

**ESTUDIO TEÓRICO DE LAS FALLAS DE CORTOCIRCUITO
CERCANAS AL NEUTRO DEL BOBINADO DEL ESTATOR
DE UN GENERADOR SINCRÓNICO**

OMAR FERNANDO OSORIO NIÑO

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

**ESTUDIO TEÓRICO DE LAS FALLAS DE CORTOCIRCUITO
CERCANAS AL NEUTRO DEL BOBINADO DEL ESTATOR
DE UN GENERADOR SINCRÓNICO**

OMAR FERNANDO OSORIO NIÑO
Tesis de grado para optar al 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
2009**

DEDICATORIA

A mi madre y a mi padre por brindarme los valores y el apoyo incondicional para cumplir todos los objetivos que me propongo

A mis profesores que mediante sus enseñanzas me han preparado para afrontar nuevos retos en la vida profesional

y

A Dios por permitirme culminar esta meta

AGRADECIMIENTOS

A mi familia porque gracias a sus enseñanzas, esfuerzo y dedicación he podido dar un gran paso hacia mi vida profesional .

Al Dr. Hermman Raúl Vargas, director del proyecto, por su orientación en la realización de este trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
1.2. Organización del libro	2
2. Fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator	5
2.1. Introducción	5
2.2. Fallas internas en el generador	5
2.2.1. Influencia del tiempo y la temperatura con la criticidad de la falla .	6
2.2.2. Reacción de una falla interna de cortocircuito	7
2.3. Fallas monofásicas cercanas al neutro del estator	8
2.3.1. Métodos de aterrizar el neutro del generador	8
2.3.2. Protección contra fallas monofásicas cercanas al neutro en el devanado del estator	9
2.4. Modelos de simulación de fallas en el estator del generador	16
3. Descripción del modelo de la máquina sincrónica cuando se presenta una falla interna	18
3.1. Introducción	18

3.2. Partición de los bobinados de la máquina sincrónica para el análisis de fallas internas	18
3.2.1. Partición del subdevanado exterior	22
3.2.2. Partición del subdevanado interior	23
3.2.3. Cálculo de inductancias de la máquina	24
3.3. Modelo circuital para la falla fase tierra	25
3.4. Cálculo de las condiciones iniciales para la simulación	26
4. Simulación, resultados y observaciones	29
4.1. Introducción	29
4.2. Estudio de caso tipo	29
4.3. Variación de la localización de la falla	34
4.4. Influencia de la resistencia de falla y la impedancia de puesta a tierra del generador	36
4.5. Comportamiento transitorio	39
5. Prepropuesta del análisis experimental de fallas en un generador	46
5.1. Introducción	46
5.2. Conexiones y requerimientos para las pruebas de laboratorio	46
5.3. Características de la máquina	49
5.4. Medidas	51
5.4.1. Análisis transitorio de las corrientes en los devanados	51
5.4.2. Análisis de vibraciones	52
5.4.3. Análisis termo-gráfico	52
6. Conclusiones y futuros desarrollos	54
A. Circuitos acoplados magnéticamente	58

B. Descripción matemática de la máquina sincrónica	61
B.1. Introducción	61
B.2. Representación de la máquina sincrónica en el dominio de fases	61
B.3. Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$	68
B.4. Verificación de la analogía entre los modelos $dq0$ y en dominio de fase	73
C. Representación en por unidad	75
C.1. Bases utilizadas en el estator	75
C.2. Bases utilizadas en el rotor	75
D. Solución del sistema de ecuaciones por el método del trapecio	77
E. Arreglo matricial de inductancias y resistencias para modelar la falla monofásica dentro del estator	79
F. Manual del usuario	82
F.1. Introducción	82
F.2. Inicio	82
F.3. Entrada de datos	82
F.3.1. Parámetros de simulación	83
F.3.2. Circuito externo	84
F.3.3. Condiciones de carga	84
F.3.4. Condiciones de simulación	85

Índice de figuras

2.1. Devanado del estator contaminado, debido a daño en una bomba de aceite de lubricación del mecanismo motor	7
2.2. Protección por porcentaje de fase diferencial	10
2.3. Protección diferencial a tierra	11
2.4. Representación gráfica del tercer armónico	13
2.5. Esquema de protección del 100 % del estator mediante detección del tercer armónico	14
2.6. Superposición del relé de frecuencia fundamental y el relé de tercera armónica	15
2.7. Esquema de inyección de subarmónicos	16
3.1. Esquema de la partición del devanado en una fase	19
3.2. Partición del devanado	20
3.3. Distribución de la MMF del subdevanado a_1	21
3.4. Distribución de la MMF del subdevanado a_2	22
3.5. Representación de la falla en la fase A del estator	26
4.1. Representación de la falla en la fase A del estator	30
4.2. Corrientes rotóricas cuando se presenta un falla monofásica en el 30 % del bobinado del estator	32
4.3. Corrientes estatóricas cuando se presenta un falla monofásica en el 30 % del bobinado del estator	33

4.4. Corrientes en la fase A cuando se presenta una falla monofásica en diferentes localizaciones dentro bobinado del estator	35
4.5. Corrientes de falla para diferentes resistencias de falla para un 20 %	37
4.6. Corrientes de cortocircuito en la fase A para diferentes resistencias de falla en el 20 % del bobinado	38
4.7. Transitorio de la corrientes rotóricas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.1	41
4.8. Transitorio de corrientes estatóricas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.1	42
4.9. Transitorio de la corrientes rotóricas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.2	44
4.10. Transitorio de corrientes estatóricas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.2	45
5.1. Conexiones para del generador para el estudio experimental	48
5.2. Motor DC acoplado al generador sincrónico: Montaje para pruebas de corto circuito en el estator [Dale Fidney, 2002]	50
5.3. Bobinado del estator construido para la emulación de fallas internas de cortocircuito en un motor de inducción	50
5.4. Estator de una máquina de 4 polos, 24 ranuras, devanado imbricado de 2 capas y de paso diametral.	51
A.1. Circuito magnético	58
A.2. Circuito acoplado magnéticamente	59
B.1. Circuitos del rotor y el estator de la máquina sincrónica	62
B.2. Representación de las bobinas de la máquina síncrona y su respectiva posición de los ejes magnéticos	67

B.3. Modelo d-q del generador sincrónico	68
B.4. Circuito equivalente para el eje d	72
B.5. Circuito equivalente para el eje q	72
B.6. Comparación de los modelos dq0 y abc cuando ocurre una falla trifásica (curva verde modelo dq0, curva azul modelo abc)	74
F.1. Sistema base para la simulación de falla monofásicas dentro del generador .	83
F.2. Área para introducir los parámetros del generador	84
F.3. Área de datos para el circuito externo al generador	84
F.4. Área de las condiciones de carga	85
F.5. Condiciones de la simulación	85
F.6. Gráficas seleccionadas para el caso ejemplo	86

Lista de tablas

4.1. Parámetros de la máquina 1	30
4.2. Parámetros estándar de la máquina 2	43
5.1. Recomendación para la localización de las termocupas	53
B.1. Parámetros de la máquina	73

RESUMEN

TÍTULO:

ESTUDIO TEÓRICO DE LAS FALLAS DE CORTOCIRCUITO CERCANAS AL NEUTRO DEL BOBINADO DEL ESTATOR DE UN GENERADOR SINCRÓNICO¹

AUTOR:

OMAR FERNANDO OSORIO NIÑO²

PALABRAS CLAVE:

Generador Sincrónico, fallas de cortocircuito, bobinado del estator, protecciones eléctricas.

AUTOR: OMAR FERNANDO OSORIO NIÑO

DESCRIPCIÓN:

Últimamente con los desarrollos de la industria de potencia eléctrica, los análisis exactos de las fallas en los generadores son cada vez más importantes. Por lo tanto este documento presenta un estudio teórico de las fallas internas cercanas al neutro del devanado del estator, apoyando de esta manera el conocimiento que se tiene del comportamiento transitorio de la máquina.

Se describe la importancia de proteger este elemento en un sistema de potencia y se examinan los principales esquemas empleados para detectar las fallas cuando ocurre un problema dentro de la máquina o en el sistema al cual está conectado, las causas de las fallas internas cercanas al neutro y los resultados adversos sobre el sistema de potencia y sobre la unidad fallada.

Se presenta un método para simular fallas internas en un generador sincrónico, el cual consiste de un bobinado por fase, mediante la utilización de cantidades de fase directa. Se presenta el modo de implementarlo para obtener las gráficas respectivas de las corrientes presentes en el generador junto con el análisis de las características más importantes cuando se presenta una falla interna basándose en las simulaciones. Además se desarrolló un pre-propuesta para hacer las pruebas experimentales a una máquina prototipo.

Los apéndices contienen las ecuaciones básicas del dominio de fases y el modelo dq0 para representar una máquina sincrónica, además un manual de usuario para el manejo de la interfaz desarrollada.

¹Proyecto de Grado

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

ABSTRACT

TITLE:

THEORETICAL STUDY OF INTERNAL FAULT PHASE CLOSE TO THE NEUTRAL OF THE STATOR WINDING SYNCHRONOUS GENERATOR³

AUTHOR:

OMAR FERNANDO OSORIO NIÑO⁴

KEY WORDS:

Synchronous generator, internal fault, phase domain, stator winding faults, partitioning of winding.

DESCRIPTION:

Along with the development of electric power industry, accurate analysis of faulted generators becomes more and more important. Therefore this document presents a theoretical study of internal fault phase close to the neutral stator winding.

It is described the importance of protecting this element in a electrical power system and examines the various protecting schemes employed to detect faults when a problem occurs inside the unit or in the system to which it is connected. The causes for internal faults and the resulting adverse effects on the power system and the faulted unit are also briefly addressed.

It is presented a method for simulating internal fault in synchronous generator, consisting of a single path per phase, using direct phase quantities. An implementation type solution is presented together the analysis of the most important characteristic where internal fault are simulated in different locations within stator winding. Furthermore, it was development a proposal to do a case test where internal faults are applied to a real synchronous machine.

Appendixes present the basic equations of the phase-domain model and the dq0 model to represent a synchronous machine, and a manual to use the interface implemented to simulate this faults.

³Degree Project

⁴Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Hermann Raul Vargas Torres.

Capítulo 1

Introducción

El generador sincrónico es uno de los elementos más importantes en el sistema de potencia, la confiabilidad del suministro de energía dependen en gran parte de su buen funcionamiento.

Conocer el comportamiento de la máquina en estado estable como en estado transitorio es relevante en la implementación de las protecciones adecuadas para asegurar su integridad.

En este trabajo se estudian las fallas de cortocircuitos cercanas al neutro del generador, mediante la implementación de un modelo matemático, apoyando de esta manera el conocimiento que se tiene acerca de los fenómenos transitorios en la máquina.

Este capítulo presenta los objetivos de la tesis y posteriormente la organización del texto.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Realizar el estudio teórico de las fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator de un generador sincrónico, por medio de la simulación de la máquina ante estas fallas y la revisión de la literatura existente, para luego presentar una prepropuesta de su estudio experimental en un posterior trabajo.

1.1.2. Objetivos específicos

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

- Realizar un estudio (revisión de la literatura) de los métodos empleados para la detección de fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator del generador sincrónico.
- Implementar un modelo de la máquina sincrónica ante fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator para su respectiva simulación mediante MATLAB.
- Analizar el comportamiento de máquina sincrónica mediante los resultados obtenidos en la simulación, determinando las principales características de estas fallas.
- Elaborar una prepropuesta del estudio experimental de las fallas simuladas, de manera que pueda ser la base para la realización de un posterior trabajo.

1.2. Organización del libro

El presente libro consta de seis capítulos y cinco apéndices

Capítulo 2

En este capítulo se expone la teoría relacionada con las fallas de cortocircuito en el estator de un generador, y se da un enfoque en las fallas de cortocircuito cercanas al neutro. Además se plantea la necesidad de conocer el comportamiento transitorio de las fallas cercanas al neutro.

Capítulo 3

Se describe el método para obtener las inductancias en la partición producida por la falla, lo cual es necesario para la implementación del modelo ante un corto circuito interno. Se presentan las ecuaciones que modelan el sistema en condiciones de cortocircuito y el modo de hallar las ecuaciones que restringen el modelo a la clase de falla.

Capítulo 4

Se exponen los resultados y las observaciones del comportamiento de la máquina sincrónica cuando se presenta una falla de cortocircuito monofásica en el devanado del estator,

basándose en las simulaciones hechas a una máquina específica. Se presentan las gráficas pertinentes para el análisis, considerando sus tiempos transitorios y los efectos sobre la intensidad de la corrientes en los bobinados.

Capítulo 5

En este capítulo se expone la prepropuesta desarrollada para el estudio experimental de fallas internas de cortocircuito del generador, se presentan los equipos a considerar en las pruebas a realizar, y las características de construcción del estator del generador a utilizar.

Capítulo 6

Se presentan las conclusiones del proyecto y los posibles problemas a investigar relacionados con las fallas internas en los generadores sincrónicos.

Apéndice A

Se presenta la teoría de los circuitos acoplados magnéticamente, necesaria para representar el comportamiento eléctrico del generador.

Apéndice B

Se describe el modelo matemático que representa el comportamiento de la máquina sincrónica. Se presentan las limitaciones de este modelo en el estudio de fallas de cortocircuito en el devanado del estator y la necesidad de desarrollar las ecuaciones en el dominio de fases.

Apéndice C

Se presentan las ecuaciones para calcular las bases de las cantidades del estator y el rotor, necesarias para la representación en por unidad.

Apéndice D

Se describe la forma de resolver el sistema de ecuaciones que representa la máquina sincrónica aplicando la regla trapezoidal.

Apéndice E

Se presenta el arreglo matricial de inductancias y resistencias para modelar la falla monofásica dentro del estator.

Apéndice F

Se da a conocer el modo de uso y las principales áreas de datos y requerimientos de la interfaz para la simulación de fallas de cortocircuito monofásicas.

Capítulo 2

Fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la teoría acerca de las fallas de cortocircuito en el estator, se da un enfoque en las fallas monofásicas cercanas al neutro del generador.

Se presentan los estudios desarrollados para modelar las fallas internas en el estator, y se plantea la necesidad de implementar un modelo para simular la máquina ante este tipo de fallas.

2.2. Fallas internas en el generador

Las fallas en el estator son causadas por la pérdida de aislamiento en los conductores del bobinado, resultado de factores como [Esparza and Ponce, 2001]:

- La temperatura a la que opera la máquina
- Los esfuerzos mecánicos en los arranques, y en las paros de la máquina
- El ataque de agentes químicos o ambientales figura 2.1 (humedad, polvo, suciedad)
- Esfuerzos eléctricos, debido a sobrevoltajes por la pérdida repentina de carga, por activación o desactivación de circuitos del sistema externo.

En el interior del generador se pueden presentar las siguientes fallas de cortocircuito [Tu, 2007]:

- Fase a tierra
- Dos fases a tierra
- Tres fases a tierra
- Entre espiras de una misma fase
- Entre espiras de diferentes fases

En este trabajo se estudian las fallas internas de corto circuito fase a tierra.

2.2.1. Influencia del tiempo y la temperatura con la criticidad de la falla

El calor y las fuerzas mecánicas tienen una variación directa con la corriente al cuadrado. Por lo tanto, una pequeña reducción en la corriente de falla reduce significativamente los requerimientos térmicos del generador.

Las corrientes de falla de los generadores no cesan inmediatamente después que el relé de protección actúa. La corriente de falla requerirá de 1 a 10 segundos para decaer a cero debido a la energía magnética almacenada en el generador [Parr, 1995]. Además la proporción $\frac{X}{R}$ para una falla en los terminales del generador, o dentro del bobinado del estator es mucho más grande que en las subestaciones. Por lo tanto el deterioro mecánico y eléctrico producido por las componentes DC de la falla eléctrica ocurrida incrementa.

Cuando se detecta una falla dentro del bobinado, se debe aislar la máquina del resto del sistema y desenergizar el bobinado del campo. Si el devanado del campo no es desenergizado, la corriente continuará fluyendo internamente.



Figura 2.1: Devanado del estator contaminado, debido a daño en una bomba de aceite de lubricación del mecanismo motor

2.2.2. Reacción de una falla interna de cortocircuito

Las fallas a tierra pueden presentar dos tipos de reacción dentro del bobinado:

- La corriente de falla fluye de la bobina con un aislamiento deteriorado, hacia el núcleo a través de un contacto directo.
- El flujo de corriente se produce a través de un arco eléctrico

Esta última es la más destructiva, debido a que el arco eléctrico concentra la energía de falla en un punto del núcleo de la máquina, produciendo el deterioro del laminado del núcleo, lo cual implica grandes costos, y un largo periodo de parada para su mantenimiento, ya que estas reparaciones generalmente deben ser hechas en sitios especiales recomendados por el fabricante para no exponer a la humedad los componentes activos del generador.

El núcleo del estator está conformado por delgadas láminas de acero con alta permeabilidad magnética. Cada hoja es aislada una de otra, este aislamiento se utiliza para prevenir las corrientes de Eddy dentro del núcleo. El arco presente en la falla puede causar uniones de soldadura entre las láminas en el punto de falla y destruir el aislamiento de estas. Los

resultados del flujo de corriente en el núcleo producirán sobre-calentamientos en los puntos de falla durante la operación normal. Si no se corrige se seguirá produciendo un deterioro acelerado del aislamiento, lo cual terminará con la pérdida total de la máquina. Los daños en el núcleo son función de la magnitud de la corriente y el tiempo de exposición a la falla [Reimert, 2006].

Un bobinado del estator con su aislamiento deteriorado, y que esté causando contactos a tierra inesperados se debe reparar si es posible, o si es el caso, se debe proceder a efectuar el cambio de la bobina dañada, evitando así consecuencias mayores, lo cual implica grandes costos en el mantenimiento correctivo.

La naturaleza asimétrica de la falla de los bobinados produce incrementos de corrientes desbalanceadas en la máquina. Estas fuerzas causan vibraciones en el generador, como consecuencia el eje y los acoplamientos pueden sufrir graves daños. Además, los devanados pueden desplazarse de su localización original dentro de las ranuras.

Con el objetivo de proteger el laminado del núcleo, y daños mayores en el bobinado del estator, la falla debe detectarse a tiempo, evitando de esta manera grandes costos de reparación, y paros extensos de la máquina que en muchos casos pueden implicar grandes pérdidas de producción para la industria. Así que existen una variedad de estrategias para detectar las fallas en el bobinado del estator, las cuales dependen en gran medida del método de aterrizar el neutro del Generador.

2.3. Fallas monofásicas cercanas al neutro del estator

Los esquemas utilizados para detectar las fallas monofásicas cercanas al neutro, dependen del método utilizado para aterrizar el neutro del generador, y de sus características de construcción.

2.3.1. Métodos de aterrizar el neutro del generador

Los elementos conectados entre el neutro del generador a tierra, determinan las corrientes de secuencia Cero durante su operación normal y durante un evento de falla a tierra del bobinado del estator [Alcantara, 2006]. Por lo tanto existen varios métodos para aterrizar el neutro del generador con el propósito de reducir la corrientes de cortocircuito.

Las formas más comunes de aterrizar el neutro del generador se pueden clasificar como :

- Sistema de baja impedancia: El neutro se aterriza a través de una baja impedancia la cual limita la corriente de falla normalmente entre 100A y la magnitud de la corriente de falla trifásica. Esta corriente es suficiente para garantizar la adecuada sensibilidad y selectividad de los dispositivos de protección, pero debido a su magnitud, puede comprometer el devanado del estator, durante una falla [Reimert, 2006] .
- Sistema de alta impedancia: Una gran impedancia se conecta a tierra a través del neutro del generador. Algunas veces se usa un transformador el cual se conecta al neutro y se implementa una resistencia pequeña en el secundario como se muestra en la figura 2.5, de esta manera aprovechando la relación de transformación se ve reflejada en el primario una alta impedancia, limitando la corrientes de secuencia cero a valores típicos entre 2 y 15 A. Si se escoge un esquema de alta impedancia, la corriente de falla a tierra está limitada a una magnitud que no causará daños mecánicos o térmicos en el generador. Los esquemas de protección aplicados en máquinas aterrizadas a través de alta impedancia se enfocan en la sensibilidad y no en la velocidad de operación. Las protecciones aplicadas a generadores que no limitan la corriente de falla son menos sensitivos, pero deben reaccionar con mayor rapidez [Reimert, 2006].
- Sistema con el neutro aterrizado: debido a que el neutro está aterrizado sin ninguna impedancia limitadora, la corriente de fase a tierra es prácticamente un cortocircuito entre la fase y el neutro, y por lo tanto las protecciones deben actuar rápidamente en la primera falla.
- Generador con el neutro sin aterrizar: este sistema se usa en áreas industriales donde es necesario mantener el servicio continuo de las unidades generadoras. Debido a que la corriente de falla es muy baja no se producen disparos automáticos en la primera falla, es la segunda falla la que requiere disparo.

