

**PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS
ELÉCTRICAS.**

**DAVID RICARDO BARRERA PINTO
OMAR JAVIER PÉREZ BELTRÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
BUCARAMANGA
2009**

**PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS
ELÉCTRICAS.**

**DAVID RICARDO BARRERA PINTO
OMAR JAVIER PÉREZ BELTRÁN**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**Director
MSc. LILIANA PATRICIA JAIMES ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
BUCARAMANGA
2009**

DEDICATORIA

*A mis padres, por su inagotable apoyo.
A mis hermanos, por el cariño que siempre me han brindado.
A toda mi familia, por el respaldo con el que siempre conté.
A María Clara por ser la razón de todo mi existir.
David*

*A mis padres que con su sacrificio y con sus consejos han formado el hombre que soy.
A mi hermano por su apoyo incondicional.
A Laura Inés, mi novia, por sus consejos y su apoyo incondicional.
A mis amigos y a todos aquellos que de una u otra manera han puesto su granito de arena para alcanzar esta meta
Javier*

AGRADECIMIENTOS

A Liliana Patricia Jaimes Rojas, por su excelente dirección, asesoría y alto sentido de colaboración y compromiso durante el desarrollo de nuestro proyecto.

Y en general a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1.	INSTRUMENTOS DE MEDIDA.....	4
1.1.	Concepto de medición.	4
1.2.	Error	5
1.3.	Clasificación de los instrumentos de medida	5
1.4.	Comparación entre los instrumentos de medida analógicos y los digitales 11	
2.	TRANSFORMADORES	13
2.1.	Partes principales de un transformador	13
2.2.	MEDICIONES DE RESISTENCIA.....	15
2.2.1.	Métodos para la medición de resistencia.....	15
2.2.1.1.	Método del puente	15
2.2.1.2.	Método del volt-amperemetro	16
2.3.	PRUEBAS DE POLARIDAD Y RELACIÓN DE FASE.....	17
2.3.1.	Marcación de los terminales e identificación de los devanados	18
2.3.2.	Polaridad aditiva y sustractiva	19
2.3.3.	Pruebas de polaridad para transformadores monofásicos	21
2.3.4.	Pruebas para la determinación de la relación de fase en transformadores polifásicos.	24
2.3.5.	Prueba de secuencia de fase	25
2.4.	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.....	26
2.4.1.	Recomendaciones para la realización de la práctica.....	27
2.4.2.	Métodos para la determinación de la relación de transformación	27
2.5.	PÉRDIDAS SIN CARGA Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN	30
2.5.1.	Corriente de excitación	30
2.5.2.	Pruebas para el cálculo de las pérdidas en vacío	31
2.5.3.	Determinación de la corriente de excitación (corriente en vacío)	35
2.6.	PÉRDIDAS DEL TRANSFORMADOR CON CARGA Y TENSIÓN DE CORTO CIRCUITO	36
2.6.1.	Factores que afectan los valores de las pérdidas con carga y la Tensión de cortocircuito un transformador.	37
2.6.2.	Pruebas para la medida de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito.....	38
2.7.	PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA TRANSFORMADORES BIDEVANADOS, TRIDEVANADOS Y AUTOTRANSFORMADORES	42
2.7.1.	Autotransformadores.....	42
2.7.2.	Transformador tridevanados	43
2.7.3.	Cálculo de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito con los datos obtenidos en los ensayos.....	45
2.7.5.	Cálculo de la tensión de cortocircuito.....	46

2.8.	ENSAYOS DIELECTRICOS	47
2.8.1.	Ensayos dieléctricos para transformadores tipo seco	48
2.8.2.	Ensayos dieléctricos para transformadores embebidos en aceite	56
3.	MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA.....	87
3.1.	PRECAUCIONES PARA ANTES DE EMPEZAR.....	89
3.1.1.	Ensayos para motores y generadores de corriente continua diseñados para operar esencialmente como libres de rizado (ripple-free).....	89
3.1.2.	Ensayos para motores de corriente continua diseñados para usarse con fuentes de potencia rectificadas	90
3.1.3.	Otros procedimientos de prueba	90
3.2.	PRUEBAS	90
3.2.1.	Generalidades	90
3.2.2.	Pruebas estáticas	91
3.2.3.	Pruebas completas	91
3.2.4.	Pruebas de rutina.....	92
3.2.5.	Métodos alternativos	92
3.3.	MEDIDAS ELÉCTRICAS Y FUENTES DE POTENCIA PARA TODOS LOS PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA	92
3.3.1.1.	Selección de los instrumentos	92
3.3.2.	Medidas de tensión	95
3.3.3.	Medidas de corriente	95
3.3.4.	Medidas de potencia	96
3.3.4.1.	Entrada de potencia en el circuito de la armadura.....	96
3.3.4.2.	Entrada de potencia al devanado paralelo	97
3.3.5.	Fuentes de potencia.....	97
3.3.5.1.	Suministro de corriente directa.....	97
3.3.5.2.	Suministro de corriente alterna rectificada	97
3.4.	PRUEBAS PRELIMINARES	98
3.4.1.	Condiciones de referencia.....	98
3.4.2.	Medidas de la resistencia de los devanados.....	99
3.4.2.1.	Corrección por temperatura de la resistencia de los devanados	99
3.4.2.2.	Método para medir la resistencia	100
3.4.3.	Mediciones del entre hierro	104
3.4.4.	Recopilación de datos.....	104
3.4.5.	Polaridad y caída de impedancia en las espiras del campo.....	105
3.4.6.	Vibraciones	106
3.4.7.	Ajuste de escobillas.....	108
3.4.6.1.	Definición- buena posición de la escobilla.....	108
3.4.6.2.	Método de rotación inversa.....	108
3.4.6.3.	Mover la armadura un pequeño ángulo	109
3.4.6.4.	Armadura estacionaria.....	110
3.4.7.	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	111
3.4.8.	PRUEBAS DE ALTO POTENCIAL	112
3.5.	DETERMINACION DE DESEMPEÑO	113

3.5.1.	Saturación magnética	113
3.5.1.1.	Impulsado separadamente	114
3.5.1.2.	Auto impulsado (excepto motores series-wound)	115
3.5.2.	Conmutación.....	115
3.5.3.	Regulación. (No aplica a motores series-wound).....	116
3.5.3.1.	Regulación de Velocidad de los Motores.....	116
3.5.3.2.	Regulación de tensión en generadores	117
3.5.3.3.	Regulación de tensión combinada del generador y el primo-motor	118
3.5.4.	Eficiencia	118
3.5.4.1.	Condiciones de referencia [6]	120
3.5.4.2.	Métodos.....	120
3.5.4.3.	Medidas directas de entradas y salidas	121
3.5.5.	Descripción de las pérdidas	126
3.5.5.1.	Pérdidas en la armadura I^2R	126
3.5.5.2.	Pérdidas de los devanados conectados en serie I^2R	126
3.5.5.3.	Pérdidas en los contactos de las escobillas	126
3.5.5.4.	Pérdidas por cargas parásitas	127
3.5.5.5.	Pérdidas en el devanado paralelo I^2R	127
3.5.5.6.	Pérdidas en el reóstato	128
3.5.5.7.	Pérdidas en el excitador	128
3.5.5.8.	Pérdidas en el núcleo rotacional	128
3.5.5.9.	Pérdidas por fricción de las escobillas	128
3.5.5.10.	Pérdidas por fricción.....	129
3.5.5.11.	Pérdidas por ventilación	130
3.5.6.	Medición de las pérdidas rotacionales	131
3.5.7.	Pruebas para motores con potencias menores a un caballo de fuerza	135
3.5.8.	Pruebas para motores con potencias de más de un caballo de fuerza	136
3.5.9.	Lecturas.....	137
3.6.	PRUEBAS DE TEMPERATURA.....	137
3.6.1.	Propósito	137
3.6.2.	Instrucciones generales.....	137
3.6.2.1.	Instrumentación.....	138
3.6.3.	Métodos para medir la temperatura.....	138
3.6.3.1.	Medida de la temperatura de los devanados por resistencia.....	138
3.6.3.2.	Medición de la temperatura superficial de los componentes.....	140
3.6.3.3.	Medición de la temperatura ambiente	141
3.6.4.	Procedimiento de prueba	142
3.6.5.	Determinación de la temperatura de la armadura.....	143
3.6.5.1.	Medida de resistencia	143
3.6.5.2.	Mediciones superficiales.....	144
3.6.5.	Incrementos de temperatura.....	145
3.7.	PRUEBAS VARIAS.....	146
3.7.1.	Pruebas de ruido auditivo.....	146

3.7.2.	Prueba de interferencia electromagnética	147
3.7.3.	Forma de onda de la tensión	147
3.7.3.1.	Osciloscopio de rayo catódico o método del oscilógrafo	147
3.7.3.2.	Método de lectura del pico con un voltmetro electrónico	148
3.7.4.	Medición de la respuesta de excitador	148
3.7.5.	Medida de la inductancia de los devanados	148
3.7.5.1.	Prueba de la inductancia de la armadura para máquinas shunt y compuesta	149
3.7.5.2.	Inductancia de la armadura en máquinas serie	150
3.7.5.3.	Prueba de inductancia de campo paralelo	151
3.7.6.	Corriente de eje	152
3.7.6.1.	Causas de la corriente de eje	153
3.7.6.2.	Pruebas para la corriente de eje	154
3.7.6.	Medidas del momento de inercia	156
3.7.7.1.	Método de ensayo del retraso	156
3.7.7.2.	Prueba de oscilación angular	157
4.	MÁQUINA DE INDUCCIÓN.	160
4.1.	Generalidades	160
4.1.1.	Fuente de alimentación	160
4.1.2.	Frecuencia	161
4.1.3.	Tipos de pruebas	162
4.1.2.	Temperaturas estandarizadas	163
4.1.2.1.	Temperatura ambiente de referencia	164
4.1.2.2.	Temperatura especificada	164
4.1.3.	Precauciones	165
4.2.	MEDICIONES	165
4.2.1.	Eléctricas	165
4.2.1.	Resistencia	168
4.2.2.1.	Selección del instrumento	168
4.2.2.2.	Medida de la resistencia	169
4.2.3.	Mecánicas	169
4.2.3.1.	Potencia	169
4.2.3.2.	Velocidad y deslizamiento	169
4.2.4.	Temperatura	170
4.2.4.1.	Métodos para medir temperaturas	170
4.2.4.2.	Temperatura ambiente	173
4.2.5.	Procedimiento	173
4.3.	ENSAYOS Y DETERMINACION DE PÉRDIDAS EN LA MÁQUINAS	173
4.3.1.	Tipos de pérdidas	174
4.3.2.	Pérdidas en el estator, I^2R	174
4.3.3.	Pérdidas en el rotor, I^2R	175
4.3.4.	Resistencia de los devanados en frío	176
4.3.5.	Pruebas sin carga	177
4.3.6.	Pruebas con carga	178
4.3.7.	Pérdidas por cargas parásitas	182
4.3.7.1.	Medición indirecta	182

4.3.7.2.	Medición directa	183
4.3.8.	Pruebas de temperatura	187
4.3.8.1.	Generalidades	187
4.3.8.2.	Método de cargamento	188
4.3.8.3.	Procedimiento.....	190
4.3.8.3.	Incremento de temperatura.....	194
4.3.8.	Circuito equivalente	195
4.3.9.1.	Pruebas de impedancia	197
4.3.9.2.	Calculo de los parámetros, método 1.....	197
4.3.9.3.	Cálculo de los parámetros, método 2.....	201
4.3.9.4.	Cálculo de los parámetros, método 3.....	201
4.3.10.	Pérdidas en los contactos de las escobillas.....	205
4.3.11.	Factor de potencia.....	206
4.4.	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	207
4.4.1.	Generalidades	207
4.4.2.	Métodos de prueba.....	208
4.4.2.1.	Método A	209
4.4.2.1.	Método B	211
4.4.2.2.	Método B1.....	216
4.4.2.3.	Método C.....	218
4.4.2.4.	Método E o E1.....	223
4.4.2.5.	Método F o F1	224
4.4.2.6.	Métodos C/F, E/F, E1/F1.....	226
4.5.	OTRAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO.....	227
4.5.1.	Tensión en el rotor.....	227
4.5.2.	Pruebas de rotor bloqueado.	228
4.5.2.1.	Corriente.....	228
4.5.2.2.	Torque.	228
4.5.2.3.	Potencia.....	229
4.5.3.	Pruebas para determinar las curvas de velocidad-torque y velocidad-corriente.....	229
4.5.3.1.	Definiciones	229
4.5.3.2.	Procedimiento para obtener las curvas de velocidad-torque y velocidad-corriente	230
4.5.3.3.	Corrección de los datos obtenidos de pruebas con Tensiones reducidas.....	234
4.6.	PRUEBAS MISCELÁNEAS.....	235
4.6.1.	Resistencia de aislamiento.....	235
4.6.2.	Pruebas de alto potencial	235
4.6.2.1.	Generalidades	235
4.6.2.2.	Medidas	235
4.6.2.3.	Conexiones	236
4.6.2.4.	Tensión de prueba.....	236
4.6.2.5.	Aplicación de la tensión	236
4.6.3.	Resistencia de aislamiento en los rodamientos.....	237
4.6.3.1.	Método 1	237

4.6.3.2.	Método 2	237
4.6.4.	Ruido.....	238
4.6.5.	Balance y vibraciones.....	238
4.6.5.1.	Balance del rotor.....	238
4.6.5.2.	Vibraciones.....	238
4.6.6.	Sobrevelocidad.....	239
4.7.	PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA MOTORES DE INDUCCIÓN MONOFÁSICOS	239
4.7.1.	Pruebas generales.....	239
4.7.1.1.	Cronograma de pruebas.....	240
4.7.1.2.	Facilidades de prueba	242
4.7.1.	Medidas	243
4.7.2.1.	Medidas eléctricas	243
4.7.2.2.	Mediciones mecánicas.....	246
4.7.2.3.	Medidas de temperatura.....	249
4.7.3.	Pruebas.....	250
4.7.3.1.	Generalidades	250
4.7.4.	Tipos de pérdidas	251
4.7.4.1.	Pérdidas resistivas en el estator	251
4.7.4.2.	Pérdidas por fricción y rozamiento con el viento	252
4.7.4.3.	Pérdidas resistivas en el rotor	255
4.7.4.4.	Pérdidas en el hierro	256
4.7.4.5.	Pérdidas por cargas parásitas	256
4.7.4.6.	Pérdidas en los contactos de las escobillas.....	258
4.7.5.	Eficiencia y factor de potencia	259
4.7.5.1.	Generalidades	259
4.7.5.2.	Determinación de la eficiencia.....	259
4.7.5.3.	Factor de potencia.....	260
4.7.6.	Pruebas de desempeño	260
4.7.6.1.	Definiciones	260
4.7.6.2.	Pruebas para determinar las características de velocidad-torque y de velocidad-corriente.....	261
4.7.6.3.	Corriente de rotor bloqueado	264
4.7.6.4.	Torque de rotor bloqueado.....	264
4.7.6.5.	<i>Pull-up torque</i>	265
4.7.6.6.	<i>Switching torque</i>	265
4.7.6.7.	<i>Breakdown torque</i>	266
5.	PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	267
5.1.	Máquina síncrona.....	267
5.1.1.	Principios de funcionamiento y fundamentos teóricos.	267
5.1.3.	Funcionamiento bajo carga.....	270
5.1.4.	Ecuaciones generales y circuito equivalente	270
5.2.	PRUEBAS MIXTAS.....	275
5.2.1.	Resistencia de aislamiento.....	275
5.2.1.1.	Pruebas dieléctricas.....	275
5.2.2.	Mediciones de resistencia	278

5.2.2.1.	Corrección de las mediciones a una temperatura específica.	278
5.2.2.2.	Resistencia de referencia del devanado de campo	279
5.2.2.3.	Resistencia de referencia de campo con la máquina en funcionamiento.	279
5.2.2.4.	Efecto de caída de tensión en las escobillas	280
5.2.3.	Ensayos para cortocircuito en las espiras del campo.....	281
5.2.4.	Ensayos de polaridad para los polos de campo	284
5.2.5.	Corriente del eje y aislamiento de los rodamientos	284
5.2.6.	SECUENCIA DE FASE.....	286
5.2.6.1.	Método 2. Indicación de la diferencia de tensión	288
5.2.6.2.	Método 3. Dirección de rotación para motores	289
5.2.7.	VOLTAJE EN TERMINALES DEL ESTATOR, DESVIACION DE FORMA DE ONDA Y FACTORES DE DISTORSIÓN	289
5.2.7.1.	Procedimientos de prueba.	289
5.2.7.2.	Análisis de la forma de onda.....	291
5.2.8.	Pruebas de embalamiento	292
5.2.8.1.	Procedimiento.....	292
5.3.	CURVAS DE SATURACIÓN, SEPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y EFICIENCIA.	294
5.3.1.	Eficiencia.	294
5.3.2.	Métodos para medir las pérdidas	294
5.3.3.	Eliminación de la excitación de entrada.....	295
5.3.4.	Efectos de la temperatura y de la presión	295
5.3.5.	Máquinas acopladas	296
5.3.6.	recalentamiento en una turbina de vapor	296
5.3.7.	Arranque eléctrico.....	296
5.3.7.1.	Método de arranque separado para las curvas de saturación y pérdidas	298
5.3.7.2.	Método de la potencia eléctrica de entrada para la determinación de pérdidas y curvas de saturación	303
5.3.8.	Métodos para la medición de la potencia de entrada	306
5.3.9.	Pérdidas de circuito abierto.....	307
5.3.11.	Pérdidas parásitas y de cortocircuito.....	308
5.3.12.1.	Método de retardo para la medición de pérdidas de la máquina y curvas de saturación.....	309
5.3.13.	Eficiencia	309
5.4.	PRUEBAS DE TEMPERATURA.....	311
5.4.1.	Métodos de carga	311
5.4.1.1.	Método 1. cargamento convencional.....	312
5.5.	PRUEBAS DE TORQUE.....	313
5.5.1.	Torque y corriente de rotor bloqueado	313
5.5.1.1.	Determinación de la corriente de rotor bloqueado	314
5.5.2.	Ensayos de velocidad-torque.....	317
5.5.2.1.	Método 1. Medición de la salida.....	318
5.5.2.2.	Método 2. Aceleración	319
5.5.2.3.	Método 3. Salida	320

5.5.2.4.	Método 4. Medición directa	321
5.6.	Aplicaciones de los parámetros eléctricos de la máquina	322
5.6.1.	Generalidades.	322
5.6.2.	Cantidades en por unidad	322
5.6.2.1.	Potencia base.....	323
5.6.2.2.	Tensión y corriente base.	324
5.6.2.3.	Impedancia base.....	325
5.6.2.4.	Frecuencia base.	325
5.7.	Pruebas para determinar los valores de los parámetros en condiciones de estado estable	327
5.7.1.	objetivo	327
5.7.2.	Instrumentación.....	327
5.7.2.1.	Tipos de parámetros a determinar	328
5.7.3.	Reactancia síncrona de eje directo.....	329
5.7.4.	Reactancia síncrona de eje de cuadratura.....	330
5.7.4.1.	Procedimiento para desarrollar una prueba de deslizamiento. Método 1 para medir X_{qs}	331
5.7.4.2.	Método 2, máxima corriente de retraso.	333
5.7.4.3.	Método 3, empírico.....	334
5.7.4.4.	Método 4, ángulo de carga.....	334
5.7.5.	Cantidades de secuencia negativa (estado estable)	335
5.7.5.1.	Reactancia de secuencia negativa	335
5.7.5.2.	Determinación de la reactancia de secuencia negativa a partir de la aplicación de una corriente de secuencia negativa en los terminales de la máquina. Método 1.	335
5.7.5.3.	Determinación de la reactancia de secuencia negativa mediante la aplicación de una tensión de secuencia negativa en los terminales de la máquina. Método 2.	337
5.7.5.4.	Determinación de la reactancia de secuencia negativa mediante la aplicación de un cortocircuito entre dos terminales de la máquina. Método 3.....	338
5.7.5.5.	Determinación de la reactancia de secuencia negativa a partir de la aplicación de una tensión de línea. Método 5.	341
5.7.5.6.	Resistencia de secuencia negativa.....	342
5.7.6.	Cantidades de secuencia cero	343
5.7.6.1.	Reactancia de secuencia cero.....	343
5.7.6.2.	Valores de reactancia de secuencia cero	343
5.7.6.3.	Metodología y conexiones para determinar las cantidades de secuencia de secuencia cero en la máquina. Método 1, circuito paralelo	343
5.7.6.4.	Metodología y conexiones para determinar las cantidades de secuencia de secuencia cero en la máquina. Método 2, circuito serie	

LISTADO DE FIGURAS

Figura. 1 esquema de un galvanómetro D'Ansonval.....	7
Figura. 2 Instrumento electrodinámico.	8
Figura. 3 Voltmetro electroestático.	9
Figura. 4. Medidor de energía de inducción.....	10
Figura. 5 Esquema de conexiones para la prueba con el método del volt- amperemetro.	16
Figura. 6 polaridad aditiva.	20
Figura. 7 Polaridad sustractiva.	20
Figura. 8 Esquema de conexiones para el método de polaridad por comparación.	23
Figura. 9 Tabla de designaciones en transformadores trifásicos.	25
Figura. 10 Método de comparación.	29
Figura. 11 Método alternativo al método de comparación.....	30
Figura. 12 Diagrama de conexiones para el ensayo de vacío.	32
Figura. 13 Diagrama de conexiones para el ensayo de vacío utilizando transformadores de medida.	32
Figura. 14 Esquema de conexiones para el ensayo de vacío en un transformador trifásico.	33
Figura. 15 Esquema de conexiones para el método del amperemetro-voltmetro- wattmetro.	39
Figura. 16 Esquema de conexiones para el método del amperemetro-voltmetro- wattmetro usando transformadores de medida.	40
Figura. 17 Esquema de conexiones para el método del amperemetro-voltmetro- wattmetro para transformadores trifásicos.	41
Figura. 18 Esquema de método del puente de impedancia.	42
Figura. 19 Esquema de conexiones para la determinación de pérdidas en un autotransformador.	43
Figura. 20 Circuito equivalente de un transformador tridevanado.....	44
Figura. 21. Dos transformadores monofásicos en oposición	74
Figura. 22. Conexión de dos transformadores Y-Delta	75
Figura. 23. Conexión Delta- Delta para un transformador trifásico o tras transformadores monofásicos.....	77
Figura. 24 Esquema del estator de una maquina de corriente continua.	88
Figura. 25 Esquema del rotor de una maquina de corriente continua.	89
Figura. 26 Montaje para el ensayo de puma back	124
Figura. 27 Temperatura de la armadura contra el tiempo	144
Figura. 28 circuito utilizado para la obtención de la inductancia saturada.....	152
Figura. 29 curvas de potencia y de velocidad contra velocidad y tiempo respectivamente.....	156
Figura. 30 Esquema del método de prueba de oscilación angular.	158
Figura. 31 Esquema del método equivalente primario-sobrepuesto.....	189

Figura. 32. Circuito equivalente de una máquina de inducción.	195
Figura. 33. Curva de reactancia total por fase contra tensión de fase en vacío. ..	202
Figura. 34: Esquema de medición recomendado.....	244
Figura. 35 conexiones de prueba con tensión variable.....	251
Figura. 36 curvas características de velocidad-torque en motores de inducción monofásicos.....	261
Figura. 37 circuito equivalente de una máquina síncrona.	272
Figura. 38 Representación fasorial de una máquina síncrona con carga inductiva.	272
Figura. 39.....	273
Figura. 40 Circuito equivalente de una máquina síncrona.....	274
Figura. 41 Dispositivo indicador de secuencia de fase	287
Figura. 42 Dispositivo indicador de secuencia de fase	288
Figura. 43 Indicador por diferencia de tensión.....	289
Figura. 44	290
Figura. 45.....	306
Figura. 46.....	309
Figura. 47 Gráfica de tensión contra corriente de excitación.	326
Figura. 48 Gráfica de tensión contra corriente de excitación con escala no recíproca.....	327
Figura. 49 conexiones necesarias	332
Figura. 50. Esquema de conexiones para el método 3.....	339
Figura. 51 Esquema de conexiones del método del circuito paralelo.....	344
Figura. 52. Esquema de conexiones del método del circuito serie.	346
Figura. 53. Esquema de conexiones del método del cortocircuito continuo.....	347
Figura. 54. diagrama fasorial de una máquina síncrona.	352

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: clases de los instrumentos de medida.....	6
Tabla 1 Métodos de prueba para transformadores [1].	15
Tabla 2. Mediciones a realizar en la determinación del factor de potencia de aislamiento .	55
Tabla 3. Valores de tensión y duración durante los ensayos dieléctricos.....	58
Tabla 4 Valores de resistencia de puesta a tierra	61
Tabla 5 valores típicos del factor empírico de enfriamiento F	72
Tabla 6 Métodos de prueba para transformadores de tipo seco.	73
Tabla 7. Categorías de transformadores para potencia mayor de 1 kVA.....	78
Tabla 7 Valores de compresión mínima de los resortes para diferentes velocidades.	107
Tabla 8 Métodos de prueba.	120
Tabla 9 lecturas tomadas durante pruebas de eficiencia. * Lectura opcional, X lectura obligatoria.	122
Tabla 10 valores de la constante k para diferentes sistemas de unidades.....	122
Tabla 11 Tipos de pérdidas en una máquina de corriente continua.	125
Tabla 12 caída de tensión en los diferentes tipos de escobilla.....	126
Tabla 13 Valores de la constante k para diferentes tipos de escobillas y sistemas de unidades utilizados.	129
Tabla 14 valores de la constante k usada en la ecuación (3-10) para los diferentes sistemas de unidades.	131
Tabla 15 constante c para diferentes unidades de medida del momento de inercia.	135
Tabla 16 tiempos máximos para obtener las lecturas de resistencia.	143
Tabla 17 valores de la constante c para las diferentes unidades del momento de inercia.	157
Tabla 18 valores de la constante c para las diferentes unidades usadas.....	159
Tabla 19. Temperaturas especificadas para el cálculo de la eficiencia en máquinas en donde la temperatura a plena carga no ha sido medida.	165
Tabla 20 Valores asumidos para las pérdidas pro cargas parásitas.	187
Tabla 21 tiempos para tomar la primera lectura de resistencia.	194
Tabla 22: Pruebas aplicables a los motores de inducción monofásicos.	240
Tabla 23: temperatura especificada para correcciones de resistencia.....	252
Tabla 24. Parámetros a determinar.	328

LISTADO DE ANEXOS.

ANEXO 1. Recomendaciones de seguridad para el laboratorio de máquinas eléctricas.

ANEXO 2. Guías para el laboratorio de máquinas eléctricas.

TÍTULO: PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS*

AUTORES: BARRERA PINTO, David Ricardo.
PÉREZ BELTRÁN, Omar Javier.**

PALABRAS CLAVES: Máquinas eléctricas, laboratorio, seguridad, IEEE, procedimientos de prueba.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

Debido a los cambios en los planes de estudio de las carreras de ingeniería eléctrica y de ingeniería electrónica, los estudiantes no cuentan con guías que describan los procedimientos a realizar en el laboratorio de máquinas eléctricas. Esta situación hace que el tiempo y los recursos destinados para el desarrollo de las prácticas no sean aprovechados de manera óptima.

Teniendo en cuenta esta problemática, en este trabajo de grado se presenta un análisis de los procedimientos de prueba recomendados por la IEEE para la realización de pruebas a cada uno de los diferentes tipos de máquinas eléctricas y se hace especial énfasis en aquellos que se pueden realizar en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander, considerando los equipos con que se cuenta en las instalaciones del mismo. A partir de este análisis se propone un conjunto de guías de laboratorio, en ellas se dan recomendaciones para la preparación previa, el desarrollo de la práctica y posteriores análisis de los procedimientos realizados.

Al final del documento se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones de seguridad aplicables al desarrollo de prácticas en las instalaciones del laboratorio de máquinas eléctricas. Se espera que este trabajo sirva como herramienta para el aprendizaje de los conceptos fundamentales de las máquinas eléctricas.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director M.Sc. Liliana Patricia Jaimes Rojas

TITLE: PROCEDURES OF TEST FOR THE LABORATORY OF ELECTRICAL MACHINES *

AUTHORS: BARRERA PINTO, David Ricardo.
PÉREZ BELTRÁN, Omar Javier.**

KEY WORDS: Electrical machines, laboratory, security, IEEE, procedures of test.

ABSTRACT

Due to the changes in the curriculum of the electrical engineering and electronic engineering, the students do not have guides who describe the procedures to realize in the laboratory of electrical machines. This situation does that the time and the resources destined for the development of the practices are not used of optimal way.

Considering this problematic one, this document contains an analysis of the procedures of test recommended by the IEEE for the accomplishment of tests to each one of the different types of electrical machines and special emphasis becomes in which they are possible to be realized in the laboratory of electrical machines of the Industrial University of Santander, considering the equipment whereupon it is counted in the facilities of the laboratory of electrical machines. From this analysis we made a set of laboratory guide, in them we offered recommendations for the previous preparation, the development of the practice and later analyzes of the realized procedures.

At the end of the document are the conclusions and we offer some recommendations of security applicable to the development of practices in the facilities of the laboratory of electrical machines. It is expected that this work serves like a tool for the learning of the fundamental concepts of the electrical machines.

* Degree Project

** Faculty of Physicomechanical engineerings. School of Engineerings Electrical, Electronic and of Telecommunications.. Liliana Patricia Jaimes Rojas (Electrical Engineer, M.Sc)

INTRODUCCIÓN

Debido al fortalecimiento de los procesos de globalización en las economías, se ha exigido mayor eficiencia de los esquemas productivos, incluyendo dentro de tales sistemas un conjunto de medidas para suministrar energía de manera confiable y eficiente. Es así como prevalece el papel de los sistemas de potencia, en razón de la eficacia que ellos pueden proporcionar, al priorizar su función en términos de la calidad y confiabilidad que se espera de ellos ante diferentes situaciones de carga.

Como resultado de los requerimientos de uso eficiente de la energía, y debido a la actual crisis energética, sistemas de generación alternativos han entrado en vigencia a partir del uso de fuentes de energía renovables. El efecto de tales sistemas, reduce el impacto ambiental e implica cambios culturales y nuevas valoraciones de esquemas de mantenimiento con el objeto de sostener y mejorar los sistemas de calidad previamente definidos.

Haciendo un balance de energía, podríamos afirmar que los sistemas utilizados en la actualidad, independientemente de si hacen uso eficiente de energía o no, difieren de los parámetros de eficiencia ideales, debido al porcentaje de pérdidas generados en los diferentes componentes del sistema de potencia, quienes a su vez exigen niveles elevados de generación para el sostenimiento de los requisitos de carga.

Una alternativa para obtener parámetros de eficiencia ideales consiste en implementar esquemas de mantenimiento preventivo y correctivo que garanticen que cada componente del sistema esta funcionando de manera adecuada. Para elaborar estos esquemas es necesario realizar una caracterización de cada componente o máquina del sistema; esto se hace mediante procedimientos de prueba los cuales deben realizarse de acuerdo a las sugerencias establecidas por

los entes de normalización respectivos. Una vez efectuadas las pruebas se pueden elaborar los esquemas de mantenimiento requeridos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el mundo laboral necesita profesionales capaces de elaborar y de ejecutar estos patrones de mantenimiento siguiendo las normas respectivas. Esta destreza debe ser adquirida en la universidad, donde cobra gran importancia los desarrollos que se puedan generar en los laboratorios de las asignaturas.

Es así como los trabajos de laboratorio deben ser realizados siguiendo métodos aplicables al contexto industrial, en donde las decisiones que el ingeniero toma, basado en el balance de sus conocimientos teórico-prácticos y las restricciones de seguridad, son relevantes para los diferentes procesos que asuma.

La adecuación y modernización del laboratorio de máquinas eléctricas en el año 2006 brindó la oportunidad de realizar nuevas prácticas. Los nuevos equipos con los que cuenta el laboratorio están diseñados para que su utilización proporcione a los estudiantes una manera de entender y relacionar la parte teórica con la parte práctica, estos dos aspectos sin lugar a duda son de vital importancia para los estudiantes de ingenierías eléctrica y electrónica.

No obstante, debido a los cambios en los planes de estudio en la escuela y particularmente las modificaciones en la asignatura Máquinas Eléctricas, han causado problemas de realización aleatoria y no direccionada de las prácticas, evitando que el tiempo y los recursos destinados para ello se usen de manera no eficiente.

En la actualidad el laboratorio carece de guías que de una manera concisa y sistemática muestren los procedimientos que se deben realizar. Por esta razón nace la necesidad de incorporar a las materias Máquinas Eléctricas I y II, guías de laboratorio que permitan al estudiante tener una mejor visión de los temas

estudiados en clase, y que proporcionen los enfoques adecuados para futuras aplicaciones en la industria.

Cabe la pena mencionar que en la actualidad las pruebas realizadas en el laboratorio no siguen ningún tipo de estándar de calidad, y que de hecho no se tienen en cuenta protocolos de prueba en las experiencias prácticas. Esto trae entre otras consecuencias el desconocimiento para el futuro ingeniero del marco real que se debe seguir en el momento de establecer, por ejemplo, esquemas de mantenimiento y dictamina posibles problemas potenciales de seguridad que podrían poner en riesgo la vida para quienes realizan la práctica y para los equipos como tal.

1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

El análisis de cualquier sistema eléctrico, como por ejemplo las máquinas eléctricas requiere de la medida y el control de algunos parámetros eléctricos. Este tipo de mediciones se realiza con los instrumentos de medida, pero para que estas sean adecuadas se debe conocer la forma de conexión y además la interpretación de los símbolos impresos en el instrumento. A continuación se hará una breve descripción de los equipos de medida utilizados en estos análisis.

1.1. Concepto de medición.

La medición de alguna cantidad física se puede definir de la siguiente manera:

Medir una cantidad de una magnitud es compararla con otra de la misma magnitud que previamente fue adoptada como patrón de medida.

Para comprender mejor la anterior definición conviene revisar los conceptos de cantidad y magnitud.

Cantidad: el concepto de cantidad se puede expresar como el número que permite realizar una comparación cuantitativa de la magnitud que se utiliza como unidad.

Magnitud: se define como la propiedad de un cuerpo o de un evento de ser medido.

Sin embargo medir no siempre es una tarea fácil, es necesario realizar una definición y una ejecución adecuada de tres pasos:

- que es lo que se va a medir.
- Como se va a medir.

- Con que elementos se va a medir.

El último punto necesita de un análisis posterior referente a la calidad de la medición. La calidad de la medición esta relacionada con el tipo de instrumento utilizado, con la habilidad de la persona que toma la medida.

1.2. Error

El error de medición es el resultado de un mensurando menos un valor verdadero del mensurando¹. Este error puede ser de dos tipos:

- Error aleatorio: es el resultado de una medición menos la media que resultaría de un número infinito de mediciones del mismo mensurando realizadas bajo las mismas condiciones de repetibilidad².
- Error sistemático: media que resultaría de un numero infinito de mediciones del mismo mensurando realizadas bajo condiciones de repetibilidad menos un valor verdadero del mensurando.

1.3. Clasificación de los instrumentos de medida

Clase.	Principio de operación.	Subclase.	Campo de aplicación.
Electromagnético.	Interacción entre corrientes y campos magnéticos	Imán móvil.	CC
		Bobina móvil.	CC
		Hierro móvil	CC/AC
Electrodinámico.	Interacción entre corrientes.		CC/AC

¹ Mensurando: magnitud particular sujeta a medición.

² Repetibilidad: proximidad entre los resultados de las mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición.

Electroestático.	Interacción electroestática.		CC/AC
Inducción.	Inducción magnética		AC.
Térmico.	Efecto térmico de la corriente	Acción directa	CC/AC
		Acción indirecta	CC/AC
Electrónico.	Procesamiento de señales	Analógico	CC/AC
		Digital.	CC/AC

Tabla 1: clases de los instrumentos de medida.

A continuación se hará una breve descripción de las clases de instrumentos de medida mencionados en la tabla 1.

- Electromagnético.

Los instrumentos de medición de esta clase se basan en el galvanómetro D'Ansorval. Este principio se debe a que posee una gran sensibilidad y exactitud, características debidas al movimiento provocado por una corriente que circula por un conductor ubicado dentro de un campo magnético, lo cual da como resultado un movimiento del conductor fuera del campo y permite medir la corriente indirectamente en una escala calibrada. Las corrientes que se pueden detectar son menores a $1\mu A$.

En la figuras 1 se muestra un esquema del galvanómetro D'Ansorval.

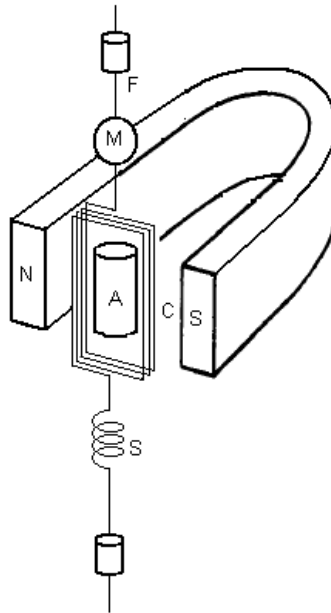


Figura. 1 esquema de un galvanómetro D'Arsonval.

Algunas de las características principales del galvanómetro D'Arsonval son las siguientes³.

- Bajo consumo de potencia.
- Corrientes a plena escala pequeñas.
- Inmunidad a los efectos de los campos magnéticos parásitos.
- Escala lineal.
- Constante de tiempo pequeña, por lo tanto tiene una respuesta rápida a los cambios de la corriente.
- Bajo costo.

- Electrodinámico.

Este tipo de instrumentos consta de dos bobinas, una fija y otra móvil, por las cuales circulan corrientes proporcionales a las cantidades a medir. Con los elementos apropiados, como resistencias etc., estos instrumentos se pueden

³ Tomado de la presentación mediciones eléctricas X del profesor Gabriel Ordóñez.

configurar para medir valores eficaces de las Tensiones, las corrientes y la potencia promedio de un sistema.

Un esquema de un instrumento de este tipo se presenta en la figura 2.

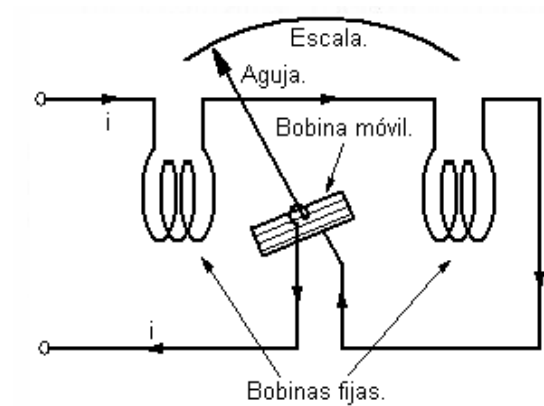


Figura. 2 Instrumento electrodinámico.

- Electroestático.

Estos instrumentos están formados de electrodos fijos y móviles, aislados entre si, de tal manera que forman un condensador. La figura 3 es un esquema de un voltmetro electroestático.

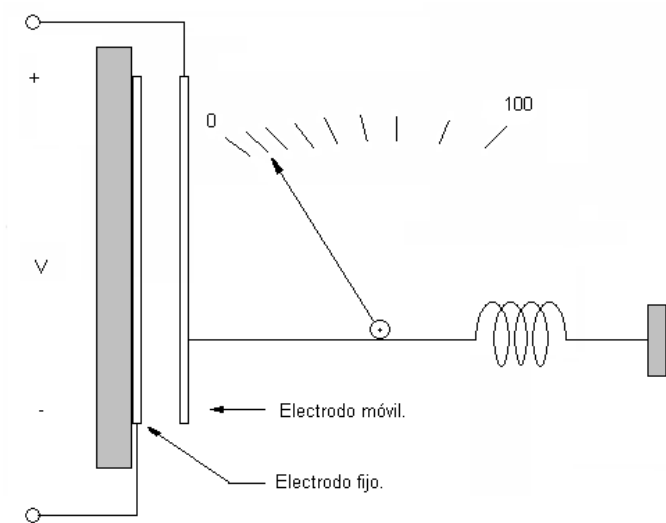


Figura. 3 Voltmetro electrostático.⁴

- Inducción.

Su funcionamiento esta basado en la inducción de pares electromagnéticos ocasionados por la interacción entre los campos generados por las señales de tensión y de corriente en un disco metálico. En la figura 4 se muestra un esquema de un medidor de inducción.

⁴ Tomado de la presentación mediciones eléctricas X del profesor Gabriel Ordóñez

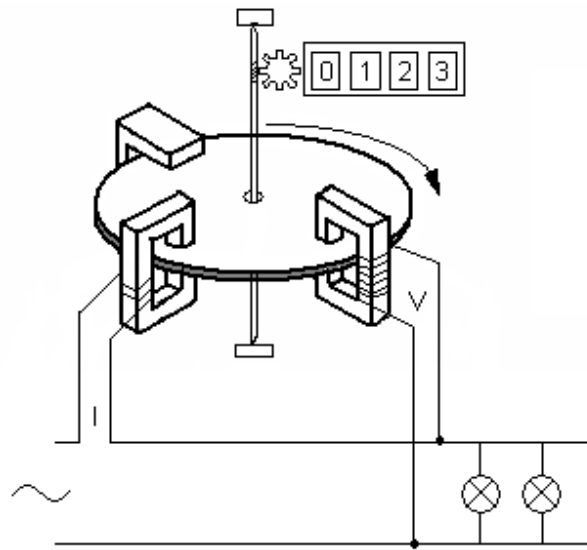


Figura. 4. Medidor de energía de inducción.⁵

- Térmico.

Estos instrumentos operan midiendo el incremento de temperatura de un elemento con resistencia R , ocasionado por la circulación de una corriente eléctrica a través de él (del elemento).

- Electrónicos.

Los medidores electrónicos presentan las siguientes características:

- Son más económicos que los electromecánicos.
- Tienen menos incertidumbre⁶ en las mediciones.
- Poseen una alta impedancia de entrada.
- Bajo consumo de potencia.
- Pueden ser analógicos o digitales.

⁵ Tomado de la presentación mediciones eléctricas X del profesor Gabriel Ordóñez

⁶ Incertidumbre de medición: parámetro asociado al resultado de una medición, el cual caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser atribuidos al mensurando.

Según la utilización de los instrumentos en ingeniería, estos se pueden clasificar en instrumentos analógicos e instrumentos digitales.

Los analógicos involucran un proceso analógico, es decir, ante una señal de entrada cuya variación sea continua, entrega a la salida una señal continua, la cual puede tomar cualquier valor entre los límites especificados.

Un instrumento digital por su parte, ante una señal de entrada cuya variación sea continua, proporciona a la salida un número discreto de valores.

1.4. Comparación entre los instrumentos de medida analógicos y los digitales

Para empezar es conveniente dar ciertas acotaciones. La instrumentación analógica posee dos características que limitan su aplicación frente a la instrumentación digital:

- tienen, por lo general, un consumo propio significativo, y/o una baja sensibilidad
- una mayor exactitud (o mayor sensibilidad) implica un instrumento más delicado.

La aplicación de las técnicas digitales permite eliminar en forma completa las partes electromecánicas sensibles al desgaste y vibraciones. En general los instrumentos digitales poseen características de entrada superiores a los analógicos, por ejemplo, impedancia de entrada muy elevada en los circuitos de tensión, un consumo de energía mucho menor y una mayor exactitud; pueden

incorporar selección automática de escala, e indicación de polaridad, lo que salvaguarda al instrumento y mejora la fiabilidad de la medida.

2. TRANSFORMADORES

2.1. Partes principales de un transformador

Un transformador básicamente consiste en dos circuitos eléctricos acoplados magnéticamente mediante un circuito magnético. Las partes constitutivas de un transformador son:

Núcleo: el núcleo de un transformador está constituido de un material ferromagnético que se encarga de transportar el flujo magnético que se induce en él. Básicamente el núcleo es un circuito magnético que acopla dos o más (dependiendo del número de devanados) circuitos eléctricos. Las principales características del núcleo son:

- Permeabilidad
- Saturación
- Resistividad eléctrica
- Pérdidas por histéresis

Cabe mencionar que la permeabilidad y la saturación limitan la capacidad del núcleo para el transporte de potencia y que además una alta resistividad del mismo es deseable para limitar las corrientes parásitas.

Devanados: un devanado está constituido por un número determinado de espiras conductoras aisladas entre si y que están enrolladas en el núcleo del transformador. La función principal de este elemento, es crear el campo magnético que originará el flujo dentro del núcleo.

Refrigeración: las pérdidas de energía en un transformador se convierten en calor, este factor afecta en gran medida los aislamientos del transformador. Generalmente la refrigeración se puede hacer con aire, aceite y otra clase de compuestos químicos.

El funcionamiento de un transformador se basa en la ley de Faraday. Una bobina que porta una corriente variable en el tiempo generará un flujo magnético también variable en el tiempo, el cual inducirá una tensión en dicha bobina.⁷

El transformador es una máquina que debe ser continuamente puesta a prueba para conocer como es su estado actual de trabajo. Los resultados de las pruebas ofrecen la información necesaria para conocer el funcionamiento del transformador y así poder tomar decisiones en cuanto a mantenimiento o reparación del mismo. En la siguiente tabla se especifican las pruebas que se deben realizar a un transformador.

PRUEBAS	CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS					
	≤500 kVA.			≥501 kVA		
	Rutina	Diseño	Otros	Rutina	Diseño	otros
Medidas de resistencia		X		X		
Polaridad y relación de fase	X			X		
Relación de transformación	X			X		
Pérdidas sin carga y corriente de excitación	X			X		
Tensión de corto circuito y pérdidas con carga		X	X	X		

⁷ Para conocer más acerca del funcionamiento de los transformadores, se recomienda revisar la literatura existente acerca de las máquinas eléctricas.

Elevación de temperatura		X			X	X
Ensayos dieléctricos						
• Voltaje aplicado	X			X		
• Voltaje inducido	X			X		
• Impulso		X	X		X	X
• Factor de potencia de aislamiento			X			X
• Resistencia de aislamiento			X			X
		X	X	X		X

Tabla 2 Métodos de prueba para transformadores [1].

Los métodos de prueba que se registran en la tabla anterior son explicados a continuación

2.2. MEDICIONES DE RESISTENCIA

La medida de la resistencia es de gran importancia para el cálculo de las pérdidas i^2R en los conductores. Es un parámetro importante para la detección de posibles daños en el transformador y para la determinación de la eficiencia de este tipo de máquinas.

2.2.1. Métodos para la medición de resistencia

2.2.1.1. Método del puente

Este es un método generalmente usado por su exactitud y conveniencia, ya que puede ser empleado para la medida de resistencias de hasta $10000\ \Omega$. El método del puente debe utilizarse en casos en donde la corriente nominal del devanado del transformador al cual se esta realizando la medición es menor que 1 A. [1]

2.2.1.2. Método del volt-amperemetro

El método del volt-amperemetro es algunas veces más conveniente que el método del puente, es empleado cuando la corriente nominal del devanado del transformador es mayor que 1A. La medición se realiza aplicando corriente directa, y se deben tomar lecturas simultáneas de tensión y corriente. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 5.

El valor de la resistencia que se quiere calcular se determina a partir de la ley de Ohm considerando los valores de tensión y corriente que se obtuvieron durante la prueba. Es recomendable utilizar una batería o filtro rectificador para que no se presenten vibraciones en la aguja del voltmetro.

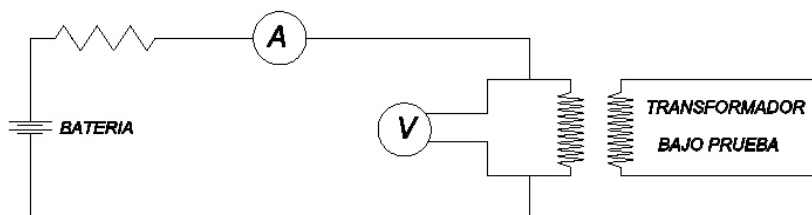


Figura. 5 Esquema de conexiones para la prueba con el método del volt-amperemetro.

Para minimizar los errores en la medición, se debe tener en cuenta que:

- Si se utilizan elementos analógicos, estos deben tener un amplio rango para la deflexión de la aguja.

- La polaridad del núcleo del transformador se debe mantener constante durante todas las mediciones realizadas en la prueba

Las terminales del voltmetro y el amperometro serán conectadas tan cerca como sea posible de los bornes del devanado al cual se le esta efectuando la medición, esto con el fin de no incluir los valores de resistencia de las puntas de prueba de los medidores [1].

Para proteger el voltmetro de lesiones por deflexiones fuera de su escala, este se debe desconectar del circuito antes de que se interrumpa el paso de la corriente. El personal debe ser protegido del golpe inductivo, para esto la corriente debe ser desconectada por un interruptor que tenga un adecuado aislamiento.

Las lecturas deben ser tomadas después de que la corriente y la tensión han alcanzado el estado estable.

Se deben tomar por lo menos cuatro mediciones diferentes de tensión y corriente. El promedio de los valores de resistencia calculados a partir de estas medidas será considerado como la resistencia del circuirlo.

Los valores de corriente usados durante la prueba no deben exceder el 15% de la corriente nominal del devanado en el cual se esta realizando la prueba. Valores mas grandes pueden causar inexactitud debido al calentamiento del devanado.

2.3. PRUEBAS DE POLARIDAD Y RELACIÓN DE FASE

La polaridad de un transformador es un parámetro relevante para la correcta conexión de este tipo de máquinas. Las pruebas de relación de fase se realizan para determinar el desplazamiento angular y secuencias relativas de fase.

2.3.1. Marcación de los terminales e identificación de los devanados

Para distinguir los devanados de alta y baja tensión en transformadores se utilizan las siguientes convenciones:

- Transformadores bidevanados: al lado de alta tensión se le asigna la letra H, mientras que para el devanado de baja tensión se usa la letra X.
- Transformadores con más de dos devanados: para este tipo de máquinas, a cada devanado se le asigna una letra diferente dependiendo del número de bobinas, H, X, Y o Z [3].

2.3.1.1. Secuencia de designación

- **Transformadores monofásicos**

El devanado de mayor tensión será designado con la letra H, excepto para transformadores diseñados para una transformación trifásica a hexafásica. Los otros devanados, serán designados en el orden en que decrece el nivel de tensión, como X, Y y Z. Si dos o más devanados tienen el mismo nivel de tensión pero diferente valor nominal de kVA, el que tenga mayor capacidad de potencia aparente será el que tome la siguiente letra. Si dos o más devanados tienen el mismo nivel de tensión y la misma capacidad de potencia aparente nominal, entonces la asignación se realizará arbitrariamente.

- **Transformadores trifásicos**

La marcación de los devanados será realizada de tal forma que si los terminales en el devanado de mayor tensión se designan de la forma H_1, H_2, H_3 , entonces

los otros dos devanados deben tener la misma secuencia, por ejemplo X_1, X_2, X_3 y Y_1, Y_2, Y_3 .

2.3.1.2. Designación externa de los devanados

Los terminales externos deben ser distinguidos unos de otros, esto se hace marcando cada borne del transformador con una letra seguida de un subíndice numérico. Las terminales del devanado H serán marcadas como H_1, H_2, H_3 , etc. Las terminales del devanado X serán marcadas como X_1, X_2, X_3 , etc.

Cuando dos terminales externas estén conectadas al mismo final de un devanado, estos podrían ser identificados con la misma letra, seguida por el número del terminal y con una letra adicional que diferencie el transformador al que pertenece el borne, por ejemplo, H1A y H1B, H2A y H2B

La identificación de los terminales del transformador se debe plasmar mediante un rótulo en la placa de características del transformador, mostrando la localización específica de los terminales. Este procedimiento también se puede realizar con una identificación en los bornes de cada devanado.

2.3.1.3. Designación del neutro

El terminal neutro de un transformador trifásico será marcado con la letra adecuada seguida del subíndice 0, por ejemplo, X_0, H_0 , etc. Un terminal neutro común a dos o más devanados de un transformador trifásico o monofásico será marcado con la combinación adecuada de las letras seguidas por el subíndice 0, por ejemplo H_0X_0

2.3.2. Polaridad aditiva y sustractiva

2.3.2.1. Polaridad aditiva

Para determinada conexión de la fuente de potencia la disposición de las bobinas del transformador es tal que el flujo producido por la bobina del primario se suma al producido por el devanado secundario. En la Figura 6 se muestra la conexión de un transformador con polaridad aditiva

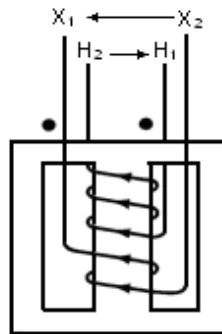


Figura. 6 polaridad aditiva.

2.3.2.2. Polaridad sustractiva:

La polaridad sustractiva indica que los flujos producidos en las bobinas del primario y secundario se están oponiendo entre si, ocasionando una disminución del flujo principal, la figura 7 muestra tal disposición

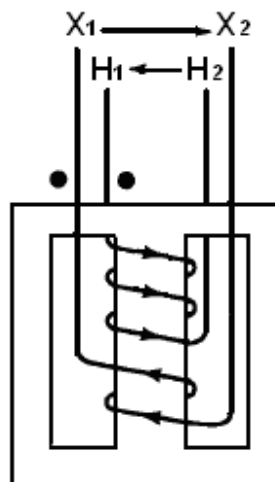


Figura. 7 Polaridad sustractiva.

2.3.3. Pruebas de polaridad para transformadores monofásicos

La determinación de la polaridad de un transformador se puede realizar de acuerdo con alguno de los siguientes métodos:

- Golpe inductivo
- Tensión alterna
- Comparación

2.3.3.1. Prueba de polaridad por el método del golpe inductivo

La polaridad de los transformadores puede realizarse simultáneamente con la prueba para la determinación de la resistencia de los devanados de la siguiente manera:

Con corriente directa circulando a través del lado de alta tensión, se conecta un voltmetro con la escala adecuada en las terminales de dicho devanado, con el fin de obtener una pequeña deflexión en la aguja del medidor

- a) Se transfiere las puntas del voltmetro a las terminales del lado de baja tensión.
- b) Se suspende la excitación, esta manera se induce tensión que causa una deflexión en el medidor.
- c) Si la aguja del medidor deflece en dirección opuesta, entonces la polaridad es substractiva.
- d) Si la aguja del medidor deflece en la misma dirección, entonces la polaridad es aditiva.

2.3.3.2. Prueba de polaridad mediante voltaje alterno

Para transformadores con relación de transformación 30 a 1 o menor, Un terminal del lado de alta tensión el cual se denominara H1 se conecta con el terminal adyacente del lado de baja tensión, como se muestra en la figura

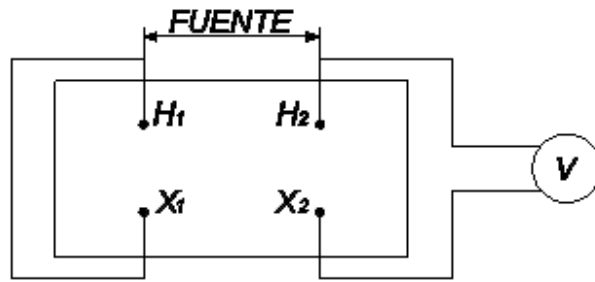


Figura 3

Un valor adecuado de tensión se aplica en el devanado de alta, se toman mediciones de tensión entre los terminales que no se cortocircuitaron, entonces si la tensión medida es mayor que la aplicada, se dice que la polaridad es aditiva, de lo contrario, si la tensión que indica el medidor es menor que la aplicada entonces la polaridad es sustractiva.

2.3.3.3. Polaridad por comparación

Cuando se cuenta con un transformador con polaridad y relación de transformación conocidas e iguales a las de la máquina bajo prueba, se puede realizar el siguiente procedimiento:

- a) Se conectan los devanados de alta tensión en paralelo, teniendo en cuenta que deben tener la misma polaridad.

- b) Se conecta los terminales de baja tensión que tengan la misma polaridad, por ejemplo los terminales X_1 y dejando libres los terminales X_2 de cada transformador (ver figura 8)
- c) Con estas conexiones se aplica en los devanados de alta un valor reducido de tensión y se mide la tensión entre los dos terminales que quedaron libres, un valor cero o cercano a él indica que las polaridades de los dos transformadores son iguales

El voltmetro se puede sustituir por fusibles o lámparas adecuadas, este procedimiento se recomienda como medida de precaución antes de conectar del medidor.

El esquema de conexión se muestra en la figura 8.

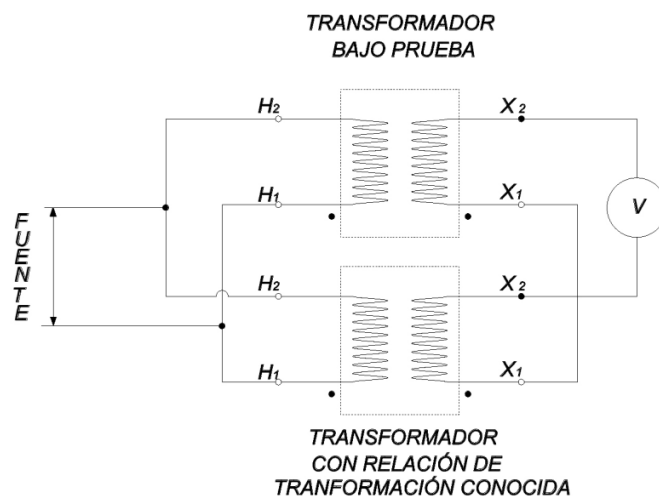


Figura. 8 Esquema de conexiones para el método de polaridad por comparación.

Si los transformadores bajo prueba son polifásicos y los ensayos se realizan de acuerdo con los métodos descritos en esta sección, entonces cada fase de la máquina tendrá la misma polaridad relativa.

2.3.4. Pruebas para la determinación de la relación de fase en transformadores polifásicos.

El diagrama fasorial de un transformador trifásico¹ define tanto el desplazamiento angular como la secuencia del mismo, estas dos características pueden ser verificadas conectando juntas las terminales H1 y X1 para excitar el transformador a un valor bajo de tensión trifásica, posteriormente se toman medidas entre pares de bornes y se realiza el diagrama fasorial. Otra forma de hacerlo es comparando las magnitudes de las mediciones tomadas con los diagramas fasoriales que se muestran en la figura 9.

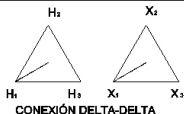
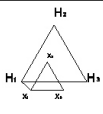
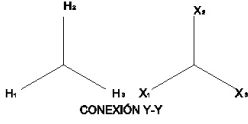
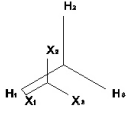
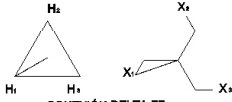
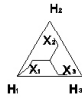
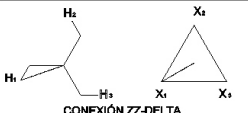
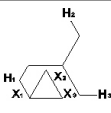
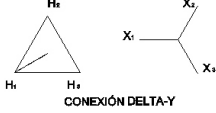
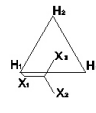
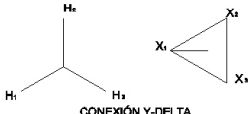
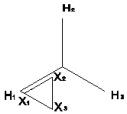
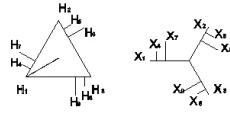
	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA FÁSorial DE CONEXIONES	MEDICIONES DE PRUEBA
GRUPO 1 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 0 GRADOS	 CONEXIÓN DELTA-DELTA		CONECTAR H1 CON X1 MEDIR: H2-X2, H3-H2, H1-H2, H2-X3, H3-X3 RELACIONES DE VOLTAJE 1) H2-X3=H3-X2 2) H2-X2<H1-H2 3) H2-X2<H2-X3 4) H2-X2=H3-X3
	 CONEXIÓN Y-Y		
	 CONEXIÓN DELTA-ZZ		
	 CONEXIÓN ZZ-DELTA		
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30 GRADOS	 CONEXIÓN DELTA-Y		CONECTAR H1 CON X1 MEDIR: H3-X2, H3-H3, H1-H3, H2-X2, H2-X3 RELACIONES DE VOLTAJE 1) H3-X2=H3-X3 2) H3-X2<H1-H3 3) H2-X2<H2-X3 4) H2-X2=H3-H3
	 CONEXIÓN Y-DELTA		
	TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON TAPS 		

Figura. 9 Tabla de designaciones en transformadores trifásicos.

2.3.5. Prueba de secuencia de fase

Para esta prueba se debe contar con un indicador de secuencia de fase, como un motor de inducción trifásico o un circuito de fase partida

El indicador se debe conectar a las terminales de alta tensión del transformador, el cual se excita con una tensión trifásica de valor adecuado para el elemento indicador de la secuencia de fase. En el momento en el que se energice el circuito, se debe registrar el sentido de giro que muestre el indicador de secuencia.

El indicador de secuencia de fase ahora se conecta a los bornes de baja tensión del transformador, de la siguiente manera:

Se debe conectar en X1 la terminal del indicador que estaba en H1, en X2 la que estaba en H2, y de la misma manera, en X3 se conecta la terminal del indicador que estaba en H3.

Sin modificar las conexiones anteriores, el transformador se excita a un nivel de tensión adecuado, y se registra la información mostrada por el indicador. Si el sentido de giro es el mismo en ambos casos, la secuencia de fase del transformador es correcta.

Los transformadores con secundarios hexafásicos que no tienen neutro, se deben conectar temporalmente en delta o en Y. Si se tiene una conexión hexafásica, los bornes del indicador serán transferidos de H1 a X1, de H2 a X3 y de H3 a X5, respectivamente, la dirección mostrada por el medidor será registrada durante la prueba. El ensayo tendrá entonces que ser repetido transfiriendo de H1 a X2, de H2 a X4 y de H3 a X6, respectivamente, y también se registrará la indicación del medidor.

Los resultados de la prueba se analizan de igual manera que en el caso anterior.

2.4. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La relación de transformación de un transformador está dada por el número de vueltas del devanado de alta respecto al de baja tensión [2]

Para transformadores con taps, la relación de transformación debe ser determinada para cada taps así como para todo el devanado

2.4.1. Recomendaciones para la realización de la práctica

- La prueba se realiza con tensión nominal o un valor menor. La frecuencia del ensayo debe ser la nominal o un valor más alto.

- Transformadores trifásicos

En el momento de realizar la prueba a un transformador trifásico en el que cada fase es independiente y accesible, es preferible usar una fuente de potencia monofásica; no obstante, cuando sea conveniente se puede usar una fuente trifásica de tensión.

- Transformadores con el neutro inaccesible

Un procedimiento de prueba alternativo, usa una fuente de tensión monofásica. Las pérdidas de exactitud con este ensayo son despreciables. Cuando solo un devanado tiene un neutro inaccesible, la conexión al neutro se puede hacer a través de un devanado en otra columna del transformador.

2.4.2. Métodos para la determinación de la relación de transformación

Según el artículo 9 de IEEE Std C57.12.01-1998, establece que al aplicar tensión nominal en un devanado del transformador, todas las otras Tensiones en vacío no deben exceder en 0.5% los valores especificados en la placa del transformador

2.4.2.1. Método del voltmetro

Para esta prueba se usan dos voltmetros, uno de ellos mide la tensión en el devanado de alta del transformador. El otro voltmetro se usara para medir la tensión del devanado de baja.

Durante la medición los dos voltmetros deben tomar las mediciones simultáneamente.

Se debe realizar una segunda prueba en la que los voltmetros se intercambian, es decir, el que se uso para medir la tensión en el devanado de alta medirá ahora la tensión en el lado de baja, y el que se uso en el lado de baja medirá ahora la tensión en el devanado de alta, esto con el fin de compensar el error debido a los instrumentos.

Las medidas realizadas por los medidores deben ser las mismas después del intercambio, de no ser así se deben aplicar las correcciones adecuadas a dichas lecturas.

El valor de la relación de transformación será el valor promedio de las dos mediciones.

La prueba se debe realizar tomando no menos de 4 de cuatro valores de tensión, los cuales deben aumentar en 10% del valor anterior. Los resultados no deben diferir en mas del 1% de cada valor, si esto no se cumple el ensayo deberá repetirse con otros voltmetros.

Cuando se debe probar varios transformadores con los mismos valores nominales, se puede aplicar el método anterior a uno de ellos y después comparar con este las unidades restantes de acuerdo con el siguiente ensayo.

2.4.2.2. Método de comparación

Este es un método adecuado si se dispone de un transformador con relación de transformación conocida y se quiere averiguar esta característica en otra máquina.

El transformador bajo prueba se excita en paralelo con la máquina que tiene la misma relación de transformación. Los devanados secundarios de ambos transformadores se conectan en paralelo, el voltmetro se conecta entre las dos terminales de igual polaridad como se muestra en la figura 10.

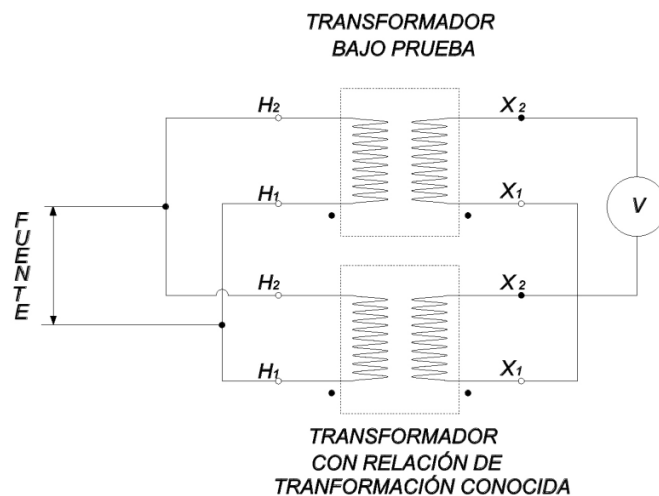


Figura. 10 Método de comparación.

Como método alternativo, el transformador bajo se excita en paralelo con la máquina de la cual se conoce la relación de transformación, los voltmetros son conectados como se muestra en la figura 11.

La prueba se debe repetir intercambiando los voltmetros. El promedio de los voltajes serán los valores correctos para usar en el cálculo de la relación de transformación.

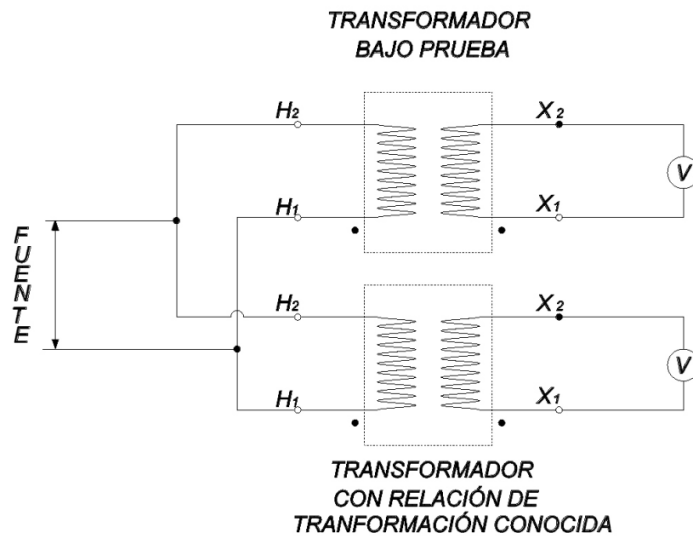


Figura. 11 Método alternativo al método de comparación.

2.5. PÉRDIDAS SIN CARGA Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN

Las pérdidas de potencia del transformador sin carga (en vacío), son aquellas que se encargan de la excitación del transformador.

Estas pérdidas se presentan debido al ciclo de histéresis, a las corrientes parásitas y la potencia que se pierde en el material dieléctrico. Esta energía consumida por el transformador varía con la tensión de excitación.

2.5.1. Corriente de excitación

La corriente de excitación es la que fluye por el devanado del transformador que se está energizando, cuando el otro devanado está en circuito abierto, generalmente se expresa como un porcentaje de la corriente nominal del lado del transformador en el cual se está realizando la medición.

Las pérdidas en el núcleo son función de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la tensión aplicada. Estas también varían con la temperatura y son

particularmente sensibles con la forma de onda, factor que puede hacer que las mediciones varíen de una prueba a otra.

2.5.2. Pruebas para el cálculo de las pérdidas en vacío

El propósito de esta prueba es determinar la potencia consumida por el transformador en vacío para determinado valor de tensión y frecuencia que por lo general son los valores nominales de la máquina.

El método más preciso para corregir las pérdidas en vacío respecto a una onda senoidal es el que usa un voltmetro de valor promedio y que se explica a continuación:

Este método emplea dos voltmetros conectados en paralelo, uno es un voltmetro de valor promedio, el otro es un medidor de voltaje calibrado con el valor rms, ver figura 12 y 13.

Las lecturas tomadas con estos instrumentos son utilizadas para la corrección de las pérdidas en vacío como se muestra mas adelante en la sección 2.4.2.6

2.5.2.1. Diagramas de conexión

En el momento de realizar el ensayo, se puede o no utilizar transformadores de instrumentación para proteger los medidores; a continuación se muestran los esquemas de conexiones con y sin transformadores de instrumentación.

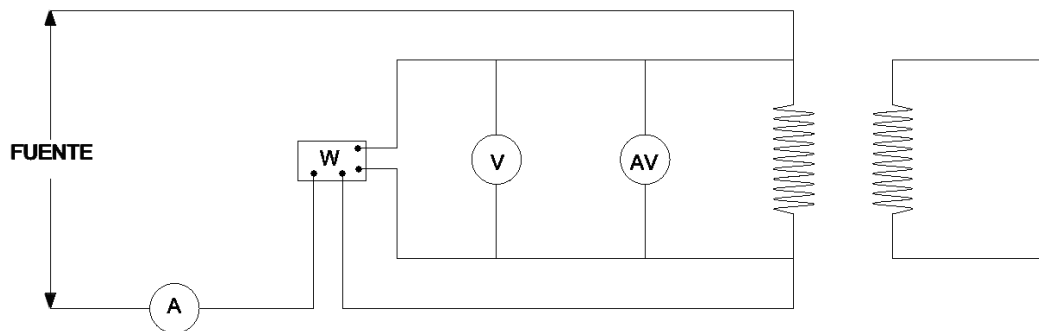


Figura. 12 Diagrama de conexiones para el ensayo de vacío.

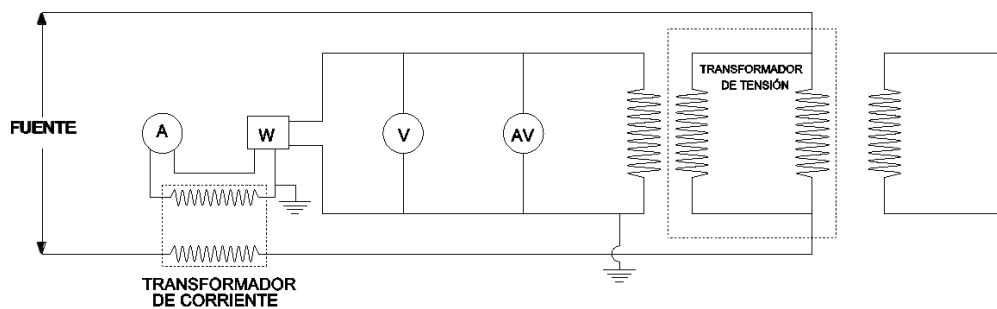


Figura. 13 Diagrama de conexiones para el ensayo de vacío utilizando transformadores de medida.

Para obtener resultados más exactos en el ensayo, se debe tener en cuenta la potencia que consumen los elementos de medida. Esto se puede hacer desconectando el transformador bajo prueba y registrando la medida del Batómetro. Esta potencia será restada de la potencia que se mide cuando el transformador bajo prueba esta conectado.

En el caso de transformadores trifásicos es necesario utilizar tres wattmetros, uno por cada fase. En la figura 14 se indican las conexiones necesarias cuando se requieren transformadores de instrumentación para la realización del ensayo.

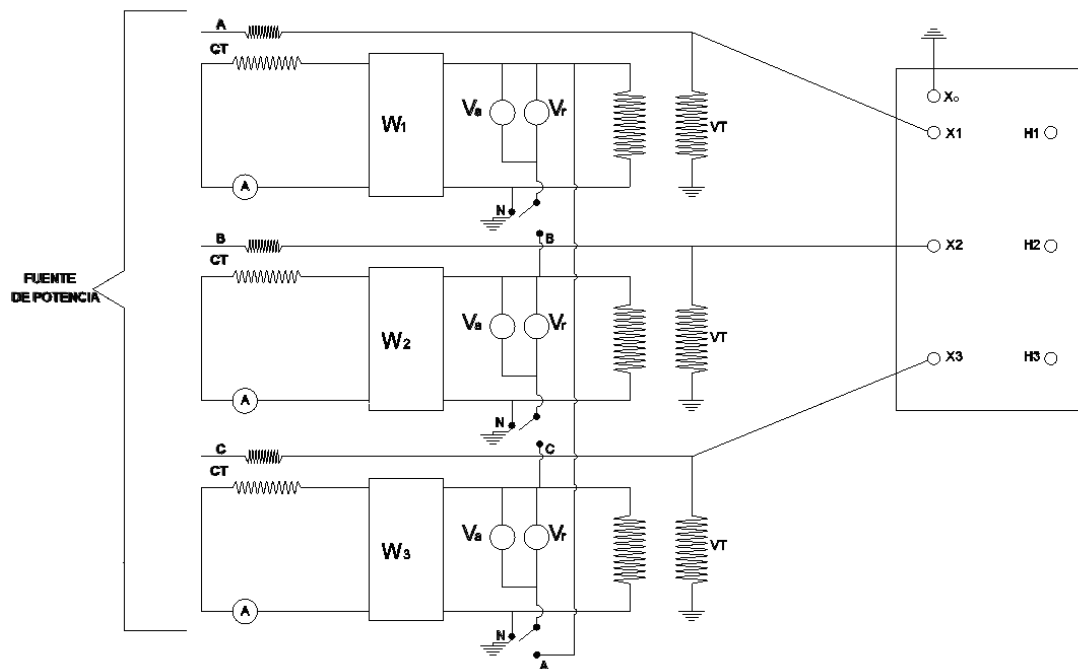


Figura. 14 Esquema de conexiones para el ensayo de vacío en un transformador trifásico.

2.5.2.2. Conexión de los voltmetros

Cuando se está corrigiendo la prueba debido a la forma de onda mediante el método del voltmetro de valor promedio, se debe prestar atención a la conexión de los medidores de tensión, debido a que la forma de la señal senoidal de línea a línea es diferente a la forma de onda de línea a neutro.

Por esto dependiendo de si los devanados del transformador están siendo energizados en delta o en Y, la forma de onda que miden los voltmetros debe ser la misma que están soportando los devanados.

2.5.2.3. Excitación de los devanados

La prueba se puede realizar energizando los devanados de alta o baja tensión, no obstante, se recomienda excitar el transformador por el lado de baja tensión. Los valores con los que se energice la máquina pueden ser los nominales aunque si

se requiere realizar el ensayo con un valor menor, este debe ser como mínimo igual al 25% de la tensión nominal de cada devanado.

2.5.2.4. Tensión y frecuencia

Las características de rendimiento y operación de un transformador están basadas en la tensión y frecuencia nominales, es por esto que. La prueba para determinar las pérdidas de potencia en vacío se debe realizar utilizando una fuente de potencia que entregue la tensión y frecuencia nominal

Se permite que la frecuencia este entre un rango de $\pm 0.5\%$ del valor nominal del transformador bajo prueba.

La tensión se ajusta tomando como referencia el valor indicado por voltmetro de tensión promedio, simultáneamente se toman medidas de tensión rms, corriente rms, y la potencia indicada por el Batómetro.

Para el caso de un transformador trifásico, la Tensión nominal de la máquina se ajusta cuando el promedio de los tres voltmetros sea el valor nominal del transformador.

2.5.2.5. Corrección de las pérdidas en vacío.

Una de las componentes de las pérdidas en vacío de un transformador es la causada por las corrientes de Eddy, esta potencia varia con el cuadrado del valor rms la tensión de excitación y son en gran medida independientes de la forma de onda de la tensión.

Para corregir las pérdidas en vacío de una señal de excitación senoidal, se usa la siguiente ecuación

$$P_c(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + kP_2} \quad (2-1)$$

Donde

T_m Es la temperatura del núcleo en el momento de la prueba,
se expresa en $^{\circ}C$

$P_c(T_m)$ Es el valor de las pérdidas en vacío, corregidas por forma de
onda, para una temperatura T_m

P_m Es la medida de las pérdidas en vacío a una temperatura T_m

P_1 Pérdidas por histéresis en por unidad

P_2 Pérdida por corrientes de Eddy en por unidad

$$k = \left(\frac{E_r}{E_a} \right)^2 \quad (2-2)$$

Donde

E_r Es la tensión medida por el voltmetro rms.

E_a Es la tensión medida por el voltmetro de voltaje promedio.

Si no se dispone de los valores reales para las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis se puede suponer un valor igual a 0.5 por unidad para estos dos parámetros.

Las ecuaciones anteriores son solamente validas para valores moderados de distorsión de la onda. Si el valor del factor de corrección k es mayor que 0.5% la prueba debe repetirse para una señal de voltaje con menos distorsión.

2.5.3. Determinación de la corriente de excitación (corriente en vacío)

La corriente de excitación (o de vacío) de un transformador es la corriente necesaria para mantener el flujo magnético en el núcleo del transformador,

normalmente se expresa en por unidad o como un valor porcentual de la corriente nominal de línea del devanado en el cual se esta realizando la medición.

La determinación de la corriente de excitación se puede realizar durante la prueba del transformador sin carga. La corriente rms que se registra el amperometro corresponde a la corriente de excitación para el caso de un transformador monofásico

En el caso de un transformador trifásico, la corriente de excitación se calcula tomando el valor promedio de las corrientes de línea del transformador.

2.6. PÉRDIDAS DEL TRANSFORMADOR CON CARGA Y TENSIÓN DE CORTO CIRCUITO

Las pérdidas de potencia con carga de un transformador, son aquellas que dependen de la carga que se conecta a la máquina, y son las siguientes:

- Pérdidas i^2R en los devanados del transformador.
- Pérdidas de potencia debido a corrientes de Eddy, inducidas por el flujo disperso y que crean corrientes parásitas en las partes conductoras del transformador.

Las pérdidas bajo carga de un transformador, se pueden determinar cortocircuitando las terminales de alta o baja tensión y aplicando una tensión en el otro devanado tal que haga fluir determinada corriente por las bobinas cortocircuitadas.

La tensión de cortocircuito se define como la tensión necesario para hacer circular por un devanado su corriente nominal cuando el otro esta cortocircuitado [2], para

esto, los bobinados del transformador deben estar conectados para trabajar a su voltaje nominal de operación

La tensión de cortocircuito normalmente se expresa en por unidad o en porcentaje la tensión nominal del devanado sobre el cual se esta aplicando y midiendo la tensión.

