

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

**DIEGO MAURICIO LIPEZ LIPEZ
MARCO ANTONIO LÓPEZ GARCÍA**

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

2012

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

**DIEGO MAURICIO LIPEZ LIPEZ
MARCO ANTONIO LÓPEZ GARCÍA**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

2012

A Dios, promotor y consejero de mi vida y quien me provisiona de sabiduría y dones necesarios para el cumplimiento de todas mis metas.

A mis padres, mi novia y mi hermana por su apoyo incondicional, amor, comprensión, fortaleza y esfuerzo en mis años de vida.

A mis amigos con los que he compartido risas, tristezas y el esfuerzo por lograr esta meta.

— Diego Mauricio López López.

A Dios, que me provisiona de sabiduría y dones necesarios para el cumplimiento de todas mis metas.

A mis padres, mi novia, mi nona y mi hermana los cuales con su amor y gran apoyo han ayudado a convertir mis sueños en realidad.

A mis amigos que han sido y seguirán siendo parte importante para mi desarrollo personal y profesional.

— Marco Antonio López García.

Agradecimientos

En la culminación de un proceso durante el cual se manifiesta un desarrollo de habilidades, constante aprendizaje, capacidades de trabajo grupal e interacción con distintas fuentes de información queremos expresar nuestros mas sinceros agradecimientos al Dr. Hermann Raul Vargas Torres , por su dirección, acompañamiento y manifestación de confianza para hacer de este trabajo de investigación un paso mas en la vida de cada uno de nosotros.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones quienes con su grandes conocimientos nos guiaron, estimularon y apollaron durante todo el proceso de formación profesional, integral y personal a lo largo de la carrera universitaria.

Índice general

Introducción	16
1. Descripción del transformador de potencia en el dominio de la frecuencia	20
1.1. Introducción	20
1.2. Descripción del transformador de potencia	20
1.2.1. Transformador monofásico	20
1.2.1.1. Circuitos equivalente	22
1.2.1.2. Prueba de corto circuito y prueba de vacío	25
1.2.2. Transformador trifásico	27
1.2.2.1. Prueba de corto circuito y prueba de vacío	28
2. Descripción del transformador de potencia en el dominio del tiempo	30
2.1. Introducción	30
2.2. El transformador de potencia real	30
2.3. Representación en el modelo de variables de estado	33
2.3.1. Representación del transformador monofásico	35
2.3.2. Representación del transformador trifásico	36
3. Metodología para la estimación de los parámetros del transformador de potencia en el dominio del tiempo	38
3.1. Introducción	38
3.2. Simplificación para las matrices $A(t)$ y $B(t)$	38
3.3. Estimación de la tensión v_{12} a partir de la prueba de vacío	40
3.4. Estimación de los parámetros L_{12} y R_{12}	42
4. Impedancia de secuencia cero	44
4.1. Introducción	44
4.2. Secuencia cero	44

4.3. Ensayos y cálculos en el dominio de la frecuencia	45
4.4. Cálculos en el dominio del tiempo	47
5. Resultados	48
5.1. Introducción	48
5.2. Transformador monofásico pruebas en el dominio de la frecuencia . . .	48
5.3. Transformador trifásico pruebas en el dominio de la frecuencia	49
5.4. Transformador monofásico, pruebas en el dominio del tiempo	50
5.5. Transformador trifásico pruebas en el dominio del tiempo	51
5.6. Comparación de los métodos.	53
5.6.1. Cálculo del error para el transformador monofásico	53
5.6.2. Calculo del error para el transformador trifásico	53
6. Conclusiones y Observaciones	54
Referencias Bibliográficas	56
Anexos	57

Índice de anexos

Estimación por mínimos cuadrados recursivos	59
Funciones implementadas en MATLAB	64

Índice de figuras

1.1. Transformador monofásico	21
1.2. Circuito equivalente transformador real referido al primario.	23
1.3. Circuito equivalente transformador real referido al secundario.	23
1.4. Circuito equivalente transformador ideal referido al primario.	23
1.5. Circuito equivalente transformador ideal referido al secundario.	24
1.6. Conexión transformador monofásico prueba de corto circuito	25
1.7. conexión transformador monofásico prueba de vacío	26
1.8. Esquema trifásico prueba de corto circuito	28
1.9. Esquema trifásico prueba de vacío	28
2.1. Circuito eléctrico del transformador monofásico ideal	30
2.2. Bobinas mutuamente acopladas. Flujo mutuo debido a las corrientes i_1 e i_2 . . .	32
2.3. Modelo general del transformador de N-devanados con estructura interna arbitraria	33
2.4. Representación circuital del modelo del transformador N-devanado	34
3.1. Pasos para la estimación de la tensión v_{12} bajo carga	41
3.2. Diagrama de flujo del procedimiento recursivo de mínimos cuadrados	42
4.1. Conexión para determinar impedancia de secuencia cero	45
4.2. Resultado de la regresión lineal	46
5.1. Conexión transformador monofásico con carga	50
5.2. Conexión transformador monofásico vacío	51
5.3. Conexión transformador trifásico con carga	52
5.4. Conexión transformador trifásico en vacío	52

Índice de tablas

4.1. Medición en ensayo de secuencia cero	46
5.1. Placa transformador monofásico	48
5.2. Placa transformador trifásico	49
5.3. Resultados en el dominio del tiempo transformador monofásico	51
5.4. Resultados en el dominio del tiempo transformador trifásico	53

RESUMEN

TÍTULO:

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA¹

AUTORES:

DIEGO MAURICIO LÍPEZ LÍPEZ

MARCO ANTONIO LÓPEZ GARCÍA²

PALABRAS CLAVE:

Estimación de parámetros, Transformadores de potencia, Mínimos cuadrados, Matlab.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad los sistemas de potencia requieren modelos y parámetros adecuados para el estudio de su estabilidad. El transformador de potencia es uno de los elementos con mayor notabilidad en los sistemas de potencia, debido a su preponderancia en los procesos de transmisión y distribución. En Colombia se hacen estudios con valores que resultan de métodos convencionales de estimación, que muchas veces no proporcionan la información necesaria para un estudio completo del problema, aunque existan pruebas que permiten obtener los modelos necesarios para un mejor análisis, llevarlas a cabo requiere de laboratorios especializados, que implican grandes gastos económicos. Por tanto, es necesario implementar métodos prácticos y económicos para la estimación de parámetros de los componentes de los sistemas de potencia. Durante el transporte de la energía eléctrica se originan pérdidas que dependen principalmente de su intensidad. Para reducir estas pérdidas se utilizan tensiones elevadas, para que con la misma potencia, resulten menores intensidades. Por otra parte es necesario que en el lugar donde se aplica la energía eléctrica, la distribución se efectúe a tensiones más bajas y además se adapten las tensiones de distribución a los diversos casos de aplicación, para esto sea necesaria la utilización del transformador de potencia.

¹Proyecto de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raul Vargas Torres

ABSTRACT

TITLE:

ESTIMATION PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS¹

AUTHORS:

DIEGO MAURICIO LIPEZ LIPEZ

MARCO ANTONIO LÓPEZ GARCÍA²

KEY WORDS:

Estimations parameters, Power transformers, Least square, Matlab.

DESCRIPTION:

Power systems now require models and parameters appropriate for the study of its stability. Power transformer is one of the elements with greater salience in power systems, due to its dominance in the processes of transmission and distribution. In Colombia studies with values that result from conventional methods of estimation, which often do not provide the information necessary for a complete study of the problem, although there is evidence that allow to obtain the necessary models for a better analysis, are carried out requires specialized laboratories, involving large economic costs. It is therefore necessary to implement economic and practical methods for the estimation of parameters of the components of the systems of power. During the transport of electrical energy system losses that depend on its intensity. High voltages are used to reduce these losses to make with the same power, lower intensities. On the other hand it is necessary that in the place where applies electricity, the distribution is made to lower tensions and also distribution voltages are adapted to various cases of application, for this required the use of the power transformer. The transformer is a device that converts electrical energy of a certain level of voltage in electrical energy of another voltage level, through the action of a magnetic field.

¹Degree Project

²Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Hermann Raul Vargas Torres

Introducción

El presente trabajo hace parte de un conjunto de investigaciones y aplicaciones realizadas por el Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), en el área de estabilidad y control. En él se sustenta un procedimiento para determinar los parámetros de un modelo para transformadores de potencia, mediante los métodos del dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia.

Se implementa una metodología en MATLAB, para la estimación de parámetros a partir de pruebas realizadas a los transformadores durante su operación.

Objetivos

Objetivo general

Estimar los parámetros del modelo del transformador aplicando los métodos: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Objetivos específicos

El objetivo general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. Llevar a cabo las pruebas mediante el equipo suministrado por GISEL en el laboratorio de máquinas.
2. Realizar una aplicación en MATLAB que permita con los datos obtenidos en las pruebas, calcular los parámetros de transformadores en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.
3. Documentar el procedimiento realizado haciendo una comparación de los resultados obtenidos por los dos métodos.

Antecedentes

La presencia de armónicos en los sistema de energía se ha venido incrementando durante los últimos años. Con la llegada de nuevas tecnologías y más cargas no lineales, éstos armónicos en el sistema tienden a aumentar tanto en amplitud como en ancho de banda de frecuencia. La propagación de la señal en sistemas de potencia depende de las impedancias del transformador. Las impedancias del transformador, por otra parte, son funciones de la frecuencia de la señal, así como del voltaje de entrada y las condiciones de carga. Por este motivo, presentar modelos de transformadores de potencia con un solo valor de los parámetros obtenidos en las pruebas no puede representar adecuadamente el transformador en presencia de armónicos. Un modelado preciso para los transformadores debe considerar los cambios en las frecuencias de la señal y las condiciones de carga a medida que ocurren.

El problema de la saturación de los transformadores de potencia genera además del inminente daño en el mismo transformador, problemas de contaminación de armónicos en el sistema.

En la mayoría de los modelos desarrollados por diferentes autores, han intentado representar los efectos de la saturación de estos elementos, con modelos basados en curvas de saturación muy idealizadas, y en muy pocos casos, los autores han realizado comparaciones con ensayos de laboratorio.

Existen diversas técnicas en la literatura empleadas en el modelado de transformadores; están los modelos basados en simulación mediante PC para diseño de transformadores como los basados en *inductancias propias y mutuas*, en *inductancias de dispersión*, en el *principio de dualidad*, entre otros. [DWC89, DWH88, FH74b, FH74a, Wil91]

En esta tesis se emplean los métodos basados en medidas, las cuales se realizan para la determinación de los parámetros en el dominio de la frecuencia o dominio del tiempo.

Los cálculos de parámetros en el dominio del tiempo se realizan mediante algoritmos basados en técnicas de mínimos cuadrados generalizados. Para los cálculos

de los parámetros en el dominio de la frecuencia se utiliza el método clásico descrito en la mayoría de libros de teoría de máquinas eléctricas. Las técnicas presentadas aquí se pueden aplicar a transformadores trifásicos y monofásicos N-devanados. Los resultados de identificación del modelo para transformadores monofásicos y trifásicos bidevanados, son presentados. La respuesta simulada del modelo identificado se compara con la respuesta del transformador real.

1. Descripción del transformador de potencia en el dominio de la frecuencia

1.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático que describe el comportamiento y la representación circuital del transformador y el procedimiento realizado para la obtención de los parámetros.

1.2. Descripción del transformador de potencia

1.2.1. Transformador monofásico

Durante el transporte de la energía eléctrica se originan pérdidas que dependen de su intensidad. Para reducir estas pérdidas se utilizan tensiones elevadas, para que con la misma potencia, resulten menores intensidades. Por otra parte es necesario que en el lugar donde se aplica la energía eléctrica, la distribución se efectúe a tensiones más bajas y además se adapten las tensiones de distribución a los diversos casos de aplicación, para esto sea necesaria la utilización del transformador [Gri01]. El transformador es un dispositivo que convierte energía eléctrica de un cierto nivel de tensión, en energía eléctrica de otro nivel de tensión, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de alambre, aisladas entre sí eléctricamente por lo general y arrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. El arrollamiento que recibe la energía eléctrica se denomina arrollamiento de entrada o primario, con independencia si se trata de la mayor o menor tensión. El arrollamiento del que se toma la energía eléctrica a la tensión

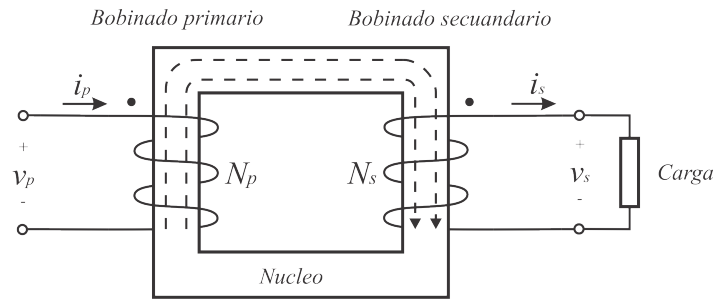


FIGURA 1.1.: Transformador monofásico

transformada se denomina arrollamiento de salida o secundario [Har04].