2.3.2. Protección contra fallas monofásicas cercanas al neutro en el devanado del estator

Los esquemas utilizados para detectar este tipo de fallas se pueden clasificar en tres grupos:

- Las protecciones diferenciales

- Las protecciones basadas en el principio de la variación del tercer armónico en las corrientes del neutro del generador
- Las protecciones basadas en la inyección de subarmónicos

Protección diferencial en el bobinado del estator

Existen dos configuraciones principales, la protección por porcentaje de fase diferencial (87), y la protección diferencial a tierra (87GN) como se muestra en las figuras 2.3 y 2.2 respectivamente.

El dispositivo que utiliza el porcentaje diferencial de fase, es capaz de detectar la mayoría de las fallas internas, sin embargo es necesario una puesta a tierra que garantice la suficiente corriente para su disparo, es decir si la máxima corriente de falla a tierra no supera el pick up de fase diferencial, el dispositivo no será capaz de detectarla. En estos casos, el esquema de protección diferencial a tierra puede ser utilizado, brindando una excelente seguridad contra fallas externas y a la vez proporcionando sensibilidad en la protección de fallas a tierra dentro del 10 % del bobinado(desde el neutro hasta el punto de falla) [Pow, 1987].

Estas protecciones se utilizan para sistemas con una baja impedancia de puesta a tierra, donde las corrientes de falla son suficientes para que los dispositivos las detecten.

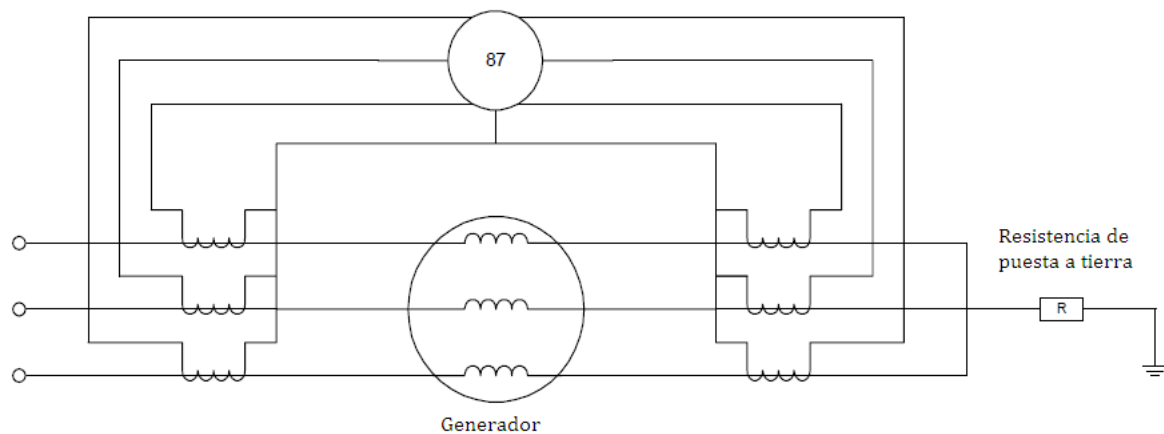


Figura 2.2: Protección por porcentaje de fase diferencial

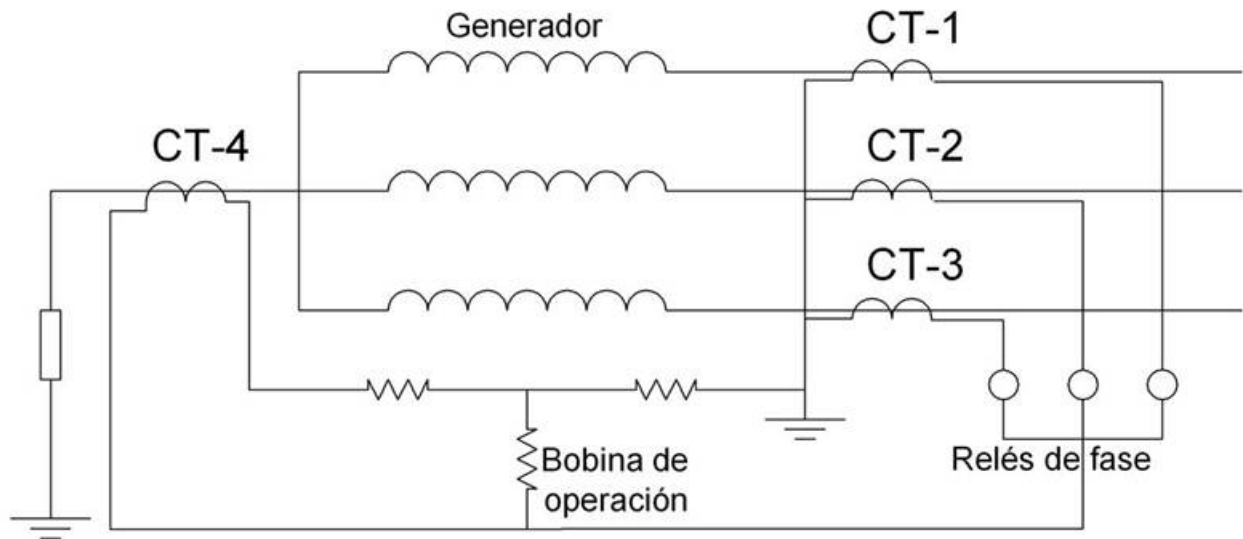


Figura 2.3: Protección diferencial a tierra

Protección por detección de sobrevoltaje en el neutro

Este esquema se emplea comúnmente en los generadores en los cuales el neutro se aterriza mediante una alta impedancia. Consiste en un relé conectado en el devanado secundario del transformador de tierra, el cual ve el sobrevoltaje que se genera en la resistencia figura 2.5. Cuando se presenta una falla asimétrica por cortocircuito entre el devanado del estator y tierra, una corriente de secuencia cero aparece en el neutro del estator, la cual se refleja en el secundario del transformador produciendo un sobrevoltaje que hará actuar el relé.

El esquema utiliza un relé de sobrevoltaje (59N) con retardo de tiempo y está diseñado para ser sensible al voltaje de frecuencia fundamental e insensible a los voltajes de tercer armónico y otros armónicos de secuencia cero presentes en el neutro del generador. Generalmente el relé de sobrevoltaje tiene un ajuste mínimo aproximado de enganche (pickup) de 5V [Mocina, 1995].

Este esquema protege únicamente un 90 % -95 % del devanado del estator debido a que la falla entre el 5 % y 10 % restante del devanado cerca del neutro no produce suficiente voltaje residual de 60Hz ,por lo tanto el complemento de esta protección debe buscar detectar las fallas más cercanas al neutro. Así que para obtener una cobertura del 100 % uno de los métodos es usar un relé de bajo voltaje de tercera armónica.

Bajo voltaje en el tercer armónico

Las componentes de voltaje de tercera armónica están presentes, en diverso grado en el neutro de casi todas las máquinas; ellos surgen y varían debido a diferencias en el diseño, la fabricación, y la carga de la máquina. Si esta componente está presente en suficiente magnitud, puede utilizarse para detectar fallas a tierra cercanas al neutro [Mocina, 1995].

Los niveles del tercer armónico presentes depende de varios factores como:

- Construcción del generador: La forma como el bobinado está constituido dentro del núcleo del estator, es un factor clave para determinar la cantidad del tercer armónico. Hay generadores que tienen un nivel del armónicos de tercer orden muy bajo y por lo tanto la detección de fallas a tierra por este método no puede ser utilizado.
- El nivel de carga del generador MW Y MVAR
- Capacitancia equivalente en los terminales del generador

El concepto de este esquema se basa en la caída del voltaje de tercer armónico cuando ocurre una falla a tierra cercana al neutro en el devanado del estator, la figura 2.4 muestra como se comporta el voltaje del tercer armónico medido en el neutro y en los terminales, bajo condiciones normales y condiciones de falla en los límites del bobinado.

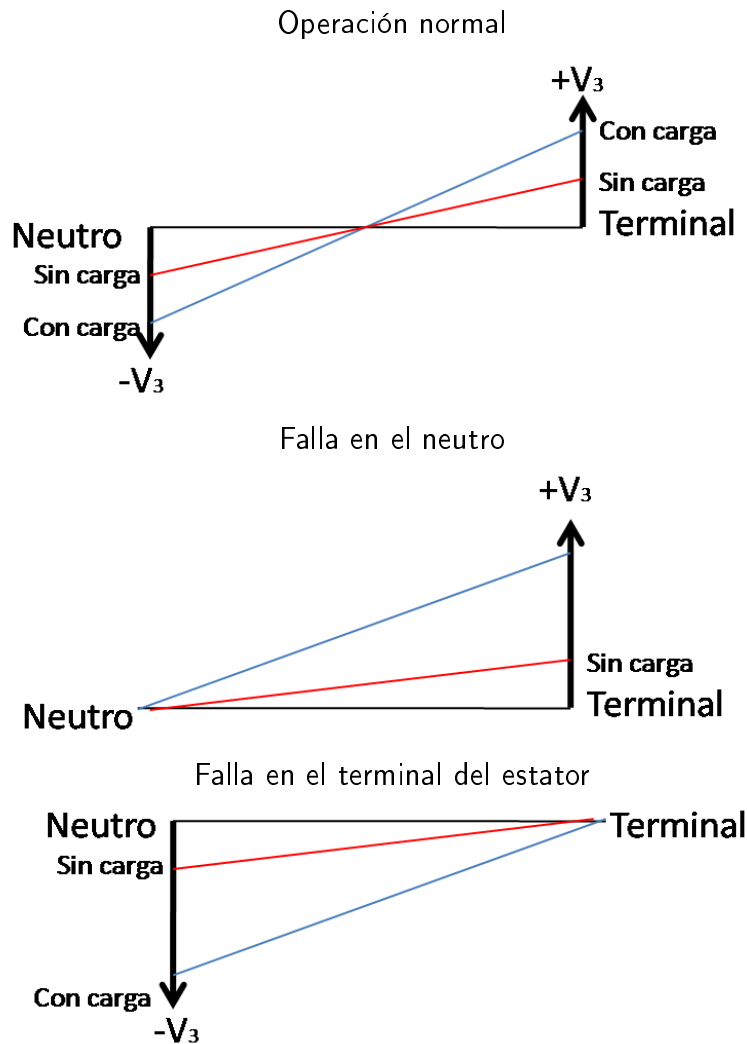


Figura 2.4: Representación gráfica del tercer armónico

Un relé de bajo voltaje opera con la componente de tercera armónica detectando la falla . En la figura 2.5 se muestra un esquema simplificado de la protección que emplea esta técnica. La figura 2.6 muestra la superposición de las funciones del 27TN (tercera armónica) y el 59N para proteger el 100 % del devanado del estator. Si el generador tiene suficiente voltaje de tercer armónico en el neutro durante su operación normal para prevenir falsos disparos del relé de bajo voltaje, entonces este método puede ser confiable para proteger el generador [Alcantara and Garcia, 2006].

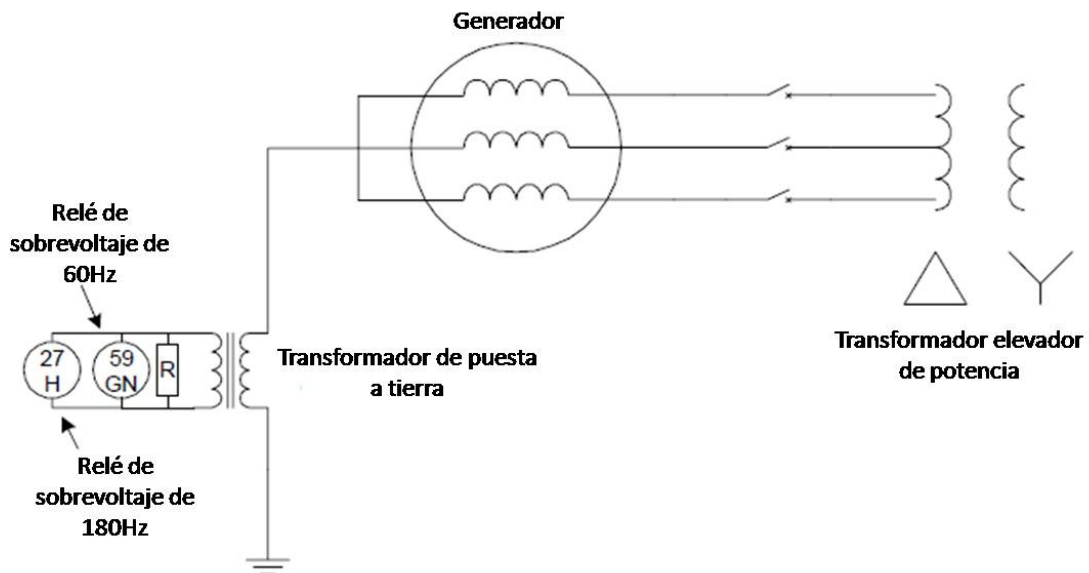


Figura 2.5: Esquema de protección del 100 % del estator mediante detección del tercer armónico

Los esquemas basados en el tercer armónico se utilizan ampliamente en los generadores para proveer protección en el devanado entero del estator. Sin embargo en algunos casos se tienen inconvenientes debido a que resultan en una operación impropia, produciendo falsos disparos del generador, por lo tanto existe otro método como alternativa para este esquema.

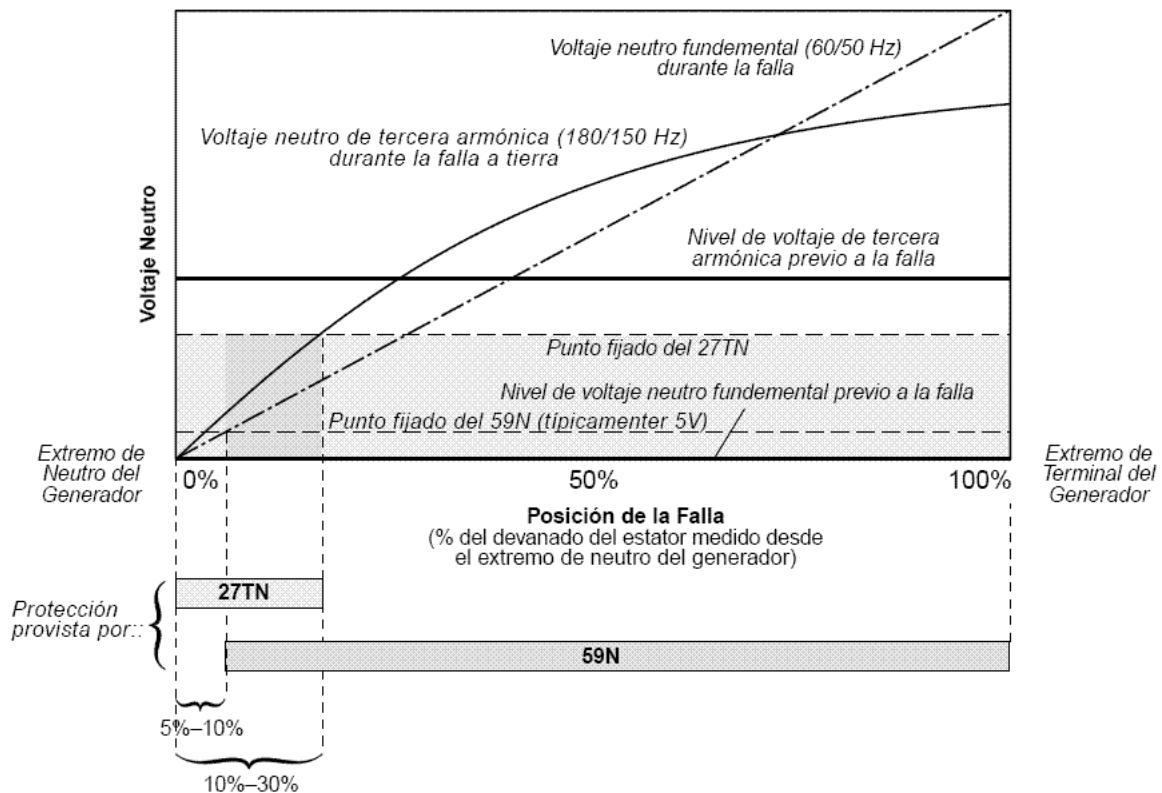


Figura 2.6: Superposición del relé de frecuencia fundamental y el relé de tercera armónica

Inyección de subarmónicos

Este esquema inyecta subarmónicos en el devanado del estator a través del transformador de la puesta a tierra como se muestra en la figura 2.7. La frecuencia inyectada es de 15-20Hz. La carga que se presenta al inyector es la capacitancia de línea a neutro del devanado del generador.

El uso de los subarmónicos de baja frecuencia hace que esta capacitancia se vea como una alta impedancia. Por lo tanto la potencia reactiva medida en el transformador de inyección se reduce sobre lo que debería ser si se usara la frecuencia fundamental. Bajo condiciones normales de operación un pequeño nivel de cambio de corriente fluiría en la frecuencia subarmónica. Cuando una falla a tierra ocurre en el devanado del estator, la capacitancia de cortocircuito será seccionada, por lo tanto fluiría más corriente, lo cual será detectada por un relé de sobrecorriente. Este esquema tiene la ventaja de poder detectar fallas a tierra del estator con el generador fuera de línea, lo cual permite conocer el estado del generador

antes de ponerlo en servicio Alcantara and Garcia [2006].

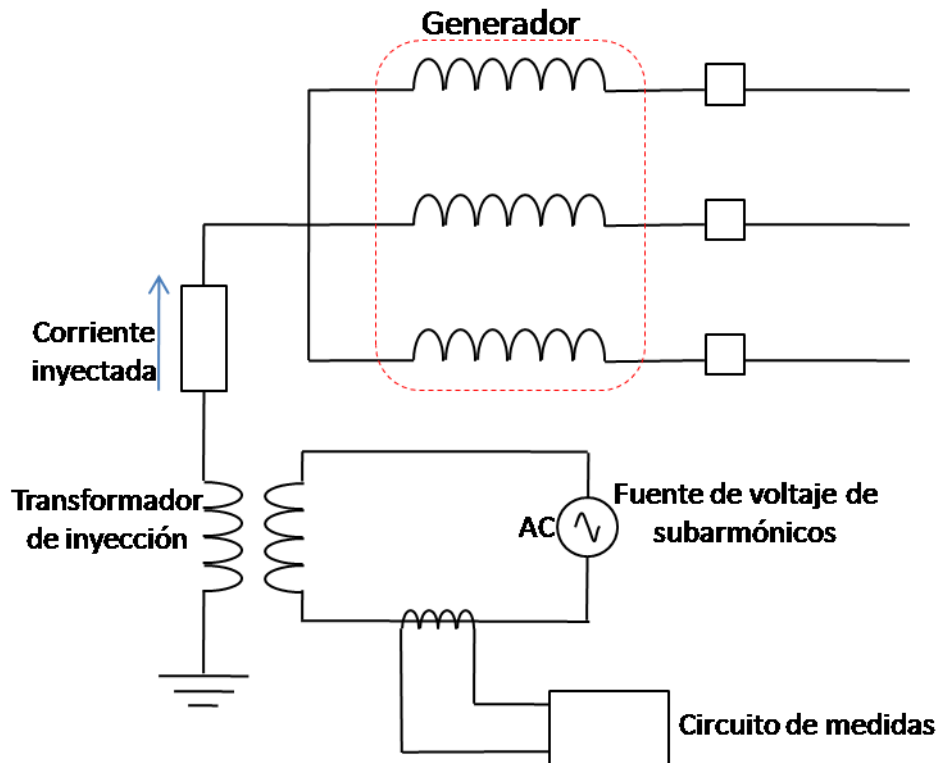


Figura 2.7: Esquema de inyección de subarmónicos

2.4. Modelos de simulación de fallas en el estator del generador

Para desarrollar sistemas de protección adecuados en el generador, y poder detectar las fallas internas evitando así consecuencias más graves en los devanados, o en el núcleo del estator, es necesario predecir el comportamiento de las corrientes transitorias que resultan cuando ocurre una falla.

La implementación de un modelo de la máquina ante fallas de cortocircuito puede dar un acercamiento al comportamiento real de las corrientes presentes en los bobinados.

El comportamiento interno de la máquina síncrona y la determinación de los factores que influyen en la severidad de las fallas dentro del bobinado, es un tema poco explorado debido a la dificultad de representarlas mediante el modelo $dq0$, lo que hace que se requiera

demasiada carga computacional en el momento de resolver el sistema de ecuaciones que modela la máquina ante fallas internas.

Cuando se presentan fallas internas de cortocircuito en el devanado del estator fase -tierra se afecta la dirección de los ejes magnéticos de la fase donde se genera la falla, además se produce una partición del devanado afectado, lo que altera la simetría del sistema a simular y por lo tanto el modelo $dq0$ no se puede utilizar ¹.