Dos componentes conforman la tensión de cortocircuito, una componente resistiva y una reactiva. La componente resistiva se denomina caída resistiva, la cual esta en fase con la corriente y corresponde a las pérdidas de potencia. La componente reactiva de la impedancia de voltaje se denomina caída reactiva, esta componente esta en cuadratura con la corriente y corresponde a los enlaces de flujo en los devanados. La tensión de cortocircuito es la suma fasorial de estas dos componentes.

La medición de la Tensión de cortocircuito se realiza durante la prueba de pérdidas de potencia del transformador con carga, midiendo la Tensión necesaria para que circule la corriente nominal del devanado.

2.6.1. Factores que afectan los valores de las pérdidas con carga y la Tensión de cortocircuito un transformador.

Las pérdidas de potencia de un transformador, así como la Tensión de cortocircuito dependen tanto del diseño de la máquina como de las condiciones de operación de la misma, a continuación se enuncian los factores que afectan estas características

- Diseño: características como el material del conductor, el material con el cual están hechos los devanados, la disposición de los devanados y la selección de los materiales que forman la estructura interna y externa del transformador.
- Temperatura: las pérdidas de potencia bajo carga son función de la temperatura, las pérdidas i^2R aumentan con la temperatura debido a las

características resistivas del material con el que están fabricados los devanados. Un efecto contrario ocurre en las pérdidas ocasionadas por las corrientes inducidas en las partes conductoras del transformador, estas pérdidas disminuyen con la temperatura. En la sección 2.7.4. se muestra una forma de corregir los valores medidos durante la prueba respecto de una temperatura de referencia.

- Mediciones: Debido a que los factores de potencia encontrados en la medición de las pérdidas bajo carga y la tensión de circuito son muy bajos, errores de ángulo de fase en los transformadores de instrumentación y demás medidores utilizados durante el ensayo afectan los resultados, debido a esto la selección del método de prueba adecuado es esencial para garantizar exactitud y repetitividad de los resultados.

2.6.2. Pruebas para la medida de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito

Independientemente del método que se utilice en la realización de este ensayo, se debe cumplir con los siguientes requerimientos para garantizar mayor precisión en los resultados de la prueba.

- La temperatura de los devanados se debe estabilizar.
- La temperatura de los devanados debe ser tomada inmediatamente antes y después de realizar la prueba de pérdidas bajo carga y tensión de corto circuito, el procedimiento debe ser el mismo que se describe en el artículo 5.2 de IEEE Std C57.12.91-2001. El promedio de esas mediciones será el verdadero valor de temperatura.
- La diferencia de temperatura del devanado antes y después del ensayo, no debe exceder 5 °C .

- Los conductores usados para cortocircuitar los devanados del transformador, deben tener la misma sección transversal o mayor que la de los bornes del transformador
- La frecuencia de la fuente de potencia utilizada durante la prueba, debe estar entre $\pm 0.5\%$ del valor nominal.

2.6.2.1. Métodos para la determinación de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito

- **Método del Amperemetro-Voltmetro-Wattmetro**

El diagrama de conexiones y el equipo necesario para la determinación de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito para un transformador monofásico se presenta en la figura 15. Si en el momento de realizar la prueba, el montaje requiere de transformadores de medida la figura 16 muestra las conexiones requeridas.

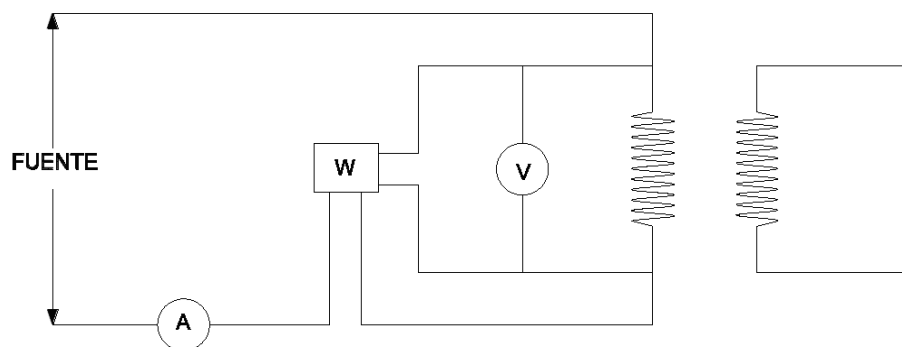


Figura. 15 Esquema de conexiones para el método del amperemetro-voltmetro-wattmetro.

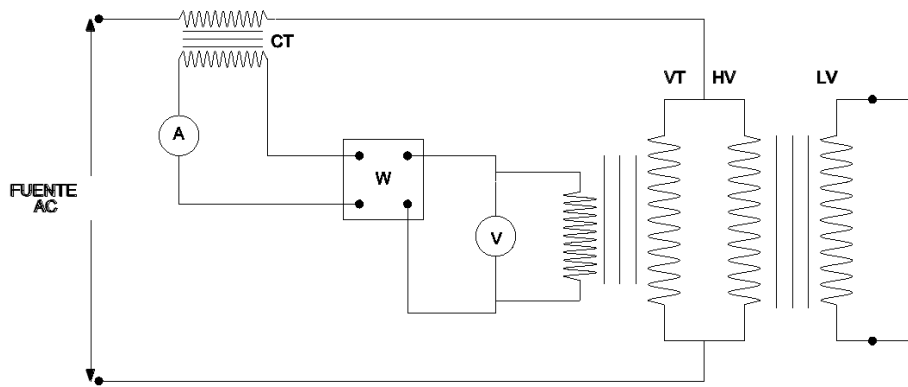


Figura. 16 Esquema de conexiones para el método del ampermetro-voltmetro-wattmetro usando transformadores de medida.

Cuando el ensayo se realiza en un transformador trifásico, se pueden utilizar solo dos Wattmetros, no obstante, es posible encontrar errores grandes debido a los muy bajos factores de potencia que se obtienen en estas pruebas. Es por esto que se recomienda no realizar la prueba con el método de los dos wattmetros.

Para transformadores trifásicos se deben utilizar tres wattmetros. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 17

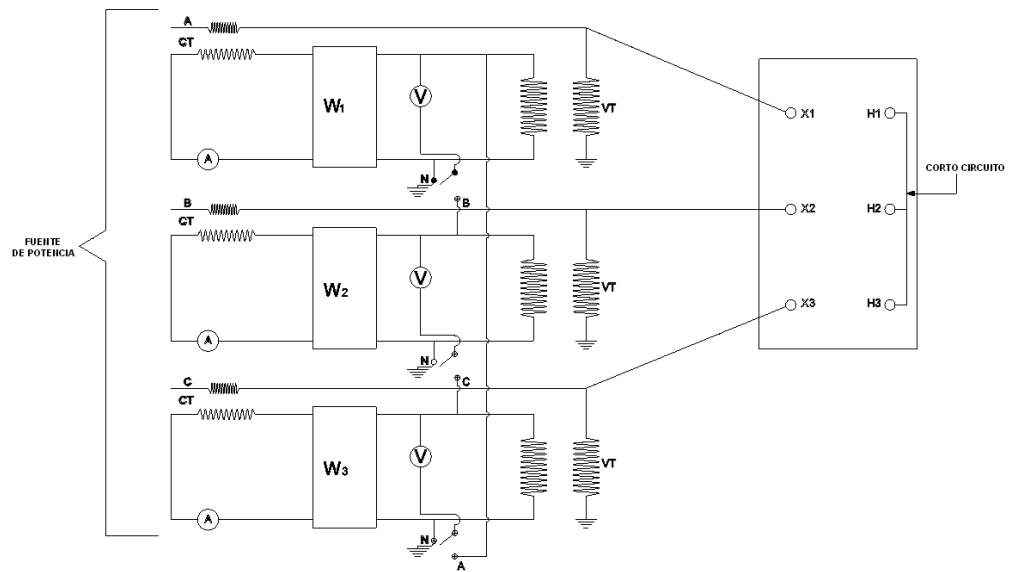


Figura. 17 Esquema de conexiones para el método del amperemetro-voltmetro-wattmetro para transformadores trifásicos.

- **Métodos de puente de impedancia.**

Existen muchas configuraciones para la elaboración de montajes en puentes de impedancia, su selección depende de los instrumentos e instalaciones con que se cuente y de la facilidad de realizar la prueba.

En la figura 18 se muestra el diagrama general de un puente de impedancia, este arreglo permite que una tensión proporcional a la corriente por el transformador bajo prueba, sea comparada con una tensión de referencia que es función de la Tensión aplicada E_t . La comparación de tensiones se realiza ajustando las impedancias que componen el circuito (Z_1, Z_2 y Z_3) hasta que las tensiones en Z_2 y Z_3 sean iguales en magnitud y fase, esta medición se realiza con el instrumento DET, las características del transformador bajo prueba, son calculadas con los valores de Z_1, Z_2 y Z_3

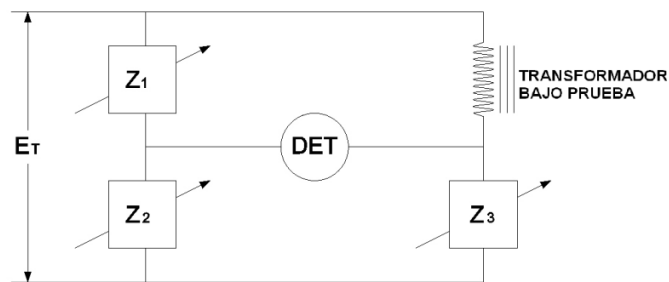


Figura. 18 Esquema de método del puente de impedancia.

En el caso de un transformador trifásico, la prueba para determinar las pérdidas con carga y la tensión de corto circuito se debe realizar conectando el puente en cada fase y calculando las pérdidas como la suma de las pérdidas por cada fase.

2.7. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA TRANSFORMADORES BIDEVANADOS, TRIDEVANADOS Y AUTOTRANSFORMADORES

Las pruebas hechas en autotransformadores trifásicos y monofásicos se deben realizar sin cambiar las conexiones internas de la máquina.

2.7.1. Autotransformadores

Los terminales de entrada (o de salida) son cortocircuitados, se aplica tensión nominal a frecuencia nominal en los otros terminales. La Tensión se ajusta de tal forma que la corriente que circule por el devanado sea la nominal de la máquina. Simultáneamente se debe registrar los valores que indican los voltmetros, amperímetros y Wattmetros, para la determinación de las pérdidas de potencia y tensión de cortocircuito [1], ver figura 19.

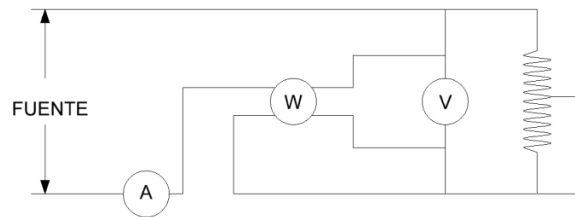


Figura. 19 Esquema de conexiones para la determinación de pérdidas en un autotransformador.

Para realizar la medición de las pérdidas con carga y tensión de cortocircuito de un autotransformador, los devanados serie y común, deben ser tratados por separado, es decir, uno excitado y otro cortocircuitado. En esta situación la corriente que circule debe ser la nominal del devanado que se está excitando, que puede o no, ser la corriente nominal de línea.

Las pérdidas de potencia y los voltamperes aplicados serán los mismos si:

- Los devanados serie y común son tratados por separado y se excitan con la respectiva corriente nominal de cada devanado.
- La máquina es tratada como autotransformador y se excita con la corriente de línea.

2.7.2. Transformador tridevanados

En transformadores tridevanados, ya sean monofásicos o trifásicos, se deben realizar tres grupos de mediciones entre pares de devanados, siguiendo el mismo procedimiento de prueba usado para transformadores bidevanados, es decir que se deben realizar mediciones entre los devanados 1, 2 y 3 para obtener las impedancias Z_{12} , Z_{23} y Z_{31} .

Es frecuente que la potencia aparente de cada devanado no sea la misma. De ser así, la corriente de la prueba será la nominal del devanado de menor capacidad amperimétrica entre los dos que están siendo sometidos a la prueba, sin embargo

los valores obtenidos se deben expresar en la misma base de potencia aparente, preferiblemente la del devanado primario.

El circuito equivalente de un transformador tridevanado se muestra en la siguiente figura.

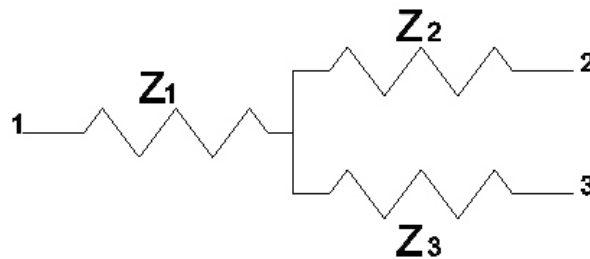


Figura. 20 Circuito equivalente de un transformador tridevanado.

Los valores de Z_1 , Z_2 y Z_3 se especifican a continuación:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} - Z_{23} + Z_{31}}{2}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{23} - Z_{31} + Z_{12}}{2} = Z_{12} - Z_1$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31} - Z_{12} + Z_{23}}{2} = Z_{31} - Z_1$$

Donde Z_{12} , Z_{23} y Z_{31} son los valores de impedancia medidos entre los pares de devanados que expresan los subíndices, y están en la misma base de potencia aparente.

Las pérdidas con carga del transformador corresponden a la suma de la potencia disipada en cada impedancia del circuito mostrado en la figura 16, para condiciones específicas de carga.

2.7.3. Cálculo de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito con los datos obtenidos en los ensayos.

Debido a que las mediciones de las pérdidas de potencia bajo carga y la tensión de cortocircuito son sensibles a los cambios de temperatura, los datos obtenidos en las pruebas deben ser corregidos a una temperatura de referencia.

2.7.4. Corrección por temperatura de las pérdidas bajo carga

Las pérdidas i^2R , $P_t(T_m)$, de un transformador son calculadas utilizando los valores obtenidos de las mediciones de resistencia de los devanados de la máquina, resultados que deben ser corregidos a la misma temperatura T_m de las pruebas de pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito. La corriente usada para calcular las pérdidas i^2R es la misma que se utilizó para la medida de la impedancia.

La diferencia entre la potencia medida al realizar la prueba de pérdidas bajo carga y las pérdidas i^2R , corresponden a las pérdidas ocasionadas por corrientes Hédl [1] en las demás partes conductoras del transformador, $[1] P_s(T_m)$.

$$P_s(T_m) = P(T_m) - P_r(T_m) \quad (2-3)$$

Donde

T_m = Temperatura del núcleo en el momento de la prueba, se expresa en $^{\circ}C$

$P_s(T_m)$ = Pérdidas por corrientes parásitas a la temperatura T_m .

$P(T_m)$ = Pérdidas bajo carga en el transformador.

$P_r(T_m)$ = Pérdidas i^2R a la temperatura T_m .

Como se señaló anteriormente las pérdidas i^2R aumentan con la temperatura, mientras que las pérdidas causadas por las corrientes de Eddy disminuyen. Por esta razón cuando sea necesario corregir las pérdidas bajo carga a una temperatura diferente a la que se tenía durante la prueba, las dos componentes deben corregirse por separado, tal como se muestra a continuación:

$$P_r(T) = P_r(T_m) * \left(\frac{T_k + T}{T_k + T_m} \right) \quad (2-4)$$

$$P_s(T) = P_s(T_m) * \left(\frac{T_k + T_m}{T_k + T} \right) \quad (2-5)$$

$$P(T) = P_r(T) + P_s(T) \quad (2-6)$$

Donde

$P_r(T_m)$ = Pérdidas i^2R a la temperatura $T, ^\circ C$.

$P_s(T_m)$ = Pérdidas por corrientes parásitas a la temperatura $T, ^\circ C$.

$P(T_m)$ = Pérdidas del transformador bajo carga, corregidas a una temperatura $T, ^\circ C$.

$T_k = 234.5 ^\circ C$ para devanados de cobre.

$T_k = 225 ^\circ C$ para devanados de aluminio (ver nota).

Nota. Para aluminio puro, se aplica el factor $T_k = 225$, para aleaciones de aluminio el valor de T_k puede ser hasta de $240 ^\circ C$. En caso que se utilicen devanados de cobre y aluminio, en el mismo transformador, se aplicará un valor para T_k de $229 ^\circ C$ para el cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas.

2.7.5. Cálculo de la tensión de cortocircuito.

La tensión de cortocircuito junto con las componentes reactiva y resistiva se calcula a partir de las siguientes expresiones:

$$E_r(T_m) = \frac{P(T_m)}{I} \quad (2-7)$$

$$E_x = \sqrt{E_z(T_m)^2 - E_r(T_m)^2} \quad (2-8)$$

$$E_r(T) = \frac{P(T)}{I} \quad (2-9)$$

$$E_z(T) = \sqrt{E_r(T)^2 + E_x^2} \quad (2-10)$$

Donde

$E_r(T_m)$ = Caída de voltaje resistiva a la temperatura T_m .

$P(T_m)$ = Pérdidas bajo carga del transformador a la temperatura T_m

I = Corriente en el devanado excitado

E_x = Caída de voltaje reactivo.

$E_z(T_m)$ = Impedancia de voltaje a la temperatura T_m .

$P(T)$ = Pérdidas de potencia del transformador, a una temperatura T .

$E_r(T)$ = Caída de voltaje resistiva a una temperatura T .

$E_z(T)$ = Tensión de cortocircuito a la temperatura T .

2.8. ENSAYOS DIELECTRICOS

Las pruebas que se describen a continuación difieren entre transformadores tipo seco y transformadores embebidos en aceite.

2.8.1. Ensayos dieléctricos para transformadores tipo seco

El propósito de los ensayos dieléctricos es evaluar si el transformador ha sido diseñado para soportar Tensiones relacionadas con los niveles de aislamiento especificados [IEEE Std C57.12.01-1998].

Para el caso de transformadores, las pruebas se deben realizar una vez se tenga completamente ensamblado el transformador.

Durante los ensayos dieléctricos la temperatura del transformador debe estar entre 10°C y 40°C

2.8.1.1. Ensayos dieléctricos en el campo

La aplicación de grandes niveles de tensión durante los ensayos dieléctricos puede ocasionar o acelerar futuras averías en aislamientos de la máquina, es por esto, que no se recomienda la realización periódica de pruebas de este tipo.

Las pruebas dieléctricas pueden ser autorizadas para circunstancias especiales, no obstante, no se recomienda realizarlas con frecuencia debido a los esfuerzos que sufren los aislamientos.

2.8.1.2. Pruebas de voltaje aplicado

- **Devanados conectados en delta**

Los transformadores diseñados para trabajar nominalmente en conexión delta o para poder utilizar cualquier terminal de un devanado monofásico como la terminal de línea.

La prueba de voltaje aplicado se realiza aplicando entre cada bobina y el resto de las bobinas conectadas a tierra, una tensión de baja frecuencia desde una fuente externa con una magnitud según lo especifica la tabla 5 de IEEE Std C57.12.01-1998.

- **Devanados conectados en Y**

Para devanados conectados permanentemente en Y se debe aplicar una tensión de prueba de acuerdo con el BIL especificado⁸

- **Conexiones de tierra durante la prueba**

La duración de la prueba será de 1 minuto, utilizando una frecuencia eléctrica de 60Hz. El devanado bajo prueba tendrá todas las piezas de ensamble juntas y conectadas al terminal de línea del transformador de prueba. El resto de terminales y demás piezas eléctricas del transformador serán conectados a la terminal aterrizada del transformador de la prueba.

Las conexiones a tierra entre los aparatos bajo prueba y el transformador constituirán un circuito metálico. Todas las conexiones tendrán un buen empalme mecánico evitando la formación de esquinas o de puntos agudos [1].

Ninguna resistencia apreciable se debe poner entre el transformador de la prueba y el devanado que está bajo prueba. Sin embargo, se permite utilizar bobinas reactivas en o cerca de los terminales del transformador de prueba [1]

- **Índice de elevación de tensión**

⁸ Los niveles básicos de aislamiento están dados en la tabla 5 de IEEE Std57.12.01-1998

La Tensión aplicada debe comenzar en un cuarto o menos del valor especificado en la sección 2.8.1.2, luego debe incrementarse dicho valor en no menos de 15 s. Después de mantenerse por el tiempo especificado, debe reducirse gradualmente (en no más que 5 s) a un cuarto del valor en el que inició el ensayo por último abrir el circuito

2.8.1.3. Pruebas de tensión inducida

La prueba de tensión inducida para los transformadores bajo prueba, se realiza aplicando una tensión⁹ en terminales de un devanado de la maquina

- **Duración**

El ensayo de tensión inducida se aplica durante 7200 ciclos o 60 s, el que sea más corto [1].

- **Frecuencia**

Debido a que esta prueba aplica una tensión tan grande como la nominal del transformador, la frecuencia la Tensión aplicado debe ser elevada para así limitar la densidad de flujo [1]

La frecuencia mínima de la prueba para cumplir estas condiciones, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Frecuencia de la prueba} = \frac{E_t}{1.1E_r} * (\text{Frecuencia nominal}) \quad (2-11)$$

Donde

E_t Es la Tensión inducido de la prueba, a través del devanado

⁹ La magnitud de los niveles de tensión aplicables en el ensayo, están especificados en el artículo 5.10.3.2 de IEEE Std C57.12.01- 1998.

E_r Es la Tensión nominal a través del devanado

Cuando la prueba de tensión inducida en una bobina da lugar a un voltaje entre los terminales de otras bobinas, superior al voltaje de baja frecuencia de la prueba, la otra bobina debe ser puesta a tierra.

La corriente debe ser monitorizada simultáneamente en cada terminal de línea que sea excitada durante la prueba, cualquier cambio debe ser registrado.

2.8.1.4. Pruebas de impulso

Este ensayo consiste en aplicar a un devanado las siguientes formas de onda y en el orden mostrado:

- Una onda completa de valor reducido: para esta prueba, la onda de tensión aplicada tendrá un valor de cresta entre el 50% y el 70% del valor de onda requerida
- Dos ondas recortadas para esta prueba, la onda de tensión será recortada por un gap de aire esta tendrá un valor de cresta y tiempo de descarga disruptiva de acuerdo Con la tabla 5 de IEEE std87.12.01-11998, el gap se localiza lo mas cerca posible de las terminales y la impedancia será limitada a la necesaria por los terminales del gap.
- Una onda completa: para esta prueba, la onda de tensión tendrá un valor de cresta de acuerdo con el cuadro 5 de IEEE Std C57.12.02-1998. el nivel de tensión debe tener una tolerancia del $\pm 3\%$ del nivel especificado de BIL. La tolerancia en el tiempo de cresta estará conforme a $\pm 30\%$ y el tiempo de media cresta estará a una tolerancia del $\pm 20\%$

Los valores aplicables se listan en IEEE Std C57.12.01-1998 o en estándares aplicables a transformadores

El intervalo de tiempo entre la aplicación de la onda recortada y la onda completa será reducido al mínimo para evitar la recuperación de la fuerza de aislamiento si ocurre una falla antes del final de la onda completa.

- **Onda que se utilizada en las pruebas de impulso**

Una onda de 1.2/50 μs será utilizada para las pruebas de onda completa y reducida. Las ondas de polaridad positiva serán utilizadas para transformadores tipo seco. El tiempo de cresta en el frente a partir del tiempo cero no excederá 2.5 μs . Excepto para bobinas de alto impulso capacitivo.

Para demostrar que la capacitancia de impulso del devanado causa un frente largo de onda, la resistencia serie del generador de impulsos puede ser reducida causando así, oscilaciones sobrepuestas. Solamente el generador y los terminales de las inductancias deben estar en el circuito.

Por conveniencia en la medición, el tiempo de cresta puede ser considerado como 1.67 veces el tiempo actual entre puntos en el frente de onda al 30% y el 90% del valor de cresta.

El tiempo desde la cola hasta el punto medio de la cresta de la onda aplicada será por lo menos de 40 μs a partir del tiempo cero, a menos que el devanado tenga una baja inductancia. Esto esta dentro del -20% de tolerancia proporcionada para una onda de 1.2/50 μs .

Cuando hay oscilaciones de alta frecuencia en la cresta de la onda, el valor de la cresta se determina a partir de una onda lisa dibujada con las oscilaciones. Si el periodo de las oscilaciones es $2\mu s$ o mas, se utiliza el valor actual de la cresta.

La magnitud de las oscilaciones en el frente de onda no debe exceder el 10% de la Tensión aplicada.

- **Conexiones para las pruebas de impulso**

- ✓ **Puesta a tierra**

Una terminal de cada devanado bajo prueba se pone a tierra directamente o a través de una resistencia. Los terminales de las bobinas que no se están probando se pueden poner a tierra directamente o a través de un resistor para limitar la tensión inducida. Es deseable que las Tensiones en los terminales que no están bajo prueba no excedan el 80% de la tensión de onda completa para su nivel de aislamiento.

Todas las puestas a tierra deben ser directas con excepción de las mencionadas en el párrafo anterior.

- ✓ **Conexiones de los devanados.**

A menos que se especifique lo contrario, las pruebas se realizarán con el devanado conectado en conexión delta.

- ✓ **Conexiones con taps**

Las conexiones de los taps deben ser realizadas con la mínima relación de transformación del devanado bajo prueba. La elección de las conexiones, de los

taps de las bobinas que no están siendo sometidas a la prueba, será hecha por el fabricante o laboratorista.

2.8.1.5. Pruebas para determinar el factor de potencia del aislamiento

El factor de potencia de aislamiento es el cociente entre la potencia disipada en el aislamiento (W) y el producto del valor eficaz de voltaje y corriente (en VA para una señal de prueba senoidal)

- **Preparación para la prueba**

El modelo de prueba debe cumplir con las siguientes indicaciones:

- Todos los devanados cortocircuitados
- La temperatura del transformador cerca de 20°C , que corresponden a la temperatura de referencia.
- El factor de potencia de aislamiento puede ser medido con determinados circuitos puente o mediante el método del Volt-Amper-Watt. La precisión de las mediciones deberá estar entre $\pm 0.25\%$, y la frecuencia de la prueba debe ser mantenida a un valor de $60\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$.
- La tensión aplicada para la medición del factor de potencia, no debe exceder la tensión de operación a tierra en ningún punto del devanado o en su defecto 1000V.

- **Procedimiento**

Las pruebas para determinar el factor de potencia de aislamiento se deben realizar desde los devanados a tierra y entre devanados como se muestra en la siguiente tabla.

Método I Prueba sin circuito de protección	Método II Prueba con circuito de protección
Transformadores bidevanados ^b • Alta a baja y a tierra • Baja a alta y a tierra • Alta y baja a tierra	Transformadores bidevanados ^b • Alta a baja y a tierra • Alta a tierra, circuito protector en baja. • Baja a alta y a tierra. • Baja a tierra, circuito protector en alta

Tabla 3. Mediciones a realizar en la determinación del factor de potencia de aislamiento

2.8.1.6. Pruebas de la resistencia de aislamiento.

Este ensayo es realizado para determinar la resistencia de aislamiento de un devanado individual a tierra o entre devanados individuales.

La resistencia de aislamiento en estas pruebas puede tener valores de megaohms y por ende se recomienda utilizar una megohmetro, no obstante la medición se puede realizar con una fuente CC variable¹⁰

- **Preparación de la prueba**

Antes de realizar la medición de la resistencia de aislamiento, se debe cumplir los siguientes requerimientos.

- ✓ Los devanados deben estar en su ambiente normal de aislamiento.
- ✓ Todos los devanados deben ser cortocircuitados.
- ✓ La temperatura del transformador debe ser aproximadamente de 20⁰C .

^b las bobinas conectadas permanentemente, por ejemplo un autotransformador, será considerado como un devanado.

¹⁰ La fuente de CC debe estar dotada con medidores de tensión y corriente.

- **Tensión aplicada durante el ensayo**

La tensión CC aplicado para la medición de la resistencia de aislamiento a tierra, no debe exceder un valor igual al valor de la Tensión de baja frecuencia que se especifico en el numeral 2.7.2.

- **Procedimiento**

- ✓ Se conectan sobre la misma tierra todos los circuitos de igual nivel de tensión. Los circuitos o grupos de circuitos de diferentes niveles de tensión sobre tierra serán probados por separado, por ejemplo de alta a baja tensión y a tierra, baja a alta tensión y a tierra
- ✓ Se incrementa la tensión a razón de 1 a 5 KV, cada incremento durara 1 minuto.
- ✓ La prueba se debe interrumpir inmediatamente en el caso de que la corriente no se estabilice

2.8.2. Ensayos dieléctricos para transformadores embebidos en aceite

2.8.2.1. Tipos de transformadores

Según el estándar IEEE Std C57.12.00-2006 los transformadores de tipo inmersos en líquido se dividen en dos clases:

- a) Clase 1: transformadores de potencia con tensión en el devanado de alta tensión igual o menor a 69 kV.
- b) Clase II: transformadores de potencia con tensión del devanado de alta entre 115 kV. y 765 kV.

2.8.2.2. Ensayos dieléctricos

El propósito de de los ensayos dieléctricos es demostrar que el transformador fue diseñado y construido para soportar niveles de aislamiento especificados en el estándar IEEE Std C57.12.00-2006

- **Mediciones de los voltajes de prueba**

A menos que se especifique lo contrario, la tensión de prueba del dieléctrico deben ser aplicadas y medidas según el estándar IEEE Std 4-1995 (*IEEE Standard Techniques For High-voltage Testing*) con las siguientes excepciones [3]:

- a) Una resistencia de protección puede conectarse en serie con las esferas en cada esfera libre o aterrizada, cuando no sea necesario proteger las esferas contra los daños producidos por el arco, la resistencia puede ser omitida.
- b) *The bushing-type potential divider method*¹¹ será considerado un método estándar para las pruebas de transformadores.
- c) El método del rectificador de corriente-condensador será considerado un método estándar para las pruebas en los transformadores.
- d) En la realización de pruebas de baja frecuencia para transformadores de 10 kVA o menos, con una tensión de prueba de 50 kV o menos, esta permitido que dependiendo de la relación de transformación de transformador de la prueba para indicar la tensión propia del ensayo.

- **Ensayos dieléctricos y condiciones en la construcción**

En el momento de realizar el ensayo, el transformador debe estar armado con todos los compartimientos que puedan afectar las pruebas en el material dieléctrico de la maquina. La temperatura durante el ensayo debe ser la misma que soporte el transformador en estado normal funcionamiento.

¹¹ este método se describe en el estándar IEEE Std. 4-1995, IEEE Standard techniques for high voltage test.

- **Ensayos dieléctricos en el campo**

Los ensayos dieléctricos en el campo no se recomiendan para realizar periódicamente debido al grande esfuerzo que esta prueba significa para los devanados.

Donde se requieran ensayos dieléctricos en el campo, se utilizaran los ensayos de voltaje aplicado de baja frecuencia y el ensayo de voltaje inducido. Para transformadores de distribución y de potencia clase I, la tensión línea-tierra y línea-línea no debe ser mayor que el 150% del esfuerzo normal de operación o 85% de la tensión total del ensayo. La duración de los ensayos se especifica en las secciones 2.8.2.7 y 2.8.2.8.

Para transformadores clase II la tensión de prueba línea-línea y línea-tierra no debe exceder 150% de la Tensión máximo de operación del sistema. La duración de las pruebas no deben exceder los límites dados en la tabla 3

Voltaje de prueba como porcentaje del valor máximo de tensión de operación del sistema	Duración mínima permitida (minutos)
150	5
140	12
130	36
120	120

Tabla 4. Valores de tensión y duración durante los ensayos dieléctricos.

2.8.2.3. Procedimientos de prueba de conmutación de impulsos

La prueba de conmutación de impulsos consiste en aplicar o inducir una onda conmutada de impulsos entre cada terminal de línea de alta tensión y tierra, el valor de cresta de la onda será igual al valor de prueba especificado.

En el ensayo se debe inyectar una onda de tensión con magnitud reducida (entre 50% y 70% del valor especificado para la prueba) seguida de dos ondas con magnitud igual al voltaje especificado para el ensayo

- **Características de la señal de prueba**

- ✓ **Forma de la onda**

La onda de tensión impuesta tendrá un valor de cresta especificado para el nivel de aislamiento con una tolerancia permitida de $\pm 3\%$ y excederá en 90% del valor de cresta para los últimos 200 μs . El tiempo actual de cresta será mayor que 100 μs y el tiempo en el que el primer valor cero de tensión en la cola de la onda será por lo menos en 1000 μs .

Ocasionalmente la saturación del núcleo causa que el tiempo en el que el primer voltaje cero ocurra antes de 1000 μs .

2.8.2.4. Procedimientos de prueba de impulsos tipo rayo

Este es un ensayo de rutina, consiste en aplicar diferentes formas de onda en el orden que se especifica a continuación: una onda de magnitud reducida, dos ondas recortadas y una onda completa. El intervalo de aplicación entre la última onda recortada y la onda completa debe ser el mínimo posible.

A continuación se describen las características que debe tener cada una de las tres ondas utilizadas en el ensayo:

- ✓ Onda completa: el valor de la cresta de la onda ocurrirá en 1.2 μs y decaerá a la mitad del valor de cresta en 50 μs respecto de un valor supuesto de

cruce por cero. El valor de cresta será el establecido para el respectivo nivel de aislamiento (BIL), con una tolerancia permitida de $\pm 3\%$, la tolerancia de tiempo para el momento en el que se espera el valor máximo para la cresta de la onda es de $\pm 30\%$ y un valor de $\pm 20\%$ para el momento en que la onda alcanza la mitad del valor máximo, se debe tener en cuenta que:

- a) El tiempo de cresta no debe exceder $2.5 \mu s$ excepto para devanados que tengan gran capacidad de impulso (*large capacitance of the windings*) baja tensión, alta capacidad de potencia aparente y devanados de alta tensión con gran capacidad de potencia aparente).
- b) La impedancia de algunos devanados puede ser tan baja, que el tiempo en el que se espera el 50% del valor de la cresta no puede ser obtenido con el equipo disponible. En tales casos se pueden utilizar formas de onda recortadas. Para asegurarse que los valores obtenidos en la prueba son los adecuados, la capacitancia del generador con la conexión usada no debe exceder $0.011 \mu F$.

Por conveniencia en la mediciones el tiempo de cresta se puede considerar como 1.67 veces el tiempo entre puntos en el frente de onda a 30% y 90% del valor de cresta.

El tiempo cero puede ser determinado localizado puntos en el frente de onda en los cuales la tensión es respectivamente 30% y 90% del valor de cresta y realizando un bosquejo a través de esos puntos. La intersección de esa línea o bosquejo con el eje del tiempo indica el valor de inicio.

- ✓ Onda completa de magnitud reducida: este tipo de onda tiene las mismas características de la onda anterior excepto por que el valor de cresta debe estar entre 50% y 70% del valor total de la onda.

- ✓ Onda recortada: la principal característica de esta onda es que el valor de cresta esta en el valor requerido de alto nivel. Para recortar la onda, el gap o cualquier otro dispositivo troceador será localizado lo más cerca posible de las terminales.

2.8.2.5. Conexiones para las pruebas de impulso en las terminales de línea

- **Puesta a tierra de los devanados**

Los ensayos se aplican a cada terminal de la maquina, uno a las vez. Los terminales que no están bajo prueba, deben ser sólidamente puestos a tierra incluyendo autotransformadores y transformadores regulantes, en el momento de aterrizar los terminales se permite hacerlo a través de una resistencia que no exceda los valores dados en la tabla 5.

Voltaje nominal del sistema (kV)	Resistencia (Ω)
Menor a 345	450
500	350
765	300

Tabla 5 Valores de resistencia de puesta a tierra

En la elección de la puesta a tierra de cada terminal se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones [4]

- a) La Tensión a tierra en cualquier terminal que no esta bajo prueba no debe exceder el 80% de la onda completa de tensión para esa terminal.

- b) Cuando un terminal se diseña o especifica para trabajar puesto a tierra durante el servicio, entonces en el ensayo, dicho terminal debe ser sólidamente puesto a tierra.
- c) Aterrizar a través de una baja impedancia en paralelo para medidas de corriente puede ser considerado como equivalente de una puesta a tierra sólida

- **Devanados para conexiones delta o Y**

Cuando un transformador trifásico se diseña para trabajar en un sistema de mas de 25 kV, las pruebas se deben realizar para conexión en delta y para conexión en Y, la tensión para prueba corresponde al nivel básico de aislamiento (BIL) de cada devanado. Para sistemas con Tensiones menores a 15 kV solamente se requiere hacer el ensayo conectando la maquina en Y a menos que se especifique lo contrario.

2.8.2.6. Pruebas de rutina de impulso para transformadores de distribución

Para transformadores de distribución, las pruebas de impulso numeradas en la sección 2.8.2.9. se aplican como pruebas de diseño. A continuación define rutina de ensayo.

- **Terminales bajo prueba.**

La los ensayos de rutina, las pruebas de impulso son aplicadas en todas las terminales de alta tensión, realizar estas pruebas en los terminales de baja tensión¹² y neutro no es necesario [8].

- **Procedimiento.**

¹² Se asume como alta tensión a valores mayos de 600 V.

Los devanados bajo prueba se conectan a tierra a través de una baja impedancia en paralelo. El tanque, núcleo y cada uno de los terminales de baja tensión o terminales de neutro debe ser puesto a tierra directamente o a través de la resistencia en paralelo. El paralelo de puesta a tierra puede ser uno de los siguientes: [8]

- a) Método de corriente de tierra: una resistencia en paralelo.
- b) Método de impedancia neutral: una baja impedancia en paralelo, consiste en una combinación de resistencia y capacitancia.

✓ **método 1**

Se debe aplicar una onda completa de magnitud reducida, seguida de una onda de la misma forma pero con el 100% de la amplitud. La primera onda debe tener un valor de cresta entre 50% y 70% del valor de BIL asignado.

✓ **Método 2.**

Dos ondas completas con valor de cresta igual al BIL asignado son aplicadas al transformador bajo prueba, la impedancia en paralelo que consta de valores adecuados de resistencia y capacitancia es empleada para registrar las formas de onda, estos datos de prueba son comparados con valores preestablecidos.

✓ **Devanados con múltiples opciones de conexión**

Para devanados de alta tensión con los que se puedan realizar múltiples conexiones, los ensayos de impulso se deben aplicar a un nivel de tensión igual al BIL asignado en cada una de las condiciones¹³

¹³ Esta condición aplica también a devanados con conexiones delta o Y

2.8.2.7. Pruebas de tensión aplicada

- **Duración, frecuencia y conexiones**

Se puede usar una fuente normal de potencia, con frecuencia de 60 Hz, la duración del ensayo será de 1 minuto [8] el devanado bajo prueba será completamente conectado a la terminal de línea del transformador de prueba.

Todas las demás partes del transformador son puestas a tierra.

- **Aplicación de la tensión de prueba**

La tensión deberá iniciar con un valor no menor al 15% del valor total especificado para la prueba, esta tensión debe incrementarse gradualmente en menos de 15 segundos, luego de cumplir el tiempo especificado para la prueba se reduce lentamente en no mas de 5 segundos hasta llegar al valor de inicio, luego se abre el circuito.

2.8.2.8. Pruebas de tensión inducida para transformadores de distribución y clase I

- **Duración de la prueba**

La tensión inducida del ensayo será aplicada por 7200 ciclos o 60 segundos, el que sea más corto.

- **Frecuencia del ensayo.**

Debido a que esta prueba aplica una tensión tan grande como la nominal del transformador, la frecuencia la Tensión aplicado debe ser elevada para así limitar

la densidad de flujo como esta permitido en 4.1.6 del estándar IEEE Std C57.12.00-2006. [4]

La frecuencia mínima de la prueba para cumplir estas condiciones, se halla con la siguiente ecuación:

$$\text{Frecuencia de la prueba} = \frac{E_t}{1.1E_r} * (\text{Frecuencia nominal}) \quad (2-11)$$

Donde

E_t Es la Tensión inducido de la prueba, a través del devanado

E_r Es la Tensión nominal a través del devanado

2.9. PRUEBAS DE TEMPERATURA

Este tipo de pruebas buscan determinar la elevación de temperatura de un transformador respecto a la del medio ambiente. El resultado de esta medición es un valor promedio de la temperatura del circuito entero.

Los ensayos para la determinación del incremento de la temperatura se realizan bajo condiciones normales de enfriamiento. Cuando el transformador al que se le realice la prueba, este equipado con ventiladores, se deben efectuar dos medidas, la primera será realizada con valor nominal de refrigeración, la segunda con el valor máximo del ventilador.

La prueba puede ser realizada en menor tiempo por el uso de sobrecargas iniciales o un enfriamiento definido. Durante la prueba, la corriente y frecuencia con que se realice la prueba, deben estar entre el 10% de los valores nominales de la máquina.

La estimación de la medida de la caída de temperatura se puede realizar utilizando sensores como: termocuplas, detectores de la temperatura de la resistencia, termómetros, u otros dispositivos convenientes.

El método más utilizado se basa en la utilización de termocuplas.

2.9.1. Medición de la temperatura del medio ambiente

La temperatura del medio ambiente será tomada como la del aire circundante, esta debe tener un valor entre 10°C y 40°C .

La temperatura ambiente es el promedio de las lecturas de por lo menos tres sensores de temperatura, espaciados uniformemente alrededor del transformador bajo prueba. Estos sensores serán colocados cerca de la mitad de la altura y a una distancia de 0.91 a 1.83m del transformador. Además, deben estar protegidos contra cambios anormales de temperatura y del calor radiante del transformador

2.9.2. medición de la temperatura superficial

Los sensores de temperatura deben ser ubicados en un lugar en donde el contacto con la superficie que se esta sometiendo a la medición sea firme, constante y térmicamente aislada del medio circundante.

Los sensores deben ser aplicados en las superficies según se especifica a continuación para diferentes tipos de transformadores:

- Ventilado tipo seco: En el centro de la parte superior del yugo y muy cerca del terminal de baja tensión del devanado de la mitad para transformadores trifásicos
- No ventilado tipo seco: centro de la superficie de la cubierta superior y en el centro de un costado superficial

2.9.3. Medición de la resistencia en frío

Las mediciones se toman en todas las fases de los devanados tanto del primario como del secundario. Normalmente las medidas son tomadas cuando el transformador esta sin energizar. Cuando se encuentre una discrepancia entre en las estimaciones de la resistencia en frío de la máquina, se permite que las medidas sean tomadas luego de estar en operación y cuando alcance el valor de temperatura ambiente.

2.9.4. Medición de la resistencia en caliente

Se puede afirmar que un transformador tiene una relación de temperatura superficial de operación constante, en relación a la temperatura ambiente, si la variación de temperatura no excede la preestablecida como base en más de 2 grados durante un periodo consecutivo de 3 horas. En el momento en el que las elevaciones de temperatura llegan a ser constantes, la tensión y corriente de la prueba serán removidos, si el transformador bajo prueba posee ventilación artificial esta debe ser suspendida [1].

Las medidas se toman en todas las bobinas de cada fase y se graficará una curva de enfriamiento de todos los devanados de cada fase. La primera medición será tomada lo más rápido posible después de la desconexión de la maquina del transformador, pero no antes de que la corriente de la prueba sea estable. La primera medida de la resistencia del devanado de una fase usada para la elaboración de la curva de enfriamiento, se debe tomar en un tiempo menor de 6 minutos.

En la transferencia de las puntas de los medidores, de una bobina a otra, se debe mantener la misma polaridad con respecto a las puntas de los elementos de medida y a los bornes del transformador.

Se recomienda la siguiente secuencia para la medición de la resistencia en caliente transformadores trifásicos luego de la desconexión, para transformadores conectados en delta y en Y

- a. Una medición de resistencia en cada uno de los tres terminales secundarios: $X1-X2$, $X2-X3$, y $X3-X1$. si el transformador esta conectado en Y, se deben realizar mediciones de resistencia ente los terminales: $X1-X0$, $X2-X0$ y $X3-X0$.
- b. Una medida de resistencia los entre pares de los terminales primarios, de la siguiente manera: $H1-H2$, $H2-H3$ y $H3-H1$. Para conexiones en Y, se toman mediciones de resistencia en $X1-X0$, $X2-X0$ y $X3-X0$.
- c. Para elaborar la curva de enfriamiento de la resistencia, se deben tomar tres medidas adicionales espaciadas en un tiempo de 1 minuto, estas son magnitudes adicionales a las presentadas en el inciso b.
- d. se pueden tomar medidas adicionales para mejorar la precisión en el momento de realizar la gráfica de la resistencia en función del tiempo.

Un procedimiento similar al mencionado anteriormente puede ser usado para efectuar las pruebas a transformadores monofásicos de múltiples devanados.

Las curvas resistencia vs. Tiempo, obtenidas en una fase tanto del devanado primario como secundario, serán usadas para determinar la corrección después de la desconexión de la maquina, con el fin de obtener la curva característica en las otras fases.

2.9.5. Cálculo de la elevación promedio de temperatura del devanado

Esta característica se determina a partir de mediciones de resistencia realizadas entre cada par de terminales según el procedimiento descrito en la sección 2.9.4.

La temperatura promedio del devanado, medida en un par de terminales correspondiente a una bobina de fase, se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$T = R / R(T_k + T_0) - T_k \quad (2-12)$$

o

$$T = R / R(T_k + T_0) - T_k \quad (2-13)$$

Donde, la elevación de temperatura promedio se calcula mediante:

$$T_r = T - T_a$$

Donde

T Es la temperatura promedio del devanado entre un par de terminales correspondiente a la resistencia en caliente R

R_0 Es la resistencia en frío entre un par de terminales, la cual está dada en ohms

T_0 Es el valor de la temperatura ($^{\circ}C$) correspondiente a la resistencia en frío, R_0

T_r Es el valor de elevación de temperatura promedio de un par de terminales, esta dada en $^{\circ}C$

T_a Es el valor de la temperatura ambiente correspondiente a la resistencia en caliente, R .

R Es el valor de la resistencia en caliente de un par de terminales, esta dada en Ohm.

T_k 234.5 °C para cobre

T_k 225 °C para aluminio.

Otros valores para T_k pueden ser usados durante la prueba si es justificable, el valor de T_k para el aluminio puede ser hasta de 240 °C para aleaciones de aluminio.

2.9.6. Factores de corrección

Los siguientes factores de corrección deben ser aplicados al valor promedio de la elevación de temperatura del devanado T_r :

2.9.6.1. Corrección por temperatura ambiente del aire.

Cuando la temperatura ambiente del aire durante la prueba es diferente a T_{ra} (usualmente 30 °C) la elevación promedio de temperatura T_r , debe ser corregida mediante la siguiente ecuación:

$$T_{cl} = T_r [(T_r + T_k + T_{ra}) / (T_r + T_k + T_a)]^n \quad (2-14)$$

Donde

T_{cl} Es el valor promedio de la elevación de temperatura corregida por temperatura ambiente.

T_r Es el valor medido de la elevación promedio de temperatura, esta dado en °C .

T_a Es la temperatura ambiente, en °C , al finalizar el ensayo,

T_{ra} Es la temperatura ambiente a potencia nominal de la máquina, usualmente es de $30^{\circ}C$.

T_k $234.5^{\circ}C$ para cobre

T_k $225^{\circ}C$ para aluminio.

n Es: 0.80 para auto refrigeración

1.0 ventilación por aire forzado

0.7 para transformadores selladas o no ventiladas

Se aplica el mismo criterio que en la sección 2.8.5 para T_k

2.9.6.2. Corrección debido al uso de corriente diferente a la nominal durante la prueba.

Si en la realización de la prueba se usa un corriente diferente de la nominal, se requiere corregir el valor de la elevación de la temperatura, este nuevo valor (corregido) se calcula con la siguiente ecuación.

$$T_{c2} = T_{c1} \left(\frac{I_r}{I_t} \right)^{2n} \quad (2-15)$$

Donde

T_{c1} Es el valor promedio de la elevación de temperatura corregida por temperatura ambiente.

T_{c2} Es el valor promedio de la elevación de temperatura del devanado corregido para la corriente nominal $^{\circ}C$

I_t Es la corriente de la prueba.

I_r Es la corriente nominal de la máquina.

n Es: 0.80 para auto refrigeración ,1.0 para ventilación por aire forzado y 0.7 para transformadores sellados o no ventilados

Esta corrección puede ser usada cuando la corriente y frecuencia con la que se realizó la prueba no difiere en más de 10% de los valores nominales de la máquina

2.9.6.3. Altitudes superiores a 1000m. Sobre el nivel del mar

Cuando las pruebas son realizadas a una altitud mayor a 1000m sobre el nivel del mar, se deben aplicar las adecuadas correcciones

Si un transformador se le realiza la prueba a una altitud de 1000m o menos, y esta máquina debe operar a una altura mayor, el valor promedio de la elevación de temperatura estará dado por la siguiente ecuación.

$$T_{c3} = T_{c2} (1 + [A + 1000 / 1000] F) \quad (2-16)$$

Donde

T_{c3} Es el valor promedio de elevación temperatura para la mayor altitud.

T_{c2} Es el valor promedio de la elevación de temperatura del devanado corregido para la corriente nominal $^{\circ}C$.

A Es la altitud sobre el nivel del mar en metros

F Es un factor empírico dado en la siguiente tabla

Tipo de enfriamiento	Factor empírico F
Para transformadores tipo seco, autoventilados	0.005
Para transformadores tipo seco, con ventilación auxiliar forzada	0.006
Para transformadores tipo seco con ventilación auxiliar	0.010

Tabla 6 valores típicos del factor empírico de enfriamiento F

2.9.7. Métodos para la determinación de la elevación de temperatura

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de prueba que se realizan a diferentes tipos de transformadores tipo seco

Método de prueba	Ventilación		Sellados o sin ventilación
	AA	FA ²	
Actual loading	X	X	X
Loading back (Método de oposición)	X	X	X
Pérdidas separadas de excitación y corriente nominal	X	X	
Impedancia KVA	X	X	X
Rated current plus additive factor	X	X	

Tabla 7 Métodos de prueba para transformadores de tipo seco.

2.9.7.1. Método 1. (*Actual loading*)

Este es el método más preciso de todos los otros, no obstante, los requerimientos de energía son muy altos para transformadores grandes. Los transformadores de baja potencia se pueden probar bajo condiciones de carga (puede ser un reóstato, un banco de lámparas o métodos similares)

2.9.7.2. Método 2 (*loading back*)

Este es un método básico para probar transformadores tipo seco y puede ser utilizado cuando más de una máquina esta disponible para el ensayo.

Para llevar a cabo este ensayo se requiere de una mayor cantidad de equipos de prueba y equipo auxiliar, debido a estos requerimientos, la implementación de este método de prueba es más difícil de realizar cuando el tamaño del transformador se incrementa, el método se explica a continuación

- **Transformadores monofásicos**

El método se aplica a transformadores que tengan los mismos valores nominales, se deben conectar en paralelo las bobinas del alta tensión de los dos transformadores al igual que los devanados de baja tensión, aplicando tensión nominal a frecuencia nominal en alguno de los terminales de las bobinas.

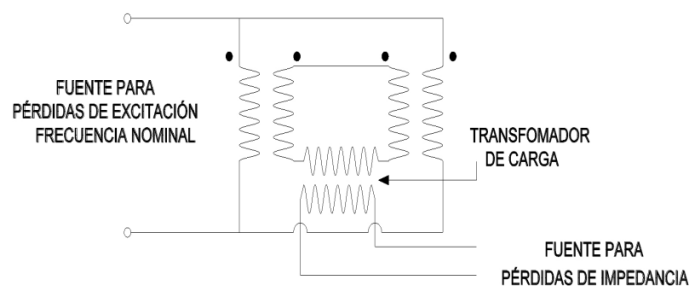


Figura. 21. Dos transformadores monofásicos en oposición

A través de la fuente se debe aplicar una tensión capaz de producir la corriente nominal en los devanados.

La corriente de la prueba debe tener la frecuencia nominal ($\pm 10\%$), si la corriente no está a valor nominal, se debe efectuar la corrección correspondiente enunciada en la sección 2.9.6.1.

El circuito se cerrará cuando se alcance la estabilidad del sistema, se debe medir la resistencia del devanado y calcular el valor promedio de la elevación de temperatura por alguno de los métodos descritos en la sección 2.9

- **Transformadores trifásicos**

Transformadores idénticos pueden ser probados mediante este método, conectando los devanados de alta y baja tensión en paralelo como se muestra en la siguiente figura.

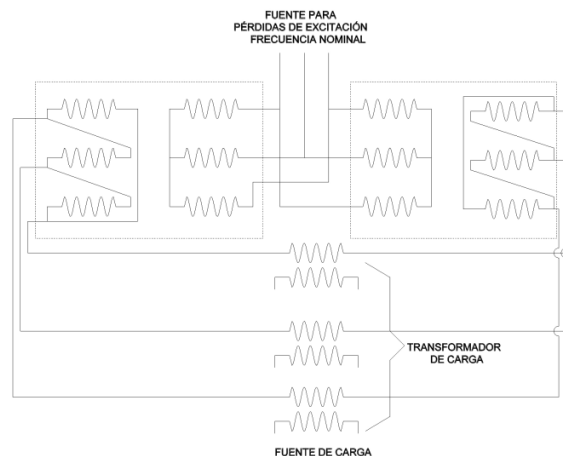


Figura. 22. Conexión de dos transformadores Y-Delta

Para excitar el circuito se debe aplicar tensión nominal a frecuencia nominal en uno de los conjuntos de bobinas que están puestas en paralelo, haciendo circular la corriente nominal en los devanados que están conectados en paralelo. Esto puede conseguirse usando una fuente trifásica de tensión de carga. La corriente que circule debe estar a frecuencia nominal ($\pm 10\%$) y se debe efectuar la corrección correspondiente enunciada en la sección 2.8.6.2

El circuito se cerrará cuando se alcance la estabilidad del sistema, se debe medir la resistencia del devanado y calcular el valor promedio de la elevación de temperatura tal y como se menciona en las secciones 2.8.5 y 2.8.4

2.9.7.3. Método de pérdidas separadas de excitación y corriente nominal

Este método permite la medición directa de la potencia en Watts y la corriente que están siendo usadas durante la prueba. La ventaja de este método es que permite un montaje mas sencillo con un menor consumo de energía.

El método es conveniente para transformadores de gran tamaño y es igual de satisfactorio para pequeños transformadores.

Las pruebas de temperatura de transformadores individuales tipo seco pueden ser realizadas utilizando las elevaciones obtenidas en dos ensayos separados:

El primero solamente con corriente, y el otro con apenas las pérdidas de excitación, posteriormente se calculan las elevaciones de temperatura en los devanados usando la siguiente ecuación:

$$T_t = T_c \left[1 + \left(\frac{T_e}{T_c} \right)^{1.25} \right]^{0.80} \quad (2-17)$$

Donde

T_t Representa la elevación total de temperatura del devanado para la corriente y excitación nominal del núcleo, si es necesario este valor debe ser corregido.

T_c Es el valor promedio de elevación de temperatura del devanado de alta o baja tensión, medida después de que la corriente nominal de plena carga fluye en un devanado mientras que el otro esta puesto en corto circuito. El valor de T_c debe ser corregido si la prueba no se realizó con la corriente nominal. El procedimiento para la corrección es el que se indica en la sección 2.8.6.2

T_e Es la elevación de temperatura del devanado de alta o baja tensión, medido inmediatamente después de que el circuito es energizado con la excitación normal en el núcleo.

T_e Puede ser determinado de transformadores que tengan similares valores nominales de salida de potencia tensión y corriente para un valor de excitación igual al transformador bajo prueba

2.9.7.4. Método de impedancia

Un transformador trifásico o un banco de transformadores monofásicos pueden ser probados mediante el esquema que se muestra en la siguiente figura 23. en donde los devanados tanto de alta como de baja, deben estar conectados en delta para la realización de la prueba.

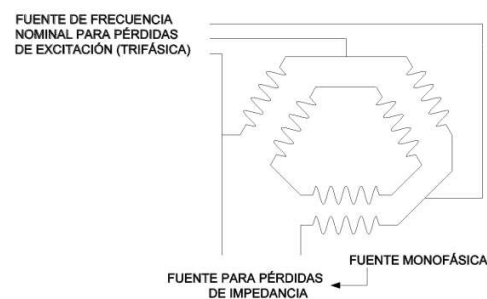


Figura. 23. Conexión Delta- Delta para un transformador trifásico o tras transformadores monofásicos

Durante el ensayo se debe aplicar tensión trifásica y frecuencia nominal en uno de los devanados. Una esquina de cualquier conexión delta será abierta y se conectara un voltaje auxiliar de una fuente de tensión monofásica.

Esta tensión se ajusta hasta que circule la corriente nominal a través de los devanados. La frecuencia de la corriente debe ser la nominal ($\pm 10\%$)

2.10. PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

Los procedimientos de prueba que se mencionan a continuación se realizan con el fin de determinar la capacidad mecánica de un transformador, para soportar un cortocircuito

Los siguientes procedimientos, se aplican a transformadores de potencia tipo seco de más de 1kVA, estas máquinas se clasifican de la siguiente manera [1]:

Categoría	Monofásico (kVA)	Trifásico(kVA)
I	1-500	15-500
II	501-1667	501-5000
III	1668-10000	5001-30000

Tabla 8. Categorías de transformadores para potencia mayor de 1 kVA

El valor nominal de potencia aparente de un transformador, es el mínimo valor de potencia que indica la placa de la máquina para los devanados principales.

Para autotransformadores, la categoría será determinada por un equivalente bifásico como se define a continuación:

El equivalente bidevanado nominal de un transformador multi-devanado o de autotransformadores, es la mitad de la suma los valores nominales de todos los devanados (como se define en IEEE Std C57.12.80-1978).

2.10.1. Procedimientos de prueba para cortocircuitos

2.10.1.1. Transformadores bidevanados y autotransformadores sin devanados terciarios

El cortocircuito puede ser aplicado en el primario o secundario del transformador, eso depende de la disponibilidad de la fuente de tensión.

Se recomienda realizar la falla de acuerdo con alguno de los siguientes métodos:

- ✓ cerrar el interruptor en los terminales en donde se quiere aplicar el cortocircuito al transformador que esta previamente energizado.
- ✓ Cerrar el interruptor en la terminal de la fuente para suplir la potencia al transformador que esta previamente cortocircuitado,

La tensión con la que se excita el transformador, no puede exceder 1.1 veces la tensión nominal del devanado o del tap que se esta energizando. Si los devanados del transformador están en la misma columna, se deba energizar la bobina que se encuentre más lejos del núcleo, esto con el fin de evitar la posible saturación del núcleo y la corriente de inrush (irrupción), la cual se superpone a la de cortocircuito durante los primeros ciclos. Para transformadores tipo Shell o core

2.10.1.2. Tipos de fallas

El tipo de falla aplicada, dependerá de la fuente de energía que este disponible para la realización del ensayo. Los siguientes son algunos tipos de fallas que se recomiendan hacer [1]

- a. Fuente trifásica: cortocircuito trifásico.
- b. Fuente trifásica: cortocircuito de fase a tierra.
- c. Fuente monofásica: cortocircuito trifásico simulado. (para devanados conectados en Y, se deben unir dos terminales, la falla, o la fuente, se aplica entre esa unión y la terminal restante. Para devanados conectados en delta, aplicar la fuente o la falla entre dos terminales de línea sin conectar la terminal sobrante. Esto debe ser repetido para cada una de las tres fases).

- d. Fuente monofásica: corto circuito monofásico en una fase a la vez (aplica a todos los transformadores monofásicos).

2.10.1.3. Transformadores multidevanados y autotransformadores

Para transformadores con más de dos devanados o autotransformadores con terciario o devanados de regulación, la realización de las pruebas de cortocircuito deben tener un cuidado especial, donde el diseñador junto con el personal que efectúan la prueba deben decidir el tipo de condiciones de falla.

La prueba se realiza de la siguiente manera:

Con el devanado primario conectado a la fuente y cada uno de los devanados secundarios para los transformadores y el devanado común para los autotransformadores deben estar cortocircuitados para la realización de la prueba.

Para autotransformadores con devanados terciarios, se pueden tener en cuenta otro tipo de fallas, como: fase a tierra o doble fase a tierra, en esta prueba se conecta la fuente de potencia a los devanados serie, común o ambos.

La corriente máxima de falla para cada devanado, se determinara de acuerdo al capítulo 7 de IEEE C57.12.01-1998.

2.10.2. Conexiones para el ensayo

2.10.2.1. Prueba trifásica

Para transformadores trifásicos bidevanados, se prefiere utilizar una fuente de potencia trifásica para obtener mejores resultados debido a la utilización de un sistema balanceado.

La carcasa del transformador, el neutro de los autotransformadores y el neutro de las conexiones en Y se deben aterrizar cuando sus terminales están disponibles. Se recomienda que la corriente de la conexión a tierra sea supervisada.

2.10.2.2. Prueba monofásica

- **transformadores trifásicos**

En el momento en el que no se cuente con una fuente de potencia trifásica con la suficiente capacidad que se necesita durante la prueba, se puede utilizar una fuente de potencia monofásica.

- **Transformadores monofásicos**

La prueba de cortocircuito para transformadores monofásicos, se puede realizar con una fuente de potencia monofásica siempre y cuando la tensión aplicada al transformador no exceda en 1.1 veces la tensión nominal del devanado o del tap.

2.10.3. Requerimientos de la prueba

2.10.3.1. corriente simétrica para transformadores bidevanados.

La magnitud de la corriente de cortocircuito depende de la clasificación del transformador:

Categoría I: la magnitud de la corriente debe ser limitada solamente por la impedancia del transformador, pero no debe exceder 25 veces la corriente base de la máquina.

Categoría II y III: La corriente de cortocircuito simétrico no debe exceder 25 veces la corriente base, a continuación se muestra el procedimiento a seguir para su cálculo:

- a. El cálculo de la corriente será realizado basándose en la suma de la impedancia del transformador y un valor adicional de impedancia especificada por el usuario.
- b. En ausencia de información del sistema por parte del usuario, el conjunto de corrientes simétricas de cortocircuito disponibles para el sistema será asumido como 36 kA para Tensiones nominales del sistema de 36.5 kV o inferiores.

Para transformadores bidevanados, el valor de corriente simétrica del devanado se determinará según las siguientes ecuaciones [2]:

$$I_{SC} = \frac{I_R}{Z_T + Z_s} \quad (2-18)$$

Donde

- I_R Es la corriente nominal de acuerdo del devanado completo o del tap (en amperes rms)
- Z_T Es la impedancia del transformador en el devanado completo o en el tap, este valor esta dado en por unidad sobre la misma base de potencia aparente que I_R .
- Z_s Es la impedancia del sistema o de los aparatos conectados permanentemente, este valor esta dado en por unidad sobre la misma base de potencia aparente que I_R

La magnitud de la corriente de cortocircuito depende de la clasificación del transformador:

Categoría I: la magnitud de la corriente debe ser limitada solamente por la impedancia del transformador, pero no debe exceder 25 veces la corriente base de la máquina.

Categoría II y III: La corriente de cortocircuito simétrico no debe exceder 25 veces la corriente base, a continuación se indica el proceso para su deducción

- c. El cálculo de la corriente será realizado basándose en la suma de la impedancia del transformador y un valor adicional de impedancia especificada por el usuario.
- d. En ausencia de información del sistema por parte del usuario, el conjunto de corrientes simétricas de cortocircuito disponibles para el sistema será asumido como 36 kA para Tensiones nominales del sistema de 36.5 kV o inferiores.

2.10.3.2. Corriente asimétrica

El pico de corriente asimétrica del primer ciclo $I_{SC}(pk\ asym)$, que el transformador tiene que soportar, se calcula de la siguiente manera:

$$I_{SC}(pk\ asym) = KI_{SC} \quad (2-19)$$

Donde

$$K = \left\{ 1 + \left\langle e^{-\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right)\frac{r}{x}} \right\rangle \sin(\phi) \right\} \sqrt{2} \quad (2-20)$$

$\phi = \arctan(x/r)$ en radianes

x/r es la impedancia total, que limita la corriente de falla del transformador.

2.10.3.3. Numero de pruebas

Cada fase del transformador debe ser probada un total de seis veces cumpliendo con los requerimientos para la corriente simétrica que se enunciaron en la sección

2.10.3.1, dos de los seis ensayos en casa fase deben satisfacer los requerimientos de corriente asimétrica mencionados en 2.10.3.2

2.10.3.4. Medición de la tensión

Para obtener mayor información acerca de la tensión en lado de la fuente de potencia, se deben instalar osciloscopios para monitorizar y registrar la tensión. El método preferido usa transformadores de potencial con una relación de transformación adecuada acoplados a los osciloscopios. Los transformadores de potencial se conectarán línea a línea para conexiones del primario en delta y línea a neutro para conexión en Y si el neutro es accesible. En todos los casos los osciloscopios deben estar calibrados para tener una precisión de $\pm 5\%$.

Cuando el cortocircuito es aplicado antes de energizar el transformador, la medición de voltaje se debe realizar lo más cerca posible de las terminales del primario del transformador bajo prueba. Cuando la prueba se realiza energizando primero el transformador para luego cortocircuitarlo, la medición de la tensión debe ser realizada en el lado de la fuente del interruptor primario.

2.10.3.5. Medición de la corriente

Para obtener un mayor numero de datos, se requieren osciloscopios para la medición de corriente en cada fase del transformador al cual se le esta efectuando la prueba. El método más usado utiliza transformadores de corriente, con una relación de transformación adecuada, que serán acoplados a los osciloscopios. Cuando los medidores de corriente pueden conectarse en el secundario aterrizado del transformador y para pruebas monofásicas con la línea que está puesta a tierra, entonces las corrientes en paralelo pueden usarse para medir las corrientes de fase. Las conexiones desde el secundario del transformador de corriente o de los acoples, a los osciloscopios debe ser realizado con conductor coaxial blindado.

Pera estimar la magnitud de la corriente de la prueba, las mediciones de corriente se realizan normalmente en las líneas de fase para transformadores conectados en Y. cuando este devanado es el que esta conectado a la fuente de potencia, las corrientes de fase son medidas directamente, si la conexión Y esta en el secundario del transformador, se debe tener en cuenta la relación de transformación de la máquina para el calculo de la corriente.

Los osciloscopios utilizados para realizar las mediciones de la corriente deben estar calibrados para tener una precisión de $\pm 5\%$. El valor de la magnitud de las corrientes debe ser medido en los terminales del transformador, que están conectados a la fuente de potencia.

El pico de corriente simétrica será establecida como la mitad del valor pico a pico en el punto medio del segundo ciclo de la onda de corriente de la prueba. Si a la fuente de tensión se le conecta un devanado del transformador que esta en Y, la medida del pico del primer ciclo de la corriente asimétrica será medido directamente del diagrama de las corrientes en las terminales mostrado por el osciloscopio. Si el devanado del transformador que esta conectado a la fuente de tensión esta en delta, la medida del pico del primer ciclo de la corriente asimétrica, no puede determinarse directamente de las mediciones de los terminales en la fuente, para esto se puede aplicar el siguiente procedimiento alternativo [1]:

- a) medida del pico del primer ciclo de la corriente asimétrica en las gráficas obtenidas del osciloscopio en la terminales de la falla, si el devanado en falla es conectado en Y.
- b) si todos los devanados están conectados en delta, conectar transformadores de corriente con las especificaciones apropiadas dentro del devanado en delta que esta conectado a la fuente, la corriente pico del primer ciclo de la corriente asimétrica se medirá de los diagramas obtenidos con los osciloscopios.

Las corrientes medidas, simétricas o asimétricas no deben ser menores que el 95% de los valores calculados en 2.10.3.1 y 2.10.3.2

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas las cuales transforman energía eléctrica de un circuito a otro con la misma frecuencia pero a diferentes niveles de tensión y de corriente. Gracias a esta propiedad los transformadores son usados como componente fundamental en los sistemas de potencia, desde la generación, transmisión hasta la distribución, puesto que permite reducir las pérdidas en la transmisión de la energía eléctrica, dando como resultado un proceso mas eficiente, convirtiéndose en una pieza clave para el acople desde los puntos de generación hasta los puntos de utilización de la energía eléctrica.

3. MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina de corriente continua es un dispositivo eléctrico que transforma energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Este tipo de máquina es empleada en múltiples aplicaciones, básicamente como motor, gracias principalmente a que:

- Posee un amplio rango de velocidades, las cuales pueden ser ajustadas de manera continua y con una alta precisión en su control.
- Presentan una característica de torque-velocidad variable.
- Es posible acelerarlas, desacelerarlas y cambiar la dirección de giro del rotor.
- Tienen la posibilidad de realizar un frenado regenerativo.

Este tipo de maquina esta constituido por dos piezas fundamentales, ellas son el estator y el rotor, el estator esta construido con un núcleo macizo o laminado, sin embargo, no es necesario que sea laminado debido a que el flujo magnético a través de él es constante y por ello no aparecen las pérdidas por efecto Foucault. Por otro lado, el flujo en el entrehierro se distribuye uniformemente gracias a la acción de la fuerza magneto motriz del devanado de campo. La estructura de soporte de la maquina es conocida como la carcasa y es el lugar en el que se ubica la placa con los terminales de conexión.

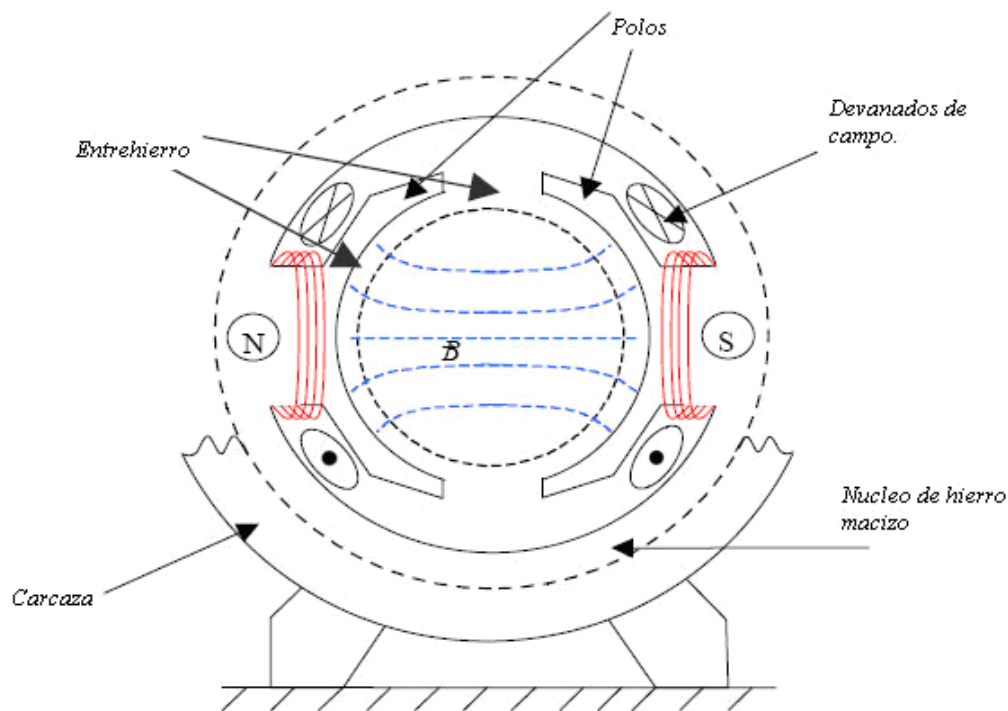


Figura. 24 Esquema del estator de una maquina de corriente continua.

El rotor se construye a partir de un núcleo de hierro laminado, esto se debe a que es atravesado por un flujo alterno y allí se producen pérdidas por efecto de histéresis y de corrientes de Foucault. El devanado de armadura esta constituido por bobinas que se introducen en ranuras hechas en las láminas que constituyen el rotor. Los terminales de las bobinas se conectan a las delgas del colector, mediante un contacto móvil, permitiendo la entrada o salida de corriente del devanado de armadura.

La configuración del devanado del rotor suele adoptar diversas formas, cada bobina puede ser independiente o interconectarse con las demás con el fin de aprovechar de un modo más eficiente las Tensiones inducidas en ellas¹⁴.

¹⁴ Para conocer mas a fondo el funcionamiento de una máquina de corriente continua revisar la literatura existente acerca de máquinas eléctricas.

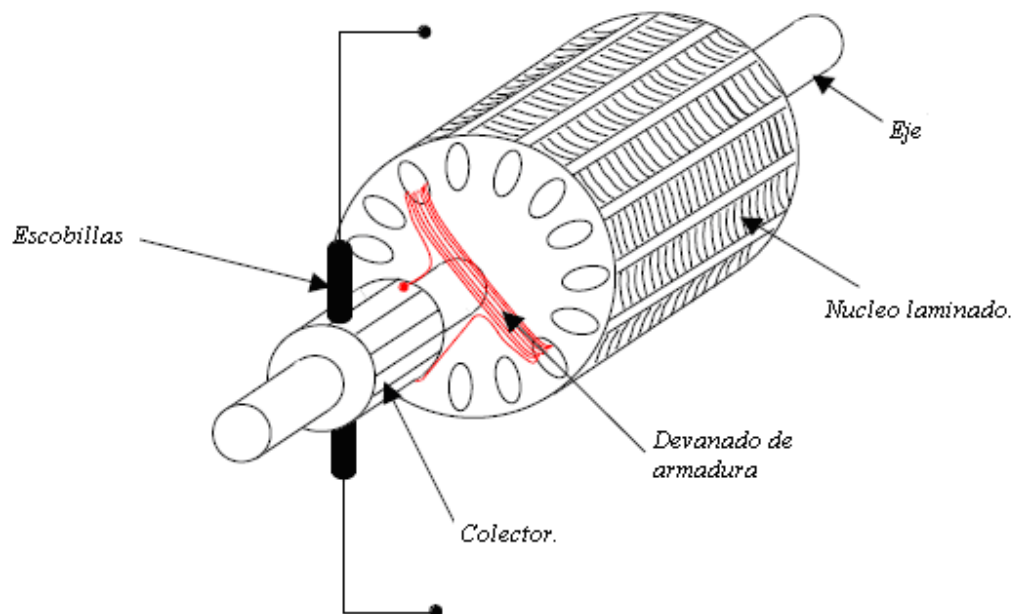


Figura. 25 Esquema del rotor de una maquina de corriente continua.

En las secciones siguientes de este capítulo se abordaran los diferentes tipos de prueba recomendados por los estándares IEEE para determinar las características de operación de las máquinas de corriente continua.

3.1. PRECAUCIONES PARA ANTES DE EMPEZAR

Debido a las corrientes, Tensiones y fuerzas encontradas en las máquinas de corriente continua, se hace necesario tomar algunas precauciones de seguridad antes de realizar cada uno de los ensayos en dichas máquinas, esto con el fin de garantizar la integridad de los equipos así como la del personal encargado de la prueba.

3.1.1. Ensayos para motores y generadores de corriente continúa diseñados para operar esencialmente como libres de rizado (ripple-free)

En este tipo de operación de las máquinas y de acuerdo con estas pruebas, el valor pico a pico de la corriente debe ser menor que el 6%, o el valor rms menor que el 2%, del cambio en la corriente de la máquina en las condiciones previstas para el ensayo.

3.1.2. Ensayos para motores de corriente continua diseñados para usarse con fuentes de potencia rectificadas

Cuando un procedimiento de prueba es aplicado a un motor de corriente continua alimentado por una fuente rectificada sin conocer lo estipulado anteriormente, el procedimiento se debe identificar con el siguiente enunciado: “con fuente rectificada.....”

3.1.3. Otros procedimientos de prueba

Existen otros procedimientos de prueba además de los descritos en este documento. Cuando más de un procedimiento pueda ser usado, las condiciones de operación de la máquina y el grado de precisión que se desee serán quienes determinaran el procedimiento a usar.

3.2. PRUEBAS

3.2.1. Generalidades

Los ensayos descritos en este documento tienen como propósito examinar el desempeño de las máquinas de corriente continua. Estos, están divididos en 4 categorías:

- pruebas preliminares.
- pruebas de determinación del desempeño.
- pruebas de temperatura.

- pruebas varias.

Las pruebas preliminares no solo incluyen las pruebas incluidas en el grupo de ensayos estáticos, estos ensayos generalmente se realizan antes de las pruebas de desempeño.

Las pruebas de desempeño y de temperatura se realizan con el propósito de determinar el desempeño de las máquinas de CC.

Las pruebas varias son realizadas para buscar información pertinente específicamente a la máquina que se esta bajo prueba.

Las máquinas de corriente continua se analizan alrededor de su punto de operación [6]. Algunos ensayos provenientes de los cuatro grupos anteriores en ocasiones se incorporan en 3 grupos de ensayos, pero estos grupos no necesariamente son considerados pruebas estándar.

3.2.2. Pruebas estáticas

El conjunto de pruebas estáticas generalmente incluye:

- medida de la resistencia de los devanados.
- medidas en los entre hierros.
- polaridad y caída de impedancia en las bobinas del devanado paralelo.
- resistencia eléctrica de aislamiento.
- pruebas de alta tensión.

3.2.3. Pruebas completas

Este conjunto de pruebas generalmente incluye las pruebas estáticas y los siguientes ensayos:

- vibraciones.
- saturación magnética.
- conmutación
- regulación
- pérdidas y eficiencia
- pruebas de temperatura.

3.2.4. Pruebas de rutina

Estas pruebas están incluidas en un estándar específico que se aplica a máquinas de tamaño particular.

3.2.5. Métodos alternativos

Para muchas de las pruebas propuestas, se describen métodos alternativos que son apropiados para los diferentes tamaños y tipos de máquina de corriente continua y para las diferentes condiciones de operación encontradas durante la prueba. En algunos casos, se indica cual es el método mas apropiado para cada caso particular.

3.3. MEDIDAS ELÉCTRICAS Y FUENTES DE POTENCIA PARA TODOS LOS PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA

3.3.1.1. Selección de los instrumentos

Se pueden utilizar medidores analógicos o digitales para realizar estas pruebas. Algunos factores que afectan la precisión, particularmente en instrumentos no electrónicos o análogos son los siguientes: el rango, las condiciones y la calibración de los instrumentos. Si la precisión de un instrumento es expresada como un porcentaje de una escala total, el rango escogido en el instrumento no

debe ser más bajo que el valor a medir. El instrumento debe calibrarse periódicamente y dependiendo de la importancia de los resultados de la prueba los instrumentos se deben calibrar antes y después de realizar el ensayo. Cuando varios instrumentos son conectados en el circuito simultáneamente se deben realizar algunas correcciones adicionales a los resultados [6].

Los instrumentos electrónicos son generalmente mucho más versátiles y poseen una impedancia de entrada mucho mayor en comparación con los instrumentos no electrónicos. Esta alta impedancia de entrada reduce la necesidad de realizar correcciones a las lecturas de corriente dadas por el instrumento. Sin embargo, una alta impedancia de entrada, hace que los instrumentos sean más susceptibles al ruido. Fuentes comunes de ruido son: acoplamientos inductivos o electrostáticos en sistemas de potencia, impedancias acopladas mutuamente, nodos de referencia inadecuados e interferencias conducidas a través de los conductores de las líneas de transmisión. Una buena práctica requiere de la utilización de conductores de señal blindados, el blindaje debe ser puesto a tierra en un solo punto y es recomendable mantener los conductores de señal tan lejos como sea posible de los conductores de las líneas de transmisión. Todas las partes metálicas deben ponerse a tierra con el fin de garantizar una práctica segura. Los requerimientos de calibración son similares para el caso en que se usen instrumentos de medida no electrónicos.