El arrollamiento de entrada y el de salida devanan la misma columna del núcleo de hierro. El núcleo se construye de hierro por que tiene una gran permeabilidad, o sea, conduce muy bien el flujo magnético, como se muestra en la figura 1.1

La relación de espiras del transformador de potencia monofásico se presenta en las ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3), (1.4).

$$\frac{N_p}{N_s} = a \quad (1.1)$$

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.2)$$

$$N_p \cdot I_p(t) = N_s \cdot I_s(t) \quad (1.3)$$

$$\frac{I_p(t)}{I_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (1.4)$$

donde:

a Relación de espiras

N_p Espiras del primario

N_s	Espiras del secundario
V_p	Tensión del primario
V_s	Tensión del secundario
I_p	Corriente del primario
I_s	Corriente del secundario

1.2.1.1. Circuitos equivalente

Normalmente en los diseños y análisis donde se utilizan transformadores, es muy común utilizar las características de éstos como si fueran transformadores ideales. Esto significa que: no tiene pérdidas por calor, no hay caídas de voltaje en los bobinados, no hay pérdidas por histéresis en el núcleo, etc.

Pero para la utilización de éstos en sistemas de potencia se hace necesario tener en cuenta las pérdidas que ocurren en estos.

Pérdidas que ocurren en transformadores reales:

1. Pérdidas en el cobre. Pérdidas en el cobre son pérdidas por resistencias en las bobinas primaria y secundaria del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente de dichas bobinas.
2. Pérdidas de corrientes parásitas. Las pérdidas por corrientes parásitas son pérdidas por resistencia en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada al transformador.
3. Pérdidas por histéresis. Las pérdidas por histéresis están asociadas a los reacomodamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada medio ciclo. Ellos son una función compleja, no lineal, de la tensión aplicada al transformador.
4. Flujo de dispersión. Los flujos que salen del núcleo y pasan solamente a través de una de las bobinas de transformador son flujos de dispersión. Estos flujos escapados producen una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria y los efectos de esta inductancia deben tenerse en cuenta.

Es posible construir un circuito equivalente que tenga en cuenta todas las imperfecciones principales de los transformadores reales. Cada imperfección principal se considera a su turno y su efecto se incluye en el modelo del transformador. Aunque es posible construir un modelo exacto de un transformador, no es de mucha utilidad. Para analizar circuitos prácticos que contengan transformadores, normalmente es necesario convertir el circuito entero en un circuito equivalente, con un nivel de tensión único. Por tanto, el circuito equivalente se debe referir, bien a su lado primario o bien al secundario en la solución de problemas [Har04]. En las figuras (1.2), (1.3) se muestran los circuitos equivalentes del transformador real y en las figuras (1.4), (1.5) los circuitos equivalentes del transformador ideal.

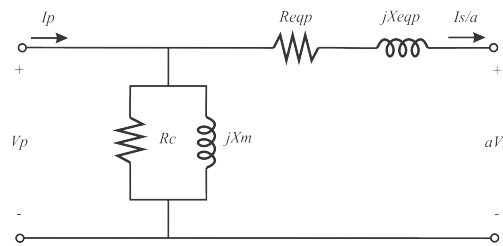


FIGURA 1.2.: Circuito equivalente transformador real referido al primario.

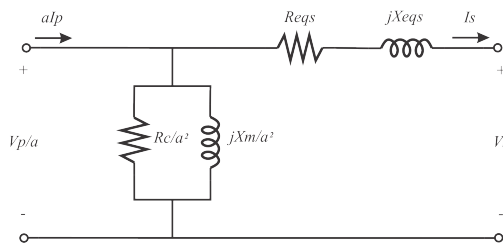


FIGURA 1.3.: Circuito equivalente transformador real referido al secundario.

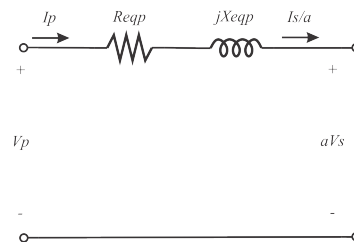


FIGURA 1.4.: Circuito equivalente transformador ideal referido al primario.

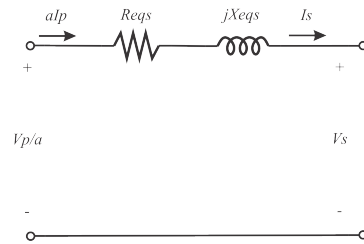


FIGURA 1.5.: Circuito equivalente transformador ideal referido al secundario.

donde:

R_{eqp}	Resistencia equivalente referida al primario
R_{eqs}	Resistencia equivalente referida al secundario
R_p	Resistencia del primario
R_s	Resistencia del secundario
R_c	Resistencia rama de magnetización
X_{eqp}	Inductancia equivalente referida al primario
X_{eqs}	Inductancia equivalente referida al secundario
X_p	Inductancia del primario
X_s	Inductancia del secundario
X_m	Inductancia rama de magnetización

$$R_{eqp} = R_p + a^2 * R_s \quad (1.5)$$

$$X_{eqp} = X_p + a^2 * X_s \quad (1.6)$$

$$R_{eqs} = \frac{R_p}{a^2} + R_s \quad (1.7)$$

$$X_{eqs} = \frac{X_p}{a^2} + X_s \quad (1.8)$$

1.2.1.2. Prueba de corto circuito y prueba de vacío

El método del dominio de la frecuencia es el método clásico y el más conocido en éste se utilizan dos pruebas básicas para estimar los parámetros de los transformadores¹, estas se denominan:

prueba de corto circuito y prueba de circuito abierto o prueba de vacío.

■ Prueba de corto circuito:

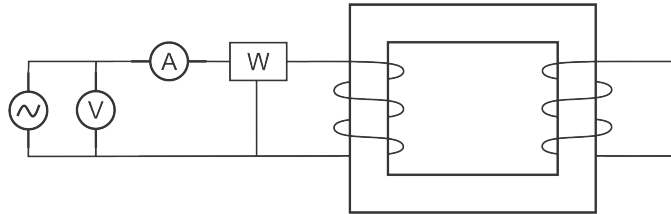


FIGURA 1.6.: Conexión transformador monofásico prueba de corto circuito

Se realiza conectando el transformador en cortocircuito por uno sus arrollamientos. Después se aplica al otro lado una tensión reducida hasta que pase por este lado del transformador la corriente nominal², con el fin de hallarse fácilmente las constantes más importantes de los devanados, como son sus tensiones, resistencias, reactancias de dispersión, la reactancia de cortocircuito y las pérdidas en las bobinas. Para el cálculo de estas constantes se utilizan las siguientes ecuaciones(1.9), (1.10), (1.11), [Ant09].

Del amperímetro $I_{cc} = I_n$

donde:

I_n Corriente nominal

I_{cc} Corriente de cortocircuito del voltímetro

U_{cc} Tensión del lado primario

¹ Impedancias relacionadas con las perdidas en el cobre y las perdidas en el núcleo

²Se recomienda realizar esta prueba utilizando como primario el lado de alta tensión, por seguridad y por límites de los instrumentos de medición

P_{cc} Potencia de cortocircuito
 $\cos\phi_{cc}$ Factor de potencia de cortocircuito

$$P_{cc} = U_{cc} * I_{cc} * \cos\phi_{cc} \quad (1.9)$$

$$P_{cc} = I_{cc}^2 * R_{cc}; \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}; \quad \cos\phi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} * I_{cc}} \quad (1.10)$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}; \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (1.11)$$

■ Prueba vacío:

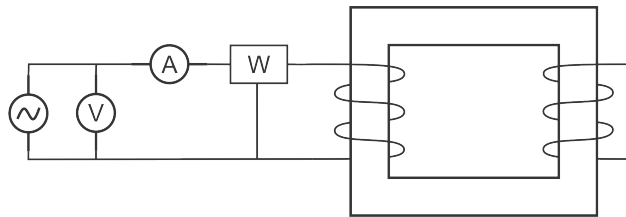


FIGURA 1.7.: conexión transformador monofásico prueba de vacío

La prueba de vacío proporciona, por medio de las medidas de tensión, corriente y potencia en el bobinado primario, los valores directos de la pérdida de potencia en el hierro, la prueba se realiza alimentando el lado primario³ a una tensión nominal y el secundario abierto, por tanto no recorrerá por este bobinado ninguna intensidad de corriente y no se tienen en cuenta las mínimas pérdidas en el cobre [Ant09].

Del voltímetro $U_o = U_n$

Donde:

I_o Corriente del lado primario

U_o Tensión del lado primario, U_n es la tensión nominal

³Se recomienda el lado de baja tensión

$$P_o = P_{fe}$$

P_{fe} Pérdidas en el hierro

$$I_{fe} = \frac{P_o}{U_o}; \quad X_m = \frac{U_o}{I_m}; \quad I_m = \sqrt{I_o^2 - I_{fe}^2} \quad (1.12)$$

$$X_m = \frac{U_o}{\sqrt{I_o^2 - \left(\frac{P_o}{U_o}\right)^2}} \quad (1.13)$$

$$R_o = \frac{U_o^2}{P_o} \quad (1.14)$$

1.2.2. Transformador trifásico

El uso de transformadores en conexión trifásica en Sistemas de Potencia es de primera importancia, pues prácticamente toda la energía eléctrica es generada y transmitida por intermedio de líneas de transmisión trifásicas, y además regularmente es necesario subir varias veces la tensión entre los generadores y las cargas [Har04].

Los transformadores en conexión trifásica pueden estar constituidos por bancos de unidades monofásicas, sin uniones magnéticas entre ellos, o bien por transformadores trifásicos, con un núcleo en el cual las tres fases están interconectadas magnéticamente. El empleo de una u otra configuración depende de las consideraciones técnico-económicas que se asuman en el conjunto [Ant09]. Según la conexión empleada, el comportamiento magnético armónico resultante introducirá problemas que es necesario considerar en los diseños.

V_L Tensión de línea

V_f Tensión de fase

I_L Corriente de línea

I_f Corriente de fase

$P_{3\theta}$ Potencia activa trifásica

P_θ Potencia activa monofásica

$Q_{3\theta}$ Potencia reactiva trifásica

Q_{θ} Potencia reactiva monofásica

1.2.2.1. Prueba de corto circuito y prueba de vacío

■ Prueba de cortocircuito

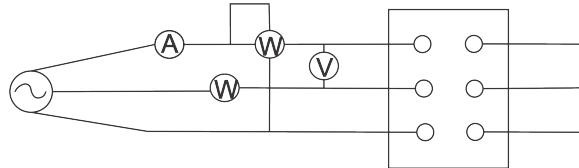


FIGURA 1.8.: Esquema trifásico prueba de corto circuito

Se recomienda realizar la prueba por el lado de alta tensión y se miden los valores de:

$$I_L, V_L, P_{3\theta}$$

Donde I_L es la corriente nominal

$$P_{3\theta} = 3I_L^2 \cdot R_{cc} \quad (1.15)$$

$$Z_{cc} = \frac{\left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)}{I_L} \quad (1.16)$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (1.17)$$

■ Prueba de vacío

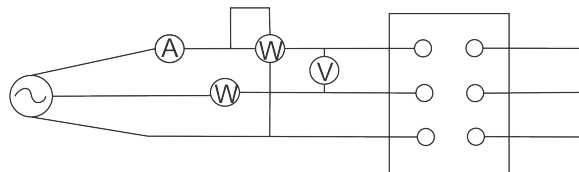


FIGURA 1.9.: Esquema trifásico prueba de vacío

Se recomienda realizar la prueba por el lado de baja tensión y se miden los valores de:

$$I_L, V_L, P_{3\theta}$$

Donde V_L es la tensión nominal

$$R_o = \frac{V_{fN}^2}{P_\theta} = \frac{V_L^2}{P_{3\theta}} \quad (1.18)$$

$$P_{3\theta} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \text{Cos}(\theta) \quad (1.19)$$

$$X_m = \frac{V_L^2}{P_{3\theta} * \text{tan}(\theta)} \quad (1.20)$$

2. Descripción del transformador de potencia en el dominio del tiempo

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático que describe el comportamiento y la representación circuital del transformador de potencia mediante el modelo de variables de estado.