En [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000a],[Kinitsky, 1965],[A.I. Megahed, 1998],[Tu, 2006],[Tu, 2007] se presentan algunos métodos desarrollados para modelar la máquina ante fallas en el bobinado del estator. Todos los modelos utilizan sistemas de ecuaciones en el dominio de fases.

Los desarrollos de los modelos varían en la forma de calcular las inductancias presentes cuando se genera una falla. En [Tu, 2006],[Tu, 2007] se utiliza la función de la FMM (fuerza magnetomotriz), la cual depende de la disposición de los devanados en el estator, y por lo tanto se incluyen los armónicos que se generan en la FMM. Sin embargo este método necesita las características físicas del bobinado y la función del entrehierro. En [A.I. Megahed, 1998] se calculan las inductancias por medio de una proporción del bobinado fallado y basándose en los desarrollos hechos en [Kinitsky, 1965]. En [Reichmeider, 2000] se describe un método de hallar las inductancias, el cual se basa en la partición del bobinado en el punto de falla, se determinan las expresiones para la FMM, y mediante la descomposición del espacio de armónicos se calcula el número de vueltas y el ángulo de cada subdevanado. Este método se utilizó en [Mehdi Rahnama], para un análisis en la detección de fallas internas y es la base de otros desarrollos descritos en [Vilchis-Rodríguez and Acha, 2008].

Para obtener información sobre el comportamiento transitorio de las corrientes cuando se genera una falla monofásica cercana a neutro se implementó el modelo presentado en [Mehdi Rahnama], debido a su simplicidad en relación con los demás modelos. Este método utiliza los parámetros estándar para el cálculo de las inductancias. En el capítulo 3, se describe el modelo y la forma de implementarlo a las fallas monofásicas en el estator.

¹El anexo B presenta la descripción matemática de la máquina sincrónica en el dominio $dq0$ y en el dominio de fases, además se explica porque no es conveniente utilizar las componentes $dq0$ para representar la máquina ante fallas de cortocircuito. Se compararon los dos métodos mediante una simulación como punto de partida para la implementación del modelo final.

Capítulo 3

Descripción del modelo de la máquina síncrona cuando se presenta una falla interna

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo del generador síncrono ante fallas de cortocircuito, basado en la teoría de la partición de los bobinados de la máquina, expuesta en [Reichmeider, 2000].

Además se muestra la forma de hallar las condiciones iniciales del sistema de ecuaciones que modela la máquina en estado normal, las cuales son el punto de partida para la simulación del generador cuando se presenta una falla.

3.2. Partición de los bobinados de la máquina síncrona para el análisis de fallas internas

La MMF es la resultante de la interacción de la corriente en los bobinados según la disposición sobre el entrehierro, donde se distribuye el flujo magnético que por inducción genera los voltajes trifásicos en el estator. Aunque la distribución espacial de la fuerza magnetomotriz MMF nunca es senoidal, se puede aproximar de esta forma. La clásica teoría de circuitos

acoplados para la máquina requiere esta suposición Reichmeider [2000]. Por lo tanto este modelo desprecia el espacio de armónicos de la MMF.

Los devanados se configuran simétricamente con un número de polos determinado como p , y una disposición de n fases, donde generalmente el devanado tiene una disposición trifásica. Para describir el modelo a implementar, y con el propósito de ilustrar el método empleado, se tomará el caso de dos polos, aunque el método se puede emplear para cualquier número de polos.

Para modelar una falla interna por medio del método escogido, es necesario dividir el devanado del estator afectado. Por lo tanto considerando que la falla a tierra está presente en el bobinado de la fase a , como se muestra en la figura (3.1), el devanado de una fase está particionado en el devanado 1 (exterior) con un número de vueltas N_1 y el devanado 2 (interior) con un número de vueltas N_2 .

Donde :

f representa la localización de la falla

α representa la localización angular del nodo interno f y puede ser desplazado entre 0° y 180° .

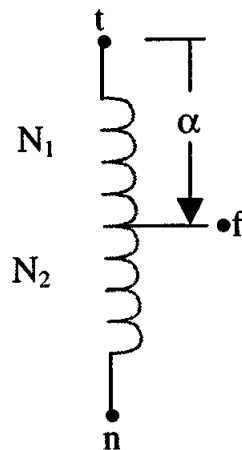


Figura 3.1: Esquema de la partición del devanado en una fase

Cuando se hace la partición del bobinado, se debe tener presente que cada devanado tiene un número de vueltas, y una posición angular de su respectivo eje magnético. Lo anterior se puede observar en la figura (3.2), donde γ_1 y γ_2 representan la localización angular de los ejes magnéticos para los devanados 1 y 2 respectivamente.

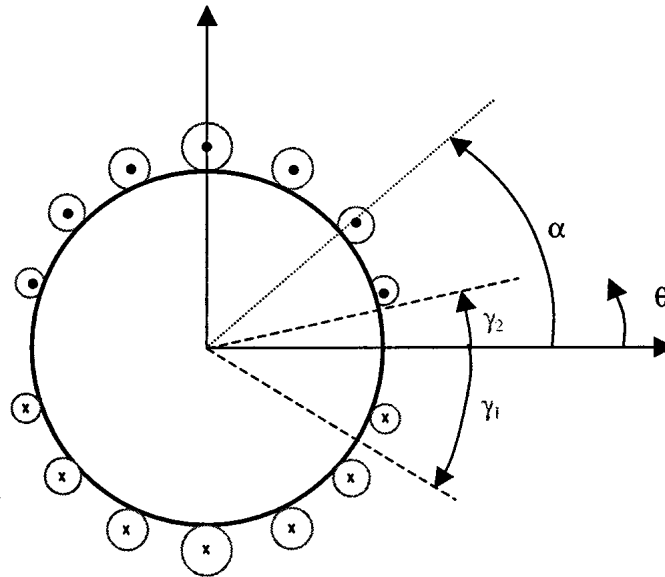


Figura 3.2: Partición del devanado

Para determinar el equivalente del número de vueltas y la localización angular del eje magnético de cada devanado para una determinada falla localizada en α , se parte de la expresión del equivalente senoidal en la respectiva partición. Entonces al descomponer la distribución original de la MMF en sus espacios de armónicos, se puede aproximar la magnitud de la componente fundamental como representación del número de vueltas en cada subdevanado. Las localizaciones de los ejes magnéticos (γ_1 y γ_2) se obtienen como los ángulos donde cada componente fundamental presenta su valor máximo.

Suponiendo un bobinado senoidalmente distribuido, la distribución del bobinado para la fase a se puede escribir como:

$$N_a(\theta) = N_p \text{sen}\theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3.1)$$

$$N_a(\theta) = -N_p \text{sen}\theta, \quad \pi \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.2)$$

donde N_p es la máxima densidad de conductores expresada en *vueltas/rad*.

Si N_s es el número equivalente de vueltas del bobinado senoidalmente distribuido, entonces:

$$N_s = \int_0^\pi N_p \text{sen}\theta d\theta = 2N_p \quad (3.3)$$

así que la fuerza magnetomotriz MMF a través del entrehierro se puede expresar como:

$$FMM = 0,5N_s i \text{Cos}\theta \quad (3.4)$$

definiendo $f(\theta)$ como MMF normalizada

$$f(\theta) = \frac{FMM}{i}$$

La onda senoidal $f(\theta)$ puede ser descompuesta de acuerdo con el ángulo de la falla como $f_1(\theta)$ para el subdevanado exterior, y $f_2(\theta)$ para el subdevanado interior. En las figuras 3.3 y 3.4 se muestra $f_1(\theta)$ y $f_2(\theta)$ respectivamente, sin embargo la suma de las dos funciones normalizadas es igual a la función original senoidal.

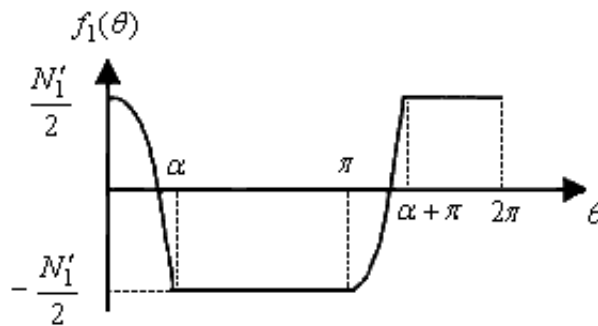


Figura 3.3: Distribución de la MMF del subdevanado a_1

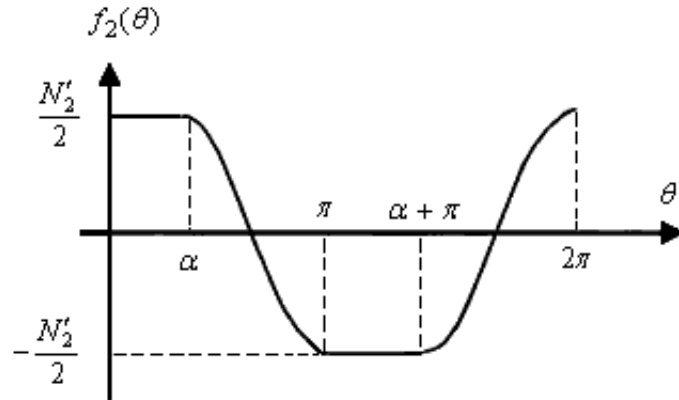


Figura 3.4: Distribución de la MMF del subdevanado a_2

3.2.1. Partición del subdevanado exterior

El subdevanado exterior comprende desde el terminal de fase del generador hasta el punto donde se origina la falla, y su MMF normalizada corresponde a la figura 3.3, la cual se puede expresar matemáticamente como:

$$f_1(\theta) = \frac{N'_1}{2} + \frac{N_s}{2}(\cos\theta - 1) \quad 0 \leq \theta \leq \alpha \quad (3.5)$$

$$f_1 = -\frac{N'_1}{2} \quad \alpha \leq \theta \leq \pi \quad (3.6)$$

$$f_1(\theta) = -\frac{N'_1}{2} + \frac{N_s}{2}(\cos\theta + 1) \quad \pi \leq \theta \leq \pi + \alpha \quad (3.7)$$

$$f_1(\theta) = \frac{N'_1}{2} \quad \pi + \alpha \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.8)$$

debido a que la función $f_1(\theta)$ es periódica, se puede representar por series de Fourier como:

$$f_1(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\theta + \phi_n) \quad (3.9)$$

donde

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

tomando la componente fundamental de la MMF se tiene :

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_1(\theta) \cos(\theta) d\theta = \frac{N_s}{2\pi} \left[\alpha - \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right]$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f_1(\theta) \sen(\theta) d\theta = -\frac{N_s}{2\pi} [\sen(\alpha)]$$

El número equivalente de vueltas para el subdevanado exterior es dos veces la amplitud del armónico fundamental de la MMF, por lo tanto:

$$N_{a1} = 2\sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{N_s}{\pi} \sqrt{a^2 - 2\alpha \sen\alpha \cos\alpha + \sen\alpha} \quad (3.10)$$

La localización del eje magnético para el subdevanado exterior γ_1 se expresa como:

$$\gamma_1 = -\tan^{-1} \left(\frac{\sen\alpha}{\alpha - \frac{1}{2}\sen(2\alpha)} \right) \quad (3.11)$$

3.2.2. Partición del subdevanado interior

El subdevanado interior comprende desde α hasta π , es decir desde el punto de falla hasta el neutro del generador. Las ecuaciones del número equivalente de vueltas para este subdevanado se obtienen de forma similar, teniendo en cuenta ahora que la función de la fuerza magnetomotriz MMF para esta sección del bobinado es como se muestra en la figura 3.4. Los resultados para el subdevanado interior son :

El número equivalente de vueltas :

$$N_{a2} = \frac{N_s}{\pi} \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + 2(\pi - \alpha)\sen\alpha \cos\alpha + \sen\alpha} \quad (3.12)$$

La localización del eje magnético

$$\gamma_2 = -\tan^{-1} \left(\frac{-\sen\alpha}{\pi - \alpha + \frac{1}{2}\sen(2\alpha)} \right) \quad (3.13)$$

3.2.3. Cálculo de inductancias de la máquina

Se describe la forma de calcular la inductancia propia para la fase A, de la misma forma se procede con las otras inductancias, para obtener la matriz que nos definirá la interacción de los flujos magnéticos, cuando se está modelando una máquina con una falla interna monofásica.

Teniendo las fuerzas magnetomotrices en cada eje de cuadratura como:

$$FMM_{a1d} = N_{a1}i_{a1}\cos(\theta - \varphi_1) \quad (3.14)$$

$$FMM_{aq1} = N_{a1}i_{a1}\cos(\theta + \frac{\pi}{2} - \varphi_1) \quad (3.15)$$

Se pueden hallar los flujos y por lo tanto el flujo ligado en el bobinado de la fase A:

$$\phi_{ad} = P_d(N_{a1}i_{a1}\cos(\theta - \varphi_1)) \quad (3.16)$$

$$\phi_q = P_q(-N_{a1}i_{a1}\sen(\theta - \varphi_1)) \quad (3.17)$$

$$\lambda_{a1a1} = N_{a1}(\phi_d\sen(\theta - \varphi_1) + \phi_q\cos(\theta - \varphi_1)) \quad (3.18)$$

donde P_q y P_d son las permeancias en cada eje.

Por definición se tienen las siguientes inductancias dependientes de la permeancia en cada eje:

$$L_s = \frac{P_d + P_q}{2} \quad (3.19)$$

$$L_{m0} = \frac{P_d - P_q}{2} \quad (3.20)$$

Remplazando 3.16 y 3.17 en la ecuación 3.18 y utilizando las ecuaciones 3.19 y 3.20 se puede obtener la expresión para la inductancia, en función de valores conocidos como:

$$L_{a1a1} = N_{a1}^2 [L_s - L_{m0} \cos 2(\theta - \varphi_1)] \quad (3.21)$$

Las matriz de inductancias que definen la interacción de flujos se muestra en el apéndice E.

3.3. Modelo circuital para la falla fase tierra

Conocidas las inductancias del sistema a simular, incluyendo las inductancias equivalentes de la partición en la localización de la falla, se puede obtener el sistema de ecuaciones que modela la falla monofásica, mediante un análisis circuital. La figura 3.5 representa la máquina en condiciones de falla.

Considerando las matrices de inductancias y resistencias como se expresan en el apéndice E, el sistema de ecuaciones que modela la máquina en condiciones de fallas internas fase neutro se puede expresar como:

$$(L - L_E - L_G) \frac{dI}{dt} = (R_{falla} + R_E + R_g - R_a - \frac{dL}{\omega dt}) [I] + [V] \quad (3.22)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ -\frac{2}{3}L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Donde I 3.24 es el vector de corrientes en condiciones de falla y V 3.25 es el vector de voltajes en la barra infinita :

$$I = [i_{a1} \ i_{a2} \ i_b \ i_c \ i_{fd} \ i_{kd} \ i_{kq}] \quad (3.24)$$

$$V = [v_a \ 0 \ v_b \ v_c \ v_{fd} \ 0 \ 0] \quad (3.25)$$

Por lo tanto el sistema de ecuaciones a resolver mediante un método de integración es:

$$\frac{dI}{dt} = B(R_{falla} + R_E + R_g - R_a - \frac{dL}{\omega dt}) [I] + B [V] \quad (3.26)$$

donde la matriz B se define como:

$$B = (L - L_E - L_G)^{-1} \quad (3.27)$$

El sistema de ecuaciones se resuelve mediante el método Dormand Prince el cual está implementado en MatLab. Debido a la necesidad de trabajar en el dominio de fases como se explicó en la sección B.2, el sistema requiere alta capacidad computacional para obtener la solución, y en las fallas simuladas cercanas al neutro su requerimiento es mayor, debido a que uno de los bobinados de la partición tiene pocas espiras [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000b].

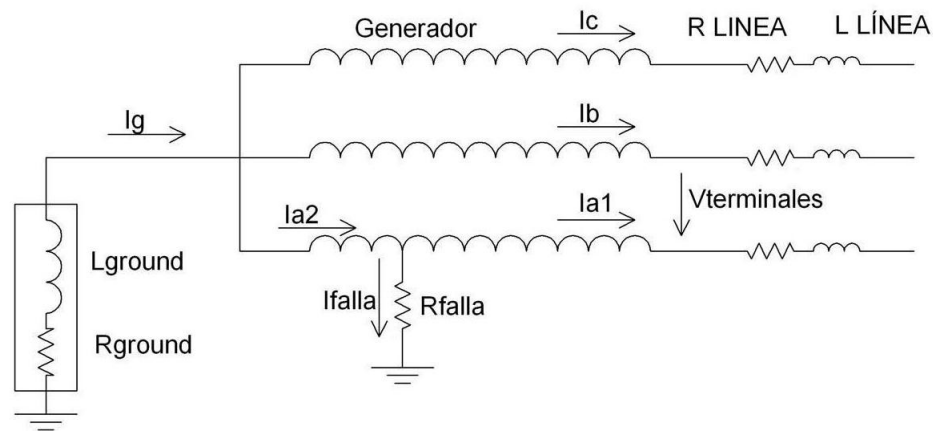


Figura 3.5: Representación de la falla en la fase A del estator

3.4. Cálculo de las condiciones iniciales para la simulación

Para la representación de las corrientes de falla en los bobinados de la máquina sincrónica, es necesario contar con las condiciones iniciales de la máquina en estado estable, con el propósito de determinar el comportamiento en condiciones normales de operación y contar con un punto de referencia con respecto a los valores en condiciones de falla. Además el sistema de ecuaciones que representa las interacciones de los flujos y sus bobinados necesita las condiciones iniciales para resolverlo por el método ODE45 existente en MATLAB.

Por lo tanto se pueden obtener estas condiciones iniciales en función de la carga conectada

al sistema, estas cantidades están expresadas en valores $p.u.$

Normalmente la potencia activa, la potencia reactiva y la magnitud del voltaje en los terminales del generador se encuentran como datos del sistema. Por lo tanto se puede hallar la corriente y el ángulo del factor de potencia como:

$$I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{E_t} \quad (3.28)$$

$$\phi_{FP} = \text{Cos}^{-1}\left(\frac{P_t}{E_t I_t}\right) \quad (3.29)$$

P_t es la potencia activa según las condiciones de carga en $p.u.$

Q_t es la potencia reactiva según las condiciones de carga en $p.u.$

I_t es la corriente de línea en $p.u.$

θ_{FP} es el ángulo del factor de potencia

Otro valor necesario para calcular la condiciones iniciales es el ángulo interno del rotor:

$$\delta_i = \tan^{-1}\left(\frac{X_q I_t \cos(\phi_{FP}) - R_a I_t \sin(\phi_{FP})}{E_t + R_a \cos(\phi_{FP}) + X_q I_t \sin(\phi_{FP})}\right) \quad (3.30)$$

donde:

R_a es la resistencia del devanado de fase en $p.u.$

X_q es la reactancia de eje de cuadratura en $p.u.$

Las componentes dq de voltaje y corrientes se calculan como:

$$e_d = E_t \sin \delta_i \quad (3.31)$$

$$e_q = E_t \cos \delta_i \quad (3.32)$$

$$I_d = I_t \sin(\delta_i + \phi_{FP}) \quad (3.33)$$

$$I_q = I_t \cos(\delta_i + \phi_{FP}) \quad (3.34)$$

Así que la corriente de campo en estado estable, con las condiciones de carga y la tensión en los terminales del generador como datos de entrada para la simulación se puede hallar como sigue:

$$I_{fd} = \frac{e_q + R_a I_q + X_d}{X_{ad}} \quad (3.35)$$

donde $X_d = X_{ad} + X_l$

En condiciones estables las corrientes en los circuitos amortiguadores son cero por lo tanto:

$$I_{kd} = 0 \quad (3.36)$$

$$I_{kq} = 0 \quad (3.37)$$

Para hallar las corrientes en cada bobinado del estator y el voltaje en los terminales de la máquina en estado estable en el dominio de fases, se debe utilizar la transformada inversa de Park que se presentó en la ecuación B.20, considerando que la componente de secuencia cero es igual a cero debido a que el sistema inicialmente está balanceado. Como resultado se obtiene:

$$i_a = -I_t \text{sen}(-\phi_{FP} - \delta_i) \quad (3.38)$$

$$i_b = -I_t \text{sen}(-\phi_{FP} - \delta_i - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.39)$$

$$i_c = -I_t \text{sen}(-\phi_{FP} - \delta_i + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.40)$$

Entonces las condiciones iniciales del sistema que representa el modelo de la máquina sincrónica se expresa por medio de la ecuación 3.35 a la 3.40.