En una fuente rectificada, los valores promedio o DC de las Tensiones y corrientes en la armadura y en el devanado de campo, pueden medirse usando instrumentos que usen el principio D'Arsonval¹⁵, u otro tipo de instrumentos, incluyendo instrumentación digital que provee lecturas del verdadero valor promedio. Los valores rms pueden medirse con instrumentos electrodinámicos u otro tipo de instrumento incluyendo en estos instrumentos digitales que capturen lecturas del verdadero valor rms. Instrumentos de corriente alterna del tipo usado en rectificadores solo sensan una porción de las señales de corriente o de tensión e

¹⁵ El principio D'Arsonval se encuentra descrito en el capítulo 1 del presente documento.

instrumentos calibrados bajo la suposición de que las señales a medir son sinusoidales puras no deben ser utilizados, esto con el fin de evitar errores introducidos en las mediciones. Estos errores se deben a que la forma de onda de las señales a medir no es senoidal sino que se encuentra distorsionada debido a fenómenos como la reacción de armadura.

Las observaciones en el osciloscopio de las señales de tensión y de corriente son recomendadas para asegurar que las formas de onda son las esperadas.

Las componentes de corriente alterna de las Tensiones y corrientes de armadura y campo pueden ser medidas usando instrumentación adecuada y en combinación con el valor promedio y el valor rms de la variable. Por ejemplo, los valores de las componentes de la corriente de armadura se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{ac}^2} \quad (3-1)$$

En donde:

I_{rms} Es el valor rms de la corriente

I_{dc} Es el valor promedio de la corriente

I_{ac} Es el valor de la componente de corriente alterna de la corriente de armadura.

Si un transformador de corriente se usa para bloquear la componente DC de la corriente, este debe ser de un tamaño suficiente para evitar la saturación magnética que resulta del paso de la corriente directa a través del devanado primario. Si un devanado para desviar la corriente continua es usado para evitar la saturación magnética del transformador, es necesario limitar la corriente AC que pasa por el devanado auxiliar en un valor menor al 2% de la corriente AC que circula por el devanado primario del transformador. La magnitud, la forma de onda

y la relación de fase de la corriente en el secundario debe observarse con un osciloscopio y compararse con la corriente primaria.

Si se usa un condensador para bloquear la componente DC de la tensión, este debe ser de un tamaño adecuado para que la caída de tensión AC a través de él sea menor al 2% de la componente AC de la tensión medida.

3.3.2. Medidas de tensión

Las medidas de tensión en la máquina deben tomarse con las puntas de prueba conectadas en los terminales de la máquina. Si las condiciones de operación no permiten esta conexión, el error cometido debe evaluarse y se deben realizar las respectivas correcciones a las lecturas tomadas. Las pruebas se deben realizar con Tensiones cercanas a la nominal de la máquina. Si la tensión en terminales es ligeramente diferente a la tensión nominal, esta diferencia debe ser tomada en cuenta y se deben realizar las correcciones respectivas a las características de la máquina calculadas. En una fuente rectificada, la entrada de tensión AC al rectificador debe especificarse en un valor entre +2%, - 0% [6].

3.3.3. Medidas de corriente

Cuando la corriente a medir está sin un rango de ampermetro adecuado, un ampermetro se puede insertar directamente en el circuito. Transductores de corriente pueden usarse cuando el rango de los ampermetros es excedido. También se pueden usar amplificadores de aislamiento para propósitos de seguridad y para hacer compatibles los demás instrumentos. En todos los casos, la inductancia del ampermetro o transductor no debe afectar apreciablemente las características de la máquina o del circuito a medir.

La corriente requerida por los dispositivos de protección usados durante la prueba no deben afectar considerablemente los resultados de la misma. En los

procedimientos de prueba para máquinas de corriente continua se recomienda que esos dispositivos sean conectados de tal manera que se necesite una corrección mínima de los resultados.

En un rectificador de potencia, el valor rms de la corriente de armadura o de la componente AC de la corriente de armadura, o ambas, deben ser medidas.

3.3.4. Medidas de potencia

La potencia eléctrica es generalmente calculada como el promedio en el tiempo del producto instantáneo de la tensión y la corriente. La lectura directa de un wattmetro puede entonces usarse para este fin. Si se requiere una exactitud elevada, se deben realizar correcciones debido a las pérdidas en los instrumentos, las conexiones de prueba y los dispositivos de protección [6].

3.3.4.1. Entrada de potencia en el circuito de la armadura

En un rectificador de potencia, la entrada de potencia en el circuito de la armadura puede ser medida directamente usando un wattmetro u otras medidas en donde se calcule el promedio en el tiempo del producto instantáneo de la tensión y de la corriente. Alternativamente, las componentes DC y AC de la potencia puede ser medidas separadamente tal y como se describe en los siguientes puntos 1 y 2:

1. La componente de DC de la potencia de entrada del circuito armadura es el producto de los valores medios de la tensión y la corriente en el circuito de armadura medidos con instrumentos de lecturas de valores medios.
2. La componente AC de la potencia de entrada del circuito de armadura es el valor promedio del producto de los componentes AC instantáneas de la tensión y de la corriente. Puede medirse bloqueando la componente DC de las señales de tensión y corriente. Las precauciones

descritas anteriormente se relacionan con la fidelidad de las señales de tensión y de corriente con las cuales se espera realizar la medición de potencia. Adicionalmente, se puede determinar la potencia mediante la observación simultánea en un osciloscopio.

3.3.4.2. Entrada de potencia al devanado paralelo

La entrada de potencia al devanado paralelo usualmente puede tomarse con una exactitud adecuada como el producto del valor medio de la tensión y el valor promedio de la corriente. Si la corriente del devanado no es libre de rizado como se definió anteriormente, la potencia en el devanado paralelo deberá ser calculada como el producto del valor rms de la corriente del devanado paralelo elevada al cuadrado y el valor DC de la resistencia.

3.3.5. Fuentes de potencia

3.3.5.1. Suministro de corriente directa

La fuente de potencia debe ser tal que si un ajuste de potencia es necesario durante el tiempo de lectura de las pruebas, la fuente tenga la capacidad de realizar estos ajustes. En general, esta debe ser de un tamaño suficiente y su operación no debe influir en las pruebas tomadas a la máquina. El suministro de potencia debe ser libre de rizado.

3.3.5.2. Suministro de corriente alterna rectificada

Las pruebas de desempeño y ajuste en motores DC destinados para funcionar con rectificadores deben ser realizadas usando una fuente de suministro tal que entregue una onda corriente de magnitud y frecuencia para las cuales el motor fue diseñado. Las formas de onda de la tensión y de la corriente deben ser las esperadas y libres de distorsiones e inestabilidades. La diferencia entre los valores

máximos y mínimos de los pulsos de corriente al final de un ciclo fundamental no debe exceder el 2% del valor máximo de la amplitud del pulso. Los parámetros significativos de la onda rectificada con respecto a la onda de la corriente de armadura son:

- numero de fases.
- entrada de tensión y frecuencia.
- impedancia del circuito de armadura.

En ausencia de facilidades de conocer los parámetros de rectificación y cuando no hay medios para guardar los resultados de los ensayos, una fuente de suministro para el circuito de armadura que entrega la misma frecuencia pero una forma de onda diferente puede usarse y en la forma de onda se restringen los cambios de valor usando un supresor de picos.

3.4. PRUEBAS PRELIMINARES

3.4.1. Condiciones de referencia

- Ubicación para la prueba: Las pruebas son realizadas generalmente en plantas de fabricación. De lo contrario se establece una ubicación adecuada para su realización.
- Aire ambiente: La temperatura del aire alrededor de la máquina debe estar entre 10 y 40 °C. La altitud sobre el nivel del mar no debe sobrepasar los 1000 metros. El procedimiento para la medición de la temperatura ambiente esta dado en el estándar IEEE Std 119-1874.
- Marcación de los terminales: La marcación de los terminales debe hacerse de acuerdo con ANSI/NEMA MGI-1978. Sin embargo, los diagramas de conexiones dados por el fabricante pueden usarse para determinar la

marcación de los terminales y las polaridades.

- Dirección de rotación: Cuando la dirección de rotación no se especifica, los motores se deben probar con una rotación en el sentido contrario de las manecillas del reloj y los generadores en el sentido de las manecillas del reloj.
- Pruebas en condiciones nominales: En estos procedimientos la frase “carga nominal” se refiere a que la corriente nominal esta fluyendo por el circuito.

3.4.2. Medidas de la resistencia de los devanados

La resistencia de los devanados de la máquina se determina revisando completamente las conexiones del devanado, calculando las pérdidas I^2R , y estableciendo una resistencia de referencia a una temperatura determinada para después usarla en la determinación de la temperatura promedio del devanado.

La medición de la resistencia debe ser realizada según se indica en el estándar IEEE Std 118-1978. La temperatura promedio del devanado puede se calculada al tiempo que se mide la resistencia en frío. La temperatura del aire no debe ser considerada como la temperatura de los devanados, a no ser que, la máquina se encuentre bajo condiciones de temperatura constante durante un periodo de tiempo considerable. Se debe ser muy cuidadoso cuando se asegura la exactitud de las mediciones de la resistencia en frío ya que un pequeño error en esta medición puede generar un error grande en la determinación de la temperatura.

3.4.2.1. Corrección por temperatura de la resistencia de los devanados

La ecuación para la corrección de la resistencia, tomando una temperatura de estándar de 25 °C es la siguiente:

$$R_1 = R_2 \frac{(k + t_1)}{(k + t_2)} \quad (3-2)$$

En donde:

R_1 = Resistencia de los devanados medida a la temperatura estándar t_1

R_2 = Resistencia de los devanados medida a la temperatura t_2

$k = 234.5$ Para el cobre

$k = 225$ Para el aluminio.

3.4.2.2. Método para medir la resistencia

A continuación se hará una descripción de los métodos utilizados para medir la resistencia de los devanados de una maquina de corriente continua [6].

- **Devanados del circuito de campo paralelo**

La resistencia en frío del campo paralelo debe determinarse en los terminales del campo paralelo con las conexiones adecuadas excluyendo todas las resistencias externas.

- **Resistencia del devanado del circuito de la armadura**

La resistencia del circuito de armadura se constituye de la suma de varios componentes (no se incluyen las escobillas y su resistencia de contacto) conectados de acuerdo con el diagrama de conexiones de la máquina. Esta sumatoria debe realizarse solo después de que la resistencia de cada componente ha sido corregida a una temperatura común. Estos componentes se miden como se indica a continuación.

1. Devanado de la armadura

a. método A

La resistencia de armadura se puede determinar mediante la aplicación de un puente de resistencias a través de dos segmentos del colector tan cerca como sea posible de uno de los polos.

b. Método B¹⁶ (recomendado)

Un conductor adecuado de baja resistencia debe ser conectado con el devanado del rotor, cualquier elevador o segmento del colector debe tener contacto con el devanado del rotor en cada ubicación de escobilla. Para un devanado simple el conductor debe hacer contacto con un segmento del colector por polo dejando un polo entre contactos. En caso de que no haya un espaciado equitativo, el contacto se debe realizar en dos segmentos consecutivos del colector simultáneamente. Si no se conoce el tipo de devanado, una aproximación muy cercana al valor de la resistencia del devanado se puede obtener aplicando el método C. La resistencia medida con la conexión del puente entre los terminales de este conductor simula las terminales positiva y negativa de las escobillas y es considerada la resistencia del devanado. Se debe reducir la resistencia de contacto a un valor despreciable.

c. Método C (alternativo)

Este es el método de la caída de tensión, las escobillas deben estar bien montadas. El rotor debe estar bloqueado adecuadamente a fin de evitar su rotación. Las escobillas se usaran como un conductor para la corriente y la caída de tensión se mide de la siguiente manera:

Dos impulsos de tensión se aplican a segmentos del conmutador separados aproximadamente por un polo. Estos impulsos deben colocarse en segmentos cercanos a la superficie de contacto de las escobillas tanto como sea posible. Los impulsos de tensión deben ser desplazados y se deben tomar lecturas en cada polo.

La corriente se mantiene constante para todas las mediciones y no debe exceder el 10% del valor nominal. La resistencia se calcula a partir del valor promedio de todas las caídas de potencial y las corrientes circulantes. Usualmente, este método arroja un valor de resistencia menor a los presentados por los métodos A y B.

PRECAUCION: la corriente y el tiempo de circulación deben ser limitados para prevenir daños en el colector debidos al calentamiento local causado por la circulación de esta corriente.

2. devanado del campo de conmutación

En máquinas sin compensación, la resistencia de este devanado se puede medir directamente en sus terminales. Si uno de los extremos de este devanado esta permanentemente conectado a la escobilla, la resistencia del campo de conmutación puede ser medida entre este punto y el terminal de salida. En máquinas compensadas este devanado puede estar intercalado con el devanado del campo de compensación. En tales casos la resistencia combinada de esos dos devanados debe ser medida. Si los devanados están partidos y localizados en lados eléctricamente opuestos de la armadura o están

organizados de otra manera, la resistencia de cada componente del devanado debe ser medida individualmente.

2. Devanados del campo de compensación

Si están separados de los devanados del campo de conmutación, la resistencia de este devanado puede ser medida directamente en sus terminales.

3. Devanados del campo serie

La resistencia debe ser medida en los terminales de cada uno de los devanados. Si el devanado está conectado permanentemente a uno de los demás devanados estacionarios y con una única conexión entre estos dos devanados, la resistencia del devanado serie debe medirse entre el terminal y esta conexión. Si el devanado del campo serie está intercalado, o no hay una distinción clara en la conexión de los devanados, la resistencia se debe medir en combinación con los demás devanados del estator a los cuales está conectado.

4. Shunts

La resistencia de cualquier campo conectado en paralelo con los devanados de la máquina debe ser medida en los terminales de este campo. El devanado shunt puede desconectarse de los devanados de la máquina cuando se miden sus respectivas resistencias.

5. Devanados auxiliares y resistores serie asociados

La resistencia de todos los devanados auxiliares debe medirse en sus terminales. La resistencia de un devanado auxiliar con resistores variables debe medirse en los terminales de los cables que unen esos resistores con el

devanado. Adicionalmente a la resistencia, las conexiones de todos los ajustes del resistor deben ser registradas.

3.4.3. Mediciones del entre hierro

Las mediciones del entre hierro deben incluir una revisión de la correcta ubicación de los polos principales, pruebas de posibles deformaciones debidas al desgaste, revisar que exista suficiente lubricación antes de la prueba y un ensamble adecuado entre el rotor y el estator.

La asimetría en los entrehierros puede causar algunas dificultades tales como niveles de tensión excesivos o sobre calentamientos de los ecualizadores.

La medida mínima del entrehierro bajo el centro de cada polo principal y cada polo del campo de conmutación debe ser cercana a los 0.100 mm para motores de más de 1 hp y cercana a los 0.050 mm para motores con potencias menores de 1 hp. En la práctica, se selecciona un punto sobre el rotor, el cual se hace rotar por todos los polos y a medida que este punto rota se toman las medidas.

Cuando no existen aberturas. La uniformidad del entrehierro puede hallarse si el rotor rota libremente colocando una espira de alambre a su alrededor antes de su ensamble con el estator. Para esta prueba el diámetro del alambre debe ser como mínimo del 70% de la distancia existente entre la cara polar y la superficie exterior del rotor.

3.4.4. Recopilación de datos

Para este procedimiento se recomienda la uniformidad en la identificación de los polos. El polo principal numero 1 y el polo del campo de conmutación numero 1 deben ser el primer polo de cada tipo en la dirección de las manecillas del reloj partiendo de una línea vertical que pasa por el centro y por encima de una línea horizontal que pasa por el centro del rotor. Cada polo principal se numera partiendo con el polo numero 1 y siguiendo consecutivamente en la dirección de las manecillas del reloj.

Para máquinas con eje vertical. El polo numero 1 es el primero de ellos en la dirección de las manecillas del reloj visto desde el fin conmutador de la máquina designado algún punto como la marca de dirección de rotación. Ese punto se debe identificar en la tabla de recopilación de datos.

3.4.5. Polaridad y caída de impedancia en las espiras del campo

- **Polaridad**

La polaridad de varios devanados puede determinarse por alguno de los métodos descritos a continuación:

- o La polaridad de cada devanado de campo debe determinarse independientemente.
- o La polaridad puede ser observada mientras una corriente pasa a través de todas las espiras de campo conectadas en serie u observando la atracción o repulsión entre los terminales de dos cortos, colocando una punta de acero entre puntas de polos adyacentes.
- o Espiras de campo que están construidas de conductores de gran tamaño pueden rastrearse fácilmente a través del devanado y obtener su polaridad ubicando el devanado y aplicando la regla de la mano derecha.

- **Caída de impedancia**

Si una prueba de resistencia CC es apta para insensibilizar las detecciones de las variaciones entre las espiras de campo, se recomienda realizar una prueba de caída de impedancia AC. Una espira en corto tiene una impedancia menor comparada con las demás espiras [6].

3.4.6. Vibraciones

Las vibraciones en el motor causadas por asimetrías mecánicas o electromagnéticas pueden medirse usando una fuente de corriente continua de baja amplitud. Tales medidas son hechas usualmente en vacío y a velocidad nominal usando media chaveta en la extensión del eje.

En rectificadores de potencia, además de las vibraciones causadas por asimetrías electromagnéticas y mecánicas, se experimentan vibraciones relacionadas con la amplitud y la frecuencia de las componentes de las corrientes de armadura y de campo.

Estas pruebas deben realizarse con varias cargas en todo el rango de velocidades de la máquina incluyendo el control de velocidad por tensión de armadura cuando se aplicable. Para diferenciar entre los diferentes tipos de vibraciones, se debe examinar la frecuencia de las oscilaciones a medida que la velocidad cambia lentamente. Las frecuencias naturales de la máquina, pueden ser excitadas por una fuente de frecuencias, armónicos o sub-armónicos actuando independientemente.

Las vibraciones radiales y axiales deben ser tomadas en las instalaciones en las que esta ubicada la máquina, si esto no es posible entonces se deben hacer en un lugar lo mas cercano posible a las instalaciones de la máquina.

Las condiciones de montaje afectaran las vibraciones de la máquina. Las máquinas poseen sus propias bases de montaje, lo cual permite hacerlas independientes de las condiciones de montaje. En máquinas de gran tamaño esto resulta poco práctico y la experiencia ha mostrado que incluso resulta innecesario. Para obtener mediciones que sean tan independientes como sea posible de las condiciones de montaje la máquina, esta debe ubicarse en almohadillas flexibles o en resortes. Estos solo deben soportar el peso de la máquina, en cantidades no menores que las mostradas a continuación.

Velocidad. $\left(\frac{\text{revoluciones}}{\text{minuto}}\right)$	Compresión mínima. (mm)
7200	0.4
3600	1.5
1800	6
1200	15
900	25
720	40
600	55

Tabla 9 Valores de compresión mínima de los resortes para diferentes velocidades¹⁷.

El valor de la compresión mínima para otras velocidades se puede obtener utilizando la siguiente ecuación:

$$c = \left(\frac{k}{v}\right)^2 \quad (3-3)$$

En donde:

$k = 4500$ Si la compresión se expresa en milímetros.

$v =$ Velocidad en revoluciones por minuto.

¹⁷ Tomado del estándar IEEE Std. 113-1985.

Las almohadillas o resortes se deben seleccionar de manera que la compresión no sea mayor que la mitad del espesor sin carga.

3.4.7. Ajuste de escobillas

La posición de las escobillas para una buena conmutación y obtener las características de tensión y velocidad deseadas, puede determinarse por observación de las máquinas bajo carga. El fabricante de máquinas de corriente continua determina la posición de las escobillas para obtener una buena conmutación y entrega unas marcas de referencia y unas direcciones para poder reubicarlas cuando sea necesario. En algunas máquinas el porta escobillas es fijado y no puede ser movido. Cuando la posición de las escobillas es tal que puede moverse, uno de los métodos dados en 3.4.6.2, 3.4.6.3 y 3.4.6.4 puede usarse para determinar el neutro eléctrico.

3.4.6.1. Definición- buena posición de la escobilla

Mínimo el 75% de la superficie de la cara de la escobilla y el 100% de la circunferencia de la escobilla debe estar en contacto con el colector.

3.4.6.2. Método de rotación inversa

Las máquinas reversibles pueden localizar el neutro mediante este método. Se debe operar la máquina a tensión constante, y a corrientes de campo y de armadura constantes. Debe existir un buen contacto entre las escobillas y el colector.

A continuación se mide la velocidad rotacional en ambas direcciones de giro. Cuando las escobillas están ubicadas en el neutro, la velocidad rotacional debe ser casi la misma en ambas direcciones. La máquina debe operar cerca de

plena carga y a la máxima velocidad de operación. Para evitar inconsistencias en la velocidad causadas por histéresis magnética en los ejes de cuadratura y directo, la corriente de campo debe fijarse de la misma manera en las pruebas en ambas direcciones de giro. Una corriente de armadura excesiva puede no permitir el flujo particularmente durante la aceleración y el frenado.

3.4.6.3. Mover la armadura un pequeño ángulo

El neutro inductivo puede ser localizado por observación de la tensión inducida en el devanado de armadura cuando alternativamente se establece y se retira un flujo en los polos principales. El procedimiento usual es el siguiente:

- Se levantan las escobillas.
- Se seleccionan dos segmentos del colector espaciados entre si por un polo.

En caso de que las barras por polo no sean un número entero, se deben tomar dos juegos de lecturas; una con el número entero siguiente y otra con el número entero anterior. Un promedio ponderado entre estas dos lecturas representara la lectura buscada.

- Conectar estos segmentos a la escala de baja tensión CC de un voltmetro o milivoltmetro.
- utilizar un interruptor auxiliar de rápida desconexión para asegurar una mayor uniformidad de la interrupción de la corriente.
- La excitación del campo principal se debe suministrar desde una fuente de corriente alterna independiente con no más del 20% de la corriente normal, la cual puede ser interrumpida por medio del interruptor auxiliar. Con la apertura del interruptor, el cambio en el flujo induce una tensión en las espiras de la armadura ubicadas entre los segmentos seleccionados y este cambio será leído por el voltmetro.
- Observar la dirección de la tensión inducida durante la remoción del

campo.

La armadura debe ser rotada unos cuantos grados, con el voltmetro conectado en los mismos segmentos. Este procedimiento se debe repetir hasta encontrar una posición en la que una interrupción en la corriente de campo produce una mínima indicación en el voltmetro. Cuando esto ocurre, la porción de devanado entre las puntas del voltmetro es equivalente o esta simétricamente ubicada bajo los polos y el centro de las caras de las escobillas debe ubicarse sobre esos puntos.

3.4.6.4. Armadura estacionaria

- **Medidas con las escobillas levantadas**

Si la armadura no puede ser rotada fácilmente, por ejemplo en máquinas de gran tamaño, las puntas del voltmetro pueden ser movidas alrededor del colector manteniendo un polo entre ellas. El punto neutro sobre el colector esta entonces en dos segmentos en donde las lecturas del voltmetro son las menores cuando ocurre la apertura o cierre del interruptor. Los centros de las escobillas deben ubicarse sobre estos puntos.

- **Medidas con las escobillas abajo**

Este método es similar al anterior excepto por que la tensión inducida es medida a través de las escobillas. Las escobillas deben estar abajo. Aunque en algunos casos el levantar las escobillas la fricción tiende a disminuir entonces también la armadura se rota con las escobillas levantadas. Las escobillas deben tener un buen contacto. Se debe conectar el voltmetro en una escala pequeña en dos porta escobillas adyacentes.

El procedimiento a seguir es el siguiente.

- ✓ se aflojan las escobillas para que se puedan mover libremente.
- ✓ se deben mover las escobillas de la posición mecánica asumida como neutro aproximadamente dos segmentos de colector en la dirección de rotación de la máquina.
- ✓ se procede a desplazar las escobillas en pequeños incrementos en contra de la dirección de rotación de la máquina, en cada posición, se establece e interrumpe la corriente de campo y se registra la deflexión del instrumento y su dirección en ambos casos. Un milivoltmetro analógico puede ser usado para este propósito.
- ✓ Se debe continuar moviendo el porta escobillas aproximadamente dos segmentos del colector más allá de la posición del neutro eléctrico.

Por ultimo se deben trazar en papel de gráfico las lecturas como una función de la posición del porta escobillas y dibujar una línea recta a través de cada sistema de puntos; las dos líneas, una para establecer y una para retirar la corriente de campo, se intersecarán o estarán cerca de la abscisa; ésta es la posición del neutro a cuál las escobillas deben ser movidas.

3.4.7. RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La resistencia de aislamiento entre los devanados y el núcleo del estator es raramente medida en máquinas pequeñas o de baja tensión, pero es comúnmente medida en máquinas grandes o de alta tensión y en máquinas sometidas a grandes demandas de aislamiento por exposición o servicio severo.

La resistencia de aislamiento a tierra es una indicación útil de si la máquina esta en condiciones adecuadas para la aplicación de pruebas de alta tensión o pruebas de funcionamiento. En tales casos en donde la resistencia de aislamiento esta siendo registrada, es importante obtener un buen grupo de valores iniciales para

efectos de futuras comparaciones. Para conocer los métodos de prueba se recomienda revisar el estándar ANSI/IEEE Std 43-1974.

3.4.8. PRUEBAS DE ALTO POTENCIAL

Con propósitos de seguridad, se deben tomar precauciones para prevenir el contacto con cualquier parte del circuito o aparato mientras las pruebas dieléctricas están en marcha.

Advertencia: debido a la alta tensión usada la cual puede causar lesiones permanentes o la muerte, las pruebas de alto potencial deben ser realizadas únicamente por personal experimentado, y se deben tomar medidas de seguridad adecuadas a fin de evitar lesiones al personal y daños en la propiedad.

Estas pruebas deben ser aplicadas cuando y solo cuando, la máquina esta en buenas condiciones y la resistencia de aislamiento no se ve afectada por la contaminación o la humedad. Los devanados bajo prueba deben ser descargados cuidadosamente a fin de evitar lesiones en el personal debidos a contactos accidentales.

- Las pruebas de alta tensión deben aplicarse sucesivamente entre cada circuito eléctrico y el núcleo. Los devanados que no hacen parte de la prueba y otras partes metálicas deben conectarse al núcleo durante esta prueba. El núcleo debe ser aterrizado adecuadamente durante este ensayo.

Todos los accesorios como capacitores, reactores, auto transformadores, etc. los cuales puedan ser dañados por altas Tensiones deben ser desconectadas durante esta prueba. Los accesorios deben ser sometidos a pruebas de alta tensión aplicables a la clase a la cual pertenecen. Tales pruebas se deben hacer en el punto de operación del aparato. Los valores de obtenidos en esta prueba, como tensión, frecuencia, forma de onda,

duración, y valor de cresta, se deben procesar de la manera sugerida por la norma ANSI/NEMA MGI-1978, en sus secciones 3.01, 12.03, 15.03, 23.5, 24.48.

Precaución: la aplicación reiterada de este tipo de pruebas degrada las cualidades dieléctricas del sistema de aislamiento.

- Las puntas deben permanecer desconectadas durante este ensayo, ya que esto puede causar un estrés extremadamente grave en algún sitio del devanado. En la realización de la prueba, la tensión debe incrementarse hasta su valor máximo tan rápido como sea posible con su valor indicado correctamente en el medidor. Después de la duración especificada para la prueba de tensión, esta debe reducirse hasta un valor igual a un cuarto de la tensión aplicada o menos en no más de 15 segundos.

Precaución: la tensión nunca debe llevarse a cero desde el valor máximo en un solo paso.

Para las medidas de tensión en la prueba de alto potencial ver el estándar ANSI/IEEE Std 4-1978. El método de medición del transformador-voltmetro es comúnmente usado.

3.5. DETERMINACION DE DESEMPEÑO

3.5.1. Saturación magnética

La curva de saturación sin carga es una relación no lineal entre la tensión en terminales de la armadura y la corriente de campo. Los datos deben ser tomados a Tensiones adecuadamente espaciadas a fin de obtener una grafica exacta desde cero corriente de campo hasta aproximadamente el 125% de la tensión nominal.

3.5.1.1. Impulsado separadamente

La máquina se debe impulsar a velocidad nominal por algún medio adecuado. Si es posible, la corriente de campo debe ser suministrada por una fuente separada a fin de estabilizar la tensión y facilitar la toma de datos. Se deben tomar simultáneamente lecturas de la corriente de campo, de la tensión de armadura y de la velocidad.

Precaución: si la máquina bajo prueba no tiene polo de conmutación y esta construida con las escobillas ubicadas fuera del neutro tal prueba puede ser perjudicial y no determinan el verdadero estado de la maquina [6].

- **Curva ascendente**

Un grupo de lecturas debe ser tomado empezando con un valor de la corriente de campo igual a cero e incrementándola hasta que se obtiene el valor máximo de tensión. Tres de estas lecturas deben tomarse tan cerca como sea posible de 90%, 100% y 110% de la tensión nominal.

Para evitar inconsistencias causadas por efectos de histéresis, la tensión en terminales de la armadura nunca debe llevarse por encima del punto de prueba y luego disminuirse. Si esto ocurre durante la prueba, la corriente de campo debe disminuirse hasta cero y la tensión en terminales de la armadura incrementarse hasta el punto de prueba.

- **Curva descendente**

Otro grupo de lecturas puede ser obtenido partiendo de la tensión en terminales de la armadura máxima y disminuyendo la corriente de campo hasta cero. Para evitar problemas debidos a la histéresis, la tensión en terminales de la armadura

nunca debe llevarse por debajo del punto de prueba y luego incrementarse [6]. Si esto ocurre durante la prueba, la corriente de campo debe incrementarse hasta su valor máximo y la tensión en terminales de la armadura debe disminuirse hasta el punto de prueba.

3.5.1.2. Auto impulsado (excepto motores series-wound)

Si no hay un medio de impulsar el motor separadamente, los datos para una curva de saturación sin carga pueden ser obtenidos operando la máquina como un motor desacoplado de una fuente sin rizado de potencia de CC. Esta fuente debe poderse ajustar desde aproximadamente el 25% hasta el 125% de la tensión nominal. Los efectos de la histéresis magnética deben evitarse de acuerdo a los numerales 3.5.1.1.1 y 3.5.1.1.2. La corriente de campo necesaria para llegar a velocidad nominal a diferentes Tensiones difiere de los datos de saturación sin carga debido a los efectos de la corriente de armadura que es requerida para operar la máquina como un motor desacoplado. La máquina puede desestabilizarse a bajas Tensiones y precauciones contra el embalamiento deben ser tomadas.

3.5.2. Conmutación

El éxito de la máquina de conmutación se obtiene si ninguna de las escobillas o el colector están quemadas o lesionadas durante la prueba de conformidad o si en condiciones normales de operación no se requiere de un mantenimiento especial. La presencia de algunas chispas visibles no es necesariamente evidencia de una conmutación no exitosa.

En rectificadores de potencia, el motor de conmutación puede resultar afectado por la reactancia AC de la línea, impedancias o reactancias CC de la línea y por la relación entre las Tensiones AC y CC. Es importante, que cuando se este

evaluando la conmutación se use una fuente de potencia que tenga características tan similares como sea posible a los destinados como suministro de potencia.

La conmutación visible será generalmente más severa en fuentes de potencia rectificadas. Debido a las características del ojo, pequeñas chispas parecerán chispas prologadas o continuas. La conmutación debe ser observada en un periodo largo de tiempo para evaluar que tan perjudiciales son las chispas que están ocurriendo.

3.5.3. Regulación. (No aplica a motores series-wound)

3.5.3.1. Regulación de Velocidad de los Motores

El propósito de esta prueba es determinar la variación de la velocidad del motor cuando la carga disminuye de plena carga a vacío manteniendo la tensión en terminales de la armadura y la corriente de campo en valores constantes. La prueba se desarrolla de la siguiente manera:

- Esta prueba debe realizarse después de que el motor ha alcanzado una temperatura estable producto de una operación continua a velocidad nominal. Los puntos de prueba deben tomarse rápidamente a fin de que la temperatura de los devanados no cambie apreciablemente. Se empieza operando el motor manteniendo tensión de armadura y corriente de campo en sus valores nominales. Si el motor usa un reóstato de campo en su funcionamiento, este se debe ajustar para obtener velocidad nominal a tensión y corriente de armadura constantes.
- Gradualmente se aplica y retira plena carga muchas veces antes de que las lecturas sean tomadas a fin de que sean consistentes. Se deben registrar las velocidades a plena carga y en vacío y con ellas se calcula la regulación de velocidad de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%regulación = 100 * \left[\frac{V_0 - V_L}{V_0} \right] \quad (3-4)$$

En donde:

V_0 = Velocidad en vacío.

V_L = Velocidad a plena carga.

Cuando sea necesario una prueba a velocidad de carga puede ser tomada.

3.5.3.2. Regulación de tensión en generadores

El propósito de este ensayo es determinar el cambio en la tensión de terminales que acompaña un cambio gradual en la corriente de armadura con el campo principal ajustado para tensión nominal.

El procedimiento es el siguiente:

- Si el generador es auto excitado, el reóstato de ajuste debe permanecer fijo durante los cambios de carga en la prueba. Si el generador es excitado separadamente, la corriente de campo de carga nominal debe mantenerse constante durante la prueba. El generador debe funcionar a velocidad nominal. La prueba debe realizarse después de que el generador ha alcanzado una temperatura estable producto de la operación continua a velocidad y cargas nominales. Los puntos de prueba deben tomarse rápidamente con el fin de que la temperatura de los devanados no cambie apreciablemente.
- Gradualmente se aplica y retira la carga nominal varias veces antes de que las lecturas tomadas sean consistentes. Se deben registrar las Tensiones a plena

carga y en vacío. La regulación de tensión se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\%regulación = 100 * \left[\frac{v_0 - v_L}{v_0} \right] \quad (3-5)$$

En donde:

v_0 = Tensión en vacío.

v_L = Tensión a plena carga.

3.5.3.3. Regulación de tensión combinada del generador y el primo-motor

El procedimiento de prueba dado en la sección anterior es para la regulación de tensión inherente. La regulación de tensión combinada es tomada siguiendo el mismo procedimiento excepto por la característica velocidad-carga que introduce el primo motor del generador. El generador debe ser impulsado a velocidad nominal con carga nominal. La velocidad de todos los demás puntos se obtiene de las características de velocidad-carga inherentes del primo motor. Si no se conoce exactamente la característica velocidad-carga, esta se debe asumir como una función lineal en todo el rango de carga.

3.5.4. Eficiencia

La eficiencia es la razón entre la potencia de salida y la potencia total de entrada. La potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas. Por tanto, si dos de las tres variables (salida, entrada, pérdidas) son conocidas, la eficiencia puede determinarse por medio de una de las siguientes ecuaciones:

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3-6)$$

$$eficiencia = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (3-7) \text{ Aplicable particularmente a los motores.}$$

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (3-8) \text{ Aplicable particularmente a los generadores.}$$

En donde:

P_{out} = Potencia de salida.

P_{in} = Potencia de entrada.

P_{loss} = Pérdidas.

Para los motores la potencia de entrada se puede determinar mediante medidas de potencia en los circuitos de armadura y de campo paralelo incluyendo los componentes AC y CC. Si la operación es con potencia rectificada, la potencia de salida se puede determinar mediante medidas de la potencia mecánica de salida. Las pérdidas se pueden determinar como se indico anteriormente.

En el caso de los generadores, la potencia de entrada puede determinarse como la sumatoria de la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de entrada al campo paralelo. La potencia de salida se determina como el producto de la tensión y de la corriente medidas en terminales de la armadura. Las pérdidas se determinan como se indico anteriormente.

3.5.4.1. Condiciones de referencia [6]

- Salvo se indique lo contrario, la eficiencia debe ser calculada para tensión y velocidad nominales. En el caso de motores de velocidad variable, la velocidad base debe ser usada si no se determina lo contrario.
- En la determinación individual de las pérdidas I^2R para los cálculos de eficiencia, la resistencia de los devanados debe ser corregida para una temperatura igual a la ambiente de $25^{\circ}C$. más el incremento de temperatura observado a carga nominal. Cuando las elevaciones de temperatura a carga nominal no son medidas, ver ANSI/NEMA MG1-1978, para corregir las resistencias a la temperatura usada.
- Si para determinar la eficiencia se usan pruebas de entrada-salida, estas se deben hacer tan cerca como sea posible a la temperatura final alcanzada en funcionamiento para el período de tiempo especificado en las condiciones de la clasificación anterior.
- Pérdidas diferentes a las I^2R no deben ser corregidas por temperatura si los datos son tomados bajo condiciones estándar.

3.5.4.2. Métodos

En general, para el tamaño de las máquinas indicado, los siguientes métodos se deben usar con las precauciones anteriormente indicadas.

Tamaño de la máquina.	Método.
Potencias menores a 1 hp.	Freno, dinamómetro o medidor de torque.
Potencias mayores a 1 hp.	freno, dinamómetro o medidor de torque,

Tabla 10 Métodos de prueba¹⁸.

¹⁸ Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985

3.5.4.3. Medidas directas de entradas y salidas

Las medidas directas de entradas y salidas siempre son hechas en máquinas pequeñas, pero generalmente, ellas incrementan su dificultad con el tamaño de la máquina debido a las limitaciones de equipos de prueba adecuados.

Lecturas

Las lecturas de tensión y corriente de entrada (o salida), de velocidad y torque de salida (o entrada) temperatura ambiente, temperatura de la armadura o resistencia, deben ser tomadas para seis puntos de carga igualmente espaciados desde 0.25 hasta 1.5 veces la carga nominal. En motores de excitación serie, la carga mínima es determinada por las limitaciones de velocidad de la máquina. Para las lecturas usadas en las determinaciones de desempeño, la elevación de la temperatura de la máquina debe ser un valor entre el 50% y el 100% de la temperatura nominal.

En fuentes de potencia rectificadas, las siguientes lecturas deben tomarse para cada uno de los seis puntos de carga.

Lectura.	Valor RMS.	Valor promedio.
Tensión de entrada al suministro de potencia, todas las fases.	X	-
Tensión de entrada al circuito de la armadura.	*	X
Corriente de entrada al circuito de la armadura.	*	X
Componente AC de la corriente de armadura.	X	-
Potencia de entrada al circuito de la armadura.	-	*
Componente AC de la potencia de entrada al circuito de la armadura.	-	X
Tensión de entrada al circuito de campo paralelo.	*	X

Corriente de entrada al circuito de campo paralelo.	*	X
Potencia de entrada al circuito de campo paralelo.	-	*
Velocidad.	-	X
Torque.	-	X
Temperatura de la armadura o resistencia.	-	X
Temperatura de las espiras de campo o resistencia.	-	X
Temperatura ambiente.	-	X

Tabla 11 lecturas tomadas durante pruebas de eficiencia. * Lectura opcional, X lectura obligatoria¹⁹.

- **Método del Dinamómetro o medidor de torque**

Cuando se usa este método, el eje de potencia se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{T * n}{k} \quad (3-9)$$

En donde:

P = Eje de potencia (kW)

T = Torque.

n = Velocidad rotacional

k = Constante relacionada con las unidades usadas.

T	k
Newton-metro.	$9.549 * 10^{-3}$
Libras-fuerza (ft).	$7.043 * 10^{-3}$
Onzas-fuerza (in).	$1.352 * 10^6$

Tabla 12 valores de la constante k para diferentes sistemas de unidades.

¹⁹ Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985

Para obtener resultados exactos, el rango del dinamómetro no debe exceder tres veces el rango de la máquina bajo prueba y este debe tener una sensibilidad al torque del 0.25% de su torque nominal. La corrección del dinamómetro debe hacerse como se esboza en la forma D²⁰.

El desgaste por fricción se refleja en el dinamómetro como resultados en diferentes escalas de lectura para el mismo valor de potencia eléctrica, dependiendo de si la carga se incrementa o se disminuye se afecta la lectura. En consecuencia, el promedio de dos grupos de lecturas debe ser tomado. El primer juego se toma mientras la carga se incrementa gradualmente; el segundo mientras la carga disminuye. Se debe tener cuidado de no rebasar los puntos de lectura en cada caso. Se dibujan curvas de torque versus potencia eléctrica en ambos casos, y el promedio de las curvas es el que será usado.

En casos especiales durante la prueba de un motor, puede ser conveniente hacer un ensayo de control, operando la máquina como generador y el dinamómetro como un primo-motor. La prueba es hecha exactamente del mismo modo que una prueba entrada-salida para cualquier motor, pero en este caso, las pérdidas totales serán iguales a la potencia mecánica de entrada menos la potencia eléctrica de salida en lugar de ser la potencia eléctrica de entrada menos la potencia mecánica de salida.

Es importante que la prueba operando la máquina como motor sea hecha a velocidad y tensión nominales, y con el mismo torque en el dinamómetro que cuando se hace la prueba en la máquina como motor. Las pérdidas encontradas en las pruebas de motor y generador, deben determinarse separadamente en cada caso por sustracción de las pérdidas totales de la armadura I^2R a la

²⁰ Ver anexos.

temperatura de prueba, las pérdidas en el núcleo, la fricción y rozamiento con el viento.

3.5.4.4. Método de Morgan

Este método se usa cuando se poseen dos máquinas de características similares. Estas máquinas se acoplan y se conectan eléctricamente de la manera mostrada en la figura 26. En este esquema una de las máquinas trabaja como generador mientras que la otra lo hace como motor. La potencia principal es devuelta de manera que solo se suministra la potencia correspondiente a las pérdidas. Las pérdidas de carga son alimentadas por el generador de refuerzo y las pérdidas sin carga por el “suministro de pérdidas”.

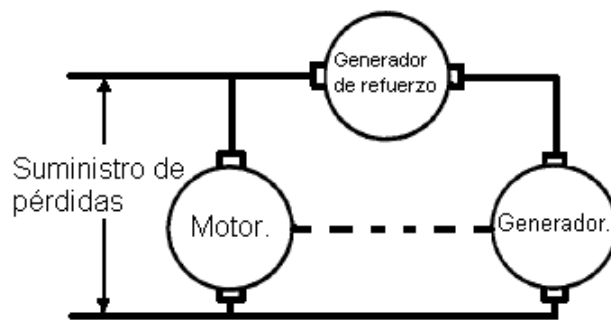


Figura. 26 Montaje para el ensayo de puma back

Este ensayo puede realizarse sin necesidad del generador de refuerzo, sin embargo esto afectaría la estabilidad del sistema.

- Tanto el generador como el motor deben operar con la fuerza de campo requerida, con la que se puede producir la tensión interna calculada correspondiente a la carga usada en la prueba.

- Las pérdidas en las dos máquinas equivalen a la potencia suministrada por el generador de refuerzo y por el suministro de pérdidas más las pérdidas en cualquier campo paralelo excitado separadamente que se utilice menos las pérdidas en los conductores, en las barras, interruptores, etc. que se usan para conectar las máquinas.
- En esta prueba, se deben considerar seis puntos de carga. Las lecturas se toman como se indico anteriormente (3.5.4.3). La eficiencia de la máquina se determina como se indica en la forma F^{21} .

3.5.4.5. Método de las pérdidas separadas

Cuando la eficiencia del motor se determina con este método, las siguientes pérdidas deben ser consideradas

Tipo de pérdida.	Descripción del cálculo.
Armadura I^2R	3.5.5.1.
Devanados conectados en serie I^2R	3.5.5.2.
Contacto de las escobillas.	3.5.5.3.
Cargas parásitas.	3.5.5.4.
Campo paralelo I^2R .	3.5.5.5.
Reóstatos.	3.5.5.6.
Excitadores.	3.5.5.7.
Núcleo rotacional.	3.5.5.8.
Fricción de las escobillas.	3.5.5.9.
Fricción.	3.5.5.10.
Ventilación.	3.5.5.11.

Tabla 13 Tipos de pérdidas en una máquina de corriente continua²².

²¹ Ver anexos.

3.5.5. Descripción de las pérdidas

3.5.5.1. Pérdidas en la armadura I^2R

Las pérdidas en la armadura se calculan con la expresión I^2R . La resistencia usada debe ser medida usando corriente continua y se debe realizar la respectiva corrección de su valor considerando los efectos de la temperatura.

3.5.5.2. Pérdidas de los devanados conectados en serie I^2R

Estas pérdidas se calculan con la siguiente ecuación I^2R , igual que en el caso anterior se debe realizar la corrección por temperatura en el valor de la resistencia del devanado.

Si existen campos auxiliares, los devanados son usados a través de cualquiera de esos campos, se debe usar una resistencia múltiple.

3.5.5.3. Pérdidas en los contactos de las escobillas

Estas pérdidas se pueden determinar realizando el producto entre la corriente de armadura y una caída de tensión. La caída total de tensión que se utiliza para el cálculo de estas pérdidas se asume dependiendo del tipo de escobilla de la siguiente manera:

Carbón, electro grafito y escobillas de grafito. Shunts adjuntos.	2 voltios.
Carbón, electro grafito y escobillas de grafito sin shunts.	3 voltios.
Escobillas de metal-grafito, shunts adjuntos.	0.5 voltios.

Tabla 14 caída de tensión en los diferentes tipos de escobilla.

²² Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985.

Se asume la misma caída de tensión para todas las cargas.

3.5.5.4. Pérdidas por cargas parásitas

Estas pérdidas corresponden a pérdidas adicionales en la máquina debidas a la carga. Este tipo de pérdidas no se incluyen en las demás categorías.

Pueden ser de dos tipos:

- Pérdidas debidas a la componente CC de la corriente de armadura.
- Pérdidas debidas a la operación de rectificación, esto se presenta en el caso de potencia rectificada.

Si no hay mediciones de estas pérdidas, su componente CC puede considerarse como el 1% de la potencia de salida. En caso contrario, existen dos métodos para determinarlas. A continuación se describen dichos métodos:

- Pueden determinarse con una prueba de Morgan, restando el total de las otras pérdidas de las pérdidas suministradas a la máquina bajo prueba. Para el cálculo de estas pérdidas se puede usar la forma G.
- Pueden determinarse mediante la prueba del dinamómetro. En este caso se usa la forma E para el respectivo cálculo.

En potencia rectificada este tipo de pérdida puede obtenerse restando la componente AC de las pérdidas en el circuito de la armadura I^2R de la componente AC de la potencia de entrada a dicho circuito.

3.5.5.5. Pérdidas en el devanado paralelo I^2R

Se calculan con la formula I^2R , el valor de la resistencia se debe corregir por temperatura y la corriente de campo es la corriente requerida por el campo para la carga a la cual se están evaluando las pérdidas.

3.5.5.6. Pérdidas en el reóstato

Generalmente, este tipo de pérdidas no se consideran en la evaluación de la eficiencia de la máquina. Sí se incluyen en los cálculos, se pueden encontrar como el producto de la tensión en el sistema de excitación y la corriente de campo para la carga a la cual se realiza el ensayo, restando las pérdidas del devanado paralelo.

3.5.5.7. Pérdidas en el excitador

Generalmente estas pérdidas no se incluyen en el análisis de la eficiencia de la máquina.

3.5.5.8. Pérdidas en el núcleo rotacional

Deben tomarse como la diferencia en la potencia requerida para impulsar la máquina a una velocidad dada cuando la excitación es producida por la tensión de circuito abierto en terminales que corresponde a la tensión interna calculada y a la potencia requerida para impulsar la máquina sin excitar la misma velocidad.

Precaución: si la máquina no tiene polos de conmutación y esta construida con las escobillas ubicadas fuera del neutro, los resultados de esta prueba pueden resultar destructivos y poco significativos.

3.5.5.9. Pérdidas por fricción de las escobillas

La experiencia muestra amplias variaciones en la obtención de estas pérdidas, en pruebas realizadas en las fábricas antes de que entre el conmutador y las escobillas se cree una superficie suave, producto de una operación continuada de la máquina. Algunos valores para la fricción de las escobillas, son el promedio de muchos ensayos. A continuación se muestra la forma de calcularla.

$$F = k * v * a \quad (3-10)$$

En donde:

F = Fricción de las escobillas (watts).

v = Superficie velocidad.

a = Área de contacto de las escobillas.

k = Constante relacionada con el tipo de escobillas y con las unidades utilizadas.

Tipo de escobilla.	Unidades de velocidad.	Unidades de área.	k
Carbón, grafito, electro grafito.	$m/\min$; $ft/\min$	mm^2 ; in^2	$4*10^{-5}$; $8*10^{-3}$
Metal-grafito.	$m/\min$; $ft/\min$	mm^2 ; in^2	$2.5*10^{-5}$; $5*10^{-3}$

Tabla 15 Valores de la constante k para diferentes tipos de escobillas y sistemas de unidades utilizados²³.

Si alguno de los valores encontrados con la ecuación anterior no es adecuado, la fricción de las escobillas puede calcularse como la diferencia en la potencia necesaria para impulsar la máquina con las escobillas y sin ellas.

3.5.5.10. Pérdidas por fricción

²³ Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985

Corresponden a la potencia requerida para impulsar la máquina sin excitación hasta su velocidad nominal con las escobillas levantadas.

- En una máquina dotada con rodamientos incompletos, este tipo de pérdidas no es tenido en cuenta en los cálculos de eficiencia.
- Las pérdidas adicionales debidas a aparatos directamente conectados no son tenidas en cuenta en la determinación de la eficiencia.

3.5.5.11. Pérdidas por ventilación

La potencia necesaria para hacer circular un gas a través de la máquina y para el sistema de ventilación si es que lo tiene, ya sea auto contenido o con ventiladores externos, debe ser cargada a la máquina excepto por lo estipulado a continuación:

- La potencia necesaria para hacer circular un gas por todas las partes de la máquina usualmente no se tiene en cuenta para la determinación de la eficiencia. La potencia requerida para la ventilación con aire, se puede encontrar mediante la siguiente expresión.

$$P = \frac{p * k * r}{e} \quad (3-11)$$

En donde:

P = Potencia de entrada (watts).

k = Constante relacionada con el sistema de unidades usado.

p = Caída de presión.

r = Taza de cambio del volumen de flujo.

e = Eficiencia del soplador por unidad.

Unidades de presión.	Unidades de flujo.	k
$Pa \left(\frac{N}{m^2} \right)$	$\left(\frac{m^3}{s} \right)$	1
Milímetros de agua.	$\left(\frac{L}{min} \right)$	0.0163
Pulgadas de agua.	$\left(\frac{ft^3}{min} \right)$	0.117

Tabla 16 valores de la constante k usada en la ecuación (3-10) para los diferentes sistemas de unidades.

- Cuando un ventilador externo se usa para suplir el efecto de ventilación incorporado en la estructura de la máquina con el fin de compensar las caídas de presión, la potencia de entrada para el ventilador externo no se tiene en cuenta para calcular la eficiencia.

• Prueba para determinar las pérdidas por ventilación

Las máquinas pueden ensayarse en las fábricas sin un refrigerador y sistema de ductos externos, pero cuando el ventilador funciona como en servicio normal y las pérdidas medidas son usadas para hallar la eficiencia de la máquina. Esta práctica es admisible debido a que, en muchos casos prácticos, la diferencia entre las pérdidas por ventilación con libre entrada y descarga, y las pérdidas con entrada y descarga normalmente restringidas, o ambos, es muy pequeña. En general, esta prueba se realiza cuando las pérdidas en el sistema de refrigeración son pequeñas comparadas con las pérdidas en la máquina.

3.5.6. Medición de las pérdidas rotacionales

En general las pérdidas individuales son determinadas por medio de medidas de la potencia de entrada necesaria para andar la máquina bajo ciertas condiciones. Para hacer lo anterior, suelen usarse los métodos de la potencia mecánica de

entrada, de la potencia eléctrica de entrada y usando el método de retardo. Estos métodos se describen a continuación:

- **Método de la potencia mecánica de entrada**

Esta prueba se lleva a cabo con un dinamómetro o con un motor calibrado adecuadamente. Cuando la máquina se excita de acuerdo a las sugerencias dadas en la sección 5.6.1.2, la salida del dinamómetro corresponde a la potencia que se necesita para alimentar las pérdidas rotacionales de la máquina bajo prueba.

1. Todas las escobillas deben estar levantadas, a excepción de aquellas necesarias para medir la tensión de armadura. La máquina en vacío debe impulsarse hasta su velocidad nominal. El campo principal se debe excitar separadamente de manera que la tensión en terminales de la armadura sea igual a la tensión interna inducida desarrollada por la máquina bajo las anteriores condiciones. La tensión interna en un motor es menor que la tensión en la armadura, en un generador ocurre lo contrario. Esta diferencia de tensión se debe a las caídas de tensión causadas por la resistencia de la armadura y de los devanados de campo conectados, y de las caídas de tensión aportadas por las escobillas.

$$\text{Para motores: } E = V - IR_a - V_b \quad (3-12)$$

$$\text{Para generadores: } E = V + IR_a + V_b \quad (3-13)$$

En donde:

E = Tensión interna (volts).

V = Tensión nominal del circuito de armadura (volts).

I = Corriente nominal de armadura (amperes).

R_a = Resistencia de armadura y devanados serie conectados corregida por temperatura.

V_b = Caída de tensión en los contactos de las escobillas (volts)

2. La máquina deberá operar a velocidad nominal, preferiblemente con su carga nominal, por varias horas a fin de estabilizar los factores de fricción. Durante este período de calentamiento, todas las escobillas deben estar en su lugar. Posteriormente, se levantan todas las escobillas excepto dos de ellas y se mide la potencia de entrada mecánica con la máquina a velocidad nominal sin carga tal como se indica en la sección anterior. Las pérdidas rotacionales medidas son la suma de las pérdidas del núcleo rotacional y las de fricción.

3. Las pérdidas del núcleo rotacional se pueden evaluar por observación de la disminución de la potencia mecánica de entrada a medida que la tensión de excitación del campo disminuye hasta cero.

4. Las pérdidas por fricción de las escobillas bajo las condiciones de prueba se pueden determinar quitando el campo de excitación y observado la diferencia entre la potencia necesaria para impulsar la máquina con las escobillas instaladas y con las escobillas levantadas.

• Método de la potencia eléctrica de entrada

Usando este método, las pérdidas rotacionales se determinan a partir de mediciones de la potencia necesaria para operar la máquina como motor a velocidad nominal sin carga [6], con el campo de excitación ajustado para generar una tensión interna igual al valor desarrollado por ésta en condiciones de servicio.

1. Se excita el campo principal a valor nominal y se opera la máquina como motor por varias horas a velocidad y carga nominales, esto con el fin de estabilizar los

factores de fricción. Las escobillas deben estar en su lugar durante todo este proceso.

2. Se detiene la máquina, se desacopla de las cargas, se levantan todas las escobillas excepto dos de ellas. Luego se mide la resistencia del devanado de armadura y de los devanados serie conectados. Se arranca la máquina y se hace funcionar como motor sin carga a velocidad nominal, ajustando la excitación del campo principal y la tensión del circuito de armadura de forma que la tensión interna generada sea igual al valor desarrollado por la máquina en condiciones de servicio.

3. Con la máquina desacoplada y con la velocidad y la excitación del campo ajustada según el literal anterior, se mide la potencia de entrada al circuito de la armadura. Esta potencia corresponde a la suma de las pérdidas en el núcleo rotacional, la fricción, la fricción de las escobillas usadas en la prueba, las pérdidas en la armadura con carga ligera y las pérdidas en el contacto de las escobillas.

• Método de retraso

Este método es usado cuando no es posible medir la potencia de entrada razón por la que suele usarse en máquinas ya instaladas. Se usa en máquinas con inercias grandes. El método consiste en llevar la máquina hasta una velocidad ligeramente superior a la nominal, pero sin exceder la velocidad máxima de seguridad, hecho esto, se desconecta el suministro de potencia y se realizan mediciones simultaneas de la velocidad y del tiempo en que la velocidad de la máquina decrece. Con estos datos y el momento de inercia de la masa rotacional, las pérdidas totales se calculan con la siguiente expresión:

$$P = c * J * \frac{dn}{dt} * 10^{-6} \quad (3-14)$$

En donde:

P = Pérdidas (kW) a la velocidad n .

n = Velocidad de rotación (r/min).

$\frac{dn}{dt}$ = Taza de desaceleración a la velocidad n .

J = Momento de inercia de las partes móviles.

c = Constante relacionada con las unidades usadas.

J	c
$(k * m^2)$ (SI de unidades)	10.97
$(lb * ft^2)$	0.4621
$(slug * ft^2)$	14.88

Tabla 17 constante c para diferentes unidades de medida del momento de inercia.

3.5.7. Pruebas para motores con potencias menores a un caballo de fuerza

La carga de rendimiento en estos motores debe medirse con un dinamómetro, un medidor de torque o un freno *prony*.

En máquinas de operación continua, esta debe operarse con carga nominal hasta alcanzar una temperatura constante antes de la prueba. En máquinas que no son de operación continua, debe operarse a carga nominal durante el periodo de tiempo para el cual es nominal para así hacer la prueba. Esta prueba se debe hacer a 1.5, 2 y 3 veces la corriente a carga nominal y se debe tomar lecturas aproximadamente a 25% pasos bajo la no carga, o en el caso de motores serie, a la máxima velocidad segura. En cada valor de carga se deben tomar lecturas de tensión de línea, corriente de línea, corriente de campo paralelo, velocidad y de torque.

3.5.8. Pruebas para motores con potencias de más de un caballo de fuerza

1. Carga

Los motores pequeños pueden cargarse usando un generador de carga, un dinamómetro o un freno *prony* con o sin un medidor de torque. En motores más grandes, la medición directa del torque puede ser una práctica no viable. En estos casos, el método de Morgan puede usarse, se debe tener acceso a dos máquinas del mismo tipo y tamaño para la realización de la prueba. En caso de no disponer de estas máquinas, la prueba de carga puede realizarse cargando el motor bajo prueba con un generador de corriente continua calibrado para tal uso. Otra forma de llevar a cabo este ensayo es impulsando el motor a velocidad nominal como un generador corto circuitado con un corriente de campo baja, para impulsarlo se usa un motor pequeño. Las pérdidas en condiciones de corto circuito corresponden a pérdidas I^2R . Solo para cargas muy limitadas se obtienen datos mediante el método del corto circuito.

2. Procedimiento de prueba

En motores de operación continua, la máquina debe operar a carga nominal hasta alcanzar una temperatura constante antes de la prueba. En máquinas de operación no continua, la carga nominal debe ser llevada durante el periodo de tiempo para el cual es nominal, antes de realizar la prueba.

- Para motores sin rango de velocidad por debilitamiento de campo, la prueba debe iniciarse a 1 y 1.5 veces la corriente a plena carga y las lecturas deben tomarse en pasos de 25% por debajo de la carga nominal. En el caso de motores serie, la carga debe ser disminuida en pasos del 25% hasta obtener la máxima velocidad segura.

- Para motores con ajuste de velocidad por debilitamiento de campo, la prueba debe realizarse a la velocidad base y a la velocidad máxima nominal

3.5.9. Lecturas

Se deben tomar las mismas lecturas que se han indicado anteriormente, teniendo en cuenta que las mediciones de torque se omiten en pruebas de carga de rutina.

3.6. PRUEBAS DE TEMPERATURA

3.6.1. Propósito

Estas pruebas se hacen para determinar la elevación de la temperatura con respecto a la temperatura ambiente de algunas partes de la máquina de corriente continua, cuando es sometida a carga nominal. A continuación se dan algunas guías para la realización de estos ensayos;

3.6.2. Instrucciones generales

La máquina a ser ensayada debe estar armada con todas sus partes, cubiertas y accesorios que puedan afectar la elevación de temperatura. La máquina bajo prueba debe protegerse de las corrientes de aire emitidas por máquinas ubicadas a su alrededor y otras fuentes que puedan afectar la temperatura ambiente y el incremento de temperatura de la misma. Se necesita suficiente espacio en el piso para permitir la libre circulación de aire. Pequeños cambios en la temperatura ambiente pueden afectar sensiblemente los incrementos de temperatura.

La conmutación y regulación de la máquina deben ser ajustadas adecuadamente antes de realizar las pruebas de calefacción.

En rectificadores de potencia, estas pruebas se deben realizar utilizando el tipo de potencia rectificada para la cual el motor está diseñado o una en la cual fue basada dicha clasificación. Si no se cuenta con una fuente de este tipo adecuada, esta prueba puede llevarse a cabo usando potencia de corriente directa en la armadura y manteniendo la corriente de armadura en el valor rms obtenido en servicio rectificado. Se debe tener en cuenta, que debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro adicionales, la temperatura de la máquina será más alta que los valores de la prueba, especialmente en máquinas selladas.

3.6.2.1. Instrumentación

Los instrumentos para medir la temperatura deben estar en conformidad al estándar IEEE Std 119-1974. Antes de empezar cualquiera de estos ensayos, los instrumentos se deben examinar a fin de minimizar los errores.

3.6.3. Métodos para medir la temperatura

Generalmente el método más adecuado para medir la temperatura de los devanados de una máquina es simplemente observar los cambios en su resistencia o en alguna porción de ellos. La temperatura de la superficie de los devanados es marcadamente mayor que la temperatura promedio de los mismos. Por esta razón, la temperatura de los devanados determina el método de medición.

3.6.3.1. Medida de la temperatura de los devanados por resistencia

Este método consiste en determinar la temperatura por comparación de la resistencia del devanado, a la temperatura a determinar con una resistencia a una temperatura conocida como se indicó anteriormente.

- **Para devanados de campo estacionarios**

Hay una pequeña dificultad para obtener resultados adecuados mediante los métodos esbozados en la sección 3.4.2. Por lo general el método de la caída de tensión arroja los mejores resultados. Se recomienda que los mismos instrumentos sean usados para las mediciones en frío y en caliente, esto con el fin de reducir los errores introducidos por los instrumentos. Como un método alternativo, se puede usar un puente doble o su equivalente, en este caso las mediciones en frío y caliente se tomaran en devanados estacionarios de baja resistencia antes y después de la prueba como se indica en la sección 3.6.3.1.2.

- **Para devanados de armadura**

Las mediciones de la resistencia en frío y caliente del devanado o una porción del mismo pueden tomarse con instrumentos adecuados como un puente doble KELVIN o mediante el método de la caída de tensión. Cuando se realizan las mediciones de la resistencia en frío la máquina tiene que permanecer en reposo durante un periodo de tiempo de longitud suficiente para que la temperatura en todo el rotor se estabilice. La temperatura superficial se debe medir de manera simultánea con la resistencia en frío.

Si se usa en método del doble puente, las terminales del puente se deben conectar a dos segmentos del colector ubicados entre escobillas adyacentes y separados por una distancia que como mínimo debe ser la mitad del espacio entre escobillas. Se debe prestar esencial atención a reducir la resistencia de contacto a un valor despreciable y los segmentos utilizados se deben marcar adecuadamente.

Con el método de la caída de tensión, una corriente no mayor que el 10% de la nominal debe circular a través de las escobillas. La caída de tensión se mide con un mili-voltmetro con los terminales conectados a dos segmentos del conmutador

ubicados entre dos escobillas adyacentes y separados por una distancia que como mínimo es la mitad del espacio entre escobillas. Las conexiones a los segmentos de las puntas del voltmetro se deben hacer a presión a fin de perforar cualquier lamina de oxido que se pudiera encontrar en la superficie del colector. Los segmentos usados deben marcarse adecuadamente.

En máquinas de gran tamaño, en donde posicionar el rotor resulta difícil, se deben usar muchas posiciones del colector para realizar la medición, de esta manera, se asegura que por lo menos un par de los segmentos usados en la medición estará localizado entre dos escobillas adyacentes.

Después de la determinación de la resistencia en frío, la armadura debe rotarse mínimo una revolución y llegar a un punto cercano al de inicio. Entonces se debe determinar la resistencia en frío nuevamente. Si este nuevo valor no esta de acuerdo con la medición inicial, la causa de ello se debe encontrar, corregir y repetir la medición. A fin de obtener mejores resultados, las resistencias en frío y caliente deben medirse entre el mismo par de segmentos seleccionado.

3.6.3.2. Medición de la temperatura superficial de los componentes

Este método consiste en determinar la temperatura de las partes de la máquina, para ello se pueden usar termómetros, termo resistores o detectores infrarrojos de temperatura; cualquiera de estos instrumentos puede usarse en la medición de las partes más calientes de fácil acceso sin alterar la estructura de la máquina. Las siguientes lecturas de temperatura, si se toman, deben ser medidas de la manera que se describe a continuación:

- **Devanados (estacionarios)**

En máquinas de potencias mayores a un caballo de fuerza, los sensores de temperatura deben ubicarse como mínimo en un campo principal y una bobina del

campo de conmutación de cada lado de la máquina. Muchos sensores se deben ubicar en cada bobina. Cuando el tamaño y la accesibilidad de la máquina hacen de esta práctica algo inviable, el número de ubicaciones puede disminuirse.

En máquinas con potencias menores a un caballo de fuerza, se sigue el anterior procedimiento a excepción de que se puede usar solo un sensor de temperatura por polo. Este debe ubicarse en el punto medio de la distancia entre el polo y la parte superior de la máquina. Se debe tener cuidado de no ubicar los sensores en lugares en donde sean enfriados por la ventilación y que no afecten sustancialmente el flujo de aire. En este tipo de máquinas también es necesario medir la temperatura de la parte superior de la estructura. Es muy importante que durante la realización de este ensayo se tome potencia rectificada.

- **Rodamientos**

- Esferas o tipo rodillo: las lecturas de temperatura deben tomarse sobre las esferas si es posible. De lo contrario lecturas de la temperatura de la carcasa pueden tomarse.

- Tipo *sleeve*: las lecturas deben tomarse lo más cerca posible al revestimiento de la superficie del rodamiento.

- Lubricante: es habitual medir la temperatura de los aceites lubricantes. Las lecturas deben tomarse en los depósitos. En sistemas con lubricación forzada, se deben tomar lecturas de las temperaturas de entrada y de salida.

3.6.3.3. Medición de la temperatura ambiente

El procedimiento seguido para la medición de la temperatura ambiente es dado en el estándar IEEE Std 119-1974.

En máquinas abiertas, la temperatura del aire refrigerante puede medirse usando varios sensores ubicados en diferentes puntos al rededor de la máquina y hasta la mitad por encima de la base. Estos dispositivos deben protegerse de corrientes de aire anormales y de la radiación de calor. Ellos deben ubicarse en el camino del aire refrigerante. Cuando la circulación de aire refrigerante es restringida por encerramientos, en el área de prueba, la temperatura del rotor se debe referir al valor medio de todas las temperaturas del aire refrigerante.

Para máquinas selladas, máquinas ventiladas separadamente, la temperatura del aire refrigerante debe medirse mediante sensores ubicados en los ductos de dicho aire a la entrada de la máquina.

El valor tomado para la temperatura del aire refrigerante es el promedio de todas las temperaturas medidas a intervalos de tiempo iguales durante la última hora de la prueba, en caso de pruebas de tiempo limitado, estos intervalos deben tomarse durante los últimos quince minutos de duración de la prueba.

3.6.4. Procedimiento de prueba

La máquina debe cargarse según lo esbozado en el sección anterior. La prueba debe hacerse a tensión y velocidad nominales. La cargabilidad puede determinarse por medición directa de la entrada o la salida. Una máquina con más de una clasificación debe probarse en aquella clasificación para la cual se presenta el máximo incremento de temperatura. En caso de que esto no se pueda determinar se deberán hacer pruebas en todas las clasificaciones.

- La prueba debe realizarse por el tiempo especificado o hasta alcanzar una temperatura constante. Si otra cosa no se especifica, una prueba corta solo puede comenzar cuando las partes de la máquina estén como máximo a 5 grados Celsius de la temperatura ambiente.

- En máquinas de operación continua cuando se necesita mucho tiempo para alcanzar una temperatura estable, sobrecargas razonables durante la parte preliminar de la prueba pueden usarse para acortar este tiempo.
- En pruebas de carga continua, las lecturas se deben tomar como mínimo cada 30 minutos hasta que los incrementos de temperatura no varíen más del 2% para tres lecturas consecutivas cada media hora. En pruebas de carga con tiempo limitado, las pruebas deben tomarse tan a menudo como sea practico y los intervalos deben ser consistentes con el tiempo de clasificación.
- Se deben tomar precauciones para minimizar el periodo de parada y mantener la temperatura durante dicho periodo, como por ejemplo manteniendo la corriente de armadura. Es recomendable limitar el tiempo requerido para obtener la primera lectura de resistencia o temperatura a un valor que no exceda lo especificado en la siguiente clasificación:

Clasificación.	Tiempo.
50 kW y menores.	60 s.
50 kW hasta 200 kW.	90 s.
Más de 200 kW.	120 s.

Tabla 18 tiempos máximos para obtener las lecturas de resistencia²⁴.

3.6.5. Determinación de la temperatura de la armadura

3.6.5.1. Medida de resistencia

Las primeras lecturas tomadas deben hacerse dentro de los límites de tiempo dados en la sección 3.6.4.4. Las lecturas deben tomarse tan frecuentemente como

²⁴ Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985

sea práctico. Estas deben tomarse en un periodo de tiempo no menor a 10 minutos después del cierre. El tiempo debe ser medido desde el instante de cierre

La temperatura más alta será considerada como el valor determinado por extrapolación de los datos en el instante de cierre. Dicha extrapolación puede hacerse usando papel uniformemente escalado y graficando versus el tiempo los valores del logaritmo del incremento de temperatura determinado de los datos de medida de resistencia. Un ejemplo de como se grafica esto se muestra a continuación.

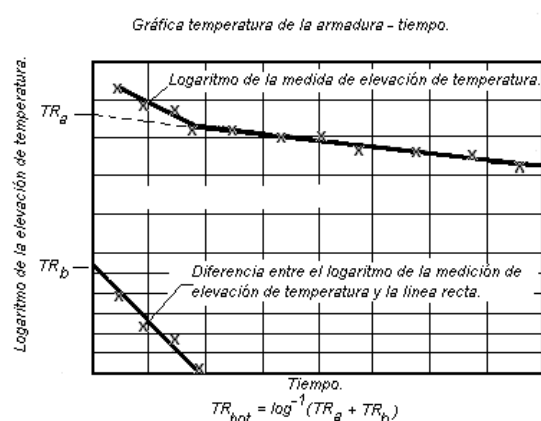


Figura. 27 Temperatura de la armadura contra el tiempo²⁵

Una línea recta es dibujada a través de los puntos de prueba haciendo caso omiso a los anteriores puntos. Una segunda recta se dibuja la cual representa la diferencia entre los puntos de prueba anteriores y al primera línea recta. La temperatura inicial del devanado o parte de el medida es derivada del antilogaritmo de la suma de las intercepciones de ambas líneas rectas con el eje Y.

3.6.5.2. Mediciones superficiales

²⁵ Tomada del estándar IEEE Std. 113-1985

- **Devanados**

Si se toman medidas de la temperatura superficial de los devanados, los sensores de temperatura deben ubicarse como se recomienda a continuación:

- Sobre el núcleo de la armadura en las ranuras.
- Sobre los conductores al final de los devanados.
- En donde ellos no estén cubiertos por bandas aislantes.
- Sobre las bandas aislantes.

Estos sensores se deben dividir equitativamente entre el colector final y la unidad final de la máquina siempre que sea posible.

- **Conmutador**

Inmediatamente en cierre, los termómetros o demás sensores de temperatura, o ambos, deben ubicarse en la superficie del colector. En máquinas con múltiples colectores, cada selección de ellos deber ser tratada como un colector separado.

- **Determinación de la temperatura de las superficies calientes**

La temperatura de las superficies calientes será considerada como el valor de las temperaturas leídas extrapolada en el punto de cierre. Si la temperatura leída indica un incremento después de las primeras lecturas seguido de valores menores, la máxima temperatura leída se considerará como la temperatura en el cierre.

3.6.5. Incrementos de temperatura

Las máquinas deben entregar pruebas de ventilación que estén bajo las condiciones estándar dadas anteriormente. Cuando la máquina es refrigerada por

el aire que esta a su alrededor, el incremento de temperatura se obtiene restando la temperatura ambiente de la temperatura de la máquina. Si la máquina es refrigerada con aire obtenido de una fuente remota, el incremento de temperatura se obtiene restando el promedio de la temperatura del aire que entra a la máquina de la temperatura de la máquina. La temperatura de la máquina debe ser la máxima lectura obtenida en el tiempo de cierre.

3.7. PRUEBAS VARIAS

3.7.1. Pruebas de ruido auditivo

Acerca del procedimiento de prueba recomendado para medir el ruido emitido por máquinas eléctricas de rotación, se recomienda ver el estándar IEEE Std 85-1973.

Con rectificadores de potencia, los motores exhiben características de ruido significativamente diferentes. Es por esto que, si el ruido es significativo, las mediciones deben hacerse siguiendo los siguientes criterios:

- La amplitud y frecuencia del ruido producido será determinado por las características de la fuente de potencia, incluyendo aquellos asociados con el rizado de la corriente del circuito de armadura. Este ruido se adiciona al producido por la operación con potencia DC.
- El máximo nivel de ruido resultante de rectificadores de potencia ocurre cuando el rizado de la corriente AC de la armadura es máximo y cuando los devanados del campo principal son excitados.
- El balance de las fases de la fuente de potencia afecta significativamente el ruido. Se debe observar la forma de onda de la corriente y eliminar cualquier desbalance.

3.7.2. Prueba de interferencia electromagnética

Esta prueba normalmente no es necesaria para motores industriales. Se recomienda revisar la norma ANSI C63.4-1981. Los métodos descritos en este estándar deben ser utilizados. Los límites no se aplican.

3.7.3. Forma de onda de la tensión

Este ensayo es para determinar la variación de la tensión terminal desde un potencial de corriente directa puro generado por una máquina DC pero excluyendo las Tensiones de alta frecuencia generadas por el chisporroteo de las escobillas. El equipo de medida debe tener una respuesta en frecuencia tal que su llano este desde 3dB hasta una frecuencia igual a tres veces la frecuencia de los segmentos del colector. El rizado de la tensión expresado como un porcentaje es igual a 100 veces la máxima variación de la tensión pico a pico dividido en dos veces la tensión promedio de prueba.

Esta prueba debe tomarse a velocidad nominal, tensión nominal y sin carga. Si se especifica, también puede realizarse con algunas cargas específicas, pero se debe hacer con una disposición que asegure que el dispositivo de carga no introduce armónicos.

La variación de la tensión pico a pico puede medirse usando un osciloscopio de rayos catódicos, un oscilógrafo adecuado o un voltmetro electrónico que mida tensión pico.

3.7.3.1. Osciloscopio de rayo catódico o método del oscilógrafo

Lecturas de la variación máxima de la tensión pico a pico puede obtenerse con el osciloscopio o el oscilógrafo conectando a los terminales de la máquina a través de un filtro pasa-bajos adecuado. El filtro debe tener una frecuencia de corte no

menor a tres veces la frecuencia de los segmentos del colector. Una frecuencia de corte de 16000 Hz es recomendada. Este filtro debe tener una atenuación insignificante hasta el 80% de la frecuencia de corte. Una tensión de corriente continua proveniente de una fuente calibrada adecuadamente puede usarse para calibrar el instrumento.

3.7.3.2. Método de lectura del pico con un voltmetro electrónico

Lecturas de la tensión pico se pueden obtener con un voltmetro de valor pico conectado en serie con un capacitor conectado en los terminales de la máquina. Se deben tomar lecturas sucesivas con el voltmetro conectado en cada una de las dos polaridades. La lectura más alta entre las dos será la tomada.

Precaución: cualquier resonancia en el circuito de medición debe evitarse.

3.7.4. Medición de la respuesta de excitador

Las características principales de la respuesta de excitador, formalmente la respuesta nominal del excitador se define en ANSI/IEEE Std 100-1984. Este estándar no es aplicable a excitadores electrónicos o al excitadores con campos serie significativos.

Esta prueba se debe tomar a velocidad nominal y sin carga en el excitador. Un dispositivo de registro permanente con una frecuencia de diez o más veces mayor que la frecuencia del excitador debe ser utilizado. Si no hay un temporizador interno en el dispositivo de registro, el elemento debe conectarse a un oscilador adecuado u otro dispositivo temporizador de frecuencia conocida para una onda temporizada en el oscilograma. Los otros canales de registro deben conectarse a los terminales de la armadura del excitador.

3.7.5. Medida de la inductancia de los devanados

3.7.5.1. Prueba de la inductancia de la armadura para máquinas shunt y compuesta

- **Inductancia no saturada**

Esta prueba se toma aplicando una corriente alterna monofásica de 50 o 60 Hz en los terminales de la armadura de la máquina, incluyendo todos los devanados de todos los arrollamientos de campo serie conectados. EL devanado del campo paralelo debe ser corto circuitado para evitar el desarrollo de altas Tensiones en el devanado. La inductancia determinada es generalmente representativa de la inductancia de las otras frecuencias y con los componentes de AC y DC presentes.

Advertencia: si el campo paralelo esta en circuito abierto, altas Tensiones pueden presentarse en este devanado y las terminales, las cuales pueden causar lesiones al personal y daños en los equipos.

La armadura debe ser bloqueada a fin de evitar su movimiento. Escobillas de carbón normal pueden usarse si la corriente alterna es limitada a aproximadamente el 20% de la corriente nominal de la máquina para evitar sobrecalentamientos en las escobillas o del colector durante la prueba. Las escobillas deben ser equipadas y revisadas antes de empezar.

Con la corriente alterna ajustada sucesivamente en tres pasos igualmente espaciados, el máximo valor no debe exceder le 20% de la corriente nominal de la máquina, las mediciones de tensión debe tomarse a través del circuito de la armadura y a través de los componentes mismos. El ángulo de fase entre la corriente y las Tensiones debe observarse usando un equipo adecuado como un osciloscopio.

Alternativamente, un wattmetro puede usarse para determinar la componente reactiva de la impedancia y la inductancia asociada. La inductancia del circuito de armadura y de los componentes, a partir de los datos promedio de la prueba es:

$$L = \frac{V \sin \theta}{2\pi f} \quad (3-15)$$

En donde:

L = Inductancia (henrys).

V = Tensión (volts).

I = Corriente (amperes).

θ = Ángulo de fase entre la tensión y la corriente.

f = Frecuencia (hertz)

- **Inductancia saturada**

Esta prueba es igual a la anterior excepto de que el devanado paralelo se excita con una fuente de corriente directa, como se describe en la sección 3.3.5.1. A corriente de campo paralelo nominal o, en ausencia de esto, a la corriente correspondiente de campo lleno, plena carga de la máquina.