2.2. El transformador de potencia real

Los transformadores son dispositivos que transfieren la energía de un circuito a otro por medio de un campo magnético común. Cuando fluye una corriente alterna en un conductor, existe un campo magnético alrededor del conductor. Si otro conductor se coloca en el campo creado por el primero de tal forma que las líneas de flujo lo vinculen, se puede inducir una tensión alterna [Gri01].

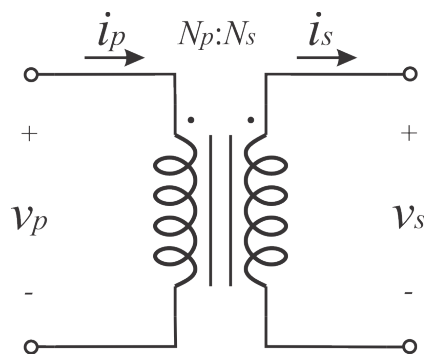


FIGURA 2.1.: Circuito eléctrico del transformador monofásico ideal

Un transformador de potencia monofásica básicamente consta de dos bobinas

arrolladas alrededor de un núcleo de material ferromagnético, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.1

El transformador ideal monofásico que responde al circuito eléctrico de la figura 2.1 se define en los siguientes supuestos:

1. La resistencia de las bobinas es cero.
2. El flujo magnético está totalmente confinado en el núcleo, es decir, no hay fugas de flujo.
3. La reluctancia magnética del núcleo es nula.
4. No hay ni histéresis ni pérdidas por corrientes de Foucault.

En estas condiciones ideales, las potencias del primario y del secundario son iguales por tanto $S_p = S_s$, y las tensiones y corrientes están relacionadas por el número de vueltas en los devanados del primario N_p y el secundario N_s [Ant09]; ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3), (1.4).

Sin embargo las líneas de flujo magnético que aparecen por efecto de la corriente en el primario, deben circular por un medio que posee cierta capacidad para llevarlas. Esta capacidad conocida como permeabilidad, es mayor en materiales constituidos por hierro o acero que la que puede proporcionar el aire circundante (del orden de 1500 veces mayor) [Har04]. Debido a estas características aparecieron los núcleos de acero que fueron utilizados en transformadores de potencia cuando se introdujeron por primera vez circuitos de corriente alterna para la distribución de energía eléctrica. Cuando dos bobinas se disponen sobre un núcleo de hierro, como se ilustra en la Figura 2.2, la mayor parte del flujo producido por la bobina 1 circula en el núcleo de modo que la tensión inducida en la bobina 2 es igual a la tensión de la bobina 1 si el número de vueltas en las dos bobinas es igual. Si se aplica una tensión a una de las bobinas de un transformador real y la otra bobina se conecta a una carga, se puede ver que las potencias activa y reactiva en ambas bobinas no son las mismas, y la relación de tensión entre el primario y el secundario no coincide exactamente con la relación de vueltas N_p/N_s [War05]. Esto plantea la necesidad de representar el transformador con un modelo más cercano a la realidad.

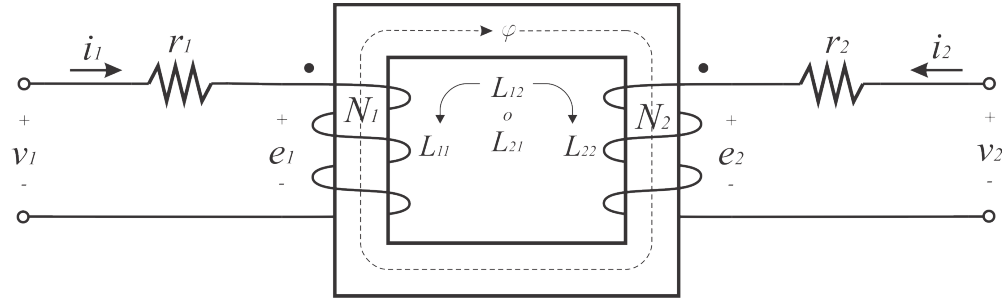


FIGURA 2.2.: Bobinas mutuamente acopladas. Flujo mutuo debido a las corrientes i_1 e i_2 .

Satisfaciendo la convención pasiva de signos en la figura 2.2, la acción única de la corriente i_1 produce el flujo ϕ_{11} el cual tiene una componente mutua ϕ_{21} que enlaza ambas bobinas y una pequeña componente de dispersión ϕ_{11} , que enlaza solamente la bobina 1. Para la bobina 1 los enlaces de flujo debidos solamente a su acción están dados por

$$\lambda_{11} = N_1\phi_{11} = L_{11}i_1$$

donde N_1 es el número de espiras de la bobina 1, y L_{11} es su inductancia propia.

Bajo la misma condición, los enlaces de flujo de la bobina 2 están dados por

$$\lambda_{21} = N_2\phi_{21} = L_{21}i_1$$

donde N_2 es el número de espiras de la bobina 2, y L_{21} es la inductancia mutua entre las bobinas [W.D96].

Definiciones similares se aplican cuando i_2 actúa sola. Para este caso el flujo ϕ_{22} tiene también dos componentes, el flujo de dispersión ϕ_{21} y el flujo mutuo ϕ_{12} . Los enlaces de flujo de la bobina 2 debidos a la acción única de i_2 son

$$\lambda_{22} = N_2\phi_{22} = L_{22}i_2$$

donde L_{22} es la inductancia propia de la bobina 2, y los enlaces de flujo de la bobina 1, debidos únicamente a i_2 , son

$$\lambda_{12} = N_1\phi_{12} = L_{12}i_2$$

Cuando ambas corrientes actúan juntas, los enlaces de flujo se suman obteniéndose las ecuaciones

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad (2.1)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{22} + \lambda_{21} = L_{22}i_2 + L_{21}i_1 \quad (2.2)$$

La propiedad recíproca de la inductancia mutua entre bobinas hace que L_{12} sea igual a L_{21} , y cuando los enlaces de flujo varían con el

tiempo [W.D96], las caídas de voltaje a través de las bobinas en la dirección de las corrientes que circulan por ellas son

$$v_1 = r_1i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} = r_1i_1 + L_{11}\frac{di_1}{dt} + L_{12}\frac{di_2}{dt} \quad (2.3)$$

$$v_2 = r_2i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} = r_2i_2 + L_{21}\frac{di_1}{dt} + L_{22}\frac{di_2}{dt} \quad (2.4)$$

2.3. Representación en el modelo de variables de estado

Partiendo de las ecuaciones (2.3) y (2.4) se considera un modelo más general como el mostrado en la figura 2.3, en donde un arreglo de resistencias, inductancias, y capacitancias conforman una estructura arbitraria [AK86].

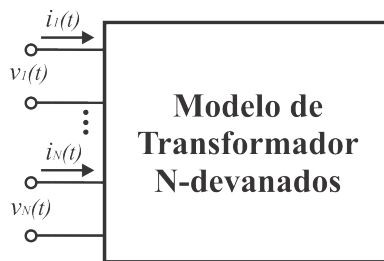


FIGURA 2.3.: Modelo general del transformador de N-devanados con estructura interna arbitraria

En particular, si cada devanado se modela por una resistencia en serie con una inductancia, y cada rama magnetizante por una resistencia en serie con una induc-

tancia saturable [FAF82], la respuesta del transformador N-devanado puede ser descrita por un conjunto de N ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden de la forma

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(X)X(t) + B(X)U(t)$$

Que pueden ser escritas como un conjunto de N ecuaciones diferenciales lineales de primer orden de coeficientes variables en el tiempo de la forma, ecuación (2.5)

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (2.5)$$

Donde:

$X = [i_1, i_2, \dots, i_N]^T$ representa el vector de estado

$U = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ es el vector de entrada

$A(t)$ y $B(t)$ son matrices N×N de parámetros variables en el tiempo

Para una condición de operación dada, la naturaleza variable en el tiempo de las matrices A y B se debe a la saturación del núcleo del transformador.

En los transformadores trifásicos, cada entrada de $A(t)$ y $B(t)$ se convierte en una matriz de 3x3 para representar el acoplamiento mutuo entre devanados [VB82].

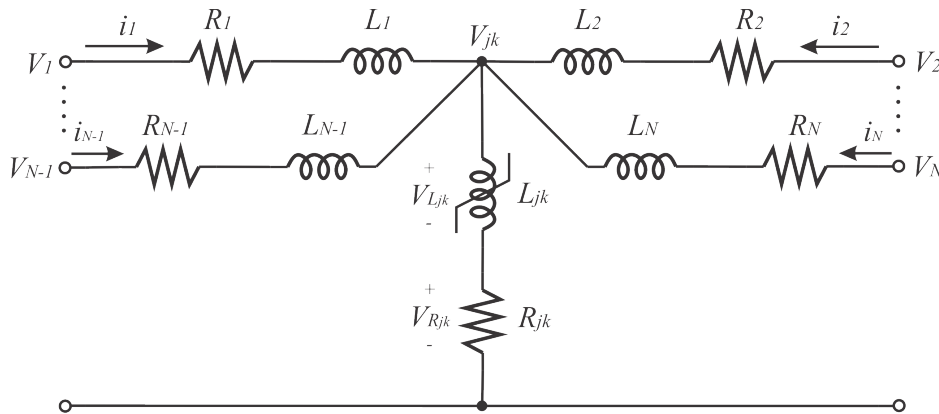


FIGURA 2.4.: Representación circuital del modelo del transformador N-devanado

Para un modelo de transformador N-devanado como el mostrado en la figura 2.4, la inductancia mutua y la resistencia mutua han sido asumidas como iguales¹ para todos los devanados j y k. La inductancia mutua L_{jk} que es una inductancia saturable, corresponde a aquella definida entre cualesquiera par de devanados, y su valor es una función no lineal de su corriente [AK86].

La representación matricial del modelo de la figura 2.4 está dado por la ecuación (2.6)

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_{jk} & R_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & R_{jk} \\ R_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_{jk} \\ R_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & R_{jk} & R_N + R_{jk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 + L_{jk} & L_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{jk} \\ L_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & L_{jk} \\ L_{jk} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{jk} & L_N + L_{jk} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Una vez supuesta una estructura para el modelo del transformador ya sea monofásico o trifásico, las matrices $A(t)$ y $B(t)$ se calculan a partir de una serie de registros de las variables de estado y de entrada. Los datos obtenidos de los procesos de medición pueden contener componentes armónicas debido a la saturación magnética del núcleo del transformador y los que pueden estar presentes en la tensión de entrada. La estimación de las matrices A y B, y la posterior obtención de los parámetros físicos del transformador debe ser llevada a cabo en presencia de ruido con una exactitud razonable [AK86].

2.3.1. Representación del transformador monofásico

Para el caso de un transformador monofásico bidevanado, los vectores de entrada y de estado están definidos por dos únicos elementos dados en la ecuación (2.5),

¹Esta asignación en general no tiene que asumirse de esta forma

obteniéndose la ecuación (2.7)

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_{12} & R_{12} \\ R_{21} & R_2 + R_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 + L_{12} & L_{12} \\ L_{21} & L_2 + L_{21} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

y las matrices que representan los valores propios y mutuos para los parámetros resistivos e inductivos, forman un arreglo de elementos de 2x2. La inductancia mutua se asume como un parámetro variable en el tiempo cuyo valor instantáneo debe ser estimado.