Debido a que se tomó como referencia las ecuaciones 3.31,3.32,3.33,3.34, presentadas en Kundur [1994], el voltaje en los terminales de la máquina en el dominio de fase se expresa como sigue, y se deduce mediante la transformada inversa de Park como se hizo con las corrientes de cada fase:

$$v_a = -v_t \text{sen}(\omega t - \delta_i) \quad (3.41)$$

$$v_b = -v_t \text{sen}(\omega t - \delta_i - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.42)$$

$$v_c = -v_t \text{sen}(\omega t - \delta_i + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.43)$$

Capítulo 4

Simulación, resultados y observaciones

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la simulación de las fallas de cortocircuito, mediante los cuales se concluyen las principales características, y los factores que influyen en el caso real de la falla. Se muestran las gráficas y su respectivo análisis de las corrientes presentes en la máquina y sus efectos al variar factores influyentes como la resistencia de puesta a tierra, la resistencia de cortocircuito, y la posición de la falla.

4.2. Estudio de caso tipo

Para la simulación se tomaron los parámetros estándar de la máquina presentada en [Kundur, 1994], los cuales se resumen en la tabla 4.1. El sistema que se muestra en la figura 4.1 está conformado básicamente por la máquina sincrónica con una potencia de 550MW y una tensión de 24kV la cual se conecta a una barra infinita, mediante una impedancia de línea Z_l .

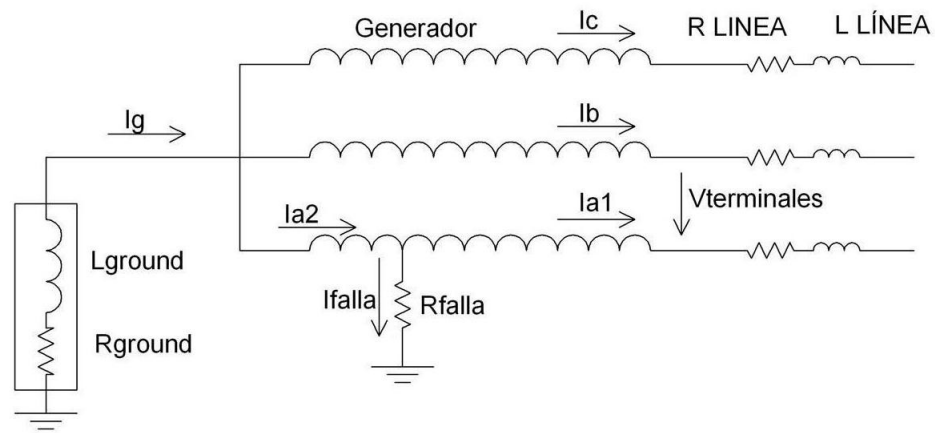


Figura 4.1: Representación de la falla en la fase A del estator

Símbolo	Parámetro	Valor en p.u. o segundos
L_d	Inductancia sincrónica en el eje D	1,81
L'_d	Inductancia transitoria en el eje D	0,3
L''_d	Inductancia subtransitoria en eje D	0,23
T'_{d0}	Constante de tiempo transitoria en el eje D	8
T''_{d0}	Constante de tiempo subtransitoria en el eje D	0,03
L_q	Inductancia sincrónica en el eje Q	1,76
L'_q	Inductancia transitoria en el eje Q	0,65
L''_q	Inductancia subtransitoria en eje Q	0,25
T'_{q0}	Constante de tiempo transitoria en el eje Q	1
T''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria en el eje Q	0,07
r_a	Resistencia de armadura	0,003
L_l	Inductancia de dispersión en la armadura	0,15

Cuadro 4.1: Parámetros de la máquina 1

Para una evaluación del comportamiento de la máquina fallada, como primer paso se analizan las corrientes en el estator como función de la posición del cortocircuito interno fase-tierra, para lo cual se tendrán en cuenta las siguientes condiciones:

La potencia generada

Potencia activa $P=0,9$ p.u

Potencia reactiva $Q=0,43$ p.u

Tensión en los terminales del generador: 1 p.u

Resistencia de puesta a tierra: 0,1 p.u

Reactancia de puesta a tierra: 0,1 p.u

Impedancia de la línea: $0,082+j0,19$ p.u

Falla monofásica dentro del estator sólidamente a tierra

En las figuras 4.2 y 4.3, se muestra el comportamiento de las corrientes rotóricas y estáticas. En el intervalo de 0 a 0,039 segundos la máquina está funcionando en estado estable y sin presencia de falla, por lo tanto la corriente de campo i_f es constante con un valor 1,45 p.u para las condiciones de carga del caso, además las corrientes en los bobinados amortiguadores i_{kd} y i_{kq} son nulas. Por cada fase i_a , i_b , i_c se transmite una corriente de 1 p.u i_a , i_b , i_c formando un sistema balanceado.

En el intervalo de 0,039 a 0,2 segundos la máquina presenta una falla interna monofásica a tierra la cual se localiza en el 30 % del bobinado desde el neutro, dejando de esta manera sus condiciones normales de funcionamiento. Se puede observar la presencia de oscilaciones en la corriente de campo, las cuales tienen una componente fundamental de 60Hz, esto se adjudica a la interacción de los flujos magnéticos asimétricos producidos en el estator debido a las nuevas corrientes que fluyen por los devanados. Esto causará un fuerte impacto en el torque electromagnético, conllevando a daños en las piezas mecánicas del generador.

Para efectos de esta simulación se supone que la inercia del sistema es muy grande, por lo tanto una falla no altera la velocidad del rotor [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000a] .

Existe otra componente en el transitorio de la corriente del devanado de campo, la cual pertenece a la componente natural de las corrientes presentes en el estator, y que por inducción electromagnética se reflejan en el transitorio del circuito rotórico del campo, como también la componente natural del circuito de campo, equivalente a un circuito RL. Esto se puede observar en la sección 4.5 figura 4.9 y 4.7.

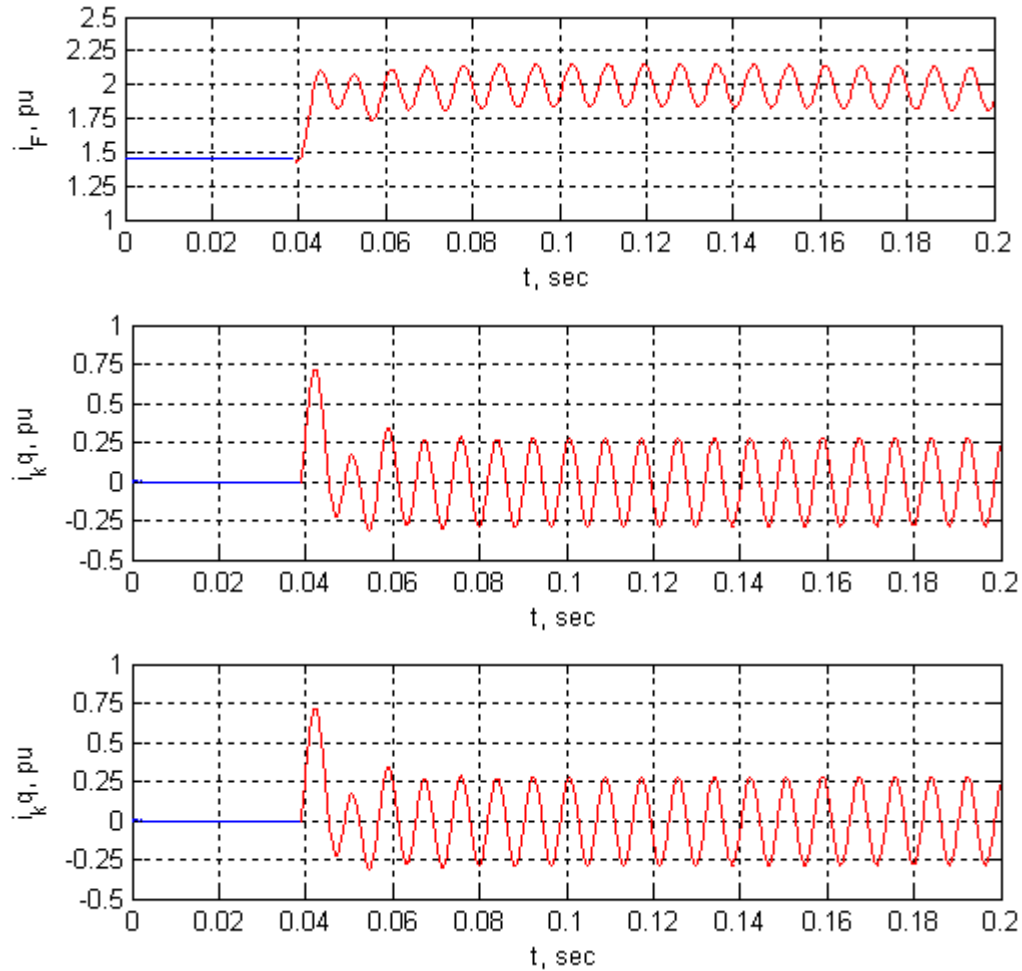


Figura 4.2: Corrientes rotóricas cuando se presenta un falla monofásica en el 30 % del bobinado del estator

En la figura 4.3 se muestra el incremento de las corrientes de la fase A debido a la falla. Se presentan las dos corrientes producidas en el devanado fallado. Como se puede observar para el caso existe un incremento en la partición interna del bobinado de 4 veces la corriente nominal, y de 2 veces la corriente nominal en la partición externa, por lo tanto la máquina se debe sacar de línea y luego proceder a la desconexión del devanado de campo, protegiendo de esta manera de sobrecalentamientos excesivos en los bobinados, y evitando de esta forma daños mayores como pérdidas de aislamiento en otras partes del bobinado que podrían causar fallas más severas como las fallas entre dos fases.

Esta corriente que fluye el bobinado de la fase A, en el momento de la falla puede saturar

el circuito magnético y puede causar serios daños en las láminas del estator [Tu, 2007].

Aunque la falla se localice en la fase A, los devanados B y C también se ven afectados debido a la interacción de los flujos magnéticos dentro del generador.

Como se muestra en la figura este tipo de falla puede ser detectado por sus efectos en las corrientes de fase, sin embargo si la falla ocurre en un porcentaje muy pequeño las protecciones pueden pasar por alto las fallas cercanas al neutro, como se explica en la sección 4.3.

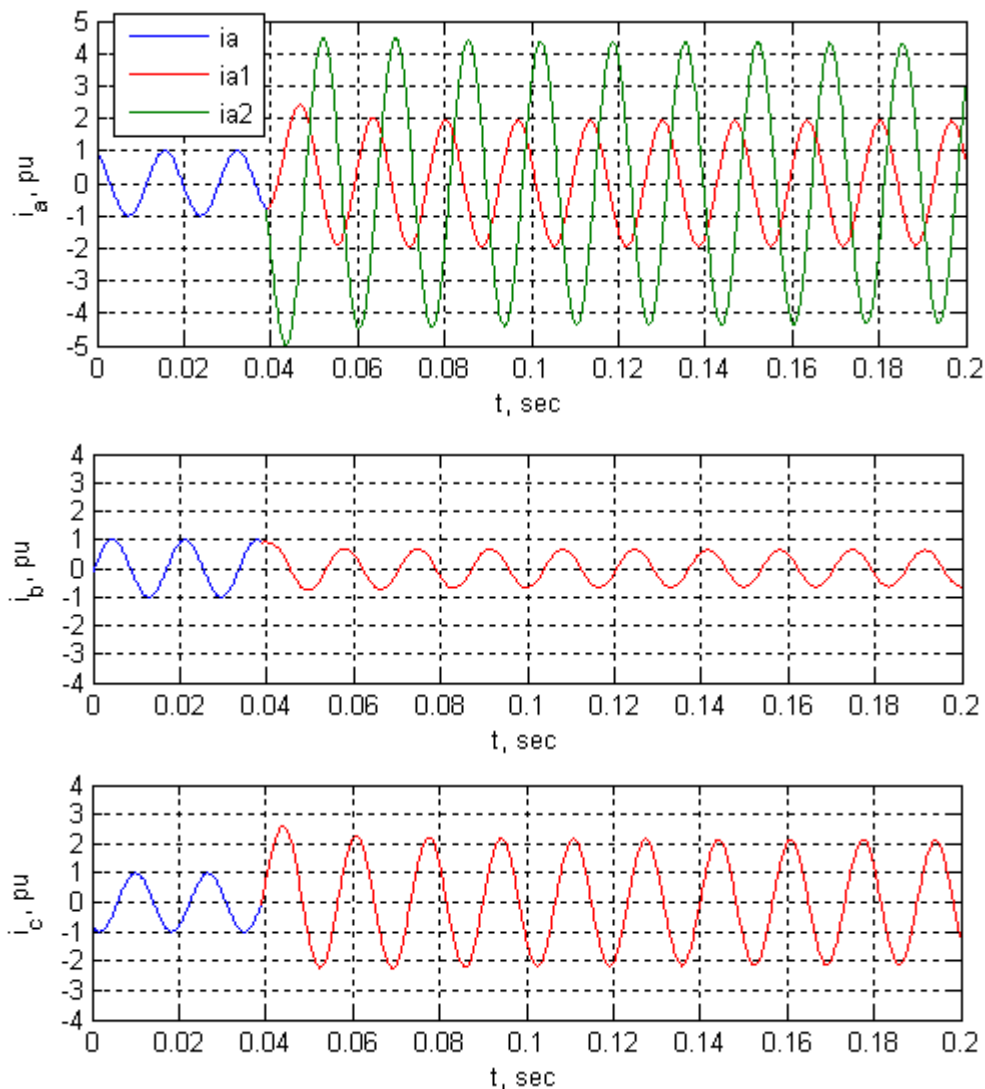


Figura 4.3: Corrientes estáticas cuando se presenta un falla monofásica en el 30 % del bobinado del estator

4.3. Variación de la localización de la falla

Las protecciones diferenciales pueden proteger efectivamente el generador de fallas internas en los devanados estatóricos, sin embargo el comportamiento de la máquina ante estas fallas se debe analizar con el fin de brindar selectividad.

La figura 4.4 muestra el comportamiento del generador cuando ocurre una falla en diferentes puntos dentro del bobinado de una fase. Cuando las fallas son muy cercanas al neutro la diferencia entre las corrientes de fase en el terminal exterior y el terminal cercano al neutro es pequeña, por lo tanto las protecciones diferenciales no las detectan en los casos donde los relés no son suficientemente sencitivos.

Las corrientes para una localización de la falla de un 7 % no difieren demasiado, lo que podría impedir su detección por medio de protección diferencial de fase. Por lo tanto puede emplearse otro tipo de protecciones, que analizan la componente de secuencia cero del generador, valiéndose de la variación de la componente del tercer armónico en el neutro, con la localización de la falla (relés 59G y 27N) o por medio de los métodos que emplean inyección de subarmónicos.

Para una localización de la falla en un 50 % el incremento de las corrientes en el bobinado fallado es apreciable, y además la diferencia de las dos corrientes dentro del bobinado es considerable para ser detectada por las protecciones.

Las diferencias de fases entre las corrientes i_{a1} y i_{a2} son apreciables cuando la falla se aleja del neutro, esto se debe a que la corriente externa circula en sentido contrario, es decir fluye del sistema de gran inercia hacia el generador debido a que la proporción del bobinado es menor que en estado normal, por lo tanto se genera una menor tensión la cual es vista por la malla de circuito externo.

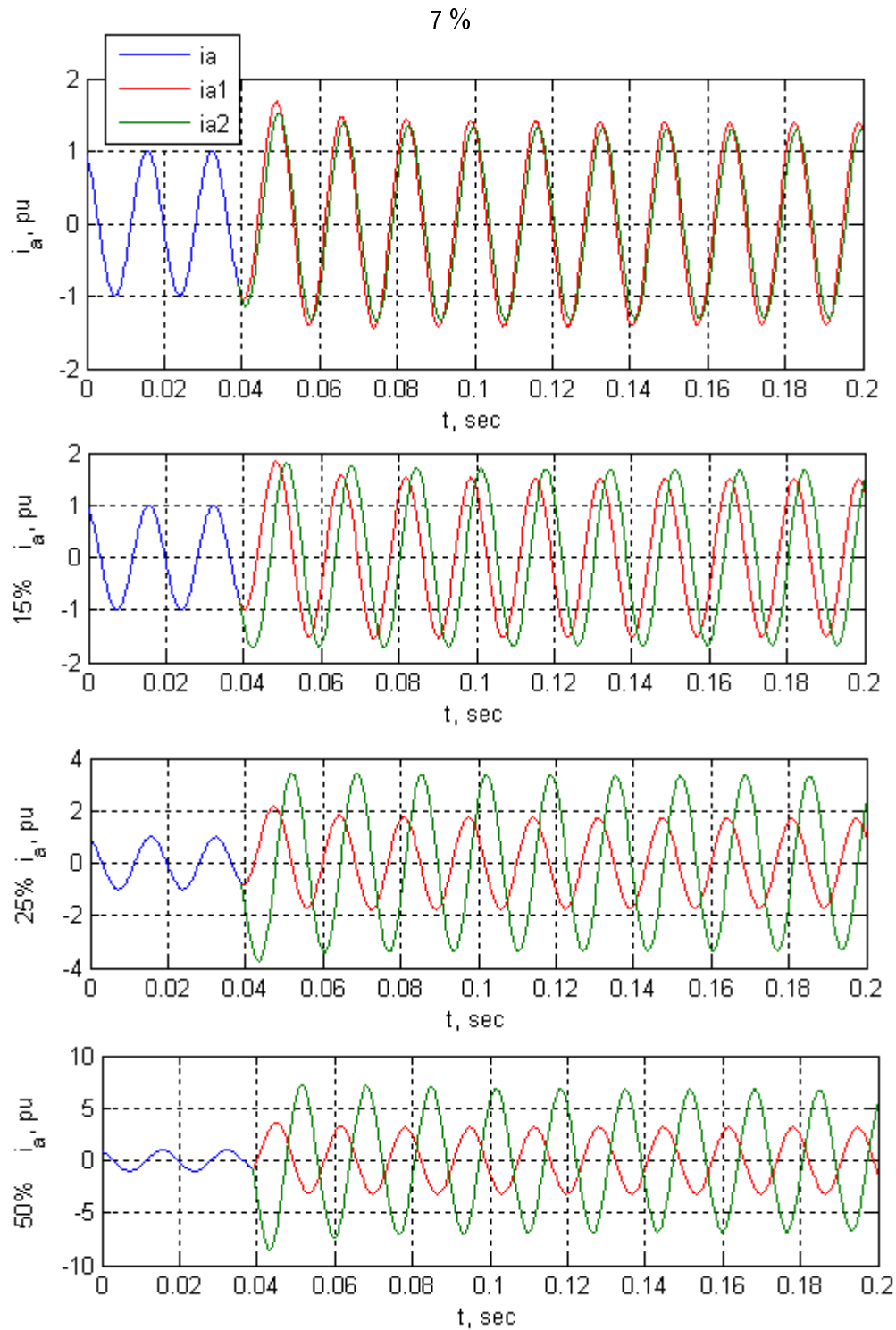


Figura 4.4: Corrientes en la fase A cuando se presenta una falla monofásica en diferentes localizaciones dentro bobinado del estator

4.4. Influencia de la resistencia de falla y la impedancia de puesta a tierra del generador

Para observar la influencia de la impedancia de la falla en la magnitud de las corrientes presentes en el generador, pensando en estimar las tendencias de estas en un estudio experimental, se simuló las fallas en varios puntos dentro del bobinado del generador, teniendo en cuenta que ahora se conecta una carga en Y al generador, sin considerar una barra infinita en sus terminales. Por lo tanto el modelo se acerca más a la realidad de las pruebas que se quieren hacer en el laboratorio y que se dejan como una prepropuesta para un estudio posterior en el capítulo 5.

La resistencia de falla limita las corrientes de cortocircuito y la corriente de falla, como se puede observar en las figuras 4.5 y 4.6, donde se muestran 4 casos con diferentes resistencias. Cuando la falla es sólidamente a tierra se observa una corriente de falla de 1.2 p.u y la corriente de cortocircuito en la fase A es de 2,2 p.u en la partición interna. Estas corrientes son críticas para la máquina por lo tanto las protecciones deben actuar rápidamente, sin embargo cuando el aislamiento no está totalmente dañado y existe una resistencia entre el bobinado y el punto de contacto a tierra que normalmente es el núcleo del estator, existirá una impedancia que limita tanto la corriente de falla como la corriente de cortocircuito en cada fase. La corriente de falla cuando la resistencia es de 10 pu es 0,01 p.u y la corriente en la fase A se mantiene muy cercana al valor en condiciones estables. Aunque las corrientes para este caso no son críticas, se pueden presentar sobrecalentamientos en las partes en contacto (bobinado- láminas del estator) que pueden acelerar el deterioro del aislamiento.

Las pruebas de laboratorio se pueden hacer controlando las corrientes de cortocircuito y la corriente de falla mediante la resistencia de falla, de esta manera se evitará la presencia de una energía muy alta que pueda dañar el aislamiento de los bobinados de la máquina prototipo, y además se mitigarán los riesgos al personal a cargo de las pruebas.