3.7.5.2. Inductancia de la armadura en máquinas serie

La inductancia de la armadura en estas máquinas varía ampliamente con la frecuencia y la amplitud de las componentes AC y DC de la corriente. En consecuencia, los valores de inductancia descritos son un valor para propósitos analíticos y de control de producción mas no una medida de la inductancia a carga nominal y a frecuencias diferentes a la de la prueba. Las medidas de inductancia saturada se pueden hacer excluyendo los devanados del campo serie, los cuales

son excitados a corriente nominal usando un suministro de potencia DC como se describe en la sección 3.3.5.1. La inductancia determinada, no incluye la inductancia suministrada por el campo serie la cual debe ser determinada analíticamente.

3.7.5.3. Prueba de inductancia de campo paralelo

En los procedimientos de prueba y cálculo descritos a continuación, la inductancia del campo paralelo es determinada por la tasa de acumulación de la corriente de campo paralelo después de la interrupción brusca de la tensión en los terminales del campo paralelo con la máquina impulsada a velocidad nominal y con el circuito de la armadura abierto. También, el denominado valor efectivo de la inductancia es calculado como la tasa de acumulación de flujo en el eje directo indicado por la tensión generada en la armadura medida en las escobillas. Ambos valores de inductancia se evalúan como el producto de la resistencia de campo paralelo y el tiempo necesario para lograr el 63.2% del valor máximo de la variable.

$$L_f = R_f * T_{if} \quad (3-16)$$

$$L_{f_{eff}} = R_f * T_{va} \quad (3-17)$$

En donde:

L_f = Inductancia del campo paralelo (henrys).

$L_{f_{eff}}$ = Inductancia efectiva del campo paralelo (henrys).

R_f = Resistencia DC de campo paralelo (ohms).

T_{if} = Tiempo necesario para lograr el 63.2% de la corriente de campo (segundos).

T_{va} = Tiempo necesario para lograr el 63.2% de la tensión de armadura (segundos).

- **Inductancia no saturada**

Con la máquina impulsada a velocidad nominal, el devanado paralelo se debe excitar con una fuente de tensión que tenga una regulación menor al 2%. Después de esto la tensión del campo paralelo se reduce hasta cero y se abre el circuito de campo. Ahora se ajusta la tensión de excitación al valor preestablecido. Y por ultimo se observa y registra la tensión y la corriente del campo paralelo, la tensión de armadura y la velocidad en el cierre del circuito de campo paralelo.

- **Inductancia saturada**

Es necesario montar el circuito de excitación mostrado en la figura 26 con el fin de permitir un cambio brusco en la tensión de excitación entre valores de rendimiento de aproximadamente el 90% y el 110% de la tensión nominal de armadura.

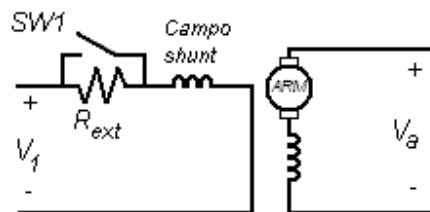


Figura. 28 circuito utilizado para la obtención de la inductancia saturada.

Con el interruptor SW1 cerrado, se ajusta el suministro de tensión al campo paralelo, V_f , para producir una corriente de campo de rendimiento del 110% de la tensión nominal de armadura. Con el interruptor SW1 abierto, ajuste el resistor R_{ext} dos veces para obtener valores de rendimiento del 90% y 110% de la tensión nominal de la armadura, terminando en el valor del 90%. Se deben registrar los valores de la tensión y corriente de campo paralelo, la tensión de armadura y la velocidad al cierre del interruptor SW1.

3.7.6. Corriente de eje

Esta corriente puede causar problemas en los rodamientos del motor o en el equipo conectado a el.

En rectificadores de potencia, los motores pueden estar sujetos a esta corriente dependiendo de las características y la puesta a tierra de la fuente involucrada y de los diseños mecánicos y electromagnéticos del motor.

3.7.6.1. Causas de la corriente de eje

Esta corriente se debe a tres causas diferentes:

- Corrientes circulantes causadas por fuerzas electromotrices generadas en el eje. Esta tensión se genera a causa de una distribución asimétrica del flujo magnético entre los polos de los yugos estacionarios o rotacionales, lo cual resulta en un flujo neto que encierra el eje y que es alternante en su polaridad. Este flujo alterno genera una fuerza electromotriz entre los extremos del eje. Si esta fuerza electromotriz es suficiente para romper la fuerza dieléctrica de la película de aceite, esta corriente fluirá si un circuito eléctrico externo esta presente entre los rodamientos.
- Corrientes localizadas pueden resultar en flujos magnéticos circulando por el eje y sus rodamientos. Si una corriente neta encierra el eje, que puede resultar de las conexiones de los devanados del estator, una fuerza electromotriz es generada entre los extremos del eje. El flujo magnético resultante pasa a través de los rodamientos y la estructura externa de soporte de la máquina. La rotación del eje genera una tensión DC homo polar alrededor de los rodamientos, la cual, sí es suficiente para romper la fuerza dieléctrica de la película de aceite, creara corrientes localizadas que dañaran los rodamientos. A causa de la saturación magnética del eje o del circuito magnético asociado y a que la velocidad de trabajo

es limitada para permitir una adecuada operación de los rodamientos, la tensión directa muy rara vez puede exceder un valor de una pequeña fracción de un volt.

- En rectificadores de potencia, corriente en los rodamientos puede resultar del acoplamiento capacitivo entre los devanados de la armadura y su estructura de soporte, particularmente en motores con rodamientos *sleeve*.

3.7.6.2. Pruebas para la corriente de eje

- **Corriente circulante debida a fuerzas electromotrices en el eje**

Esta prueba debe tomarse con la máquina en vacío, a tensión nominal, y a velocidades base y máxima. El circuito eléctrico externo formado por la estructura de soporte de los rodamientos, los rodamientos, y el eje, debe estar abierto.

- Para cada una de las condiciones anteriores, la fuerza electromotriz generada entre los extremos del eje debe medirse con un milivoltmetro AC. Un instrumento con una escala de 100mV es generalmente adecuado. Los instrumentos electrónicos o térmicos son adecuados para esta prueba.

Advertencia: las puntas de prueba deben asegurar un buen contacto de metal a metal y los resultados obtenidos se deben repetir.

- Para las condiciones anteriores, la medida de corriente debe hacerse con un amperemetro AC de 60 amperes o mas, las puntas deben tener una longitud de 3 metros y de un calibre numero 4 o mayor conectado entres los extremos del eje.

Precaución: el contacto entre las puntas de prueba y el eje debe tener una resistencia de contacto muy baja. La magnitud de la corriente será por lo general de un valor que se puede medir con la escala mas baja del instrumento. La escala de lectura debe ser registrada. La magnitud actual se determinara con una

adecuada calibración. Un instrumento con lecturas bajas tendrá también una impedancia alta, con lo cual se conseguirán buenos resultados.

- **Corrientes locales debidas a fuerzas electromotrices en el eje**

En este ensayo la máquina debe estar a carga nominal, tensión nominal, y máxima velocidad nominal. El circuito magnético formado por la estructura de soporte de los rodamientos, los rodamientos, y el eje debe simular la actual aplicación tan cerca como sea posible. La medida de la tensión residual bajo las anteriores condiciones se realiza con un milivoltmetro de corriente directa. Un instrumento con una escala de 100mV es por lo general adecuado. Las puntas del instrumento deben tener un contacto con la superficie del eje de baja resistencia en cada lado del habitáculo del rodamiento. Esta prueba debe repetirse para cada rodamiento.

- **Corriente en los rodamientos debidas a capacitancias entre los devanados y la tierra**

En rectificadores de potencia, posibles potenciales en el eje se pueden encontrar con un osciloscopio o con un voltmetro AC electrónico con la máquina operando bajo condiciones normales de operación y con las escobillas de tierra del eje levantadas. Niveles de tensión menores a 50 volts pico o pico pueden considerarse normales. Si la lectura muestra un nivel alto de tensión, la eficacia de las escobillas de tierra puede reducirse apreciablemente, trayendo con ello, un incremento del peligro para el personal. En consecuencia, el correcto funcionamiento de la fuente de potencia debe ser revisado. Con las escobillas de tierra del eje reducidas y con un mantenimiento adecuado, la tensión pico a pico debe disminuir a un valor menor que 5 volts bajo condiciones normales de operación.

Precaución: Las anteriores observaciones deben realizarse rápidamente a fin de evitar daños al eje y a los rodamientos.

3.7.6. Medidas del momento de inercia

A continuación se describen dos métodos para determinar el momento de inercia de las máquinas de corriente continua. El primer método es adecuado para ensayar máquinas ensambladas, particularmente de gran tamaño. El segundo método se refiere a pruebas hechas únicamente a la armadura.

3.7.7.1. Método de ensayo del retraso

- Determine las pérdidas por fricción de la máquina, incluyendo las pérdidas por fricción con las escobillas, usando los métodos descritos anteriormente. Se deben hacer pruebas a muchas velocidades y graficar la suma de las pérdidas como una función de la velocidad como se muestra en seguida:

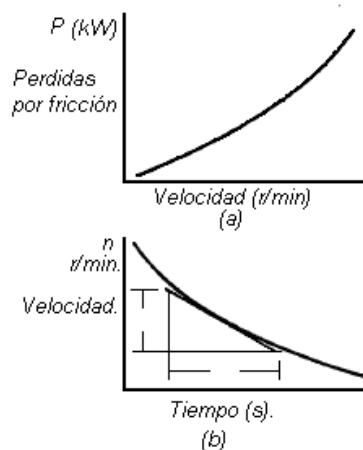


Figura. 29 curvas de potencia y de velocidad contra velocidad y tiempo respectivamente.

- Con la máquina desacoplada, incrementar la velocidad hasta la máxima velocidad nominal y se retira la armadura y la potencia del campo de excitación. Se debe medir la velocidad como una función del tiempo como

se muestra en la parte b de la anterior figura 27. De la pendiente de la curva, se debe derivar la tasa de cambio de la velocidad en función del tiempo.

- El momento de inercia se obtiene de observaciones realizadas a varias velocidades usando la siguiente ecuación:

$$J = \frac{P * 10^6}{c * n * \frac{dn}{dt}} \quad (3-18)$$

En donde:

J = Momento de inercia.

P = Pérdidas por fricción (kW a la velocidad n).

n = Velocidad rotacional (rpm).

$\frac{dn}{dt}$ = Taza de desaceleración.

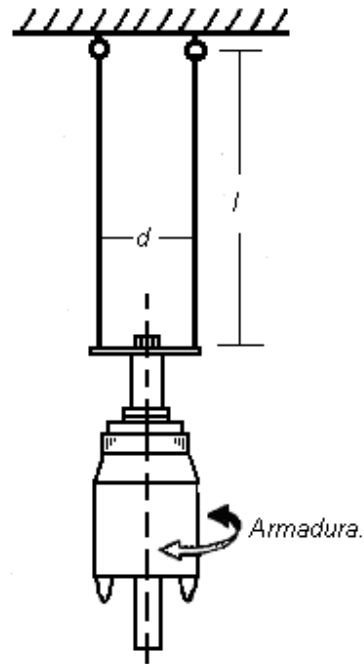
c = Constante relacionada con las unidades usadas.

J	c
$(kg * m^2)$	10.97
$(lb * ft^2)$	0.4621
$slug * ft^2$	14.88

Tabla 19 valores de la constante c para las diferentes unidades del momento de inercia.

3.7.7.2. Prueba de oscilación angular

Suspenda la armadura con el eje orientado verticalmente usando dos hilos verticales como se muestra en la figura 28.



Método de oscilación angular.

Figura. 30 Esquema del método de prueba de oscilación angular.

Los hilos deben ubicarse diametralmente, igualmente espaciados del centro del eje. El valor de la relación $\left(\frac{l}{d}\right)$ debe ser aproximadamente 10. Luego se rota la armadura pequeña cantidad desde la posición de equilibrio, después de esto, se libera midiendo la frecuencia de la oscilación angular. El momento de inercia se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$J = \frac{c * m * d^2}{l * f^2} \quad (3-19)$$

En donde

J = Momento de inercia.

m = Peso de la armadura.

l = Longitud de los hilos.

d = Separación de los hilos.

f = Frecuencia de oscilación en hertz.

c = Constante relacionada con las unidades usadas.

J	m	l, d	c
$(kg * m^2)$	Kg	m	$6.2 * 10^{-2}$
$(lb * ft^2)$	lb	ft	$2.04 * 10^{-1}$
$(slug * ft^2)$	lb	ft	$6.33 * 10^{-3}$

Tabla 20 valores de la constante c para las diferentes unidades usadas.

4. MÁQUINA DE INDUCCIÓN.

Los motores de inducción están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están constituidos por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija y la otra es móvil, llamadas respectivamente estator y rotor. El devanado del rotor, por el cual fluye corriente alterna, producida por inducción desde el devanado del estator, esta formada por conductores de aluminio o de cobre alojados en un rotor de láminas de acero. Se colocan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la jaula de ardilla o bien en uno de los extremos en el caso del rotor devanado. Los motores de inducción de rotor devanado son poco utilizados como consecuencia de su costo y por que requieren mayor mantenimiento que los de jaula de ardilla.

En las secciones siguientes de este capítulo se discutirán algunos de los procedimientos utilizados para la determinación de los diferentes parámetros que definen el desempeño de una máquina de inducción. Los procedimientos en los cuales se basa el presente análisis corresponden a los recomendados por la IEEE²⁶ para tales casos.

4.1. Generalidades

4.1.1. Fuente de alimentación

- **Selección**

Debido a que el funcionamiento de una máquina de inducción depende no sólo del valor de la tensión de línea y de la frecuencia sino también de la forma de onda y del equilibrio tanto en la magnitud como en el ángulo de fase de las Tensiones de línea, los datos correctos pueden obtenerse únicamente

²⁶ Institute of Electrical and Electronics Engineers.

realizando una medición cuidadosa, usando los equipos de medida adecuados y empleando una fuente conveniente de potencia.

- **Forma de onda**

La fuente de alimentación suministrará las Tensiones equilibradas de tal manera que se aproximen a la forma de una onda sinusoidal. El coeficiente de la distorsión armónica, THD, no debe ser mayor que 0.05 [7]. El THD se define según como se indica en la siguiente ecuación.

$$THD = \frac{\sqrt{E^2 - E_1^2}}{E_1} \quad (4-1)$$

En donde:

E_1 = Es el valor RMS de la onda fundamental de tensión, en voltios.

E = Es el valor RMS de la onda de tensión total, en voltios.

- **Desequilibrio de la tensión**

El desequilibrio de la tensión no debe sobrepasar el 0.5%. El porcentaje de desequilibrio de la tensión es igual a 100 veces que la desviación máxima de la tensión de la promedio dividido en la tensión promedio.

4.1.2. Frecuencia

Para las pruebas en general, la frecuencia debe encontrarse dentro del $\pm 0.5\%$ del valor requerido para la prueba que se esta realizando, si no se especifica algo diferente. Cualquier salida de la frecuencia especificada durante la prueba afecta directamente a la eficiencia obtenida mediante los métodos A, B, y B1²⁷

²⁷ Estos métodos se describen en la sección 4.4.2

de la prueba de eficiencia. Cuando estos métodos son empleados, la frecuencia debe estar dentro del $\pm 0.1\%$ del valor especificado para el ensayo.

No se deben permitir cambios bruscos en la frecuencia durante el desarrollo de la prueba, esto es debido a que tales variaciones afectan los resultados de la máquina y a los instrumentos de medición. Las variaciones en frecuencia durante una prueba no deben sobrepasar el 0.33% de la frecuencia promedio.

4.1.3. Tipos de pruebas

- **Típicas**

Las máquinas de inducción polifásicas se someten generalmente a pruebas de rutina, pero también pueden ser sometidas a pruebas adicionales.

Las pruebas incluidas en los ensayos de rutina típicos se encuentran incluidos en el estándar NEMA MG 1-2003 [B7] partes 12 y 20.

- **Pruebas preliminares**

La medida de la resistencia de los devanados es generalmente la primera prueba realizada. La resistencia o la continuidad de todos los circuitos y devanados deben ser observados al tiempo. La temperatura ambiente debe medirse según las indicaciones del estándar IEEE Std 119-1974. Si la máquina tiene detectores embebidos, éstos se pueden utilizar para confirmar que los devanados están a la temperatura ambiente.

- **Pruebas de corrientes en vacío**

Las pruebas de corrientes sin carga se hacen para determinar las pérdidas del hierro y las de fricción.

- **Pruebas con carga**

Las pruebas con la carga se realizan para determinar la eficiencia, el factor de potencia, la velocidad, la corriente, y los incrementos de temperatura. Para todas las pruebas con carga, la máquina debe encontrarse correctamente alineada y sujeta con seguridad. Para que las lecturas tomadas sean útiles en los análisis, el incremento de temperatura en la máquina debe ser un valor entre el 50% y 120% del incremento de temperatura nominal. El procedimiento generalmente consiste en tomar lecturas utilizando valores descendentes de carga.

- **Pruebas con el rotor bloqueado**

Es necesario tener en cuenta que la prueba de las máquinas de inducción bajo condiciones de rotor bloqueado implica altos niveles de esfuerzo mecánico y altas tasas de calentamiento. Por tal razón, es necesario que:

- Los medios mecánicos utilizados para asegurar la máquina y bloquear el rotor posean la fuerza necesaria para prevenir posibles lesiones a los operarios o daño al equipo.
- La dirección de la rotación se establece antes de la prueba.
- La máquina está en una temperatura aproximadamente igual a la ambiente antes de que se comience la prueba.

Las lecturas de la corriente y del torque deben ser tomadas tan rápido como sea posible, y, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder el incremento de temperatura nominal en más 40 °C. Las lecturas para cualquier punto deben ser tomadas 5 segundos después de que la tensión es aplicada.

4.1.2. Temperaturas estandarizadas

4.1.2.1. Temperatura ambiente de referencia

La temperatura ambiente de referencia será de 25 °C [7]. Si la temperatura ambiente durante cualquier prueba de funcionamiento difiere de la temperatura ambiente de referencia, las determinaciones del funcionamiento deben ser corregidas a una temperatura ambiente de 25 °C.

Las temperaturas reales de la prueba serán utilizadas en la separación de pérdidas en la prueba de vacío y en la determinación de las pérdidas por cargas parásitas por el método directo.

4.1.2.2. Temperatura especificada

La eficiencia de la máquina, con todas las cargas, debe ser determinada cuando la máquina se encuentra a la temperatura especificada. Para determinar exactamente los valores de algunos componentes de las pérdidas con algunos métodos de la prueba de eficiencia, es necesario que las temperaturas reales de la prueba sean utilizadas en el análisis. Si las temperaturas de la prueba no son iguales a las temperaturas especificadas, se deben realizar correcciones a las pérdidas I^2R dependiendo de la temperatura.

La temperatura especificada será determinada por una de los siguientes ítems:

- La temperatura especificada es el incremento de temperatura medido por una resistencia a carga nominal con una temperatura de 25 °C. La carga nominal es clasificada en la placa de características para un factor de servicio igual a 1.
- La temperatura especificada es el incremento de temperatura medido, conforme al artículo anterior, en una máquina duplicado²⁸.
- Cuando el incremento de temperatura a carga nominal no se ha medido, la temperatura especificada se selecciona de la tabla 19 basada en la clase del

²⁸ Una máquina duplicado se define como una de la misma construcción y diseño eléctrico

sistema del aislamiento. Si el incremento de temperatura nominal se estipula para ser la de una clase más baja de sistema del aislamiento que el usado en la construcción, el valor de la temperatura enumerado para la clase más baja del aislamiento será utilizado como la temperatura especificada.

Clase del sistema de aislamiento.	Temperatura en °C. (Temperatura total, incluye los 25°C de la temperatura ambiente de referencia).
A	75
B	95
F	115
H	130

Tabla 21. Temperaturas especificadas para el cálculo de la eficiencia en máquinas en donde la temperatura a plena carga no ha sido medida.

4.1.3. Precauciones

Muchas de las pruebas descritas en estos procedimientos someten a la máquina a esfuerzos térmicos y/o mecánicos más allá de límites normales del funcionamiento. Para reducir al mínimo el riesgo de daño a la máquina, se recomienda que todas las pruebas estén realizadas bajo supervisión del fabricante o de acuerdo a sus recomendaciones.

4.2. MEDICIONES

4.2.1. Eléctricas

- **Valores RMS**

Todas las mediciones de Tensiones y corrientes son valores RMS, a menos que se especifique lo contrario.

- **Selección de los instrumentos**

Debe utilizarse Instrumentos y sus accesorios calibrados de alta precisión. Los instrumentos análogos o digitales se pueden utilizar en la prueba. Los factores que afectan la exactitud, particularmente con los instrumentos análogos no electrónicos, son

- Cargamento de la fuente de la señal.
- Calibración de las puntas de prueba.
- Rango, condición, y calibración del instrumento.

Dado que la exactitud del instrumento se expresa generalmente como porcentaje de su escala máxima, el rango del instrumento elegido debe ser tan bajo como sea posible.

Los instrumentos electrónicos son generalmente más versátiles y tienen impedancias de entrada mucho más altas que los instrumentos no electrónicos [6]. Una impedancia de entrada alta reduce la necesidad de hacer las correcciones para la corriente medida por el instrumento. Sin embargo, los instrumentos con altas impedancias de entrada pueden ser más susceptibles al ruido.

Fuentes comunes de ruido son:

- Acoplamientos inductivos o electrostáticos de los conductores de señal en los sistemas eléctricos.
- Impedancias acopladas mutuamente o lazos de tierra.
- Nodos de referencia inadecuados.
- Interferencia conducida por la línea eléctrica

Los instrumentos tendrán un expediente de calibración, en el plazo de 12 meses de la prueba, indicando los límites del error no mayor al $\pm 0.5\%$ de la máxima escala para la prueba general o no mayor al $\pm 0.2\%$ de la máxima escala cuando los resultados de la prueba se usan con el método B. del ensayo de eficiencia. Cuando varios instrumentos están conectados en el circuito simultáneamente, las correcciones adicionales de la indicación del instrumento pueden ser necesarias.

Dependiendo de la disponibilidad, se puede utilizar sistemas de adquisición de datos automáticos adecuados o registradores de alta velocidad. La información adicional con respecto al uso de instrumentos se da en el estándar IEEE Std 120-1989.

- **Transformadores de medida**

Cuando se utilizan los transformadores de corriente y de potencial, se deben realizar correcciones para eliminar los errores introducidos por las relaciones de transformación tanto en la magnitud como en el ángulo de fase de las lecturas tomadas para la medición de potencia.

Los errores de los transformadores usados no deben ser mayores que el $\pm 0.5\%$ para las pruebas generales, o no mayores al $\pm 0.3\%$ cuando los resultados de la prueba se usan para calcular la eficiencia por medio del método B [7]. Cuando los transformadores y los instrumentos de medida para la medición de tensión, corriente, o potencia están calibrados como sistema de medición, los errores del sistema no pueden ser mayores al $\pm 0.2\%$ de plena escala cuando los resultados de la prueba se usan para calcular la eficiencia por medio del método B.

- **Tensión**

Cada tensión de línea debe medirse con las puntas de prueba conectadas a los terminales de la máquina. Si las condiciones locales no permiten tales conexiones, se debe medir la diferencia entre la Tensión en los terminales de la máquina y el punto de la medida; tal diferencia se debe evaluar y las lecturas deben corregirse. El promedio aritmético de los datos de prueba se utiliza en los cálculos del desempeño de la máquina.

- **Corriente**

Las corrientes de línea en cada fase del motor deben medirse, y el valor del promedio aritmético será utilizado para determinar el funcionamiento de la máquina a partir de los datos de prueba.

- **Potencia**

La entrada de potencia a un motor trifásico o la salida de potencia de un generador trifásico pueden medirse con dos wattmetros monofásicos conectados como en el método de dos wattmetros, con un wattmetro polifásico, o con tres wattmetros monofásicos. Las lecturas de la potencia deben corregirse si los errores medidos son significativos.

Todas las medidas y cálculos de potencia, eléctricas y mecánicas, deben realizarse en watts. Si la unidad de medida se cambia, se debe tener cuidado en que todos los valores afectados están convertidos correctamente.

4.2.1. Resistencia

4.2.2.1. Selección del instrumento

Se debe utilizar instrumentación de alta precisión, calibrada. Instrumentos análogos o digitales se pueden utilizar en la prueba. Los instrumentos deben llevar un expediente de la calibración, en el plazo de 12 meses de la prueba, indicando los límites del error no mayor al $\pm 0.2\%$ de la escala máxima. Se puede utilizar un sistema de adquisición de datos automático adecuado si este esta disponible.

4.2.2.2. Medida de la resistencia

Los procedimientos dados en IEEE Std 118-1978 e IEEE Std 119-1974 deben ser utilizados al medir la resistencia de la bobina del estator.

4.2.3. Mecánicas

4.2.3.1. Potencia

Las medidas de potencia mecánica deben tomarse cuidadosamente y con un alto nivel de exactitud. Si se utilizan las medidas de salida de un dinamómetro, el acoplamiento y las pérdidas por fricción en los rodamientos deben ser compensados. Se deben utilizar dinamómetros correctamente seleccionados, de manera tal que el acoplamiento, la fricción, y las pérdidas por rozamiento con el aire del dinamómetro medidas a la velocidad nominal de la máquina bajo prueba no sean mayores al 15% de la salida nominal de la máquina que es probada; y el dinamómetro debe ser sensible a un cambio en el torque de 0.25% del torque nominal.

Los errores de la instrumentación usada para medir el torque no deben superar el $\pm 0.2\%$ de la escala máxima.

4.2.3.2. Velocidad y deslizamiento

- **Instrumentos**

Los métodos estroboscópicos o el del tacómetro digital pueden ser usados para determinar el deslizamiento o la velocidad. Cuando un estroboscopio se utiliza para medir el deslizamiento, la fuente de alimentación para el estroboscopio debe tener la misma frecuencia que la fuente de alimentación del motor.

Cuando se mide la velocidad, la instrumentación usada debe tener un error no mayor que ± 1.0 r/min. De la lectura [7].

4.2.4. Temperatura

4.2.4.1. Métodos para medir temperaturas

La temperatura de piezas de la máquina se puede medir mediante alguno de los siguientes métodos:

- Termómetro del alcohol
- Detector local de temperatura
- Detector encajado
- Resistencia de los devanados.

Las temperaturas medidas por cualquiera de estos métodos pueden desviarse substancialmente de los determinados por los otros métodos. Por lo tanto, las temperaturas medidas por alguno de esos métodos no deben interpretarse en lo referente a los estándares escritos en términos de métodos adicionales.

Para la información de carácter general, revisar el estándar IEEE Std 119-1974 y el IEEE Std 1-1986.

- **Termómetro de alcohol**

Los termómetros de alcohol se utilizan para medir la temperatura de las piezas accesibles de la máquina bajo prueba. Las temperaturas de las siguientes piezas pueden ser tomadas utilizando este método:

- Bobinas de estator, en por lo menos dos lugares.
- Núcleo del estator, en por lo menos dos lugares.
- Temperatura ambiente.
- Aire descargado de conductos del aire, o líquido refrigerador interno descargado a la entrada de refrigeradores de máquinas con la recirculación del sistema de enfriamiento.
- Chasis.
- Rodamientos.

Los termómetros de alcohol se deben ubicar para obtener la temperatura más alta de la pieza que es medida, a excepción del aire de entrada y de descarga o de la temperatura del líquido refrigerador, para los cuales deben ser colocados para medir los valores medios.

- **Detector local de temperatura**

La temperatura local de varias piezas de una máquina puede ser medida usando detectores locales de temperatura, los siguientes son algunos ejemplos de este tipo de instrumento:

- Termopares
- Pequeños termómetros de resistencia
- Termistores

La dimensión máxima del elemento de detección de estos detectores locales no debe superar los 5 cm. Estos detectores pueden emplearse para medir temperaturas en los mismos sitios que los termómetros de alcohol, y son de uso general en aquellos sitios no accesibles de la máquina en los cuales un termómetro de alcohol no puede utilizarse. Por lo general se instalan como una pieza permanente de la máquina y con frecuencia están disponibles para su uso durante la realización de las pruebas.

El elemento de detección debe ubicarse sobre o muy próximo a la pieza en la cual se desea averiguar la temperatura. Para el caso del aire entrada y de descarga o de otra temperatura del líquido refrigerante, se deben tomar medidas del valor promedio de la temperatura.

Instrumentos especialmente diseñados deben ser utilizados junto con los detectores locales de temperatura para prevenir la introducción de errores significativos o evitar posibles daños en el detector durante la medida. Debido a la variedad de materiales usados en estos detectores, se recomienda asegurar el instrumento seleccionado para el material específico usado en el detector. Muchos aparatos de medición de la resistencia ordinaria pueden ser inadecuados para utilizarlos con los termómetros de resistencia debido a la corriente relativamente grande que puede pasar a través del elemento de la resistencia mientras que se hace medición.

- **Detectores embebidos**

Detectores embebidos, como los detectores de temperatura resistivos o termopares, se usan comúnmente en máquinas de gran tamaño para monitorear la temperatura de los devanados durante su operación. Este tipo de sensor también es adecuado para tomar las lecturas de temperatura durante el desarrollo de pruebas realizadas a la máquina. Por lo general, se instalan al interior de las bobinas ubicadas en una ranura del estator. Un detector de temperatura resistivo

entrega una lectura que corresponde al valor promedio de la temperatura de dos lados de las bobinas ubicadas sobre el elemento sensor. Un termopar mide la temperatura del punto de ensamble del termopar en medio de dos bobinas.

- **Resistencia de los devanados**

La temperatura promedio del devanado puede encontrarse mediante una comparación de la resistencia del devanado a una temperatura determinada con la resistencia obtenida a una temperatura conocida.

4.2.4.2. Temperatura ambiente

Para medir la temperatura ambiente se deben seguir las recomendaciones dadas en el estándar IEEE Std 119-1974.

4.2.5. Procedimiento

Cualquier serie de incrementos o decrementos en las lecturas de los datos obtenidos, debe tratarse cuidadosamente con el fin de no sobrepasar el punto de ajuste deseado y así evitar la introducción de pérdidas por histéresis causadas por una inversión en la dirección de prueba.

4.3. ENSAYOS Y DETERMINACION DE PÉRDIDAS EN LA MÁQUINAS

A continuación se presenta una descripción de los tipos de pérdidas presentes en las máquinas de inducción y de algunos de los procedimientos de prueba existentes para determinarlas. Los resultados obtenidos de estos ensayos pueden utilizarse para determinar la eficiencia de la máquina mediante algunos métodos descritos más adelante.

4.3.1. Tipos de pérdidas

Algunos de los tipos de pérdidas presentes en una máquina de inducción se encuentran enumerados a continuación:

- Pérdidas en el estator, I^2R
- Pérdidas en el rotor, I^2R
- Fricción y pérdidas por rozamiento con el viento.
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parásitas.
- Pérdidas en los contactos de las escobillas.

Existen otros ensayos requeridos como soporte para los métodos de prueba de la eficiencia de la máquina, a continuación se mencionan algunos de ellos:

- Potencia en el eje.
- Correcciones a las lecturas de dinamómetro.
- Circuito equivalente.
- Pruebas de temperatura.

4.3.2. Pérdidas en el estator, I^2R

Para una máquina trifásica, estas pérdidas pueden ser determinadas utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{SIR} = 1.5I^2R = 3I^2R_1 \quad (4-2)$$

En donde:

I = Es la corriente de línea en amperes.

R = Es la resistencia DC, en ohms, medida entre dos terminales de la máquina y corregida por temperatura de ser necesario²⁹.

R_1 = Resistencia DC por fase, en ohms.

4.3.3. Pérdidas en el rotor, I^2R

Estas incluyen las pérdidas en los contactos de las escobillas. Para su determinación se usa una de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Pérdidas en el rotor de un motor } I^2R = (P_{in-est} - I^2R_{(est)} - P_{core}) * s \quad (4-3)$$

$$\text{Pérdidas } I^2R \text{ del generador} = (P_{out-est} + I^2R_{(est)} + P_{core}) * s \quad (4-4)$$

En donde:

s = Deslizamiento en por unidad, con la velocidad sincronía de la máquina como base.

Todas las potencias deben estar indicadas en watts.

Deslizamiento

El deslizamiento puede medirse directamente con un estroboscopio o puede calcularse a partir de las medidas de velocidad. Este parámetro debe convertirse a un valor numérico o por unidad para poder usarlo en los análisis de la máquina.

El deslizamiento s se define como la diferencia entre la velocidad de sincronismo de la máquina y la velocidad del motor.

$$\text{La velocidad de deslizamiento es } = n_s + n_t \quad (4-5)$$

²⁹ El procedimiento para la corrección por temperatura de la resistencia es descrito en el capítulo 3.

En donde:

$$n_s = 120 * \frac{f}{p} \quad (4-6)$$

n_s = Velocidad de sincronismo.

n_t = Velocidad medida.

f = Frecuencia.

p = Número de polos.

Corrección del deslizamiento por temperatura

El deslizamiento esta directamente relacionado con la resistencia del rotor, por tal razón, este puede sufrir algunas modificaciones causadas por la temperatura. Para realizar las correcciones respectivas, se pueden usar las mismas relaciones usadas para la corrección de la resistencia por temperatura. La ecuación utilizada para realizar esta corrección es la siguiente:

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{(t_t + k_1)} \quad (4-7)$$

En donde:

s_s = Deslizamiento corregido para la temperatura del estator, t_s .

s_t = Deslizamiento medido con una temperatura en los devanados, t_t .

t_s = Temperatura especificada para la corrección de la resistencia, en °C.

t_t = Temperatura de los devanados del estator durante la prueba, en °C.

$k_1 = 234.5$ Para el cobre.

$k_1 = 225$ Para el aluminio.

4.3.4. Resistencia de los devanados en frío

Con la máquina a temperatura ambiente, se mide la resistencia del devanado entre terminales con la máquina conectada en la configuración que se usará en la prueba de eficiencia. Se deben medir y registrar todas las combinaciones entre bornes, con el fin de garantizar que se mida el valor exacto de la resistencia. También se necesita medir y registrar la temperatura ambiente.

4.3.5. Pruebas sin carga

Para desarrollar este ensayo la máquina se debe operar como motor en vacío con tensión y frecuencias nominales. Deben tomarse lecturas de temperatura, tensión, corriente y potencia de entrada a frecuencia nominal. Las Tensiones necesarias deben estar en un rango que va desde el 125% de la tensión nominal hasta el punto en el cual cualquier reducción en la tensión hace que la corriente se incremente.

- **Estabilización de las pérdidas en los rodamientos**

Algunos motores pueden experimentar un cambio en las pérdidas por fricción hasta el momento en que los rodamientos alcanzan una condición de operación estable. En rodamientos lubricados con grasa, esta estabilidad no se alcanza hasta que los excesos de grasa son removidos. Se puede considerar que se ha alcanzado un nivel de estabilidad aceptable cuando la potencia de entrada sin carga no varía en más del 3% entre dos lecturas sucesivas con la misma tensión y en intervalos de media hora.

- **Corriente sin carga**

El promedio de las corrientes de línea a tensión nominal es el valor de la corriente sin carga.

- **Pérdidas sin carga**

La potencia de entrada medida es el total de las pérdidas en el motor sin carga. Estas pérdidas se componen de las pérdidas I^2R del estator, la fricción (*incluye las pérdidas por contacto con las escobillas*), pérdidas por rozamiento con el viento y pérdidas en el núcleo.

- **Fricción y rozamiento con el viento**

La fricción y las pérdidas por rozamiento con el viento pueden ser determinadas utilizando una progresión lineal de tres puntos de la curva de potencia contra tensión. Para determinar estas pérdidas se debe restar las pérdidas del estator de las pérdidas totales en cada tensión de prueba y dibujar la curva resultante de potencia contra tensión, llevando la curva hasta que la tensión se hace igual a cero. El cruce de la curva en donde la tensión se hace nula corresponde a las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento.

- **Pérdidas en el núcleo**

Este tipo de pérdidas se obtiene restando las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, de la potencia de entrada menos las pérdidas en el estator. Se recomienda la construcción de una curva de este tipo de pérdidas contra tensión, esto con el fin de poder determinar las pérdidas para cualquier tensión.

4.3.6. Pruebas con carga

La mayor parte de los métodos de prueba para determinar la eficiencia requieren de una prueba con carga. Para realizar este tipo de ensayo, la máquina es acoplada con una carga y sometida a cuatro puntos de carga igualmente espaciados que van desde el 75% hasta el 150% de la carga nominal [7].

En cada punto de carga se deben obtener lecturas de potencia eléctrica, corriente, tensión, frecuencia, velocidad o deslizamiento, torque, temperatura o resistencia de los devanados y temperatura ambiente. El valor inicial de la carga debe ser el máximo y debe descender progresivamente hasta llegar al mínimo valor.

Algunos de los elementos utilizados como carga para realizar esta prueba son los siguientes:

- Dinamómetro.
- Carga directa sin medición de torque.
- Utilizando como carga una máquina duplicado.

1. Dinamómetro como carga

Para realizar este ensayo, la máquina debe cargarse con un freno mecánico o con un dinamómetro. El tiempo utilizado en realizar esta prueba debe ser muy corto para poder garantizar que la temperatura de la máquina no cambie considerablemente durante el desarrollo del ensayo.

- **Potencia mecánica**

La potencia en el eje de la máquina bajo prueba se obtiene a partir de los valores de velocidad y torque obtenidos en la prueba para cada punto de carga usando la ecuación (4-8). Las mediciones de torque pueden necesitar correcciones debidas a las pérdidas en el dinamómetro.

$$P = \frac{2 * n_t T}{60} = \frac{n_t T}{k_2} \quad (4-8)$$

En donde:

P = Potencia en el eje, en watts.

n_t = Velocidad medida.

$k_2 = 9.459$ Si el torque es dado en Newton-metros.

T = Torque en Newton-metros.

Cuando se necesiten correcciones en el torque debidas a las pérdidas en el dinamómetro se debe usar la siguiente ecuación:

$$T = T_t \pm T_D \quad (4-9)$$

En donde:

T_t = Torque medido en el eje de la máquina, en N·m.

T_D = Corrección por el dinamómetro, se obtiene a partir de la ecuación (4-10).

- **Corrección por el dinamómetro**

Una prueba sin carga del dinamómetro combinada con una prueba sin carga de la máquina puede ser utilizada para determinar la corrección necesaria para compensar las pérdidas debidas al acoplamiento y la fricción de los rodamientos del dinamómetro. La máquina debe operarse como motor a tensión nominal mientras se encuentra acoplada al dinamómetro y se debe retirar el suministro de potencia eléctrica al mismo. Es necesario registrar la potencia de entrada, tensión, corriente, deslizamiento o velocidad, torque, y la resistencia eléctrica o la temperatura de los devanados del estator. Posteriormente, la máquina debe desacoplarse del dinamómetro y ponerse nuevamente en marcha sin carga y a tensión nominal, es necesario registrar las mismas lecturas que cuando estaba operando con carga. La corrección del dinamómetro, en N·m, se obtiene de:

$$T_D = k_2 * \frac{P_A - P_B}{n_A} - T_A \quad (4-10)$$

En donde:

$$P_A = (P_{inA} - P_{SIRA} - P_h) * (1 - s_A) \quad (4-11)$$

$$P_B = (P_{inA} - P_{SIRB} - P_h) \quad (4-12)$$

Y,

T_D = Corrección que se aplicará al torque de la carga antes de realizar el cálculo de la potencia.

P_{inA} = Potencia de entrada, en Watts, cuando la máquina es operada como motor con un dinamómetro acoplado y con el circuito de la armadura del dinamómetro abierto.

P_{SIRA} = Pérdidas en el estator durante la prueba A.

s_A = Deslizamiento en por unidad durante la prueba A.

T_A = Torque registrado por el dinamómetro durante la prueba A.

n_A = Velocidad medida durante la prueba A.

P_{inB} = Potencia de entrada durante la prueba sin carga a tensión nominal (prueba B)

P_{SIRB} = Pérdidas en el estator durante la prueba sin carga, prueba B.

P_h = Pérdidas en el núcleo durante la prueba sin carga a tensión nominal, en Watts.

$k_2 = 9.549$ Si el torque es dado en N·m.

2. Carga directa sin medición de torque

Para obtener los datos necesarios para determinar la eficiencia mediante el método E³⁰, se necesita acoplar la máquina a una carga variable y después realizar la prueba según se indicó anteriormente. En este caso no se requiere de una medición del torque en cada punto de carga.

³⁰ Este método se describe en la sección 4.4.2

La resistencia del devanado del estator en cada punto de carga se puede determinar comparando el incremento de temperatura con los correspondientes aumentos obtenidos como valores de estado estacionario durante una prueba de temperatura. Cuando no se realiza ninguna prueba de temperatura en la máquina bajo prueba o en una máquina duplicado, los cálculos en el análisis de la eficiencia se hacen con la resistencia del devanado del estator corregida a la temperatura total del devanado asumida para la prueba.

3. Una máquina duplicado como carga

La carga utilizada para la prueba de eficiencia mediante el método C³¹ utiliza dos máquinas similares acopladas entre si. Variando la frecuencia de la tensión aplicada a una de las máquinas se controla el nivel de carga y la dirección del flujo de potencia entre las máquinas.

4.3.7. Pérdidas por cargas parásitas

Las pérdidas por cargas parásitas son una porción de las pérdidas totales que no son tenidas en cuenta en la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, las pérdidas I^2R del estator y del rotor, y las pérdidas en el núcleo.

4.3.7.1. Medición indirecta

Las pérdidas por cargas parásitas se determinan indirectamente midiendo las pérdidas totales y restando de ellas la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, las pérdidas I^2R del rotor y del estator, y las pérdidas del núcleo. El valor resultante de esta sustracción corresponde a las pérdidas por cargas parásitas.

³¹ Este método se describe en la sección 4.4.2

4.3.7.2. Medición directa

En este caso se encuentran las componentes de las pérdidas por cargas parásitas de frecuencia fundamental y de altas frecuencias. La suma de ellas corresponde al valor total de las pérdidas por carga parasita.

- **Pérdidas por cargas parásitas a la frecuencia fundamental**

Las pérdidas por cargas parásitas a la frecuencia fundamental se determinan aplicando una tensión polifásica equilibrada en los terminales del devanado del estator. La potencia eléctrica de entrada menos las pérdidas I^2R del estator a la temperatura de prueba, corresponden a las pérdidas por cargas parásitas a la frecuencia fundamental. Durante esta prueba, todas las partes estructurales en las que se puedan inducir corrientes deben estar en sus respectivos lugares. Las corrientes usadas en este ensayo cubren cargas que van desde el 25% hasta el 150% de la carga nominal. En la ecuación (4-13) se muestra la forma de obtener esta corriente. Se debe variar la tensión aplicada con el fin de obtener corrientes estables, es necesario registrar los valores de la potencia de entrada, de la corriente y de la temperatura del devanado.

$$I_t = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4-13)$$

En donde:

I_t = Valor de la corriente en el devanado durante el ensayo.

I_0 = Valor de la corriente sin carga.

I = Valor de la corriente de línea del estator para el cual se están determinando las pérdidas por cargas parásitas.

- **Pérdidas por cargas parásitas a altas frecuencias**

Estas pérdidas se pueden determinar mediante una prueba de rotación inversa, en la que con el motor completamente ensamblado, se aplica una tensión polifásica equilibrada con frecuencia nominal en los terminales del devanado del estator. El rotor debe ser impulsado por algún medio externo a una velocidad cercana a la de sincronismo en dirección opuesta a la de rotación del campo del estator. Debe medirse la potencia eléctrica de entrada al estator.

La potencia mecánica necesaria para impulsar el rotor debe medirse con y sin corriente en el estator. Una tensión polifásica balanceada debe aplicarse en los terminales del devanado del estator a fin de obtener corrientes de igual magnitud que las usadas en la prueba con frecuencia fundamental. En cada valor de la corriente, deben medirse y registrarse los valores de la potencia mecánica necesaria para impulsar el rotor, la potencia eléctrica de entrada, la corriente y la temperatura de los devanados. Se debe registrar la potencia mecánica de entrada cuando la corriente de entrada es cero.

- **Cálculo de las pérdidas por cargas parásitas**

Estas pérdidas se determinan combinando las componentes de frecuencia fundamental y de altas frecuencias. La ecuación (4-14) es la utilizada en el cálculo de dichas pérdidas.

$$P_{SL} = P_{SLs} + P_{SLr} \quad (4-14)$$

En donde:

$P_{SLs} = (P_s - I^2 R_{estator})$ Componente fundamental de las pérdidas por cargas parásitas, en Watts.

$P_{SLr} = (P_r - P_m) - (P_{rr} - P_{SLs} - I^2 R_{estator})$ Componente de altas frecuencias de las pérdidas por cargas parásitas, en Watts.

P_m = Potencia mecánica de entrada necesaria para impulsar el motor sin tensión aplicada en los terminales del devanado del estator.

P_r = Potencia mecánica de entrada necesaria para impulsar el motor con tensión aplicada en los terminales del devanado del estator.

P_{rr} = Potencia eléctrica de entrada durante la prueba de rotación inversa, en Watts.

P_s = Potencia eléctrica de entrada al devanado del estator con el rotor removido, en Watts.

- **Calculo de las pérdidas por cargas parásitas en un punto específico**

Se empieza por determinar un valor aproximado de la corriente del rotor correspondiente al valor nominal de la corriente de línea del rotor. A continuación se presenta la ecuación para realizar este cálculo.

$$I_2' = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4-15)$$

En donde:

I_2' = Valor de la corriente del rotor.

I = Valor nominal de la corriente de línea en el estator, en Amperes.

I_0 = Valor de la corriente del estator sin carga, en Amperes.

Usando el valor de la corriente del rotor, las pérdidas por cargas parásitas se calculan para cargas trifásicas usando la siguiente ecuación.

$$P_{SL}' = A_1(I_2')^{N_1} + 2A_2(I_2')^{N_2} - A_3(I_2')^{N_3} - 3*(I_2')^2*(2R_{1s} - R_{1s}) \quad (4-16)$$

En donde:

P_{SL}' = Es el valor de las pérdidas por cargas parásitas, en Watts.

$I_2' =$ Valor aproximado de la corriente del rotor, en Amperes.

$R_{1s} =$ Resistencia del estator por fase, en Ohms, durante una prueba con el rotor removido a la temperatura de prueba.

$R_{1r} =$ Resistencia del estator por fase, en Ohms, durante una prueba de rotación inversa a la temperatura de prueba.

El valor de estas pérdidas para cualquier punto de carga se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{SL} = P_{SL}' \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \quad (4-17)$$

La corriente de rotor en cada punto de carga usada para análisis de eficiencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_2 = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4-18)$$

En donde:

$I =$ Valor de la corriente de línea en el estator para la cual se calcularon las pérdidas.

$I_0 =$ Valor de la corriente sin carga.

- **Valores asumidos para las pérdidas por cargas parásitas**

Si las pérdidas por cargas parásitas no se miden y es aceptable por estándares aplicables, el valor de dichas pérdidas a carga nominal puede asumirse según las indicaciones de la tabla 22.

Para cargas diferentes a la nominal, estas pérdidas se asumirán como proporcionales al cuadrado de la corriente de rotor calculada usando la ecuación (4-18).

Potencia nominal kW.	Pérdidas por cargas parásitas como porcentaje de la carga nominal.
1-90.	1.8%
91-375.	1.5%
376-1850.	1.2%
1851 y mayores.	0.9%

Tabla 22 Valores asumidos para las pérdidas por cargas parásitas.

4.3.8. Pruebas de temperatura

Las pruebas de la temperatura se hacen para determinar el incremento de temperatura de ciertas piezas de la máquina al funcionar bajo condiciones específicas de carga.

4.3.8.1. Generalidades

La máquina debe protegerse de las corrientes de aire provenientes de las poleas, de las correas, y de otras máquinas [7]. Una corriente muy leve de aire puede causar grandes discrepancias en los resultados de la prueba de temperatura. Las condiciones que dan lugar a cambio rápido de la temperatura ambiente no serán consideradas satisfactorias para las pruebas de temperatura. Debe existir suficiente espacio entre las máquinas para permitir la circulación libre del aire.

- **Instrumentos de medida**

Los instrumentos de medida de temperatura deben estar de acuerdo con el estándar IEEE Std 119-1974. Antes de iniciar el ensayo, todos los instrumentos deben ser comprobados para asegurar que no haya errores apreciables del instrumento debido a los efectos de campos residuales.

- **Temperatura del rotor y otras partes en máquinas totalmente selladas**

Estas temperaturas serán obtenidas después de detener la máquina aplicando el termómetro a las piezas más calientes que son accesibles quitando las cubiertas.

4.3.8.2. Método de cargamento

El método de cargamento para realizar la prueba de temperatura puede ser uno de los siguientes:

- Método de cargamento real
- Método equivalente Primario-sobrepuesto
- Remitir el método del equivalente de la parada
- **Método de cargamento real**

En este método la máquina se opera como motor o como generador bajo las condiciones nominales de carga.

- **Método equivalente Primario-sobrepuesto**

Con este método, la máquina se opera sin carga desde una fuente de alimentación principal y con una fuente de potencia auxiliar de baja tensión y diferente frecuencia sobrepuesta. La rotación de fase de la fuente de potencia auxiliar se elige de manera que se tenga la misma dirección que la de la alimentación principal. Generalmente, los incrementos de temperatura se determinan operando la máquina con la fuente de potencia sobrepuesta a una frecuencia 10 Hertz por debajo de la frecuencia nominal, y con la tensión ajustada de manera que la corriente en la máquina sea igual al valor nominal. En la siguiente figura se muestra una configuración usada para este método.

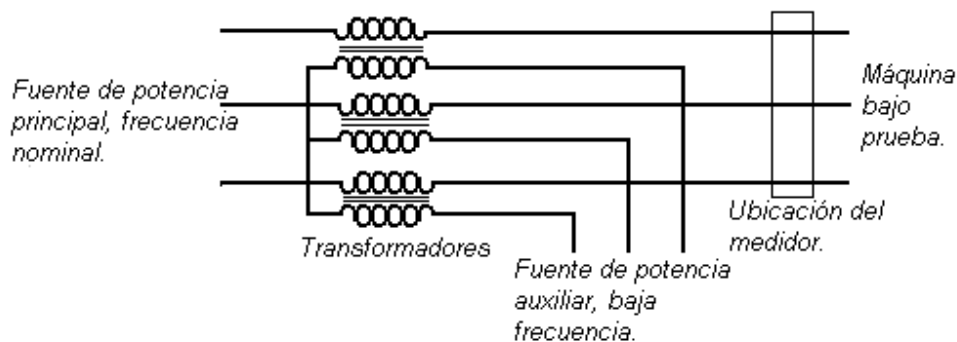


Figura. 31 Esquema del método equivalente primario-sobrepuesto³²

- **Remitir el método del equivalente de la parada**

En este método la máquina bajo prueba se impulsa a la velocidad nominal en su dirección normal de la rotación utilizando un motor auxiliar mientras que los terminales del motor bajo prueba se conectan a una fuente de tensión reducida y de frecuencia fija con la secuencia de fase seleccionada para dar la rotación en la dirección normal. Generalmente, la frecuencia de la fuente es el 20% o el 25% menor que la frecuencia nominal de la máquina. El motor auxiliar debe tener una potencia nominal de por lo menos el 10% de la potencia nominal de la máquina bajo prueba.

Con el motor auxiliar impulsando la máquina a velocidad nominal, la tensión en los terminales de la máquina se ajusta hasta obtener una corriente de línea de igual valor que la nominal. Cuando la máquina opera en estas condiciones se comporta como un generador con un deslizamiento aproximadamente del -25%.

Con tensión reducida, las pérdidas del hierro del estator son más bajas que bajo condiciones de carga reales. Para compensar esta diferencia, la prueba se complementa con dos pruebas de temperatura sin carga a frecuencia nominal. Una de ellas con la tensión nominal y otra con la tensión usada en la prueba de la

³² Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

parada delantera. La diferencia entre los incrementos de temperatura del estator de estas dos pruebas se agrega al incremento de temperatura medido durante la prueba delantera de la parada y el incremento resultante debe ser considerado como el incremento de temperatura total.

4.3.8.3. Procedimiento³³

- La máquina puede cargarse usando uno de los métodos anteriores, el valor de la carga puede ser determinado usando una medición directa de entradas o salidas.
- Una máquina con varias condiciones nominales debe ensayarse bajo aquellas condiciones que generan el mayor incremento de temperatura. Si no se conocen estas condiciones, entonces la máquina debe ensayarse para todos los conjuntos de condiciones nominales.
- Una máquina con dos frecuencias puede ensayarse a la frecuencia que se encuentre disponible, si se dispone de ambas, el ensayo debe realizarse a la frecuencia en la que se presenta el mayor incremento de temperatura.
- Si no se especifica lo contrario, una máquina con un factor de servicio mayor de 1.0 debe ensayarse con la carga del factor del servicio; lo anterior para que respete los límites de temperatura de la clase del aislamiento. El incremento de temperatura en el factor de servicio 1.0 será utilizado para calcular el desempeño de la máquina.
- Cuando la prueba de la temperatura se realiza con un factor de servicio a carga nominal, el incremento de temperatura por la resistencia del motor en la carga nominal puede determinarse variando el incremento de temperatura con el cuadrado de la corriente. Para los cálculos de la eficiencia, la temperatura total (temperatura especificada) será el incremento a carga nominal más 25 °C.

³³ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

- Cuando el análisis fue hecho cerca pero no a carga nominal, la ecuación (4-19) puede usarse para ajustar el incremento de temperatura a los valores nominales de la máquina.

$$T_{nominal} = T_{prueba} * \left[\frac{I_{nominal}}{I_{prueba}} \right]^2 \quad (4-19)$$

En donde:

$T_{nominal}$ = Incremento de temperatura bajo condiciones nominales.

T_{prueba} = Incremento de temperatura bajo condiciones de prueba.

- **Condiciones iniciales**

Las pruebas de temperatura en máquinas operadas continuamente bajo condiciones nominales, se pueden iniciar en cualquier temperatura menor que la nominal de la máquina. Salvo especificación de lo contrario, una prueba corta se inicia únicamente cuando las piezas de la máquina están dentro de un rango de 5°C alrededor de la temperatura ambiente.

- **Sobrecargas admisibles**

En máquinas operadas continuamente bajo condiciones nominales, cuando un gran intervalo de tiempo es necesario para alcanzar una temperatura estable, sobrecargas del 25% al 50% durante la parte inicial de la prueba pueden utilizarse para acortar este tiempo³⁴. Cualquier sobrecarga debe retirarse antes de que la temperatura llegue a la temperatura final esperada.

- **Mediciones de temperatura**

³⁴ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

La máquina debe dotarse de instrumentos para realizar mediciones de la temperatura de los devanados y de la temperatura del núcleo del núcleo del estator entre otras. De este modo, en una prueba dada, puede ser deseable utilizar los cuatro métodos anteriormente descritos para medir la temperatura de varias piezas de la máquina.

Detectores locales de temperatura pueden usarse para realizar estas mediciones, cuando se utilizan muchos de ellos para medir la temperatura de los devanados, todas las lecturas deben registrarse y la más alta de ellas será considerada como la temperatura de los devanados.

La temperatura de los devanados en máquinas con detectores embebidos puede determinarse mediante el método del detector embebido. Todas las lecturas tomadas deben registrarse y la más alta será considerada como la temperatura del devanado.

Las temperaturas de los devanados del estator y del rotor se pueden determinar mediante el método de la resistencia del devanado después del cierre. La resistencia es medida entre cualquier par de terminales con un valor de referencia tomado a una temperatura conocida.

Las temperaturas de otras partes de la máquina como los rodamientos y el lubricante deben tomarse y registrarse adecuadamente.

- **Terminación de la prueba**

La prueba debe realizarse durante el tiempo especificado o hasta alcanzar una temperatura constante. En máquinas operadas continuamente bajo condiciones nominales, las lecturas de las entradas, salidas y temperaturas de la máquina deben tomarse a intervalos de 30 minutos o menos. En máquinas que no operan

continuamente bajo condiciones nominales, las lecturas se tomarán a intervalos consistentes con el tiempo nominal de la prueba. En el caso de máquinas bajo condiciones nominales, la temperatura se considera constante hasta que su valor no varíe más de 1°C alrededor de la temperatura ambiente durante un periodo de tiempo mayor de 30 minutos.

- **Resistencia de cierre**

La resistencia de los devanados debe medirse después de cierre y ésta se utilizará para determinar la temperatura final de la máquina y su incremento de temperatura. Esta medición requiere de un cierre rápido de la máquina al final de la prueba de temperatura y del uso rápido de las puntas del instrumento de medición de la resistencia.

Si la lectura inicial de la resistencia es obtenida dentro del intervalo de tiempo sugerido en la tabla 23, esta lectura es aceptada como el valor de la resistencia. De lo contrario, la lectura debe tomarse en el menor tiempo posible y las lecturas de resistencia adicionales serán tomadas en intervalos de 30 a 60 segundos para un mínimo de 10 lecturas. Con los datos obtenidos de resistencia debe construirse una curva de resistencia contra tiempo, esta debe extrapolarse para alguno de los tiempos dados en la tabla 23 para condiciones nominales de la máquina. El valor de resistencia obtenido será considerado como la resistencia de cierre.

Condiciones nominales		Tiempo después del cierre (segundos).
KVA	kW	
50 o menos.	38 o menos.	30.
Mayores de 50 y hasta 200.	Mayores de 38 y hasta 150.	90

Mayores de 200.	Mayores de 150.	120.
-----------------	-----------------	------

Tabla 23 tiempos para tomar la primera lectura de resistencia³⁵.

- **Cuidados en la medida**

Se debe tener la precaución de asegurar la exactitud de las medidas de resistencia, esto debido a que un pequeño error en la medición de la resistencia puede causar un error comparativamente grande en la determinación de la temperatura.

4.3.8.3. Incremento de temperatura

Cuando la máquina es refrigerada por el aire a su alrededor, el incremento de temperatura es igual a la temperatura de la máquina menos la temperatura ambiente. Si el aire usado para la ventilación de la máquina se obtiene de una fuente remota, el incremento de temperatura será igual a la temperatura de la máquina menos la del aire que entra a ella.

Si las lecturas son tomadas a altitudes no mayores a 1000 metros sobre el nivel del mar y con temperaturas del aire refrigerante entre 10°C y 40°C no se necesita realizar correcciones de temperatura.

- **Cálculo de la temperatura**

Si se usa la resistencia de los devanados, la temperatura puede encontrarse a través de la siguiente ecuación.

$$t_t = \left(\frac{R_f}{R_b} * (t_b + k_1) \right) - k_1 \quad (4-20)$$

En donde:

³⁵ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

t_t = Temperatura total del devanado.

R_f = Resistencia medida durante la prueba.

R_b = Valor de la resistencia de referencia.

t_b = Temperatura de referencia.

$k_1 = 234.5$ Para el cobre.

$k_1 = 225$ Para el aluminio.

La temperatura obtenida con la ecuación (4-20) es la temperatura total del devanado para el tiempo de prueba.

4.3.8. Circuito equivalente

El circuito equivalente mostrado en la figura 32 se usa como base para calcular la eficiencia mediante algunos métodos que se serán abordados más adelante.

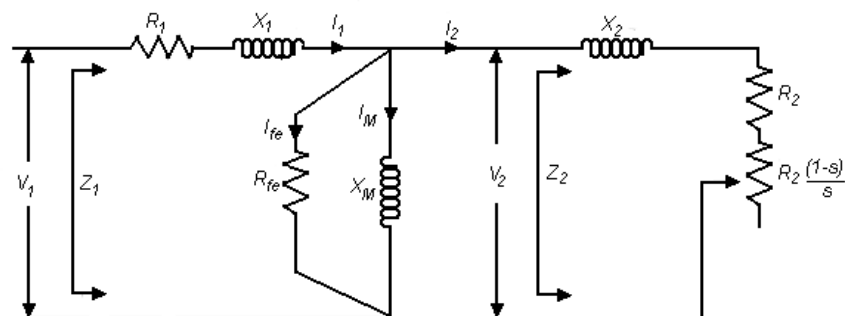


Figura. 32. Circuito equivalente de una máquina de inducción.

Las cantidades asociadas con este circuito equivalente son las siguientes:

V_1 = Tensión de fase, en V.

V_2 = Tensión de fase en el rotor referida al estator, en V.

f = Frecuencia, en Hz.

I_1 = Corriente en el estator, en A.
 I_2 = Corriente en el rotor referida al estator, en A.
 I_m = Corriente de magnetización, en A.
 I_{fe} = Corriente causante de las pérdidas en el núcleo, en A.
 m = Número de fases.
 R_1 = Resistencia del estator, en ohms.
 R_2 = Resistencia del rotor referida al estator, en ohms.
 R_{fe} = Resistencia del núcleo, en ohms.
 G_{fe} = Conductancia del núcleo, en siemens.
 X_1 = Reactancia del estator, en ohms.
 X_2 = Reactancia del rotor referida al estator, en ohms.
 X_m = Reactancia magnetizante, en ohms.
 B_M = Susceptancia magnetizante, en siemens.
 P = Potencia, en W.
 P_h = Pérdidas en el núcleo, en W.
 P_f = Pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, en W.
 Q = Potencia reactiva, en vars.
 Z = Impedancia por fase, en ohms.
 Z_2 = Impedancia por fase del rotor referida al estator, en ohms.
 s = Deslizamiento en por unidad.

Los parámetros del anterior circuito equivalente se obtienen a partir de los datos de prueba registrados durante pruebas en vacío y pruebas de impedancia. El circuito equivalente representa una fase de una máquina trifásica conectada en estrella. Pero también puede usarse si la máquina tiene una conexión delta interna. La tensión del rotor, la corriente, la resistencia, y los todos valores de reactancia se refieren el estator.

4.3.9.1. Pruebas de impedancia

Lecturas de tensión, corriente, potencia eléctrica de entrada, y de resistencia o de temperatura del devanado del estator se deben tomar en una o más frecuencias, Tensiones, y/o cargas. Estos datos se refieren como los datos de la impedancia. Si la máquina bajo prueba es de rotor devanado, este debe ser cortocircuitado para realizar la prueba.

Las pruebas de reactancia se deben realizar a carga nominal [7]. La reactancia y la impedancia se deben calcular con la temperatura de la máquina a la hora de la prueba. Los valores de la resistencia serán corregidos a la temperatura especificada antes de ser tomada como parámetro del circuito equivalente.

4.3.9.2. Calculo de los parámetros, método 1

- **Prueba del rotor bloqueado**

El rotor de jaula de ardilla es un devanado de barras simétricas, por lo tanto, la impedancia del rotor es la misma para cualquier posición del rotor con respecto al estator.

La impedancia de un motor con rotor devanado varía con la posición del rotor con respecto al estator. Por lo tanto, es necesario realizar una prueba de la impedancia con el rotor bloqueado para determinar la posición del rotor que determina una impedancia promedio. Antes de tomar lecturas en máquinas con rotor devanado, este debe ser cortocircuitado. La distancia angular a la cual es necesario observar la variación de la corriente, se determina permitiendo que el rotor gire lentamente y observando la corriente del estator, prestando especial atención a la distancia que el rotor debe recorrer para que la corriente del estator termine un ciclo. Para las máquinas que tienen un número entero de

ranuras por polo y por fase tanto en el rotor como en el estator, esta distancia será igual a dos tercios del paso polar para máquinas trifásicas.

El rotor de un motor con rotor devanado se debe bloquear de modo que no pueda girar libremente; la tensión suministrada se aumenta gradualmente hasta que una corriente aproximadamente igual a la nominal se obtenga. La tensión (debe ser balaceada) y la corriente en todas las fases se debe medir y registrar. Con la misma tensión, el rotor debe rotarse lentamente y los valores mínimo y máximo de la corriente durante un ciclo completo deben ser registrados. El rotor se bloqueará para la prueba de la impedancia en aquella posición en la que se obtenga una corriente promedio de los valores máximo y mínimo registrados.

Durante la prueba de rotor bloqueado, se deben tomar lecturas de tensión y corriente en todas las fases y de la potencia de entrada a diferentes Tensiones para establecer un valor cercano a la corriente de plena carga. La resistencia del devanado del estator también debe registrarse. Se debe tener la precaución de no recalentar los devanados.

- **Cálculos**

Se deben trazar algunas curvas usando las Tensiones como abscisas y las corrientes y potencias de entrada como ordenadas. La curva de corriente contra tensión es generalmente una línea recta, con una leve curva hacia arriba en los valores más altos³⁶. De estas curvas se obtiene el valor de la tensión y de la potencia de entrada para determinar la reactancia total y la resistencia del rotor al nivel de corriente requerido.

Para determinar la resistencia del rotor, R_2 , y la reactancia total, $X_1 + X_2$, se usan las ecuaciones (4-21)-(4-30). Los cálculos comienzan asumiendo una

³⁶ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

relación entre X_1 y X_2 . Si se cuenta con los detalles del diseño, se puede utilizar el cociente calculado $\frac{X_1}{X_2}$. De lo contrario se pueden utilizar los siguientes:

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1 \text{ Para motores de rotor devanado, de diseño A y de Diseño D.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.67 \text{ Para motores de diseño B.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.43 \text{ Para motores de diseño C.}$$

Calculo de la potencia reactiva del motor sin carga, Q_0 , y a las condiciones de la prueba de impedancia, Q_L .

$$Q_0 = \sqrt{(mV_{10}I_{10})^2 - P_0^2} \quad (4-21)$$

$$Q_L = \sqrt{(mV_{1L}I_{1L})^2 - P_L^2} \quad (4-22)$$

La tensión de fase V_1 para una máquina trifásica es:

$$V_1 = \frac{\text{tensión-línea-línea}}{\sqrt{3}} \quad (4-23)$$

Para el cálculo de la reactancia de magnetización se usa la siguiente expresión:

$$X_M = \frac{mV_0^2}{Q_0 - (mI_{10}^2 X_1)} * \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{X_M}\right)^2} \quad (4-24)$$

Cálculo de la reactancia del estator, X_1 , a la frecuencia de prueba.

$$X_{1L} = \frac{Q_L}{mI_{1L}^2 * \left[1 + \left(\frac{X_1}{X_2} \right) + \frac{X_1}{X_M} \right]} * \left[\left(\frac{X_1}{X_2} \right) + \frac{X_1}{X_M} \right] \quad (4-25)$$

La reactancia del estator a la frecuencia nominal.

$$X_{1L} = \frac{f}{f_L} * X_{1L} \quad (4-26)$$

Las ecuaciones (4-24), (4-25) y (4-26) se pueden resolver de la siguiente manera:

1. se resuelve la ecuación (4-24) para X_M , asumiendo un valor de $\frac{X_1}{X_M}$ y de X_1 .
2. se resuelve la ecuación (4-25) para X_{1L} , usando el mismo valor de $\frac{X_1}{X_M}$ del ítem anterior.
3. se resuelve la ecuación (4-26) para X_1 .
4. se resuelve la ecuación (4-24) para X_M , usando X_1 de la ecuación (26) y $\frac{X_1}{X_M}$ de la ecuación (4-24).
5. se continua iterando hasta que los valores de X_1 y X_M no varían en mas del 0.1%.

$$B_M = \frac{1}{X_M} \quad (4-27)$$

$$X_{2L} = \frac{X_{1L}}{\left(\frac{X_1}{X_2} \right)} \quad (4-28)$$

$$X_2 = \frac{f}{f_L} * X_{2L} \quad (4-29)$$

$$G_{fe} = \frac{P_h}{mV_{10}^2} * \left(1 + \frac{X_1}{X_M}\right)^2 \quad (4-30)$$

En donde:

P_h = Pérdidas en el núcleo.

$$R_{fe} = \frac{1}{G_{fe}} \quad (4-31)$$

$$R_{2L} = \left(\frac{P_L}{mI_{1L}^2} - R_{1L} \right) * \left(1 + \frac{X_2}{X_1}\right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 * (X_{1L}^2 G_{fe}) \quad (4-32)$$

En donde:

R_{1L} = La mitad de la resistencia de Terminal a Terminal de los devanados del estator, en ohms, a la temperatura de prueba.

4.3.9.3. Cálculo de los parámetros, método 2

En este método se construyen curvas de los valores de la resistencia del rotor y de la inductancia contra la frecuencia. Estas curvas se pueden utilizar para determinar los valores en la frecuencia de funcionamiento requerida. El valor resultante para la resistencia del rotor y los valores para las inductancias se utilizan en el circuito equivalente para determinar desempeño de la máquina.

4.3.9.4. Cálculo de los parámetros, método 3

- **Prueba de frecuencia reducida**

La resistencia del rotor, R_2 , y la reactancia, X_2 a la frecuencia reducida se pueden obtener de las lecturas de Tensión, corriente, potencia, deslizamiento, temperatura o resistencia de estator a una velocidad de deslizamiento que se

aproxime a la frecuencia reducida deseada del rotor. En este método, la máquina es operada acoplada o no a una carga pequeña y con una tensión que permita obtener la velocidad de deslizamiento deseada.

Un generador se opera como motor o puede ser impulsado por otro medio a una velocidad mayor que la de sincronismo a fin de obtener el deslizamiento deseado mientras que la tensión debe ser reducida para limitar la salida eléctrica.

- **Cálculos**

Con datos de la prueba saturación sin carga, se puede calcular la reactancia total por la fase para cada punto de prueba. Con estos datos se construye una curva de la reactancia total por fase contra la tensión por fase sin carga. Figura 33. El punto más alto en esta curva se utiliza como la reactancia total sin carga por fase, $X_1 + X_M$ en cálculos de la prueba de deslizamiento con tensión reducida.

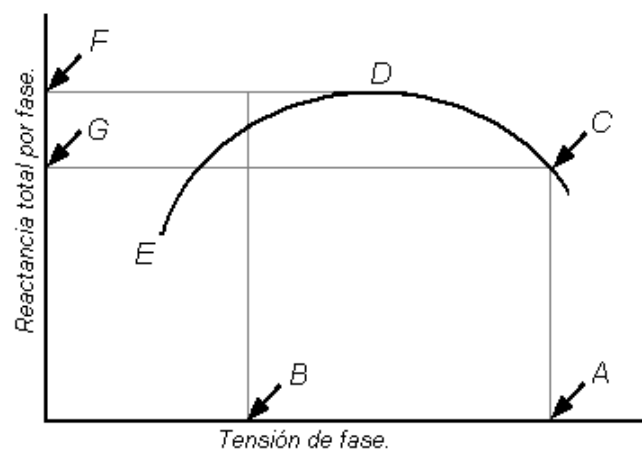


Figura. 33. Curva de reactancia total por fase contra tensión de fase en vacío³⁷.

Las cantidades asociadas con la figura 33 corresponden a lo siguiente:

A es la tensión nominal.

³⁷ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

B es la tensión reducida para la prueba de deslizamiento.

CDE corresponden a la curva de la reactancia total obtenida de una prueba sin carga.

F es la reactancia correspondiente al punto más alto de la curva.

G es la reactancia total usada para la determinación de X_M .

Si la máquina se opera como un motor durante la prueba, la potencia eléctrica medida se toma como positiva en los cálculos. Si la máquina fue considerada como un generador, la potencia se considerara negativa. Con los datos de obtenidos en este ensayo, se calcula la impedancia total por la fase, (Z) y el factor de potencia, (que será negativo para la operación como generador). El ángulo de fase, θ_1 , de la corriente de entrada, la resistencia aparente total por fase, R, y la reactancia aparente total por fase, X, se pueden determinar según las siguientes ecuaciones:

$$\theta_1 = -\cos^{-1}(FP) \quad (4-33)$$

$$R = Z * \cos(-\theta_1) \quad (4-34)$$

$$X = Z * \text{sen}(-\theta_1) \quad (4-35)$$

El valor de X determinado con la ecuación (4-35) se usa como un primer estimado de la suma $(X_1 + X_2)$. Basados en esta suma y con la relación $\left(\frac{X_1}{X_2}\right)$, se puede calcular un estimado inicial para el valor de X_1 a partir de:

$$X_1 = X \frac{\left(\frac{X_1}{X_2}\right)}{1 + \left(\frac{X_1}{X_2}\right)} \quad (4-36)$$

Utilizando el valor de la resistencia total sin carga, del punto D de la figura 33, el valor de la reactancia de magnetización se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$X_M = (X_1 + X_M) - X_1 \quad (4-37)$$

De los datos obtenidos durante la prueba se puede calcular:

$$V_2 = \sqrt{[V_1 - I_1(R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1)]^2 + [I_1(R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1)]^2} \quad (4-38)$$

La resistencia R_1 debe ser corregida por temperatura.

El ángulo de fase θ_2 se calcula con la ecuación.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{-I_1(R_1 \sin \theta_1 - X_1 \cos \theta_1)}{V_1 - I_1(R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1)} \quad (4-39)$$

$$I_e = \frac{V_2}{X_M} \quad (4-40)$$

$$R_{fe} = \frac{V_2^2}{\left(\frac{P_h}{m}\right)} \quad (4-41)$$

$$G_{fe} = \frac{1}{R_{fe}} \quad (4-42)$$

$$I_{fe} = \frac{V_2}{R_{fe}} \quad (4-43)$$

A continuación se calculan los siguientes parámetros:

$$I_2 = \sqrt{[I_1 \cos \theta_1 - I_e \sin \theta_2 - I_{fe} \cos \theta_2]^2 + [-I_1 \sin \theta_1 + I_e \cos \theta_2 + I_{fe} \sin \theta_2]^2} \quad (4-44)$$

$$X_2 = \frac{-V_1 I_1 \sin \theta_1 - I_1^2 X_1 - I_e^2 X_M}{I_2^2} \quad (4-45)$$

$$X = X_1 + X_2 \quad (4-46)$$

Usando como valor inicial la relación $\frac{X_1}{X_2}$, se debe continuar iterando hasta que

los valores de las reactancias no varíen más del 0.1%.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (4-47)$$

$$R_2 = s \sqrt{(Z_2^2 - X_2^2)} \quad (4-48)$$

Ahora, usando el valor de la reactancia total, obtenido del punto C de la figura 33 se obtiene lo siguiente:

$$X_M = (X_1 + X_2) - X_1 \quad (4-49)$$

$$B_M = \frac{1}{X_M} \quad (4-50)$$

$$V_2 = \sqrt{[V_1 - I_1 (R_1 \cos \theta_1 + X_1 \sin \theta_1)]^2 + [I_1 (R_1 \sin \theta_1 + X_1 \cos \theta_1)]^2} \quad (4-51)$$

$$G_{fe} = \frac{P_h}{m V_2^2} \quad (4-52)$$

Los valores obtenidos mediante la utilización de las ecuaciones sugeridas por este modelo son usadas en los cálculos realizados con el circuito equivalente de la figura 32.

4.3.10. Pérdidas en los contactos de las escobillas

Este tipo de pérdidas es considerado en los análisis de la eficiencia de la máquina. Para máquinas de rotor devanado, estas pérdidas son determinadas por el producto de la corriente secundaria calculada y una caída de tensión en las escobillas. La caída de tensión en todas las escobillas de la misma fase puede

asumirse como de 1 Volt para escobillas de carbón o grafito y como de 0.3 volts para escobillas de carbón-metal³⁸.

4.3.11. Factor de potencia

- **Obtención indirecta**

Cuando se están determinando las características de desempeño de la máquina, el factor de potencia se puede determinar para cada punto de carga según la siguiente ecuación.

$$PF = \frac{P}{\sqrt{3} * VI} \quad (4-53)$$

En donde:

P = Potencia eléctrica de la máquina, en W.

PF = Factor de potencia de la máquina.

V = La tensión de línea a la entrada, en V.

I = La corriente de entrada, en A.

- **Obtención directa**

Si se usa el método de los dos wattmetros para medir la potencia de entrada de una máquina trifásica, el factor de potencia se puede obtener a partir de la siguiente ecuación.

$$PF = \frac{100}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right)^2}} \quad (4-54)$$

En donde:

P_1 = La lectura más alta.

P_2 = La lectura más baja.

³⁸ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004

Si la lectura de P_2 es un valor negativo, este debe considerarse una cantidad negativa.

Si hay pulsaciones de carga, el factor de potencia obtenido con el método directo es mayor que el obtenido con el método indirecto, la lectura mayor será considerada como el valor correcto.

- **A partir del circuito equivalente**

El factor de potencia, en porcentaje se determina a partir del circuito equivalente multiplicando la resistencia total por 100 y dividiéndolo el resultado por la impedancia total.

4.4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

4.4.1. Generalidades

La eficiencia es la razón entre la potencia de salida y la potencia total de entrada. La potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas³⁹. Por tanto, si dos de las tres variables (salida, entrada, pérdidas) son conocidas, la eficiencia puede determinarse por medio de una de las siguientes ecuaciones:

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4-54)$$

$$eficiencia = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad \text{Aplicable particularmente a los motores.} \quad (4-55)$$

³⁹ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \text{ Aplicable particularmente a los generadores.} \quad (4-56)$$

En donde:

P_{out} = Potencia de salida.

P_{in} = Potencia de entrada.

P_{loss} = Pérdidas.

Si no se especifica lo contrario, la eficiencia se debe determinar para tensión y frecuencia nominales.

4.4.2. Métodos de prueba

Los métodos para la determinación de las pérdidas y la eficiencia se enumeran a continuación⁴⁰:

1. Método A (entrada-salida)
2. Método B (entrada-salida con discriminación de las pérdidas y medición indirecta de las pérdidas por cargas parásitas)
3. Método B1 (entrada-salida con discriminación de las pérdidas y medición indirecta de las pérdidas por cargas parásitas y una temperatura asumida)
4. Método C (máquinas duplicadas con discriminación de las pérdidas y medición indirecta de las pérdidas por cargas parásitas).
5. Método E (potencia eléctrica medida bajo carga con discriminación de pérdidas y medición directa de las pérdidas por cargas parásitas).

⁴⁰ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004.

6. Método E1 (potencia eléctrica medida bajo carga con discriminación de pérdidas y asumiendo un valor para las pérdidas por cargas parásitas).
7. Método F (circuito equivalente con medición directa de las pérdidas por cargas parásitas).
8. Método F1 (circuito equivalente asumiendo un valor para las pérdidas por cargas parásitas).
9. Método C/F (circuito equivalente calibrado por el método C con medición directa de las pérdidas por cargas parásitas).
10. Método E/F (circuito equivalente calibrado por el método E con medición directa de las pérdidas por cargas parásitas).
11. Método E1/F1 (circuito equivalente calibrado por el método E asumiendo un valor para las pérdidas por cargas parásitas).

4.4.2.1. Método A

Este método está limitado para máquinas con potencias menores a 1 kW. Según él, la eficiencia se calcula como la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada, después de realizar las correcciones necesarias por temperatura y por el dinamómetro.

- **Procedimiento de prueba**

- ✓ **Resistencia en frío**

Con la máquina a temperatura ambiente se miden y registran la resistencia de los devanados y la temperatura ambiente.

- ✓ **Prueba de temperatura bajo carga nominal**

La prueba de temperatura debe realizarse de acuerdo a las recomendaciones dadas anteriormente.

✓ **Pruebas bajo carga.**

La máquina es cargada con un freno mecánico o con un dinamómetro.