Resolviendo para $A(t)$ y $B(t)$ según la ecuación (2.5), se obtienen las ecuaciones (2.8) y (2.9)

$$A(t) = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -L_2(R_1 + R_{12}) - L_{12}R_1 & L_{12}R_2 - L_2R_{12} \\ L_{12}R_1 - L_1R_{12} & -L_1(R_2 + R_{12}) - L_{12}R_2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$B(t) = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_2 + L_{12} & -L_{12} \\ -L_{12} & L_1 + L_{12} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Donde:

$$D = L_1L_2 + L_{12}(L_1 + L_2)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) & i_2(t) \end{bmatrix}^T$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) & v_2(t) \end{bmatrix}^T$$

Mas sin embargo, estas formas para las matrices $A(t)$ y $B(t)$ se pueden simplificar a otra forma mas reducida cuando se implementa la metodología para el cálculo de los parámetros en el capítulo 3.

2.3.2. Representación del transformador trifásico

Para un transformador trifásico, cada entrada en las matrices de parámetros se convierte en un arreglo de 3x3, y cada entrada para los vectores de estado y de entrada se convierte en un arreglo de 3x1, es decir, $L_1 + L_{jk}$ se convierte en, ecuación (2.10)

$$\begin{bmatrix} L_a + L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_b + L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_{jk} & L_c + L_{jk} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

y $R_1 + R_{jk}$ en, ecuación (2.11)

$$\begin{bmatrix} R_a + R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_b + R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_{jk} & R_c + R_{jk} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} v_1 \text{ en } & \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix}^T \\ v_2 \text{ en } & \begin{bmatrix} v_A & v_B & v_C \end{bmatrix}^T \\ i_1 \text{ en } & \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T \\ i_2 \text{ en } & \begin{bmatrix} i_A & i_B & i_C \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

de aquí se obtiene, ecuación (2.12)

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_b + R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_{jk} & R_c + R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_A + R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_B + R_{jk} & R_{jk} \\ R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_{jk} & R_C + R_{jk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} L_a + L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_b + L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_{jk} & L_c + L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_A + L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_B + L_{jk} & L_{jk} \\ L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_{jk} & L_C + L_{jk} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En donde los parámetros mutuos fuera de la diagonal principal R_{jk} y L_{jk} , son todos iguales para cualesquiera par de devanados. Para este caso resulta algo dispendioso invertir la matriz de inductancias para propósitos ilustrativos y definir $A(t)$ y $B(t)$, se deja para el capítulo 3 la ilustración de las formas reducidas para éstas matrices.

3. Metodología para la estimación de los parámetros del transformador de potencia en el dominio del tiempo

3.1. Introducción

En esta sección, se presenta la formulación matemática del enfoque adoptado en la estimación de los parámetros en transformadores¹ bidevanados monofásicos y trifásicos en las condiciones descritas en el capítulo 2. El procedimiento se lleva a cabo en el dominio del tiempo discreto, y una reformulación matemática para el vector de entrada en la ecuación (2.5), hace posible suprimir el efecto de la inductancia mutua para la utilización de un estimador generalizado de mínimos cuadrados. Los valores para R_{jk} y L_{jk} son determinados de forma indirecta mediante la estimación de una tensión no medible directamente.

3.2. Simplificación para las matrices $A(t)$ y $B(t)$

La ecuación (2.5), para el dominio en tiempo discreto se convierte en:

$$X[k + 1] = A^*[k]X[k] + B^*[k]U[k]$$

En donde A^* y B^* son matrices de parámetros para el modelo de tiempo discreto y k es el instante de tiempo. Estas matrices se pueden estimar a partir de un conjunto de datos obtenidos en pruebas de laboratorio para $X[\cdot]$ y $U[\cdot]$, usando técnicas generalizadas de mínimos cuadrados y suponiendo que estos parámetros son invariantes en el tiempo o varían lentamente. Para la estimación de los parámetros en el mode-

¹Impedancias relacionadas con las pérdidas en el núcleo y pérdidas en el cobre

lo de tiempo continuo se emplean transformaciones adecuadas para A^* y B^* para un instante de tiempo dado.

En un transformador la inductancia mutua es un parámetro que varía rápidamente, y para que el EGMC² haga un seguimiento cercano de $A^*[k]$ y $B^*[k]$, debe eliminarse el efecto de ésta inductancia en las entradas para éstas matrices [AK86]. Escribiendo nuevamente de una forma apropiada el vector de entrada para la ecuación (2.5), se tiene para el caso monofásico, ecuación (3.1)

$$U = \begin{bmatrix} v_1 - \widehat{v}_{12} & v_2 - \widehat{v}_{12} \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

En donde \widehat{v}_{12} indica la tensión estimada para la rama magnetizante. Con este cambio de entrada, para el caso de un transformador monofásico, las matrices A y B se convierten en, ecuación (3.2)

$$A = \begin{bmatrix} -R_1/L_1 & 0 \\ 0 & -R_2/L_2 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Que no dependen de L_{12} . El problema entonces se reduce a estimar los valores para (3.2) y para R_{12} y L_{12} a partir de una serie de mediciones para las tensiones y corrientes en los devanados, teniendo presente que la tensión v_{12} en (3.1), no se puede medir directamente.

Para tal propósito se debe primero a partir de mediciones hechas en pruebas de vacío, determinar la tensión v_{12} , luego se estiman los parámetros del transformador mediante el procesamiento de las secuencias de tensión y corrientes medidas en pruebas bajo carga y el valor estimado para v_{12} [AK86]. Esto significa que debe estimarse primero el vector de entrada definido en (3.1), para luego junto con el vector de estados encontrar los valores para la ecuación (3.2).

Para el caso trifásico se extiende a la siguiente forma, ecuación (3.3)

$$U = \begin{bmatrix} v_a - \widehat{v}_{aA} & v_b - \widehat{v}_{bB} & v_c - \widehat{v}_{cC} & v_A - \widehat{v}_{Aa} & v_B - \widehat{v}_{Bb} & v_C - \widehat{v}_{Cc} \end{bmatrix}^T \quad (3.3)$$

² EGMC Estimador Generalizado de Mínimos Cuadrados.

y para éste vector de entrada las matrices A y B se convierten en las ecuaciones (3.4) y (3.5)

$$A = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_b/L_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_c/L_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_A/L_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_B/L_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_C/L_C \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_C \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

En adelante solo se definirán las ecuaciones para el caso monofásico, extendiéndose de la misma forma para el caso trifásico.

3.3. Estimación de la tensión v_{12} a partir de la prueba de vacío

A partir del circuito equivalente se obtiene la ecuación (3.6)

$$v_{12} = \frac{1}{2} \left(v_1 + v_2 - R_1 i_1 - R_2 i_2 - L_1 \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \quad (3.6)$$

y asumiendo que $R_1 \approx R_2$ y $L_1 \approx L_2$ se puede estimar v_{12} en el dominio del tiempo continuo mediante, ecuación (3.7)

$$\widehat{v}_{12} = f_t \left(v_1 + v_2, i_1 + i_2, \frac{d}{dt} (i_1 + i_2) \right) \quad (3.7)$$

o en el dominio de tiempo discreto por, ecuación (3.8)

$$\widehat{v}_{12}[k] = g_k (v_1[k] + v_2[k], i_1[k] + i_2[k], i_1[k + 1] + i_2[k + 1]) \quad (3.8)$$

Las funciones variantes en el tiempo f_t y g_k se deben estimar a partir de las pruebas de vacío, asumiendo que éstas no cambian significativamente cuando el transformador opera en condiciones de vacío o bajo carga. Al ser g_k un operador lineal, se puede reemplazar por una matriz variante en el tiempo G_k . Para el transformador en vacío $i_2 = 0, v_{12} = v_2$ y se puede escribir, ecuación (3.9)

$$\widehat{v}_{12}[k] = [G[k]] \begin{bmatrix} i_1[k] \\ i_1[k + 1] \\ v_1[k] + v_2[k] \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

La matriz G_k se puede estimar usando el EGMC.

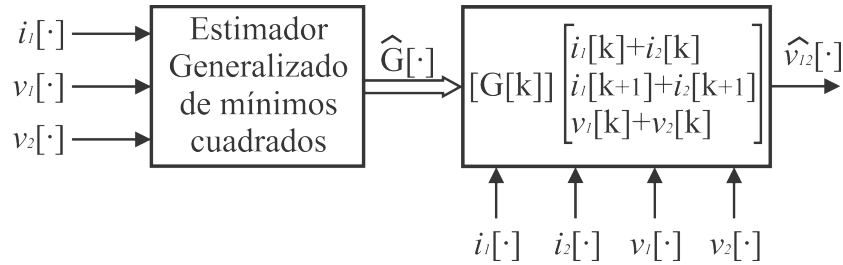


FIGURA 3.1.: Pasos para la estimación de la tensión v_{12} bajo carga

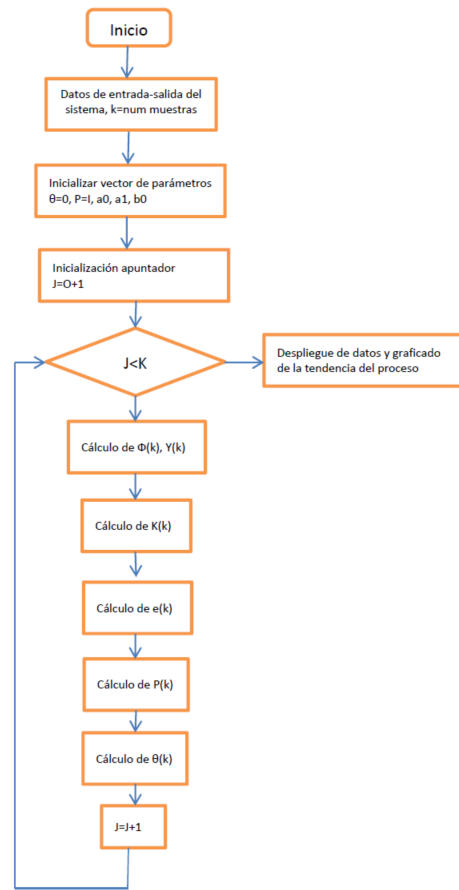


FIGURA 3.2.: Diagrama de flujo del procedimiento recursivo de mínimos cuadrados

3.4. Estimación de los parámetros L_{12} y R_{12}

Para obtener los estimados de L_{12} y R_{12} se expresa el voltaje \widehat{v}_{12} y la corriente $i_{12} = i_1 + i_2$ en términos de sus expansiones en series de Fourier truncadas (3.10) y (3.11)

$$i_{12} = \sum_l (a_l \text{sen}(l\omega t) + b_l \text{cos}(l\omega t)) \quad (3.10)$$

$$\widehat{v}_{12} = \sum_l (c_l \text{sen}(l\omega t) + d_l \text{cos}(l\omega t)) \quad (3.11)$$

definiendo; ecuaciones (3.14) y (3.13)

$$i_{12}^l = (a_l \text{sen}(l\omega t) + b_l \text{cos}(l\omega t)) \quad (3.12)$$

$$v_{12}^l = (c_l \text{sen}(l\omega t) + d_l \text{cos}(l\omega t)) \quad (3.13)$$

La tensión v_{12}^l tiene dos componentes, una en fase con i_{12}^l , v_R^l , y una adelantando a i_{12}^l por 90° , v_L^l . Para encontrar estas componentes se procede:

1. Se escribe i_{12}^l como $i_{12}^l = (a^2 + b^2)^{1/2} \text{cos}(l\omega t - \phi_l)$, siendo $\phi_l = \text{Arctan2}(a_l/b_l)$
2. Se calcula la matriz de transformación $T_l = \begin{bmatrix} -\text{cos}\phi_l & \text{sen}\phi_l \\ \text{sen}\phi_l & \text{cos}\phi_l \end{bmatrix}$
3. Se calcula luego v_L^l y v_R^l mediante $v_L^l = -e_l \text{sen}(l\omega t - \phi_l)$ y $v_R^l = -f_l \text{cos}(l\omega t - \phi_l)$, donde $\begin{bmatrix} e_l \\ f_l \end{bmatrix} = [T_l] \begin{bmatrix} c_l \\ d_l \end{bmatrix}$

La inductancia L_{12} ahora puede ser estimada mediante

$$\widehat{L}_{12} = \frac{\partial}{\partial i_{12}} \int v_l dt$$

$$v_L = \sum_l v_L^l$$

En donde tanto la integración como la diferenciación se llevan a cabo a partir de los valores ascendentes y descendentes de i_{12} . La resistencia R_{12} puede ser estimada usando el EGMC para ajustar el modelo de la forma, ecuación (3.14)

$$v_R[k] = \sum_l v_R^l[k] = \widehat{R}_{12}[k] i_{12}[k] \quad (3.14)$$

4. Impedancia de secuencia cero

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el método y el ensayo para determinar la impedancia de secuencia cero¹

4.2. Secuencia cero

La impedancia de secuencia cero de un transformador depende fuertemente del circuito magnético que este posea, es decir del núcleo del transformador y en algunos casos de la presencia de la cuba. En este caso el transformador trifásico es de tres columnas con ventilación natural, por lo tanto, la componente del flujo de secuencia cero se cierra principalmente por el aire.