La resistencia del neutro a tierra del generador, también servirá para controlar la magnitud de la falla. En las simulaciones realizadas se obtuvieron resultados similares a los presentados en la figura 4.5 cuando se varía la impedancia de puesta a tierra. Por lo tanto mediante esta se puede reducir la corriente de falla y consecuentemente los efectos sobre el aislamiento y la integridad de la máquina.

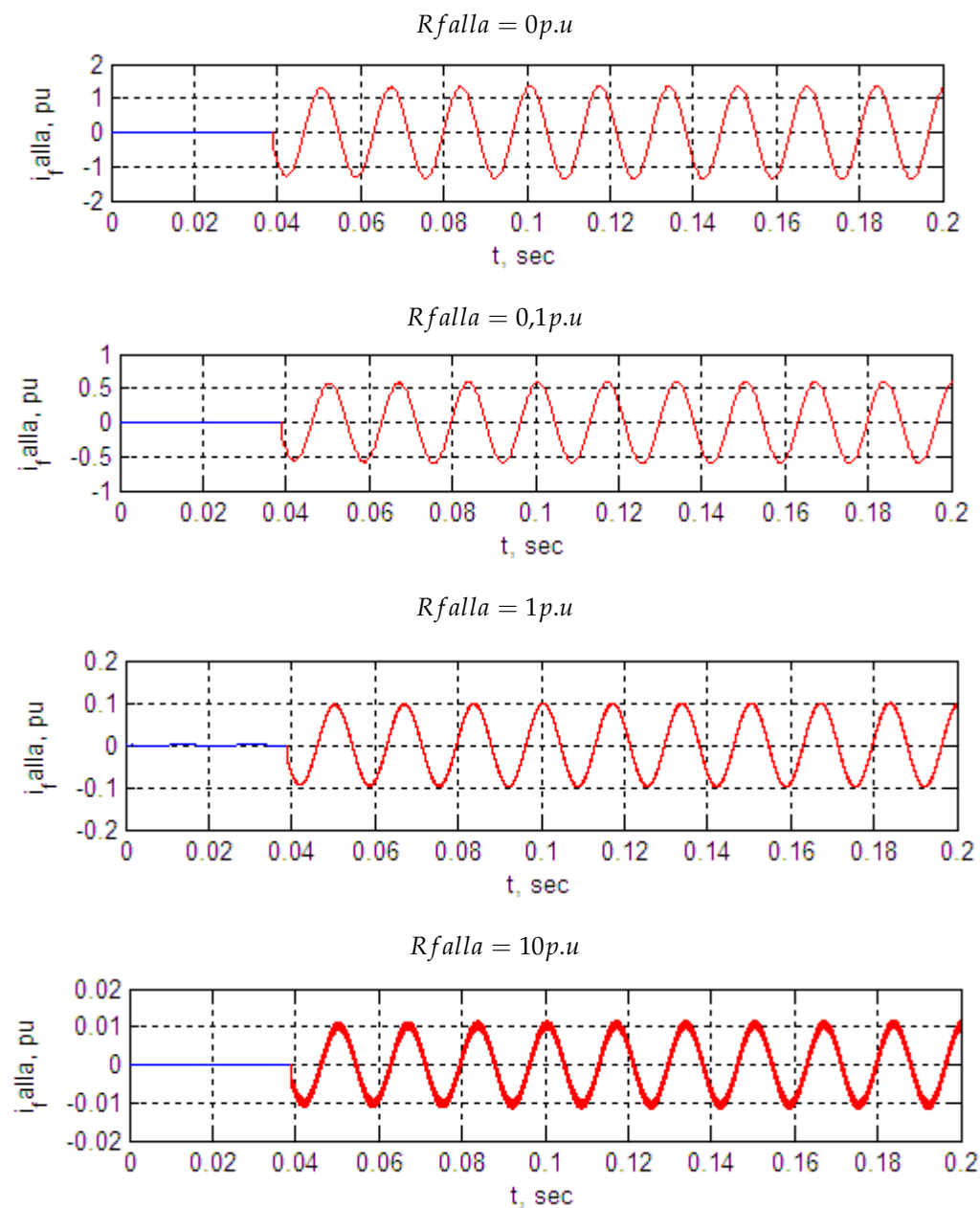


Figura 4.5: Corrientes de falla para diferentes resistencias de falla para un 20 %

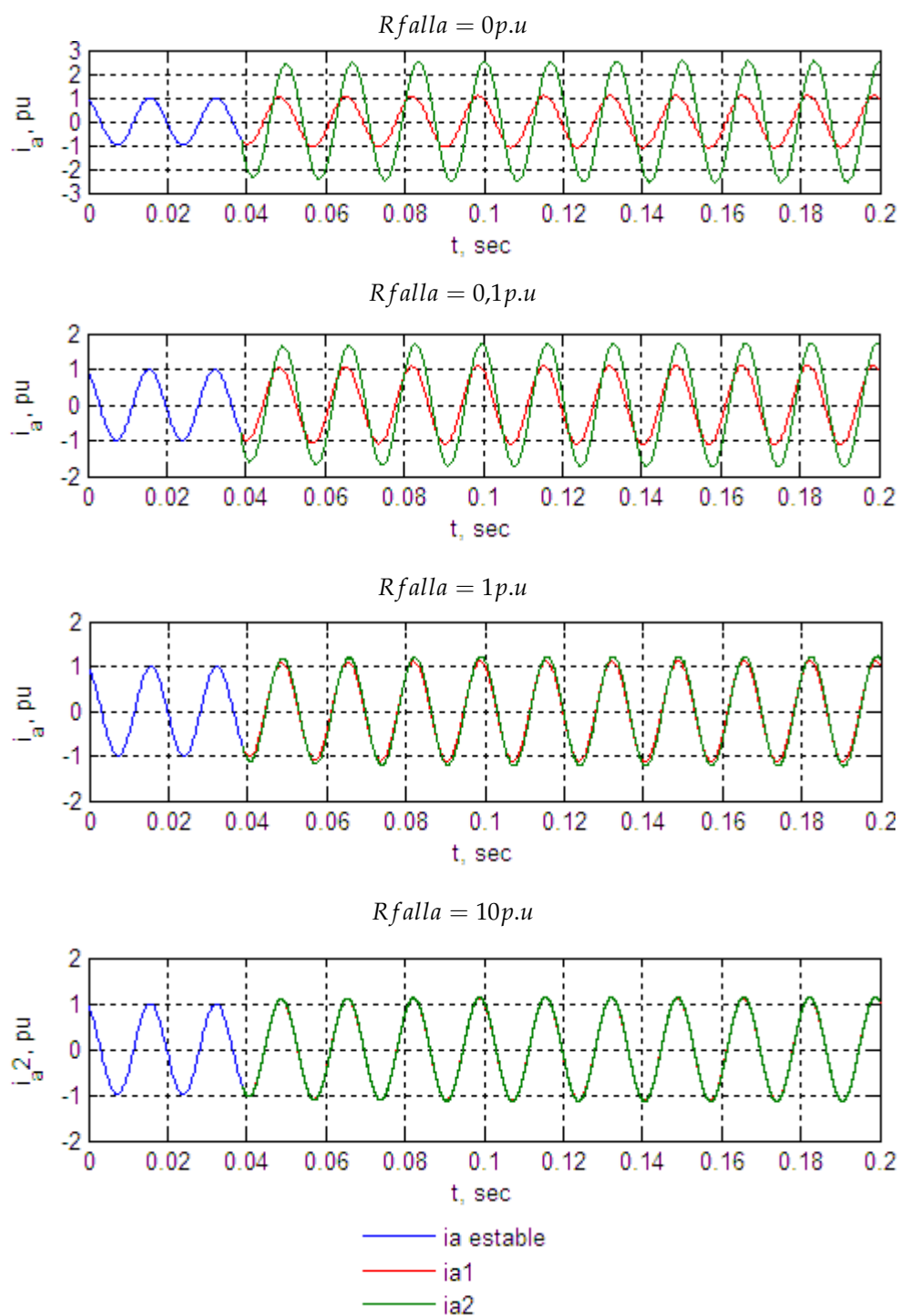


Figura 4.6: Corrientes de cortocircuito en la fase A para diferentes resistencias de falla en el 20 % del bobinado

4.5. Comportamiento transitorio

Para observar el comportamiento transitorio de la fallas monofásicas internas se obtuvieron los resultados de las simulaciones para la máquina con parámetros estándar dados en la tabla 4.1, con las siguientes condiciones:

Potencia activa: 0,9 p.u

Potencia reactiva: 0,43 p.u

Voltaje en terminales : 1 p.u

Resistencia de puesta a tierra: 1 p.u

Reactancia inductiva: 0,1 p.u

Resistencia de puesta a tierra externa: 0 p.u

Inductancia de puesta a tierra externa: 0 p.u

Impedancia de la línea: 0,082+j0,19 p.u

Falla sólidamente a tierra, localizada en el 45 % del bobinado desde el neutro al punto de falla.

La máquina tiene un tiempo de falla de 0,54 segundos después de estar en sus condiciones estables y se simuló durante un tiempo de 8 segundos, los resultados se muestran en las figuras 4.8 y 4.7.

El tiempo del transitorio del circuito de campo es de 8 segundos aproximadamente, y está de acuerdo con los parámetros estándar de la máquina 4.1, lo cual se verifica por medio de la relación $\frac{L}{R}$. Los valores reales de las inductancias y resistencias de esta máquina para el circuito de campo se presentan en [Kundur, 1994], aunque también se pueden calcular a través de los parámetros estándar:

$$L_{fd} = 576,92mH$$

$$R_{fd} = 0,0715\Omega$$

Entonces la componente unidireccional o DC de la corriente de campo decae con una constante de tiempo $\frac{L_{fd}}{R_{fd}} = 8,0688$ segundos, como se observa en la figura 4.7. Además se presentan oscilaciones que son producto de interacción de los campos magnéticos producidos por las corrientes en el estator y reflejados en el rotor.

En los devanados amortiguadores se inducen corrientes compensadoras cuando se produce un cambio en las corrientes del estator. El flujo ligado en los devanados amortiguadores no puede cambiar instantáneamente, debido a su naturaleza inductiva, por lo tanto se presentan corrientes que evitan la discontinuidad del flujo. Como estas corrientes giran a la velocidad correspondiente a 60Hz, en el estator se inducen corrientes que dependen de estas [Carrillo, 1987].

El efecto del devanado amortiguador en el estator desaparece rápidamente, debido a que su relación $\frac{L_k}{R_k}$ es más baja que el devanado de campo.

$$\frac{L_{kd}}{R_{kd}} = 0,03 \quad \frac{L_{kq}}{R_{kq}} = 0,07$$

Estos valores se muestran en la tabla 4.1 como T_{d0}' y T_{q0}' respectivamente.

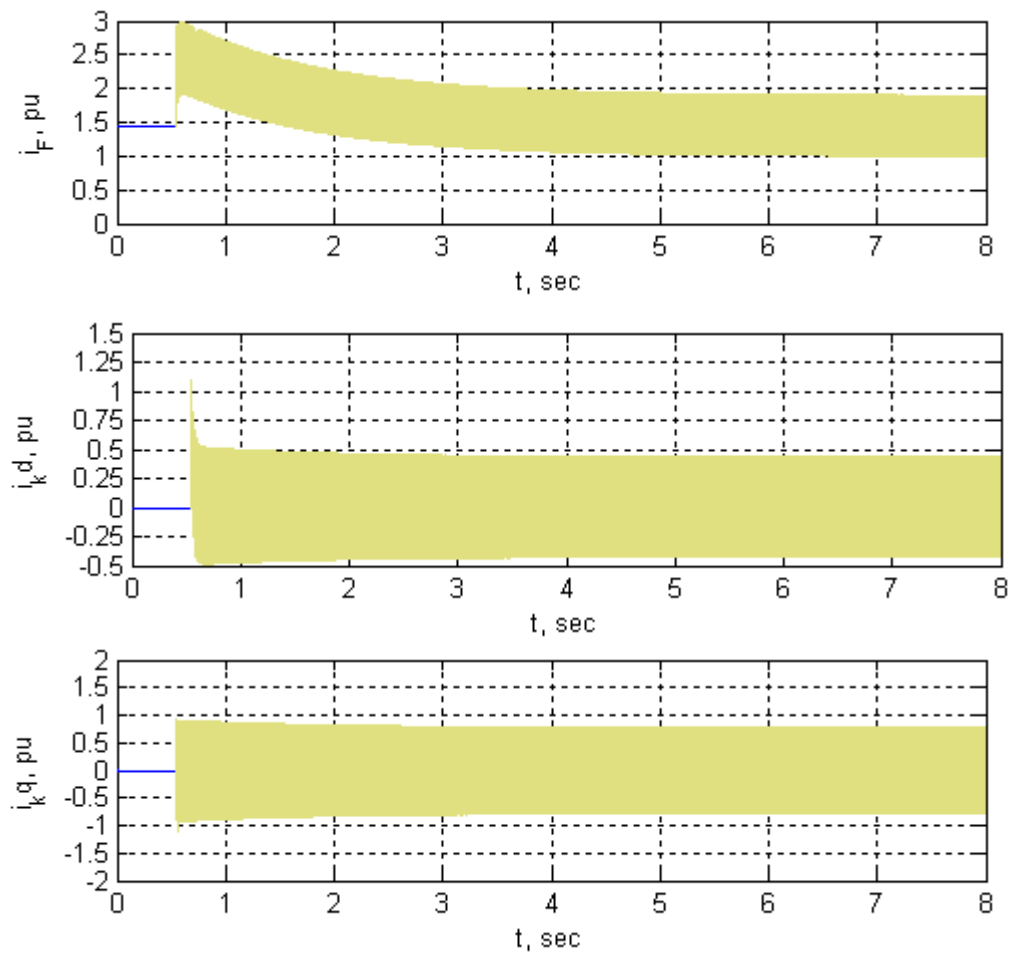


Figura 4.7: Transitorio de la corrientes rotóricas, para una falla monofásica en el 45% del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.1

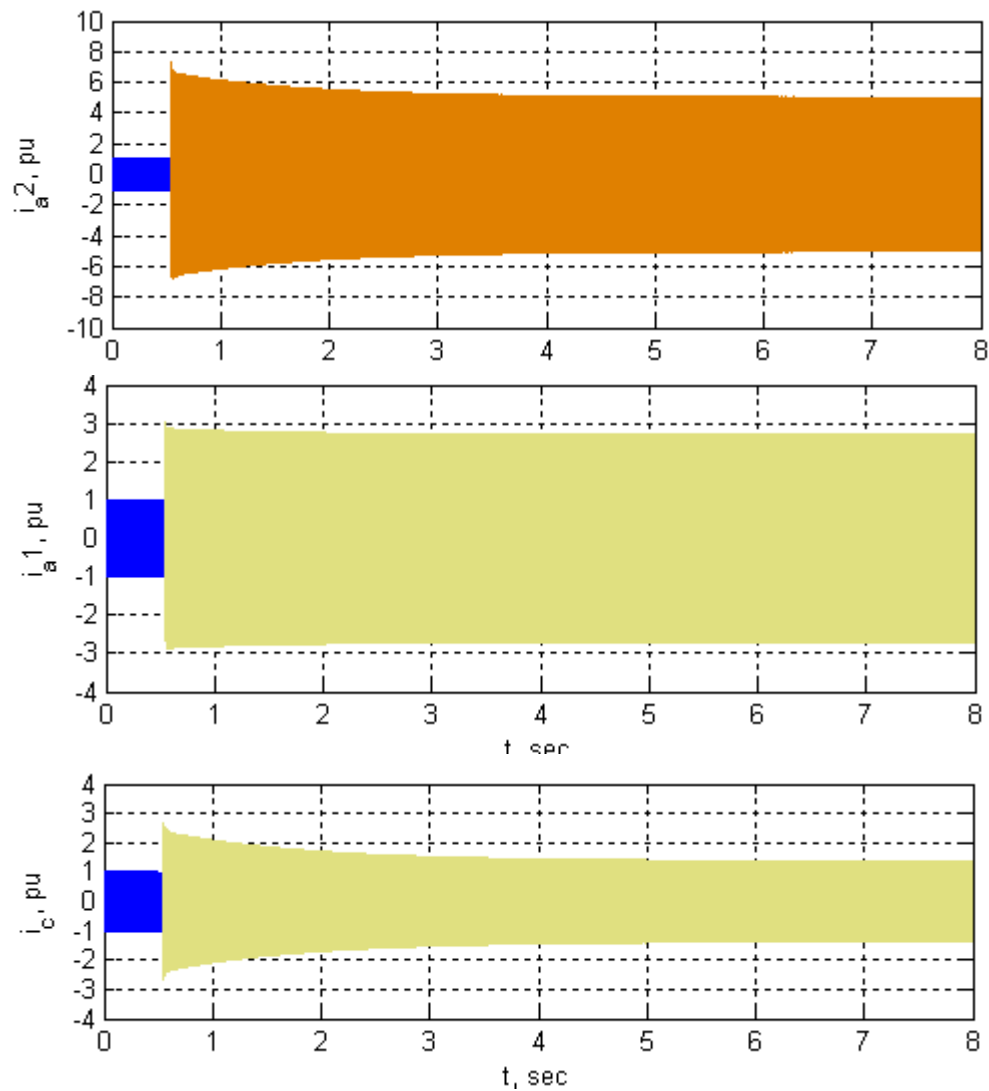


Figura 4.8: Transitorio de corrientes estáticas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.1

Mediante otra máquina con parámetros estándar presentados en la tabla 4.2 la cual fue utilizada en [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000b] para el desarrollo del modelo de la partición de bobinados, se obtuvieron las gráficas de las corrientes en los circuitos que componen el generador, con las siguientes condiciones:

Potencia activa: 0,9 p.u

Potencia reactiva: 0,43 p.u

Voltaje en terminales : 1 p.u

Resistencia de puesta a tierra: 1 p.u

Reactancia inductiva: 0,1 p.u

Resistencia de puesta a tierra externa: 0 p.u

Inductancia de puesta a tierra externa: 0 p.u

Impedancia de la línea: 0,082+j0,19 p.u

Falla sólidamente a tierra, localizada en el 45 % del bobinado desde el neutro al punto de falla.

tiempo de falla 0,54 segundos

tiempo de simulación 5 segundos

Símbolo	Parámetro	Valor en p.u, o segundos
L_d	Inductancia sincrónica en el eje D	2,039
L'_d	Inductancia transitoria en el eje D	0,217
L''_d	Inductancia subtransitoria en eje D	0,15
T'_{d0}	Constante de tiempo transitoria en el eje D	5,615
T''_{d0}	Constante de tiempo subtransitoria en el eje D	0,022
L_q	Inductancia sincrónica en el eje Q	1,944
L'_q	Inductancia transitoria en el eje Q	0,446
L''_q	Inductancia subtransitoria en eje Q	0,147
T'_{q0}	Constante de tiempo transitoria en el eje Q	0,457
T''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria en el eje Q	0,046
r_a	Resistencia de armadura	0,004
L_l	Inductancia de dispersión en la armadura	0,128

Cuadro 4.2: Parámetros estándar de la máquina 2

En las figuras 4.9, se puede confirmar el tiempo transitorio de la componente unidireccional o DC, para el circuito de campo, según la tabla 4.2.

$$\frac{L_{fd}}{R_{fd}} = 5,65$$

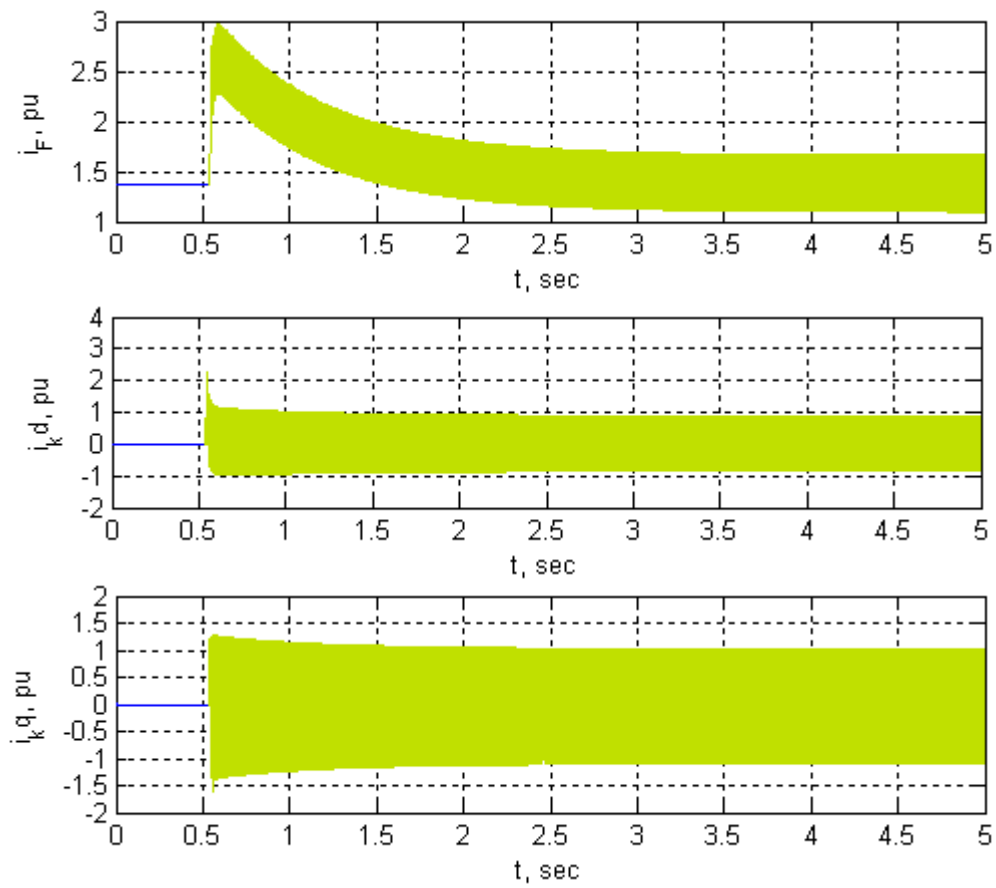


Figura 4.9: Transitorio de las corrientes rotóricas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.2