✓ **Cálculos.**

El desempeño se calcula según las indicaciones de la forma A⁴¹, con los detalles de los cálculos demostrados en la forma A2.

✓ **Corrección por temperatura.**

La potencia del estator debe corregirse por temperatura, la cantidad de potencia a corregir se determina con la ecuación (4-56).

$$P_c = I_t^2 R_s - I_t^2 R_t \quad (4-57)$$

En donde:

P_c = Corrección necesaria en la potencia, en W.

I_t = Corriente de línea durante la prueba, en A.

R_t = Promedio de la resistencia del devanado en el momento de cierre, en ohms.

R_s = Es el valor de R_t corregido para la temperatura de prueba.

La corrección de la potencia del estator para un motor es la potencia eléctrica medida durante la prueba más P_c . En el caso de un generador la potencia P_c debe restarse de la potencia eléctrica medida.

✓ **Eficiencia**

⁴¹ Ver anexos.

Se deben Utilizar los valores corregidos de la potencia eléctrica y mecánica para calcular la eficiencia.

4.4.2.1. Método B

Todos los datos se toman con la máquina funcionando como motor o como generador, dependiendo de la región de operación para la cual se necesiten los valores de la eficiencia. Las pérdidas aparentes totales se discriminan en varios componentes. Las pérdidas por cargas parásitas son definidas como la diferencia entre las pérdidas totales y la suma de las pérdidas convencionales. Las pérdidas por cargas parásitas se grafican contra el cuadrado del torque y una regresión lineal se utiliza para reducir el efecto de errores al azar en las medidas de la prueba. Después de esto, los datos de las pérdidas parásitas se utilizan para calcular el valor final de las pérdidas y de la eficiencia.

- **Procedimiento de prueba**

Las pruebas individuales que componen el método de prueba B deben realizarse en el orden establecido. No es necesario que estas pruebas sean realizadas sucesivamente. Las pruebas pueden ser realizadas individualmente si la temperatura de operación de la máquina se establece cerca de su temperatura de operación normal para el tipo de prueba antes de obtener los datos.

- ✓ **Resistencia en frío**

Con la máquina a temperatura ambiente se toman lecturas de las temperaturas de los devanados y de la temperatura ambiente.

- ✓ **Prueba de temperatura a carga nominal**

Una prueba de temperatura con carga nominal, utilizando un dinamómetro, debe ser realizada de acuerdo con 4.3.8.2.1. Esta prueba no se requiere cuando una prueba de temperatura con carga nominal ha sido realizada previamente en una máquina duplicado. Se debe determinar la temperatura especificada para la máquina.

✓ **Pruebas bajo carga**

Durante esta prueba la máquina se debe cargar con un dinamómetro. La temperatura del estator debe estar a menor de 10°C de la máxima temperatura medida en una prueba de temperatura con carga. La prueba debe realizarse rápidamente a fin de evitar cambios en la temperatura de la máquina durante el ensayo.

✓ **Pruebas sin carga**

Se deben realizar de acuerdo a las sugerencias dadas en la sección 4.3.5.

• **Cálculos.**

Para realizar los cálculos de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento y de las pérdidas en el núcleo, se deben seguir los procedimientos dados en la sección 4.3.5.

✓ **Pérdidas I^2R en el estator.**

Para calcular estas pérdidas se debe seguir el procedimiento descrito en la sección 4.3.2. Este cálculo de las pérdidas del estator I^2R para cada punto de carga se hará utilizando la resistencia promedio del devanado. Si la resistencia promedio del devanado se mide en cada punto durante la prueba con carga, esta puede utilizarse directamente para la determinación de las pérdidas I^2R del

estator en ese punto de carga. Si la temperatura del devanado se obtiene por medio de detectores locales o embebidos, estas lecturas deben convertirse a un valor promedio equivalente antes de realizar los cálculos de las pérdidas.

Un valor que aproximadamente se acerca a la temperatura promedio se puede determinar con la ecuación (4-56).

$$t_A = \frac{t_{TR} t_t}{t_{TTD}} \quad (4-58)$$

En donde:

t_A = Temperatura promedio usada en los cálculos de las pérdidas, en °C.

t_{TR} = Temperatura total obtenida del cierre en una prueba de temperatura.

t_t = Temperatura obtenida de una prueba con carga.

t_{TTD} = Temperatura, en °C, al lado de detector cierre de la prueba de la temperatura.

✓ **Pérdidas I^2R del rotor.**

En este caso se recomienda revisar la sección 4.3.3. La primera estimación de las pérdidas I^2R del rotor se hace en base a la velocidad o el deslizamiento medidos para cada punto de carga y no se requiere de ajustes.

✓ **Pérdidas totales aparentes**

Este tipo de pérdidas deben obtenerse separadamente para cada punto de carga, su cálculo se realiza restando de la entrada el valor de la salida, ambas dadas en watts.

✓ **Determinación de las pérdidas por cargas parásitas (método indirecto)**

Este tipo de cargas debe calcularse separadamente para cada punto de carga. Para obtenerlas se resta de las pérdidas totales las pérdidas del estator, las del núcleo, las debidas a la fricción y al rozamiento con el viento, y las pérdidas en el rotor correspondientes al valor del deslizamiento encontrado.

Adecuación de los datos de las pérdidas por cargas parásitas

Para realizar este proceso, se puede realizar una regresión lineal basada en una función en la que las pérdidas por cargas parásitas son función del cuadrado del torque en la carga. La ecuación (4-59) muestra los resultados del anterior análisis.

$$P_{SL} = AT^2 + B \quad (4-59)$$

En donde:

P_{SL} = Pérdidas por cargas parásitas, en W.

T = Torque, en N·m.

A = Pendiente.

B = Intercepto con la línea de torque cero.

Si la pendiente es negativa, o si el factor de correlación es menor que 0.9, se debe ignorar el peor punto y repetir el análisis de regresión. Si en la segunda regresión el factor de correlación se incrementa hasta 0.9 o más, se debe usar la segunda regresión. Si lo anterior no ocurre o si la pendiente continua siendo negativa, la prueba se declara no satisfactoria. Los errores en los instrumentos o en las

lecturas se deben indicar⁴². Se debe encontrar la causa del error y corregirla, y en pruebas bajo carga, estas se deben repetir.

- **Correcciones**

- ✓ **Corrección de las pérdidas por cargas parásitas**

La curva obtenida para las pérdidas por cargas parásitas se corrige desplazándola hacia el origen manteniendo la pendiente original. El resultado de esta corrección es la ecuación (4-60), la cual será usada para determinar la corrección en el valor de las pérdidas por cargas parásitas para cada punto de carga.

$$P_{SLc} = AT^2 \quad (4-60)$$

En donde:

A = Pendiente de la curva de las pérdidas por cargas parásitas contra el cuadrado del torque.

T = Torque para cada punto de carga, en N·m.

- ✓ **Corrección por temperatura de las pérdidas I^2R del estator**

La corrección para cada punto de carga se calcula usando el valor promedio de la resistencia del estator corregida para una temperatura específica.

- ✓ **Corrección por temperatura de las pérdidas I^2R del rotor**

La corrección de estas pérdidas para cada punto de carga se muestra en la sección 4.3.3.

- ✓ **Corrección de las pérdidas totales**

⁴² Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004

El valor corregido de las pérdidas totales para cada punto de carga es determinado por la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas corregidas en el estator, en el rotor y por cargas parásitas.

✓ **Eficiencia**

Para calcular la eficiencia se utilizan la potencia eléctrica medida y la potencia mecánica corregida.

✓ **Factor de potencia**

El factor de potencia se calcula usando la ecuación (4-53).

4.4.2.2. Método B1

Todos los datos se toman con la máquina funcionando como motor o como generador, dependiendo de la región de operación para la cual se necesiten los valores de la eficiencia. Las pérdidas aparentes totales se discriminan en varios componentes. Las pérdidas por cargas parásitas son definidas como la diferencia entre las pérdidas totales y la suma de las pérdidas convencionales. Las pérdidas por cargas parásitas se grafican contra el cuadrado del torque y una regresión lineal se utiliza para reducir el efecto de errores al azar en las medidas de la prueba. Después de esto, los datos de las pérdidas parásitas se utilizan para calcular el valor final de las pérdidas y de la eficiencia.

- **Procedimiento de prueba**

El procedimiento de prueba seguido por este método es el mismo que se describió en el caso del método B.

- **Cálculos**

Las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas I^2R del rotor y las pérdidas totales aparentes se calculan siguiendo el mismo procedimiento descrito en el método B. Las pérdidas I^2R en el estator se evalúan según las recomendaciones dadas en la sección 4.3.2. Las pérdidas se calculan con la resistencia corregida para la temperatura de la prueba.

La determinación de las pérdidas por cargas parásitas (método indirecto) debe realizarse separadamente para cada punto de carga. Para obtenerlas se resta de las pérdidas totales las pérdidas del estator, las del núcleo, las debidas a la fricción y al rozamiento con el viento, y las pérdidas en el rotor correspondientes al valor del deslizamiento encontrado. Los valores obtenidos para estas pérdidas se deben adecuar siguiendo el mismo procedimiento mostrado en la sección anterior.

- **Correcciones**

Se deben realizar las mismas correcciones descritas en la sección anterior. Adicionalmente, se deben realizar correcciones a la potencia mecánica. La potencia mecánica corregida (de la salida) para cada uno de los puntos de carga para un motor es igual a la diferencia de la potencia eléctrica medida (de la entrada) y de las pérdidas totales corregidas. La potencia mecánica corregida (de la entrada) para un generador es igual a la suma de la potencia eléctrica medida (de la salida) y de las pérdidas totales corregida.

- **Eficiencia**

Para calcular la eficiencia se utilizan la potencia eléctrica medida y la potencia mecánica corregida.

- **Factor de potencia**

El factor de potencia se calcula usando la ecuación (4-51).

4.4.2.3. Método C

Este método determina la eficiencia usando dos máquinas duplicados. Estas máquinas deben acoplarse y conectarse eléctricamente a dos fuentes de potencia, una de ellas de frecuencia variable. Las dos fuentes deben tener la capacidad de entregar y absorber potencia. Las pérdidas por cargas parásitas se determinan mediante el método indirecto.

- **Procedimiento de prueba**

Las pruebas individuales que componen el método de prueba B deben realizarse en el orden establecido. No es necesario que estas pruebas sean realizadas sucesivamente. Las pruebas pueden ser realizadas individualmente si la temperatura de operación de la máquina se establece cerca de su temperatura de operación normal para el tipo de prueba antes de obtener los datos.

Por conveniencia en el análisis, la máquina conectada a la fuente de frecuencia constante se identificará como la máquina *M1*, la otra llevará el nombre de máquina *M2*.

- ✓ **Pruebas bajo carga**

Las máquinas se acoplan, la máquina *M1* se alimenta desde la fuente de frecuencia nominal mientras que la *M2* es alimentada de la fuente de frecuencia variable. La máquina *M1* es cargada como motor y como generador con cuatro puntos de carga igualmente espaciados que van desde el 25% hasta el 100% de plena carga. Dos puntos de carga adicionales deben considerarse por encima del 100% pero no más allá del 150% de plena carga. En cada uno de los puntos de carga se deben tomar lecturas de la potencia eléctrica, de la tensión, de la corriente, de la frecuencia y de la temperatura de los devanados del estator y del rotor, además de la velocidad y de la temperatura ambiente.

La prueba se inicia con la carga mayor y operando la máquina *M1* como motor. Manteniendo tensión y frecuencia nominales en la máquina *M1*, la tensión y la frecuencia en la máquina *M2* se disminuyen hasta que la corriente de línea en la máquina *M1* es aproximadamente igual a la corriente del mayor punto de carga. Cuando la tensión en la máquina *M2* dividida en la frecuencia es igual a la tensión nominal dividida en la frecuencia nominal, se puede considerar que el punto de prueba es adecuado y se deben tomar las lecturas anteriormente nombradas.

Una vez tomadas las lecturas, la frecuencia y la tensión en la máquina *M2* se incrementan hasta que la corriente en la máquina *M1*, operando como generador, sea igual a la corriente que tenía cuando operaba como motor. Cuando los valores de la tensión y la frecuencia en la máquina *M2* son los correctos, se ha encontrado otro punto de prueba válido y se deben tomar las lecturas de nuevo.

Con los dos juegos de lecturas tomados la prueba se ha terminado para ese punto de carga, puede procederse al siguiente siguiendo el mismo procedimiento. La prueba debe realizarse en poco tiempo con el propósito de que la temperatura de la máquina no cambie significativamente.

- **Cálculos**

✓ **Pérdidas I^2R en el estator**

Para el cálculo de este tipo de pérdidas se debe revisar la sección 4.3.2. La temperatura de prueba medida será utilizada al ajustar la resistencia de los devanados para la determinación de las pérdidas. El procedimiento para la adecuación de la temperatura que se describe en la sección 4.4.2.2 puede ser utilizado si se desea pero solamente cuando una prueba de temperatura a plena carga se ha realizado en una de las máquinas. Se necesita de dos cálculos para cada máquina en cada punto de carga, uno durante su operación como motor y el otro durante su operación como generador [7].

✓ **Pérdidas I^2R del rotor**

En este caso se recomienda revisar la sección 4.3.3. Estos cálculos se basan en la velocidad o en el deslizamiento para cada porción de cada punto de carga y no se requiere de correcciones. Es necesario realizar dos cálculos para cada máquina en cada punto de carga. Se debe tener cuidado en verificar que el flujo de potencia observado es el adecuado.

Las pérdidas I^2R en el rotor del motor son:

$$\text{Pérdidas } I^2R \text{ en el rotor del motor} = s * (P_{inm} - I^2R_{estator} - P_h) \quad (4-61)$$

En donde:

s = Deslizamiento del motor.

P_{inm} = Potencia de entrada al motor.

$I^2R_{estator}$ = Pérdidas en el estator.

P_h = Pérdidas en el núcleo.

En la anterior ecuación la cantidad $(P_{inm} - I^2 R_{estator} - P_h)$ corresponde a la potencia a través del entrehierro del motor.

Las pérdidas $I^2 R$ en el rotor del generador son:

$$\text{Pérdidas } I^2 R \text{ en el rotor del generador} = s_G * (P_{outG} + I^2 R_{estator} + P_h) \quad (4-62)$$

En donde:

s_G = Deslizamiento del generador.

P_{outG} = Potencia de salida al generador.

$I^2 R_{estator}$ = Pérdidas en el estator.

P_h = Pérdidas en el núcleo.

En la anterior ecuación la cantidad $(P_{outG} + I^2 R_{estator} + P_h)$ corresponde a la potencia a través del entrehierro del generador.

✓ **Pérdidas por cargas parásitas**

Máquina M1 operando como motor

Las pérdidas por cargas parásitas combinadas se determinan restando de las pérdidas totales la suma de las pérdidas en el estator, el rotor, el núcleo y las debidas a la fricción y el rozamiento con el viento de las dos máquinas.

Las pérdidas por cargas parásitas se asumen como proporcionales al cuadrado de la corriente del rotor.

Para la máquina M1 como motor este tipo de pérdidas se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{SL(motor)} = I^2 R_{(rotor-motor)} * \frac{P_{SL(combinadas)}}{I^2 R_{(rotor-motor)} + I^2 R_{(rotor-generador)}} \quad (4-63)$$

Si la máquina *M2* opera como generador se obtiene lo siguiente:

Pérdidas por cargas parásitas en el generador se obtienen sustrayendo las pérdidas por cargas parásitas en el motor de las pérdidas por cargas parásitas combinadas.

Máquina *M1* operando como generador

Se sigue el mismo procedimiento que el caso anterior, teniendo en cuenta que las máquinas cambian su forma de operación en este caso.

Valor promedio

El valor preliminar para las pérdidas por cargas parásitas de las máquinas es el promedio de los valores encontrados para cada una en su operación como motor y como generador.

La adecuación de las pérdidas parásitas se hace de la misma manera que se realiza en los anteriores métodos.

- **Correcciones.**

Las correcciones en las pérdidas por cargas parásitas pueden aplicarse a cualquier máquina, sin embargo, las correcciones serán hechas sobre la máquina *M1*.

- ✓ **Corrección de las pérdidas por cargas parásitas.**

El valor de la corrección de las pérdidas parásitas se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{SLc} = A(I_2)^2 \quad (4-64)$$

En donde:

A = La pendiente de la curva.

I_2 = La corriente del rotor para cada punto de carga, en A.

Las correcciones a los demás tipos de pérdidas así como el cálculo de la eficiencia y del factor de potencia se realizan de la misma forma que se hace en los métodos anteriores.

4.4.2.4. Método E o E1.

Este método mide la potencia de entrada y determina la potencia de salida restando las pérdidas totales de la entrada.

- **Procedimiento de prueba**

Se sigue el mismo procedimiento de los otros métodos, con la diferencia de que ahora el valor de las pérdidas por cargas parásitas se determina por el método directo.

- **Cálculos**

- ✓ **Pérdidas por cargas parásitas**

Con el valor calculado de estas pérdidas, el nivel de pérdidas para cada punto de prueba se determina por un cociente entre los cuadrados de las corrientes de los rotores.

✓ **Pérdidas totales y potencia de salida**

El total de pérdidas en una máquina es la suma de las pérdidas por fricción y por rozamiento con el viento, las pérdidas en el núcleo, en el estator, en el rotor y las debidas a cargas parásitas.

La salida de potencia en el eje de un motor es igual a la potencia eléctrica de entrada menos el total de las pérdidas.

Si se trata de un generador, la potencia de salida es igual a la potencia eléctrica de entrada durante una prueba con carga y la potencia de entrada en el eje es igual a la potencia eléctrica de prueba más las pérdidas.

✓ **Desempeño del motor/generador**

La eficiencia para cada punto de carga se calcula usando los valores de entrada y salida. El factor de potencia para cada punto de carga se obtiene según la sección 4.3.11.

4.4.2.5. Método F o F1

Cuando no se realizan pruebas bajo carga, las características de operación se pueden obtener a partir del circuito equivalente de la máquina. Los parámetros de este equivalente se obtienen de los datos arrojados por una prueba sin carga y una prueba de impedancia.

- **Procedimiento de prueba**

Para los cálculos de la resistencia en frío, con la máquina a temperatura ambiente se toman lecturas de las temperaturas de los devanados y de la temperatura ambiente.

Las pruebas sin carga se deben realizarse según la sección 4.3.5. Para realizar este ensayo, la máquina se debe operar sin carga hasta lograr que la potencia de entrada se estabilice.

Las pruebas de impedancia se realizan según las indicaciones de la sección 4.3.9. Las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento y en el núcleo se calculan se la forma mostrada en la sección 4.3.5. Para determinar los valores de los parámetros del circuito equivalente revisar la sección 4.3.9.

- **Cálculos.**

Los cálculos comienzan asumiendo los valores del deslizamiento para cada punto del cálculo y se siguen los pasos señalados en la forma F2. Después de la terminación de la primera serie de cálculos, los resultados los valores se deben revisar y se deben seleccionar nuevos valores de deslizamiento de manera que se puedan obtener mejores aproximaciones a los puntos de carga deseados. Se pueden utilizar cálculos iterativos para determinar valores del deslizamiento. Las formas F y F2 se utilizan para los cálculos del desempeño de la máquina. Las formas se arreglan asumiendo que X_1 y X_2 siguen siendo constantes a través del rango de operación de la máquina.

- ✓ **Determinación del torque máximo.**

El torque máximo en un motor puede aproximarse según el procedimiento dado, usando el deslizamiento obtenido con la siguiente fórmula.

$$s = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (4-65).$$

4.4.2.6. Métodos C/F, E/F, E1/F1.

Cuando un punto de prueba bajo carga a una temperatura t_t de los devanados esta disponible, el circuito equivalente se puede calibrar encontrando los mejores valores para R_2 y X_M . El siguiente procedimiento se usa después de que se han determinado valores iniciales para los parámetros del circuito equivalente.

1. Se utilizan las formas F y F2, pero se inicia en la segunda línea con un valor asumido de $\frac{R_2}{s}$ para el punto de carga de prueba y un valor de R_1 basado en la temperatura t_t de los devanados del estator. Después realizar el cálculo de la potencia del estator, los valores de entrada de la corriente y de la potencia que se calcularon se comparan con los valores de entrada medidos de la corriente y de la potencia.
2. se ajustan los valores de $\frac{R_2}{s}$ y de X_M , después se continua iterando hasta que los valores de entrada de la corriente y de la potencia calculados difieren en menos del 1% de los valores medidos de dichas variables. Otros parámetros del circuito no deben ser ajustados.
3. se obtiene el valor de R_2 multiplicando el valor de $\frac{R_2}{s}$ asumido como valor final por el deslizamiento medido en por unidad de la velocidad de sincronismo. Este procedimiento establece el valor de R_2 (sin la corrección de temperatura) que se utilizará en el cálculo de las características de desempeño bajo carga.
4. se corrigen los valores de R_1 y R_2 a la temperatura especificada y se determina el desempeño en el punto de carga deseado.

- **Pérdidas por cargas parásitas**

- ✓ **Método C/F**

Para este método las pérdidas por cargas parásitas se determinan de la siguiente manera:

1. Para los puntos de carga en la operación como motor y como generador, se determina el valor promedio de las pérdidas por cargas parásitas
2. Se determina el valor promedio de la corriente del rotor en los puntos de carga tanto para la operación como motor como para la operación como generador usando la ecuación (4-18) el valor promedio de esos dos valores se utiliza en la ecuación (4-66).
3. El valor de las pérdidas por cargas parásitas se determina para cualquier punto de carga utilizando la ecuación (4-66).

$$P_{SL} = P_{SLavg} \left(\frac{I_2}{I_{2avg}} \right)^2 \quad (4-66)$$

En donde:

P_{SLavg} = Valor promedio de las pérdidas por cargas parásitas del paso 1.

I_2 = Corriente del rotor, determinada a partir del circuito equivalente para el punto de carga específico.

I_{2avg} = Valor promedio de la corriente del rotor.

4.5. OTRAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO.

4.5.1. Tensión en el rotor.

En máquinas de rotor devanado, las Tensiones pueden medirse entre todas las terminales del rotor, con el rotor bloqueado, los devanados en circuito abierto y la tensión nominal aplicada en el estator. Si se encuentra algún desbalance, se acostumbra a tomar lecturas en varias posiciones del rotor y calcular un promedio.

4.5.2. Pruebas de rotor bloqueado.

4.5.2.1. Corriente.

Esta prueba se puede realizar tanto para evaluar la calidad como para determinar el desempeño de la máquina. De ser posible, las lecturas se deben tomar con tensión y frecuencia nominales dado que la corriente no es directamente proporcional a la tensión, esto se debe a los cambios en la reactancia debidos a la saturación. Cuando la prueba se realiza para determinar la calidad de una máquina con rotor de jaula de ardilla, es posible omitir los medios mecánicos para bloquear el rotor, estos pueden reemplazarse en el caso máquinas trifásicas, aplicando potencia monofásica a tensión y frecuencia nominales en cualquier par de terminales de la máquina. En una máquina trifásica, la corriente será aproximadamente del 86% y la potencia de entrada del 50% de los valores obtenidos con una potencia de entrada trifásica.

4.5.2.2. Torque.

El torque bajo condiciones de rotor bloqueado se toma como el mínimo torque desarrollado en todas las posiciones angulares del rotor [7]. Los motores de rotor devanado esta sujetos a variaciones en el torque bajo condiciones de rotor bloqueado, dependiendo de la posición angular del rotor con respecto al estator. En motores con rotores del tipo de jaula de ardilla, es usual bloquear el rotor en cualquier posición. Si no se realiza una medición directa del torque bajo

condiciones de rotor bloqueado, una aproximación de este se puede obtener mediante la aplicación de la ecuación (4-67).

$$T = \frac{C_1 k_2 (P_{si} - P_{SIR} - P_h)}{n_s} \quad (4-67)$$

En donde:

T = Torque, en N·m.

P_{si} = Potencia de entrada al estator, en W.

P_{SIR} = Pérdidas $I^2 R$ del estator, en W, a la corriente de prueba.

P_h = Pérdidas en el núcleo a la tensión de prueba, en W.

n_s = Velocidad de sincronismo, en r/min.

C_1 = Factor de reducción.

k_2 = 9.549 Si el torque es dado en N·m.

4.5.2.3. Potencia

Se deben tomar lecturas de la potencia de entrada simultáneamente con las lecturas de tensión, corriente y torque.

4.5.3. Pruebas para determinar las curvas de velocidad-torque y velocidad-corriente

4.5.3.1. Definiciones

- **Característica de velocidad-torque⁴³**

Esta característica representa la relación entre la velocidad y el torque, en un intervalo que va desde cero hasta la velocidad de sincronismo en un motor y

⁴³ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004

desde la velocidad de sincronismo hasta la velocidad de extracción en un generador. Esta relación debe incluir los torques máximo, de extracción y de rotor bloqueado.

Para motores con rotor devanado, el torque y la corriente deben medirse entre la velocidad de sincronismo y la velocidad a la que ocurre el torque máximo. Los anillos deslizantes se deben cortocircuitar para realizar este ensayo.

- **Característica velocidad-corriente⁴⁴**

Esta característica representa la relación entre la velocidad y la corriente.

4.5.3.2. Procedimiento para obtener las curvas de velocidad-torque y velocidad-corriente

Cualquiera de los cuatro métodos descritos a continuación puede usarse para determinar las características, la selección del método depende del tamaño y las características de velocidad-torque de la máquina y de las facilidades para realizar el ensayo. En cualquier caso, se deben tomar puntos de prueba suficientes para garantizar la confiabilidad de la curva. Es importante que la frecuencia de la fuente de potencia utilizada se mantenga constante durante toda la prueba. En motores de rotor devanado los anillos deslizantes deben ser cortocircuitados durante el ensayo.

- **Método 1.**

Un generador CC al que se le han calculado las pérdidas previamente se acopla con el motor. Una fuente de potencia AC con frecuencia nominal se conecta en los terminales del motor. La tensión aplicada debe ser tan alta como sea posible pero sin causar un calentamiento excesivo en los terminales del motor, si es posible

⁴⁴ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004

está debe ser menor que el 50% de la tensión nominal. La velocidad para cada punto de prueba se controla variando la carga en el generador.

Durante este ensayo, se utilizan velocidades que van desde $\frac{1}{3}$ de la velocidad de sincronismo hasta la máxima velocidad que se pueda obtener. En cada ajuste de la velocidad se deben tomar lecturas de tensión, corriente, y velocidad para el motor de inducción; de tensión y corriente de armadura y de corriente de campo del generador DC. Se debe tener cuidado de no recalentar el motor.

La exactitud de las medidas de la velocidad es particularmente importante cuando se presenta un bajo deslizamiento.

La potencia total de salida del motor es la suma de la potencia de salida y las pérdidas del generador DC.

El torque para cada velocidad se puede obtener mediante la ecuación (4-68).

$$T = \frac{k_2(P_{GO} + P_{GL})}{n} \quad (4-68)$$

En donde:

T = Torque en N·m.

P_{GO} = Potencia de salida del generador.

P_{GL} = Pérdidas en el generador.

n = Velocidad de prueba para el motor.

$k_2 = 9.549$ Si el torque se da en N·m.

- **Método 2**

En este método, el motor se arranca sin carga, y el valor de la aceleración es determinado para varias velocidades. El torque se determina a partir de la aceleración de las masas de las partes rotativas. En este caso es importante la exactitud de las medidas de la velocidad y de la aceleración.

La aceleración y la duración de la prueba son determinadas por el tipo de instrumento utilizado para realizar las mediciones. En cualquier caso la prueba debe durar el tiempo suficiente para permitir que los transitorios eléctricos no perturben la curva de velocidad-torque y para que las lecturas necesarias sean tomadas con la exactitud requerida por la curva.

El tiempo para tomar las lecturas se puede prolongar, se puede incrementar aplicando una tensión reducida o acoplando el eje del motor a una inercia adecuada.

Como el motor se acelera desde reposo hasta una velocidad cercana a la de sincronismo, se deben tomar simultáneamente lecturas de tensión de línea para una fase, de corriente de línea en una fase, de velocidad y del tiempo en segundos. Un mínimo de 5 grupos de medidas se debe tomar durante el periodo de aceleración.

El torque, para cada velocidad se calcula a partir de la aceleración utilizando la siguiente ecuación.

$$T = \frac{J}{k_2} * \frac{dn}{dt} \quad (4-69)$$

En donde:

T = Torque en N·m.

J = Momento de inercia de las partes móviles, en $kg \cdot m^2$

$\frac{dn}{dt}$ = Aceleración para cada velocidad.

$k_2 = 9.549$ Si el torque se da en N·m.

- **Método 3**

En este método el torque se determina restando las pérdidas de la máquina de la potencia de entrada. Es comúnmente usado cuando la máquina no puede ser descarga para determinar el torque por medio de la aceleración.

La máquina debe arrancarse como se describe en la sección 4.4.5.3 con la diferencia de que en este caso no puede retirarse la carga. Las lecturas de las entradas tomadas en el sección 4.4.5.3.2.2 se grafican contra las lecturas de velocidad. La tensión de línea, la corriente de línea, la potencia, y la velocidad se deben graficar contra el tiempo.

El torque para cada velocidad se determina a partir de la ecuación (4-70).

$$T = \left\{ \left[\frac{k_2}{n_s} \right] * \left[P_{si} - P_{SIR} - P_h - P_{SLs} * \sqrt{\frac{n}{n_s}} \right] \right\} - T_{fw} \quad (4-70)$$

En donde:

T = Torque en N·m.

P_{si} = Potencia de entrada al estator, en W.

P_{SIR} = Pérdidas en el estator a la corriente de prueba, en W.

P_h = Pérdidas en el núcleo, en W.

P_{SLs} = Pérdidas por cargas parásitas a la frecuencia fundamental.

P_{SLr} = Pérdidas por cargas parásitas a altas frecuencias.

n = Velocidad de prueba.

n_s = Velocidad de sincronismo.

$k_2 = 9.549$ Si el torque se da en N·m.

T_{fw} = Torque debido a la fricción y el rozamiento con el viento en una prueba de velocidad, en N·m.

- **Método 4**

El torque y la corriente se miden cuando la máquina esta cargada a diferentes velocidades con un dinamómetro o un freno mecánico. En cada velocidad se deben tomar lecturas simultáneas de tensión, corriente, velocidad y torque. Esta prueba debe realizarse con una tensión cercana a la nominal, si se hace con Tensiones reducidas, los valores del torque y la corriente se debe corregir a la tensión especificada.

4.5.3.3. Corrección de los datos obtenidos de pruebas con Tensiones reducidas

Cuando es necesario establecer valores de la corriente y del torque a tensión nominal, a partir de pruebas de velocidad-torque, de velocidad-corriente y de rotor-bloqueado hechas con Tensiones reducidas, se debe considerar que, debido a la saturación de las trayectorias del flujo, la corriente puede aumentar en un factor mayor que la primera potencia de la tensión; y el torque puede aumentar en un factor mayor que cuadrado de la tensión. La relación varía con el diseño; sin embargo, como primera aproximación, se asume que la corriente se incrementa directamente con la tensión y que el torque lo hace con el cuadrado de la tensión.

Un método más exacto requiere de la determinación de la razón de cambio de la corriente y del torque con la tensión estableciendo las curvas de velocidad-torque y de velocidad-corriente para por lo menos dos, y preferiblemente para tres o más, valores de la tensión. Los puntos de prueba con tensión reducida se deben trazar en papel con abscisas y ordenadas logarítmicas y se deben corregir a la tensión nominal usando un ajuste cuadrático de la curva para mayor exactitud.

4.6. PRUEBAS MISCELÁNEAS

4.6.1. Resistencia de aislamiento

Las pruebas de resistencia de aislamiento son de gran valor para los procesos de mantenimiento. Para realizar este ensayo, todos los accesorios que estén conectados a los terminales de la máquina se deben desconectar durante la prueba y las sus termaleas se deben unir con el núcleo [7].

Para conocer más detalladamente los métodos de prueba, se recomienda revisar el estándar IEEE Std 43-2000.

4.6.2. Pruebas de alto potencial

4.6.2.1. Generalidades

Este tipo de pruebas consiste en la aplicación de una tensión mayor que la tensión nominal durante un tiempo específico, esto se hace con el fin de determinar la suficiencia contra daños y espaciamientos de los materiales aislantes bajo condiciones normales. La tensión de prueba debe ser aplicada cuando, y solo cuando, la máquina está en buenas condiciones y la resistencia de aislamiento no esta deteriorada debido a la contaminación, la humedad u otros tipos de daños. Antes de realizar una prueba de este tipo se recomienda revisar el estándar IEEE Std 43-2000.

4.6.2.2. Medidas

Para tomar las medidas de la tensión en un prueba de alto-potencial, se recomienda revisar las recomendaciones dadas en el estándar IEEE Std 4-1995

[B6]. Por lo general, se utiliza el método del voltmetro para la tomar estas medidas.

4.6.2.3. Conexiones

La tensión de prueba se aplica sucesivamente entre cada circuito eléctrico y el núcleo, con los devanados que no están bajo prueba y las demás piezas metálicas conectadas al núcleo⁴⁵. Los devanados polifásicos interconectados se consideran como un solo circuito. Todos los accesorios conectados a los terminales de la máquina se deben desconectar y deben conectarse al núcleo durante esta prueba. No se debe dejar ningún terminal desconectado ya que esto éste puede causar esfuerzos severos en algún punto del devanado.

4.6.2.4. Tensión de prueba

Generalmente, la tensión de prueba recomendada para ensayar estatores nuevos es de 1000 V más dos veces la tensión nominal de la máquina bajo prueba, asimismo, para rotores nuevos y motores de rotor devanado esta tensión debe ser igual a 1000 V más dos veces la máxima tensión inducida en los anillos colectores. Sin embargo se recomienda revisar las recomendaciones de NEMA MG 1-2003 [B7] en sus partes 12 y 20 para confirmar el valor de la tensión de prueba para la máquina que se desea ensayar.

Puesto que la prueba de alto-potencial es agotadora para los componentes dieléctricos de los devanados, se recomienda que las Tensiones iniciales estén limitadas hasta el 85% de los niveles usados para la prueba del equipo nuevo. Para cualquier otra prueba de alto-potencial, se recomienda que el nivel de la tensión de prueba se limite al 75%.

4.6.2.5. Aplicación de la tensión

⁴⁵ Tomado del estándar IEEE Std. 112-2004

Durante el desarrollo de la prueba, la tensión se debe llevar a su valor máximo en el menor tiempo posible mientras se mantenga una lectura exacta [7]. Esta tensión se debe mantener durante un minuto, posteriormente, esta debe reducirse con una tasa igual a $\frac{1}{4}$ del valor máximo en no mas de 15 segundos. Para evitar un estrés excesivo de los componentes del aislamiento, no se recomienda el uso repetido de la tensión de prueba.

4.6.3. Resistencia de aislamiento en los rodamientos

4.6.3.1. Método 1

La forma más confiable para examinar el aislamiento de un rodamiento se presenta cuando la máquina esta en reposo. Si únicamente se aísla un rodamiento, una capa de papel aislante debe ser aplicada debajo del rodamiento. Los acopladores a las unidades adyacentes deben estar separados si no se aíslan.

Un medidor de resistencia se puede utilizar para hacer una estimación inicial de la resistencia de aislamiento de los rodamientos. Esta medición se realiza conectando a el eje una de las puntas de prueba de medidor, la otra se conecta al núcleo de la máquina.

En las máquinas con dos capas de aislamiento en el rodamiento y con un separador metálico entre las capas, esta prueba se debe realizar entre el separador metálico y el núcleo de la máquina. La prueba puede realizarse mientras que la máquina está operando, pero es preferible hacerla con la máquina en reposo. La prueba se debe complementar con una cuidadosa inspección visual que asegure que no hay trayectorias paralelas sin aislar.

4.6.3.2. Método 2

Una capa de papel se coloca alrededor del eje para aislarlo de los rodamientos. Después, desde una fuente de 110-125 V, ya sea con una lámpara de filamento adecuado para la tensión del circuito o un voltmetro de aproximadamente 150 V en su escala mayor y con una resistencia en el rango de 100-300 Ω/V colocada en serie con la fuente de tensión, los terminales del instrumento de medida se conectan uno en el rodamiento y otro en el núcleo de la máquina. Si el filamento de la lámpara no cambia de color (o si la lectura del voltmetro no se excede los 60 V), el aislamiento se puede considerar satisfactorio.

Un megohmmetro de 500 V puede también ser utilizado. Esto es mucho más sensible que el método anterior y puede tender a rechazar el aislamiento, que, en realidad, es adecuado para evitar que pequeñas Tensiones en el eje causen corrientes perjudiciales. Se recomienda revisar la sección 4.6.4.1.

4.6.4. Ruido

Para conocer los niveles y las pruebas relacionadas con el ruido, se debe referir a NEMA MG -2003 [B7] en su parte 9 y a la norma IEC 60034-9 [B3].

4.6.5. Balance y vibraciones.

4.6.5.1. Balance del rotor.

Los rotores de los motores y generadores se deben balancear dinámicamente utilizando una media llave.

4.6.5.2. Vibraciones.

Para la realización de pruebas relacionadas con las vibraciones se recomienda revisar los siguientes estándares, NEMA MG 1-2003 [B7] parte 7, IEC 60034-14 [B4] o API Std 541, cuarta edición.

4.6.6. Sobrevelocidad

Cuando se toman pruebas de este tipo, se deben tomar medidas de seguridad para proteger tanto al personal encargado de la prueba como al equipo.

4.7. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA MOTORES DE INDUCCIÓN MONOFÁSICOS

A continuación, se hacen algunas recomendaciones para la realización de la mayoría de las pruebas realizadas para determinar el desempeño de los motores de inducción monofásicos.

4.7.1. Pruebas generales.

Los motores de inducción monofásicos generalmente se someten a pruebas de rutina, en estas pruebas se realizan mediciones de la potencia de entrada, de la corriente de entrada cuando la máquina está en vacío, de la corriente de entrada bajo condiciones de rotor bloqueado. También suelen realizarse pruebas de alto-potencial. Las medidas de la potencia y de la corriente de entrada sin carga y con rotor bloqueado se deben realizar a tensión y frecuencia nominales. Mediante la realización de pruebas adicionales es posible determinar la eficiencia, el factor de potencia, el torque de arranque, el deslizamiento y los incrementos en la temperatura.

4.7.1.1. Cronograma de pruebas

En la tabla numero 24 se encuentra un listado de los tipos mas comunes de motor de inducción monofásico, junto con las pruebas aplicables a cada uno de ellos.

Tipos de prueba.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Corriente de rotor bloqueado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Torque de rotor bloqueado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Torque de pull-up.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Torque de conmutación		X	X	X				X		
Torque de pull-in.									X	
Breakdown torque	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Pull-out torque								X	X	
Velocidad.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Factor de potencia	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eficiencia.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Incremento de temperatura	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 24: Pruebas aplicables a los motores de inducción monofásicos⁴⁶.

En donde:

A= Condensador (permanente partida)

B=.condensador (dos valores)

C= Arranque con capacitor.

D= Fase partida.

E= Polos de sombra.

F= Repulsión.

G= Repulsión-inducción.

H= Repulsión-arranque-inducción.

I= Reluctancia.

J= Universal.

⁴⁶ Tomada del estándar IEEE Std.114-2001.

Las pruebas de velocidad, factor de potencia e incremento de temperatura, son realizadas normalmente con carga nominal, sin embargo, se pueden realizar con cualquier valor de carga de ser necesario.

- **Pruebas con carga**

Las pruebas con carga se realizan para determinar la eficiencia, el factor de potencia, la velocidad y los incrementos de temperatura. Cuando se realizan este tipo de ensayos el motor debe estar adecuadamente alineado y asegurado. Cuando se toman las lecturas para cálculos de desempeño, el incremento de temperatura debe encontrarse entre el 50% y el 100% del incremento nominal de la temperatura. Usualmente las pruebas se inician con las cargas más altas.

- **Pruebas con el rotor bloqueado**

Se debe tener en cuenta que las pruebas con rotor bloqueado involucran altos niveles de estrés mecánico y de calentamiento. Por tal razón se deben tomar algunas precauciones:

- los medios para bloquear el rotor deben ser adecuados para prevenir posibles daños en el equipo y lesiones al personal que realiza la prueba.
- La dirección de la rotación debe determinarse antes de prueba para poder aplicar los métodos de bloqueo y el torque adecuados.
- La temperatura del motor debe ser aproximadamente igual a la ambiente antes de empezar con la prueba.

Se deben tomar lecturas del torque y de la corriente tan pronto como sea posible después de aplicada la tensión. El tiempo transcurrido entre la aplicación de la tensión y la toma de las lecturas no debe exceder los 5 segundos. La temperatura del motor debe ser como máximo la temperatura nominal más 40°C.

- **Precauciones**

Debido a que el desempeño de un motor de inducción monofásico no solo depende de la tensión y de la frecuencia, sino también de la forma de onda de la tensión, valores adecuados de esta variable se pueden obtener solo mediante medidas cuidadosas y la utilización de una fuente de potencia adecuada.

4.7.1.2. Facilidades de prueba

- **Selección de los instrumentos**

Se deben utilizar instrumentos calibrados y de alta precisión ya sean digitales o analógicos [8]. Algunos factores que afectan la exactitud, en especial en instrumentos analógicos son los siguientes.

- Rango, condiciones y calibración del instrumento.
- Calibración de las puntas de prueba.

Los instrumentos debe tener un registro de calibración, en el cual se indican los límites del error, los cuales no deben ser superiores al 0.5% de la máxima escala para pruebas generales y al 0.2% para la determinación de eficiencia.

Los instrumentos electrónicos son en general mucho más versátiles y poseen una impedancia de entrada más alta. Sin embargo, una alta impedancia de entrada hace que el instrumento sea más susceptible al ruido. Una buena practica, requiere de la utilización de puntas de prueba blindadas y trenzadas. El blindaje debe ponerse a tierra en un solo punto y las puntas de prueba deben mantenerse alejadas de los conductores de fase. Todas las partes metálicas deben ser equipotencializadas.

- **Transformadores de medida**

Cuando se utilizan transformadores de medida, se deben hacer correcciones debido a los errores incluidos por las relaciones de transformación. En este caso, los errores no deben ser mayores del 0.5%.

- **Fuente de potencia**

La tensión de la fuente de potencia debe ser aproximadamente senoidal, el factor de desviación de la forma de onda no debe exceder el 10% [8]. La frecuencia debe mantenerse con un $\pm 0.5\%$ del valor requerido para realizar la prueba, cualquier cambio en la frecuencia afecta directamente el valor de la eficiencia.

- ✓ **Estabilidad de la frecuencia**

En una prueba de entrada-salida no se pueden permitir cambios rápidos en la frecuencia, ya que ellos producen cambios en la velocidad. Las variaciones en la frecuencia durante la prueba no deben exceder el 0.33% del promedio de la frecuencia.

4.7.1. Medidas

4.7.2.1. Medidas eléctricas

- **Cantidades RMS**

Los valores medidos de la corriente y de la tensión deben ser valores RMS, a menos que se indique otra cosa.

- **Tensión**

La tensión de línea debe medirse en los terminales de la máquina, si las condiciones de operación de la máquina no permiten esto, se debe considerar el error introducido en los cálculos. Se debe contar con medios que permitan ajustar la tensión al valor deseado, este control puede realizarse usando un autotransformador.

- **Corriente**

La corriente puede medirse usando un amperemetro o un transformador de corriente. El esquema de medición recomendado es mostrado en la figura 34.

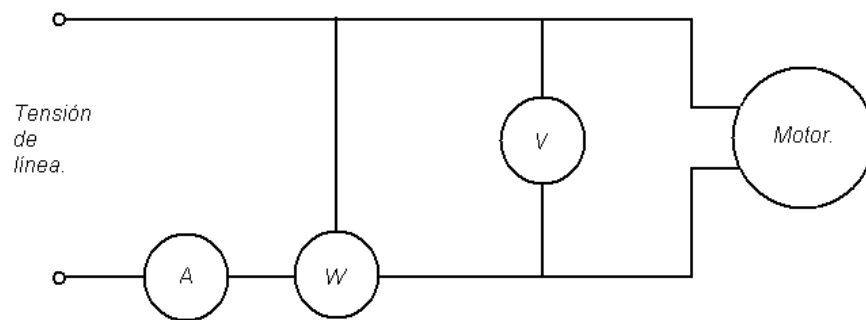


Figura. 34: Esquema de medición recomendado.

La corriente neta del motor, es la verdadera corriente de entrada al motor. Para su cálculo se utiliza la ecuación (4-71).

$$I = \sqrt{I_A^2 - \frac{2 \cdot P_W}{R_M} + \left(\frac{E}{R_M} \right)^2} \quad (4.71)$$

En donde:

I_A = Corriente de línea medida.

P_W = Potencia medida por el wattmetro.

E = Tensión de línea medida en los terminales del motor.

R_M = Resistencias en paralelo del voltmetro y de la bobina de tensión del wattmetro.

Otra opción para el cálculo de la corriente neta del motor es la ecuación (4-72).

$$I = I_A - \frac{P_W}{I_A R_M} \quad (4-72)$$

Teniendo la cuenta de la siguiente condición $I_A \geq \frac{7 \cdot E}{R_M}$.

- **Potencia**

Para medir la potencia se puede medir con un wattmetro monofásico, el total de watts medidos por el wattmetro será reducida por las pérdidas de potencia en el circuito de tensión de los instrumentos.

- **Resistencia**

Para medir la resistencia DC del estator debe medirse según los procedimientos dados en el estándar IEEE Std 118-1978.

- ✓ **Referencia a la temperatura ambiente**

Todas las determinaciones de desempeño deben corregirse a una temperatura ambiente de 25 °C.

- ✓ **Corrección a una temperatura específica**

Cuando la resistencia del devanado es determinada a una temperatura t_t , esta puede ser corregida a una temperatura t_s utilizando la ecuación:

$$R = \frac{R_t \cdot (t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (4-73)$$

En donde:

R_s = Resistencia del devanado corregida.

R_t = Resistencia del devanado medida a la temperatura t_t .

t_2 = Temperatura especificada para la corrección de la resistencia.

t_t = Temperatura a la cual se midió la resistencia.

k = Constante seleccionada de acuerdo al tipo de conductor.

4.7.2.2. Mediciones mecánicas

- **Torque**

El torque puede medirse con un dinamómetro, con un sensor de torque ubicado en el eje o por medio de la reacción del estator.

- **Velocidad rotacional**

Los instrumentos para medir la velocidad rotacional no deben tener errores mayores que 1 revolución por minuto.

- ✓ **Método del estroboscopio**

Este método es recomendado para motores de 40 W o menos, debido a la carga agregada por el tacómetro.

- **velocidad de deslizamiento y deslizamiento**

La velocidad de deslizamiento es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad rotacional medida. El deslizamiento se expresa generalmente como el siguiente cociente:

$$s = \frac{\text{velocidad_de_deslizamiento}}{\text{velocidad_sin_crons.}} \quad (4-74)$$

En donde ambas velocidades están dadas en $\frac{\text{rev}}{\text{min}}$.

La velocidad de deslizamiento puede medirse utilizando un estroboscopio electrónico.

✓ Corrección en el deslizamiento por temperatura

Las mediciones de deslizamiento pueden corregirse a la temperatura del estator de la siguiente manera:

$$S_s = \frac{S_t \cdot (t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (4-75)$$

En donde:

S_s = Deslizamiento corregido.

S_t = Deslizamiento medido a la temperatura t_t .

t_s = Temperatura especificada para la corrección del deslizamiento.

t_t = Temperatura medida de los devanados.

k = Constante seleccionada según el tipo de conductor.

• Potencia de salida

La potencia mecánica de salida se expresa de la siguiente manera:

$$P = T \cdot \omega \quad (4-76)$$

En donde:

T = Torque.

ω = Velocidad angular.

Dado que la velocidad rotacional, es usualmente expresada en r/min, se obtiene lo siguiente:

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = 9.549 \cdot \omega \quad (4-77)$$

$$P = \frac{T \cdot n}{k} = \frac{T \cdot n}{9.549} \quad (4-78)$$

La potencia mecánica de salida puede determinarse usando un freno o un dinamómetro.

✓ Freno

En este método un freno se monta en el eje del motor y este se ajusta en una escala adecuada para medir la fuerza de retraso oposición por el freno. El torque se calcula como el producto de la lectura del freno y de la longitud del brazo del freno.

✓ Dinamómetro

En este método el motor se conecta a un dinamómetro. Las pérdidas por fricción y acoplamiento deben ser compensadas. Se debe usar un dinamómetro de tamaño adecuado, de tal manera que, las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento

del dinamómetro a la velocidad nominal del motor no sean más grandes que el 15% de la potencia de salida del motor. El dinamómetro debe tener una sensibilidad tal que registre cambios del 0.25% en el torque [8].

Correcciones en el dinamómetro

La corrección del dinamómetro es una corrección en la medición del torque. Esta corrección se basa en la potencia de entrada con el motor operando en vacío y con el motor operando mientras se encuentra acoplado al dinamómetro. Ambas medidas de la potencia de entrada se deben obtener a la misma velocidad.

$$T_w = \frac{k(P_a - P_b)}{n} \quad (4-79)$$

En donde:

P_a = Potencia de entrada al motor cuando opera acoplado con el dinamómetro.

P_b = Potencia de entrada cuando el motor opera en vacío.

n = Velocidad rotacional.

k = Constante seleccionada de acuerdo del sistema de unidades usado.

- **Estabilización de las pérdidas en los rodamientos**

La fricción en algunos motores puede cambiar hasta que los rodamientos han alcanzado condiciones de operación estables. Se considera que la estabilización se ha alcanzado cuando la potencia de entrada sin carga no varía en más del 3% en lecturas sucesivas tomadas en intervalos de 30 minutos. La estabilización de la máquina requiere de muchas horas de operación. Todas las mediciones para determinar la estabilización deben tomarse a la misma tensión y frecuencia.

4.7.2.3. Medidas de temperatura

Este tipo de medidas se hacen para determinar lo siguiente⁴⁷:

- temperatura ambiente.
- Incrementos de temperatura en algunas partes de la máquina.
- Cambios bruscos de la temperatura en ciertas partes del motor, como en los devanados.

- **Métodos para determinar la temperatura**

Los métodos de determinación de la temperatura comúnmente usados se definen en el estándar IEEE Std 1-1986. A continuación se enumeran algunos de ellos:

- termómetro.
- Termocupla aplicada.
- Termocupla de contacto.
- Resistencia.
- Detectores embebidos.

4.7.3. Pruebas

4.7.3.1. Generalidades

- **Conexiones**

Las conexiones entre la fuente de potencia y el motor se muestran en la figura 35.

⁴⁷ Tomada del estándar IEEE Std.114-2001

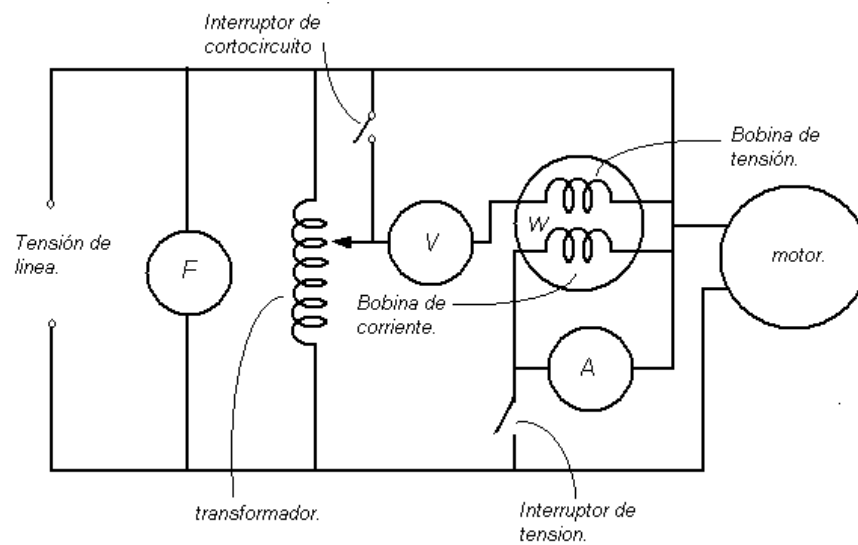


Figura. 35 conexiones de prueba con tensión variable.

- **Temperatura ambiente**

Todas las determinaciones se deben realizar con una temperatura ambiente de 25°C. Sin embargo, la temperatura ambiente no debe ser menor de 10 °C ni mayor de 40°C, a no ser que el fabricante especifique otra cosa.

Para la medición de la temperatura ambiente de los motores eléctricos, se recomienda seguir las indicaciones del estándar IEEE Std 119-1974.

4.7.4. Tipos de pérdidas

4.7.4.1. Pérdidas resistivas en el estator

Las pérdidas resistivas en el estator se obtienen a partir de la siguiente ecuación.

$$P_{sl} = \frac{I^2 \cdot R}{2} \quad (4-80)$$

En donde:

I = Corriente medida en el devanado del estator a una carga específica.

R = Resistencia DC entre los terminales, corregida a la temperatura especificada.

- **Temperatura especificada**

Para la medición de la temperatura se puede seguir uno de los siguientes criterios:

- incremento de temperatura determinado para la medición de resistencia a la temperatura de prueba para carga nominal más 25°C.
- temperatura determinada en el ítem anterior para un motor de la misma construcción y del mismo diseño eléctrico.
- Temperatura de la tabla 23, de acuerdo a la clase de aislamiento.

Esta temperatura de referencia debe usarse para determinar las pérdidas resistivas con todas las cargas.

Clase de aislamiento.	Temperatura en grados Celsius.
A	75
B	95
F	115
H	130

Tabla 25: temperatura especificada para correcciones de resistencia.

4.7.4.2. Pérdidas por fricción y rozamiento con el viento

Este tipo de pérdidas se determina por alguno de los siguientes métodos. Para asegurar que se obtenga un valor correcto de estas pérdidas, el motor se debe operar hasta que la potencia de entrada se estabilice [8].

- **Método de retardo**

Para utilizar este método, se debe conocer de antemano el momento de inercia de las partes rotativas. Se empieza por operar el motor en vacío a tensión y frecuencia nominales hasta que la potencia de entrada se estabilice. Cuando esto ocurre, el motor se desconecta y empieza a desacelerarse. La tasa de desaceleración se obtiene midiendo el tiempo requerido por la velocidad para disminuirse en algún intervalo fijado, o, midiendo el cambio en la velocidad para un intervalo de tiempo determinado.

Las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento se calculan a partir de la velocidad y de la tasa de desaceleración. La ecuación utilizada para realizar los cálculos se muestra a continuación.

$$P_f = k \cdot n \cdot J \cdot \left(\frac{dn}{dt} \right) \quad (4-81)$$

En donde:

k = Constante seleccionada según el sistema de unidades usado.

n = Velocidad a la cual la tasa de desaceleración es medida.

J = Momento rotacional de inercia del rotor.

$\frac{dn}{dt}$ = Tasa de desaceleración.

Cuando este método se usa en motores pequeños, es recomendable medir la velocidad a través de medios visuales.

- **Método del dinamómetro**

Este método se basa en la medición del torque necesario para impulsar las partes rotativas de la máquina a velocidad normal. En este caso, las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_f = \frac{T_f \cdot n}{k} \quad (4-82)$$

En donde:

T_f = Torque neto de fricción y rozamiento con el viento.

n = Velocidad rotacional.

k = Constante seleccionada de acuerdo a las unidades usadas en la medición.

El dinamómetro usado para esta prueba debe ser tal que el torque medido de la fricción y el rozamiento con el viento represente como mínimo el 15% del torque nominal del dinamómetro.

- **Método de saturación sin carga**

El motor debe operarse en vacío con tensión y frecuencia nominales hasta que la potencia de entrada se estabilice. Se toman lecturas de la tensión, de la corriente y de la potencia de entrada a frecuencia nominal para tensiones que varían desde el 125% de la tensión nominal bajo un punto en el cual cualquier cambio en la tensión incrementa la corriente. Inmediatamente después de esta prueba y antes de que la temperatura cambie considerablemente, se deben tomar lecturas de la potencia de entrada y de la corriente con el 50% de la tensión nominal con el rotor bloqueado y sin excitación del campo. Después de esta prueba se debe hacer una medición de la resistencia en el estator.

Las pérdidas resistivas en el motor se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$P_l = \frac{I_s^2}{2} \left(R_t + \frac{P_1}{I_1^2} \right) \quad (4-83)$$

En donde:

P_1 = Potencia de entrada con el rotor bloqueado y el 50% de la tensión nominal.

R_t = Resistencia del estator medida a la temperatura de prueba.

I_1 = Corriente de entrada con el rotor bloqueado y el 50% de la tensión nominal.

La potencia de entrada medida menos las pérdidas resistivas, se dibujan en función de la tensión. Cuando la curva obtenida se extiende hasta tensión cero, la intercepción con el eje de tensión cero corresponde a las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento. La intercepción se puede determinar más exactamente si la curva se traza considerando la tensión al cuadrado para los valores inferiores de la tensión.

- **Corriente sin carga**

La corriente sin carga se puede medir directamente.

4.7.4.3. Pérdidas resistivas en el rotor

Cuando el deslizamiento es adecuadamente determinado, las pérdidas resistivas en el rotor se pueden calcular mediante el deslizamiento. En el caso de motores con rotores devanados, las pérdidas resistivas del rotor incluyen las pérdidas en los contactos de las escobillas. Las pérdidas resistivas en el rotor están dadas por:

$$P_{rl} = (P_0 - P_{sl} - P_{cl} - P_f)s \quad (4-84)$$

En donde:

P_0 = Potencia de entrada al estator.

P_{sl} = Pérdidas resistivas en el estator.

P_{cl} = Pérdidas en el hierro.

P_f = Pérdidas por fricción y rozamiento con el viento.

s = Deslizamiento.

Si se tiene en cuenta que bajo condiciones de rotor bloqueado P_f es cero y el deslizamiento es 1, la ecuación (4-85) se puede reducir a la siguiente expresión.

$$P_{rl} = (P_0 - P_{sl} - P_{cl}) \quad (4-85).$$

4.7.4.4. Pérdidas en el hierro

Cuando el motor opera en vacío, la potencia de entrada medida es igual a las pérdidas totales, además el deslizamiento es considerablemente pequeño, por lo tanto la potencia de entrada menos las pérdidas resistivas en el estator corresponde a la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento y las pérdidas en el hierro. Por lo tanto, las pérdidas en el hierro se obtienen restando las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento de la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento y las pérdidas en el hierro.

4.7.4.5. Pérdidas por cargas parásitas

- **Medición indirecta**

Este tipo de pérdidas se determina indirectamente midiendo las pérdidas totales y restando de ellas la suma de las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, las pérdidas resistivas en el estator y el rotor y las pérdidas en el hierro.

- **Método directo para motores de rotor devanado**

En este método, el rotor es excitado con corriente directa y los terminales del devanado del estator son cortocircuitados con un amperemetro en el circuito. El rotor se impulsa hasta velocidad sincrónica usando medios externos, y la excitación del rotor se ajusta hasta que la corriente circulante en el devanado del estator es el valor para el cual se desea determinar las pérdidas.

El valor de las pérdidas por cargas parásitas se determina a partir de la ecuación (4-86).

$$P_{sll} = (P_r - P_f) - P_{sl} \quad (4-86)$$

En donde:

P_r = Potencia mecánica necesaria para impulsar el rotor con excitación DC.

P_f = Potencia mecánica necesaria para impulsar el rotor sin excitación DC

P_{sl} = Pérdidas resistivas en el estator a la temperatura de prueba.

- **Adecuación de los datos de prueba**

La exactitud de este método se puede mejorar dibujando las pérdidas por cargas parásitas contra la corriente del estator al cuadrado. Las cantidades P_{sll} , $(P_r - P_f)$ y P_{sl} son ajustadas mediante una ecuación de la forma:

$$P_i = A_i \cdot I^{N_i} \quad (4-87)$$

En donde:

$i = 1, 2, \text{ o } 3.$

$$P_i = P_1 = P_{sll}; P_2 = (P_r - P_f); P_3 = P_{sl}$$

A_i = Intercepción con el eje y en una gráfica logarítmica.

N_i = Pendiente en una grafica logarítmica.

I = Corriente de línea durante la prueba de pérdidas por cargas parásitas.

- **Valores asumidos para las pérdidas por cargas parásitas**

Si el valor de estas pérdidas no se mide, las pérdidas por cargas parásitas a carga nominal se pueden asumir como el 1.8% de la carga nominal [8]. Para otros valores de carga, se puede asumir que estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente del rotor.

$$\overline{P}_{sll} = P_{sll} \cdot \left(\frac{\overline{I}}{I_0} \right)^2 \quad (4-88)$$

En donde:

P_{sll} = Valor asumido para las pérdidas por cargas parásitas a carga nominal.

$\overline{I}$ = Valor de la corriente del rotor en el punto de carga.

I_0 = Valor de la corriente del rotor a carga nominal.

4.7.4.6. Pérdidas en los contactos de las escobillas

Para motores con rotores devanados, las pérdidas en el contacto de las escobillas son determinadas por el producto de la corriente secundaria y una caída de tensión. La caída de tensión puede asumirse como de 1 V para escobillas de Carbón o grafito y de 0.3 V para escobillas de metal-carbón⁴⁸.

⁴⁸ Tomada del estándar IEEE Std.114-2001

4.7.5. Eficiencia y factor de potencia

4.7.5.1. Generalidades

La eficiencia del motor se define como la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada como se muestra en la ecuación (4-89).

$$E = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4-89).$$

Otra forma de expresarlo se encuentra si se considera que la potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas.

$$E = \frac{P_{in} - P_l}{P_{in}} \quad (4-90)$$

P_l Corresponde a las pérdidas de potencia.

4.7.5.2. Determinación de la eficiencia

La determinación de la eficiencia se basa en las mediciones de la potencia de entrada y la potencia de salida.

- **Procedimiento de prueba**

Para empezar el motor, se carga con un freno o un dinamómetro. Si no se especifica otra cosa, la eficiencia se calcula considerando los valores nominales de la tensión, de la frecuencia y del incremento de la temperatura. Para dibujar una curva de eficiencia contra potencia de salida, se recomiendan como mínimo

siete puntos: se deben tomar lecturas de la potencia eléctrica, de la corriente, de la tensión, de la frecuencia, del deslizamiento, del torque, de la temperatura ambiente y de la resistencia de los devanados del estator para por lo menos cuatro puntos de carga igualmente espaciados desde el 25% hasta el 100% de la carga, y dos puntos adicionales de carga ubicados adecuadamente por encima del 100% pero no mayores al 150% de la carga nominal.

4.7.5.3. Factor de potencia.

El factor de potencia es la razón de la potencia de entrada medida al producto de la tensión y la corriente como se muestra en la ecuación:

$$PF = \frac{P}{V \cdot I} \quad (4-91)$$

Todos los instrumentos deben leerse tan simultáneamente como sea posible.

4.7.6. Pruebas de desempeño

4.7.6.1. Definiciones

- **Característica de velocidad-torque⁴⁹**

Esta característica es la relación existente entre el torque y la velocidad, en un rango de velocidades que va desde cero hasta la velocidad de sincronismo. Un ejemplo de este tipo de curva se muestra en la figura 3.

⁴⁹ Tomada del estándar IEEE Std.114-2001

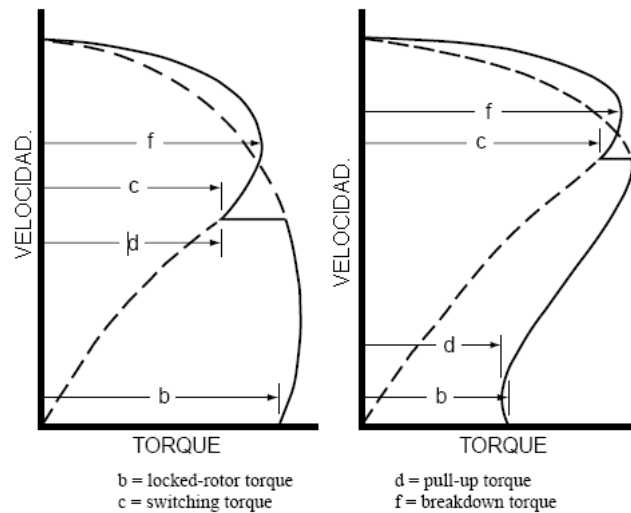


Figura. 36 curvas características de velocidad-torque en motores de inducción monofásicos.

- **Característica velocidad-corriente⁵⁰**

Esta característica es la relación existente entre la corriente y la velocidad, en un rango de velocidades que va desde cero hasta la velocidad de sincronismo. Esta característica es usualmente dibujada junto con la característica de velocidad-torque, usando la misma escala de velocidad para ambas curvas.

4.7.6.2. Pruebas para determinar las características de velocidad-torque y de velocidad-corriente

- **Procedimiento**

Los siguientes métodos pueden utilizarse para determinar estas curvas, se deben registrar suficientes datos para asegurar que las curvas se puedan dibujar en las regiones de interés. La frecuencia de la fuente de potencia se debe mantener constante en el valor de la frecuencia nominal del motor bajo prueba.

- ✓ **Método 1**

⁵⁰ Tomada del estándar IEEE Std.114-2001

El motor bajo prueba se debe acoplar a una carga adecuada que permita controlar la velocidad del rotor mediante variaciones de la carga. Las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento de la carga deben determinarse previamente. Los valores obtenidos del torque se deben corregir agregándole el torque correspondiente a las pérdidas por fricción y rozamiento de la carga.

Los datos deben obtenerse a velocidades entre 1/3 de sincrónica y la velocidad máxima, la velocidad debe mantenerse constante mientras se toman los datos. Se deben tomar lecturas del torque, la tensión y la corriente para cada velocidad. Es muy importante evitar el recalentamiento del motor mientras se realiza la prueba.

La potencia total de salida es la suma de la potencia de salida medida y las pérdidas asociadas con la carga. El torque para cada velocidad se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$T = \frac{k \cdot (P_0 + P_l)}{n} \quad (4-92)$$

En donde:

T = Torque.

k = Constante seleccionada según el sistema de unidades usado.

P_0 = Potencia de salida.

P_l = Pérdidas por fricción y rozamiento con el viento de la carga.

n = Velocidad de prueba.

✓ Método 2

Para este método se debe conocer previamente el momento de inercia de las partes rotativas de la máquina. Como la máquina se acelera desde reposo a una velocidad cercana a la nominal, se deben tomar lecturas simultáneas de la

corriente y de la velocidad en intervalos de tiempo fijos. El torque se obtiene para cada velocidad utilizando la siguiente ecuación.

$$T = \left(\frac{J}{k} \right) \left(\frac{dn}{dt} \right) \quad (4-93)$$

En donde:

T = Torque.

$\frac{dn}{dt}$ = Aceleración.

J = Momento de inercia rotacional.

k = Constante seleccionada según el sistema de unidades usado.

✓ Método 3

En este método el torque se obtiene restando las pérdidas de la potencia de entrada. Las lecturas de entrada tomadas en la sección 4.7.2.1.3. se dibujan contra la velocidad. Las líneas de tensión, potencia y velocidad deben ser dibujadas en función del tiempo. Valores promedio de las lecturas de velocidad cero de la prueba de rotor bloqueado se deben incluir.

Para la determinación del torque para diferentes velocidades se usa:

$$T = \frac{k}{n} (P_i - P_l) - T_{fw}. \quad (4-94).$$

En donde:

T = Torque.

k = Constante seleccionada según el sistema de unidades usado.

P_l = Pérdidas resistivas en el estator.

P_i = Potencia de entrada.

n = Velocidad de prueba.

T_{fw} = Torque por fricción y rozamiento con el viento del motor a la velocidad de prueba.

✓ Método 4

Estas curvas se pueden construir a partir de un método de adquisición de datos continuo. Cuando equipos de este tipo no se encuentran disponibles, estas pruebas se pueden realizar con dinamómetro. La prueba debe realizarse a tensión nominal usando una fuente regulada de potencia.

4.7.6.3. Corriente de rotor bloqueado

La corriente de rotor bloqueado se debe obtener a frecuencia nominal, y la tensión medida no debe variar en más del 5% de la tensión nominal [8]. Las medidas de la corriente de rotor bloqueado se deben corregir para cualquier salida de la tensión nominal, esto se hace multiplicando la corriente por la tensión nominal y dividiendo el producto en la tensión medida.

Todas las lecturas se deben tomar tan rápido como sea posible después de aplicar la tensión. El periodo de tiempo transcurrido entre la aplicación de la tensión y la toma de las lecturas no debe exceder los 5 segundos.

La temperatura del motor al iniciar la prueba debe estar dentro del intervalo de 10 a 40 °C, a menos que el fabricante indique otra cosa. La temperatura del motor nunca debe exceder el incremento de temperatura nominal mas 40°C.

4.7.6.4. Torque de rotor bloqueado

El torque del motor depende de la posición angular del rotor con respecto al estator. El torque de rotor bloqueado es el mínimo torque desarrollado en reposo para cualquier posición angular del rotor. La mejor forma de determinar este valor es construyendo una curva de torque contra posición angular del rotor. La temperatura del motor al iniciar la prueba debe estar dentro del intervalo de 10 a 40 °C, a menos que el fabricante indique otra cosa. La temperatura del motor nunca debe exceder el incremento de temperatura nominal mas 40°C.

4.7.6.5. *Pull-up torque*

Este tipo de torque en un motor de corriente alterna corresponde al mínimo valor del torque externo que el motor desarrolla durante un periodo de aceleración desde reposo hasta la velocidad a la que se presenta el torque de *breakdown*. Este tipo de torque se debe determinar con el motor operando lo más cerca posible de la temperatura normal de operación. Los métodos usados para medirlo son entre otros un adquirente continuo de datos, un freno o un dinamómetro.

4.7.6.6. *Switching torque*

Este tipo de torque se presenta en motores con cambio automático de conexión en el periodo de arranque. Se define como el mínimo torque externo desarrollado por el motor cuando se acelera hasta la velocidad de operación del interruptor.

Para determinar este torque se puede emplear alguno de los siguientes procedimientos:

- El motor se opera a velocidad nominal en vacío, posteriormente el torque de la carga se incrementa gradualmente hasta que la velocidad cae abruptamente y el interruptor empieza a cerrarse. Con este valor del torque, la velocidad del motor puede caer hasta cero o la velocidad cambiara cíclicamente entre sus valores máximo y mínimo. En cualquier caso, el torque de la carga se debe disminuir hasta que ocurra la

transferencia y el motor mantenga su conexión de operación.

- El motor se arranca con una carga de gran torque, luego la carga se disminuye hasta que el interruptor realiza la transferencia y el motor mantiene su conexión de operación.

4.7.6.7. Breakdown torque

La determinación de este torque se puede realizar mediante métodos de adquisición continua de datos o mediante mediciones directas. Si se utiliza el método de medición directa, la prueba se realiza arrancando el motor con un valor bajo de carga, posteriormente, el valor de la carga se incrementa gradualmente hasta que la velocidad del motor cae abruptamente. Esta prueba debe realizarse en el menor tiempo posible, dependiendo de la exactitud, pero no tan rápido como para que se introduzcan errores en las lecturas causados por la inercia.

5. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

5.1. Máquina síncrona.

5.1.1. Principios de funcionamiento y fundamentos teóricos.

El circuito magnético de una máquina síncrona consta de una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Sobre tales estructuras se encuentran los circuitos eléctricos, estando el devanado del inducido alojado en las ranuras del estator, mientras que el circuito inductor se encuentra sobre el rotor

La máquina síncrona recibe este nombre debido a que funciona a la velocidad de sincronismo, la cual, viene definida por la frecuencia de las corrientes en el estator y por el número de polos de la máquina.

$$n_1 = \frac{60 * f_1}{P} \quad (5-1)$$

Debido a las formas constructivas del sistema de excitación, las máquinas síncronas se clasifican en máquinas de rotor de polos salientes y máquinas de rotor cilíndrico, la utilización de alguno de ellos depende de las velocidades de operación. Generalmente, las máquinas con un número pequeño de polos (alta velocidad) suelen ser de rotor cilíndrico, por el contrario las máquinas con muchos polos (bajas velocidades) son de rotor de polos salientes. Existen dos procedimientos para alimentar el circuito de excitación:

- 1.) Mediante escobillas
- 2.) Mediante un sistema de suministro de c.c. a partir de la generación de la potencia necesaria en una fuente montada sobre el mismo eje de la máquina.

Cuando la máquina síncrona funciona como generador, el devanado del rotor es alimentado con una tensión continua, permitiendo la creación de un campo magnético dentro de la máquina de características senoidales. Si se aplica un par de giro al rotor, este se desplazará con una velocidad angular ω_1 , haciendo que el flujo es concatenado con el circuito inducido, a una función periódica que dependa de su posición respecto al eje del inductor. De la forma:

$$\phi = N\phi_0 \cos(\omega_1 t) \quad (5-2)$$

Esta variación induce una f.e.m igual a

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -N\phi_0 \text{sen}(\omega_1 t) = -E_0 \text{sen}(\omega_1 t) \quad (5-3)$$

Si existen 3 bobinas desplazadas $\frac{2}{3}\pi$ se obtiene un sistema de Tensiones trifásico de valor:

$$e_1(t) = -E_0 \text{sen}(\omega_1 t) \quad (5-4)$$

$$e_2(t) = -E_0 \text{sen}\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5-6)$$

$$e_3(t) = -E_0 \text{sen}\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (5-7)$$

Donde la tensión inducida en cada una de las fases expresada en valor eficaz sería:

$$E = 4.44 \zeta f_1 N \phi_0 \quad (5-8)$$

Si el circuito inducido es cerrado a través de una carga trifásica, circularán unas corrientes que dan lugar a un campo que gira en la misma dirección y con la misma velocidad del rotor, dada por la ecuación (5-1)

La presencia de los campos del sistema inductor e inducido originan un par, este par, si la máquina funciona como generador, será de sentido contrario al desplazamiento del rotor, actuando entonces, como par resistente.

Si la máquina trabaja como motor, se alimentan los circuitos inductor e inducido. El inducido es alimentado a través de un sistema trifásico de corrientes, las cuales dan origen a un campo magnético giratorio de velocidad, n_1 así:

$$n_1 = \frac{60 * f_1}{P} \quad (5-9)$$

Si el rotor se encuentra en reposo, a pesar de que se encuentre alimentado con una corriente continua, el par es nulo. El campo del rotor se encuentra fijo en el espacio mientras que el del estator gira a velocidad de sincronismo. El par que resulta entre ambos campos, cambiará alternativamente de sentido siendo nulo en un periodo. Esta dificultad en el arranque puede ser resuelta usando una máquina auxiliar, con la que se lanza el rotor a una velocidad próxima a la velocidad del campo del estator. Tal situación permitiría un par resultante no nulo, funcionando de esta manera la máquina como motor

5.1.2. Funcionamiento de la máquina síncrona en vacío.

La máquina funciona en vacío cuando no hay carga alguna acoplada al circuito inducido. La f.e.m, inducida es:

$$E = 4.44 \zeta f_1 N \phi_0 = K \phi_0 \omega \quad (5-10)$$

Para una velocidad constante, el valor de la f.e.m. es función del flujo y por tanto de la corriente de excitación.

$$E_0 = f(I_{ex}) \quad (5-11)$$

5.1.3. Funcionamiento bajo carga.

Si circula corriente por los devanados del circuito de inducido de la máquina se dice que la máquina trabaja bajo carga. En este caso, la tensión en los terminales de la máquina es diferente de la f.e.m inducida como consecuencia de una serie de fenómenos a tener en cuenta.

Al igual que en la máquina c.c, cuando circula una corriente por el devanado inducido aparece el efecto desmagnetizante de la reacción de armadura. En una máquina síncrona este fenómeno es más complejo ya que su valor y posición dependen de las características de la carga.

La resistencia de los devanados y la dispersión de flujo originan una caída de tensión que afectará la relación de Tensiones en la máquina. De la misma manera la dispersión del flujo genera en los devanados del inducido una f.e.m. de autoinducción de acuerdo con $X_\sigma * I$, siendo X_σ la reactancia total de dispersión. Esta f.e.m. de reactancia, en forma compleja se puede expresar como:

$$E_\sigma = -jX_\sigma * I \quad (5-12)$$

5.1.4. Ecuaciones generales y circuito equivalente

Conocida la relación de flujos en una máquina síncrona y con la finalidad de establecer un modelo, es necesario conocer la relación entre las magnitudes que intervienen en su funcionamiento.

Cuando la máquina funciona en vacío, el único flujo que está presente es el de excitación, en el que la variación temporal es de forma sinusoidal, dando origen a una f.e.m generada en el devanado inducido.

En su funcionamiento es necesario considerar los siguientes aspectos:

Además del flujo de excitación, la circulación de corriente por el circuito inducido, genera un flujo de reacción cuya posición espacial depende de las características de la carga acoplada a la salida de la máquina, dando como resultado un flujo total:

$$\phi_T = \phi_{ex} + \phi_r \quad (5-13)$$

La tensión de salida, por lo general, no será igual a la f.e.m generada, por lo tanto se debe considerar, además de las caídas de tensión óhmica e inductiva en el devanado inducido, la influencia en la relación de Tensiones que produce el flujo de reacción.

Llamando E a la f.e.m. generada en carga y cuyo valor es función de la variación temporal de ϕ_T , se cumplirá:

$$E = V + R \cdot I + jX_\sigma \cdot I \quad (5-14)$$

Donde

E Es la tensión interna generada por la máquina.

V Es la tensión en bornes de la máquina.

I Es la corriente de armadura.

X_σ Es la reactancia síncrona.

Dando como resultado el siguiente circuito equivalente:

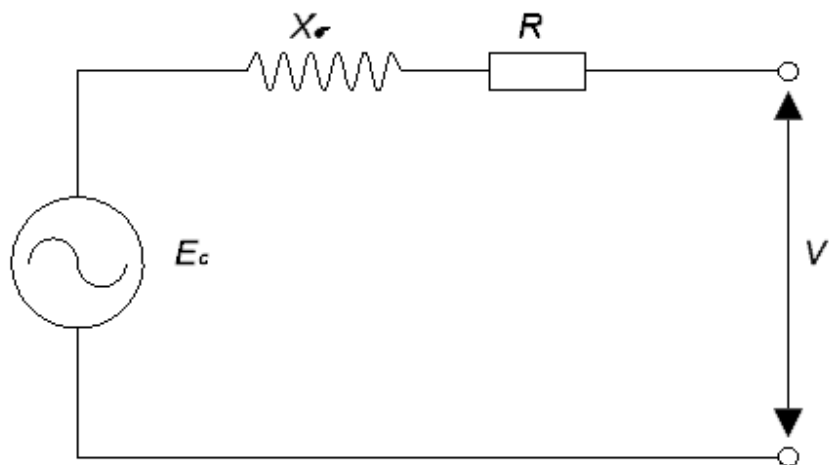


Figura. 37 circuito equivalente de una máquina síncrona.