¹Este capítulo se realiza para calcular un parámetro adicional, el cual no se tiene en cuenta en los cursos de máquinas eléctricas de pregrado, pero se utiliza en cursos posteriores (sistemas de potencia).

4.3. Ensayos y cálculos en el dominio de la frecuencia

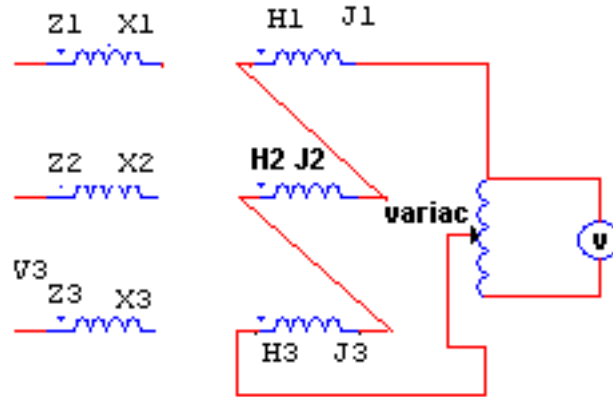


FIGURA 4.1.: Conexión para determinar impedancia de secuencia cero

Para determinar la impedancia de secuencia cero se utilizó el método de conectar las tres bobinas en serie (bobinas de baja) de un lado del transformador, dejando el lado opuesto abierto. Esto garantiza que las corrientes que circulan por los devanados del transformador sean iguales, sin embargo, la tensión de cada bobina es la tercera parte de la tensión medida, al igual que la potencia. La impedancia de secuencia cero se determina con las ecuaciones:

$$Z_0 = \frac{V}{3I} \quad (4.1)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{P}{V \cdot I} \right) \quad (4.2)$$

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos(\phi) \quad (4.3)$$

$$X_0 = Z_0 \cdot \sin(\phi) \quad (4.4)$$

Las mediciones realizadas, tensión-corriente y potencia activa, de acuerdo en la disposición mostrada en la figura 4.1. Tomando una cantidad considerable de puntos para construir una característica V/I partiendo de tensión cero hasta la máxima que puede entregar el autotransformador.

V(V)	I(A)	P(W)	Z ₀ (Ω)	φ	R ₀ (Ω)	X ₀ (Ω)
0	0	0	-	-	-	-
18,35	2,02	3	3,02	1,48	0,27	3,0
37,2	4,05	11	3,06	1,49	0,24	3,05
55,6	6,01	25	3,08	1,49	0,24	3,06
70	7,61	42	3,06	1,49	0,24	3,05

TABLA 4.1.: Medición en ensayo de secuencia cero

Luego de obtener los valores correspondientes a la impedancia, resistencia y reactancia de secuencia cero para cada medición realizada, se procede a realizar una estimación mediante regresión lineal según la ecuación 4.1, obteniéndose la figura 4.2:

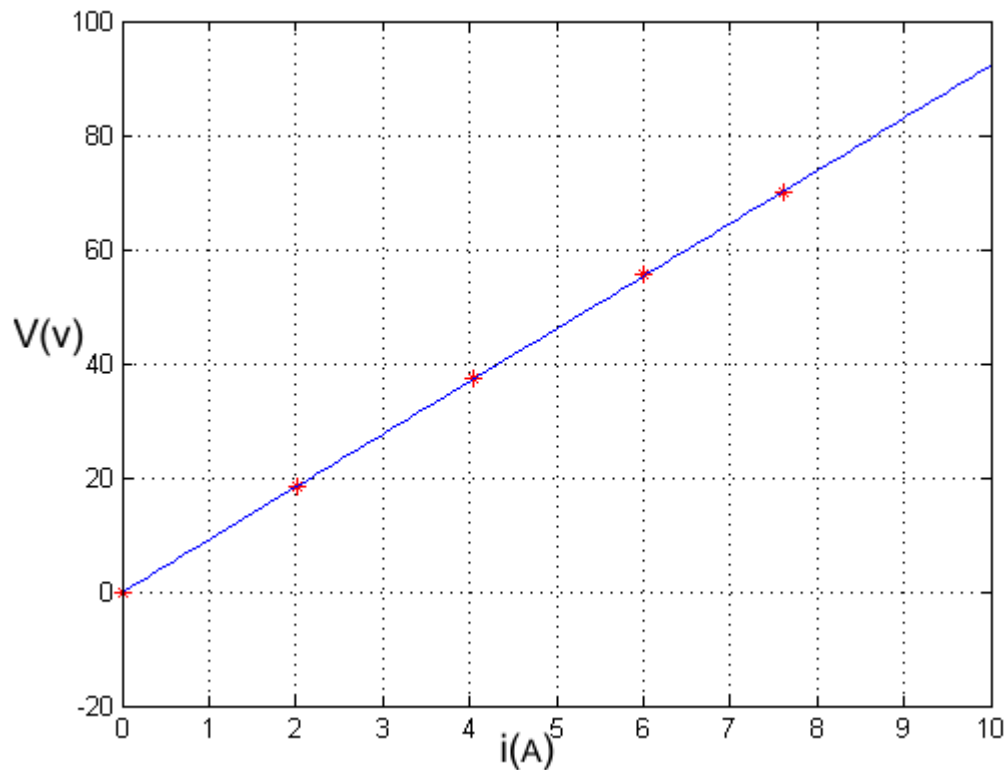


FIGURA 4.2.: Resultado de la regresión lineal

Se toman los datos de la entrada 3 de la tabla 4.1 ya que coinciden mejor con la línea recta.

$$Z_0 = 3,06 \text{ } [\Omega]$$

$$R_0 = 0,24 [\Omega]$$

$$X_0 = 3,05 [\Omega]$$

4.4. Cálculos en el dominio del tiempo

Teniendo en cuenta el esquema de la figura 4.1, al conectar los devanados de baja en serie, se pueden obtener las ecuaciones (4.5) y (4.6)

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (4.5)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (4.6)$$

entonces, las relaciones de tensión y corriente en el dominio del tiempo continuo se reducen a, ecuaciones (4.7) y (4.8)

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (4.7)$$

y para el tiempo discreto:

$$v[k] = RI[k] + LI[k + 1] \quad (4.8)$$

al resolver este sistema lineal mediante un algoritmo de mínimos² cuadrados se obtiene:

$$L = 0,027 [H]$$

$$R = 3,98 [\Omega]$$

²El algoritmo se muestra en los anexos B de este libro.

5. Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas al transformador monofásico y al transformador trifásico seleccionados del laboratorio de maquinas eléctricas de la Universidad Industrial de Santander, utilizando el método del dominio de la frecuencia y del dominio del tiempo.

5.2. Transformador monofásico pruebas en el dominio de la frecuencia

Lado de alta tensión		Lado de baja tensión	
216	V	132	V
8,3	A	16,7	A
2		kVA	

TABLA 5.1.: Placa transformador monofásico

■ Prueba de cortocircuito

Realizando la prueba se obtiene:

$$P_{ccprueba} = 72 \text{ [W]} \quad I_{ccprueba} = 8 \text{ [A]} \quad U_{ccprueba} = 9,2 \text{ [V]}$$

$$P_{cccorregida} = 77,501 \text{ [W]} \quad I_{cccorregida} = 8,3 \text{ [A]} \quad U_{cccorregida} = 9,545 \text{ [V]}$$

Reemplazando los datos corregidos en las ecuaciones¹ (1.9), (1.10), (1.11) se obtiene
 $R1 = R2 = 0,426 \text{ } [\Omega]$
 $L1 = L2 = 0,239 \text{ } [mH]$

■ Prueba de vacío

Realizando la prueba se obtiene

$$I_o = 1,9 \text{ } [A] \quad U_o = 132,4 \text{ } [V] \quad P_o = 29 \text{ } [W]$$

Reemplazando estos datos en las ecuaciones (1.12), (1.13), (1.14) se obtienen los siguientes resultados

$$R_o = 604,4752 \text{ } [\Omega]$$

$$L_m = 843,9 \text{ } [mH]$$

5.3. Transformador trifásico pruebas en el dominio de la frecuencia

Lado de alta tensión		Lado de baja tensión	
220	V	127	V
12,1	A	21	A
8		kVA	

TABLA 5.2.: Placa transformador trifásico

Las pruebas realizadas al transformador trifásico se realizaron con conexión Y-y0

■ Prueba de corto circuito

Resultados de la prueba

$$I_{ccprueba} = 8 \text{ } [A] \quad ; U_{ccprueba} = 12,9 \text{ } [V] \quad ; P_{ccprueba} = 176 \text{ } [W]$$

$$I_{cccorregida} = 12,1 \text{ } [A] \quad ; U_{cccorregida} = 19,2 \text{ } [V] \quad ; P_{cccorregida} = 402,627 \text{ } [W]$$

¹Los valores obtenidos en la prueba de cortocircuito tanto para monofásico como para trifásico, se corrigieron debido a que no se logró realizar el ensayo a corriente nominal, por restricciones del autotransformador

Reemplazando estos datos corregidos en las ecuaciones (1.15), (1.16), (1.17), se obtiene:

$$R1 = R2 = 0,33549 \text{ } [\Omega]$$

$$L1 = L2 = 0,157 \text{ } [mH]$$

■ Prueba de vacío

Resultados de la prueba

$$I_o = 1,2 \text{ } [A], U_o = 220 \text{ } [V], P_o = 46 \text{ } [W]$$

Remplazando los datos obtenidos de la prueba en las ecuaciones(1.18), (1.19), (1.20), se obtiene:

$$R_o = 1052,174 \text{ } [\Omega]$$

$$L_m = 282,2 \text{ } [mH]$$

5.4. Transformador monofásico, pruebas en el dominio del tiempo

Las figuras (5.1) y (5.2) muestran las conexiones realizadas al transformador monofásico para las pruebas en el dominio del tiempo.

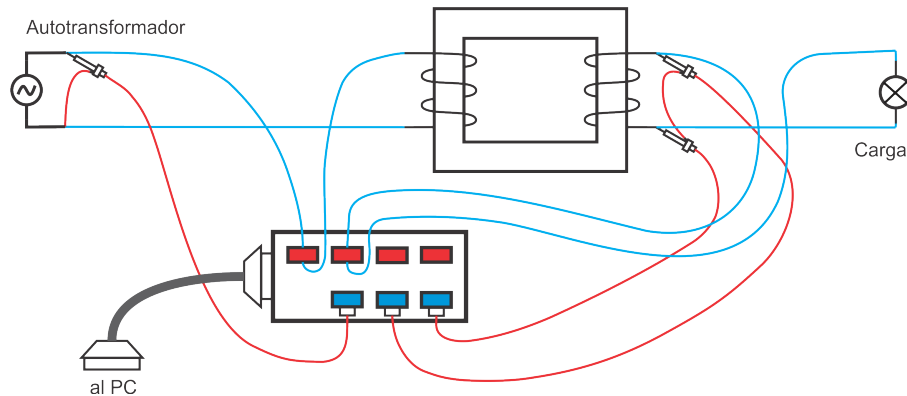


FIGURA 5.1.: Conexión transformador monofásico con carga

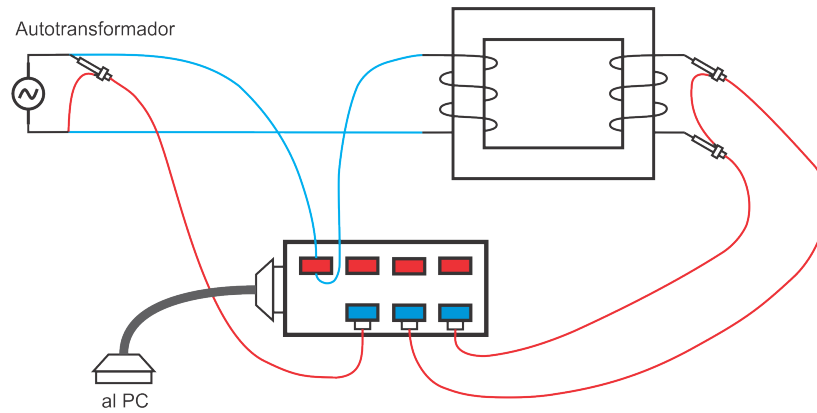


FIGURA 5.2.: Conexión transformador monofásico vacío

Los resultados obtenidos del algoritmo para el transformador monofásico son los siguientes:

L mH	R Ω
L1=64,8	R1=0,94
L2=71,1	R2=0,957

TABLA 5.3.: Resultados en el dominio del tiempo transformador monofásico

5.5. Transformador trifásico pruebas en el dominio del tiempo

Las figuras (5.3) y (5.4) muestran las conexiones realizadas al transformador trifásico para las pruebas en el dominio del tiempo.