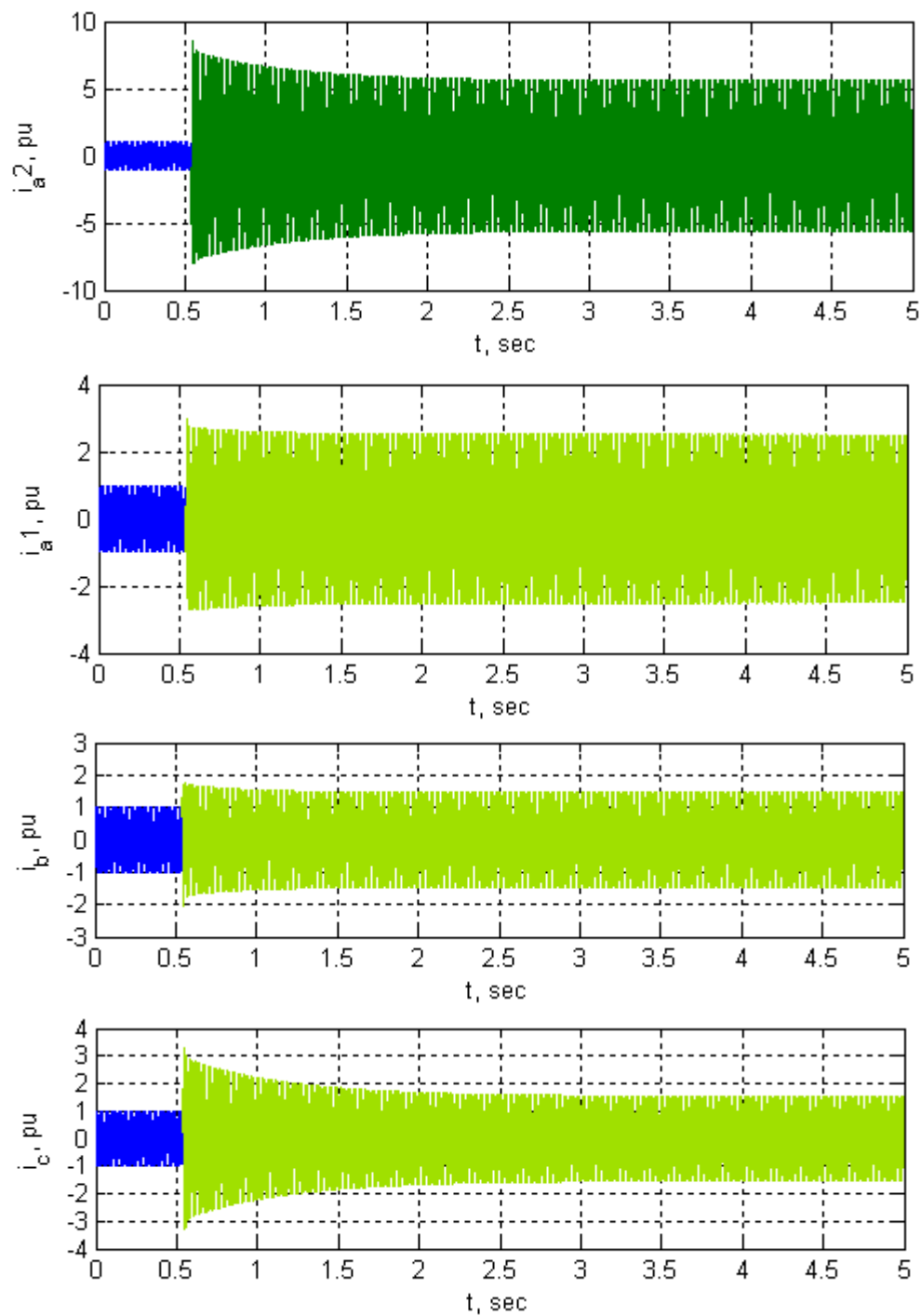


Figura 4.10: Transitorio de corrientes estáticas, para una falla monofásica en el 45 % del bobinado del estator, para la máquina con los parámetros estándar de la tabla 4.2

Capítulo 5

Prepropuesta del análisis experimental de fallas en un generador

5.1. Introducción

En el modelo implementado en este trabajo se consideró que la fuerza magnetomotriz presente en el entrehierro del generador es completamente senoidal, por lo tanto se desprecian los armónicos presentes debido a la distribución del bobinado y a la construcción del estator [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000a], [Reichmeider, 2000]. Mediante la prueba de las fallas en un generador real se podrían comparar las medidas de las corrientes con las obtenidas mediante el modelo de simulación implementado.

En este capítulo se dan las recomendaciones para la realización de un análisis experimental como paso inicial para un posterior estudio, presentando las características básicas del bobinado de la máquina, los equipos y las medidas necesarias para las pruebas.

5.2. Conexiones y requerimientos para las pruebas de laboratorio

Los estudios experimentales que requieren inducir a una falla un equipo usualmente necesitan operaciones y sistemas físicos bajo algunas condiciones que pueden ser peligrosas,

destructivas, y costosas. Por lo tanto se debe planear las pruebas de laboratorio de una manera segura para generar los menores impactos en los equipos utilizados y evitar riesgos en el personal.

La prepropuesta del estudio experimental de fallas de cortocuito consiste en realizar eventos controlados, con el fin de mitigar el riesgo, disminuyendo la cantidad de energía a la cual se exponen los componentes del laboratorio debido a las sobrecorrientes. Esto se puede lograr mediante un sistema de cierre y apertura de un contactor temporizado en el punto de falla, y una resistencia de falla que controlará la magnitud de las corrientes.

Esta propuesta inicial está especialmente diseñada para el análisis de fallas monofásicas en el estator, sin embargo puede ser la base para el estudio de otras fallas internas, e inclusive externas, lo que puede dar paso a un mejor entendimiento del comportamiento del generador cuando se presenta condiciones anormales de funcionamiento.

El circuito a implementar se muestra en la figura 5.1. Las conexiones incluyen los CT para acondicionar las señales de corriente a niveles manejables por la interfaz del sistema de adquisición de datos. Se puede observar que el bobinado de una fase del generador está equipado con varios taps, de esta manera se puede generar la falla variando su porcentaje y su severidad. El circuito de control debe incluir los respectivos contactores:

- Un contactor para controlar el cierre y apertura de la falla con su respectivo circuito temporizado, para controlar la energía de la falla y proteger los devanados del estator del generador.
- Un contactor para cerrar el circuito entre el generador y la carga.
- Un contactor del circuito de campo.

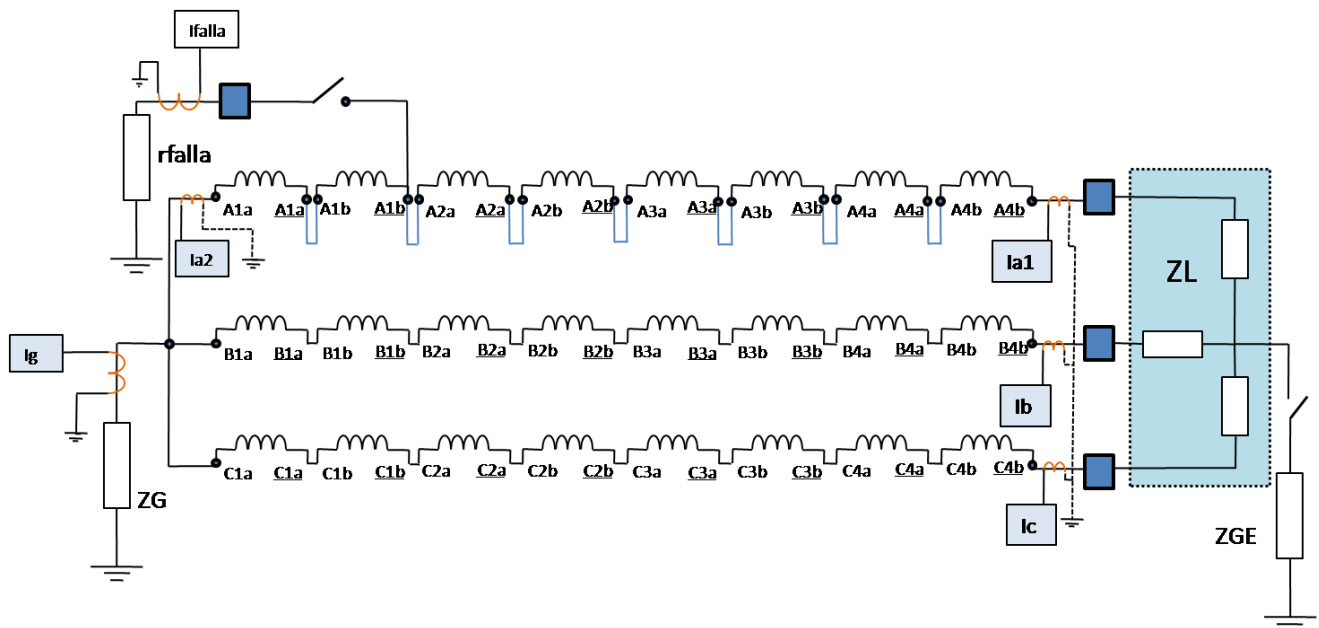


Figura 5.1: Conexiones para del generador para el estudio experimental

Como la corriente de falla puede sobrepasar varias veces la corriente nominal, se deben tomar todas las medidas de seguridad necesarias para garantizar el control del sistema, y la integridad del operador. Por lo tanto es recomendable guardar distancias entre la máquina que se expondrá a fallas en el estudio. Entonces se debe implementar un sistema de control mediante lógica cableada o un PLC teniendo en cuenta:

- Control del sistema motor
- Control de arranque y parada del generador
- Control de temporización de la falla

Los principales equipos a utilizar para el estudio son:

- Generador prototipo con modificación del devanado del estator
- Motor primario con un sistema de control para mantener la velocidad constante.
- 5 transformadores de corriente
- Sistema de adquisición de datos

- Elementos del circuito de control: Contactores, y relés de control o PLC, estos elementos serán utilizados para programar el tiempo de falla.
- Voltímetro
- Pinzas amperimétricas
- Termocuplas: Si se quiere observar el comportamiento térmico cuando se presentan este tipo de fallas.

5.3. Características de la máquina

La pieza fundamental para la realización de estas pruebas, es el bobinado del estator, el cual debe permitir implementar las fallas en los diferentes porcentajes, especialmente las fallas monofásicas cercanas al neutro. Estas son la base del presente proyecto y se quiere comparar el comportamiento simulado con el comportamiento real. El método empleado para representar los bobinados en presencia de fallas internas fue validado mediante la implementación de elementos finitos en [Peter P. Reichmeider and Salon, 2000b].

En la figura 5.2 se muestra la disposición física de los devanados del estator. Este generador prototipo fue implementado por General Electric para el estudio de protecciones eléctricas [Dale Fidney, 2002]. Se puede observar que los taps implementados son accesibles, con el objetivo de facilitar las conexiones respectivas en las diferentes localizaciones de la falla. Se puede construir el devanado con varias bobinas, dejando sus terminales mediante conectores externos, los cuales se dispondrán a las conexiones en serie, permitiendo de esta manera, distribuir el campo a través de todo el estator, y a la vez la conexión en determinada falla.

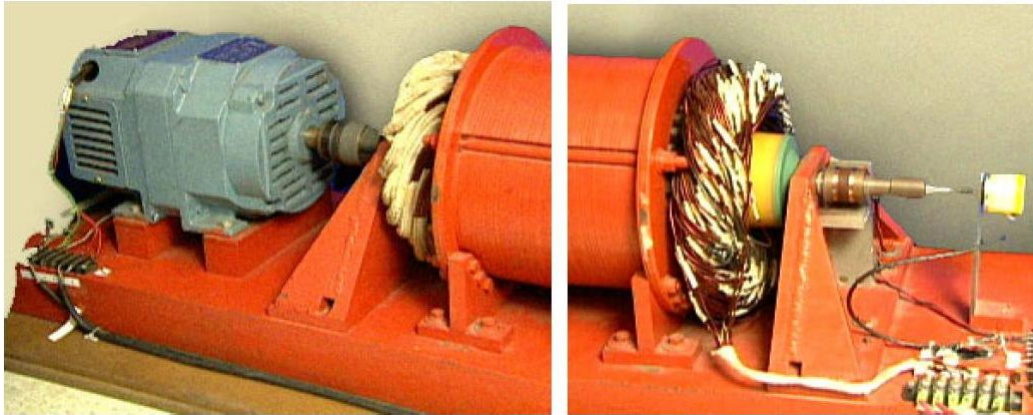


Figura 5.2: Motor DC acoplado al generador sincrónico: Montaje para pruebas de corto circuito en el estator [Dale Fidney, 2002]



Figura 5.3: Bobinado del estator construido para la emulación de fallas internas de corto circuito en un motor de inducción

Suponiendo que el generador tenga 24 ranuras en el estator, con un devanado entero a doble capa y 4 polos por fase. Para generar las fallas internas se dejan los terminales de cada bobina de la fase A para su respectiva conexión externa. La propuesta para el estator del generador prototipo se muestra en la figura 5.4. De esta forma se podrán simular fallas internas en las siguientes localizaciones: 12.5 %, 25 %, 37.5 %, 50 %, 62.5 %, 75 %, 87.5 %, 100 %.

Para un estudio más detallado en la cercanía al neutro, se puede pensar en obtener taps de la primera bobina, sin embargo hay que tener en cuenta que los conductores externos pueden alterar las condiciones y parámetros del generador debido a la dispersión de flujo en los conductores.

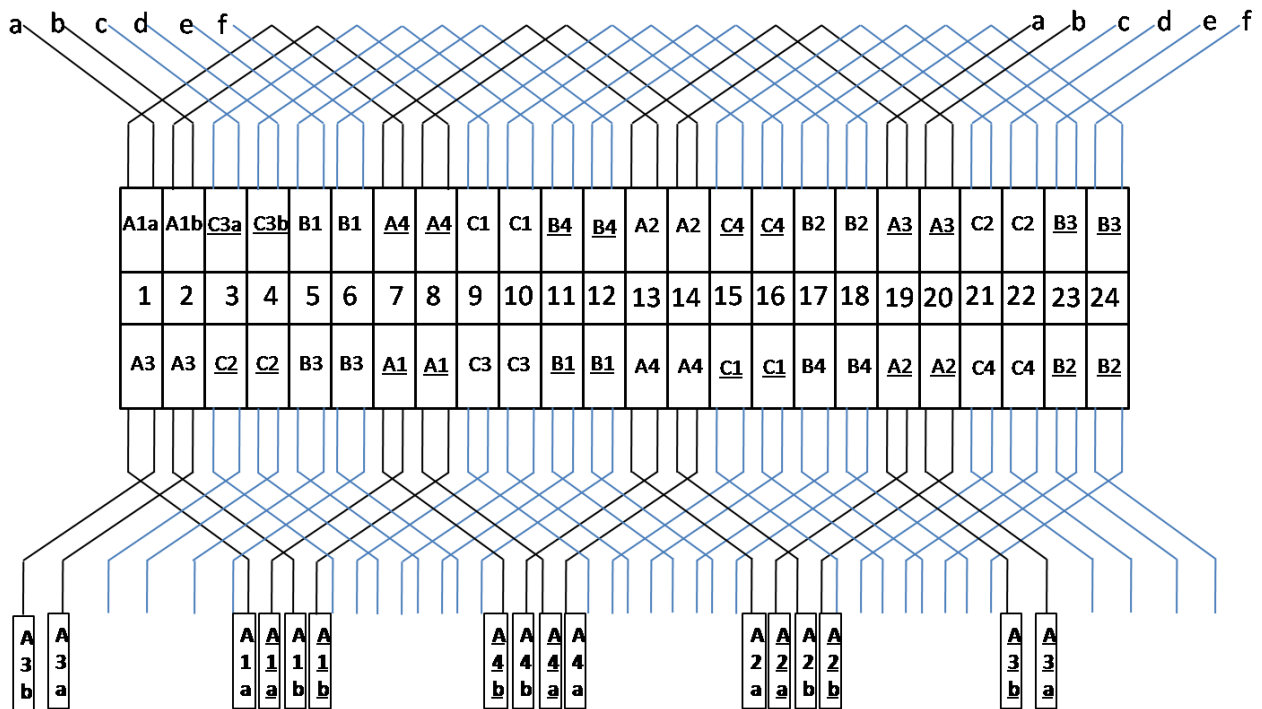


Figura 5.4: Estator de una máquina de 4 polos, 24 ranuras, devanado imbricado de 2 capas y de paso diametral.

La figura 5.1 muestra las conexiones suponiendo que el generador prototipo tiene las características del devanado de la figura 5.4.

5.4. Medidas

Las variables más relevantes y expuestas a cambios, cuando se produce una falla en una máquina rotatoria son: la corriente, las vibraciones, y la temperatura, por lo tanto se recomienda realizar pruebas para registrar el comportamiento de estas variables.

5.4.1. Análisis transitorio de las corrientes en los devanados

Mediante un sistema de adquisición de datos, registrar el comportamiento transitorio en cada uno de los devanados del estator, cuando se genera una falla monofásica dentro del generador. Los posibles puntos a revisar mediante las señales capturadas durante la falla son:

- Revisar el contenido del tercer armónico y su variación con la localización de la falla.
- Revisar la tendencia de las corrientes en los devanados con la variación de la localización de la falla.
- Analizar el comportamiento de las corrientes de los devanados en el estator, con diferentes resistencias de falla, y su variación con su localización.
- Analizar la influencia de la conexión de la carga: Carga sin neutro aterrizado, con neutro aterrizado mediante una impedancia, y carga con el neutro común al neutro del generador.

5.4.2. Análisis de vibraciones

Realizadas previamente las pruebas y con el registro de las corrientes de falla máximas, se recomienda hacer un análisis de vibraciones a una falla controlada, para registrar el comportamiento de las fuerzas mecánicas en el estator que pueden inducir a nuevas fallas por acercamiento entre conductores debido a vibraciones.

- Revisar las tendencias de las frecuencias de vibración, y si tienen alguna relación con la localización de la falla.

5.4.3. Análisis termo-gráfico

Hoy en día el análisis termográfico, es una gran herramienta en el mantenimiento preventivo de equipos eléctricos. Los incrementos de temperatura en las localizaciones de falla pueden arrojar datos importantes a las pruebas. Las inspecciones periódicas mediante este tipo de mantenimiento preventivo son muy utilizadas en la industria. Por lo tanto se recomienda hacer una análisis termo-gráfico, considerando una falla controlada mediante la resistencia de falla y la resistencia de la puesta a tierra del generador. Esto debido a que para analizar un comportamiento térmico se necesita un tiempo relativamente largo, y la energía a la cual se expone el bobinado en condiciones anormales es crítica en la integridad del aislamiento del bobinado.

Para registrar mejor el comportamiento térmico se puede adicionar termocuplas en los diferentes puntos de la máquina tabla 5.1 , las cuales serán leídas por medio del sistema de adquisición de datos.

Los generadores normalmente tienen un sistema de control de temperatura en los bobinados. Se emplean RTD (Resistance Temperature Detector) para detectar los sobre-calentamientos, esta información es procesada y el sistema de protecciones toma una decisión de sacar de línea la máquina según el tiempo de exposición y su incremento de temperatura, protegiendo de esta forma el aislamiento de los bobinados y evitando así fallas mayores o la pérdida total del equipo.