Su representación fasorial, asumiendo una carga de tipo inductivo, se muestra a continuación

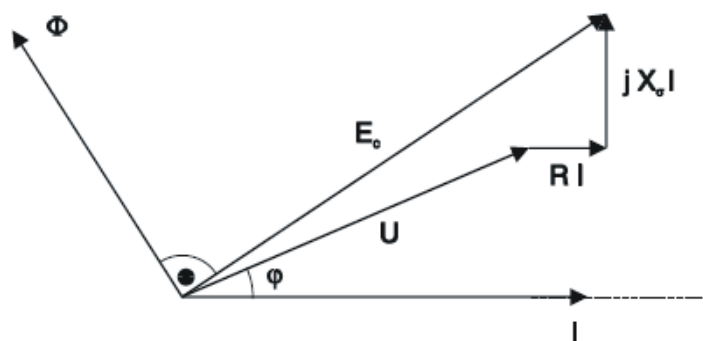


Figura. 38 Representación fasorial de una máquina síncrona con carga inductiva.

Después de estas consideraciones, se puede representar el diagrama de Tensiones, f.e.m y flujos completo.

De la ecuación de Tensiones se obtiene el vector V por diferencia entre E y la suma de la caída de tensión óhmica y la originada por el flujo disperso.

$$V = E - (R + jX_s) * I \quad (5-15)$$

De la relación entre las f.e.m.s se puede obtener la posición del vector F_{ex} y a partir de esta, es posible ubicar el flujo ϕ_0

$$F_{ex} = F_T + (-F_r) \quad (5-16)$$

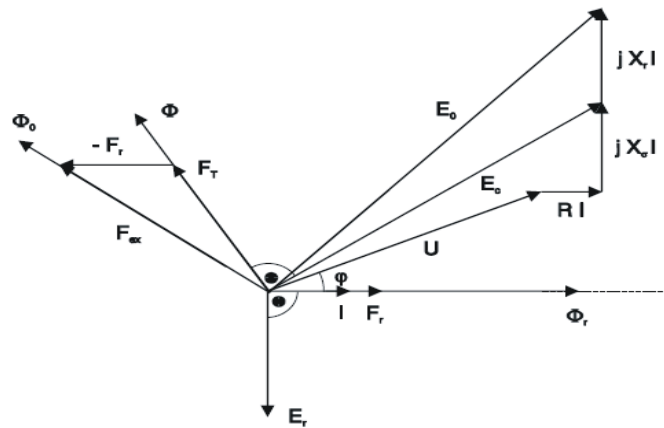


Figura. 39. Diagrama fasorial de una máquina síncrona.

Considerando separadamente cada uno de estos flujos giratorios, las f.e.m inducidas en el devanado del estator debidas a cada una de ellas estarán desfasadas 90 grados en atraso.

Siendo E la f.e.m debida al flujo ϕ_0 y E_r inducida por el flujo de reacción ϕ_r . Se obtiene que:

$$E = E_c + (-E_r) \quad (5-17)$$

Donde:

$$E_r = -jX_r I \quad (5-18)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior

$$E = E_c + jX_r I \quad (5-19)$$

Con base en estas consideraciones el efecto de reacción de inducido puede asimilarse a una reactancia X_r en serie con un generador de f.e.m E .

En síntesis,

$$E = V + I * (R + j(X_\sigma + X_r)) \quad (5-20)$$

Reuniendo en una sola reactancia, los efectos de reacción de inducido y la dispersión, se tiene la reactancia síncrona de la forma:

$$X_s = X_r + X_\sigma \quad (5-21)$$

Y el circuito equivalente reducido de una máquina síncrona será de la siguiente forma.

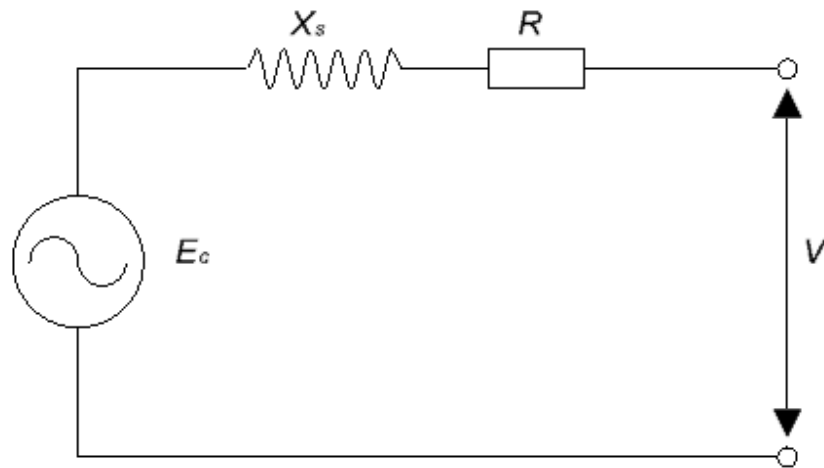


Figura. 40 Circuito equivalente de una máquina síncrona.

Debido a la gran importancia que tiene una máquina síncrona dentro de un sistema de potencia, es necesario realizar ensayos para determinar el estado de funcionamiento y así justificar esquemas de mantenimiento preventivo o correctivo

A continuación se enuncian los procedimientos que de manera general permiten determinar el rendimiento de la máquina. Los ensayos que se describen a continuación se aplican a generadores y motores síncronos, condensadores síncronos y cambiadores de frecuencia.

5.2. PRUEBAS MIXTAS

5.2.1. Resistencia de aislamiento

Los métodos recomendados por el estándar IEEE Std 43-1974 son:

Método I. Medición directa:

Este método se realiza midiendo directamente la resistencia de aislamiento utilizando un megohmmetro⁵¹.

Método II. Estimación de la resistencia de aislamiento mediante cálculos.

Este ensayo se basa en lecturas realizadas con un voltímetro y un miliamperímetro, usando una fuente de tensión DC

5.2.1.1. Pruebas dieléctricas.

La frecuencia, magnitud, forma de onda y duración de la prueba están dados en ANSI C50-10-1977 NEMA/ANSI MGI-1978

⁵¹ El estándar IEEE Std 43-1974 recomienda varias referencias de megohmmetro

La prueba de alta tensión será aplicada en cada circuito eléctrico (incluyendo cada fase de los devanados polifásicos si estos no están internamente conectados) con todos los demás circuitos y partes eléctricas puestas a tierra.

- **Preparación**

Durante la prueba de los devanados de campo para grandes máquinas, las escobillas deben ser levantadas y aisladas eléctricamente de los anillos del colector, de modo que no se impongan grandes esfuerzos de tensión en los devanados del campo.

A continuación se hacen algunas recomendaciones para la realización del ensayo:

- La prueba del sistema de escobillas de la máquina se puede realizar al mismo tiempo en el hacen las pruebas en el campo.
- Los terminales de excitación deben ser desconectados a menos que se quiera probar simultáneamente con el excitador,
- Los terminales permanentes de la instrumentación deben ser desconectados, estos pueden ser probados separadamente si se así se quiere.

En la realización de la prueba los devanados de campo de las máquinas que no tienen escobillas, los terminales de la excitación DC deben ser completamente desconectados del excitador, a menos que se tenga previsto realizar las pruebas con el excitador y sus componentes asociadas. En cualquier caso, los componentes del circuito sin escobillas (diodos, tiristores, etc.) deben ser cortocircuitados durante la prueba.

Método I. Prueba de voltaje alterno en la frecuencia de la potencia⁵²

⁵² La información completa de este método se encuentra en IEEE Std 4-1995 y IEEE Std 95-1977

Un voltaje alterno de la frecuencia de la potencia es aplicado al devanado que esta bajo prueba. Se recomiendan los siguientes métodos para la medición del voltaje alterno:

- a) El transformador voltímetro
- b) Métodos de las esferas

El método del transformador-voltímetro se basa en el uso de transformadores de potencial de instrumentación, de los cuales se conoce la relación de transformación

El método de las esferas se basa en la calibración de la abertura del aire como dieléctrico entre esferas de tamaños y espaciamientos determinados. Se deben tomar precauciones contra la aparición de oscilaciones de sobre voltaje debidas a las descargas, este es un método frecuentemente usado solamente para la protección contra voltaje.

Durante la aplicación, el voltaje de la prueba debe ser incrementado lentamente y mantenido durante el periodo de la prueba (normalmente un minuto).

Método 2. Prueba de voltaje directo en los devanados del estator

La magnitud de la tensión aplicada durante este ensayo es igual a 1.7 veces el valor rms. de la tensión de prueba del método anterior

Luego de aplicar la tensión de prueba, el devanado bajo prueba se debe poner directamente a tierra. El valor nominal de aislamiento del devanado y el nivel de tensión del voltaje aplicado determinan el periodo de tiempo requerido para disipar la energía. En muchos casos este proceso puede durar horas pero es necesario para proteger al personal que esta manipulando la máquina.

Método 3. Prueba de baja frecuencia en los devanados del estator

Para este método se aplica una tensión a muy baja frecuencia, en el devanado que se quiere someter a la prueba, (la frecuencia esta en un rango de 0.1 Hz) con una cresta igual a 1.63 veces el valor rms del valor especificado en el método 1 del numeral 5.2.1.1.1.este método de prueba tiene gran ventaja en máquinas grandes con alta capacitancia de los devanados, donde la aplicación de este método reduce el equipo requerido para la prueba⁵³.

5.2.2. Mediciones de resistencia

Para la obtención de mediciones de resistencia de corriente directa de los devanados de armadura y de campo, se deben usar los procedimientos dados en IEEE Std 118-1978. Los siguientes ítems ofrecen consideraciones importantes en la medición de la resistencia de los devanados. Si las terminales del campo de la máquina son inaccesibles, entonces se debe proveer equipo y métodos especiales para realizar la medición, además se debe consultar al fabricante de la máquina.

5.2.2.1. Corrección de las mediciones a una temperatura específica.

Cuando la resistencia R_t de un devanado ha sido determinada mediante un ensayo en el que la temperatura es t_t , el valor de la resistencia debe ser corregido a un valor de temperatura t_s mediante la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t \left(\frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \quad \Omega \quad (5-21)$$

Donde

⁵³ Este procedimiento de prueba se especifica en el artículo IEEE Std 4333-1974.

- R_s Es la resistencia del devanado, corregida a una temperatura, t_s . (Ohm)
- t_s Es la temperatura especificada, $^{\circ}C$
- R_p Es el valor de resistencia del devanado, medido durante la prueba (Ohm)
- t_p Es la magnitud de la temperatura cuando se realizo la medición de la resistencia R_p , $^{\circ}C$
- k Es una constante característica del material con el que esta fabricado el devanado⁵⁴

5.2.2.2. Resistencia de referencia del devanado de campo

Para la determinación de la temperatura del devanado de campo, se requiere de un valor de resistencia del cual partir, este valor se denomina resistencia de referencia, el cual es determinado cuando el rotor, después de haber estado en funcionamiento alcanza la temperatura ambiente.

Cuando se va a medir la resistencia del campo mediante una caída de potencial, se usara un valor relativamente bajo de corriente para que así las pérdidas i^2R no causen un cambio significativo en la temperatura durante el tiempo de aplicación de la prueba.

5.2.2.3. Resistencia de referencia de campo con la máquina en funcionamiento.

Aunque el valor de resistencia de referencia mencionado en la sección anterior es más fácil de calcular debido a que la máquina no esta en movimiento, se recomienda estimar el mismo valor cuando la máquina esta en funcionamiento y preferiblemente a velocidad nominal. El valor de la resistencia de referencia con la

⁵⁴ $k=234.5 [^{\circ}C]$ para cobre puro y $k=225 [^{\circ}C]$ para aluminio compuesto de un 62% de cobre

máquina energizada se realiza aplicando en el rotor una corriente de baja magnitud, tan pronto como este valor se estabilice se debe medir la caída de tensión en los anillos del colector⁵⁵

5.2.2.4. Efecto de caída de tensión en las escobillas

Debido a que la caída de tensión en las escobillas suele ser un valor relativamente insignificante, el no tenerlo en cuenta acarrea errores de precisión en los resultados obtenidos.

Para determinar la resistencia de una máquina en funcionamiento de manera precisa, es necesario obtener la tensión a través del devanado de campo sin incluir la caída de tensión que se presenta en las escobillas que energizan el devanado. Este efecto es de gran importancia cuando la corriente de campo es muy pequeña, como cuando se está determinando el valor de resistencia. Por esta razón es deseable medir la caída de tensión directamente sobre los anillos del colector usando escobillas especiales en contacto con los anillos del colector durante la medición de la tensión, a continuación se describen estos tipos de escobillas:

- Escobillas especiales de cobre o bronce soportadas directamente en los anillos del colector.
- Escobillas aisladas que no han desarrollado una superficie esmaltada.
- Escobillas especiales de carbón o grafito compuestas con materiales altamente conductores para reducir la resistencia.

⁵⁵ La caída de tensión en las escobillas se discute en la sección 5.2.2.5

Cuando no se disponen de las escobillas mencionadas anteriormente, la medición de tensión en los terminales del colector debe incluir necesariamente la caída en las escobillas. Una forma de reducir su efecto en la medición es incrementando el flujo de corriente, esto se puede lograr reduciendo el número o la sección transversal de las escobillas usadas durante el ensayo

Cuando se dispone de información acerca de la caída de tensión en las escobillas, se pueden obtener resultados más exactos si se sustrae la tensión en las escobillas de la tensión total que fue medida antes de calcular la resistencia.

5.2.3. Ensayos para cortocircuito en las espiras del campo

Con estas pruebas se busca detectar bobinas que tienen espiras en cortocircuito, un incorrecto número de espiras o incorrecto tamaño del conductor.

No todas las espiras de campo cortocircuitadas son evidentes cuando la máquina está detenida, es por esto que también se requiere una prueba a velocidad nominal.

Método 1. Caída de tensión, corriente directa

Este método es usado para detectar espiras en cortocircuito solamente cuando las conexiones entre bobinas están accesibles para la instalación de los elementos de medida.

El ensayo se realiza con el rotor detenido y haciendo circular corriente directa a través de todo el devanado de campo. La caída de tensión en cada espira o par de espiras es determinado por un voltímetro, si esas lecturas varían en un valor mayor al $\pm 2\%$ del valor promedio, es una indicación de que la bobina puede tener una o más espiras en cortocircuito o también puede indicar que parte del

devanado esta arrollado con un numero equivocado de espiras o tamaño del conductor.

Método 2. Caída de tensión, corriente alterna

Una prueba más sensible para espiras en cortocircuito es realizada haciendo circular corriente alterna de amplitud constante a través de todo el devanado de campo.

Si se tiene acceso a las conexiones entre bobinas, con el rotor detenido se debe medir la tensión a través de cada bobina o par de bobinas. La tensión que esta soportando una bobina que esta en cortocircuito será notoriamente menor que la de una bobina en buen funcionamiento.

La tensión a través de una bobina en buen funcionamiento adyacente a una bobina que tiene una espira en cortocircuito será menor que le tensión medida en otras bobinas en buen estado; esto se debe a la reducción del flujo magnético en la espira cortocircuitada.

Si las conexiones entre espiras no son accesibles, se debe medir la corriente y caída de tensión (a través de todo el devanado). La impedancia de un solo devanado en el cual una bobina tiene una espira cortocircuitada se reducirá en aproximadamente $(m-1)/m$ veces el valor de tensión a través de un devanado en buen estado, donde m es el numero de espiras en el devanado. Este ensayo es útil para detectar una máquina que tiene una espira cortocircuitada solamente cuando la máquina esta es movimiento. Si la velocidad varía cuando la corriente esta siendo aplicado, una discontinuidad en las lecturas de corriente o tensión indicara que hay un cambio debido a un cortocircuito, ya sea por la conexión o desconexión de este.

Los siguientes métodos (3, 4 y 5) son utilizados con mayor frecuencia para máquinas de rotor cilíndrico.

Método 3. Resistencia de corriente directa

En este método se realiza una comparación entre la resistencia del campo y un valor previamente obtenido mediante un ensayo o un cálculo.

Después de que el rotor ha sido expuesto a la temperatura ambiente por un periodo lo suficientemente largo para que el devanado del rotor alcance esta temperatura. La resistencia de campo será medida tomando valores de tensión y corriente aplicados, la temperatura del rotor se estimara por varios termómetros o termocuplas ubicadas en puntos convenientes para tal fin. La resistencia es entonces corregida a la misma temperatura ambiente medida anteriormente, Si el valor corregido de la resistencia es significativamente más alto que la magnitud de referencia, existe una gran probabilidad de que se encuentren espiras en cortocircuito.

Método 4. Bobinas excitadas para rotores cilíndricos

Este método usa un dispositivo de ensayo que tiene una bobina de excitación dispuesta en un núcleo en forma de U capaz excitar una ranura de bobina de un rotor cilíndrico. Para la realización del ensayo, el dispositivo se sitúa a través de cada ranura de campo y haciendo circular corriente alterna en la excitación del dispositivo. Luego se mide la tensión en cada bobina del rotor.

Si el dispositivo excita una bobina en la cual la tensión difiere de las medicaciones realizadas en las otras bobinas del rotor, será una indicación de que en ese devanado se encuentran espiras en cortocircuito

Método 5. Detección de forma de onda del rotor para rotores cilíndricos

Este método utiliza un transductor o bobina de arranque conectada a un osciloscopio para determinar la forma de onda del campo magnético.

Para la medición de la forma de onda, el rotor debe estar girando a determinada velocidad, entonces la bobina de arranque se inducirá una tensión que será registrada por el osciloscopio. La existencia de espiras en cortocircuito se determinará a partir de la gráfica obtenida, analizando la aparición de discontinuidades o asimetrías⁵⁶.

5.2.4. Ensayos de polaridad para los polos de campo

La polaridad de los polos del campo puede ser revisada utilizando un imán permanente colocado de tal forma que pueda girar fácilmente cambiando su dirección. Para esta prueba, el devanado de campo se energiza con un valor de corriente que este entre el 5% y el 10% del valor nominal de corriente, el imán permanente indicará la polaridad mientras cambia de polo a polo. Es importante revisar que el imán mantenga su polaridad debido a que el flujo magnético puede modificar tal característica.

5.2.5. Corriente del eje y aislamiento de los rodamientos

Debido a las variaciones que se presentan en el circuito magnético, cierta cantidad de flujo magnético enlaza al eje de la máquina, induciendo tensiones en el mismo que ocasionan la circulación de corrientes. Estas corrientes afectan los rodamientos, rodamientos de soporte y el armazón de la máquina.

Para los métodos del 1 al 4 señalados a continuación la máquina debe rotar a velocidad nominal y ser excitada a tensión nominal de circuito abierto de armadura.

⁵⁶ Para mayor información ver IEEE Std 67-1990

Método 1.

El método más sencillo consiste en realizar una medición de la tensión en el final del eje de la máquina utilizando un voltímetro de alta impedancia.

Método 2. A través de la capa de aceite de los rodamientos, rodamientos sin aislamiento

Cuando se utiliza este método, se deben conocer las características de la capa de aceite de los rodamientos para saber si pueden soportar la tensión que se presenta en el eje. La presencia de la corriente inducida en el eje, puede ser determinada cuando la máquina esta a velocidad y tensión nominal. Se debe conectar un conductor de baja resistencia desde el eje hasta el núcleo de un rodamiento y un voltímetro de AC con terminales de baja resistencia desde el eje hasta el núcleo de otro rodamiento. Si el voltímetro indica que hay una diferencia de tensión entre el eje y los rodamientos será por que en el eje existe una corriente circulante, por el contrario, si el voltímetro indica que la tensión entre el eje y el rodamiento es cero, con lo que se concluye que el aislador no esta en buen estado o que no es el mejor para los niveles que requiere la máquina.

Método 3. A través del aislamiento de los rodamientos.

Gran cantidad de máquinas tienen uno o más rodamientos aislados para eliminar las corrientes en el eje. Para este método al igual que los descritos el método 4 y 5, se supondrá que el aislamiento se encuentra localizado entre el rodamiento y el núcleo de la máquina. Con el fin de determinar la presencia de Tensiones en el eje se conectará un conductor de baja resistencia desde el eje hasta el rodamiento sin aislar, (esto para cortocircuitar la capa de aceite). Por último se instalara un voltímetro de bajo rango (o un amperímetro de alta escala) entre el eje u el núcleo

sucesivamente en cada rodamiento aislado. La deflexión de los instrumentos de medición indicará la presencia de una tensión en el eje que producirá corrientes en el mismo si se cuenta con rodamientos aislados.

Método 4. Aislamiento del rodamiento

El aislamiento puede ser probado conectando un voltímetro o amperímetro de corriente alterna a través del aislamiento. Un conductor de baja resistencia será conectado desde el eje a cada rodamiento para cortocircuitar la capa de aceite. La deflexión de los instrumentos de medida indicará que el aislamiento es efectivo. Si no se presenta una deflexión de los instrumentos, se podrá afirmar que el aislamiento no es efectivo o también puede indicar que no existen Tensiones en el eje.

Método 5. Doble aislamiento.

Una capa de papel pesado es puesta alrededor del eje para aislarlo de los rodamientos que están en cortocircuito con él. Entonces una fuente de tensión será conectada en serie con una lámpara de filamento o con un voltímetro. Una terminal del circuito descrito anteriormente se conectara en el rodamiento aislado y la otra terminal en el eje (a través del aislamiento). Si la lámpara no enciende o si la lectura de del voltímetro es muy pequeña, se puede concluir que el aislamiento es satisfactorio.

5.2.6. SECUENCIA DE FASE

Las pruebas de secuencia de fase son realizadas para examinar la concordancia entre la marcación de las terminales y la rotación de las fases. Los resultados son usados para conectar correctamente las terminales de línea a las de armadura de la máquina y con ello obtener una adecuada secuencia de fase en el caso de la

máquina trabajando como generador, o una correcta dirección de rotación para el caso de un motor.

Método 1. Indicadores de secuencia de fase

La secuencia de fase es determinada cuando la máquina esta trabajando como generador en la dirección de rotación para la cual fue diseñada. Para verificar tal condición se conecta en las terminales de armadura un indicador de secuencia de fase o un motor de inducción, del cual se conoce la dirección de rotación para determinada conexión en sus terminales.

La figura 41 muestra un diagrama de un indicador de secuencia de fase, el cual consiste en unos devanados alrededor de un núcleo de hierro, en el centro del núcleo se encuentra una barra de acero. Las terminales de la máquina bajo prueba, ya sea monofásica o trifásica, se conectarán en los correspondientes terminales del indicador.

El dispositivo de la figura operará en el sentido de las agujas del reloj si la secuencia de fase es 1, 2, 3 y en sentido contrario si la secuencia es 1, 3, 2.

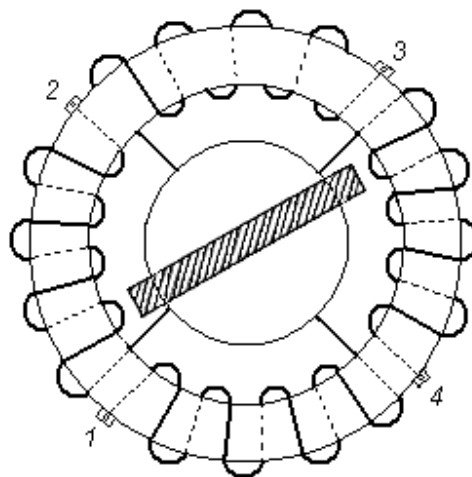


Figura. 41 Dispositivo indicador de secuencia de fase

Existen dispositivos indicadores de secuencia que no tienen partes en movimiento, estos mecanismos son disponibles para sistemas trifásicos. El indicador usa un condensador y dos lámparas de neón conectadas en Y a través de las terminales de la máquina que bajo prueba. En la figura 2 se muestra este dispositivo, para el cual una secuencia de fase 1, 2, 3 hace que la lámpara conectada a la terminal 1 encienda, para secuencia de fase 1, 3, 2 la lámpara conectada a la terminal 3 debe encender.

Para revisar el funcionamiento del dispositivo indicador de fase, basta con cerrar el interruptor que se muestra en la figura, si las dos lámparas encienden con igual intensidad, indica un buen funcionamiento del mecanismo.

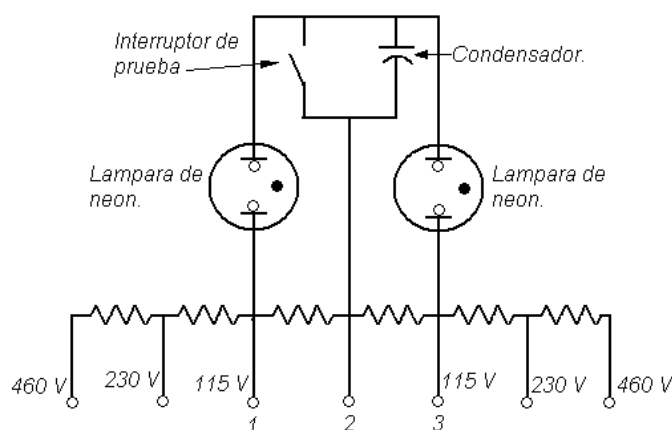


Figura. 42 Dispositivo indicador de secuencia de fase

5.2.6.1. Método 2. Indicación de la diferencia de tensión

Este método muestra cómo realizar una comparación entre la secuencia actual de la máquina y la secuencia que tiene el sistema al cual se conectará la máquina.

El ensayo para generadores síncronos consta de cuatro transformadores de potencia conectados como se muestra en la figura 43. La máquina debe estar girando a velocidad sincrónica o muy cerca y se debe estar excitada a tensión nominal.

El montaje mostrado hace que cuando la secuencia del sistema si y solo si las luces permanecen encendidas al mismo tiempo, si las luces se encienden una tras de otra será por que la secuencia del generador es contraria a la del sistema.

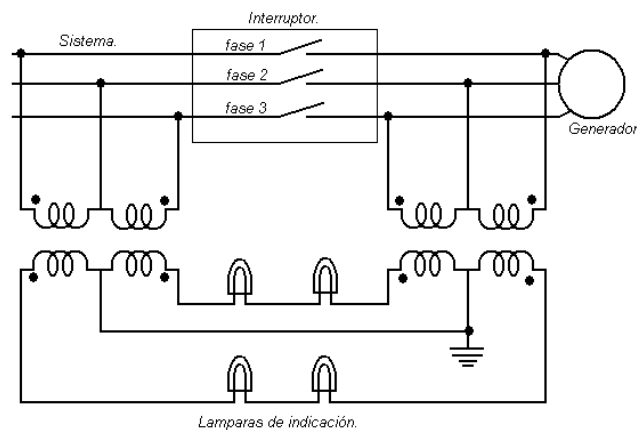


Figura. 43 Indicador por diferencia de tensión

5.2.6.2. Método 3. Dirección de rotación para motores

En el caso de un motor la secuencia de fase puede ser revisada haciendo rotar la máquina con una fuente normal de tensión y observando el sentido de rotación. Si la dirección de la rotación para el que fue diseñada la máquina puede causar algún daño sobre esta, se debe verificar la secuencia de fase de la red

5.2.7. VOLTAJE EN TERMINALES DEL ESTATOR, DESVIACION DE FORMA DE ONDA Y FACTORES DE DISTORSIÓN

5.2.7.1. Procedimientos de prueba.

La forma de onda de la tensión de prueba será registrada en un osciloscopio que permita dividir medio ciclo de onda⁵⁷ en partes iguales. El estándar IEEE Std 115-1995, establece que para un análisis adecuado la amplitud máxima de la forma de onda desde el nivel de referencia cero en el osciloscopio debe ser de 3.2 cm, y la distancia para medio ciclo por lo menos debe ser de 4 cm. La figura 44 muestra la una forma de onda para ser analizada en coordenadas rectangulares, también se traza una onda senoidal para localizar el valor máximo de la desviación de onda con respecto a la señal ideal. La amplitud de una onda seno equivalente puede ser determinada como se describe a continuación:

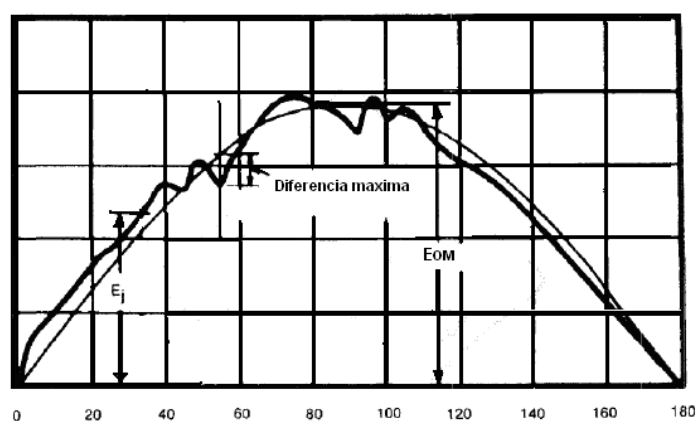


Figura. 44. Forma de onda real y equivalente, de tensión en la salida en un generador síncrono

Para obtener la amplitud de la onda seno equivalente, el intervalo de tiempo de medio ciclo de la onda a ser analizada, se subdivide en J (mínimo 18) intervalos iguales, empezando en donde la señal medida cruce el eje de las abscisas. Si la tensión E_j es medida en cada uno de los J puntos de intersección con la onda registrada, el valor pico de la señal senoidal equivalente E_{OM} está dada por:

⁵⁷ Se utiliza medio ciclo si el semiciclo positivo es igual al negativo, de lo contrario se debe analizar el periodo completo.

$$E_{OM} = \sqrt{\frac{2}{J} \sum_{j=1}^J E_j^2} \quad (5-22)$$

Donde

E_j Es el valor instantáneo de la onda de tensión en el punto j .

La señal equivalente se debe graficar en papel transparente, en la misma escala del osciloscopio y sobrepuesta a la señal registrada: Este ajuste se debe realizar hasta que la desviación vertical entre las dos graficas sea lo menor posible (ver figura 44).

El método descrito anteriormente fue remplazado por sistemas digitales de adquisición de datos, en los que se aumenta la precisión, exactitud y velocidad.

5.2.7.2. Análisis de la forma de onda

El máximo valor de desviación entre la onda que se esta analizando y la onda equivalente de designa como ΔE . Entonces el factor de desviación esta dado por:

$$F_{DEV} = \frac{\Delta E}{E_{OM}} \quad (5-23)$$

Antes de realizar el análisis de la forma de onda, se debe eliminar la componente DC de la señal, esto se logra calculando los siguientes valores [1]:

$$E_0 = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad (5-24)$$

Donde

E_0 Es el valor DC de la forma de onda

N Es el número de muestras tomadas en un periodo

E_i Es la muestra i de la forma de onda

El valor DC de la forma de onda puede ser sustraído de la señal de entrada como se muestra a continuación:

$$E_j = E_i - E_0 \quad (5-25)$$

Para $j = 1, 2, \dots, N$

El valor rms de la señal de entrada esta dada por:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_j^2} \quad (5-26)$$

De esta forma el valor pico de la señal senoidal equivalente E_{OM} esta dado por

$$E_{OM} = \sqrt{2} E_{rms} \quad (5-27)$$

Para determinar el valor máximo de desviación, el cual fue designado como ΔE se debe sobreponer la señal equivalente a la señal real en donde el valor absoluto de la desviación vertical entre las dos ondas sea mínimo. Esta localización ocurre en el tiempo en cuando los valores de tensión son cero.

5.2.8. Pruebas de embalamiento

Las pruebas de sobre velocidad son realizadas principalmente para generadores síncronos conectados a turbinas o algún otro dispositivo mecánico que pueda presentar grandes variaciones de velocidad. Para realizar ensayos en una máquina sincrónica a una velocidad superior a la nominal es necesario consultar al fabricante.

5.2.8.1. Procedimiento

Antes de realizar esta prueba, la máquina debe ser sometida a un cuidadoso mantenimiento de todas las partes rotativas. El rotor debe tener un perfecto balance mecánico. La velocidad debe ser medida con un tacómetro eléctrico o algún otro dispositivo remoto para la estimación de la velocidad. El tacómetro debe ser calibrado con los mismos terminales usados en la lectura de la velocidad de la máquina a velocidad normal antes de iniciar el ensayo.

Cuando se inicie el ensayo, la máquina debe ser operada a velocidad nominal durante un tiempo lo suficientemente largo para tomar mediciones de estabilidad de la máquina y establecer si la máquina esta funcionando óptimamente. Posteriormente, la máquina empezara a ser acelerada lentamente hasta alcanzar la velocidad especificada. Para velocidades de hasta 115% de la velocidad nominal es aconsejable detener la aceleración durante algún tiempo para revisar el estado de la máquina y así poder seguir aumentando su velocidad.

Normalmente no es necesario excitar la máquina para realizar las pruebas de embalamiento, no obstante si la máquina esta siendo energizada se debe tener cuidado en que la tensión no supere 105% de su valor nominal.

Una vez aplicada la prueba la máquina, debe ser llevada a un valor menor o igual de la velocidad nominal.

Cabe mencionar que si la prueba es aplicada durante un periodo de tiempo prolongado, los rodamientos alcanzarán grandes temperaturas, lo cual ocasionará que la viscosidad del aceite sea mucho menor que lo normal, en este caso se recomienda [1]:

- Dejar que la máquina gire a velocidad nominar hasta que la temperatura retorne a su valor normal.

- Apagar la máquina rápida pero adecuadamente hasta que los rodamientos lleguen a su temperatura normal de operación.

Después de la prueba, la máquina debe ser inspeccionada cuidadosamente.

5.3. CURVAS DE SATURACIÓN, SEPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y EFICIENCIA.

5.3.1. Eficiencia.

La verdadera eficiencia de una máquina corresponde al cociente de las potencias de salida y de entrada bajo ciertas condiciones. En máquinas pequeñas se puede medir directamente. En máquinas de gran tamaño en donde la potencia mecánica no se puede medir exactamente, la eficiencia se determina tomando como base la separación de las pérdidas.

Los siguientes tipos de pérdidas son considerados en el análisis de eficiencia de una máquina síncrona:

- Fricción y pérdidas por rozamiento con el viento.
- Pérdidas en el hierro.
- Pérdidas por cargas parásitas
- Pérdidas I^2R en la armadura considerando la corriente de armadura para la carga especificada y la resistencia DC corregida para la temperatura considerada.
- Pérdidas I^2R en el campo, utilizando la corriente de campo y la resistencia de campo corregida para una temperatura específica.

5.3.2. Métodos para medir las pérdidas

Existen cuatro métodos para medir las pérdidas en una máquina síncrona, ellos son los siguientes:

- Método de arranque independiente
- Método de la potencia eléctrica de entrada.
- Método de retardo.

Para cada uno de los tres métodos se requiere simular las condiciones de carga, operando la máquina con los terminales de la armadura en cortocircuito y en circuito abierto. Para la prueba de calor transferido, la máquina puede operar con o sin las condiciones de carga simuladas para los otros métodos.

Si los terminales de la máquina están en circuito abierto, el total de pérdidas incluye las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento de todos los aparatos conectados mecánicamente y las pérdidas en el hierro corresponden a la tensión y a la frecuencia de la armadura. Si se encuentran en corto circuito el total de pérdidas incluye además las pérdidas en el cobre de la armadura y las pérdidas por cargas parásitas correspondientes a la corriente y a la frecuencia de la armadura.

5.3.3. Eliminación de la excitación de entrada

Si una conexión directa es usada para la excitación durante la prueba, la potencia de entrada se deduce a partir de la entrada total cuando se determinan las pérdidas por fricción, rozamiento con el viento, en el hierro y por cargas parásitas.

5.3.4. Efectos de la temperatura y de la presión

La temperatura de los rodamientos se debe mantener constante durante la prueba debido a su influencia en la viscosidad del aceite y por lo tanto a su efecto en las pérdidas por fricción. Por tal razón, la máquina debe operarse a velocidad nominal

hasta alcanzar una temperatura constante en los rodamientos antes de empezar con la medición de las pérdidas.

La temperatura del refrigerante, la presión barométrica, la humedad y la pureza del gas afectan la densidad del gas, y por lo tanto, las pérdidas por rozamiento con el viento.

Todos los efectos mencionados anteriormente deben considerarse para las condiciones de prueba establecidas en aquellas máquinas en las que la temperatura puede ser ajustada.

5.3.5. Máquinas acopladas

Se recomienda que la máquina esté desacoplada de otros aparatos antes de poder determinar las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento. En los casos en los que el desacople no sea posible, es necesario asignar un valor a las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento que incluya las pérdidas aportadas por las demás máquinas acopladas a la máquina bajo prueba. Esta asignación se debe hacer en proporción al mejor estimado disponible de los valores esperados para cada máquina.

5.3.6. recalentamiento en una turbina de vapor

En algunas ocasiones, las pérdidas en los generadores impulsados por turbinas de vapor se evalúan sin la presencia de vapor en las paletas de la turbina. Durante tales pruebas, se deben tomar medidas tendientes a evitar el recalentamiento severo en las partes de la turbina. Debido a la gran cantidad de factores involucrados y a las diferencias entre las máquinas, se debe consultar al fabricante de la turbina antes de hacer la prueba.

5.3.7. Arranque eléctrico

Cuando no es posible alcanzar la velocidad necesaria por métodos mecánicos, es necesario arrancar la máquina eléctricamente. Generalmente, los generadores son adecuados para arrancar a partir de una fuente de potencia de frecuencia y tensión nominales.

Si al aplica la tensión plena de arranque, se obtiene una corriente de arranque excesiva se recomienda se recomienda reducir la tensión de arranque, En máquinas de gran tamaño, es usualmente necesario, la utilización de una máquina adicional de tamaño adecuado, la cual es conectada únicamente en el momento en que se esta realizando la prueba, con tensión de prueba variable.

Muchos generadores no poseen devanados amortiguadores capaces de arrancar la máquina con la frecuencia y la aceleración necesarias para obtener la velocidad máxima. En este caso, se necesita de una máquina adicional de tamaño adecuado que pueda ser operada con velocidades variables, para arrancar la máquina bajo prueba

Para el encendido síncrono, las armaduras de la máquina que va a ser arrancada y la que servirá para tal fin, se conectan directamente entre si mientras se realiza el ensayo. Se debe disponer de fuentes de excitación para las dos máquinas (la sincrónica bajo prueba y la de arranque), aun así una sola fuente de excitación puede ser usada para alimentar ambos campos en serie.

La máquina, que va a ser impulsada, se excita con aproximadamente la corriente normal de campo para tensión en vacío y la máquina de arranque se excita con una corriente de campo de aproximadamente el 80% de corriente normal de tensión en vacío.

El primo motor de la máquina que esta siendo arrancada es entonces puesto en movimiento suavemente y las dos máquinas eléctricamente conectadas son llevadas a la velocidad deseada.

Algunas veces se usa un encendido de frecuencia reducida. La máquina que se quiere impulsar debe estar girando a una frecuencia no mayor que la nominal⁵⁸, se excita el mecanismo impulsor para producir la tensión y frecuencia recomendadas en las terminales de la máquina bajo prueba. El campo de la máquina que se esta sometiendo al ensayo es cortocircuitado a través de un resistor de arranque. Cuando la maquina que se esta impulsando este cerca del sincronismo y conectada con la maquina de arranque, se le debe aplicar aproximadamente un 80% de la tensión en vacío a la excitación y al impulsador se le excita con tensión nominal de vacío, Este procedimiento se lleva a cabo para sacar las máquinas de sincronismo y llevarlas a una velocidad deseada.

5.3.7.1. Método de arranque separado para las curvas de saturación y pérdidas

- **Motor de arranque**

La máquina bajo prueba es usualmente impulsada por un motor, a través de una correa o de engranajes. El motor puede ser:

- Shunt de corriente continua (preferiblemente tipo polos conmutables).
- De inducción.
- Síncrono.

Cuando el motor arrancador suministrando las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire de la maquina bajo prueba, su potencia de salida debe ser un valor entre el 15% y el 20% de su potencia nominal cuando se alimentan las pérdidas por fricción y rozamiento con el viento, pérdidas en el núcleo a tensión nominal, Adicionalmente la potencia de salida del arrancador no debe ser mayor de 125% del valor nominal cuando suministra las pérdidas en las pruebas de circuito

⁵⁸ Este valor debe ser recomendado por el fabricante de la máquina que esta siendo sometida a la prueba.

abierto o corto circuito. Estas especificaciones permiten que el motor de arranque trabaje en la región lineal de la curva de eficiencia.

Las pérdidas en vacío del motor de arranque deben ser conocidas con una muy alta precisión, además se debe contar con una curva de pérdidas versus entrada.

El motor de arranque debe ser capaz de acelerar la máquina bajo prueba hasta la velocidad nominal de la misma. Cuando se usa un motor de inducción para arrancar la máquina, se debe proveer una fuente de frecuencia debido a los cambios de pérdidas con carga en la máquina bajo prueba.

Las medidas que se realicen bajo la aplicación de este método, solo serán registradas cuando la velocidad se estabilice en el valor esperado por el personal que realiza la práctica.

- **Procedimiento**

El procedimiento usual para la prueba consiste en llevar la máquina a velocidad nominal, hasta que los rodamientos alcancen una temperatura constante y las pérdidas por fricción lleguen a un valor estable. Esta situación se puede alcanzar cuando la entrada de potencia al arrancador sea constante. La entrada al motor arrancador menos sus propias pérdidas da como resultado potencia consumida por la máquina que se está probando.

- ✓ **Arrancado con dinamómetro**

Si se quiere, se puede usar un dinamómetro como motor de arranque, para tal caso, se deben realizar mediciones de torque y velocidad, esto para determinar la potencia de entrada de la máquina bajo prueba. La potencia de entrada de la máquina a la cual se le está realizando el ensayo es obtenida de la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia en kilowatts} = \frac{n * T}{k} \quad (5-28)$$

Donde

- n Es la velocidad rotacional expresada en r / min
- T Es el torque medido
- k Es 9549 si T esta dado en N-m (Newton-metros)
- K Es 7043 si T esta dado en lb*ft (libras por pie)

- **Curva de saturación de circuito abierto**

La curva de saturación de circuito abierto es obtenida impulsando la máquina bajo prueba hasta alcanzar la velocidad nominal, y registrando la tensión en los terminales de la armadura, la corriente de campo y la frecuencia en las terminales o la velocidad del eje. Se hacen las siguientes recomendaciones [1] para la determinación de valores apropiados que permitan mayor precisión en la obtención de la característica de vacío de la máquina.

- a) Se deben tomar seis lecturas por debajo del 60% de la tensión nominal de la máquina (1 medida se debe realizar con excitación cero).
- b) Por lo menos 10 lecturas para una tensión en terminales de 60% a 110% y siempre con un incremento del 5%.
- c) Los últimos 2 datos de deben tomar sobre 110%, incluyendo una lectura en un punto aproximadamente al 120% de la corriente nominal de campo sin carga o al máximo valor recomendado por el fabricante.
- d) Se recomienda verificar el balance en las Tensiones de línea de la maquina, cuando esta alcance los valores nominales. Estas lecturas deben ser realizadas con el mismo voltímetro y para condiciones constantes de excitación y velocidad.

En máquinas de rotor cilíndrico se recomienda seguir las indicaciones del fabricante para determinar la máxima tensión o excitación a ser utilizada en la obtención de la curva de saturación en vacío.

Las lecturas para la característica de saturación deben ser tomadas incrementando la excitación. Si se es necesario volver a tomar un valor menor al actual, la corriente de campo debe ser reducida a cero para luego ser incrementada hasta el valor deseado. Este proceso se realiza para eliminar los efectos de histéresis en los resultados.

Se debe permitir que la máquina funcione durante el tiempo necesario en cada valor de tensión hasta que la velocidad se estabilice. Se debe determinar el tiempo mínimo que la maquina puede soportar valores mayores al 110% de los nominales⁵⁹

- **Línea del entrehierro**

La línea del entrehierro es obtenida de la curva de saturación de circuito abierto, trazando una recta desde la región lineal de dicha curva. Si esta parte de la grafica es no lineal, la línea del entrehierro es trazada como una línea recta con la máxima pendiente posible desde el origen y tangente a la curva de saturación.

- **Pérdidas en el núcleo y fricción con el aire**

Estas dos clases de pérdidas de potencia pueden ser determinadas de lecturas adicionales tomadas usando el mismo montaje de la prueba para la determinación de la curva de saturación. Para cada valor de tensión en los terminales de la maquina bajo prueba, se debe medir la potencia de entrada del motor impulsador. Si el dispositivo que se usa para acelerar la máquina bajo prueba es un motor DC, se deben tomar lecturas para la corriente de armadura, tensión (el producto de

⁵⁹ Esta información debe ser suministrada por el fabricante.

estos dos valores es la potencia de entrada) y corriente de campo. Si se usa un motor de corriente alterna como impulsador, la potencia de entrada puede ser medida directamente con un wattmetro. La potencia de entrada a la máquina bajo prueba se obtiene sustrayendo las pérdidas del dispositivo impulsador (este valor debe ser determinado con anterioridad) de la potencia de entrada al mismo.

La fricción y las pérdidas debido a la acción del aire dentro de la máquina son obtenidas como la potencia de entrada a la máquina bajo prueba, con tensión de excitación cero (ver sección 5.3.7.1)

La tensión en las terminales de la máquina debe ser revisada si aparece algún valor residual de tensión. El campo debe ser desmagnetizado aplicando la corriente del campo en diferentes direcciones.

- **Curva de saturación de cortocircuito**

La curva de saturación de cortocircuito es obtenida impulsando la máquina bajo prueba hasta velocidad nominal pero con la armadura cortocircuitada.

Para la obtención de la curva de cortocircuito, se debe excitar la máquina de tal forma que la corriente de la armadura alcance valores de: 125%⁶⁰, 100%⁶¹, 75%, 50% y 25% con respecto a la corriente nominal.

Es importante que las lecturas de corriente sean tomadas reduciendo el valor de excitación, comenzando con el valor que produce una corriente de armadura igual al máximo permitido [9].

- **Ensayos de cortocircuito y pérdidas parásitas**

⁶⁰ Se debe consultar si este valor de corriente puede causar daños en la máquina.

⁶¹ A corriente nominal se recomienda medir la corriente en cada una de las tres fases, para analizar el balance.

Las pérdidas parásitas pueden ser determinadas de lecturas adicionales en el mismo momento en el que se realizan las mediciones para el cálculo de la curva de saturación de cortocircuito⁶². Para cada valor de corriente de armadura se debe registrar la potencia de entrada⁶³. Las pérdidas del motor de arranque deben ser sustraídas de la potencia de entrada para así obtener la potencia consumida por la máquina bajo prueba. Para obtener las pérdidas de cortocircuito se sustraen las pérdidas por fricción y rozamiento⁶⁴ de la potencia consumida por la máquina.

Un factor importante a tener en cuenta durante el ensayo, es la temperatura de los devanados de armadura, para esto deben ser puestos termómetros en varios lugares al final del devanado. Para devanados de armadura con conductor refrigerado, la temperatura de dicho elemento debe ser determinada del promedio de las temperaturas del refrigerante en las entradas y salidas de las bobinas.

Las pérdidas de cortocircuito incluyen las pérdidas por corrientes parásitas y la potencia $i^2 R_a$ disipada en los devanados de la armadura, donde R_a es el valor de la resistencia DC de la resistencia de la armadura. Las pérdidas por corrientes parásitas son obtenidas restando la potencia $i^2 R_a$ calculadas de la medición de las corrientes de armadura durante la prueba, el valor de la resistencia CC debe ser corregida al valor promedio de la temperatura del devanado durante la prueba.

5.3.7.2. Método de la potencia eléctrica de entrada para la determinación de pérdidas y curvas de saturación

Para esta prueba la máquina se pone en funcionamiento como un motor síncrono sin carga, el cual es alimentado por una fuente de potencia que entrega tensión variable con una frecuencia igual a la nominal de la máquina bajo prueba. La

⁶² ver sección 5.3.7.1.6.

⁶³ como se describe en la sección 5.3.3

⁶⁴ sección 5.3.3

potencia de entrada es medida por wattmetros u otros medidores de potencia, bajo diferentes condiciones de tensión y corriente para así obtener las pérdidas.

Durante el ensayo la máquina bajo prueba es operada aproximadamente a factor de potencia uno por un ajuste de la mínima corriente de armadura.

- **transformadores de instrumentación**

Los transformadores de instrumentación usados durante la prueba deben tener un aislamiento adecuado para soportar la tensión máxima durante el ensayo. Se debe especificar el tamaño y longitud de los terminales secundarios y los valores de carga para propósitos de calibración.

- **Transformadores de corriente**

La corriente nominal del primario del transformador de corriente debe ser aproximadamente del 5% de la corriente nominal en vacío de la máquina bajo prueba.

- **Transformadores de potencial**

La tensión primaria nominal de los transformadores de potencial para las características de circuito abierto debe ser mayor que la corriente nominal de línea del estator de la máquina. Si no se puede garantizar esta característica, el transformador de potencial puede ser conectado a tensión de fase.

Se exige que el transformador de potencial tenga un estándar de precisión clase 0.3, el límite de corrección de la relación de transformación debe estar entre 0.997 y 1.003. Para las pruebas de cortocircuito y pérdidas parásitas, las relaciones de transformación deben ser las más bajas posibles.

- **Tensión en los instrumentos**

La tensión impuesta a los medidores de potencia no debe ser menor que el 70% del valor nominal de los mismos. Por esta razón los transformadores de potencial deben tener una relación de transformación adecuada para cumplir con esta condición

- **Conexión de los dispositivos de medición**

Las conexiones usadas para la medición de la potencia de entrada dependen de la conexión de la máquina. Si el neutro de la máquina es conectado al sistema durante el ensayo, se debe realizar la conexión de los tres wattmetros mostrada en la figura 45. En la figura 46 se muestran las condiciones necesarias con dos wattmetros para cuando el neutro de la máquina esta disponible pero este no se conecta al sistema. El método de los tres wattmetros se recomienda debido a que proporciona cálculos más correctos de la potencia que se esta consumiendo.

Como se menciona anteriormente, cuando el neutro no esta disponible se puede realizar la medición con dos wattmetros, no obstante si se quiere, se pueden conectar tres wattmetros con conexión Y para medir la potencia trifásica. Un punto de cada circuito secundario siempre debe ser conectado a una tierra común como se muestra en la figura 45 y 46, también se permite el uso de wattmetros polifásicos.

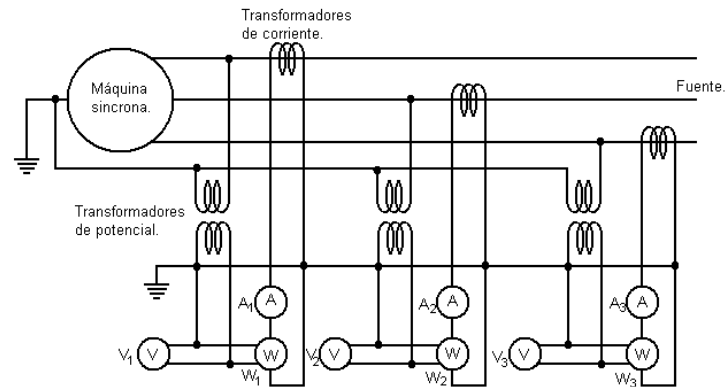


Figura. 45 método de los tres Wattmetros para la medición de potencia

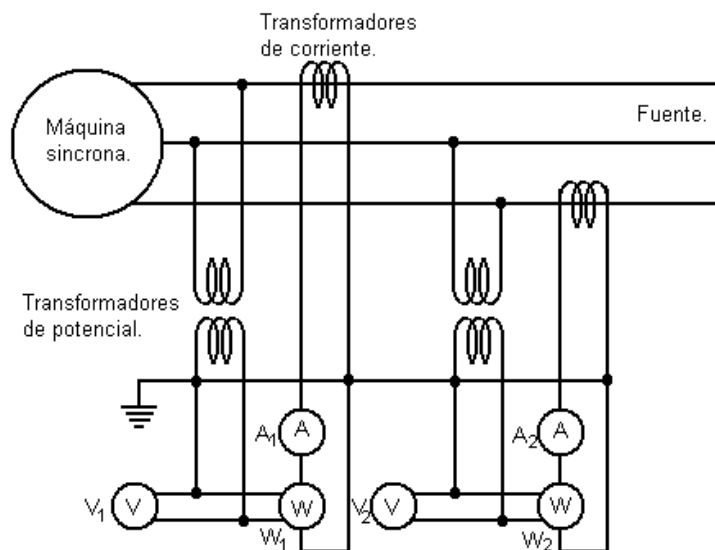


Figura 46. Método de dos wattmetros para la medición de potencia

5.3.8. Métodos para la medición de la potencia de entrada

- **Método 1.**

Durante la realización de la práctica, todas las lecturas deben ser tomadas simultáneamente, para los casos en los que, bajo condiciones de prueba se presenten oscilaciones de la aguja del medidor, se tomara aquel valor en el que el puntero se demore al menos medio segundo. Se debe tomar más de una muestra

por cada nivel de tensión, el promedio de estos valores será el que se utilice para la realización de la curva.

- **Método 2.**

Otra forma de medir la potencia de entrada a la máquina es a través de Wattmetros-hora portátiles conectados de acuerdo con los requerimientos enunciados en la sección 5.3.7.2. En la medición de la energía sobre un corto periodo de tiempo. Se recomienda que todos los instrumentos sean iniciados y detenidos en el mismo instante de tiempo, usando un periodo de por lo menos 3 minutos para máquinas pequeñas y 5 minutos para máquinas grandes.

5.3.9. Pérdidas de circuito abierto.

La máquina bajo prueba es operada como motor síncrono a aproximadamente factor de potencia 1 y aplicando la mayor cantidad de niveles de tensión especificados en la sección 5.3.7.1.7. Se deben tomar mediciones de la potencia de entrada, tensión de armadura y corriente de campo. Para obtener mayor precisión en las mediciones, se recomienda trabajar con factores de potencia entre 0.95 sobreexcitado y 0.95 sub-excitado [9].

La potencia consumida en circuito abierto por el núcleo, es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas por fricción, rozamiento con el aire y las pérdidas i^2R en los devanados de la armadura.

5.3.10. Curva de saturación de circuito abierto

Esta curva es graficada con la medición de la tensión de armadura y corriente de campo en los ensayos de pérdidas de potencia en vacío, debe mencionarse que tensión de armadura no puede ser menor que el 30% del valor nominal.

5.3.11. Pérdidas parásitas y de cortocircuito

La máquina bajo prueba debe ser operada como motor síncrono a un nivel de tensión estable, preferiblemente a 1/3 de la tensión nominal. La corriente de armadura es controlada mediante la corriente de campo. Durante el ensayo, la corriente de armadura debe ser variada en seis pasos entre 125% y 25% de la corriente nominal y debe incluir una o dos mediciones el menor porcentaje posible.

El valor máximo de corriente durante el ensayo es por lo general el 125% del valor nominal; no obstante, este valor debe ser avalado por el fabricante puesto que en algunas ocasiones los devanados del estator están diseñados para operar máximo al 100%. Las lecturas a los valores máximos, deben ser obtenidas cuando los devanados del estator tengan una temperatura uniforme. En el ensayo se deben tomar mediciones de la potencia de entrada, corriente, tensión de armadura, y corriente de campo. La temperatura del estator debe ser revisada y registrada mediante termómetros localizados en lugares cerca a los devanados.

5.3.12. Curva de pérdidas

La figura 46 muestra una curva obtenida con el método descrito en esta sección. Esta grafica esta compuesta de las pérdidas en el núcleo, las pérdidas de cortocircuito y las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire. Cada curva debe ser extrapolada hasta un valor cero de corriente. Las pérdidas parásitas pueden ser determinadas sustrayendo la potencia $i^2 R_a$ calculada para la temperatura del devanado durante la prueba.

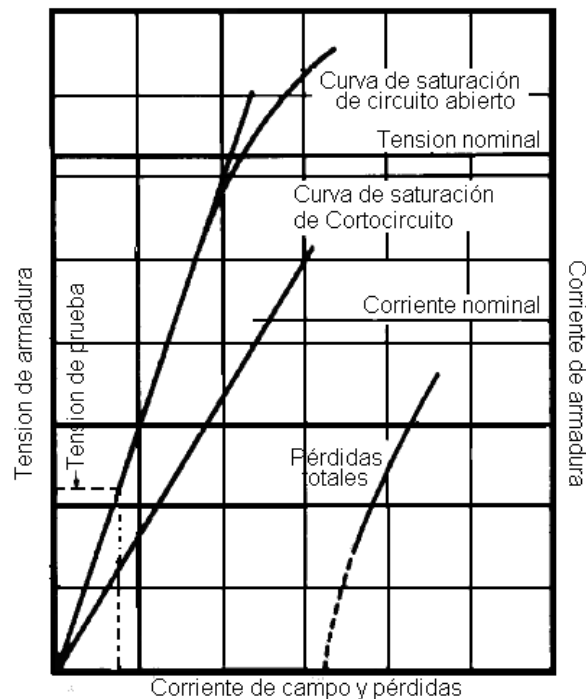


Figura. 46. Curvas obtenidas con el método de la potencia eléctrica de entrada

5.3.12.1. Método de retardo para la medición de pérdidas de la máquina y curvas de saturación

Este método para la determinación de las pérdidas fue desarrollado para ensayos en generadores de turbinas hidráulicas después de ser instaladas (ver IEEE Std 492-1974).

El método se basa en la relación entre la razón de cambio de la desaceleración de una masa en rotación, el peso, el radio de giro y las potencias que tienden a desacelerarlo

Para más información acerca de este método ver IEEE Std 115-1995

5.3.13. Eficiencia

- **Método 1. Pérdidas separadas.**

La manera convencional de calcular la eficiencia es sumando las pérdidas de potencia determinadas mediante los ensayos que se describieron anteriormente. La eficiencia se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Eficiencia(\%) = 100 - \frac{P_{pérdidas} * 100}{P_{salida} + P_{pérdidas}} \quad (5-29)$$

Para un motor

$$Eficiencia(\%) = 100 - \frac{P_{pérdidas} * 100}{P_{entrada}} \quad (5-30)$$

- **Método 2. Entrada-salida**

Este método establece el cálculo de la eficiencia usando la siguiente expresión:

$$Eficiencia(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100 \quad (5-31)$$

El método más recomendado para la medición de la entrada de potencia a un generador o la potencia de salida de un motor es a través de un dinamómetro⁶⁵. La potencia de entrada y de salida se obtiene de la siguiente ecuación

$$Potencia \text{ en kilowatts} = \frac{n * T}{k} \quad (5-32)$$

Donde

n Es la velocidad rotacional (r/min)
 T Es el valor del torque

⁶⁵ Las medidas obtenidas con el dinamómetro debes ser corregidas, para esto ver IEEE Std 112-1991, forma B

k Es 9549 si T esta dado en (in*metro)

K Es 7043 si T esta dado en lb*ft

La potencia eléctrica de entrada al motor o de salida para el generador, debe ser cuidadosamente medida. Los terminales de los transformadores de potencial deben ser conectados directamente a los terminales de la máquina bajo prueba, esto para no incluir la caída de potencial de las conductores para la conexión, las lecturas de los instrumentos deben ser corregidas por errores de escala y por errores de la relación de transformación y ángulo de fase en transformadores de corriente y de potencial.

Si no se dispone de un dinamómetro, el ensayo se puede realizar utilizando un motor o generador de corriente directa o alterna (esto depende si la máquina síncrona bajo prueba es un motor o un generador). Se debe disponer de la curva de eficiencia de tal máquina, para calcular la potencia de entrada o de salida.

5.4. PRUEBAS DE TEMPERATURA

Los cambios de temperatura de una máquina síncrona dependen de la carga a la que esta conectada, Variaciones en la carga ocasionaran cambios en la temperatura de la máquina.

Las pruebas de temperatura se realizan para determinar cómo varia la temperatura en ciertas partes de la máquina comparado con un valor de referencia que por lo general es la temperatura ambiente.

5.4.1. Métodos de carga

Los ensayos de temperatura son realizados con la máquina operando a una o mas condiciones de carga. A continuación se describen cuatro métodos recomendados

por el estándar IEEE Std115-1995, para modificar la carga de la máquina con el fin de determinar la elevación de temperatura de misma.

5.4.1.1. Método 1. cargamento convencional

El método más usado para la realización de los ensayos de temperatura se basa en mantener condiciones específicas de corriente, potencia, tensión, y frecuencia hasta que la máquina alcance una temperatura constante. Estas mediciones se deben tomar por lo menos cada media hora. A continuación se enuncian algunas recomendaciones para este método:

- a) La tensión en las terminales se debe mantener entre $\pm 2\%$ del valor nominal de la máquina.
- b) El ensayo se debe realizar con varios niveles de tensión cercanos del valor nominal y se deben interpolar los resultados.

5.4.1.2. Método 2. Realimentación sincrónica

Cuando se dispone de una máquina similar a la de prueba. Las dos máquinas son acopladas y conectadas eléctricamente de manera que una funcione como motor y la otra como generador. La salida del generador será conectada al motor. Las pérdidas de las dos máquinas son asumidas por una tercera máquina⁶⁶ (un motor), la cual es alimentada por una fuente independiente de tensión. La tercera máquina entrega potencia a las otras dos máquinas mediante un acople mecánico (poleas o engranajes).

Los rotores de las dos máquinas requieren de un acople mecánico para que giren a la misma velocidad. Durante la prueba, los rotores acoplados deben ser llevados a la velocidad nominal. Los circuitos de armadura deben estar conectados en la secuencia de fase correspondiente a la dirección de rotación y a

⁶⁶Se puede conectar una fuente de potencia eléctrica en lugar de este motor

las polaridades de campo de los rotores. El circuito eléctrico que conecta los devanados de armadura de las máquinas, debe tener un adecuado interruptor además de tener conectados wattmetros, amperímetros y voltmetros. El circuito de campo de cada máquina debe estar conectado a fuentes independientes de tensión CC, en las cuales se deben realizar estimaciones de potencia, corriente y tensión.

Con el interruptor cerrado, la corriente de campo de una de las máquinas se incrementa hasta alcanzar la corriente y tensión nominal, con las máquinas acopladas trabajando a valores nominales, se realiza el intercambio de potencia aparente (en kVA) nominales entre las dos máquinas al factor de potencia deseado. Tal potencia aparente es función del desplazamiento angular entre los dos rotores

5.4.1.3. Método 3. Factor de potencia cero

Este método consiste en poner en funcionamiento la máquina sin carga como un condensador síncrono, manteniendo condiciones apropiadas de corriente de campo, corriente de armadura, tensión y frecuencia hasta que la máquina alcance una temperatura constante.

Para factores de potencia diferentes de 0 el método se basa en el cálculo de la reactancia de Potier⁶⁷

5.5. PRUEBAS DE TORQUE

5.5.1. Torque y corriente de rotor bloqueado

Durante la prueba de rotor bloqueado se busca determinar cual es el valor de la corriente durante el arranque y par de rotor bloqueado convertido

⁶⁷ Información de este método junto con la información de la reactancia de Potier se encuentra en el estándar IEEE Std 115-1995

Para la realización de la prueba, se debe conectar a los terminales de la armadura de la máquina, una fuente variable de tensión. El devanado de campo será cerrado a través de una resistencia de arranque. La realización de esta prueba debe hacerse en el menor tiempo posible, debido a las altas temperaturas que alcanza la máquina.

La prueba debe iniciar con la corriente más alta que soporte la máquina sin que esta sufra daños debido a las altas temperaturas, posteriormente de deben realizar ensayos con corrientes de menor magnitud; tomando Para cada valor mediciones de: tensión de armadura, corriente, potencia, torque y corriente de campo inducida.

Para ciertos tipos de máquinas, el torque varía con el ángulo del rotor entre cada ranura del estator. En tales máquinas es necesario realizar una prueba preliminar con tensión reducida para diferentes posiciones del rotor, hasta encontrar la posición donde el valor del torque sea el menor. Esta será la posición que debe tener el rotor para los siguientes valores de corriente.

5.5.1.1. Determinación de la corriente de rotor bloqueado

Cuando la máquina esta trabajando en la región lineal de la curva de saturación, la corriente de rotor bloqueado varía directamente con la tensión y el cuadrado de la potencia eléctrica. Si los efectos de saturación están presentes, los valores de la corriente deben ser tomados de la curva de Corriente vs. Tensión. La corriente de armadura a graficar es entonces el promedio de todas las fases, los datos obtenidos durante la pruebas son utilizados para obtener la grafica requerida

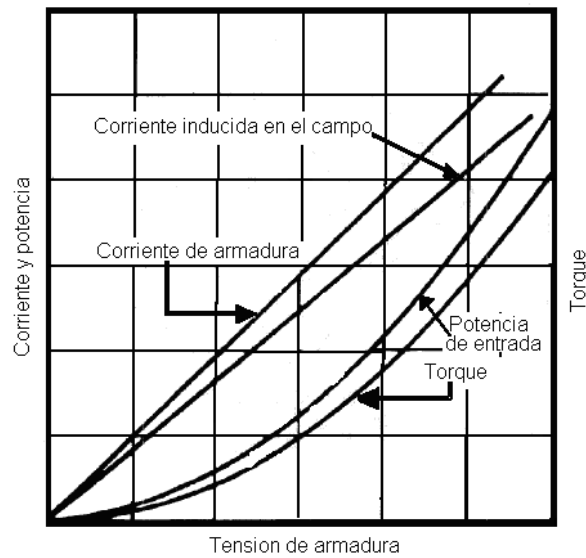


Figura 46. Característica de torque con rotor bloqueado.

- **Método 1. torque por escala**

En la realización de esta prueba es necesario de velocidad sea perpendicular a la dirección del movimiento de la escala, se debe tener la longitud del brazo de palanca desde el centro del eje hasta el punto de soporte de la escala. El torque motor T_l , es el producto entre la fuerza neta y la longitud la brazo de palanca. El torque del entrehierro en este caso iguala el torque de salida mecánica y por lo tanto puede ser calculada usando las siguientes ecuaciones:

$$T_g = \frac{T_l}{T_n} \text{ p.u. (5-33)}$$

Donde

T_g Es el torque del entrehierro en las condiciones de la prueba, en por unidad, con la salida como valor base

- T_l Es $F * l$ = torque mecánico de salida a las condiciones de la prueba
- F Es la fuerza neta [N]
- l Es la longitud del brazo de palanca [m]
- T_n Es el torque mecánico de salida del motor (se asume como valor base)

$$T = \frac{k * P_{MN}}{n_s} \quad (5-34)$$

- n_s Es la velocidad sincronía [r/min]
- K Es 9546
- P_{MN} Es la salida nominal del motor bajo prueba [kW]

El torque del entrehierro es ajustado a las condiciones especificadas en la sección 5.5.1.2.

- **Método 2. Torque por entrada eléctrica.**

Si no se dispone de los medios para medir el torque, el rotor puede ser calculado mediante mediciones eléctricas. El torque del entrehierro es calculado como la potencia de entrada al rotor en kilowatts dividida por la potencia de salida convertida a kilowatts. La entrada al rotor es determinada sustrayendo las pérdidas de cortocircuito a la corriente de la prueba de la potencia de entrada.

5.5.1.2. Torque en condiciones específicas

El torque de rotor bloqueado es definido como el valor para el cual la posición del rotor entrega el mínimo par, cuando se le esta aplicando tensión nominal es sus terminales [1].

Para un nivel específico de tensión, el torque es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$T_{LR} = T_g \left(\frac{I_s}{I_t} \right)^2 \quad p.u. (5-35)$$

Donde

T_{LR} Es el torque de rotor bloqueado para un valor dado de tensión, [p.u. sobre la base de salida]

T_g Es el torque del entrehierro en las condiciones de la prueba, [p.u.]

I_s Es la corriente de rotor bloqueado a la tensión especificada

I_t Es el valor de la corriente de rotor bloqueado del mismo ensayo usado para la determinación de T_g

5.5.1.3. Determinación de la corriente de campo inducido o tensión inducida

Para un arranque con el devanado de campo cerrado, la corriente inducida en el campo es obtenida para evaluar las características del resistor de arranque, mientras que para un arranque con el campo abierto se debe obtener la tensión inducida en el campo para determinar el aislamiento en el devanado de campo.

5.5.2. Ensayos de velocidad-torque

Los métodos que se describen a continuación son usados para determinar la curva de velocidad-torque de un motor. La selección del método, depende del tamaño de la máquina y de las facilidades con las que se cuenta en el momento de realizar el ensayo.

Durante el ensayo es primordial que la frecuencia de la fuente de potencia permanezca constante, el nivel de tensión debe ser el nominal del motor.

De los siguientes métodos, el 1 y 4 requieren que la velocidad de la máquina sea invariable durante cada medición.

5.5.2.1. Método 1. Medición de la salida.

Un generador DC con pérdidas de potencia conocidas, es acoplado al motor bajo prueba. El campo del motor debe ser cerrado por medio de un resistor de arranque. Una fuente de tensión alterna es conectada a las terminales del motor. La tensión debe tener una magnitud del 50% del valor nominal del motor. La variación de velocidad del motor se realiza por medio de ajustes en el generador.

Para esta prueba, en cada valor de velocidad, se deben tomar lecturas de la tensión de armadura, corriente, velocidad y corriente de campo inducida para el motor. En el generador se deben tomar registros de tensión, corriente de armadura y corriente de campo.

La precisión de las mediciones de velocidad es muy importante. Los dispositivos con los que se realicen estas estimaciones deben ser precisamente ajustados o calibrados a la velocidad sincronía. [9]

El torque del entrehierro T_g , para cada velocidad es calculado usando la siguiente ecuación:

$$T_g = \frac{k(P_{GO} + P_{GL}) * n_s}{P_{MN}(n)} + T_{FW} \text{ p.u. en la base de la potencia de salida. (5-36)}$$

Donde

P_{GO} Es la potencia DC de salida del generador [kW].

P_{GL} Es el valor de las pérdidas del generador DC, incluyendo las pérdidas por la acción del aire [kW].

$$T_{FW} \text{ Es } \frac{k(P_{FW}) * n_s}{P_{MN} * n} \quad (5-37)$$

P_{FW} Es la fricción del motor a torque por el aire, por unidad de la potencia de salida.

n_s Es la velocidad síncrona del motor [r/min]

n Es la velocidad de la prueba en el motor⁶⁸, [r/min]

P_{MN} Es la potencia nominal de salida del motor bajo prueba [kW]

k Es 1.0

5.5.2.2. Método 2. Aceleración

En esta prueba el motor síncrono como motor carga. El valor de la aceleración es determinado para varias velocidades.

El torque para cada velocidad es determinado de la aceleración y el momento de inercia de las partes rotativas.

El motor debe ser operado por una fuente de corriente alterna y tensión variable a la frecuencia nominal del motor bajo prueba. El campo debe ser cerrado a través de un resistor de arranque.

La variación de la aceleración y duración de la prueba es determinada por el tipo de instrumentos que son usados para realizar las mediciones indicadas en la sección 5.3.2.1. No obstante, el tiempo de aceleración debe ser suficiente para que pasen los efectos transitorios que pueden modificar las mediciones⁶⁹.

⁶⁸ Si el motor y el generador están directamente acoplados $n_s = n$

⁶⁹ se recomienda un tiempo de 5 s. a 15 s.

En el momento de realizar el ensayo el motor se debe encender con un mínimo valor de tensión. Si el motor tarda más de 1.5 minutos para pasar a acelerar de 30% a 95%, se debe incrementar la tensión hasta que se corrija esta característica.

Se deben realizar mediciones de velocidad, tensión, corriente de línea y potencia. El torque del entrehierro debe ser calculado en cada punto de acuerdo con

$$T_g = \frac{k * 10^{-6} * J * n_s * (dn / dt)}{P_{MN}} + T_{FW} \quad (5-38)$$

Donde

n_s Velocidad sincronía del motor [r/min]

dn / dt Aceleración para cada valor de velocidad [r/min/s]

$$T_{FW} \text{ Es } \frac{k(P_{FW}) * n_s}{P_{MN} * n} \quad (5-39)$$

J Momento de inercia de las partes rotativas [kg*m²]

P_{MN} Potencia nominal de salida del motor bajo prueba [kW]

$$k = (\pi / 30)^2 * 1000 = 10.97$$

5.5.2.3. Método 3. Salida

En este método, el torque es determinado sustrayendo las pérdidas de la máquina de la potencia de entrada, es un método muy útil cuando no se puede quitar la carga de la máquina⁷⁰.

⁷⁰ En las máquinas en que se presentan torques ocasionados por armónicos no es recomendable utilizar este método.

En la práctica, este es un método bastante aproximado debido a que las pérdidas del estator no pueden ser determinadas para las condiciones de operación cuando se realiza el ensayo y por esto deben ser aproximadas a los valores de las curvas de circuito abierto (vacío) y cortocircuito [9].

La máquina se arranca que en el método anterior, con la excepción que ahora se le conecta una carga. El torque del entrehierro T_g , para cada velocidad es determinado a partir de:

$$T_g = k \left(\frac{P_{si} - P_{sc} - P_c}{P_{MN}} \right) \text{ p.u. en la base de la potencia de salida. (5-40)}$$

Donde

P_{si} Es la potencia de salida del estator, [kW]

P_{sc} Es el valor de las pérdidas de cortocircuito a la corriente de la prueba, [kW]

P_c Es el valor de las pérdidas en el núcleo a la tensión de prueba, [kW]

P_{MN} Es la potencia de salida nominal del motor bajo prueba, [kW]

k Es una constante de valor 1.0.

5.5.2.4. Método 4. Medición directa

El torque puede ser medido para varias velocidades utilizando un dinamómetro, para este método aplican los procedimientos de la sección 5.5.2.1. con el reemplazo del generador DC por un dinamómetro.

El torque en el entrehierro mediante este método se calcula utilizando:

$$T = \frac{k^* P_{MN}}{n_s} \quad (5-40)$$

$$T_g = \frac{T_t}{T_n} + T_{FW} \quad \text{p.u. sobre la base de la potencia de salida.} \quad (5-41)$$

Donde

T_t Es el torque mecánico de salida en el motor bajo prueba

T_n Es la base del torque mecánico de salida del motor

T_{FW} Es el torque causado por la fricción con el aire para cada velocidad, p.u. de la potencia de salida.

5.6. Aplicaciones de los parámetros eléctricos de la máquina.

5.6.1. Generalidades.

Los parámetros eléctricos de las máquinas síncronas son usados para resolver muchos problemas en los sistemas de potencia.

En condiciones de estado estable, un conocimiento previo de las reactancias de eje directo X_{du} y de eje de cuadratura X_{qu} es necesario para determinar, después de los respectivos ajustes por saturación, el valor máximo de la potencia reactiva de salida, Q . La potencia reactiva de salida de los generadores es usada en estudios de flujos de carga en sistemas de potencia para controlar las Tensiones y el suministro de potencia reactiva a las cargas.

5.6.2. Cantidades en por unidad

A continuación se revisarán algunos métodos para determinar las reactancias y resistencias de la máquina en por unidad.

Con el fin de evitar errores en la utilización de las cantidades en por unidad, es importante definir y seleccionar cuidadosamente las bases a utilizar. El procedimiento recomienda en escoger tres cantidades base y a partir de ellas derivar las restantes. Generalmente las tres cantidades base seleccionadas son las siguientes:

- La potencia trifásica, $S_{N\Delta}$.
- La tensión de línea, $E_{N\Delta}$.
- La frecuencia, f_N .

Cada cantidad medida, se expresa en cantidades en por unidad dividiendo su valor entre la respectiva base, las dos cantidades deben estar expresadas en las mismas unidades. Si desea pasar de un valor en por unidad a unidades físicas se debe multiplicar el valor obtenido por la base respectiva. Para cambiar de base, el valor en por unidad se multiplica por su base actual y se divide entre la base a la cual se desea convertir.

5.6.2.1. Potencia base.

Si se trata de un generador, la potencia trifásica base corresponde a la potencia aparente de salida nominal de la máquina.

Para un motor, se toma como potencia trifásica base el valor de la potencia aparente de entrada cuando la máquina opera a tensión y carga nominales.

Si se necesita realizar mediciones monofásicas, estas se expresan en por unidad de la potencia base de una fase. La potencia base monofásica se obtiene de la potencia base trifásica de la manera dada en la ecuación (5-42).

$$S_N = \frac{S_{N\Delta}}{3} \quad (5-42)$$

En donde:

$S_{N\Delta}$ = Potencia trifásica base.

5.6.2.2. Tensión y corriente base.

La base para las Tensiones de fase se puede obtener a partir de la base de las Tensiones de línea. Para realizar esta conversión se utiliza:

$$E_N = \frac{E_{N\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (5-43)$$

Es usual seleccionar la tensión de línea nominal como base de las Tensiones. Una tensión de línea es expresada en por unidad dividiendo su valor en la respectiva base, teniendo la precaución de que ambas cantidades se expresen en las mismas unidades. Si existen condiciones senoidales balanceadas, los valores en por unidad de una tensión de línea y de una tensión de fase correspondiente son iguales.

La corriente de línea base se obtiene a partir de la tensión y de la potencia base, esta corriente base es igual a la corriente de línea que circula por el circuito cuando este se somete a la tensión y a la potencia base. La ecuación (5-45) es utilizada para obtener el valor de esta corriente base.

$$I_N = \frac{1000 \cdot S_{N\Delta}}{\sqrt{3} \cdot E_{N\Delta}} = \frac{1000 \cdot S_N}{E_N} \quad (5-45)$$

En donde:

$S_{N\Delta}$ = Potencia trifásica base, en kilovoltamperes.

S_N = Potencia monofásica base, en kilovoltamperes.

$E_{N\Delta}$ = Tensión de línea base, volts.

E_N = Tensión de fase base, volts.

Otra forma de encontrar el valor de la corriente de línea base se muestra en la ecuación (5-46).

$$I_N = \frac{S_{N\Delta}}{\sqrt{3} \cdot E_{N\Delta}} \quad (5-46)$$

En la ecuación (5-46) el valor de la potencia se expresa en megavoltamperes y el de la tensión de línea en kilovolts.

Cuando la máquina se encuentra conectada en delta, el valor de la corriente base se determina a través de la ecuación (5-47).

$$I_{N\Delta} = \frac{S_{N\Delta}}{3 \cdot E_{N\Delta}} \quad (5-47)$$

5.6.2.3. Impedancia base.

La impedancia base es el valor de impedancia obtenido cuando la corriente base circula a través de un elemento sometido a la tensión de línea base. El valor de esta impedancia puede expresarse como se muestra en la ecuación (5-48).

$$Z_N = \frac{E_N}{I_N} = \frac{E_N^2}{V \cdot A} = \frac{E_{N\Delta}^2}{1000 \cdot S_{N\Delta}} = \frac{E_N^2}{1000 \cdot S_N} \quad (5-48)$$

5.6.2.4. Frecuencia base.

La frecuencia nominal es generalmente seleccionada como la frecuencia base. A partir de este valor se pueden obtener las bases para la velocidad angular y para el tiempo.

$$\omega_N = 2\pi \cdot f_N \quad (5-49)$$

$$t_N = \frac{1}{f_N} \quad (5-50)$$

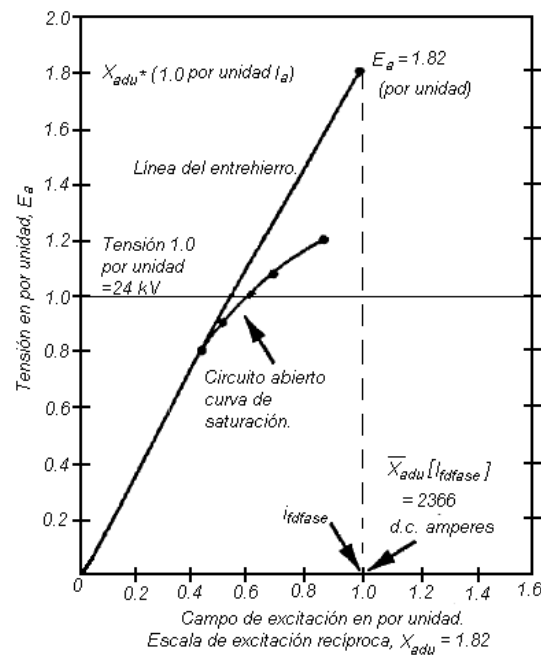


Figura. 47 Gráfica de tensión contra corriente de excitación⁷¹.