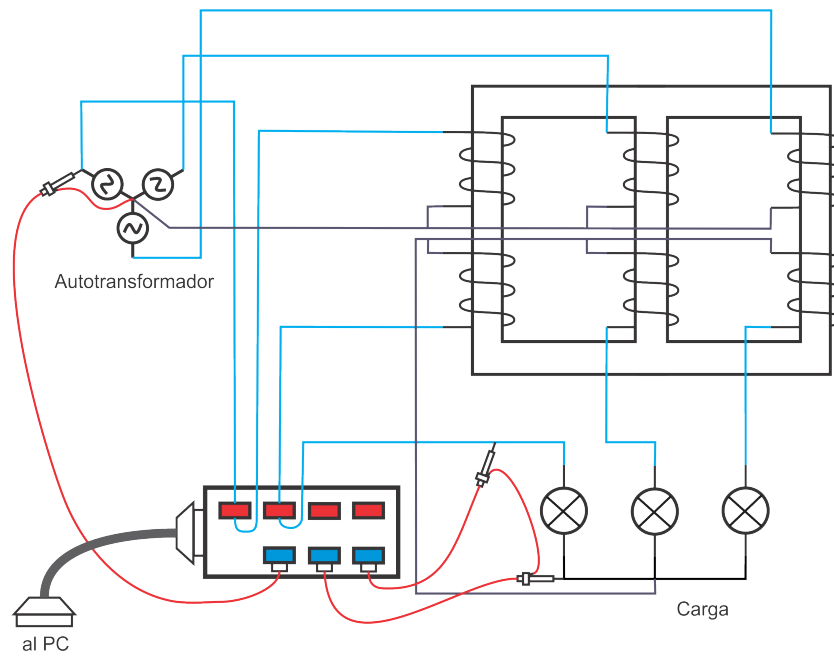


FIGURA 5.3.: Conexión transformador trifásico con carga

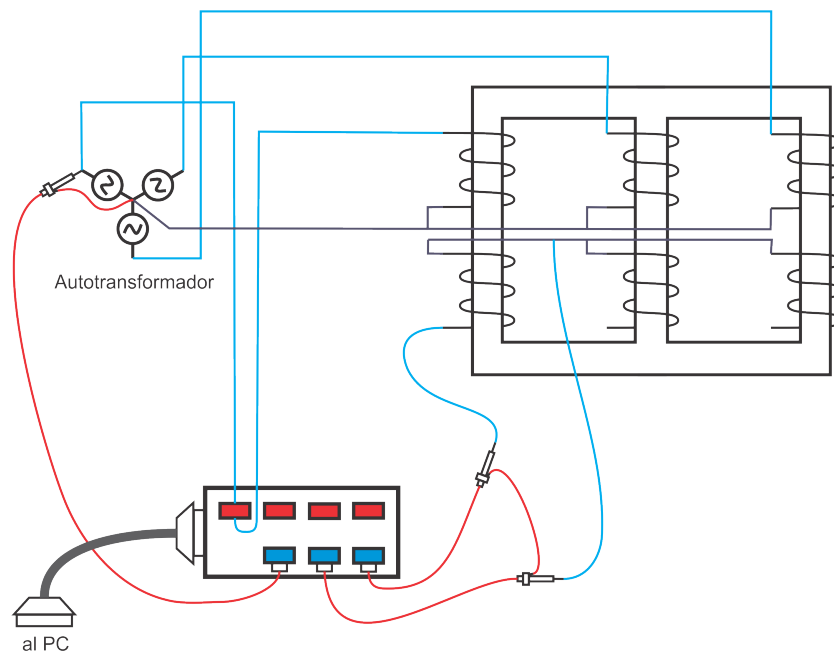


FIGURA 5.4.: Conexión transformador trifásico en vacío

Utilizando el algoritmo desarrollado para el transformador trifásico se obtienen los siguientes resultados:

L [mH]	R [Ω]
L1a =4,2	R1a =0,6232
L1b =4,2	R1b =0,6232
L1c =4,2	R1c =0,6232
L2a =6	R2a =0,363
L2b =6	R2b =0,363
L2c =6	R2c =0,363

TABLA 5.4.: Resultados en el dominio del tiempo transformador trifásico

5.6. Comparación de los métodos.

5.6.1. Cálculo del error para el transformador monofásico

Utilizando los datos obtenidos de las pruebas realizadas con los dos métodos para el transformador monofásico se calculan los errores:²

$$\varepsilon_{R1} \% = \frac{|0,94-0,426|}{0,426} * 100 = 120,65\%$$

$$\varepsilon_{R2} \% = \frac{|0,957-0,426|}{0,426} * 100 = 124,64\%$$

$$\varepsilon_{L1} \% = \frac{|64,8m-0,239m|}{0,239m} * 100 = 2701,1\%$$

$$\varepsilon_{L2} \% = \frac{|71,1m-0,239m|}{0,239m} * 100 = 2965,2\%$$

5.6.2. Calculo del error para el transformador trifásico

Utilizando los datos obtenidos de las pruebas realizadas con los dos métodos para el transformador trifásico se calculan los errores:

$$\varepsilon_{R1} \% = \frac{|0,6232-0,33549|}{0,33549} * 100 = 85,75\%$$

$$\varepsilon_{R2} \% = \frac{|0,363-0,33549|}{0,33549} * 100 = 8,19\%$$

$$\varepsilon_{L1} \% = \frac{|4,2m-0,157m|}{0,157m} * 100 = 257,5\%$$

$$\varepsilon_{L2} \% = \frac{|6m-0,157m|}{0,157m} * 100 = 372,1\%$$

²Para el cálculo de los errores tanto del transformador monofásico como del transformador trifásico se utiliza como base el método del dominio de la frecuencia

6. Conclusiones y Observaciones

El trabajo experimental ha sido indispensable para el desarrollo de este trabajo, porque ha permitido el diseño conceptual y desarrollar el modelo presentado. Los resultados más importantes de este trabajo son los siguientes:

1. Se han desarrollado ensayos en dos transformadores pertenecientes al laboratorio de máquinas eléctricas de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER; uno trifásico de tres columnas del tipo seco con una potencia de 8 kVA y el otro es un transformador monofásico de 2 kVA .
2. El modelado del transformador ha sido realizada bajo la idea de una formulación sencilla y que sus parámetros necesarios sean fáciles de obtener en laboratorio, sin necesidad de parámetros constructivos o de diseño que solo pueda proporcionar el fabricante.
3. Se ha desarrollado un procedimiento de medidas de laboratorio para la obtención de los parámetros necesarios para caracterizar los transformadores.
4. Se ha desarrollado el procedimiento necesario para calcular los parámetros del transformador en el dominio de la frecuencia.
5. Se ha desarrollado un algoritmo para la obtención de los parámetros de forma recursiva de los transformadores en el dominio del tiempo.
6. El algoritmo desarrollado para el transformador monofásico ha servido como base para el desarrollo del algoritmo del transformador trifásico. Utilizando el método de mínimos cuadrados recursivos.
7. El algoritmo implementado se desarrolló en el programa MATLAB, debido a su fácil utilización por su formato vectorial matricial.

8. Se utiliza el método basado del dominio de la frecuencia como base para realizar las comparaciones de estos dos métodos, debido a que este es el más conocido y utilizado, durante el transcurso de la carrera de Ingeniería Eléctrica.
9. Para comparar los resultados obtenidos en dichos métodos se asume que en el dominio de la frecuencia $R1=R2$, $L1=L2$.
10. Dada la sencillez del modelo propuesto, éste puede usarse también para usos didácticos en el estudio del fenómeno de la saturación en laboratorio. Se incluyen los listados del algoritmo para la obtención de los parámetros en el dominio del tiempo.

La herramienta suministrada por el grupo de investigación GISEL, mostró ser efectiva al lograr una buena estimación de los parámetros de los transformadores utilizados en las pruebas. No obstante los resultados pueden mejorar, si se hacen ajustes en la herramienta.

Referencias Bibliográficas

- [AK86] S.M. Miri A. Keyhani. Observers for tracking of synchronous machine parameters and detection of incipient fault. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-1:9, 1986.
- [Ant09] Electric energy systems, analysis and operation. 2009.
- [DWC89] W.G. Hurley D.J. Wilcox and M. Colon. Calculations of self and mutual impedances of between sections of transformer windings. *IEE Proceeding*, Vol. 136, Pt. C:pp. 308–314, No. 5 September 1989.
- [DWH88] M. Colon D.J. Wilcox and W.G. Hurley. Calculations of self and mutual impedances for coils on ferromagnetic cores. *IEE Proceeding*, Vol. 135, Pt. A:pp. 470–476, No. 7 September 1988.
- [FAF82] N. A. Demerdash F. A. Fouad, T. W. Nehl. Saturated transformers inductances determined by energy perturbation techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101:9, 1982.
- [FH74a] P.I. Fergestad and T. Henriksen. inductances for the calculations of transient oscillation in transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93:pp. 510–517, March-April 1974.
- [FH74b] P.I. Fergestad and T. Henriksen. Transient oscillations in multiwinding transformer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93:pp. 500–509, March-April 1974.
- [Gri01] Electric power engineering handbook. 2001.
- [Har04] James H Harlow. Electric power transformer engineering. 2004.
- [VB82] I.I. Dommel V. Brandwajn, H.W. Dommel. Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101:10, 1982.

- [War05] D. F. Warne. Electrical power engineer's handbook 2 edition. 2005.
- [W.D96] W.D.Stevenson. Análisis de sistemas eléctricos de potencia. 1996.
- [Wil91] D.J. Wilcox. Theory of transformer modelling using modal analysis. *IEE Proceeding*, Vol. 138, Pt. C:pp. 121– 128, No. 2 March 1991.

Anexos

A. Estimación por mínimos cuadrados recursivos

El método de mínimos cuadrados, permite obtener estimación de parámetros para sistemas bien condicionados en un análisis fuera de línea. Sin embargo, a partir de esta idea, se plantea la posibilidad de realizar una estimación de parámetros en línea, esto es, realizando un proceso de identificación con los últimos valores muestreados de la entrada y salida del sistema de tal manera que en el intervalo de tiempo entre cada muestra se realice el procedimiento de identificación.

Para aplicaciones en tiempo real la forma recursiva del método de mínimos cuadrados reduce el tiempo de cómputo. Este método básicamente estima el vector de parámetros $\underline{\omega}(n)$ como función del valor previo $\underline{\omega}(n-1)$ y del último valor muestreado de la entrada $u(n)$ y salida $y(n)$ del sistema. El desarrollo de este método se describe a continuación.