Número	Localización
1	Bobinado de la fase fallada (punto de falla)
2	Fases sin falla
1	Bobinado del rotor si existe
3	Núcleo del estator
1	Exterior o temperatura ambiente

Cuadro 5.1: Recomendación para la localización de las termocuplas

Capítulo 6

Conclusiones y futuros desarrollos

Las fallas internas monofásicas cercanas al neutro pueden generar otro tipo de fallas internas como las fallas bifásicas o entre espiras, debido al incremento de la corriente de cada fase, lo cual aumenta la potencia disipada en el interior del generador, conllevando a pérdidas de aislamiento por calentamiento en las zonas de falla. Aunque la corriente de falla no sea considerada crítica puede acelerar la disminución del tiempo de vida útil del generador.

Del modelo implementado se puede concluir que: presenta algunas limitaciones, debido a que algunas fallas presentan un tiempo de proceso muy largo para encontrar la solución, en especial cuando las fallas se localizan en menos del 7 % del bobinado, esto se debe a que en cada paso de integración debe hacerse una inversión matricial, lo que requiere bastante carga computacional. Sin embargo el modelo sirve para dar una estimación del comportamiento del generador ante fallas monofásicas cercanas al neutro y para dar inicio a estudios posteriores que apoyen el conocimiento acerca del comportamiento del generador en condiciones anormales.

Cuando se produce una falla monofásica cercana al neutro del generador, las corrientes en estado permanente en los devanados del estator no presentan variaciones con referencia a las corrientes permanentes en estado normal. Sin embargo el valor máximo de las corrientes en el transitorio si superan los valores nominales de la máquina. Por lo tanto el riesgo para la integridad del generador existe cuando por vibraciones mecánicas se producen contactos repentinos entre la espira que presenta daños en el aislamiento y el núcleo del estator, esto debido a los efectos transitorios producidos en cada contacto.

El estudio de estos fenómenos eléctricos en la máquina sincrónica mediante la implementación de modelos matemáticos da un acercamiento a la realidad del comportamiento e

implicaciones de la máquina, sin embargo este estudio teórico no considera efectos como distorsiones armónicas, efectos de temperaturas, vibraciones mecánicas, dispersiones del flujo en los conductores. Por lo tanto para complementar el trabajo realizado en esta tesis, se recomienda hacer un estudio experimental donde se registren las medidas necesarias para considerar estos efectos.

Las corrientes monofásicas en el interior del generador pueden alcanzar magnitudes que sobrepasan varias veces el valor nominal para el cual fue diseñada la máquina, dependiendo de la impedancia de puesta a tierra, la impedancia de la falla y su localización. Esto se verificó mediante las simulaciones hechas en este trabajo, por lo tanto en el momento de producir una falla para alguna prueba experimental, se deben tener en cuenta estos factores para controlar su magnitud, así como el tiempo de exposición del generador a las condiciones anormales. De esta manera se podría controlar la energía a la cual se expondrá el bobinado del generador.

Bibliografía

- O.P Malik A.I. Megahed. Synchronous generator internal fault computation and experimental verification. *IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib.*, 145:604–610, 1998.
- R Alcantara. 100 *Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University*, 2006.
- R. Alcantara and F. G. Garcia. 100 Master's thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2006.
- Ion Boldea. *The Electric Generator Handbook*. 1a edition, 2006. capítulo 5.
- Gilberto Carrillo. *SISTEMAS DE POTENCIA*. Universidad Industrial de Santander, 1987.
- Mark Adamiak Dale Fidney. Dynamic testing of generator protection using a model generator platform. *General Electric*, 56, 2002.
- M. Esparza and E. Ponce. Diagnóstico integral del devanado del estator de generadores eléctricos. *Comisión Federal de Electricidad*, pages 1–8, 2001.
- V.A Kinitsky. Calculation of internal fault currents in synchronous machines. *IEEE Trans.*, 84:381–389, 1965.
- Prabha Kundur. *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1st. edition, 1994.
- W. A. Lewis. A basic analysis of synchronous machine-part i. *AIEE Trans.*, 77:436–456, December 1958.
- Jalal Nazarzadeh Mehdi Rahnama. Synchronous machine modeling and analysis for internal faults detection. *IEEE*.
- Charles J. Mocina. Mejoramiento de la protección de generadores usando tecnología digital. pages 3–4, 1995.

- G. C. Parr. Generator stator phase fault protection. *IEEE*, catalog number 95 TP 102, 1995.
- Charles A. Gross Damir Novosel Peter P. Reichmeider, Dale Querrey and Sheppard Salon. Internal faults in synchronous machines part i: The machine model. *IEEE Trans. Energy conversion*, 15:376–379, 2000a.
- Charles A. Gross Damir Novosel Peter P. Reichmeider, Dale Querrey and Sheppard Salon. Internal faults in synchronous machines part ii: Model performance. *IEEE Trans. Energy conversion*, 15:380–383, 2000b.
- IEEE for AC generator protection*. Power System Relaying committee of the IEEE Power Engineering Society, 1987.
- Peter P. Reichmeider. Partitioning of synchronous machine winding for internal fault analysis. *IEEE Trans. Energy conversion*, 15:372–375, 2000.
- Donald Reimert. *Protective Relaying For Power Generator Systems*. Taylor & Francis Group, 1a edition, 2006. capítulo 5.
- Xiaoping Tu. A new of synchronous machine internal faults based on winding distribution. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 53:1818–1827, 2006.
- Xiaoping Tu. Modeling and real-time simulation of internal faults in synchronous generator with parallel-connected winding. 54:1400–1409, 2007.
- LUIGI VANFRETTI. Modelación y simulación de la máquina y su operación en sistemas de potencia. *Universidad de San Carlos Guatemala*, 2005.
- Damian S. Vilchis-Rodriguez and Enrique Acha. A synchronous generator internal fault model based on the voltage-behind reactance representation. *IEEE Trans. Energy conversion IEEE*, 2008.

Apéndice A

Circuitos acoplados magnéticamente

De acuerdo a la ley de Faraday el voltaje inducido en una bobina es:

$$e_1 = \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{A.1})$$

Donde ψ es el valor del flujo instantáneo y puede ser expresado como

$$\psi = Li \quad (\text{A.2})$$

Ver figura A.1.

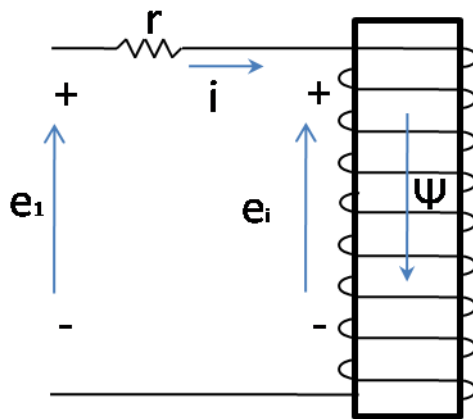


Figura A.1: Circuito magnético

Cuando se presentan dos bobinas acopladas magnéticamente A.2 los voltajes en sus terminales se pueden expresar como:

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1 \quad (\text{A.3})$$

$$e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 \quad (\text{A.4})$$

El campo magnético está determinado por las corrientes que pasan por los dos bobinados. Por lo tanto ψ_1 y ψ_2 son los flujos ligados en el respectivo bobinado, producido por el efecto total de las dos corrientes.

$$\psi_1 = N_1(\phi_{m1} + \phi_{l1}) + N_1(\phi_{m2}) \quad (\text{A.5})$$

$$\psi_2 = N_2(\phi_{m2} + \phi_{l2}) + N_2(\phi_{m1}) \quad (\text{A.6})$$

Los flujos se muestran en la figura A.2.

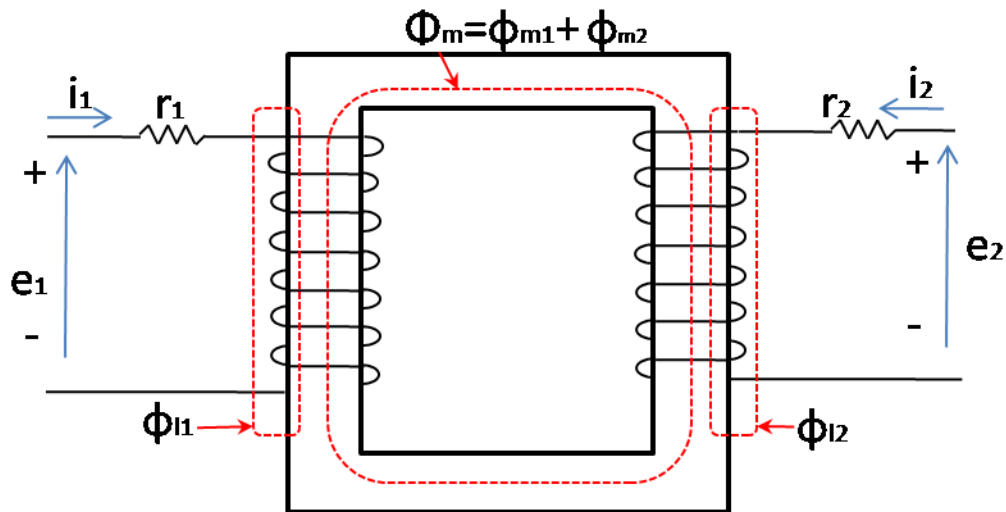


Figura A.2: Circuito acoplado magnéticamente

El flujo se puede expresar en términos de inductancias propias y mutuas:

$$L_{11} = \frac{N_1(\phi_{m1} + \phi_{l1})}{i_1} \quad (\text{A.7})$$

$$L_{22} = \frac{N_2(\phi_{m2} + \phi_{l2})}{i_2} = L_{m1} + L_{l1} \quad (\text{A.8})$$

$$L_{12} = \frac{N_1(\phi_{m2})}{i_2} \quad (\text{A.9})$$

$$L_{21} = \frac{N_2(\phi_{m1})}{i_1} \quad (\text{A.10})$$

Por lo tanto el flujo ligado en cada bobina se puede expresar de la siguiente manera:

$$\psi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad (\text{A.11})$$

$$\psi_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \quad (\text{A.12})$$

Entonces un generador sincrónico puede verse como un circuito de 6 bobinas acopladas magnéticamente. Donde interactúan los flujos producidos por las corrientes del estator, la corriente del rotor y la corriente de los devanados amortiguadores. De esta forma se pueden deducir las ecuaciones presentadas en la sección B.2.

Apéndice B

Descripción matemática de la máquina sincrónica

B.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático que describe el comportamiento de la máquina sincrónica, el cual es usado ampliamente en estudios de sistemas de potencia. También se presentan las limitaciones de este modelo en el estudio de fallas de cortocircuito en el devanado del estator y la necesidad de desarrollar las ecuaciones en el dominio de fases.

B.2. Representación de la máquina sincrónica en el dominio de fases

Los devanados de las máquinas eléctricas, son en esencia circuitos acoplados magnéticamente, esto significa que existen factores de autoinducción y de inducción mutua; estos coeficientes determinarán las intensidades que circulan por los bobinados [VANFRETTI [2005]]. La máquina sincrónica se puede representar, mediante 6 bobinas acopladas magnéticamente [Boldea [2006]]. En la figura [B.2] se muestra los circuitos que representan la ubicación espacial de los devanados de la máquina. El estator el cual comprende tres inductancias y cada una representa el devanado de cada fase, donde se inducen las tensiones de salida de la máquina. El rotor se representa mediante los devanados de amortiguamiento y

el devanado de campo. Los devanados de amortiguamiento están ubicados ortogonalmente entre sí, en sus respectivos ejes magnéticos (eje directo d y eje de cuadratura q). El devanado de campo está alineado con el eje d .

θ se define como el ángulo entre el eje d y el eje de la fase A .

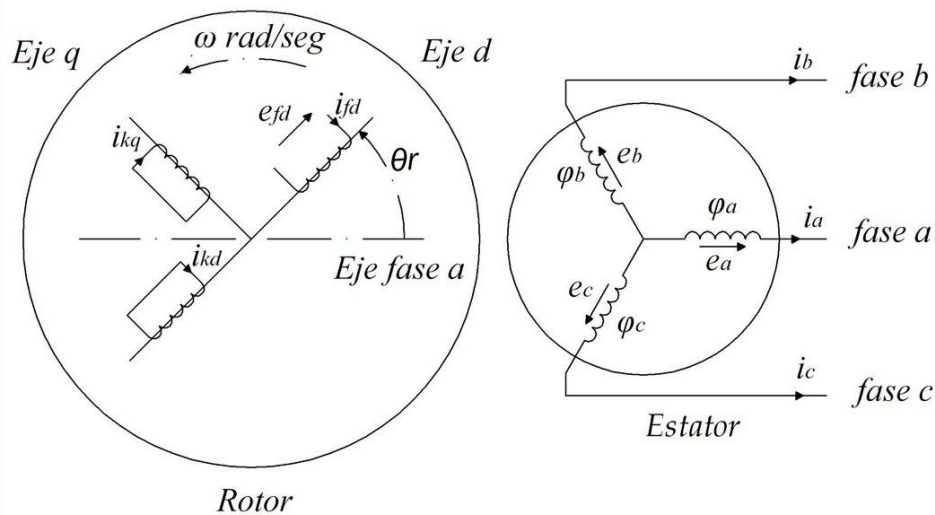


Figura B.1: Circuitos del rotor y el estator de la máquina síncrona

Al variar la posición del rotor, cada una de las inductancias propias y mutuas cambian de magnitud, por lo que se incrementa la complejidad del sistema de ecuaciones característico de la máquina síncrona. Las variaciones de las inductancias son causadas por la variación de la permeancia del flujo magnético resultante. La permeancia depende en gran parte de la longitud del entrehierro, y esta no es uniforme en todos los puntos debido a que el rotor no es totalmente liso. El caso más notorio es una máquina con rotor de polos salientes, el eje directo presenta la menor longitud del entrehierro, mientras que el eje de cuadratura presenta la mayor longitud y por tanto la menor permeancia. Las ecuaciones (B.1) y (B.4) representan la operación de la máquina en la fase A .

El sistema de ecuaciones que representa el funcionamiento eléctrico del generador síncrono se puede obtener mediante el análisis de los circuitos acoplados magnéticamente, identificados en la figura (B.2). La teoría relacionada con los circuitos acoplados magnéticamente se presenta en el apéndice A.

Teniendo en cuenta los efectos mutuos de las corrientes en los bobinados se pueden obtener las siguientes ecuaciones Kundur [1994]:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - Ri_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a \quad (\text{B.1})$$

$$e_b = \frac{d\psi_b}{dt} - Ri_b = \frac{d\psi_b}{dt} - R_b i_b \quad (\text{B.2})$$

$$e_c = \frac{d\psi_c}{dt} - Ri_c = \frac{d\psi_c}{dt} - R_c i_c \quad (\text{B.3})$$

Donde el flujo en cada fase del estator es el resultado de los flujos ligados en cada bobinado y que son generados por cada una de las corrientes presentes: corrientes del estator y corrientes del rotor.

$$\psi_a = -L_{aa}i_a - L_{ab}i_b - L_{ac}i_c + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd} + L_{akq}i_{kq} \quad (\text{B.4})$$

$$\psi_b = -L_{ba}i_a - L_{bb}i_b - L_{cb}i_c + L_{bfd}i_{fd} + L_{bkd}i_{kd} + L_{bkq}i_{kq} \quad (\text{B.5})$$

$$\psi_c = -L_{ca}i_a - L_{cb}i_b - L_{cc}i_c + L_{cfd}i_{fd} + L_{ckd}i_{kd} + L_{ckq}i_{kq} \quad (\text{B.6})$$

donde:

i_a , i_b e i_c son corrientes de cada fase.

i_{kd} , i_{kq} e i_{fd} corrientes rotóricas.

L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} inductancias propias de cada fase.

L_{ab} , L_{ba} , L_{ac} , L_{ca} , L_{bc} , L_{cb} inductancias mutuas de los bobinados del estator.

L_{afd} , L_{bfd} , L_{cfd} inductancias mutuas entre el bobinado del estator y el bobinado de campo.

L_{akd} , L_{akq} , L_{bkd} , L_{bkq} , L_{ckd} , L_{ckq} inductancias mutuas entre el bobinado de cada fase y los bobinados de amortiguamiento.

Es necesario aclarar que para el desarrollo de las ecuaciones se asumieron las corrientes del estator saliendo de sus respectivos devanados en cada fase, y entrando para los circuitos del rotor, como se muestra en la figura(B.1) .

La representación matricial de la máquina sincrónica en el dominio de las fases abc se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

$$\psi_s = L_{ss}I_s + L_{sr}I_r \quad (\text{B.8})$$

$$\psi_r = L_{sr}^T I_s + L_r I_r \quad (\text{B.9})$$

La matriz de resistencias en estator se expresa como:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

La matriz de resistencias del rotor:

$$[R_r] = \begin{bmatrix} r_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

Para las direcciones de las corrientes y la convención de signos para la tensión establecidos en la figura B.1 para el estator y el rotor, se define la matriz de inductancias en el estator como:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} -(L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2\theta_r) & L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \\ L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -(L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3})) & L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r - \pi) \\ L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ab0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r - \pi) & -(L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3})) \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

La relación entre los flujos del estator y el rotor están presentes por inducción electromagnética, y se pueden expresar matricialmente así:

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{afd}\cos\theta & L_{akd}\cos\theta & -L_{akq}\sin\theta_r \\ L_{afd}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{akd}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -L_{akq}\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{afd}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{akd}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -L_{akq}\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{B.13})$$

La matriz de las inductancias propias en el rotor, considerando un circuito amortiguador se define como:

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ffd} & L_{afd} & 0 \\ L_{afd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.14})$$

Los símbolos de los parámetros por fase son los siguientes:

r_s resistencia del devanado del estator.

r_{fd} resistencia del devanado de campo.

r_{kd} resistencia del devanado de amortiguamiento en el eje d .

r_{kq} resistencia del devanado de amortiguamiento en el eje q .

L_{ls} inductancia de dispersión del devanado del estator.

L_{lkd} inductancia de dispersión del devanado de amortiguamiento en el eje d .

L_{lkq} inductancia de dispersión del devanado de amortiguamiento en el eje q .

L_{afd} , L_{akd} , L_{kq} inductancias mutuas entre los devanados del estator y rotor.

L_{ffd} , L_{kkd} , L_{kkq} autoinductancia de los devanados de campo y amortiguamiento en el rotor.

En una forma compacta la relación de voltajes y corrientes se puede representar por la siguiente ecuación:

$$[V]_{6 \times 1} = \frac{d[\Lambda]_{6 \times 1}}{dt} + [R]_{6 \times 6} [I]_{6 \times 1} \quad (\text{B.15})$$

donde :

$$\Lambda = [L]_{6 \times 6} [I]_{6 \times 1} \quad (\text{B.16})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ \frac{2}{3}L_{sr}^T & L_r \end{bmatrix}, \quad [R] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.17})$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}, \quad [V] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_{fd} \\ v_{kd} \\ v_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.18})$$

Las ecuaciones B.15 y B.16 se deben resolver mediante un adecuado método numérico de integración, evitándose inestabilidades en la solución de las corrientes de los bobinados. Si se usa el método de integración trapezoidal como método de solución, el vector de corrientes se puede expresar como:

$$[I(t)]_{6 \times 1} = [G]_{6 \times 6} [I(t - \Delta t)]_{6 \times 6} - [H]_{6 \times 6} [V^*]_{6 \times 1} \quad (\text{B.19})$$

Las matrices G y H están definidas de la siguiente forma:

$$[G] = \left[I - \frac{\Delta t}{2} [A] \right]^{-1} \left[I + \frac{\Delta t}{2} [A] \right] \quad [H] = \left[I - \frac{\Delta t}{2} [A] \right]^{-1} [B] \Delta t$$

I es la matriz identidad, A y B son expresiones derivadas de la ecuación B.15, como se muestra en el apéndice D y se expresan como:

$$[A] = -[B] \left[R + \frac{d[L]}{dt} \right] \quad [B] = [L]^{-1}$$

Como es evidente en las ecuaciones B.12 y B.13 (L_{ss} y L_{sr}) los elementos de las autoinductancias de cada fase y las inductancias mutuas con las otras fases, como también las inductancias entre el estator y el rotor son función del ángulo θ_r el cual varía con el tiempo y la proporción de la velocidad rotórica. Estos coeficientes dependientes del tiempo presentan una dificultad computacional en el momento de resolver el sistema de ecuaciones directamente en el dominio de las fases. Para obtener las corrientes de la máquina sincrónica utilizando algún método numérico como ODE45 presente en el software MATLAB o el método del trapecio presentado en el apéndice, es necesario evaluar las inductancias en cada paso de tiempo, además es necesario evaluar la inversa de la matriz de inductancias. El cálculo de la matriz inversa en cada paso de tiempo representa un carga computacional muy pesada y podría producir problemas de estabilidad numérica.