⁷¹ Gráfica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995.

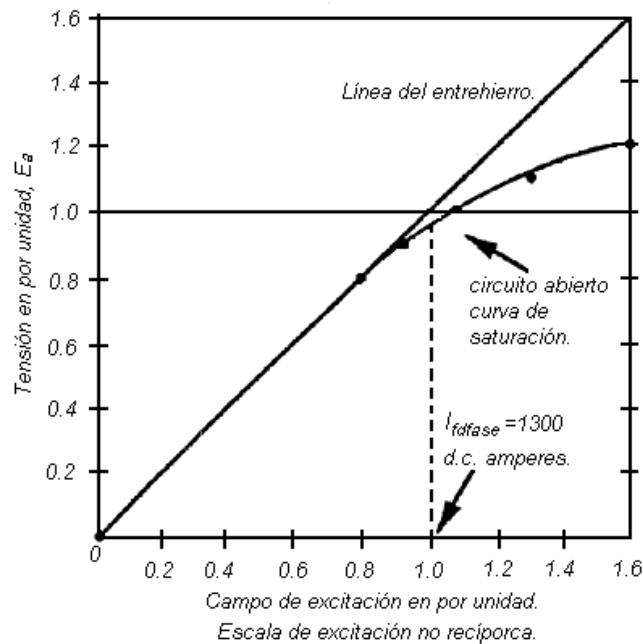


Figura. 48 Grafica de tensión contra corriente de excitación con escala no recíproca⁷².

5.7. Pruebas para determinar los valores de los parámetros en condiciones de estado estable

5.7.1. objetivo

Algunas de las pruebas para condiciones de estado estable son requeridas en el análisis del desempeño de la máquina. Bajo estas condiciones, las variaciones en la potencia de salida y en la tensión en los terminales son relativamente pequeñas.

Cuando la máquina se encuentra en condiciones des balanceadas, las resistencias y reactancias de secuencia cero son utilizadas para realizar el análisis de máquina, debido a que tales cantidades afectan el desempeño de la misma.

5.7.2. Instrumentación

⁷² Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995.

Los instrumentos requeridos para la mayoría de las pruebas son los transformadores de corriente y de potencial con todos los amperímetros, voltímetros o wattímetros en las configuraciones requeridas para realizar mediciones trifásicas. Para las mediciones de los ángulos de fase se requiere instrumentación especial.

5.7.2.1. Tipos de parámetros a determinar

En la tabla 24 se muestra una lista de las cantidades derivadas de las pruebas de estado estable.

X_{du}	Reactancia síncrona no saturada de eje directo.
X_{ds}	Algún valor en particular de X_{du} que depende de la tensión en lo terminales de la máquina, de la potencia aparente y del factor de potencia.
X_{adu}	Reactancia síncrona mutua no saturada de eje directo, la cual es una porción de X_{du} asumido de acuerdo a la saturación.
X_{ads}	Porción saturada de X_{ds} , en donde $X_{ds} = X_{ads} + X_t$
X_q	Reactancia síncrona del eje de cuadratura.
X_{qs}	Reactancia síncrona del eje de cuadratura, obtenida de la prueba.
X_2	Reactancia de secuencia negativa.
R_2	Resistencia de secuencia negativa.
X_0	Reactancia de secuencia cero.
R_0	Resistencia de secuencia cero.
SCR	Cociente de cortocircuito.
δ	Angulo eléctrico interno.

Tabla 26. Parámetros a determinar.

5.7.3. Reactancia síncrona de eje directo⁷³

En máquinas de diseño normal, la magnitud de la reactancia síncrona de eje directo es un valor aproximadamente igual al de la impedancia síncrona de eje directo. Por lo tanto con fines prácticos se puede asumir el mismo valor.

La impedancia síncrona no saturada de eje directo puede determinarse a partir de los resultados de las pruebas de vacío y de corto circuito. Esta impedancia en por unidad es igual a la razón de la corriente de campo con la corriente de armadura base, de la prueba de corto circuito, a la corriente de campo con la tensión base en la línea del entrehierro.

La reactancia síncrona puede determinarse utilizando la siguiente expresión:

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (5-51).$$

En donde:

X_{du} = Reactancia síncrona no saturada.

I_{FSI} = Corriente de armadura correspondiente a la corriente de armadura base de la prueba de cortocircuito.

I_{FG} = Corriente de campo correspondiente a la tensión base sobre la línea del entrehierro.

El valor de la reactancia síncrona saturada depende de las condiciones de operación de la máquina. La reactancia síncrona se compone de la reactancia

⁷³ Para ver las definiciones de la reactancia y de la impedancia de armadura, se debe revisar el estándar IEEE Std. 100-1992.

mutua entre en estator y el rotor X_{ad} , más la reactancia de dispersión del estator, X_ℓ .

$$X_d = X_{ad} + X_\ell \quad (5-52)$$

En donde:

X_{ad} es la porción saturada de X_d .

$$X_{du} = X_{adu} + X_\ell \quad (5-53)$$

Cuando X_{ad} es saturada para cualquier valor, (X_{ads}), entonces

$$X_{ds} = X_{ads} + X_\ell \quad (5-54)$$

5.7.4. Reactancia síncrona de eje de cuadratura⁷⁴

No hay una definición clara de la reactancia síncrona de eje de cuadratura saturada y no saturada. Es común asumir esta reactancia de la siguiente forma:

$$X_q = X_{aq} + X_\ell \quad (5-55)$$

El valor de X_{aq} representa la porción de X_q sometida a saturación.

Una suposición similar se puede hacer en el caso de X_{qs} como se muestra en la ecuación (5-56).

$$X_{qs} = X_{aqs} + X_\ell \quad (5-56)$$

⁷⁴ Para ver las definiciones de la reactancia y de la impedancia de armadura, se debe revisar el estándar IEEE Std. 100-1992.

5.7.4.1. Procedimiento para desarrollar una prueba de deslizamiento.

Método 1 para medir X_{qs} .

En esta prueba se debe impulsar el rotor a una velocidad ligeramente diferente de la de sincronismo. El campo se debe encontrar en circuito abierto y la armadura se debe energizar con una fuente de tensión trifásica, de frecuencia nominal y secuencia positiva. El valor de la tensión debe ubicarse por debajo del punto de circuito abierto de la curva de saturación. De este ensayo se deben obtener lecturas de la corriente, tensión de armadura, y de la tensión en el circuito abierto de la armadura.

La medida del deslizamiento se puede hacer de dos maneras:

- Mediante la razón de la frecuencia de la tensión inducida en el campo a la frecuencia de la tensión aplicada, y
 - A través del uso de un estroboscopio energizado a la misma frecuencia que la Tensión aplicada, el cual ilumina marcas equidistantes en el rotor. El número de marcas es igual al número de polos. La frecuencia del deslizamiento corresponde al cambio progresivo de las marcas en las revoluciones, multiplicado por el número de pares de polos. El deslizamiento es la razón de la frecuencia del deslizamiento a la frecuencia de la tensión aplicada.
- **Precauciones.**

En ocasiones es muy difícil mantener una velocidad constante cuando el deslizamiento es suficientemente bajo para una determinación exacta de la reactancia síncrona del eje de cuadratura. Esto es debido a los efectos de los polos salientes y de las corrientes inducidas en los devanados amortiguadores, los cuales producen un torque variante. En tales casos, se debe tomar una serie

de lecturas, comenzando con el deslizamiento más pequeño para el cual se puede mantener la velocidad aproximadamente constante y se hacen tres o más pruebas con valores de deslizamiento progresivamente mayores.

La tensión inducida en el circuito de campo abierto puede alcanzar valores peligrosos cuando el deslizamiento es grande. Los instrumentos de medida se debe desconectar del campo hasta que se pueda asegurar que las Tensiones inducidas son menores que sus Tensiones de operación.

Si el deslizamiento es bajo y la velocidad es constante, los instrumentos de indicación seguirán la tensión y sus variaciones con bastante exactitud como para permitir su uso. Es necesario tomar lecturas simultáneas de la corriente y de la tensión cuando la corriente alcanza sus valores máximos y mínimos.

En la figura 49 se muestra un esquema de las conexiones necesarias para este ensayo.

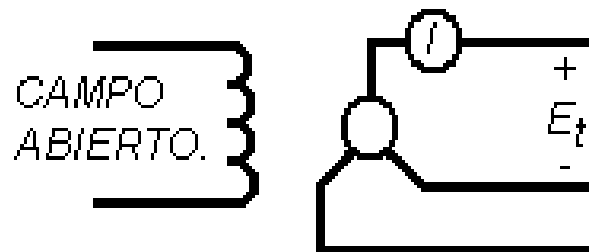


Figura. 49 conexiones necesarias

- **Determinación de X_{qs} a partir del método 1.**

Los valores máximo y mínimo del cociente de la tensión y la corriente de armadura se obtienen cuando el deslizamiento es muy pequeño. A partir de estos valores, se

pueden calcular valores aproximados de las reactancias de ejes directo y de cuadratura. Estos cálculos se hacen utilizando las ecuaciones (5-55) y (5-56).

El método más exacto para obtener los valores de las reactancias consiste en determinar la reactancia de eje directo a partir de una prueba y posteriormente obtener la reactancia de eje de cuadratura mediante las ecuaciones (5-57) o (5-58).

$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\max}} \quad (5-55)$$

$$X_{ds} = \frac{E_{\max}}{I_{\min}} \quad (5-56)$$

$$X_{qu} \approx X_{du} \left(\frac{X_{qs}}{X_{ds}} \right) \quad (5-57)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right) \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right) \quad (5-58)$$

Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones son todos valores en por unidad.

Se debe tener en cuenta que si el deslizamiento no es lo suficientemente bajo, las corrientes inducidas en los devanados amortiguadores producirán un error considerable.

5.7.4.2. Método 2, máxima corriente de retraso.

La máquina bajo prueba se opera como un motor síncrono en vacío, con una tensión de prueba aplicada que no supera el 75% de la tensión nominal. La excitación del campo se reduce a cero, se invierte en polaridad, y entonces la excitación se aumenta gradualmente con la polaridad opuesta, esto hace que la corriente de armadura incremente su valor. Se aumenta la excitación en dirección negativa en pequeños incrementos hasta que el sistema se vuelva inestable, y

entonces se determina la corriente de la armadura en por unidad para la máxima excitación que mantiene al sistema estable. Esto da un valor saturado, X_{qr} .

- **Determinación de X_{qs} mediante el método 2.**

La reactancia sincronía del eje de cuadratura se obtiene aplicando la siguiente formula:

$$X_{qs} = \frac{E}{I_t} \text{ En por unidad. (5-59)}$$

En donde:

E = Tensión de la armadura en por unidad.

I_t = Corriente de armadura en el limite de estabilidad en por unidad.

5.7.4.3. Método 3, empírico.

El cociente de la reactancia síncrona de eje de cuadratura a la reactancia síncrona de eje directo, para una máquina convencional, se puede determinar mediante una función empírica de algunas dimensiones significativas de la máquina y puede por lo tanto, ser calculado por el fabricante a partir de tales dimensiones. La reactancia síncrona no saturada de eje de cuadratura se determina multiplicando la reactancia síncrona no saturada de eje directo, determinada mediante pruebas, por el cociente suministrado por el fabricante.

5.7.4.4. Método 4, ángulo de carga

La determinación de varios ángulos de carga puede utilizarse junto con la tensión y corriente medidas para determinar X_{qs} .

5.7.5. Cantidades de secuencia negativa (estado estable)

5.7.5.1. Reactancia de secuencia negativa⁷⁵

La presencia de componentes armónicos en la corriente puede modificar la secuencia negativa fundamental de la tensión sin un correspondiente cambio en la secuencia negativa fundamental de la corriente. Por lo tanto, la reactancia de secuencia negativa se ve afectada por la presencia de componentes armónicos en la corriente. Este efecto es más apreciable en máquinas de polos salientes sin devanados amortiguadores o con devanados amortiguadores no conectados entre los polos.

Una prueba básica de reactancia de secuencia negativa requiere de la aplicación de una corriente de secuencia negativa senoidal de frecuencia fundamental y de la medición de la componente fundamental de la tensión de secuencia negativa en los terminales.

- **Condiciones de prueba**

La reactancia de secuencia negativa a corriente nominal se define para una corriente de secuencia negativa igual a la corriente nominal de armadura, y puede obtenerse mediante los métodos 1, 2 o 3.

La reactancia de secuencia negativa a tensión nominal también se puede definir a partir de condiciones súbitas de cortocircuito y puede obtenerse usando alguno de los métodos descritos en la sección 5.7.3.

5.7.5.2. Determinación de la reactancia de secuencia negativa a partir de la aplicación de una corriente de secuencia negativa en los terminales

⁷⁵ Para ver las definiciones de la reactancia y de la impedancia de armadura, se debe revisar el estándar IEEE Std. 100-1992.

de la máquina. Método 1.

La máquina bajo prueba se opera a velocidad nominal con su devanado de campo en cortocircuito. Luego se aplican corrientes trifásicas sinusoidales simétricas de secuencia negativa. Si el valor de la corriente nominal de secuencia negativa esta por determinarse, la corriente se debe ajustar hasta que sea aproximadamente igual a la corriente nominal de la máquina. Dos o más pruebas se deben hacer con valores por encima y por debajo de corriente nominal, para permitir la interpolación.

Para las máquinas de polos salientes sin devanados amortiguadores continuos, es importante que la fuente posea una impedancia lineal mucho mayor que la reactancia de secuencia negativa a determinar. Lo anterior permite que la corriente se pueda mantener aproximadamente senoidal durante toda la prueba. Si se utiliza una fuente de baja impedancia, reactores lineales en serie se deben insertar en las puntas de prueba.

Para máquinas de rotor cilíndrico o máquinas de polos salientes con devanados amortiguadores continuos, la impedancia requerida no es de mayor importancia. Estos ensayos producen calentamientos anormales en el rotor de la máquina bajo prueba, por lo que el ensayo debe realizarse en el menor tiempo posible. El valor máximo y la duración de la corriente de prueba especificados por el fabricante no deben ser excedidos. Las Tensiones de línea, las corrientes de línea, y la potencia de entrada se miden y se expresan en por unidad.

- **Determinación de parámetros mediante el método 1.**

La reactancia de secuencia negativa se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones.

- Impedancia de secuencia negativa en por unidad.

$$Z_2 = \frac{E}{I} \quad (5-60)$$

- Resistencia de secuencia negativa en por unidad.

$$R_2 = \frac{P}{I^2} \quad (5-61)$$

- Reactancia de secuencia negativa en por unidad.

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \quad (5-62)$$

En donde:

E = Valor promedio de los valores rms de las componentes fundamentales de las tres Tensiones de línea, en por unidad.

I = Valor promedio de los valores rms de las componentes fundamentales de las tres corrientes de línea, en por unidad.

P = Potencia eléctrica de entrada en por unidad.

5.7.5.3. Determinación de la reactancia de secuencia negativa mediante la aplicación de una tensión de secuencia negativa en los terminales de la máquina. Método 2.

Este método es una variación del método 1, generalmente se utiliza en máquinas de polos salientes pequeñas y sin devanados amortiguadores continuos. Se requiere de una fuente de tensión con una impedancia menor a la reactancia de secuencia negativa a determinar, esto con el fin de la tensión en los terminales de la máquina sea aproximadamente senoidal. El procedimiento es el mismo del

método 1, solo que se incluyen mediciones de tensión y corriente hechas mediante un oscilograma.

- **Corrección de la tensión de secuencia negativa aplicada para determinar X_2 .**

La reactancia de secuencia negativa se obtiene mediante la ecuación (5-63) en por unidad.

$$X_2 = \frac{(X_2'')^2}{2 \cdot X_d'' - X_{2r}} \quad (5-63)$$

En donde

X_{2r} = Reactancia de secuencia negativa obtenida mediante la ecuación (5-62).

X_d'' = Reactancia sub-transitoria de eje directo.

Para realizar dicha corrección la reactancia sub-transitoria de eje directo se debe conocer bajo las mismas condiciones. Esta corrección no produce ningún cambio si se considera que $X_{2r} = X_d''$ en las máquinas de rotor cilíndrico o para máquina de rotor de polos salientes con devanados amortiguadores continuos.

5.7.5.4. Determinación de la reactancia de secuencia negativa mediante la aplicación de un cortocircuito entre dos terminales de la máquina. Método 3.

5.7.5.4.1. Instrumentación y precauciones.

Para la realización de esta prueba la máquina se impulsa a velocidad nominal y dos de sus terminales deben cortocircuitarse. Un transformador de corriente ubicado sobre una de las fases cortocircuitadas entrega la corriente para el

amperemetro y para la bobina de corriente de un wattmetro monofásico. Un transformador de potencial se ubica entre uno de los terminales cortocircuitados y el terminal que esta abierto, los voltmetros y la bobina de tensión del wattmetro se conectan al secundario de este transformador. En la figura 50 se muestra un diagrama de las conexiones necesarias.

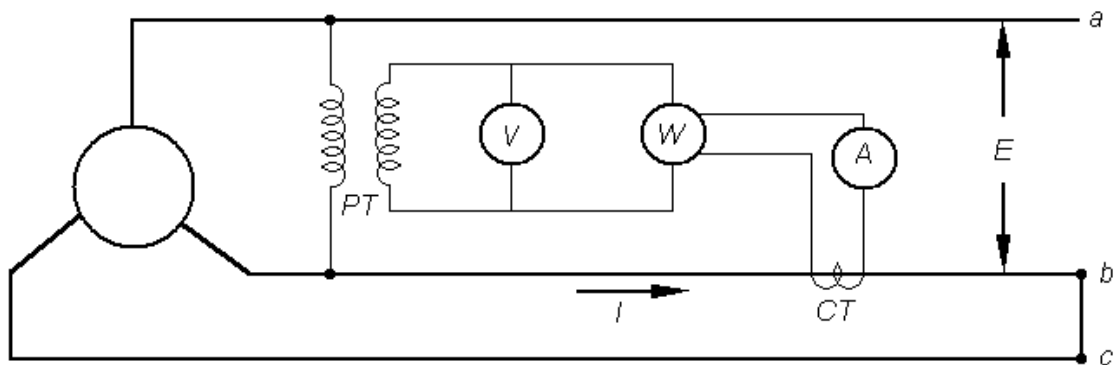


Figura. 50. Esquema de conexiones para el método 3⁷⁶.

Con la máquina excitada con corriente de campo reducida, se toman una serie de lecturas del amperemetro, del voltmetro, y del wattmetro para varias corrientes de campo, en orden ascendente.

Durante este ensayo es necesario proteger al rotor del recalentamiento. Para cada valor de la corriente de campo, las lecturas se deben tomar lo más rápido posible, una vez que se hayan alcanzado las condiciones de estado estable. El campo se debe desenergizar una vez se han tomado las lecturas. La prueba debe ser suspendida si se observa algún recalentamiento en el rotor.

- **Determinación de los parámetros mediante el método 3.**

El valor de la impedancia de secuencia negativa es obtenido a partir de:

⁷⁶ Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995

$$Z_{2(LL)} = \frac{E}{I} \text{ En por unidad. (5-64)}$$

En donde:

E = Componente fundamental de la tensión de línea, en por unidad.

I = Componente fundamental de la corriente de cortocircuito, en por unidad.

El valor de la reactancia de secuencia negativa se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$X_{2(LL)} = \left(\frac{P_{v-a}}{\sqrt{3} \cdot E \cdot I} \right) \cdot Z_{2(LL)} \quad (5-65)$$

En donde:

P_{v-a} = Lectura del wattmetro expresada en por unidad se la base de potencia monofásica.

Si tanto la corriente como la tensión contienen componentes significativas del tercer armónico, se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Los valores de la reactancia de secuencia negativa se pueden dibujar como una función de la corriente de secuencia negativa. En este caso, la corriente de secuencia negativa corresponde al valor de la corriente de cortocircuito dividida en $\sqrt{3}$.
- Corrección para un cortocircuito continuo de línea a línea. La definición de la reactancia de secuencia negativa, para una corriente senoidal de secuencia negativa, se determina a partir del valor obtenido durante un cortocircuito de línea a línea.

$$X_2 = \frac{X_{2(LL)}^2 + (X_d'')}{2 \cdot X_d''} \quad (5-66)$$

Para poder realizar estas correcciones la reactancia sub-transitoria de eje directo se debe conocer con las mismas condiciones.

- La presencia de armónicos puede influenciar los resultados de la prueba. Si tanto la tensión como la corriente contienen componentes del tercer armónico considerables, los valores en por unidad de las lecturas del wattmetro se debe corregir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{v-a}' = P_{v-a} - \sqrt{3} \cdot E_3 \cdot I_3 \quad (5-67)$$

En donde:

E_3 = Valor rms del tercer armónico de la tensión en por unidad de la tensión de línea.

I_3 = Valor rms del tercer armónico de la corriente en por unidad de la corriente de línea.

5.7.5.5. Determinación de la reactancia de secuencia negativa a partir de la aplicación de una tensión de línea. Método 5.

Si este prueba se realiza a frecuencia nominal, la frecuencia de la corriente del rotor debe ser 1.5 veces la de la corriente de secuencia negativa bajo condiciones normales de operación. Si los efectos de la frecuencia de la corriente del rotor sobre la reactancia de secuencia negativa son apreciables, este método no se debe emplear.

La reactancia de secuencia negativa se puede calcular utilizando la ecuación (5-68).

$$X_2 = \frac{K}{2} \text{ En por unidad. (5-68)}$$

La corriente de secuencia negativa en cada punto de prueba es el valor en por unidad de la componente fundamental de la corriente de prueba dividida en $\sqrt{3}$.

5.7.5.6. Resistencia de secuencia negativa⁷⁷

Si la resistencia de secuencia negativa varía apreciablemente con la corriente, el valor para la corriente nominal se puede determinar graficando la resistencia como una función de la corriente de secuencia negativa y seleccionando el valor correspondiente a la corriente nominal.

- **Método 1 para la medición de la resistencia de secuencia negativa.
Aplicando una corriente de secuencia negativa.**

Para realizar esta prueba se aplica una corriente senoidal de secuencia negativa según lo indicado en la sección 5.7.2.5. La resistencia de secuencia negativa se obtiene aplicando la ecuación (5-61). No se necesitan correcciones por temperatura. Las conexiones y precauciones que se deben tomar son idénticas a las realizadas para determinar la reactancia de secuencia negativa mediante el método 1.

- **Método 2 para la medición de la resistencia de secuencia negativa.
Cortocircuito continuo entre dos terminales de la máquina**

Se realiza un cortocircuito continuo entre dos terminales de la máquina de la misma manera que se muestra en la sección 5.7.2.5.4.2. Con los valores de la

⁷⁷ Para ver las definiciones de la reactancia y de la impedancia de armadura, se debe revisar el estándar IEEE Std. 100-1992.

reactancia y de la impedancia de secuencia negativa obtenidos en esa sección, la resistencia de secuencia negativa se determina empleando la ecuación (5-69).

$$R_2 = \sqrt{Z_2^2 - X_2^2} \quad (5-69)$$

No es necesario realizar correcciones por temperatura debido a la naturaleza incierta de la corrección y a la naturaleza aproximada del valor de resistencia obtenido de la prueba.

5.7.6. Cantidades de secuencia cero

5.7.6.1. Reactancia de secuencia cero

La reactancia de secuencia cero solo tiene significado en máquinas conectadas en Y con el neutro accesible. Para conocer un poco acerca de su definición se recomienda revisar el estándar IEEE Std 100-1992.

5.7.6.2. Valores de reactancia de secuencia cero

Para corrientes iguales o menores que la nominal, la reactancia de secuencia cero cambia ligeramente con la corriente. Sin embargo, si la reactancia de secuencia cero varía apreciablemente con la corriente de prueba, la reactancia de secuencia cero puede dibujarse como una función de la corriente de secuencia cero y el valor para la corriente nominal puede determinarse a partir de la curva.

5.7.6.3. Metodología y conexiones para determinar las cantidades de secuencia de secuencia cero en la máquina. Método 1, circuito paralelo

En este caso, los neutros de los terminales se conectan de manera convencional para operación normal, los otros tres terminales se conectan de tal forma que las tres fases queden en paralelo. Una vez realizado esto, se aplica una tensión alterna monofásica entre los terminales de fase y los neutros. Es recomendado que durante esta prueba la máquina se impulse a velocidad normal, con el devanado de campo en cortocircuito y con la ventilación normal.

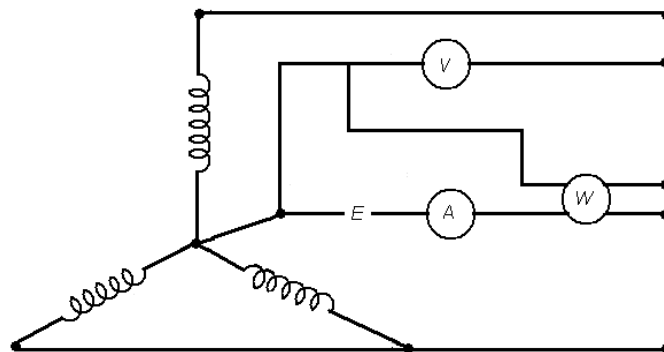


Figura. 51 Esquema de conexiones del método del circuito paralelo⁷⁸.

Para varios valores de la tensión aplicada se produce, si es posible, una corriente de prueba total de hasta tres veces corriente nominal o más, se deben tomar lecturas de la tensión y de la corriente. Si se va a determinar la resistencia de secuencia cero, o si se va a realizar una corrección de la resistencia, se deben tomar lecturas de la potencia de entrada.

- **Determinación de las cantidades de secuencia cero usando el método 1**

La impedancia de secuencia cero se obtiene mediante el empleo de la siguientes formula:

⁷⁸ Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995

$$Z_0 = \frac{3 \cdot E}{I} \text{ En por unidad (5-70)}$$

En donde:

E = Tensión de prueba.

I = Corriente total de prueba.

En la mayoría de los casos la reactancia y la impedancia de secuencia cero se consideran iguales. Sin embargo, para máquinas pequeñas, o en donde la resistencia de la armadura es considerable, la reactancia de secuencia cero es más pequeña y se necesita una corrección por resistencia. En tales casos la reactancia de secuencia cero se calcula usando la ecuación (5-71).

$$X_0 = Z_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P}{E \cdot I} \right)^2} \quad (5-71)$$

En donde:

P = Lectura del wattmetro correspondiente a los valores de E e I usados para determinar Z_0 .

5.7.6.4. Metodología y conexiones para determinar las cantidades de secuencia de secuencia cero en la máquina. Método 2, circuito serie

En este método los devanados de las tres fases se conectan en serie como se muestra en la figura 52. Este método solo es aplicable a máquinas con los dos terminales de cada fase accesibles para conexiones externas. En los demás aspectos es similar al método 1.

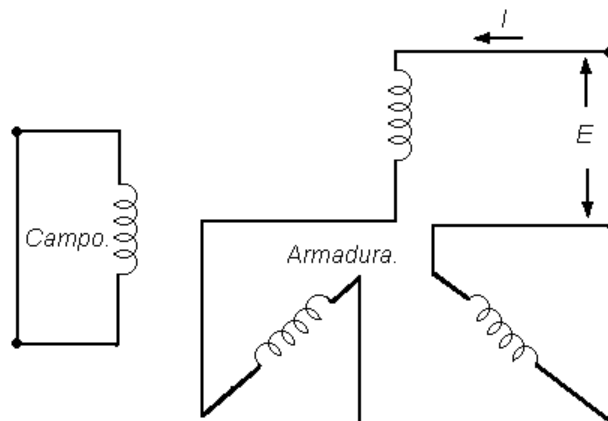


Figura. 52. Esquema de conexiones del método del circuito serie⁷⁹.

- **Determinación de las cantidades de secuencia cero usando el método 2**

La impedancia de secuencia cero se calcula a partir de:

$$Z_0 = \frac{E}{3 \cdot I} \quad (5-72)$$

En donde:

E = Tensión de fase.

I = Corriente.

En este método se asume que la corriente de secuencia cero es igual a la corriente de prueba.

⁷⁹ Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995

5.7.6.5. Metodología y conexiones para determinar las cantidades de secuencia de secuencia cero en la máquina. Método 3, cortocircuito continuo

La máquina se impulsa a velocidad nominal con un cortocircuito continuo entre los terminales de dos de sus fases y el neutro, como se ve en la figura 53. En este caso se deben tomar lecturas de la tensión del terminal abierto al neutro y de la corriente por el cortocircuito en las otras dos fases. Si se va a determinar la resistencia de secuencia cero, o si se va a realizar alguna corrección de la resistencia, se deben tomar lecturas de la potencia correspondiente a la tensión y a la corriente de prueba. La excitación del campo se ajusta para dar una serie de lecturas para los valores de la corriente normal, y si es posible, hasta tres veces la corriente nominal o mayores.

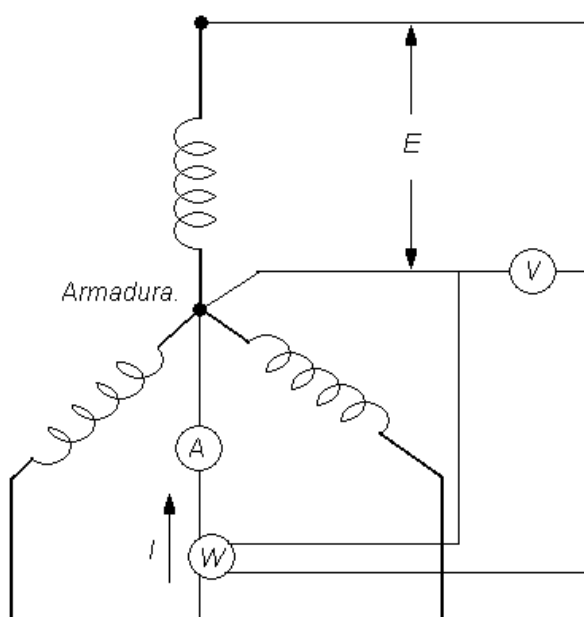


Figura. 53. Esquema de conexiones del método del cortocircuito continuo⁸⁰.

⁸⁰ Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995

- **Determinación de las cantidades de secuencia cero usando el método 3**

La impedancia de secuencia cero se obtiene mediante la utilización de la ecuación (5-73).

$$Z_0 = \frac{E_a}{I_n} \quad (5-73)$$

En donde:

E_a = Tensión de fase en el terminal abierto.

I_n = Corriente por el neutro.

En la mayoría de los casos las impedancias y reactancias de secuencia cero se asumen iguales. Cuando esto no se puede asumir, como por ejemplo en máquinas pequeñas, la reactancia de secuencia cero se calcula usando la ecuación (5-74).

$$X_0 = Z_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{an}}{E_a \cdot I_n} \right)^2} \quad (5-74)$$

En donde P_{an} es la lectura de wattmetro en por unidad de la potencia monofásica.

5.7.6.6. Resistencia de secuencia cero

La resistencia de secuencia cero solo tiene significado cuando la máquina se encuentra conectada en Y. Generalmente este valor no varía apreciablemente con la corriente. En el caso en el que varíe, el valor para la corriente nominal se determina dibujando la resistencia como una función de la corriente de secuencia cero y seleccionando el valor correspondiente a la corriente nominal.

- **Método 1, circuito paralelo**

Cuando se hacen pruebas de reactancia de secuencia cero de acuerdo a la sección 5.7.2.6.3.1, la potencia de entrada se mide con un wattmetro monofásico. Teniendo en cuenta lo anterior, la resistencia de secuencia cero se puede determinar con:

$$R_0 = \frac{3 \cdot P}{I^2} \quad (5-75)$$

En donde:

P = Potencia de prueba en por unidad.

I = Corriente total de prueba en por unidad.

Para esta prueba la corriente de secuencia cero es un tercio de la corriente total de prueba.

- **Método 2, circuito serie**

Cuando se hacen pruebas de reactancia de secuencia cero de acuerdo a la sección 5.7.2.6.4, la potencia de entrada se mide con un wattmetro monofásico. La siguiente ecuación permite la determinación de la resistencia de secuencia cero:

$$R_0 = \frac{P}{3 \cdot I^2} \quad (5-76).$$

En donde.

P = Potencia de prueba en por unidad.

I = Corriente total de prueba en por unidad.

- **Método 3, cortocircuito continuo**

Cuando se hacen pruebas de reactancia de secuencia cero de acuerdo a la sección 5.7.2.6.5, la potencia de entrada se mide con un wattmetro monofásico, y se calcula s expresión a partir de:

$$R_0 = \frac{3 \cdot P_{an}}{I_n^2} \quad (5-77).$$

En donde.

P_{an} = Lectura de wattmetro en por unidad.

I_n = Corriente por el neutro en por unidad.

5.7.7. Procedimientos de prueba y determinación de los parámetros para la resistencia de secuencia positiva de una máquina síncrona

La resistencia de secuencia positiva se puede usar en simulaciones de desbalances en los terminales del estator de una máquina. Si las pérdidas del estator bajo condiciones de operación son de interés, la resistencia de secuencia positiva puede usarse para calcularlas. Para una definición más clara de la resistencia de secuencia negativa se sugiere la revisión del estándar IEEE Std 100-1992.

5.7.7.1. Determinación a partir de pruebas

La resistencia CC de armadura se determina mediante ensayos y se corrige a una temperatura especificada.

La resistencia de secuencia positiva se determina utilizando la ecuación (5-78) o la ecuación (5-79).

$$R_1 = R_a + \frac{W_{L0} \cdot 10^3}{3 \cdot I_N^2} \quad \Omega \quad (5-78)$$

$$R_1 = \frac{1}{Z_N} \left(R_a + \frac{W_{L0} \cdot 10^3}{3 \cdot I_N^2} \right) \quad \text{En por unidad. (5-79).}$$

En donde:

R_a = Resistencia por fase de la armadura corregida a la temperatura especificada.

W_{L0} = Pérdidas por cargas parásitas a la corriente de línea base, en kW.

I_N = Corriente de línea base, en A.

Z_N = Impedancia base de la armadura.

Se debe verificar y registrar la temperatura para la cual se determina la resistencia de secuencia positiva.

5.7.8. Pruebas adicionales en estado estable para máquinas síncronas

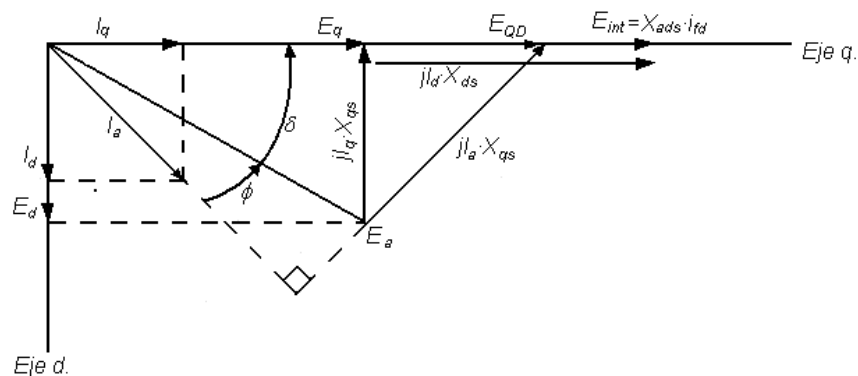
5.7.8.1. Determinación del cociente de cortocircuito (SCR)

Los procedimientos de prueba para determinar el (SCR) son muy similares a los utilizados para el cálculo de la reactancia síncrona de eje directo. Aunque este valor no se usa en estudios de estabilidad, si es usado para dar alguna idea de las características en estado estable de la máquina, también se considera una guía aproximada para determinar el tamaño y el costo relativo de una máquina síncrona.

5.7.8.2. Cálculos

$$SCR = \frac{I_{FNL}}{I_{FSI}} \quad (5-80)$$

I_{FSI} = Corriente de campo para corriente de armadura nominal durante un cortocircuito trifásico a frecuencia nominal.



5.7.8.4. Cálculo del ángulo interno

Un método aproximado de calcular el valor de δ utiliza la ecuación (5-81).

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_a \cdot X_{qs} (\cos \phi)}{E_a + I_a \cdot X_{qs} (\sin \phi)} \quad (5-81)$$

Si se observa en la figura 54, E_a e I_a corresponden a la tensión y corriente de armadura respectivamente, X_q es la reactancia síncrona de eje de cuadratura (también llamada X_{qs}) y ϕ es el ángulo del factor de potencia del generador.

5.7.9. Técnica de medida del estroboscopio

Este tipo de prueba se hace observando el cambio en la posición del rotor (ángulo de la carga) cuando la carga aplicada es de potencia, factor de potencia, y tensión especificados a cero-MW. La prueba se hace con frecuencia nominal. El cambio en la posición del rotor se observa usando el cambio en la escala del tiempo de señal entre un tacómetro digital y la forma de onda de la tensión en terminales. El objetivo del tacómetro se ubica generalmente en el eje del generador. La señal generada por el tacómetro óptico es comparada a la forma de onda sinusoidal de la tensión en terminales observando los cruces por cero, justo cuando la onda seno empieza a ser positiva.

El ángulo de carga en radianes eléctricos se calcula mediante la ecuación (5-82).

$$\delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (5-82)$$

En donde:

⁸² Grafica tomada del estándar IEEE Std. 115-1995

f = Frecuencia.

Δt = Cambio en la señal de tiempo.

5.7.10. Pruebas para evaluar los valores de las características transitorias y sub-transitorias

5.7.10.1. Generalidades

Estas pruebas involucran cambios repentinos en la armadura de la máquina. Los cambios repentinos en el circuito eléctrico de campo también son considerados. Tales cambios pueden ser producto de fallas monofásicas o fallas entre fases, también pueden debidos a fallas entre una o más fases en el neutro de la máquina.

5.7.10.2. Razones para realizar pruebas que involucren cambios repentinos en los circuitos de armadura o de campo

Los valores de las reactancias transitoria y sub-transitoria de las máquinas síncronas se han usado desde hace mucho tiempo con muchos propósitos. Inicialmente tales reactancias y las constantes de tiempo se calculaban para dar información de las magnitudes de las corrientes de cortocircuito y de su razón de cambio. Este conocimiento también permite calcular el impacto mecánico al que se someten los devanados de la armadura como producto de las corrientes excesivas que aparecen debido a las perturbaciones en o cerca de los terminales de la máquina.

5.7.10.3. Metodología seguida para realizar pruebas con la corriente de cortocircuito

Esta prueba se hace aplicando un cortocircuito trifásico en los terminales de la máquina con la máquina sin carga y en circuito abierto. Los valores obtenidos, son valores de eje directo. Estos se pueden obtener manteniendo la excitación de pre falla constante durante el decaimiento de las corrientes de falla trifásica a valores de estado estable.

Existe una justificación teórica para desarrollar ecuaciones de corto circuito, las cuales dan resultados que se ajustan a los valores de prueba de cortocircuito. Esto se conoce como el teorema de flujo de campo acoplado, y es la base para asumir una tensión constante para la reactancia transitoria.

5.7.10.4. Detalles de procedimiento e instrumentación para la obtención de datos de la prueba de cortocircuito

- **Calibración del equipo de prueba**

Cuando los resultados de la prueba se determinan a partir de valores variantes de la corriente y de la tensión durante las primeras etapas de un cortocircuito antes de alcanzar el estado estable, las corrientes y las Tensiones deben determinarse a partir de oscilogramas o algún medio equivalente. Cuando el cortocircuito implica dos o más fases, es esencial que el cortocircuito sea aplicado a través de un interruptor que cierre todas las fases casi al mismo tiempo, para evitar errores causados por el comienzo no simultáneo del cortocircuito en las diversas fases. Las puntas de los shunts o de los secundarios del transformador de corriente deben mantenerse unidas para minimizar las Tensiones inducidas en los circuitos de los instrumentos. Alternativamente, el uso de la tecnología de fibra óptica junto con las facilidades de la transmisión digital de datos, son muy recomendados, debido a que dichas herramientas eliminan el efecto de las Tensiones inducidas en el registro de las formas de onda de la corriente del cortocircuito.

- **Conexiones trifásicas en la armadura**

Los estudios realizados están basados en corrientes de línea, y por tal razón son aplicables a cualquier máquina conectada en Y o en delta.

- **Interpretación de los datos de prueba**

Dado que las corrientes y Tensiones son obtenidas a partir de oscilogramas, los resultados generalmente se expresan en por unidad. Si la forma de onda es senoidal o parecida, lo cual es usual es cortocircuitos trifásicos, el valor rms de la componente alterna de la corriente o de la tensión es determinado dividiendo la distancia entre crestas obtenida del oscilograma en la distancia de cresta a cresta de la corriente o tensión rms tomada como base. Cuando los valores rms cambian con el tiempo, curvas envolventes pueden dibujarse a través de las picos de las ondas, y el valor rms de la componente AC en por unidad es igual al cociente de la distancia vertical entre envolventes y el valor correspondiente a esa distancia en la forma de onda base.

- **tolerancia para las distorsiones en los resultados de prueba obtenidos de oscilogramas**

Si se usan oscilogramas de cortocircuitos para evaluar las impedancias, distorsiones en la forma de onda pueden hacer inexacto el método de la sección 5.7.3.4, especialmente en máquinas de polos salientes sin devanados amortiguadores continuos. Si la forma de onda es distorsionada, se puede cometer un error grande si solo se tienen en cuenta los valores pico de las ondas de corriente, razón por la cual se debe hacer un análisis de los armónicos. Sin embargo, si las medidas son calibradas con datos en estado estable, el efecto de distorsión en la onda es eliminado.

- **Efectos de corrientes no simétricas, diagramas con presencia de armónicos**

Cuando la corriente de corto circuito es no simétrica, pero la componente AC es senoidal o parecida, la componente DC puede leerse de los diagramas trazando una curva intermedia entre las envolventes. Si la corriente contiene armónicos de magnitud considerable, la línea que representa la componente DC no es la línea intermedia entre las envolventes. Esta línea puede ubicarse solo mediante un análisis de la forma de onda que determine la cantidad de armónicos y permita determinar el desplazamiento a partir del punto medio.

- **Mediciones y control de las cantidades de campo**

Se deben tomar lecturas de por lo menos una tensión de fase, de la corriente de armadura en cada fase en cortocircuito, y de la tensión y la corriente de campo. La tensión de armadura y la corriente de campo justo antes de que la máquina entre en cortocircuito se deben leer de las indicaciones de los instrumentos. El sistema de excitación no debe reforzar la corriente de campo durante la prueba.

- **Medidas de las cantidades en estado estable**

Los valores de la corriente de cortocircuito en la armadura en estado estables son necesarios para el análisis de las reactancias y de las constantes de tiempo. Estas se pueden obtener mediante un registro continuo hasta que se alcanza el estado estable. Debido a que el decaimiento final de la corriente de armadura es muy gradual, es muy difícil determinar cuando se ha alcanzado el estado estable. Una alternativa ante esta situación es detener los registros durante los segundos iniciales y reiniciarlos una vez se ha llegado al estado estable. Las indicaciones dadas por los instrumentos para los valores de la corriente de armadura en estado estable y la correspondiente corriente de campo pueden usarse para revisar o calibrar los oscilogramas.

5.7.10.5. Precauciones necesarias para realizar pruebas de cortocircuito

Las precauciones tomadas en los aspectos de la seguridad implican apoyar las bobinas de la armadura, en los lugares que sea necesario. También se incluyen requisitos de puesta a tierra de los devanados de la armadura, así como para las derivaciones usadas para medir la corriente de la armadura. Una revisión de los dispositivos de protección que se deben desactivar durante las pruebas también se recomiend

6. CONCLUSIONES

- ✓ En este trabajo se realizó una búsqueda bibliográfica de los procedimientos de prueba recomendados por la IEEE⁸³ para los diferentes tipos de máquinas eléctricas, el cual deberá contribuir a la enseñanza de la asignatura máquinas eléctricas.
- ✓ A partir de la búsqueda anterior se proponen unas guías de laboratorio, las cuales se ajustan en lo posible a las recomendaciones dadas por IEEE, con ellas se pretende que el estudiante profundice en los conceptos fundamentales de las máquinas eléctricas y tenga un acercamiento a uno de los posibles campos de desempeño laboral.
- ✓ En este trabajo de grado se proponen recomendaciones de seguridad para la realización de procedimientos de prueba en el laboratorio de maquina eléctricas, esperando proteger la integridad física de las personas y de los equipos.

⁸³ The Institute of Electrical and Electronics Engineers

- ✓ Con las guías de laboratorio propuestas en este trabajo de grado, se logra un mayor aprovechamiento de las instalaciones del laboratorio de máquinas eléctricas.
- ✓ Se recomienda que el material utilizado, como guía para el desarrollo de las prácticas, sea actualizado periódicamente. Esto permitirá que los estudiantes renueven su conocimiento acerca de las normas que rigen el sector eléctrico, en este caso las relacionadas con los procedimientos de prueba para las máquinas eléctricas.
- ✓ Se recomienda que los grupos de laboratorio sean pequeños, esto permite reducir los riesgos de accidentes durante la *práctica* y garantiza que los estudiantes aprovechen de mejor manera el tiempo destinado al laboratorio.
- ✓ Se recomienda que todos los ensayos realizados sobre un tipo de maquina en especial, se hagan sobre el mismo dispositivo y de esta manera se pueden hacer comparaciones de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas.
- ✓ Se recomienda la realización previa de una simulación de las diferentes pruebas, esto permite realizar comparaciones del desempeño de la maquina bajo condiciones ideales y bajo condiciones de operación reales.
- ✓ Algunos de los procedimientos de prueba recomendados por IEEE no se pueden realizar en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad, debido a que este carece de cargas adecuadas para la realización de estas pruebas.

- ✓ Se recomienda la adecuación de todos los bancos existentes en el laboratorio para la realización de las prácticas, de esta manera los grupos de trabajo pueden ser más pequeños.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, IEEE Std C57.12.91-2001

[2] IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers Including Those with Solid- Cast and/or Resin-Encapsulated Windings, IEEE Std C57.12.01-1998

[3] IEEE Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers, IEEE Std C57.12.70-2000.

[4] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.90™-2006

[5] IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.00™-2006

[6] IEEE Std 113-1985 (Revision of IEEE Std 113-1973), IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines

[7] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112™-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996)

[8] IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, IEEE Std 114-2001 (Revision of IEEE Std 114-1982)

[9] IEEE: Std 1158-1995 (Revision of IEEE Std 115-1983 and IEEE Std 115A-1987), IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, Part I--

Acceptance and Performance Testing, Part II-Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis.

[10] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, IEEE Std 43-2000(R2006)

[11] Cesar Augusto Vargas Potes, Operación y mantenimiento de las máquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander, Pág. 118, 1971.

[12] ANSI C50.10- 1977, American National Standard General Requirements for Synchronous Machines.

[13] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[14] Guru, B. S y H. R. Hiziroglu, Máquinas eléctricas y Transformadores, Alfaomega, 2006.

[15] Harlow, James H. "Transformers", The Electric Power Engineering Handbook, Ed.L.L. Grigsby Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

[15] S.V.Kulkarni and S.A.Khaparde, Transformer Engineering: Design and Practice, Chapter 1: Transformer Fundamentals.

[17] Ion Boldea, Synchronous Generators, Chapter 7: Design of Synchronous Generators

ANEXO 1. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

Las actividades realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas implican ciertos riesgos para el personal que allí trabaja, a continuación se presentan algunas recomendaciones de seguridad para la realización de las prácticas:

- ✓ Debe existir una clara señalización de las salidas de emergencia existentes en las instalaciones del laboratorio.
- ✓ Los extinguidores de fuego deben estar ubicados en lugares de fácil acceso. Es necesario someterlos a procesos de mantenimiento periódicos.
- ✓ Para prevenir lesiones en los estudiantes y operarios, se debe evitar el uso de manillas, anillos, pulseras, cadenas, relojes, etc. O cualquier elemento que pueda entrar en contacto físico o eléctrico con las máquinas bajo prueba.
- ✓ Durante la práctica, el estudiante debe utilizar calzado cerrado, no debe utilizar bermudas, si tiene el cabello largo, lo debe llevar recogido.
- ✓ No se permite ingerir alimentos ni bebidas dentro del laboratorio.
- ✓ Se debe verificar que la capacidad y el rango seleccionado en los instrumentos de medida sean los adecuados para los niveles de tensión y corriente que se manejan durante la prueba.
- ✓ Antes de realizar el montaje de los esquemas de prueba, se debe verificar que ninguno de los elementos se encuentre energizado.

- ✓ Antes de energizar el circuito pida la supervisión del personal encargado del laboratorio.
- ✓ Previamente se deben realizar todos los cálculos necesarios en base a los valores nominales plasmados en la placa de características de las máquinas con el fin de conocer de antemano los niveles de tensión, corriente y potencia que se van a manejar durante la prueba y de esta manera seleccionar los instrumentos de medida y sus rangos.
- ✓ Verifique que las piezas y puntas de medición están fijadas correctamente en las máquinas antes de energizar el circuito.
- ✓ Una vez finalizadas las pruebas, se debe verificar que las máquinas y dispositivos estén desenergizados y que aquellas que sean de tipo rotativo se encuentren en reposo.
- ✓ Para realizar las diversas conexiones, utilice las puntas de seguridad con las que cuenta el laboratorio, verifique que la clasificación CAT⁸⁴ sea adecuada para los niveles de tensión se la adecuada para los niveles de tensión que se van a manejar durante la prueba.
- ✓ Cuando se requiera realizar una medición sobre el circuito energizado, trate de acercarse lo menos posible.
- ✓ Se debe realizar periódicamente un mantenimiento preventivo en la máquinas eléctricas existentes en el laboratorio, para garantizar de esta manera, que los resultados obtenidos a partir de los procedimientos de prueba sean correctos.

⁸⁴ Categoría de medición

A continuación se hacen algunas recomendaciones de seguridad para la realización de procedimientos de prueba hechos a máquinas eléctricas. Dichas recomendaciones se encuentran separadas según el tipo de máquina de la siguiente manera:

1. Durante los ensayos realizados a transformadores se deben tener en cuenta:

- ✓ En las practicas con transformadores, se debe tener cuidado con la interrupción abrupta del paso de corriente.
- ✓ En la pruebas de cortocircuito se debe tener cuidado de no aplicar la tensión nominal, ya que esto implicaría el flujo de corrientes de cortocircuito superiores a la nominal, lo cual puede deteriorar los sistemas de aislamiento de la maquina.
- ✓ Si se utilizan elementos analógicos, estos deben tener un amplio rango para la deflexión de la aguja.
- ✓ Para proteger el voltmetro de lesiones por deflexiones fuera de su escala, este debe desconectarse del circuito antes de interrumpir el paso de la corriente.
- ✓ El personal se debe proteger del golpe inductivo, para esto la corriente se debe desconectar utilizando un interruptor que tenga un aislamiento adecuado.
- ✓ La aplicación de tensiones altas durante los ensayos dieléctricos puede ocasionar o acelerar futuras averías en aislamientos de la máquina, por tal razón, este tipo de pruebas no debe realizarse periódicamente.

- ✓ Todas las pruebas se deben interrumpir inmediatamente en el caso de que la corriente no se estabilice
 - ✓ Durante las pruebas de cortocircuito se debe considerar que la tensión con la que se excita el transformador, no debe ser mayor que 1.1 veces la tensión nominal del devanado o del TAP que se esta energizando.
2. Cuando se realizan procedimientos de prueba a máquinas de corriente continua se deben considerar las siguientes recomendaciones de seguridad:
- ✓ Cuando se este trabajando con máquinas de corriente continua se debe evitar las suspensión de la corriente de excitación, ya que esto produce grandes incrementos en la velocidad, los cuales pueden ocasionar daños en el equipo y posibles lesiones en las personas alrededor de la máquina.
 - ✓ Si la dirección de rotación no se especifica, los motores se deben probar con una rotación en el sentido contrario de las manecillas del reloj y los generadores en el sentido de las manecillas del reloj.
 - ✓ Durante el desarrollo de pruebas para la medición de la resistencia, la corriente y el tiempo de circulación deben ser limitados para prevenir daños en el colector debidos al calentamiento local causado por la circulación de esta corriente.
 - ✓ Durante la realización de pruebas de alto potencial para la determinación de la resistencia de aislamiento se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones de seguridad:

- Se prevenir el contacto con cualquier parte del circuito o aparato mientras las pruebas dieléctricas están en marcha.
 - Debido a la alta tensión usada la cual puede causar lesiones permanentes o la muerte, las pruebas de alto potencial deben ser realizadas únicamente por personal experimentado.
 - Estas pruebas deben ser aplicadas cuando y solo cuando, la máquina esta en buenas condiciones y la resistencia de aislamiento no se ve afectada por la contaminación o la humedad.
 - Los devanados bajo prueba deben ser descargados cuidadosamente a fin de evitar lesiones en el personal debidos a contactos accidentales.
 - Debe evitarse la aplicación reiterada de este tipo de pruebas ya que esto degrada las cualidades dieléctricas del sistema de aislamiento.
 - La tensión nunca debe llevarse a cero desde el valor máximo en un solo paso.
- ✓ Cuando se realiza el ensayo de vacío se debe considerar que si la máquina bajo prueba no tiene polos de conmutación y esta construida con las escobillas ubicadas fuera del neutro tal prueba puede ser perjudicial y no determina el verdadero estado de la maquina.
 - ✓ Los ensayos para la determinación de las pérdidas rotacionales no se deben realizar en máquinas sin polos de conmutación o que estén construidas con las escobillas ubicadas fuera del neutro, ya que los

resultados de esta prueba pueden resultar destructivos y poco significativos.

- ✓ Si el campo paralelo esta en circuito abierto, durante las pruebas para la determinación de la Inductancia no saturada, se pueden presentar altas tensiones en este devanado, las cuales pueden causar lesiones al personal y daños en los equipos.

3. Las siguientes son algunas recomendaciones que se deben considerar durante el desarrollo de pruebas en máquinas de inducción.

- ✓ Durante la realización de pruebas con el rotor bloqueado es necesario tener en cuenta que dicha prueba implica altos niveles de esfuerzo mecánico y altas tasas de calentamiento. Por tal razón, es necesario que:
 - Los medios mecánicos utilizados para asegurar la máquina y bloquear el rotor posean la fuerza necesaria para prevenir posibles lesiones a los operarios o daño al equipo.
 - La dirección de la rotación debe determinarse antes de prueba para poder aplicar los métodos de bloqueo y el torque adecuados.
 - La máquina se encuentre a una temperatura aproximadamente igual a la ambiente antes de que se iniciar el ensayo.
 - Las lecturas de la corriente y del torque se deben tomar tan rápido como sea posible, y, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder el incremento de temperatura nominal en más 40 °C.

- Las lecturas para cualquier punto deben ser tomadas 5 segundos después de que la tensión es aplicada.
 - ✓ En las pruebas de temperatura la maquina es sometida a esfuerzos térmicos y/o mecánicos más allá de límites normales del funcionamiento. Para reducir al mínimo el riesgo de daño a la máquina, se recomienda que todas las pruebas estén realizadas bajo supervisión del fabricante o de acuerdo a sus recomendaciones.
 - ✓ En una prueba de entrada-salida no se pueden permitir cambios rápidos en la frecuencia, ya que ellos producen cambios en la velocidad. Las variaciones en la frecuencia durante la prueba no deben exceder el 0.33% del promedio de la frecuencia.
4. Durante la realización de pruebas a las máquinas síncronas se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones para garantizar la seguridad de los equipos y de las personas encargadas del ensayo:
- ✓ Es importante que las lecturas de corriente sean tomadas reduciendo el valor de excitación, comenzando con el valor que produce una corriente de armadura igual al máximo permitido
 - ✓ El valor máximo de corriente durante el ensayo es por lo general 125% del valor nominal, no obstante, este valor debe ser avalado por el fabricante, puesto que en algunas ocasiones los devanados del estator están diseñados para operar máximo al 100%.
 - ✓ Las pruebas debe realizarse en el menor tiempo posible, debido a las altas temperaturas que alcanza la máquina.

- ✓ La prueba debe iniciar con la corriente mas alta que soporte la máquina sin que esta sufra daños debido a las altas temperaturas, posteriormente de deben realizar ensayos con corrientes de menor magnitud.

ANEXO 2. GUÍAS DE LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÁCTICA 1. MEDICIÓN DE POTENCIA

3. Fundamentación teórica.

La obtención de los parámetros característicos de las máquinas eléctricas depende de la correcta medición de las variables eléctricas en cada procedimiento de prueba. Una de las variables más importante a medir es la potencia eléctrica. Con el desarrollo de esta práctica es espera adquirir algunos conceptos básicos acerca de las mediciones de potencia eléctrica en los sistemas eléctricos

1. objetivos.

- Medir la potencia de un sistema monofásico.
- Medir la potencia de un sistema trifásico.

2. equipo a utilizar.

- 1 Autotransformador.
- 3 Voltmetros.
- Cargas.
- 3 Wattmetros.

3.1. Método de los tres voltmetros.

Para la medición de potencia por este método se debe realizar el montaje mostrado en la figura 1.

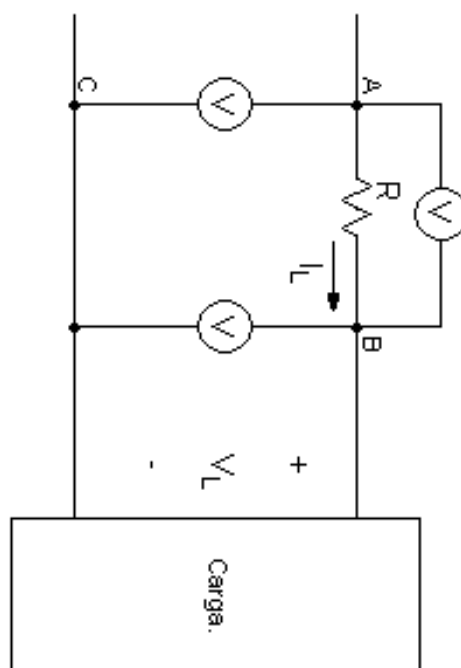


Figura 1. Esquema de conexiones para la medición de potencia por el método de los tres voltmetros.

Este método propone la medición de la potencia mediante mediciones de

Las tensiones alrededor de un elemento resistivo conectado en serie con la carga.

La ecuación utilizada para encontrar la potencia es la siguiente:

$$P_L = \frac{V_{AC}^2 - R^2 \cdot I_L^2 - V_L^2}{2 \cdot R} = \frac{V_{AC}^2 - V_{AB}^2 - V_{BC}^2}{2 \cdot R}$$

3.2. medición de potencia Monofásica con un wattmetro.

La medición de potencia monofásica se puede realizar utilizando un wattmetro. La figura 2 muestra el esquema de conexiones necesario para realizar la medición.

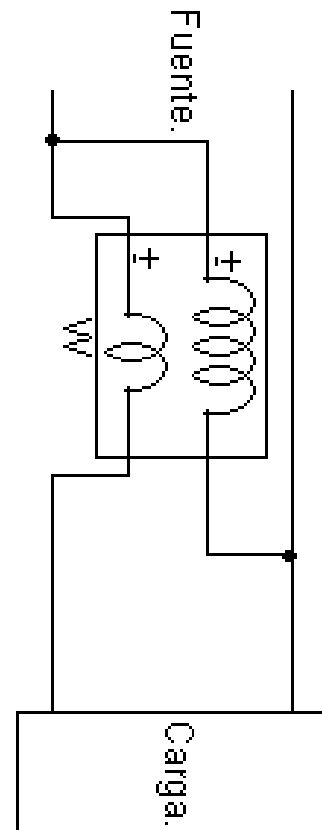


Figura 2 Esquema de conexiones para la medición de potencia con un wattmetro.

3.3. Medición de potencia trifásica con dos wattmetros (conexión Aron)

Con la utilización de este método se obtiene una evaluación adecuada de la potencia activa trifásica.

En cuanto a las potencias reactiva y a aparente se pueden generar algunos errores dependiendo de las

características del sistema. La figura 2 es el diagrama de conexiones de usado en este método.

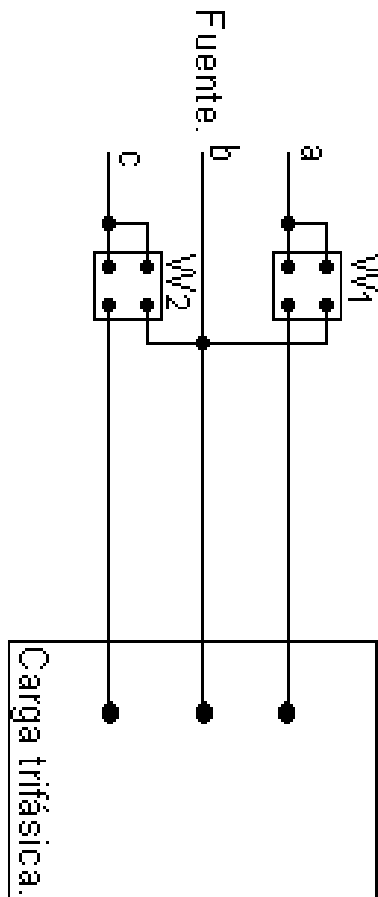


Figura 3. Conexión Aron.

Con las lecturas tomadas de los wattmetros y utilizando la siguiente ecuación se puede obtener la potencia activa trifásica.

$$P_{3\phi} = W_1 + W_2$$

Si la carga es equilibrada y balanceada, los valores de la potencia reactiva y del factor de potencia se pueden calcular de la siguiente manera.

$$Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1)$$

$$FP = \frac{W_1 + W_2}{\sqrt{4 \cdot W_1^2 + 4 \cdot W_2^2 - 4 \cdot W_1 \cdot W_2}}$$

4. Preguntas para antes de la práctica.

- ¿Existen otros métodos para la medición de potencia trifásica?
- ¿que ocurre con los cálculos de la potencia reactiva y del factor de potencia si la conexión Aron se utiliza en un sistema desbalanceado?

5. Procedimiento

- Mida la potencia de un sistema monofásico utilizando el método de los tres voltmetros y el del wattmetro.
- Mida la potencia trifásica de un sistema balanceado y de un sistema desbalanceado usando

la conexión Aron y uno de los métodos consultados antes de la práctica.

6. Preguntas para después de la práctica.

- ¿cuál es el error cometido al medir la potencia mediante los diferentes métodos tanto en el caso monofásico como en el trifásico?

PRACTICA 2. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS, ENSAYOS PRELIMINARES

Debido a los diferentes niveles de tensión a los que están sometidos los transformadores, y con el fin de garantizar la correcta operación de los mismos, es necesario someter a los equipos de transformación a cierto tipo de pruebas. Con el desarrollo de la presente práctica se espera determinar algunos aspectos fundamentales de los transformadores de potencia monofásicos, que serán utilizados para el correcto modelado de este tipo de máquinas, así como para su caracterización ante diferentes situaciones de carga. Dichas pruebas se enumeran a continuación:

- Medición de la resistencia de aislamiento.
- Medición de la resistencia de los devanados.
- Determinación de la polaridad.
- Determinación de la relación de transformación.

1. Objetivos

- Determinar la resistencia de aislamiento.
- Determinar la resistencia de los devanados.
- Determinar la polaridad de un transformador monofásico.
- Determinar la relación de transformación de un transformador monofásico.

2. Equipo a utilizar

- 2 voltmetro
- 1 amperometro

3. Fundamentación teórica.

3.1. Resistencia de aislamiento

La resistencia de aislamiento a tierra es una indicación útil de si la máquina está en condiciones adecuadas para

la aplicación de pruebas de alta tensión o pruebas de funcionamiento

Este ensayo es realizado para determinar la resistencia de aislamiento de un devanado individual a tierra o entre devanados individuales.

La aplicación de grandes niveles de tensión durante los ensayos dieléctricos puede ocasionar o acelerar futuras averías en los aislamientos de la máquina, es por esto que la realización periódica de pruebas de este tipo no se recomienda.

Según el estándar IEEE Std C57.12.91-2001, la resistencia de aislamiento es del orden de megaohms. Por lo tanto se sugiere la utilización de un megohmmetro para realizar esta medición. Otro método aplicable para la estimación de este parámetro, consiste en la utilización de la ley de ohm a partir de mediciones de tensión aplicada y corriente de fuga.

3.1.1. Preparación de la prueba

Antes de realizar la medición de la resistencia de aislamiento, se debe cumplir con las siguientes condiciones.

- Los devanados estén en su ambiente normal de aislamiento.
- Todos los devanados deben ser cortocircuitados.
- La temperatura del transformador debe ser aproximadamente de 20°C .

3.1.2. Instrumentación

La resistencia de aislamiento puede ser determinada usando cualquiera de los siguientes elementos de medición.

- Una fuente CC de tensión variable, que tenga medidores para el registro de tensión y de la corriente.
- Un megohmmetro.



3.1.3. Tensión aplicada durante la prueba

La tensión CC aplicada para la medición de la resistencia de aislamiento a tierra, no debe exceder un valor igual al de la tensión de baja frecuencia que se especifico.

3.1.4. Procedimiento

- Se unen con respecto a tierra los devanados de igual nivel de tensión. Los devanados de diferentes niveles de tensión, se prueban por separado.
- La tensión se aumenta en pasos (el valor de cada paso debe estar entre 1 y 5 kV), el incremento de tensión se debe mantener durante 1 minuto.
- Si la corriente de fuga tiende a incrementarse, es decir, no se estabiliza, el ensayo debe interrumpirse inmediatamente.

3.2. Resistencia de los devanados

La medida de la resistencia es de gran importancia para el cálculo de las pérdidas i^2R en los conductores, y es una base importante para la detección de posibles daños los devanados del transformador, además es un parámetro fundamental en el cálculo de la eficiencia.

3.2.1. Métodos para la medición de resistencia

3.2.1.1. Método del volt-amperemetro

Este método es empleado cuando la corriente nominal del devanado del transformador en el cual se esta realizando la medición es mayor que 1 [A].

La medición se realiza aplicando corriente directa y tomando lecturas simultáneas de tensión y corriente. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 1.



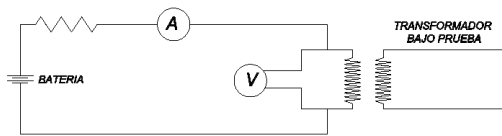


Figura 1. Esquema de conexiones para la medición de la resistencia de los devanados

El valor de la resistencia se calcula de acuerdo con la ley de Ohm, utilizando los valores de tensión y corriente que se obtuvieron durante la prueba. Se recomienda emplear una batería o un filtro rectificador, para prevenir vibraciones en la aguja del voltmetro, si se trata de instrumentos analógicos.

Para minimizar los errores en la medición, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Si se utilizan elementos analógicos, estos deben tener un amplio rango para la deflexión de la aguja.
- La polaridad del núcleo del transformador se debe

mantener constante durante todas las mediciones realizadas durante la prueba.

- Las terminales del voltmetro y del amperemetro deben conectarse tan cerca como sea posible cerca de los bornes del devanado

al cual se le esta efectuando la medición, esto con el fin de no incluir los valores de la resistencia de las puntas de prueba de los medidores [1].

- Para proteger el voltmetro de daños por deflexiones fuera de su escala, este debe desconectarse del circuito antes de interrumpir el paso de la corriente.
- El personal debe ser protegido del golpe inductivo, para esto la corriente debe ser desconectada por un interruptor que tenga un adecuado aislamiento.



- Las lecturas deben ser tomadas después que la corriente y tensión han alcanzado el estado estable.

3.2.1.2. Procedimiento

Para la realización de esta prueba debe realizarse el montaje mostrado en la figura1. Es necesario tomar por lo menos cuatro mediciones diferentes de tensión y corriente. El promedio de los valores de resistencia calculados a partir de estas medidas corresponde a la resistencia del circuito.

Los valores de corriente usados durante la prueba no deben exceder el 15% de la corriente nominal del devanado en el cual se esta realizando la prueba. Valores mas grandes pueden causar inexactitud debido al calentamiento del devanado haciendo que cambie el valor de la resistencia.

3.3. Identificación de los terminales y determinación de la polaridad

3.3.1. Marcación de los terminales e identificación de los devanados

Para distinguir los devanados de alta y baja tensión en transformadores monofásicos, se asigna la letra H al devanado de alta tensión y la X a los de baja.

3.3.2. Polaridad aditiva y sustractiva

3.3.2.1. Polaridad aditiva

Para determinada conexión de la fuente de potencia la disposición de las bobinas del transformador es tal que el flujo producido por la bobina del primario se suma al producido por el devanado secundario. En la Figura 2 se muestra la conexión de un transformador con polaridad aditiva



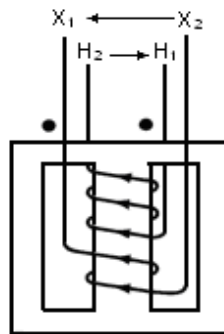


Figura 2. Transformador con polaridad aditiva

3.3.2.2. Polaridad sustractiva

La polaridad sustractiva indica que los flujos producidos en las bobinas del primario y secundario se están oponiendo entre si, ocasionando una disminución del flujo principal, la figura 3 muestra tal disposición

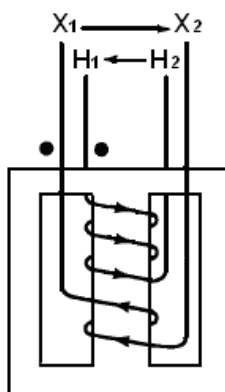


Figura 3 Transformador con polaridad sustractiva

3.3.2.3. Pruebas de polaridad para transformadores monofásicos

La determinación de la polaridad de un transformador se puede realizar de acuerdo con cualquiera de los siguientes métodos:

- Golpe inductivo
- Voltaje alterno
- Comparación

3.3.2.3.1. Prueba de polaridad por el método del golpe inductivo

La polaridad de los transformadores puede determinarse paralelamente a la determinación de la resistencia de los devanados, de la siguiente manera:

- Con corriente directa circulando a través del lado de alta tensión, se conecta un voltmetro en las terminales de dicho devanado, con el fin de



obtener una pequeña deflexión en la aguja del medidor

- b) Se Transfiere las puntas del voltmetro a las terminales del lado de baja tensión.

- c) Se suspende la excitación para inducir una pequeña tensión que causará una deflexión en el medidor.

Si la aguja del medidor deflece en dirección opuesta, entonces la polaridad es substractiva, de lo contrario, la polaridad será aditiva.

3.3.2.3.2. Prueba de polaridad mediante voltaje alterno (Método del puente)

Para transformadores con relación de transformación 30 a 1 o menor, Un terminal del lado de alta tensión el cual se denominara H1 se conecta al terminal adyacente del lado de baja tensión, como se muestra en la figura 4

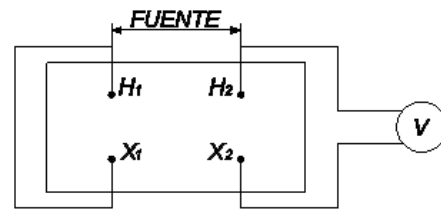


Figura 4. Esquema para la prueba de polaridad mediante Tensión alterna (método del puente)

Un valor adecuado de tensión se aplica en el devanado de alta tensión, y se toman mediciones de la tensión entre las terminales que no se unieron. Si la tensión medida es mayor que la aplicada, se dice que la polaridad es aditiva, es decir, el puente de polaridad une puntos de diferente polaridad. Si la tensión que indica el medidor es menor que la aplicada entonces la polaridad es sustractiva, por lo tanto el puente une puntos de igual polaridad.

3.3.2.3.3. Polaridad por comparación

Cuando se cuenta con un transformador con polaridad y relación de transformación conocidas, y que son iguales a los de la máquina



bajo prueba, se puede realizar el siguiente procedimiento:

- Conectar los devanados de alta tensión en paralelo, uniendo los terminales que tienen la misma designación.
- Conectar los terminales de bajo voltaje, X_2 , de los dos transformador, dejando libres los terminales X_1 .
- Con estas conexiones se debe aplicar en los devanados de alta tensión un valor reducido de tensión y medir el voltaje entre las dos terminales que quedaron libres. Un valor cero o cercano a él indicará que las polaridades de los dos transformadores son iguales.

El voltímetro se puede sustituir por fusibles o lámparas adecuadas, este procedimiento se recomienda como medida de precaución antes de conectar del medidor.

El esquema de conexión se muestra en la figura 5.

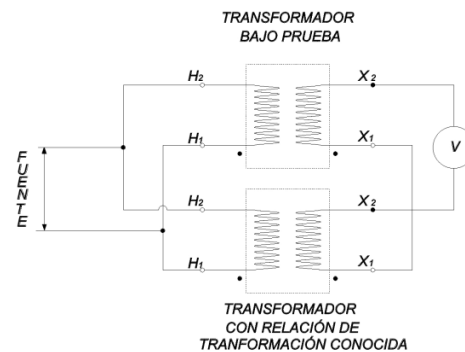


Figura 5. Montaje la determinación de polaridad mediante el método de comparación

3.4. Determinación de la relación de transformación.

La relación de transformación de un transformador esta dada por el número de vueltas del devanado de alta respecto al de baja tensión.

3.4.1. Métodos para la determinación de la relación de transformación

Según el artículo 9 del estándar IEEE Std C57.12.01-1998, se establece que al aplicar tensión nominal en un devanado del transformador, todas las otras tensiones en vacío no deben exceder en 0.5% de los valores



especificados en la placa característica del transformador

A continuación se describen algunos de los métodos existentes para la determinación de la relación de transformación en un transformador monofásico.

3.4.2. Método del voltmetro

Este método utiliza dos voltmetros, uno de ellos medirá la tensión en el devanado de alta del transformador mientras que el otro lo hará en el lado de baja. Las lecturas de los dos voltmetros deben realizarse simultáneamente.

Se debe realizar una segunda prueba en la que los voltímetros se intercambian, es decir, el que se usó para medir la tensión en el devanado de alta medirá ahora la tensión en el lado de baja, y el que se usó en el lado de baja medirá ahora la tensión en el devanado de alta, esto con el fin de compensar el error debido a los instrumentos.

Las medidas realizadas por los medidores deben ser las mismas después del intercambio, de no ser así se deben aplicar las correcciones adecuadas a dichas lecturas.

El valor de la relación de transformación será el valor promedio de las dos mediciones.

La prueba debe ser realizada tomando no menos de 4 de cuatro valores de tensión, los cuales deben aumentar en 10% del valor anterior. Los resultados deben diferir en no mas del 1% de cada valor, si esto no se cumple el ensayo deberá repetirse con otros voltímetros.

Cuando se deben probar varios transformadores con los mismos valores nominales, se puede aplicar el método anterior a uno de ellos. Luego por comparación se determina la relación de transformación de los otros transformadores.

3.4.3. Método de comparación



Este método se recomienda cuando se dispone de un transformador con relación de transformación conocida y se quiere averiguar este parámetro en otra maquina de características similares.

El transformador al cual se le va a efectuar la prueba es excitado en paralelo con la máquina que tiene la misma relación de transformación. Los devanados secundarios de ambos transformadores se conectan en paralelo, el voltmetro se conecta entre los dos terminales de igual polaridad como se muestra en la figura 6

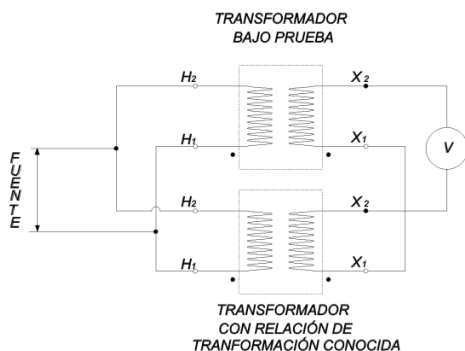


Figura 6. Montaje para la determinación de la relación de transformación mediante el método de comparación

Como método alternativo, el transformador que se va a probar es excitado en paralelo con el transformador del cual se conoce la relación de transformación, los voltímetros son conectados como se muestra en la figura 7.

La prueba se debe repetir intercambiando los voltmetros. El promedio de las tensiones será el valor correcto para usar en el cálculo de la relación de transformación.

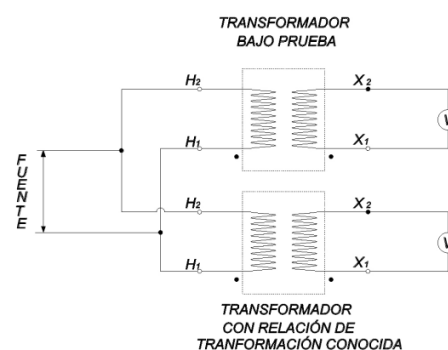


Figura 7. Montaje para la determinación de la relación de transformación mediante el método de comparación (método alternativo)

4. preguntas para antes de la práctica.



- ¿Cuál es la diferencia entre la designación de polaridad europea y americana?
 - Explique cuales son los tipos de aislamientos presentes en un transformador.
 - ¿A qué se deben los daños en los aislamientos de los transformadores?
 - Defina y explique que es el nivel básico de aislamiento
- b) Verifique la polaridad de los devanados por medio todos los métodos descritos.
 - c) Mida y calcule la relación de transformación del transformador empleado.
 - d) Mida la resistencia de aislamiento del transformador.

Referencias y bibliografía

[1] Francisco Rueda, introducción al estudio de los transformadores, Universidad industrial de Santander, Pág. 67, 1984.

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] IEEE Std C57.12.91™-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers

[4] IEEE Std C57.12.00™-2006, IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed

5. Procedimiento

- a) Realice un esquema del transformador indicando cuales bornes corresponden al mismo arrollamiento. Determine cuales son los bornes de alta y cuales son los de baja, por medio de la medición de resistencia y continuidad en los devanados.





UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



Distribution, Power, and Regulating

Transformers

[5] Guru, Hiziroglu, Maquinas
eléctricas y transformadores,
Alfaomega, Oxford, 2003.





Practica 3. Determinación de la eficiencia de un transformador monofásico

El cálculo de eficiencia en un transformador se constituye en una herramienta fundamental para conocer el estado de la maquina. Para determinar este parámetro se hace necesaria la estimación de los diferentes tipos de pérdidas que se presentan en un transformador. Durante el desarrollo de la presente práctica se estimará la eficiencia para el caso de un transformador monofásico con la ayuda del circuito equivalente. Para la determinación de los parámetros del circuito se realizaran los ensayos de corto circuito y de vacío.