A.1. Declaración del problema

- Dado el conjunto de muestras de entrada $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$ y el conjunto de respuestas esperadas $\{d(1), d(2), \dots, d(N)\}$
- En la familia de filtros lineales, la salida se calcula de acuerdo a:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M \omega_k u(n-k), \quad n = 1, 2, \dots$$

- Encontrar recursivamente en el tiempo los parámetros $\{\omega_0(n), \omega_1(n), \dots, \omega_{M-1}(n)\}$ tal que minimizen la suma de los errores al cuadrado

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(\omega_0(n), \omega_1(n), \dots, \omega_{M-1}(n)) = \sum_{i=i_1}^n \beta(n, i) [e(i)]^2 = \sum_{i=i_1}^n \beta(n, i) \left[d(i) - \sum_{k=0}^{M-1} \omega_k(n) u(i-k) \right]^2$$

Donde la señal de error es:

$$e(i) = d(i) - y(i) = d(i) - \sum_{k=0}^{M-1} \omega_k(n)u(i-k)$$

y el factor de olvido o factor de ponderación reduce la influencia de los datos mas antiguos

$$0 < \beta(n, i) \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

comunmente toma la forma ($0 < \lambda < 1$)

$$\beta(n, i) = \lambda^{n-i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

A.2. Solución recursiva en el tiempo

Se desea encontrar una forma recursiva en el tiempo para calcular

$$\omega(n) = [\Phi(n)]^{-1} \underline{\psi}(n)$$

usando la información ya disponible en el tiempo $n - 1$,

$$\omega(n-1) = [\Phi(n-1)]^{-1} \underline{\psi}(n-1)$$

por lo tanto, reescribiendo las variables $\Phi(n)$ y $\Psi(n)$ como funciones de $\Phi(n-1)$ y $\psi(n-1)$

$$\Phi(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \underline{u}(i) \underline{u}^T(i) = \lambda \sum_{i=1}^{n-1} \lambda^{n-1-i} \underline{u}(i) \underline{u}^T(i) + \underline{u}(n) \underline{u}^T(n) = \lambda \Phi(n-1) + \underline{u}(n) \underline{u}^T(n)$$

$$\underline{\psi}(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \underline{u}(i) d(i) = \lambda \sum_{i=1}^{n-1} \lambda^{n-1-i} \underline{u}(i) d(i) + \underline{u}(n) d(n) = \lambda \underline{\psi}(n-1) + \underline{u}(n) d(n)$$

■ Formula de la matriz inversa

Si A y B son matrices definidas de $M \times M$, D es una matriz de $N \times N$ y C es una matriz $M \times N$, las cuales están relacionadas por

$$A = B^{-1} + CD^{-1}C^T$$

luego

$$A^{-1} = B - BC(D + C^TBC)^{-1}C^TB$$

prueba el ejercicio.

■ Deducción del algoritmo

Aplicando la formula de la matriz inversa a

$$\Phi(n) = \lambda\Phi(n-1) + \underline{u}(n)\underline{u}(n)^T$$

se obtiene

$$\Phi^{-1}(n) = \lambda^{-1}\Phi^{-1}(n-1) - \frac{\lambda^{-2}\Phi^{-1}(n-1)\underline{u}(n)\underline{u}(n)^T\Phi^{-1}(n-1)}{1 + \lambda^{-1}\underline{u}^T(n)\Phi^{-1}(n-1)\underline{u}(n)}$$

que denota

$$P(n) = \Phi^{-1}(n)$$

y

$$\underline{k}(n) = \frac{\lambda^{-1}P(n-1)\underline{u}(n)}{1 + \lambda^{-1}\underline{u}^T(n)P(n-1)\underline{u}(n)} = P(n)\underline{u}(n)$$

se obtiene

$$P(n) = \lambda^{-1}P(n-1) - \lambda^{-1}\underline{k}(n)\underline{u}^T(n)P(n-1)$$

se está en condición de deducir la ecuación principal de actualización de $\underline{\omega}(n)$

$$\underline{\omega}(n) = \underline{\omega}(n-1) + \underline{k}(n)\alpha(n)$$

en donde

$$\alpha(n) = d(n) - \underline{u}^T(n)\underline{\omega}(n-1)$$

■ Resumen de formulas del algoritmo RLS

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1}P(n-1)u(n)}{1 + \lambda^{-1}u^T(n)P(n-1)u(n)}$$

$$\alpha(n) = d(n) - \underline{u}^T(n)\underline{\omega}(n-1)$$

$$\underline{\omega}(n) = \underline{\omega}(n-1) + \underline{k}(n)\alpha(n)$$

$$P(n) = \lambda^{-1}P(n-1) - \lambda^{-1}\underline{k}(n)\underline{u}^T(n)P(n-1)$$

A.3. Inicialización del algoritmo RLS

En el algoritmo RLS hay dos variables involucradas en el proceso recursivo (aquellas con índice de tiempo $n-1$): $\hat{\underline{\omega}}(n-1)$, P_{n-1} . Se debe suministrar valores iniciales para estas variables con el propósito de iniciar las recursiones.

■ $\hat{\underline{\omega}}(0)$

Si se tiene alguna información previa acerca del parámetro ω ésta será usada para inicializar el algoritmo.

De lo contrario, la inicialización típica es

$$\underline{\omega}(0) = 0$$

■ P_0

$$P(n) = \Phi^{-1}(n) = \left[\sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \underline{u}(i)\underline{u}^T(i) \right]^{-1}$$

la inicialización exacta de la recursividad utiliza un pequeño segmento inicial de los datos $u(i_1)$, $u(i_1 - 1)$, ..., $u(0)$ para calcular

$$P(0) = \Phi^{-1}(0) = \left[\sum_{i=1}^0 \lambda^{n-i} \underline{u}(i)\underline{u}^T(i) \right]^{-1}$$

Sin embargo, no es una simple cuestión de seleccionar la longitud de los datos necesarios para garantizar la invertibilidad de $\Phi(0)$.

- La inicialización aproximada comunmente usada, y que no requiere inversión es:

$$P(0) = \delta I$$

Hay una explicación intuitiva de esta inicialización.

$$P(n) = \Phi^{-1}(n) \approx \text{constante} \cdot E(\underline{\omega}(n) - \underline{\hat{\omega}})(\underline{\omega}(n) - \underline{\hat{\omega}})^T$$

el valor recomendado para δ es:

$$\delta = 100\sigma_u^2$$

Para longitud de datos grandes, los valores iniciales asignados a $n = 0$ no son importante, ya que se olvidan debido al factor exponencial de olvido λ .

B. Funciones implementadas en MATLAB

A continuación se presentan las funciones implementadas en MATLAB para el proceso de patronamiento de las señales adquiridas, la estimación de parámetros y los métodos de integración y diferenciación numérica.

B.1. Función MRMC

Esta función proporciona los parámetros requeridos para la estimación de la tensión \hat{V}_{12} en el transformador en condiciones de operación bajo carga, a partir de las secuencias de datos adquiridas bajo condiciones de vacío. Toma como valores de entrada dos arreglos matriciales, uno con los datos adquiridos de la operación del transformador en condiciones de vacío, y el otro con los datos de operación en condiciones bajo carga. La función devuelve un vector con una secuencia de valores estimados para \hat{V}_{12} .

```
function[V12s]=MRMC(A,B)
%Obtención de datos de entrada - salida del sistema
A=[A(:,1)-sum(A(:,1))/length(A(:,1)),...
   A(:,2)-sum(A(:,2))/length(A(:,2)),...
   A(:,3)-sum(A(:,3))/length(A(:,3))];
B=[B(:,1)-sum(B(:,1))/length(B(:,1)),...
   B(:,2)-sum(B(:,2))/length(B(:,2)),...
   B(:,3)-sum(B(:,3))/length(B(:,3)),...
   B(:,4)-sum(B(:,4))/length(B(:,4))];
V1=A(:,1)./(132*sqrt(2));
V2=A(:,2)./(216*sqrt(2));
I1=A(:,3)./(15.15*sqrt(2));
a=size(A);
a=a(1);
for k=1:a-1
    n(k)=k-1;
    t(k)=1/6245*(k-1);
```

```

        x(k)=I1(k);
        v12(k)=V2(k);
        u(k)=V1(k)+V2(k);

    end
    %*****
    %Inicialización de Teta DT=3;%Teta=zeros(DT,1); Teta=[-1.1;1.6;0];
    % valores iniciales [-1.13;1.68;0]%Inicialización de Pkd P=eye(DT,DT);
    % Inicialización del proceso de calculo de FI(j)
    O=3;
    for k=1:O-1

        a0(k)=0; a1(k)=0;
        b0(k)=0;

    end
    for k=0:a-1

        FITk=[x(k-2) x(k-1) u(k-2)];
        FIk=FITk';
        y=v12(k-1);
        K=(P*FIk)*inv(1+FITk*P*FIk);
        e=y-FITk*Teta;
        P=P-K*FITk*P;
        Teta=Teta+P*FIk*e;
        a0(k)=Teta(1);
        a1(k)=Teta(2);
        b0(k)=Teta(3);
        [k a0(k) a1(k) b0(k)];

    end

    end
    %*****
    [a0' a1' b0'];
    plot(t,a0,'*r',t,a1,'*b',t,b0,'*m'); grid;
    legend a0 a1 b0
    EJE=[a0 a1 b0];
    axis ([0 max(t) 1.2*min(EJE) 1.2*max(EJE)]);
    title 'Estimación de Parámetros por Mínimos Cuadrados Recursivos'
    xlabel 't'
    ylabel 'Teta'
    G=[a0(a-1) a1(a-1) b0(a-1)];
    %G=[-1.1 1.67 .48];
    V12=G*[I1(1:1249)';I1(2:1250)';V1(1:1249)'+V2(1:1249)'];
    %*****
    B(:,1)=B(:,1)./(132*sqrt(2));
    B(:,2)=B(:,2)./(216*sqrt(2));
    B(:,3)=B(:,3)./(15.15*sqrt(2));
    B(:,4)=B(:,4)./(9.25*sqrt(2));
    E=[B(1:a-1,3)'+B(1:a-1,4)';B(2:a,3)'+B(2:a,4)';B(1:a-1,1)'+B(1:a-1,2)'];
    V12s=(G*E)';

```

B.2. Función ptrfp

Calcula los parámetros correspondientes al modelo de transformador monofásico. Toma como entradas el vector estimado para \hat{V}_{12} , La matriz de datos de operación bajo carga, y los valores base que corresponden a los valores nominales del transformador.

```
function[]=ptrfp(Dc,Dv,Sb,Vbp,Vbs)
%ptrfp(Dc,Dv,Sb,Vbp,Vbs)
%Cálculo de los parametros de transformadores de potencia%*****
%Para el caso monofáico
%Dc: Datos de las pruebas de carga. Debe ser una matriz de 4xn
%Dv: Datos de la pruebas de vacio. Debe ser una matriz de 3xn
%Sb: Potencia base
%Vbp: Voltaje base del primario
%Vbs: Voltaje base del secundario
a=(Vbp/Vbs);
Ibp=2*Sb/Vbp;
Ibs=2*Sb/Vbs;
%Verificar los valores base
Zbp=Vbp^2/Sb;
Zbs=Vbs^2/Sb;
%Eliminación de componente dc
Dc=[Dc(:,1)-sum(Dc(:,1))/length(Dc), Dc(:,2)-sum(Dc(:,2))/length(Dc),...
    Dc(:,3)-sum(Dc(:,3))/length(Dc), Dc(:,4)-sum(Dc(:,4))/length(Dc)];
Dv=[Dv(:,1)-sum(Dv(:,1))/length(Dv), Dv(:,2)-sum(Dv(:,2))/length(Dv),...
    Dv(:,3)-sum(Dv(:,3))/length(Dv)];
%mag=length(Dc)/2;
mag=length(Dc)-10;
Ts=(1/60*12)/length(Dc);
Dc(:,1)=Dc(:,1)/Vbp;
Dc(:,2)=Dc(:,2)/Vbs;
Dc(:,3)=Dc(:,3)/Ibp;
Dc(:,4)=Dc(:,4)/Ibs;
Dv(:,1)=Dv(:,1)/Vbp;
Dv(:,2)=Dv(:,2)/Vbs;
Dv(:,3)=Dv(:,3)/Ibp;
% Hasta acá
V12s=calcV12(Dc,Dv,mag);
V12=Dv(1:mag,2)';
I12=Dc(1:mag,3)+Dc(1:mag,4);
V12rms=sqrt(1/mag*sum(V12.^2));
I12rms=sqrt(1/mag*sum(I12.^2));
t=0:Ts:mag*Ts-Ts;
%mi=length(I12)
%ms=length(cos(2*pi*60*t))
%ms=cos(2*pi*60*t)
anI12=2/mag*sum(I12'.*cos(2*pi*60*t));
bnI12=2/mag*sum(I12'.*sin(2*pi*60*t));
cnV12=2/mag*sum(V12.*cos(2*pi*60*t));
dnV12=2/mag*sum(V12.*sin(2*pi*60*t));
```

```

fil=atan2(anI12,bnI12);
Tl=[-cos(fil) sin(fil); sin(fil) cos(fil)]
ef=Tl*[cnV12; dnV12];
el=ef(1) fl=ef(2)
X=[Dc(1:mag,3) Dc(1:mag,4)]';
U=[(Dc(1:mag,1)-V12s) (Dc(1:mag,2)-V12s)]';
C=RGLSE(X,U);
A=C(:,1);
B=C(:,3);
L1=1/B(1,1) L2=1/B(2,1)
R1=-L1*A(1,1) R2=-L2*A(2,1)
%*****
%Cálculo de V12 bajo condiciones de carga
function[V12s]=calcV12(Dc,Dv,mag)
D=[Dv(1:mag,3)';Dv(2:mag+1,3)';Dv(1:mag,1)'+Dv(1:mag,2)'];
V12=Dv(1:mag,2)';
G=V12*D'*(D*D')^(-1);
E=[Dc(1:mag,3)'+Dc(1:mag,4)';Dc(2:mag+1,3)'+Dc(2:mag+1,4)';...
    Dc(1:mag,1)'+Dc(1:mag,2)']; V12s=(G*E)';
%*****
%Estimador generalizado de mínimos cuadrados recursivo
function[CF]=RGLSE(X,U)
Z=[X;U];
S=eye(4); C=0; Ce=zeros(2,4);
for j=1:length(X)-1
    C=C+X(:,j+1)*Z(:,j)';
end
C=C*S;
for k=1:length(X)-1
    Xe=C*Z(:,k);
    E=X(:,k+1)-Xe;
    S=S-(S*Z(:,k)*Z(:,k)'+S)/(1+Z(:,k)'+S*Z(:,k));
    C=C+E*Z(:,k)'+S;
    Ee=Ce*Z(:,k);
    Ce=Ce+(E-Ee)*Z(:,k)'+S;
    CF=C+Ce;
    pa1(k)=CF(1,1);
    pa2(k)=CF(2,2);
    pb1(k)=CF(1,3);
    pb2(k)=CF(2,4);
end
%Nota
%transformador trifásico
%n=1:1:250
%plot(n,Dc(1:250,1),n,Dc(35:284,1),n,Dc(70:319,1)); grid;
%Transformador Monofásico Transformador Trifásico%*****
%S = 2 kVA S = 8 kVA
%X6 = 132 V H2 = 216 V Vl = 127 V Vh = 220 V
%I = 15.15 A I = 9.25 A Il = 21 A Ih = 12.1 A

```

B.3. Función ptrfp3

Al igual que la función ptrfp Calcula los parámetros correspondientes al modelo de transformador, pero para este caso trifásico. Toma como entradas el vector estimado para \hat{V}_{12} , La matriz de datos de operación bajo carga, y los valores base que corresponden a los valores nominales del transformador trifásico.

```
function []=ptrfp3(Dc,Dv,Sb,Vbp,Vbs)
%este si es ptrfp(Dc,Dv,Sb,Vbp,Vbs)
%Cálculo de los parametros de transformadores de potencia*****
%Para el caso monofáico
%Dc: Datos de las pruebas de carga. Debe ser una matriz de 4xn
%Dv: Datos de la pruebas de vacio. Debe ser una matriz de 3xn
%Sb: Potencia base
%Vbp: Voltaje base del primario
%Vbs: Voltaje base del secundario
a=(Vbp/Vbs);
Ibp=2*Sb/Vbp;
Ibs=2*Sb/Vbs;
%Verificar los valores base
%Eliminación de componente dc
Dc=[Dc(:,1)-sum(Dc(:,1))/length(Dc), Dc(:,2)-sum(Dc(:,2))/length(Dc),...
    Dc(:,3)-sum(Dc(:,3))/length(Dc), Dc(:,4)-sum(Dc(:,4))/length(Dc),...
    Dc(:,5)-sum(Dc(:,5))/length(Dc),Dc(:,6)-sum(Dc(:,6))/length(Dc),...
    Dc(:,7)-sum(Dc(:,7))/length(Dc),Dc(:,8)-sum(Dc(:,8))/length(Dc),...
    Dc(:,9)-sum(Dc(:,9))/length(Dc), Dc(:,10)-sum(Dc(:,10))/length(Dc),...
    Dc(:,11)-sum(Dc(:,11))/length(Dc), Dc(:,12)-sum(Dc(:,12))/length(Dc)];
Dv=[Dv(:,1)-sum(Dv(:,1))/length(Dv), Dv(:,2)-sum(Dv(:,2))/length(Dv),...
    Dv(:,3)-sum(Dv(:,3))/length(Dv), Dv(:,4)-sum(Dv(:,4))/length(Dv),...
    Dv(:,5)-sum(Dv(:,5))/length(Dv), Dv(:,6)-sum(Dv(:,6))/length(Dv),...
    Dv(:,7)-sum(Dv(:,7))/length(Dv), Dv(:,8)-sum(Dv(:,8))/length(Dv),...
    Dv(:,9)-sum(Dv(:,9))/length(Dv)];
%mag=length(Dc)/2;
mag=length(Dc)-2;
Ts=(1/60*12)/length(Dc);
Dc(:,1)=Dc(:,1)/Vbp;
Dc(:,2)=Dc(:,2)/Vbs;
Dc(:,3)=Dc(:,3)/Vbp;
Dc(:,4)=Dc(:,4)/Vbs;
Dc(:,5)=Dc(:,5)/Vbp;
Dc(:,6)=Dc(:,6)/Vbs;
Dc(:,7)=Dc(:,7)/Ibp;
Dc(:,8)=Dc(:,8)/Ibs;
Dc(:,9)=Dc(:,9)/Ibp;
Dc(:,10)=Dc(:,10)/Ibs;
Dc(:,11)=Dc(:,11)/Ibp;
Dc(:,12)=Dc(:,12)/Ibs;
Dv(:,1)=Dv(:,1)/Vbp;
Dv(:,2)=Dv(:,2)/Vbs;
Dv(:,3)=Dv(:,3)/Vbp;
Dv(:,4)=Dv(:,4)/Vbs;
```

```

Dv(:,5)=Dv(:,5)/Vbp;
Dv(:,6)=Dv(:,6)/Vbs;
Dv(:,7)=Dv(:,7)/Ibp;
Dv(:,8)=Dv(:,8)/Ibp;
Dv(:,9)=Dv(:,9)/Ibp;
%Dc=Dc(1:mag,1:2); %Dc=Dc(1:mag,3:4);
%Dc=Dc(1:mag,5:6); %Dc=Dc(1:mag,7:8);
%Dc=Dc(1:mag,9:10); %Dc=Dc(1:mag,11:12);
%Dc=[Dcva Dcvb Dcvc Dcia Dcib Dcic];
%Dv=Dv(1:mag,1:2);
%Dv=Dv(1:mag,3:4);
%Dv=Dv(1:mag,5:6);
%Dv=Dv(1:mag,7);
%Dv=Dv(1:mag,8);
%Dv=Dv(1:mag,9);
%Dv=[Dvva Dvvb Dvvc Dvia Dvib Dvic];
%*****
V12s=calcV12(Dc,Dv,mag); V12=Dv(1:mag,2)';
I12=Dc(1:mag,3)+Dc(1:mag,4);
V12rms=sqrt(1/mag*sum(V12.^2));
I12rms=sqrt(1/mag*sum(I12.^2));
t=0:Ts:mag*Ts-Ts;
%mi=length(I12)
%ms=length(cos(2*pi*60*t))
%ms=cos(2*pi*60*t)
anI12=2/mag*sum(I12'.*cos(2*pi*60*t));
bnI12=2/mag*sum(I12'.*sin(2*pi*60*t));
cnV12=2/mag*sum(V12.*cos(2*pi*60*t));
dnV12=2/mag*sum(V12.*sin(2*pi*60*t));
fil=atan2(anI12,bnI12);
Tl=[-cos(fil) sin(fil); sin(fil) cos(fil)]
ef=Tl*[cnV12; dnV12];
el=ef(1) fl=ef(2)
X=[Dc(1:mag,7) Dc(1:mag,9) Dc(1:mag,11) Dc(1:mag,8)...
   Dc(1:mag,10) Dc(1:mag,12)]';
U=[(V12s(:,1)-Dc(1:mag,1)) (V12s(:,2)-Dc(1:mag,3))...
   (V12s(:,3)-Dc(1:mag,5)) (V12s(:,1)-Dc(1:mag,2))...
   (V12s(:,2)-Dc(1:mag,4)) (V12s(:,3)-Dc(1:mag,6))]';
C=RGLSE(X,U)
A=C(:,1:6); B=C(:,7:12);
R1a=1/B(1,1)
R1b=1/B(2,2)
R1c=1/B(3,3)
R2a=1/B(4,4)
R2b=1/B(5,5)
R2c=1/B(6,6)
L1a=-R1a*A(1,1)
L1b=-R1b*A(2,2)
L1c=-R1c*A(3,3)
L2a=-R2a*A(4,4)
L2b=-R2b*A(5,5)
L2c=-R2c*A(6,6)

```

```

%*****
%Cálculo de V12 bajo condiciones de carga
function[V12s]=calcV12(Dc,Dv,mag)
D=[Dv(1:mag,7)';Dv(2:mag+1,7)';Dv(1:mag,1)'+Dv(1:mag,2)'];
V12=Dv(1:mag,2)';
G=V12*D'*(D*D')^(-1);
E=[Dc(1:mag,7)'+Dc(1:mag,8)';Dc(2:mag+1,7)'+Dc(2:mag+1,8)';...
    Dc(1:mag,1)'+Dc(1:mag,2)']; V12s1=(G*E)';
D=[Dv(1:mag,8)';Dv(2:mag+1,8)';Dv(1:mag,3)'+Dv(1:mag,4)'];
V12=Dv(1:mag,4)';
G=V12*D'*(D*D')^(-1);
E=[Dc(1:mag,9)'+Dc(1:mag,10)';Dc(2:mag+1,9)'+Dc(2:mag+1,10)';...
    Dc(1:mag,3)'+Dc(1:mag,4)']; V12s2=(G*E)';
D=[Dv(1:mag,9)';Dv(2:mag+1,9)';Dv(1:mag,5)'+Dv(1:mag,6)'];
V12=Dv(1:mag,6)';
G=V12*D'*(D*D')^(-1);
E=[Dc(1:mag,11)'+Dc(1:mag,12)';Dc(2:mag+1,11)'+Dc(2:mag+1,12)';...
    Dc(1:mag,5)'+Dc(1:mag,6)']; V12s3=(G*E)';
V12s=[V12s1 V12s2 V12s3];%*****
%Estimador generalizado de mínimos cuadrados recursivo
function[CF]=RGLSE(X,U)
Z=[X;U]; S=eye(12); C=0; Ce=zeros(6,12);
for j=1:length(X)-1
    C=C+X(:,j+1)*Z(:,j)';
end
C=C*S;
for k=1:length(X)-1
    Xe=C*Z(:,k);
    E=X(:,k+1)-Xe;
    S=S-(S*Z(:,k)*Z(:,k)'*S)/(1+Z(:,k)'*S*Z(:,k));
    C=C+E*Z(:,k)'*S;
    Ee=Ce*Z(:,k);
    Ce=Ce+(E-Ee)*Z(:,k)'*S;
    CF=C+Ce;
    pa1(k)=CF(1,1); pa2(k)=CF(2,2); pb1(k)=CF(1,3); pb2(k)=CF(2,4);
end
%Nota%transformador trifásico%n=1:1:250%plot(n,Dc(1:250,1),n,
    Dc(35:284,1),n,Dc(70:319,1)); grid;
%Transformador Monofásico Transformador Trifásico%*****
%S = 2 kVA S = 8 kVA
%X6 = 132 V H2 = 216 V Vl = 127 V Vh = 220 V
%I = 15.15 A I = 9.25 A Il = 21 A Ih = 12.1 A

```