1. Objetivos.

- Estimación de los parámetros característicos del transformador.
- Determinación de la eficiencia de un transformador monofásico.

2. Equipo a utilizar.

- Un transformador monofásico.
- Un voltmetro.
- Un amperometro.
- Un wattmetro
- Un transformador de corriente.

3. Fundamentación teórica.

Pérdidas sin carga y corriente de excitación.

Las pérdidas de potencia del transformador sin carga (en vacío), son aquellas debidas a la corriente de excitación del transformador.

Estas pérdidas se presentan debido al ciclo de histéresis, a las corrientes parásitas y a las pérdidas en el

material dieléctrico. Esta energía consumida por el transformador varía con la tensión de excitación.

3.2. Corriente de excitación

La corriente de excitación es la corriente primaria del transformador cuando su componente de carga es nula.

Generalmente se expresa dicha corriente en porcentaje de la corriente nominal del lado del transformador al que se realiza la medición

Las pérdidas en el núcleo son función de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la tensión aplicada, estas también varían con la temperatura y son

particularmente sensibles a la forma de onda, factor que puede hacer que las mediciones varíen de una prueba a otra.

El propósito de esta prueba es determinar la potencia consumida en

vacío del transformador para determinado valor de tensión y frecuencia que por lo general son los valores nominales de la máquina.

El método más preciso para corregir las pérdidas en vacío respecto a una onda senoidal es el que usa un voltmetro de valor promedio y que se explica a continuación:

Este método emplea dos voltmetros conectados en paralelo, uno es un voltmetro de valor promedio, el otro es un medidor de tensión calibrado con el valor rms, ver figura 1 y 2.

3.4. Diagramas de conexión

En el momento de realizar el ensayo, se puede o no utilizar transformadores⁸⁵ de instrumentación para proteger los medidores. A continuación se muestran los esquemas de conexiones con y sin transformadores de instrumentación.

⁸⁵ Estos transformadores se utilizan si las corrientes circulantes obtenidas durante el ensayo son mayores a las especificadas para los instrumentos de medida.

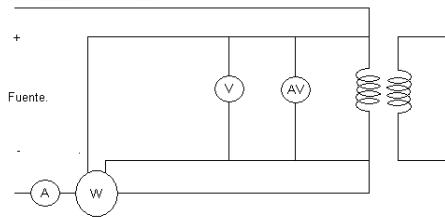


Figura. 55 esquema de conexiones para la prueba de vacío.

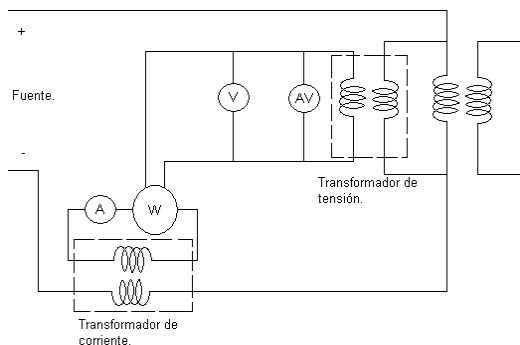


Figura. 56 Esquema de conexiones para la prueba de vacío utilizando transformadores de medida.

La prueba se puede realizar energizando los devanados de alta o baja tensión, no obstante, se recomienda excitar el transformador por el lado de baja tensión⁸⁶. Los valores con los que se alimenta la máquina pueden ser los nominales del transformador aunque si se requiere realizar el ensayo a un valor menor, este no debe ser menor que el 25% de la tensión nominal de cada

devanado. Se deben tomar lecturas de la tensión, de la corriente y de la potencia. La corriente de excitación corresponde a la corriente rms que registra el Amperemetro.

3.5. Pérdidas del transformador con carga y tensión de corto circuito

Las pérdidas de potencia con carga de un transformador, son aquellas que dependen de la carga que se le esta conectando a la máquina, y son las siguientes:

- Pérdidas $i^2 R$ en los devanados del transformador
- Pérdidas de potencia debido a corrientes de Eddy.

Las pérdidas bajo carga de un transformador, se pueden determinar cortocircuitando las terminales de alta o baja tensión y aplicando una tensión en el otro devanado tal que haga fluir determinada corriente por las bobinas cortocircuitadas.

La medición de la tensión de cortocircuito se realiza durante la

⁸⁶ Esto con el fin de manejar tensiones mas bajas durante la prueba, de manera que el riesgo para los equipos y las personas sea mínimo.

prueba de pérdidas de potencia del transformador con carga, midiendo la tensión necesaria para que circule la corriente nominal del devanado.

3.6. Factores que afectan los valores de las pérdidas con carga y la tensión de cortocircuito un transformador.

Las pérdidas de potencia de un transformador, así como la tensión de cortocircuito dependen tanto del diseño de la máquina como de las condiciones de operación de la misma, algunos de los factores que afectan estas características son:

- Diseño: características como el material del conductor, el material con el cual están hechos los devanados, la disposición de los devanados y la selección de los materiales que forman la estructura interna y externa del transformador.
- Temperatura: las pérdidas de potencia bajo carga son función de la temperatura, las

pérdidas i^2R aumentan con la temperatura debido a las características resistivas del material con el que están fabricados los devanados

- Mediciones: los medidores utilizados durante el ensayo afectan los resultados, debido a esto la selección del método de prueba adecuado es esencial para garantizar exactitud y repetitividad de los resultados.

3.7. Métodos para la determinación de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito

3.7.1 Método del Amperemetro-Voltmetro-Wattmetro

El diagrama de conexiones y el equipo necesario para la determinación de las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito para un transformador monofásico se presenta en la figura 3. Si en el momento de realizar la prueba, el montaje requiere de transformadores

de medida la figura 4 muestra las conexiones requeridas.

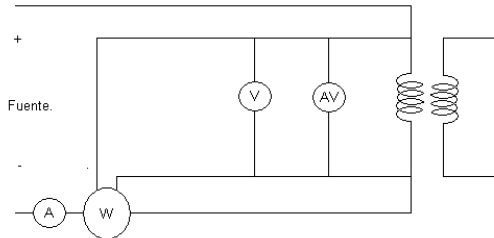


Figura. 57 Esquema de conexiones para la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico.

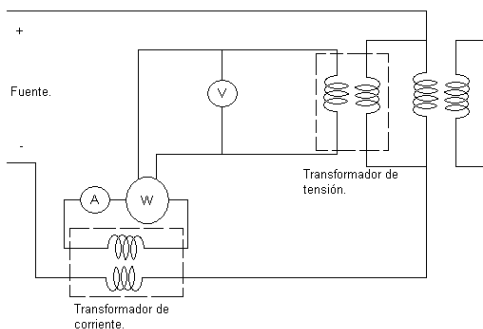


Figura. 58 Esquema de conexiones para la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico utilizando transformadores de medida.

3.7.2. Método del puente de impedancia.

Existen muchas configuraciones para la elaboración de montajes en puentes de impedancia, su selección

depende de los instrumentos e instalaciones con que se cuente y de la facilidad de realizar la prueba.

En la figura 5 se muestra el diagrama general de un puente de impedancia, este arreglo permite que una tensión proporcional a la corriente por el transformador bajo prueba, sea comparada con una tensión de referencia que es función del voltaje aplicado E_t . La comparación de tensión se realiza ajustando una o mas impedancias que componen el circuito (Z_1, Z_2 y Z_3) hasta que las tensiones en Z_2 y Z_3 sean iguales en magnitud y fase, esta medición se realiza mediante el instrumento DET, las características del transformador bajo prueba, son calculadas con los valores de Z_1, Z_2 y Z_3

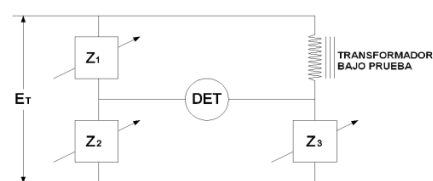


Figura. 59 Esquema del método del puente de impedancia.



4. Rendimiento del transformador.

El rendimiento de un transformador se define al igual que para cualquier maquina de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \quad (1)$$

En donde:

P_{out} Es la potencia de salida.

P_{in} Es la potencia de entrada.

Para la determinación de este parámetro se puede utilizar cualquiera de los siguientes métodos:

- **Método directo.**

Este método se basa en la medición directa de las potencias de entrada y de salida.

- **Método indirecto.**

Este método calcula la eficiencia mediante de las pérdidas de potencia presentes en la maquina. Las ecuaciones utilizadas son:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + p_{per}} * 100 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{per}}{P_{in}} * 100 \quad (3)$$

En donde P_{per} representa las pérdidas de potencia en la maquina.

5. Regulación de tensión.

La regulación de tensión se puede definir de dos maneras:

- Es el cambio en la tensión del devanado secundario, al pasar de vacío a plena carga, manteniendo la tensión primaria constante.

$$RV = \frac{E_2 - V_2}{V_2} * 100 \quad (4)$$

- Variación necesaria en la tensión primaria, al pasar de vacío a plena carga, manteniendo constante la tensión en el secundario.

$$RV = \frac{E_1 - V_1}{V_1} * 100 \quad (5)$$

6. Preguntas para antes de la práctica

- Investigar cómo a través de las mediciones realizadas en la estimación de las pérdidas sin carga y con carga se puede determinar el diagrama equivalente de un transformador monofásico.
- Si los valores durante la práctica no son los nominales, determinar como corregirlos para el cálculo del circuito equivalente.
- Calcular de acuerdo a los valores del transformador, la magnitud de las corrientes que circularán en los montajes.
- Determinar si es necesario emplear transformadores de instrumentación.
- El transformador entrega su máxima eficiencia para las condiciones nominales.

7. Procedimiento

- Medir la resistencia de los devanados del transformador.⁸⁷
- Realizar la prueba de vacío en un transformador monofásico.
- Realizar la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico.
- Realizar una grafica de la eficiencia de la maquina contra la potencia de salida.

8. Actividades para después de la práctica

- Calcule la eficiencia del transformador.
- Determine el circuito equivalente del transformador.
- Determine las pérdidas del transformador en vacío y a plena carga.

Referencias y bibliografía

[1] Francisco Rueda, introducción al estudio de los transformadores, Universidad industrial de Santander, Pág. 67, 1984.

⁸⁷ Seguir el procedimiento mencionado en la guía de la practica#.



[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] IEEE Std C57.12.91TM-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers

PRACTICA 4. ENSAYOS DE POLARIDAD, CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS Y VERIFICACION DE LAS DESIGNACIONES.

La polaridad de los transformadores es un parámetro que cobra gran importancia en el momento de conectar transformadores monofásicos en bancada trifásica o de verificar la designación de un transformador trifásico. Su determinación permite realizar conexiones precisas para el acople, por ejemplo, de dos transformadores en paralelo o el acople a una carga específica.

1. Objetivos:

- Determinar la polaridad de un transformador trifásico.
- Realizar conexiones de designaciones para transformadores trifásicos.
- Verificar las designaciones para distintas conexiones de transformadores trifásicos

2. Equipo a utilizar.

- Transformador trifásico.
- Un voltmetro.
- Una fuente de tensión AC
- Cables de conexión de seguridad.

3. Fundamentación teórica.

3.1 Polaridad de transformadores trifásicos

Según el estándar IEEE Std C57.12.91-2001, se establece que cada fase de un transformador polifásico tendrá la misma polaridad relativa cuando los ensayos se realicen de acuerdo con los métodos desarrollados para transformadores monofásicos⁸⁸.

⁸⁸ Los métodos de polaridad para transformadores monofásicos se encuentran en la guía número #

El método más utilizado en la práctica, es el método de comparación, el cual para el caso trifásico tiene ciertas variantes comparado con el caso monofásico. Este método se explica a continuación:

3.2 Método de comparación

Habiendo identificado las bobinas de alta y baja tensión que están sobre la misma columna del núcleo del transformador, se debe determinar la polaridad de una las fases (igual que para el caso monofásico) es decir:

Un terminal del lado de alta tensión el cual se denominara H1 se conecta con el terminal adyacente del devanado de baja tensión, como se muestra en la figura 1

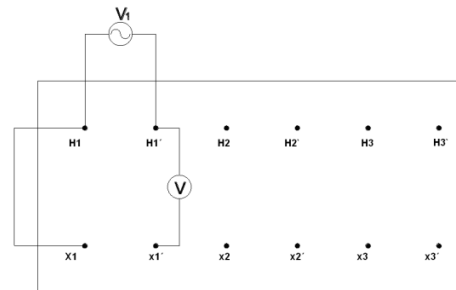


Figura 4. Determinación de la polaridad de una fase

Un valor adecuado de tensión se aplica en el devanado de alta tensión, y se toman mediciones de la tensión entre las terminales de manera que:

- Si $V < V_1$ el puente une bornes de la misma polaridad.
- Si $V > V_1$ el puente une bornes de diferente polaridad.

Luego se determina la polaridad de las demás fases con base en la primera, para este caso el puente se realiza entre los terminales de un par de bobinas de alta tensión, entonces aplicando una tensión reducida se mide la diferencia de potencial en los bornes que están libres (ver figura 2), de manera que:

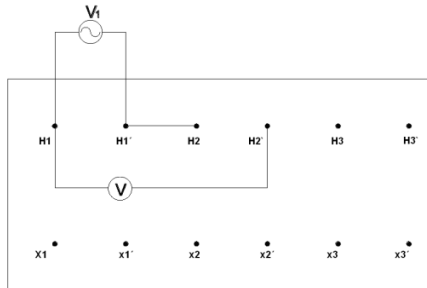


Figura 5. Determinación de la polaridad de una fase con respecto a la otra.

- Si $V < V_1$ el puente une bornes de diferente polaridad.
- Si $V > V_1$ el puente une bornes de igual polaridad.

La razón por la cual varía en este caso es que en el momento de la prueba el lado de alta de la fase B está actuando como secundario y el de la fase A como primario y en trabajo normal ambos actúan como primarios o secundarios [1]

La regla de polaridad se aplica de esta manera debido a que el flujo atraviesa los devanados de la columna en el mismo sentido, pero si se está determinando la polaridad de

los devanados de las otras columnas, los cuales están excitados, el flujo atraviesa dichos devanados en dirección opuesta.

Las conexiones y mediciones mencionadas anteriormente se realizan para las demás fases del transformador

3.3. Pruebas para determinar la correcta conexión de designación de un transformador trifásico

El diagrama fasorial de un transformador trifásico define tanto el desplazamiento angular como la secuencia del mismo, estas dos características definen la designación y correcta conexión de la máquina

El estándar IEEE Std C57.12.91-2001, recomienda el siguiente procedimiento para verificar el correcto funcionamiento de la designación:



- Conectar las terminales H1 y X1 para excitar el transformador a un valor bajo de tensión trifásica.
- Se toman medidas entre pares de bornes y se dibuja el diagrama fasorial.

Otra forma de hacerlo es comparando las magnitudes de las mediciones tomadas con los diagramas fasoriales que se muestran en el anexo 1

3.3. Designación de conexiones

Una forma de catalogar y diferenciar las diferentes conexiones trifásicas es a través de las designaciones en las que se tiene en cuenta la forma en la que están conectados los devanados de alta y baja tensión. También es posible verificar del desfase entre fases correspondientes medido en sentido horario y dividido en 30 grados. El estándar IEEE Std C57.12.91-2001, clasifica las conexiones trifásicas en dos grupos⁸⁹

- Grupo 1, desplazamiento angular 0 grados.
- Grupo 2, desplazamiento angular 30 grados

4. Preguntas para antes de la práctica

- ¿Cuál es la importancia de realizar una correcta conexión de una designación dada?
- ¿Cómo esta influenciada la polaridad de un transformador por la construcción de los devanados de la maquina?
- ¿Cuándo se puede decir que una conexión no existe?

5. Procedimiento:

1. Verifique la polaridad que se indica en el transformador

⁸⁹ En el anexo 1 se especifican los dos grupos con las respectivas conexiones de los devanados de alta y baja tensión

- utilizando el método del puente de polaridad⁹⁰
2. realice una conexión de cada grupo especificado por IEEE Std C57.12.91-2001
 3. verifique mediante comparaciones entre mediciones de tensión, la correcta conexión del procedimiento anterior.

[4] IEEE Std C57.12.00™-2006, IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

Referencias y bibliografía

[1] Francisco Rueda, introducción al estudio de los transformadores, Universidad industrial de Santander, Pág. 67, 1984.

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] IEEE Std C57.12.91™-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers

⁹⁰ Tenga en cuenta que no todos los transformadores tienen los devanados de la misma fase sobre la misma columna del núcleo



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



ANEXO 1 DIAGRAMA FASORIAL PARA CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA FÁSorial DE CONEXIONES	MEDICIONES DE PRUEBA
GRUPO 1 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 0 GRADOS	CONEXIÓN DELTA-DELTA		CONECTAR H1 CON X1 MEDIR: H2-X2, H3-H2, H1-H2, H2-X3, H3-X3 RELACIONES DE VOLTAJE 1) H2-X3=H3-X2 2) H2-X2<H1-H2 3) H2-X2<H2-X3 4) H2-X2=H3-X3
	CONEXIÓN Y-Y		
	CONEXIÓN DELTA-ZZ		
	CONEXIÓN ZZ-DELTA		
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR 30 GRADOS	CONEXIÓN DELTA-Y		CONECTAR H1 CON X1 MEDIR: H3-X2, H3-H3, H1-H3, H2-X2, H2-X3 RELACIONES DE VOLTAJE 1) H3-X2=H3-X3 2) H3-X2<H1-H3 3) H2-X2<H2-X3 4) H2-X2<H3-H3
	CONEXIÓN Y-DELTA		
	TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON TAPS 		

Practica 5. Pruebas de vacío y cortocircuito de un transformador trifásico

Los transformadores trifásicos son un componente primordial en los sistemas de potencia. Por tal razón se debe garantizar la adecuada representación de su funcionamiento. Para la obtención de sus elementos característicos, se deben realizar algunas pruebas en el laboratorio. Dichas pruebas determinaran el desempeño del transformador bajo una condición específica de carga.

1. Objetivo.

Realizar los ensayos de corto circuito y de vacío en un transformador trifásico.

2. Equipo utilizado.

- Un transformador trifásico.
- Voltmetros.
- Amperímetros.
- Wattmetros.
- Transformadores de medida.
- 1 autotransformador

3. Fundamentación teórica.

3.1. Pérdidas sin carga y corriente de excitación.

Los conceptos necesarios para la realización de este ensayo son los mismos que se utilizaron durante la prueba de vacío en un transformador monofásico.

Las conexiones necesarias son las mostradas en la figura 1. En este caso

será necesario utilizar tres wattmetros, uno por cada fase., además de transformadores de instrumentación.

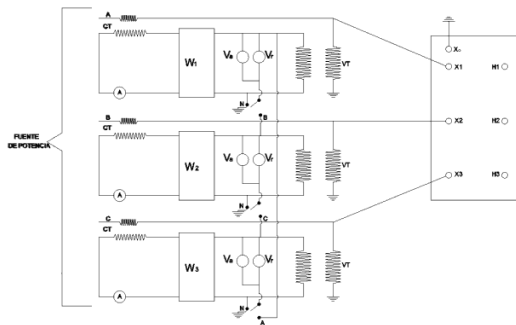


Figura. 60 Esquema de conexión con tres wattmetros para la prueba de vacío.

Es indispensable antes de realizar el montaje para la prueba, verificar la disponibilidad de equipos de medición para la toma de datos. En caso de no contar con los equipos señalados en la figura 1, la prueba se puede realizar utilizando una conexión que requiera solo dos wattmetros. El esquema de tal conexión se muestra en la figura 2.

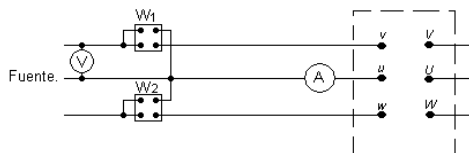


Figura. 61 Esquema de conexiones con dos wattmetros.

En este caso $W_0 = W_1 \pm W_2$ (1).

Debido a que el factor de potencia puede ser menor de 0.5 durante el ensayo de vacío, es posible que la lectura de uno de los wattmetros sea negativa.

$$P_0 = W_0 - \frac{3}{2} I_0^2 R_{med} - P_{instrumento} \quad (2)$$

En donde:

W_0 = Potencia calculada según la ecuación 1.

I_0 = Corriente de línea, medida por el amperímetro.

R_{med} = Resistencia medida entre los bornes del lado energizado.

$P_{instrumento}$ = Pérdidas en los instrumentos de medida.

P_0 = Pérdidas en vacío.

Con el fin de que la determinación de las pérdidas en vacío sea mas precisa, se deben tomar tres grupos de medidas, cambiando la fase de referencia cada vez. El valor promedio

de las tres mediciones corresponderá al valor adoptado como las pérdidas en vacío. La corriente de excitación se calcula tomando el valor promedio de las corrientes de línea del transformador.

3.2. Pérdidas del transformador con carga y voltaje de corto circuito.

Al igual que el ensayo de vacío, las recomendaciones y los conceptos necesarios para la realización de este ensayo son similares a los utilizados en un transformador monofásico⁹¹.

En este caso también se pueden utilizar solamente dos Wattmetros, no obstante, es posible encontrar de esta forma errores muy grandes debido a los muy bajos factores de potencia que se obtienen en estas pruebas⁹².

Para transformadores trifásicos se deben utilizar tres wattmetros. El

diagrama de conexiones se muestra en la figura 3.

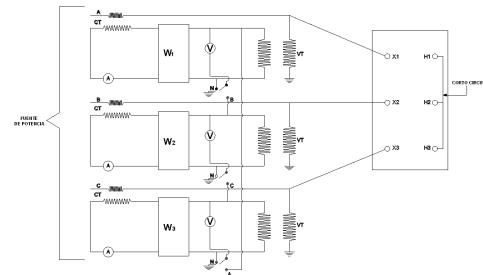


Figura. 62 Esquema de conexión con tres wattmetros para el ensayo de cortocircuito en transformadores trifásicos.

El esquema de conexiones con la utilización de dos wattmetros es el siguiente.

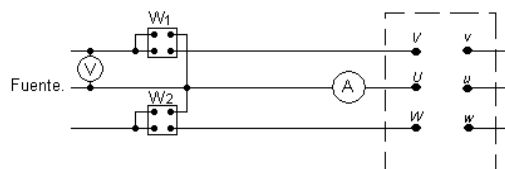


Figura. 63 Esquema de conexiones para el ensayo de cortocircuito utilizando dos wattmetros⁹³.

En este caso se debe alimentar con tensión reducida, hasta que la corriente medida corresponda al valor nominal.

⁹¹ Para mas información revisar la guía numero 3.

⁹² Es por esto que se recomienda no realizar la prueba con el método de los dos wattmetros.

⁹³ En este caso se debe alimentar por el lado de baja tensión, con una tensión reducida de tal manera que por el cortocircuito circule la corriente nominal del devanado de alta tensión.

Al igual que el caso del ensayo de vacío, se deben tomar tres grupos de lecturas, cambiando la fase de referencia cada vez. El valor promedio de los tres grupos de lecturas será el que se considere finalmente. Las pérdidas del cobre obtenidas corresponden a las pérdidas del cobre a carga nominal. Si el ensayo no se realiza con la corriente de cortocircuito igual a la nominal, las pérdidas deben corregirse utilizando la siguiente ecuación.

$$P_{cuN} = P_{cuX} \cdot \left(\frac{I_N}{I_{CC}} \right)^2 \quad (3).$$

En donde:

P_{cuN} = Pérdidas en el cobre a carga nominal.

P_{cuX} = Pérdidas en el cobre a una carga cualquiera.

4. Preguntas para antes de la práctica

- Investigar cómo a través de las mediciones realizadas en la estimación de las pérdidas sin carga y con carga se puede

determinar el diagrama equivalente de un transformador trifásico.

- Si los valores durante la práctica no son los nominales, determinar como corregirlos para el cálculo del circuito equivalente.
- Calcular de acuerdo a los valores del transformador, la magnitud de las corrientes que circularan en los montajes, determinar si es necesario emplear transformadores de instrumentación.
- ¿Cómo se calcula la regulación de tensión y la eficiencia en un transformador trifásico?
- ¿En que influye la realización de los ensayos de vacío y de cortocircuito bajo condiciones diferentes a las nominales?

5. Procedimiento.

- Medir la resistencia entre bornes de los devanados de alta tensión.
 - Realizar el ensayo de vacío en un transformador trifásico⁹⁴.
 - Realizar el ensayo de cortocircuito en un transformador trifásico.
- [2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.
- [3] IEEE Std C57.12.91TM-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers

6. Actividades para después de la práctica

- Calcule la eficiencia del transformador.
- Determine el circuito equivalente del transformador.
- Determine las pérdidas del transformador en vacío y a plena carga.

Referencias y bibliografía

[1] Francisco Rueda, introducción al estudio de los transformadores, Universidad industrial de Santander, Pág. 67, 1984.

⁹⁴ Para la realización de estos ensayos se recomienda la utilización del esquema de conexiones con dos wattmetros, debido a la cantidad de instrumentos de medida con que cuenta el laboratorio.

PRACTICA6. ENSAYOS PRELIMINARES DE UN MÁQUINA CC

Antes de conectar cualquier tipo de máquina ya sea por primera vez o después de un proceso de mantenimiento, es necesario realizar algunas pruebas preliminares para determinar si la máquina esta en condiciones adecuadas para su puesta en funcionamiento.

Debido a las corrientes, tensiones y fuerzas encontradas en las máquinas de corriente continua, se hace necesario tomar algunas precauciones de seguridad⁹⁵ antes de realizar cada uno de los ensayos en dichas máquinas, esto con el fin de garantizar la integridad de los equipos así como la del personal encargado de la prueba.

1. Objetivos.

⁹⁵ Para conocer a cerca de estas precauciones de seguridad, revisar el libro en su sección de máquinas de corriente continua.

- Identificar los bornes de los devanados de una máquina de corriente continua.
- Medir la resistencia eléctrica de los devanados.
- medir la resistencia de aislamiento.
- Determinar la zona neutra.

2. Equipo utilizado.

- 1 Megohmmetro.
- 2 Voltmetro.
- Amperometro.
- Máquina de corriente continua.
- Fuente de tensión CC.

3. Fundamentación teórica.

3.1. Identificación de los bornes de una máquina de corriente continua.

La máquina de corriente continua compuesta es la que presenta mayor cantidad de bornes. Esta máquina consta de los siguientes devanados.

- Devanado de la armadura.
- Devanado de excitación shunt.
- Devanado de excitación serie.
- Devanado auxiliar.

Para la identificación de cada uno de estos devanados se procede de la siguiente manera.

- a) Se mide continuidad entre los terminales de los devanados. De esta medición deben resultar cuatro pares de bornes.
- b) Se mide la resistencia en cada uno de los devanados, el que tenga la mayor resistencia corresponde al devanado de excitación shunt.
- c) El devanado de armadura se determina midiendo continuidad con respecto a las escobillas, los bornes que cumplan con esta

condición son los de la armadura.

- d) Se alimenta con tensión continua el devanado shunt, posteriormente, se cierra y se abre el circuito de este devanado y se verifica la tensión inducida en los bornes de los demás devanados. Al hacer esta verificación, se obtendrá una tensión inducida mayor en el devanado de excitación serie.

- e) El par de bornes restante corresponde al devanado auxiliar.

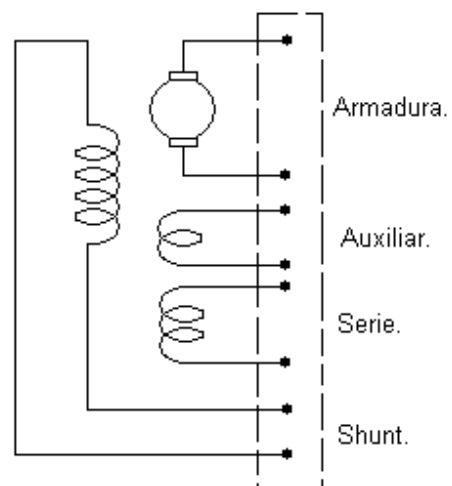


Figura. 64 Esquema de los devanados de una máquina de corriente continua compuesta.

3.2. Medidas de la resistencia de los devanados.

La resistencia de los devanados de la máquina se determina revisando completamente las conexiones del devanado, calculando las pérdidas I^2R , y estableciendo una resistencia de referencia a una temperatura determinada para después usarla en la determinación de la temperatura promedio del devanado⁹⁶.

3.3. Método para medir la resistencia.

3.3.1. Devanados del circuito de campo paralelo:

La resistencia en frío del campo paralelo debe determinarse en los terminales del campo paralelo con las conexiones adecuadas excluyendo todas las resistencias externas.

⁹⁶ Para conocer un poco acerca de la determinación de la resistencia de los devanados revisar el estándar IEEE Std 118-1978.

3.3.2. Resistencia del devanado del circuito de la armadura

La resistencia del circuito de armadura se constituye de la suma de varios componentes (no se incluyen las escobillas y su resistencia de contacto) conectados de acuerdo con el diagrama de conexiones de la máquina. Esta sumatoria debe realizarse solo después de que la resistencia de cada componente ha sido corregida a una temperatura común. Estos componentes se miden como se indica a continuación:

a) Devanado de la armadura.

Esta medición se hace usando el método de la caída de tensión⁹⁷. El rotor debe estar bloqueado adecuadamente a fin de evitar su rotación. Las escobillas se usarán como un conductor para la corriente y la caída de tensión se mide de la siguiente manera:

⁹⁷ las escobillas deben estar bien montadas.

- Dos impulsos de tensión se aplican a segmentos del conmutador separados aproximadamente por un polo en medio. Estos impulsos deben colocarse en segmentos cercanos a la superficie de contacto de las escobillas tanto como sea posible.
- Los impulsos de tensión deben desplazarse y se deben tomar lecturas en cada polo.
- La corriente se mantiene constante para todas las mediciones y no debe exceder el 10% del valor nominal.
- Las resistencias se calcula a partir del valor promedio de todas las caídas de potencial y las corrientes circulantes [1]

b) Devanado del campo de conmutación:

En máquinas sin compensación, la resistencia de este devanado se puede medir directamente en sus terminales. Si uno de los extremos de este

devanado esta permanentemente conectado a la escobilla, la resistencia del campo de conmutación puede ser medida entre este punto y el terminal de salida. En máquinas compensadas este devanado puede estar intercalado con el devanado del campo de compensación. En tales casos la resistencia combinada de esos dos devanados debe ser medida. Si los devanados están partidos y localizados en lados eléctricamente opuestos de la armadura o están organizados de otra manera, la resistencia de cada componente del devanado debe ser medida individualmente.

c) Devanados del campo de compensación:

Si están separados de los devanados del campo de conmutación, la resistencia de este devanado puede ser medida directamente en sus terminales.

d) Devanados del campo serie:

La resistencia debe ser medida en los terminales de cada uno de los

devanados. Si el devanado esta conectado permanentemente a uno de los demás devanados estacionarios y con una única conexión entre estos dos devanados, la resistencia del devanado serie debe medirse entre el terminal y esta conexión. Si el devanado del campo serie esta intercalado, o no hay una distinción clara en la conexión de los devanados, la resistencia se debe medir en combinación con los demás devanados del estator a los cuales está conectado.

e) Shunt:

La resistencia de cualquier campo conectado en paralelo con los devanados de la máquina debe ser medida en los terminales de este campo. El devanado shunt puede desconectarse de los devanados de la máquina cuando se miden sus respectivas resistencias.

f) Devanados auxiliares y resistores serie asociados:

La resistencia de todos los devanados auxiliares debe medirse en sus terminales. La resistencia de un devanado auxiliar con resistores variables debe medirse en los terminales de los cables que unen esos resistores con el devanado. Adicionalmente a la resistencia, las conexiones de todos los ajustes del resistor deben ser registradas.

3.3.3. Resistencia de aislamiento.

La resistencia de aislamiento entre los devanados y el núcleo del estator es raramente medida en máquinas pequeñas o de baja tensión, pero es comúnmente medida en máquinas grandes o de alta tensión y en máquinas sometidas a grandes demandas de aislamiento por exposición o servicio severo.

La resistencia de aislamiento a tierra es una indicación útil de si la máquina esta en condiciones adecuadas para la aplicación de pruebas de alta tensión o pruebas de funcionamiento. En los casos en donde la resistencia de

aislamiento esta siendo registrada, es importante obtener un buen grupo de valores iniciales para efectos de futuras comparaciones⁹⁸.

3.3.4. Determinación de la zona neutra.

Para la determinación de la zona neutra se puede seguir alguno de los siguientes métodos:

a) Método de rotación inversa:

Las máquinas reversibles pueden localizar el neutro mediante este método. Se debe operar la máquina a tensión constante, y a corrientes de campo y de armadura constantes. La ubicación entre la escobilla y el colector debe ser adecuada.

A continuación se mide la velocidad rotacional en ambas direcciones de giro. Cuando las escobillas están ubicadas en el neutro, la velocidad rotacional debe ser casi la misma en

ambas direcciones. La máquina debe operar cerca de plena carga y a la máxima velocidad de operación, la corriente de campo debe fijarse de la misma manera en las pruebas en ambas direcciones de giro.

b) Mover la armadura un pequeño ángulo.

El neutro inductivo puede ser localizado por observación de la tensión inducida en el devanado de armadura cuando alternativamente se establece y se retira un flujo en los polos principales. El procedimiento usual es el siguiente:

- Levantar las escobillas.
- seleccionar dos segmentos del colector espaciados por un polo en medio.
- Conectar estos segmentos a la escala de baja tensión CC de un voltímetro o milivoltmetro.
- utilizar un interruptor auxiliar de rápida desconexión para asegurar una mayor uniformidad de la

⁹⁸ Para conocer los métodos de prueba revisar el estándar ANSI/IEEE Std 43-1974.

interrupción de la corriente.

- Organizar la excitación del campo principal desde una fuente de corriente alterna independiente con no más del 20% de la corriente normal, dicha corriente se puede suspender por medio del interruptor auxiliar. Con la apertura del interruptor, el cambio en el flujo induce una tensión en las espiras de la armadura ubicadas entre los segmentos seleccionados y esta variación será leído por el voltímetro.
- Observar la dirección de la tensión inducida durante la remoción del campo.
- La armadura debe ser rotada unos cuantos grados, con el voltímetro conectado en los mismos segmentos.
- El procedimiento se debe repetir hasta encontrar una posición del rotor en la que una interrupción en la corriente de campo produce una mínima indicación en el voltímetro.
- Cuando esto ocurre, la porción de devanado entre las puntas del

voltímetro esta simétricamente ubicada bajo los polos y el centro de las caras de las escobillas debe ubicarse sobre esos puntos.

4. Preguntas para antes de la práctica

- ¿Cuáles son las características de cada uno de los devanados de una maquina de corriente continua?
- Defina la zona neutra geométrica con carga y sin carga.

5. Procedimiento.

- Identificar los bornes de una máquina de corriente continua.
 - Medir la resistencia eléctrica de cada uno de los devanados.
 - Comprobar la resistencia de aislamiento.
-



- Determinar la zona neutra geométrica⁹⁹.

6. preguntas para después de la práctica.

- Verificar la resistencia de aislamiento medida y los valores establecidos en las normas y explicar resultados.

⁹⁹ Mediante el método de mover la armadura un pequeño ángulo.

Practica 7. Determinación de las características de vacío, carga y regulación de un generador CC

Las pruebas que se realizan a continuación sirven para conocer cual es el comportamiento de una maquina de CC para diferentes condiciones carga. Las curvas determinadas a partir de estos ensayos proveen importante información en el momento en el que se requiera utilizar una maquina de este tipo

1. Objetivos.

- Determinar la característica de vacío.
- Determinar la característica de carga.
- Determinar la característica de regulación.

2. Equipo a utilizar.

- 1 Motor de inducción.
- 1 Maquina de corriente continua.
- 1 Voltmetro.

- 1 Amperemetro.
- Carga.
- Fuente variable de tensión CC.
- Autotransformador.

3. Fundamentación teórica.

Característica de vacío.

La curva de la característica de vacío es una relación no lineal entre la

tensión en terminales de la armadura y la corriente de campo.

Los datos para la obtención de dicha curva deben ser tomados a tensiones adecuadamente espaciadas a fin de obtener una grafica exacta desde cero corriente de campo hasta aproximadamente el 125% de la

tensión nominal. A continuación se describen los métodos utilizados para su determinación.

- **Impulsado separadamente**

La máquina se debe impulsar a velocidad nominal por algún medio adecuado. Si es posible, la corriente de campo debe ser suministrada por una fuente separada a fin de estabilizar la tensión y facilitar la toma de datos. Se deben tomar simultáneamente lecturas de la corriente de campo, de la tensión de armadura y de la velocidad.

Precaución: si la máquina bajo prueba no tiene polo de conmutación y esta construida con las escobillas ubicadas fuera del neutro tal prueba puede ser perjudicial y no determina el verdadero estado de la maquina.

a) Curva ascendente

Un grupo de lecturas debe ser tomado empezando con un valor de la corriente de campo igual a cero e

incrementándola hasta que se obtenga el valor máximo de tensión.

Tres de estas lecturas deben tomarse tan cerca como sea posible de 90%, 100% y 110% de la tensión nominal.

Para evitar inconsistencias causadas por efectos de histéresis, la tensión en terminales de la armadura nunca debe llevarse por encima del punto de prueba y luego disminuirse. Si esto ocurre durante la prueba, la corriente de campo debe disminuirse hasta cero y la tensión en terminales de la armadura incrementarse hasta el punto de prueba.

b) Curva descendente

Otro grupo de lecturas puede ser obtenido partiendo de la tensión en terminales de la armadura máxima y disminuyendo la corriente de campo hasta cero. Para evitar problemas debidos a la histéresis, la tensión en terminales de la armadura nunca debe llevarse por debajo del punto de prueba y luego incrementarse. Si esto ocurre durante la prueba, la

corriente de campo debe incrementarse hasta su valor máximo y la tensión en terminales de la armadura debe disminuirse hasta el punto de prueba.

Esta característica representa la tensión en terminales como una función de la corriente de excitación., manteniendo la corriente de carga y la velocidad en valores constantes.

El esquema de conexiones para la obtención de esta característica es el mostrado en la figura 1.

En el laboratorio esta característica puede obtenerse siguiendo el siguiente procedimiento:

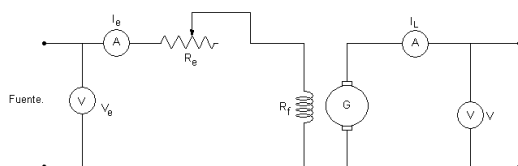


Figura. 65 Esquema de conexiones para la determinación de la característica de vacío.

Características de carga.

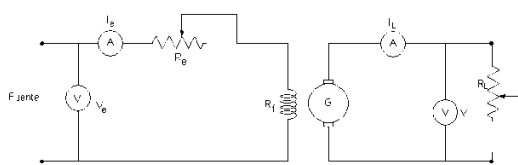


Figura. 66 Esquema de conexiones para la determinación de la característica de carga.

3.2.1. Característica de carga

$$V_e = f(I_e).$$

Se lleva el generador a la velocidad deseada, por lo general a la nominal, se excita para obtener una tensión menor que la nominal. Posteriormente se agrega carga hasta obtener el valor de la corriente de armadura para la cual se desea determinar la característica y entonces se mide la tensión en terminales y la corriente de excitación, manteniendo la velocidad constante.

El siguiente paso es incrementar la corriente de excitación, lo que traerá como consecuencia una variación en la velocidad y un incremento en la corriente de armadura, razón por la cual se hace necesario regular estos parámetros para llevarlos a los valores iniciales, esto se consigue variando la

carga y la velocidad del primo-motor. Una vez realizado lo anterior se procede a tomar nuevamente las lecturas. El mismo procedimiento se sigue para los demás puntos de la característica.

3.2.2. Característica de carga

$$V_e = f(I_a)$$

Esta característica, también conocida como característica externa, representa la tensión en terminales en función de la corriente de armadura, manteniendo la velocidad y la corriente de excitación en valores constantes.

Para obtención en el laboratorio de esta característica se debe llevar el generador a la velocidad deseada¹⁰⁰, con la máquina en vacío, se excita para obtener el valor de tensión deseado como punto de inicio de la característica¹⁰¹. Se miden los valores de la tensión y de la corriente de

excitación, esta debe mantenerse constante durante toda la prueba. Ahora debe conectarse una carga, se debe verificar que los valores de la velocidad y de la corriente de excitación sean los iniciales una vez conectada la carga, se toman lecturas de la tensión en los terminales de la armadura y de la corriente de armadura. Para obtener los demás puntos de la característica se sigue el mismo procedimiento incrementado el valor de la carga en cada uno de ellos.

Otro método para obtener estas características de carga se basa en la obtención del triángulo de caídas de la máquina¹⁰²¹⁰³. Este procedimiento se recomienda en aquellos casos en que no se cuenta con una carga variable.

4. Regulación de tensión en generadores

¹⁰⁰ Generalmente a la velocidad nominal de la máquina.

¹⁰¹ Generalmente se toma un valor de tensión entre 1.02 y 1.06 de la tensión nominal.

¹⁰² Como trabajo previo al desarrollo de la práctica se recomienda revisar este método.

¹⁰³ Debido a que en el laboratorio se cuenta con el tipo de carga necesario, la prueba se realizará siguiendo el método anterior.

El propósito de este ensayo es determinar el cambio en la tensión de terminales que acompaña un cambio gradual en la corriente de armadura con el campo principal ajustado para tensión nominal.

El procedimiento es el siguiente:

- Si el generador es auto excitado, el reóstato de ajuste debe permanecer fijo durante los cambios de carga en la prueba.
- Si el generador es excitado separadamente, la corriente de campo de carga nominal debe mantenerse constante durante la prueba.
- El generador debe funcionar a velocidad nominal.
- La prueba debe realizarse después de que el generador ha alcanzado una temperatura estable producto de la operación continua a velocidad y cargas nominales.
- Los puntos de prueba deben tomarse rápidamente con el fin de que la temperatura de los

devanados no cambie apreciablemente.

- Gradualmente se aplica y retira la carga nominal varias veces antes de que las lecturas tomadas sean consistentes.

- Se deben recopilar las tensiones a plena carga y en vacío y calcular la regulación de tensión de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{regulación} = 100 * \left[\frac{v_0 - v_L}{v_0} \right]$$

En donde:

v_0 = Tensión en vacío.

v_L = Tensión a plena carga.

5. Preguntas para antes de la práctica.

- Explique los métodos de arranque para una maquina CC

- ¿Cuáles son las precauciones necesarias a la hora de arrancar una maquina de corriente continua?
- 3. Determinar regulación de tensión del generador de corriente continua.

6. Procedimiento.

1. Determinar la característica de vacío para velocidad nominal y valores ascendentes de la corriente.
2. Obtener las dos características de carga, a velocidad nominal, corriente de armadura igual a 1 en por unidad y considerando como punto inicial de la característica externa la corriente de excitación obtenida con una tensión igual a 1.02 la tensión nominal.

7. Actividades para después de la práctica

- Grafique las curvas para las características en vacío, cortocircuito.

PRACTICA 8 Eficiencia de una máquina de CC.

La eficiencia de una máquina eléctrica es un parámetro que indica el nivel de aprovechamiento de la energía de entrada, es decir, que cantidad de la potencia de entrada se convierte en potencia útil y que cantidad se disipa en el funcionamiento propio de la máquina. La determinación de la eficiencia para una máquina eléctrica ofrece también información del estado de funcionamiento de la máquina, permitiendo así establecer posibles daños en la máquina.

1. Objetivos

Determinar la eficiencia de un motor CC con conexión shunt

2. Equipo a utilizar.

- 1 motor CC con conexión shunt
- 2 reóstatos
- 1 voltmetro
- 2 amperometro

- 1 fuente variable de tensión CC

3. Fundamentación teórica.

3.1. Eficiencia.

La eficiencia es la razón entre la potencia de salida y la potencia total de entrada. La potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas. Por tanto, si dos de las tres variables (salida, entrada, pérdidas) son conocidas, la eficiencia puede determinarse por medio de una de las siguientes ecuaciones:

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

$$eficiencia = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (2)^{104}$$

$$eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (3)^{105}$$

¹⁰⁴ Aplicada a motores

¹⁰⁵ Aplicado a generadores

3.2. Pérdidas de potencia en una máquina de corriente continua

- Pérdidas en la armadura I^2R .

Las pérdidas en la armadura se calculan con la expresión I^2R . La resistencia usada debe ser medida usando corriente continua y se debe realizar la respectiva corrección de su valor considerando los efectos de la temperatura.

- Pérdidas de los devanados conectados en serie I^2R .

Estas pérdidas se calculan de la misma forma que en el caso anterior, donde también se debe realizar la corrección por temperatura en el valor de la resistencia.

- Pérdidas en los contactos de las escobillas.

La pérdida de potencia en las escobillas se puede determinar realizando el producto entre la corriente de armadura y una caída de

tensión.¹⁰⁶ La caída total de tensión que se utiliza para el cálculo de estas pérdidas se asume según el tipo de escobillas de la siguiente manera:

Carbón, electro grafito y escobillas de grafito. Shunts adjuntos.	2 voltios.
Carbón, electro grafito y escobillas de grafito sin shunts.	3 voltios.
Escobillas de metal-grafito, shunts adjuntos.	0.5 voltios.

Tabla 27 caída de tensión en los diferentes tipos de escobilla.

Se asume la misma caída de tensión para todas las cargas.

- Pérdidas en el devanado paralelo I^2R .

Se calculan con la formula I^2R . E el valor de la resistencia se debe corregir por variaciones en la

¹⁰⁶ La caída total de tensión que se utiliza se encuentra en el libro

temperatura y la corriente de campo es la requerida por la carga a la cual se le están evaluando las pérdidas.

Otros tipos de pérdidas de potencia presentes en las máquinas de corriente continua son¹⁰⁷:

- Pérdidas en el reóstato.
- Pérdidas por fricción.
- Pérdidas por ventilación.
- Pérdidas por cargas parásitas¹⁰⁸

3.3. Métodos para la estimación de las pérdidas de potencia de las máquinas de CC

Los métodos recomendados por el estándar IEEE Std113-985 para determinar la magnitud de las pérdidas en una máquina CC son:

- Medidas directas de entradas y salidas
- Método del Dinamómetro o medidor de torque:
- Método Morgan.
- Método de las pérdidas separadas
- Método de la potencia eléctrica de entrada
- Método de retraso

4. Preguntas para antes de la práctica

- ¿Cómo se podría realizar el arranque de un motor CC con conexión shunt?
- ¿Cómo se produce y que se debe hacer en caso de que la máquina se embale?
- ¿Cómo se varia la velocidad de la máquina con conexión shunt?

5. Procedimiento:

¹⁰⁷ Información detallada de cada tipo de pérdidas y la forma en que se calcularla se muestra en el libro

¹⁰⁸ Si no hay mediciones de estas pérdidas, su componente CC puede considerarse como el 1% de la potencia de salida. En caso contrario, existen dos métodos para determinarlas. A continuación se describen dichos métodos

Para la determinación de la eficiencia de la máquina de CC se realizara el siguiente procedimiento¹⁰⁹

5.1. Determinación de las pérdidas en vacío

- Se conecta la máquina como motor shunt en vacío,
- Se lleva la máquina a velocidad nominal y se toman medidas de (ver figura 1):
 - Tensión en bornes.
 - Corriente de armadura
 - Corriente de devanado shunt

Este proceso se debe seguir para diferentes valores de velocidad¹¹⁰ manteniendo constante la excitación.

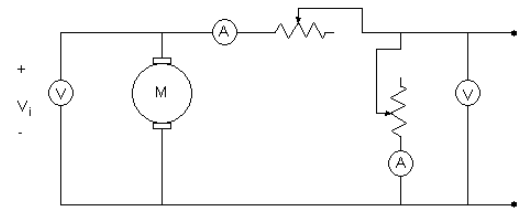
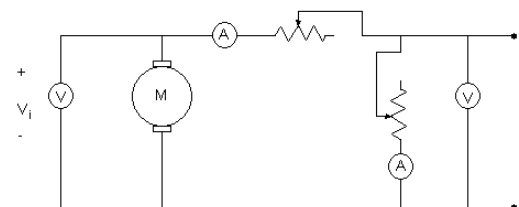


Figura 6. Motor CC conexión shunt en vacío

5.2. Determinación de las pérdidas por rozamiento y fricción

- Para determinar estas pérdidas, se utiliza una máquina CC (máquina 2), la cual se energiza y se hace girar a una velocidad igual a la que se va a llevar a la máquina bajo prueba, se deben tomar las mediciones necesarias para calcular la potencia desarrollada.



¹⁰⁹ El método que se desarrolla en el laboratorio de máquinas eléctricas es una adaptación del método recomendado de pérdidas separadas recomendado por IEEE GUIDE: TEST PROCEDURES FOR DIRECT CURRENT MACHINES IEEE Std.113-985

¹¹⁰ Antes de la practica se debe investigar como se realiza la variación de velocidad para diferentes tipos de conexión de máquinas CC

Figura 2. Conexión para la máquina 2

- Calcular la eficiencia de la máquina

- Acoplar la máquina bajo prueba ¹¹¹ y la máquina 2, hacer girar las máquinas a la velocidad de la prueba, tomar las mediciones necesarias para determinar la potencia desarrollada en la máquina 2.

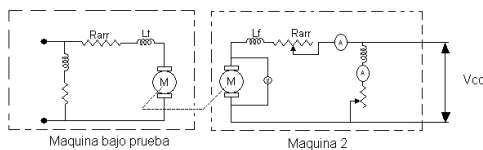


Figura 3. Acople del motor de arranque y la maquina bajo prueba

7. Bibliografía y referencias

[1] IEEE GUIDE: TEST PROCEDURES FOR DIRECT CURRENT MACHINES IEEE Std. 113-985.

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] Guru, hizioglu, Máquinas eléctricas y transformadores, Alfaomega, Oxford, 2003

- Calcular las pérdidas por rozamiento y fricción con los datos anteriores.

6. Actividades para después de la práctica

- Determinar las pérdidas de potencia de la máquina indicando el valor de cada una.

¹¹¹ La máquina debe estar desenergizada

Practica 9. Máquina de inducción, pruebas preliminares

La máquina de inducción es la más usada como motor en la industria, debido a su bajo costo y a su eficiencia. Es por esto, que la determinación de sus características de funcionamiento es de gran importancia en el momento de utilizar dicha maquina

- Un megohmmetro.
- Un voltmetro.
- Un amperometro.
- Un autotransformador trifásico
- Puntas de prueba de seguridad.
- Un tacómetro digital

1. Objetivos.

- Identificar los terminales de una máquina de inducción trifásica.
- Medir la resistencia de los devanados.
- Determinar la resistencia de aislamiento.
- Calcular el deslizamiento de la maquina

2. Equipo a utilizar.

- Maquina de inducción trifásica.

3. Fundamentación teórica.

3.1 Identificación de terminales.

La identificación de los terminales de una máquina de inducción es de gran importancia en sus procesos de arranque. Si los terminales no están designados se sigue el siguiente procedimiento para su identificación:

- Medir continuidad entre los mismos, resultando tres pares de bornes con los cuales se harán las conexiones.

En la figura 1 se muestra un esquema de la disposición de los terminales y de las conexiones en delta y estrella.

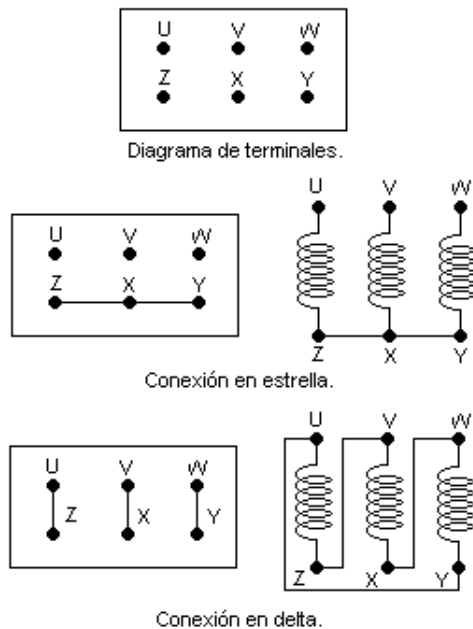


Figura. 67 Disposición de los terminales y conexiones en estrella y en delta de los mismos.

3.2 Resistencia de los devanados¹¹².

¹¹² Para conocer los procedimientos para la medición de la resistencia de los devanados, revisar el estándar IEEE Std 118-1978 y el estándar IEEE Std 119-1974.

Con la máquina a temperatura ambiente, se mide la resistencia del devanado de terminal a terminal con la máquina conectada en la configuración que se usará en la prueba de eficiencia. Se deben medir y registrar todas las combinaciones, con el fin de garantizar que se mida el valor exacto de la resistencia.

3.3 Verificación de la resistencia de aislamiento.

Las pruebas de resistencia de aislamiento¹¹³ son de gran valor para los procesos de mantenimiento. Para realizar este ensayo, todos los accesorios que estén conectados a los terminales de la máquina se deben desconectar durante la prueba y sus terminales se deben unir con el núcleo.

3.4 Medición del deslizamiento.

Los métodos estroboscópicos o el del tacómetro digital pueden ser usados para determinar el deslizamiento o la

¹¹³ Para más detalles revisar el estándar IEEE Std.43-2000.

velocidad. Cuando un estroboscopio se utiliza para medir el deslizamiento, la fuente de alimentación para el estroboscopio debe tener la misma frecuencia que la fuente de alimentación del motor.

Cuando se mide la velocidad, la instrumentación usada debe tener un error no mayor que ± 1.0 r/min. de la lectura.

4. Preguntas para antes de la práctica.

- ¿Cómo se realiza la identificación de los terminales en una máquina de inducción cuando ésta tiene nueve bornes disponibles y cuáles son las posibles conexiones?
- ¿Cuáles son y en que se diferencian los diferentes tipos de motores de inducción?
- Si para las pruebas que se van a realizar en esta práctica se utilizara una máquina con rotor

devanado ¿cambiarían los procedimientos de prueba?

- ¿Cuáles son las precauciones que se deben tomar antes de arrancar una máquina de inducción?
- ¿Cuáles son los métodos existentes para la determinación del deslizamiento de una máquina de inducción trifásica?

5. Procedimiento.

- Identificar los terminales de un motor de inducción trifásico de seis terminales.
- Realice una conexión en estrella de los devanados de la máquina y verifique si el arranque es normal.
- Medir la resistencia de los devanados de la máquina.
- Verificar la resistencia de aislamiento entre cada devanado y el núcleo de la máquina.

- Seleccione el método aplicable durante la prueba para determinar el deslizamiento de la maquina y mida dicho parámetro.

[3] Guru, hiziroglu, Máquinas eléctricas y transformadores, Alfaomega, Oxford, 2003

6. Preguntas para después de la práctica.

- ¿Cuál es la resistencia de los devanados de la máquina?
- ¿La resistencia de aislamiento de la maquina se ajusta a los valores sugeridos por las normas?
- ¿Cuál es el valor del deslizamiento de la maquina?

7. Bibliografía.

[1] IEEE Std 112™-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

Practica 10. Pruebas de vacío y de rotor bloqueado en una máquina de inducción trifásica.

El desempeño de una máquina de inducción se puede determinar a partir de los ensayos de vacío y de rotor bloqueado. Con los datos obtenidos de estas pruebas se puede estimar los parámetros del circuito equivalente, el cual se utiliza para realizar el estudio de las características de funcionamiento de las máquinas de inducción.

1. Objetivos.

- Obtener la característica de vacío de un motor de inducción.
- Determinar un motor de inducción.
- Determinar las pérdidas en un motor de inducción.

2. Equipo utilizado.

- 1 Máquina de inducción trifásica.
- 2 Wattmetros.
- 1 Voltmetro.
- 1 Amperometro.
- 2 Transformadores de corriente.
- 1 Autotransformador.
- Puntas de seguridad.

3. Fundamentación teórica.

3.1 Ensayo de vacío.

Las pruebas de corrientes sin carga se hacen para determinar las pérdidas del hierro y las de fricción. Algunas otras pruebas tales como la de tensión del eje también se pueden realizar bajo estas condiciones. En la figura 1 se muestra un esquema de las conexiones necesarias para realizar este prueba.

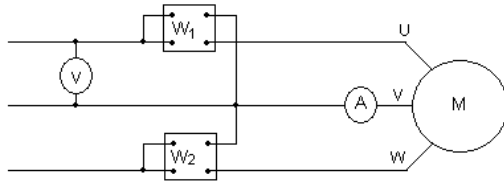


Figura. 68 Esquema de conexiones para el ensayo vacío.

De este montaje se deben tomar las lecturas de los wattmetros, del amperemetro y del voltmetro. Con estos datos se determinan los parámetros del circuito equivalente.

Debido a que en el ensayo del vacío, el factor de potencia puede ser menor de 0.5, la lectura en los wattmetros puede ser negativa.

3.2 Ensayo de rotor bloqueado.

Es necesario tener en cuenta que la prueba de las máquinas de inducción bajo condiciones de rotor bloqueado implica altos niveles de esfuerzos mecánicos y altas tasas de calentamiento. Por tal razón, es necesario que:

- Los medios mecánicos utilizados para asegurar la máquina y bloquear el rotor posean la fuerza necesaria para prevenir posibles lesiones a los operarios o daño al equipo.
- La dirección de la rotación se establezca antes de la prueba.
- La máquina está en una temperatura aproximadamente igual a la ambiente antes de que se comience la prueba.

Las lecturas de la corriente y del torque deben ser tomadas tan rápido como sea posible, y, para obtener valores representativos, la temperatura de la máquina no debe exceder el incremento de temperatura nominal en más 40 °C. Las lecturas para cualquier punto deben ser tomadas 5 segundos después de que la tensión es aplicada.

En la figura 2 se muestra un esquema de conexiones para la prueba de rotor bloqueado.

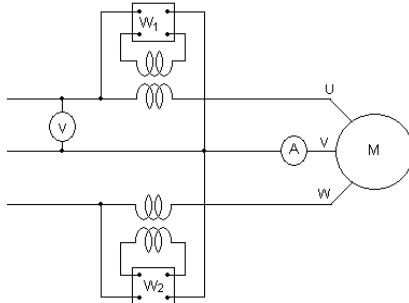


Figura. 69 Esquema de conexiones para la prueba de rotor bloqueado.

Este ensayo debe realizarse con tensión reducida, esto con el propósito de limitar la corriente a la nominal. Se deben tomar lecturas de los wattmetros, del voltmetro y del amperemetro. Con los datos obtenidos se determinan los parámetros del circuito equivalente.

Al igual que en el ensayo del vacío, el factor de potencia puede ser menor de 0.5, la lectura en los wattmetros puede ser negativa.

Pérdidas¹¹⁴.

Algunos de los tipos de pérdidas presentes en una máquina de inducción

se encuentran enumerados a continuación:

- Pérdidas en el estator, I^2R
- Pérdidas en el rotor, I^2R
- Fricción y pérdidas por rozamiento con el viento.
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parasitas.
- Pérdidas en los contactos de las escobillas.

Existen otros ensayos requeridos como soporte para los métodos de prueba de la eficiencia de la máquina, a continuación se mencionan algunos de ellos:

- Potencia en el eje.
- Correcciones a las lecturas de dinamómetro.
- Circuito equivalente.
- Pruebas de temperatura.

4. Circuito equivalente.

El circuito equivalente mostrado en la figura 1 se usa como base para los cálculos de eficiencia.

¹¹⁴ Información más detallada acerca de las pérdidas en una máquina de inducción y los métodos para determinarlas se encuentra en la sección 4.7.4. de los procedimientos de prueba para el laboratorio de máquinas eléctricas.

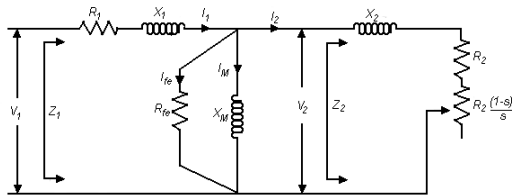


Figura. 70 Circuito equivalente de una máquina de inducción.

Los parámetros del anterior circuito equivalente se obtienen a partir de los datos de prueba registrados durante pruebas vacío y de rotor bloqueado. El circuito equivalente representa una fase de una máquina trifásica conectada en estrella. La tensión del rotor, la corriente, la resistencia, y los todos valores de reactancia se refieren el estator.

5. Preguntas para antes de la práctica

- ¿Qué error se comete si se calculan las pérdidas de potencia en una máquina de inducción utilizando los métodos mencionados en la sección 3?
- ¿Cómo se determina el circuito equivalente de una máquina de inducción?

- ¿Qué diferencia existe entre los métodos de medición de potencia con dos y tres Wattmetros?
- ¿Cuáles son las precauciones que se deben tener en cuenta para realizar la prueba de rotor bloqueado?
- ¿Qué ocurre si los ensayos de vacío y de rotor bloqueado se realizan condiciones no nominales?
- Determine los valores de tensión, corriente y potencia que se obtendrán durante el desarrollo de la practica¹¹⁵

6. Procedimiento.

- realizar el ensayo de vacío a una máquina de inducción.
- Realizar el ensayo de rotor bloqueado.

7. Preguntas para después de la práctica.

¹¹⁵ Se recomienda averiguar los datos de los valores nominales de las máquinas e instrumentos de medida a utilizar durante el desarrollo de la practica

- Determine el circuito equivalente del motor de inducción.
 - Construya las gráficas de las características de vacío y de rotor bloqueado.
- Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

8. Bibliografía.

- [1] IEEE Std 112™-2004, IEEE Standard Test Procedure for
- [3] Guru, hiziroglu, Máquinas eléctricas y transformadores, Alfaomega, Oxford, 2003

PRACTICA 11 Características de vacío y cortocircuito de un generador síncrono

Las máquinas son componentes importantes en los sistemas de potencia, por tal razón es necesario que posea un alto nivel de eficiencia. cuales permiten obtener los parámetros característicos para la representación de dicha maquina

Teniendo en cuenta lo anterior, los procedimientos encaminados hacia la obtención de dicho parámetro representan una herramienta fundamental para el análisis de dichos sistemas

Algunos de estos procedimientos parten de la obtención de las características de corto y de vacío, las

1 Objetivos

- Determinar las características de vacío y de cortocircuito para una maquina síncrona.
- Determinar los parámetros de reactancia, a partir de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto

2 Equipo a utilizar.

- Una maquina síncrona
- 3 amperímetros.
- 2 Voltímetros
- 3 Reóstatos
- Un motos CC

Existen métodos para medir las pérdidas de potencia en una máquina síncrona, a continuación se enuncian¹¹⁶ dichos procedimientos:

3 Fundamentación teórica.

3.2.1. Método de la potencia eléctrica de entrada para la determinación de pérdidas y curvas de saturación

3.1. Curvas de saturación, separación de las pérdidas y eficiencia.

Los siguientes tipos de pérdidas son considerados en el análisis de eficiencia de una máquina síncrona:

- Fricción y pérdidas por rozamiento con el viento.
- Perdidas en el hierro.
- Pérdidas por cargas parásitas
- Pérdidas I^2R en la armadura
- Pérdidas I^2R en el campo.

Para esta prueba la máquina se pone en funcionamiento como un motor síncrono sin carga, el cual es alimentado por una fuente de potencia que entrega tensión variable con una frecuencia igual a la nominal de la máquina bajo prueba. La potencia de entrada es medida por wattmetros u otros medidores de potencia, bajo diferentes condiciones de tensión y corriente para así obtener las pérdidas.

3.2.1.1. Conexión de los dispositivos de medición

Las conexiones usadas para la medición de la potencia de entrada

3.2. Métodos para estimar las pérdidas de potencia.

¹¹⁶ Para información más detallada, revisar el estándar IEEE Std 115-1995

dependen de la conexión de la máquina. Si el neutro de la máquina es conectado al sistema durante el ensayo, se debe realizar la conexión de los tres wattmetros mostrada en la figura 1.

- Shunt de corriente continua (preferiblemente tipo polos conmutables).
- De inducción.
- Síncrono.

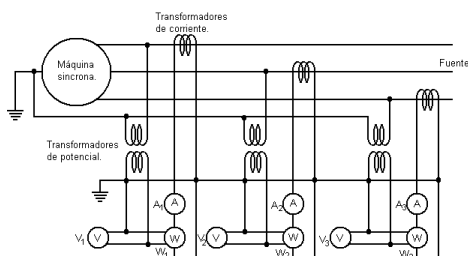


Figura 1. Método de los tres Wattmetros para la medición de potencia

Las pérdidas en vacío del motor de arranque deben ser conocidas con una muy alta precisión, además se debe contar con una curva de pérdidas de potencia versus potencia de entrada para dicha maquina.

Las medidas que se realizan bajo la aplicación de este método, solo se registran cuando la velocidad se estabiliza en el valor esperado por el personal que realiza la práctica.

3.2.2. Método de arranque separado para la obtención de las curvas de saturación y pérdidas

3.2.2.1. Motor de arranque

La máquina bajo prueba es usualmente impulsada por un motor, a través de una correa o de engranajes. El motor puede ser:

3.2.2.2. Curva de saturación en circuito abierto

La curva de saturación en circuito abierto es obtenida impulsando o arrancando la máquina bajo prueba hasta alcanzar la velocidad nominal y registrando la tensión en los terminales

de la armadura, la corriente de campo y la frecuencia en las terminales o la velocidad del eje (ver figura 2).

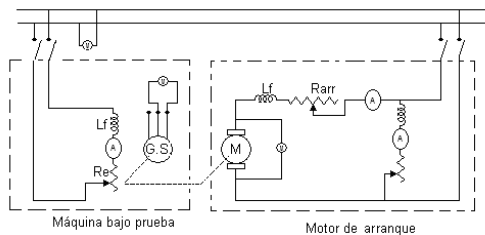


Figura 2 Montaje para la prueba de circuito abierto

Las lecturas para la curva se deben tomadas incrementando la excitación. Si se es necesario volver a tomar un valor menor al actual, la corriente de campo debe ser reducida a cero para luego incrementarse hasta el valor deseado. Este proceso se realiza para eliminar los efectos de histéresis en los resultados.

La curva puede ser determinada en función de la tensión de excitación de línea, tensión de fase o como el promedio de las tensiones de las tres fases.

3.1.2.3. Pérdidas en el núcleo y fricción con el aire

Estas pérdidas de potencia pueden ser determinadas a partir de lecturas adicionales tomadas usando el mismo montaje de la prueba para la determinación de la curva de saturación para circuito abierto. En cada valor de tensión en los terminales, se debe medir la potencia de entrada del motor impulsador. Si el dispositivo que se usa para acelerar la máquina bajo prueba es un motor DC, se deben tomar lecturas para la corriente de armadura, tensión (el producto de estos dos valores es la potencia de entrada) y corriente de campo. Si se usa un motor de corriente alterna como impulsador, la potencia de entrada puede ser medida directamente con un wattmetro. La potencia de entrada a la máquina bajo prueba se obtiene sustrayendo las pérdidas del dispositivo impulsador (este valor debe ser determinado con anterioridad) de la potencia de entrada al mismo.

Las pérdidas en el núcleo para cada valor de tensión de armadura se determinan sustrayendo las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire, de la potencia total de entrada a la máquina bajo prueba. Las pérdidas del núcleo pueden ser graficadas en función de la tensión.

3.1.2.3. Curva de saturación de cortocircuito

La curva de saturación de cortocircuito es obtenida impulsando la máquina bajo prueba hasta velocidad nominal pero con la armadura cortocircuitada (ver figura 3),

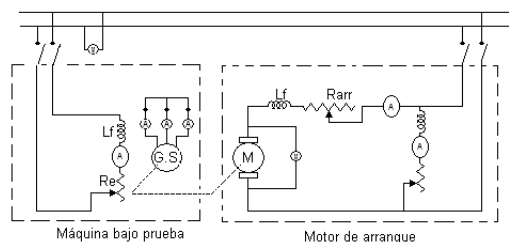


Figura 3. Montaje para la prueba de cortocircuito

Es importante que las lecturas de corriente sean tomadas reduciendo el valor de excitación, comenzando con el

valor que produce una corriente de armadura igual al máximo permitido [1].

3.1.2.3.4. Determinación de las pérdidas parasitas

Las pérdidas parásitas pueden ser determinadas a partir de lecturas adicionales en el mismo momento en el que se realizan las mediciones necesarias para el cálculo de la curva de saturación de cortocircuito. Las pérdidas del motor de arranque deben ser sustraídas de la potencia de entrada para así obtener la potencia consumida por la máquina bajo prueba. Para obtener las pérdidas de cortocircuito se sustraen las pérdidas por fricción y rozamiento calculadas

Las pérdidas de cortocircuito incluyen las pérdidas por corrientes parásitas y la potencia $i^2 R_a$ disipada en los devanados de la armadura, donde R_a es el valor de la resistencia DC de la armadura. Las pérdidas por corrientes parásitas son obtenidas restando la potencia $i^2 R_a$ calculada por la medición

de las corrientes de armadura durante la prueba y con el valor de la resistencia de corriente directa corregida al valor promedio de la temperatura del devanado durante la prueba.

3.1.4. Pruebas para determinar los valores de los parámetros en condiciones de estado estable.

Tipos de parámetros a determinar.

Reactancia síncrona de eje directo.

La impedancia síncrona no saturada de eje directo puede determinarse a partir de los resultados de las pruebas de vacío y de corto circuito. Esta impedancia en por unidad es igual a la razón de la corriente de campo con la corriente de armadura base, de la prueba de corto circuito, a la corriente de campo con la tensión base en la línea del entrehierro.

La reactancia síncrona puede determinarse utilizando la ecuación (1).

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (1).$$

En donde:

X_{du} = Reactancia síncrona no saturada.

I_{FSI} = Corriente de campo correspondiente a la corriente de armadura base de la prueba de cortocircuito.

I_{FG} = Corriente de campo correspondiente a la tensión base sobre la línea del entrehierro.

El valor de la reactancia síncrona saturada depende de las condiciones de operación de la máquina. La reactancia síncrona se compone de la reactancia mutua entre en estator y el rotor X_{ad} , más la reactancia de dispersión del estator, X_{ℓ} .

$$X_d = X_{ad} + X_{\ell} \quad (2)$$

En donde:

X_{ad} Es la porción saturada de X_d .

$$X_{du} = X_{adu} + X_{\ell} \quad (3)$$

Cuando X_{ad} es saturada para cualquier valor, (X_{ads}), entonces

correspondiente corriente de campo.

$$X_{ds} = X_{ads} + X_{\ell} \quad (4)$$

Procedimiento para obtener el valor de la reactancia síncrona

Para la determinación de la reactancia síncrona se deben realizar las mismas conexiones que se utilizaron en la obtención de las características de cortocircuito y circuito abierto de la maquina¹¹⁷

- Para el montaje de la figura 3, se hace circular por la armadura la corriente base de armadura y se registra la respectiva corriente de campo
- Para el montaje de la figura 2, se aplica la tensión base del campo y se registra la

4. Preguntas para antes de la práctica

- Determine y explique cuales son los diferentes tipos de arranque para una maquina CC.
- ¿Cuál es la importancia de la realización de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto de una maquina síncrona?
- Explique como afecta la saturación del material magnético en el momento de realizar las pruebas de cortocircuito y circuito abierto.
- Explique como se realizan las estimaciones de las pérdidas de circuito abierto y cortocircuito por el método mencionado en el numeral 3.1.1.

5. Procedimiento

¹¹⁷ Se deben tener en cuenta las mismas recomendaciones y requerimientos de la practica para la determinación de las curvas de circuito abierto y cortocircuito

Curva de saturación en circuito abierto Realizar el montaje de la figura 2

Realizar el montaje de la figura 1 tomar las respectivas mediciones¹¹⁸ para:

- e) Seis lecturas por debajo del 60% de la tensión nominal de la máquina (1 medida se debe realizar con excitación cero).
- f) Por lo menos 10 lecturas para una tensión en terminales de 60% a 110% y siempre con un incremento del 5%.
- g) Los últimos 2 datos de deben tomar sobre 110%, incluyendo una lectura en un punto aproximadamente al 120% de la corriente nominal de campo sin carga o al máximo valor recomendado por el fabricante.

Curva de saturación en circuito abierto

a) La curva de saturación de cortocircuito es obtenida impulsando la máquina bajo prueba hasta velocidad nominal pero con la armadura cortocircuitada.

b) Registrar los valores de las corrientes de la armadura, de un valor igual al 125¹¹⁹%, 100%, 75%, 50% y 25%

Es importante que las lecturas de corriente sean tomadas reduciendo el valor de excitación, comenzando con el valor que produce una corriente de armadura igual al máximo permitido [1].

6. Actividades para después de la práctica

- Realizar las graficas de circuito abierto y cortocircuito con los datos obtenidos durante la práctica.
- Determinar las pérdidas de potencia

¹¹⁸ Se recomienda que a tensión nominal realizar mediciones de tensión de línea en las terminales de la maquina para verificar el balance

¹¹⁹ Par este valor de corriente se debe consultar al asistente del laboratorio



Referencias y bibliografía

[1] IEEE Guide :Test Procedures for Synchronous Machines IEEE: Std 1158-1995

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] Guru, hizioglu, Máquinas eléctricas y transformadores, Alfaomega, Oxford, 2003

PRACTICA 12. Comprobación de la secuencia de fase

Las pruebas de secuencia de fase son realizadas para examinar la concordancia entre la marcación de las terminales y la rotación de las fases. Los resultados son usados para conectar correctamente las terminales de línea a las de armadura de la máquina para obtener adecuada secuencia de fase en el caso de la máquina trabajando como generador o una correcta dirección de rotación para el caso de un motor.

1. Objetivos

- Determinar la secuencia de fase de un generador síncrono

2. Equipo a utilizar

- Un máquina síncrona.
- Motor CC conexión shunt
- Dispositivo DL 1030

- 2 Reóstatos para la maquina CC

3. Fundamentación teórica

Método para determinar la secuencia de fase por medio de la Indicación de la diferencia de tensión

- Este método muestra como realizar una comparación entre la secuencia actual de la máquina y la secuencia que tiene el sistema al cual se va a conectar la máquina.

El ensayo para generadores síncronos consta de cuatro transformadores de potencia conectados como se muestra en la figura 3 que conectan lámparas o indicadores entre el sistema y el

generador. La máquina debe estar girando a velocidad sincronía o muy cerca y se debe estar excitada a tensión nominal. El montaje mostrado hace que cuando la secuencia del generador, con las condiciones anteriores sea la misma del sistema si y solo si las luces permanecen encendidas al mismo tiempo, si las luces se encienden una tras de otra será por que la secuencia del generador es contraria a la del sistema.

El laboratorio de maquinas eléctricas cuenta con un dispositivo indicador de fase¹²¹, el cual permite realizar el ensayo con el mismo método que propone la IEEE Std 115-1995

- a) Conecte el rotor de la maquina síncrona a un motor shunt de CC, de manera que este proporcione el par de arranque. (ver figura 2).

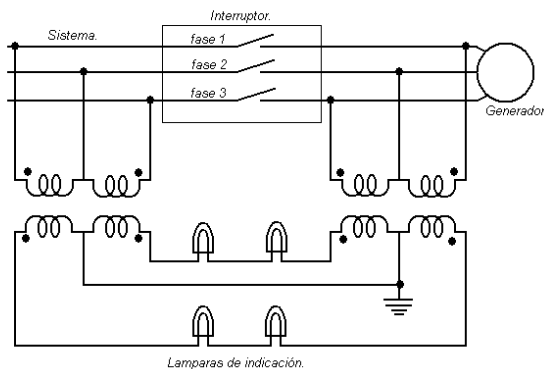
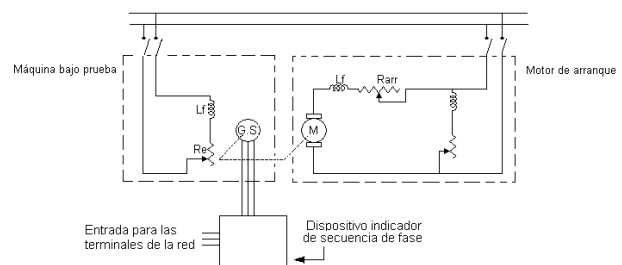


Figura 1¹²⁰. Indicador por diferencia de tensión



Procedimiento

¹²⁰ Esquema del montaje dado por IEEE Std 115-1995

¹²¹ Se recomienda que antes de la practica, cada estudiante revise como es la conexión y operación del dispositivo DL 1030

PRACTICA 13. Conexión en paralelo de transformadores trifásicos.

La conexión en paralelo de transformadores es muy frecuente en los sistemas de potencia debido a las siguientes causas:

Pera que la conexión de transformadores en paralelo sea segura, se deben cumplir las siguientes condiciones de conexión:

- Sistemas en desarrollo.
- Optimización de la carga en cada unidad.
- Seguridad de servicio.
- Los transformadores deben tener la misma relación de transformación: si esa condición no se cumple, se originan corrientes circulantes en la conexión de los transformadores,

1. Objetivos

- Realizar la conexión en paralelo de dos transformadores trifásicos.
- Iguaes caídas relativas de tensión μ_z : esta es una característica importante cuando se busca que la repartición de la carga entre los dos transformadores sea la misma

2. Equipo a utilizar

- 2 transformadores trifásicos
- 1 voltmetro.
- Cables para la conexión
- El Angulo de desfase entre las tensiones del primario y secundario deben ser el mismo en cada transformador: esta condición debe cumplirse para

3. Fundamentación teórica

que no se presenten cortocircuitos en la conexión, por esto debe verificarse la correcta designación de cada transformador.

Para garantizar una correcta conexión en paralelo, se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La designación de cada transformador debe ser comprobada¹²²
- Los diagramas fasoriales de cada transformador se deben superponer, esto con el fin de que cuando se conecten en paralelo, las tensiones de los respectivos devanados estén en fase

4. Preguntas para antes de la práctica

¹²² Para comprobar que la conexión esta bien realizada, se debe seguir el mismo procedimiento de la *practica 4*.

- ¿Qué pasa si en el momento de conectar transformadores en paralelo, se juntan equivocadamente bornes de diferente polaridad?
- Proponga por lo menos 3 conexiones de transformadores trifásicos que se puedan conectar en paralelo, grafique el diagrama fasorial de cada uno de ellos y haga un esquema de las conexiones necesarias.
- Cual es la potencia que se puede manejar conectando transformadores en paralelo

5. Procedimiento

- Realice una de las conexiones que propuso para la conexión en paralelo.
- Verifique la conexión realizada.
- Conecte el segundo transformador con una conexión adecuada para ponerlo en paralelo con el anterior transformador.



Referencias y bibliografía

[1] Francisco Rueda, introducción al estudio de los transformadores, Universidad industrial de Santander, Pág. 67, 1984.

[2] Chapman, S. J., Máquinas eléctricas, McGraw-Hill, Nueva Cork, 1985.

[3] IEEE Std C57.12.91™-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers