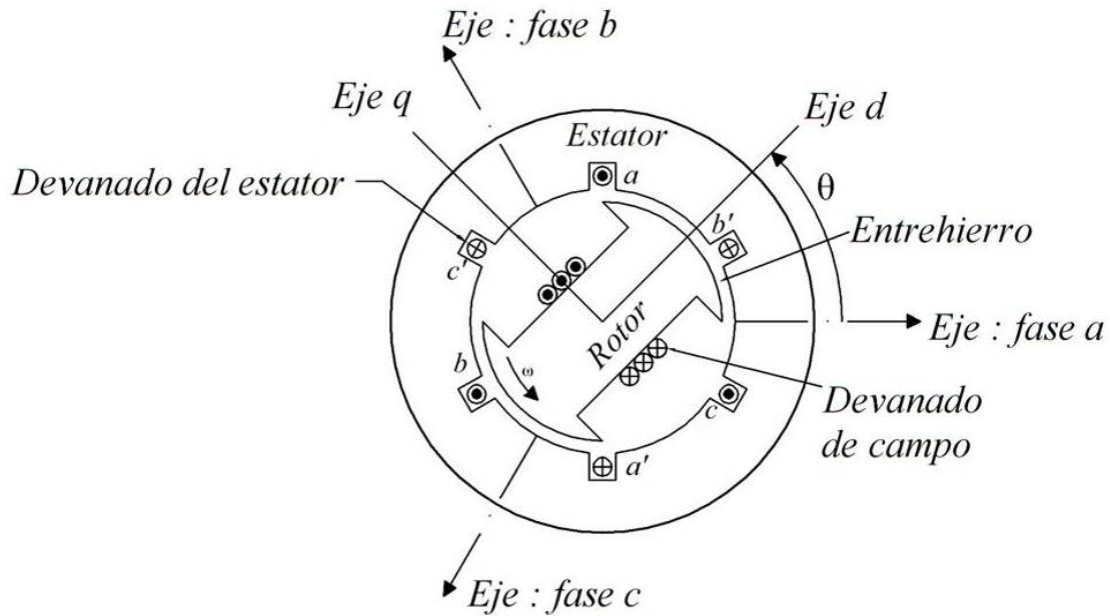


Figura B.2: Representación de las bobinas de la máquina síncrona y su respectiva posición de los ejes magnéticos

Este inconveniente es superado representando los bobinados de la máquina, por medio de devanados ficticios ubicados en dos ejes perpendiculares [Kundur [1994]]. Los bobinados de las fases abc se representan por los devanados d y q (ubicados en el eje directo y eje de cuadratura respectivamente). El eje d tiene la dirección del eje magnético del bobinado de campo. Los devanados de campo y los de amortiguamiento se ubican en el eje d y q sin ninguna transformación figura (B.2).

B.3 Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$ 68

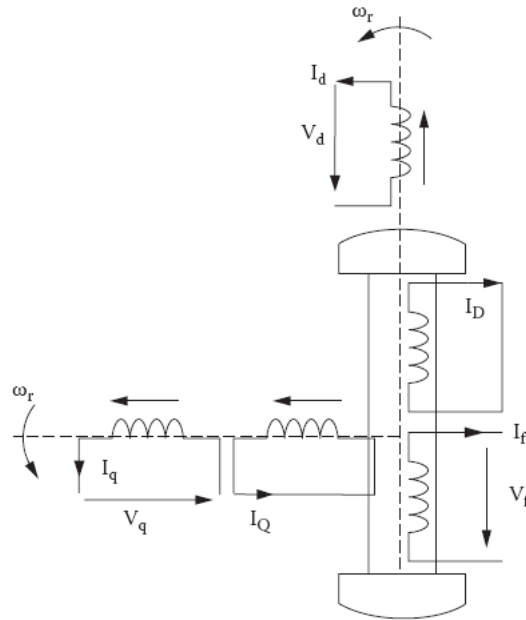


Figura B.3: Modelo d-q del generador sincrónico

B.3. Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$

Mediante el modelo $dq0$ se puede obtener una matriz de inductancias independiente del tiempo, por lo tanto si las ecuaciones de la máquina se resuelven en el dominio de $dq0$, no será necesario invertir la matriz en cada paso de tiempo del algoritmo. Esto es la mayor ventaja de la transformada Park, así que la mayoría de los modelos de la máquina sincrónica están basados en este concepto.

En base a la teoría de la reacción de los dos ejes ortogonales q y d , la transformación de $dq0$ consiste en obtener expresiones que sean matemáticamente más fáciles de operar, evitando la dependencia del tiempo en las matrices de las inductancias propias y mutuas y por lo tanto la inversión de estas en cada paso de tiempo, para la obtención del vector solución de corrientes en la máquina. Para lograr esto se toma como base la matriz de transformación de Park que se define de la siguiente forma Kundur [1994] ¹:

¹Estas ecuaciones son denominadas componentes de Park en honor a R.H. Park, quien desarrolló los conceptos en los que están basadas estas ecuaciones. Existe otro tipo de ecuaciones propuesto por W.A.

B.3 Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$ 69

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Y su inversa se define como:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.20})$$

El modelo de la MS (Máquina sincrónica) está compuesto por dos circuitos, cada circuito representa un eje de la máquina, eje directo (d) y eje de cuadratura (q). El eje directo está alineado con el centro de los polos del rotor, el eje de cuadratura entre los dos polos, en la parte de menor flujo de campo.

Utilizando la transformada se obtiene la relación de inductancias en el dominio de fases y la inductancia en los ejes $dq0$:

$$L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3L_{aa2}}{2}$$

$$L_q = L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3L_{aa2}}{2}$$

$$L_d = L_{aa0} - 2L_{ab0}$$

$$L_d = Ll + L_{ad}$$

$$L_q = Ll + L_{aq}$$

Con el sistema en p.u utilizado en [Kundur [1994]] y descrito en el apéndice C se tiene:

Lewis en [Lewis, 1958] donde se sugieren los factores $k_q = k_d = \sqrt{\frac{2}{3}}$, diferentes a los empleados por las componentes de Park $k_q = k_d = \frac{2}{3}$.

B.3 Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$ 70

$$L_{afd} = L_{fda} = L_{akd} = L_{kda} = L_{ad}$$

$$L_{akq} = L_{kqa} = L_{aq}$$

$$L_{fkd} = L_{kdf}$$

Las ecuaciones (B.21) a (B.26) representan las tensiones inducidas en el estator de la máquina sincrónica²

$$e_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q\omega_r - r_s i_d \quad (\text{B.21})$$

$$e_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d\omega_r - r_s i_q \quad (\text{B.22})$$

$$e_0 = \frac{d\psi_0}{dt} - r_s i_0 \quad (\text{B.23})$$

$$e_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + r_{fd} i_{fd} \quad (\text{B.24})$$

$$0 = \frac{d\psi_{kkd}}{dt} + r_{kd} i_{kd} \quad (\text{B.25})$$

$$0 = \frac{d\psi_{kkq}}{dt} + r_{kq} i_{kq} \quad (\text{B.26})$$

Donde:

ψ_d es el flujo en el devanado del eje directo.

ψ_q es el flujo en el devanado del eje de cuadratura.

ψ_{fd} es el flujo en el devanado de campo.

ψ_{kd} es el flujo en el devanado amortiguador en el eje d .

²Las ecuaciones (B.21) hasta la ecuación (B.32) representan la máquina sincrónica en el dominio $dq0$ y están dadas en por unidad. En el apéndice C se resumen la bases de cada variable.

B.3 Representación circuital de la máquina síncrona en componentes $dq0$ 71

ψ_{kq} es el flujo en el devanado amortiguador en el eje q .

Las ecuaciones (B.21), hasta (B.26) están definidas en función de los flujos ligados, los cuales se representan mediante las corrientes en los devanados de la máquina y los parámetros inductivos. Aplicando la transformación de Park a las ecuaciones B.4, B.5 y B.6, se obtiene:

$$\psi_d = -(Ll + L_{ad})i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{kd} \quad (\text{B.27})$$

$$\psi_q = -(Ll + L_{aq})i_q + L_{aq}i_{kq} \quad (\text{B.28})$$

$$\psi_0 = -L_{ls}i_0 \quad (\text{B.29})$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{ad}i_d \quad (\text{B.30})$$

$$\varphi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{ad}i_d \quad (\text{B.31})$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} - L_{aq}i_q \quad (\text{B.32})$$

El modelo de máquina síncrona descrito mediante el sistema de ecuaciones en el dominio de $dq0$ se puede representar mediante un equivalente circuital, que puede proporcionar una mejor descripción visual del comportamiento de la máquina. En las figuras B.4 y B.5 se muestran los circuitos equivalentes de la máquina síncrona en el eje d y q respectivamente.

B.3 Representación circuital de la máquina sincrónica en componentes $dq0$ 72

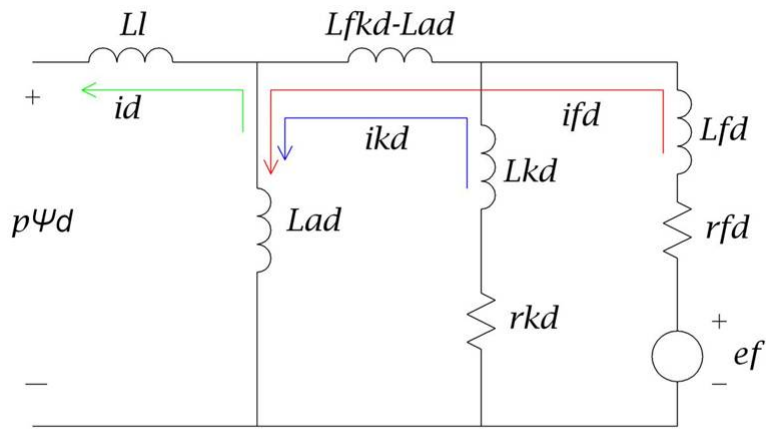


Figura B.4: Circuito equivalente para el eje d

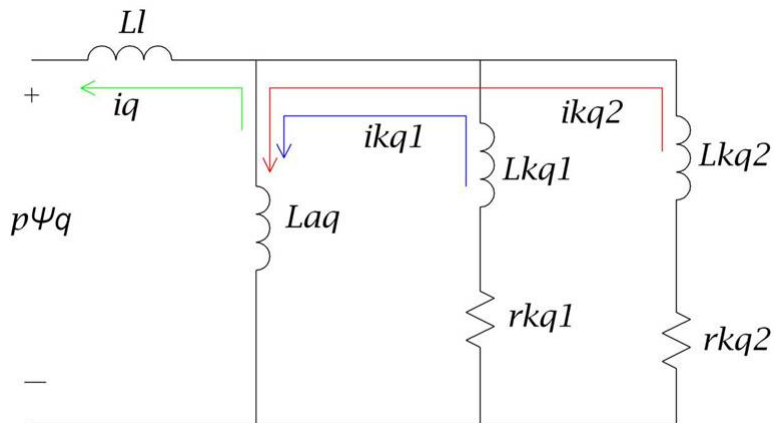


Figura B.5: Circuito equivalente para el eje q

El modelo $dq0$ se puede utilizar para fallas externas debido a que estas no afectan la dirección de los ejes magnéticos de las fases de los bobinados. Sin embargo cuando se simulan fallas internas de cortocircuito en el devanado del estator fase-tierra se afecta la dirección de los ejes magnéticos de la fase donde se presenta la falla, además se produce una partición del devanado afectado, lo que altera la simetría del sistema a simular. Así que en presencia de fallas internas, la máquina no puede modelarse mediante un circuito de 6 bobinas acopladas magnéticamente.

B.4. Verificación de la analogía entre los modelos dq0 y en dominio de fase

Como paso inicial para el desarrollo del modelo ante fallas de cortocircuito fase a neutro en el devanado del estator se implementó el modelo en el dominio de fases y se comparó con las corrientes arrojadas por el modelo $dq0$. Los datos de la máquina utilizada para la verificación fueron tomados de Kundur [1994].

Un generador con una potencia nominal de $555MVA$ de dos polos, y un factor de potencia de $0,9$, el cual trabaja a una frecuencia nominal $60Hz$, y una tensión nominal de $24kV$. Los parámetros de la máquina se presentan en la tabla B.1.

Nombre	valor en p.u
Lad	1,66
Laq	1,61
Lls	0,15
Lffd	1,825
Llfd	0,165
rfd	0,0006
Lkd	0,1713
rkd	0,0284
Lkq	0.125

Cuadro B.1: Parámetros de la máquina

Para comparar los dos modelos y verificar las ecuaciones en el dominio de fases que serán utilizadas como base en el estudio de fallas de cortocircuito, se simuló una falla trifásica externa con condiciones de carga nominal. La falla se presenta en 0.1 segundos. Se puede observar que las curvas son iguales figura B.6, por lo tanto el modelo en el dominio de fases se comprobó para proceder a implementarlo en el modelo de fallas internas.

B.4 Verificación de la analogía entre los modelos dq0 y en dominio de fase 74

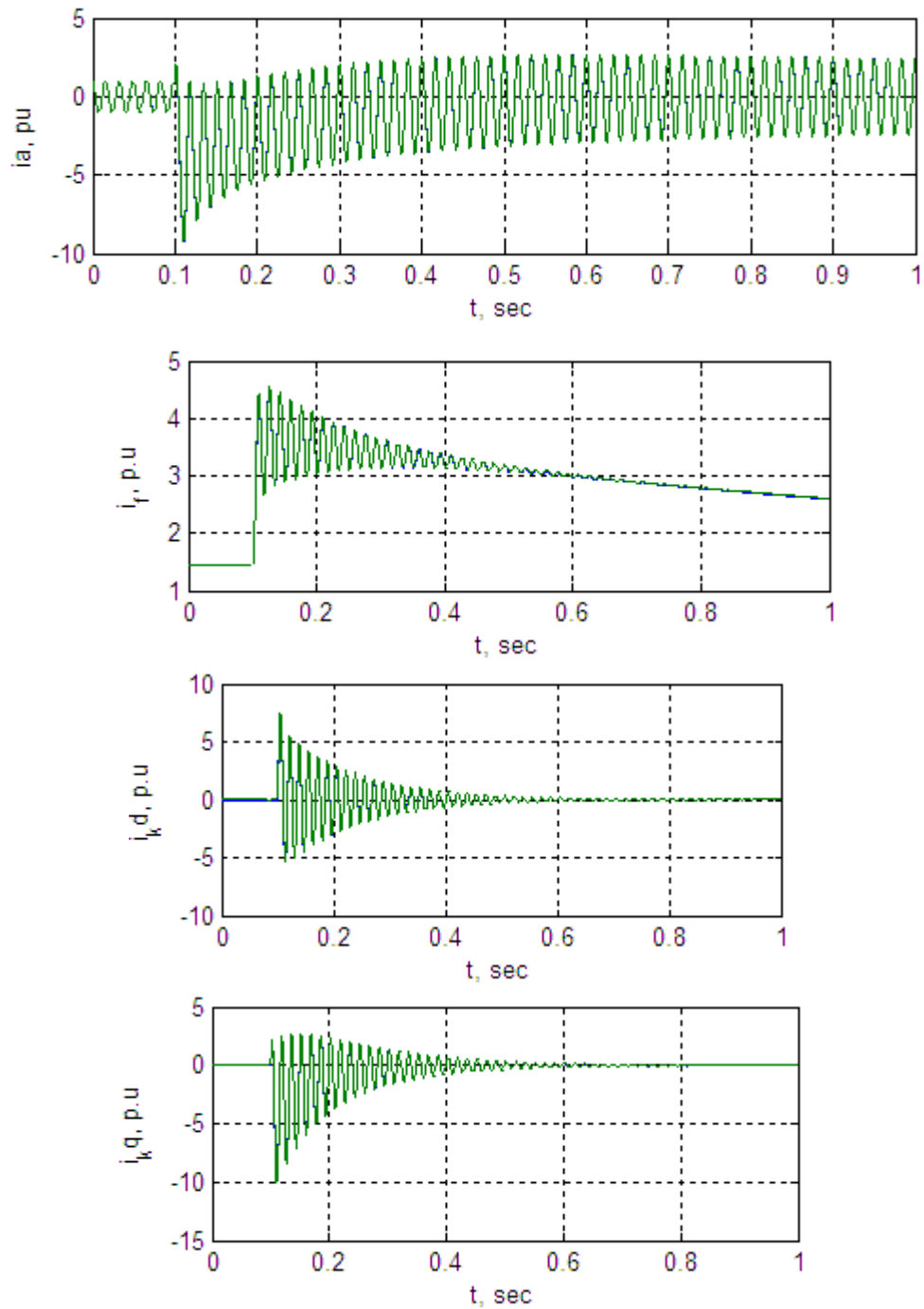


Figura B.6: Comparación de los modelos dq0 y abc cuando ocurre una falla trifásica (curva verde modelo dq0, curva azul modelo abc)

Apéndice C

Representación en por unidad

C.1. Bases utilizadas en el estator

$3\Psi VA_{base}$ = Potencia aparente de la máquina en volts-ampéres.

e_{sbase} = Valor de tensión fase-neutro de la máquina.

f_{base} = Frecuencia eléctrica del sistema, Hz.

$$i_{base} = \frac{3\Psi VA_{base}}{(3/2)e_{sbase}}, A$$

$$Z_{sbase} = \frac{e_{sbase}}{i_{sbase}}, \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base}, rad. elec/s$$

$$\omega_{mbase} = \omega_{base} \frac{2}{p_f}, rad. mec/s$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{\omega_{base}}, H$$

$$\psi_{sbase} = L_{sbase} i_{sbase}, Wb-vuelta$$

C.2. Bases utilizadas en el rotor

$$i_{fdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{fd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kqbase} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}} i_{sbase}, A$$

$$e_{fdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{fdbase}}, V$$

$$Z_{fdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{fdbase}^2}, \Omega$$

$$Z_{kdbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{kdbase}^2}, \Omega$$

$$Z_{kqbase} = \frac{3\Psi VA_{base}}{i_{kqbase}^2}, \Omega$$

$$L_{kdbase} = \frac{Z_{kdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$t_{base} = \frac{1}{\omega_{base}}, s$$

$$L_{fdbase} = \frac{Z_{fdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$L_{kqbase} = \frac{Z_{kqbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$T_{base} = \frac{3\Psi VA_{base}}{\omega_{mbase}}, N-m$$

Apéndice D

Solución del sistema de ecuaciones por el método del trapecio

Las ecuaciones B.15 y B.16 describen el comportamiento de la máquina sincrónica. Se puede resolver el sistema aplicando la regla trapezoidal:

Se tienen la ecuación principal

$$[V]_{6 \times 1} = \frac{d[\Lambda]_{6 \times 1}}{dt} + [R]_{6 \times 6} [I]_{6 \times 1} \quad (D.1)$$

reemplazando B.16 en B.15 y resolviendo se obtiene:

$$[V] - [R] [I] = \left[L \frac{d[I]}{dt} \right] + \left[\left[\frac{d[L]}{dt} \right] [I] \right] \quad (D.2)$$

$$\left[[L] \frac{d[I]}{dt} \right] = [V] - \left[\left[[R] + \frac{d[L]}{dt} \right] [I] \right] \quad (D.3)$$

Ecuación a despejar por medio de la regla trapezoidal

$$\left[\frac{d[I]}{dt} \right] = [L]^{-1} [V] - [L]^{-1} \left[\left[[R] + \frac{d[L]}{dt} \right] [I] \right] \quad (D.4)$$

$$[A] = - \left[B \left[[R] + \frac{d[L]}{dt} \right] \right] \quad [B] = [L]$$

$$\frac{d[I]}{dt} = [A] [I] + [B] [V] \quad (D.5)$$

Usando Δt como el paso de integración, el vector $[I]$ se puede expresar como:

$$[I(t)] = [I(t - \Delta t)] + \int_{(t-\Delta t)}^t \frac{d[I(t)]}{dt} dt \quad (D.6)$$

Aplicando la regla de integración trapezoidal en la ecuación D.6, se tiene el siguiente resultado:

$$[I(t)] = [I(t - \Delta t)] + \left[\frac{[A] [I(t)] + [B] [V] + [A] [I(t - \Delta t)] + [B] [V(t - \Delta t)]}{2} \right] \Delta t \quad (D.7)$$

Por lo tanto $[I]$ se puede expresar como:

$$[I(t)]_{6 \times 1} = [G]_{6 \times 6} [I(t - \Delta t)]_{6 \times 6} - [H]_{6 \times 6} [V^*]_{6 \times 1} \quad (D.8)$$

donde las matrices G, H, V están definidas de la siguiente forma:

$$[G] = \left[I - \frac{\Delta t}{2} [A] \right]^{-1} \left[I + \frac{\Delta t}{2} [A] \right] \quad [H] = \left[I - \frac{\Delta t}{2} [A] \right]^{-1} [B] \Delta t$$

$$[V]^* = \frac{[[V(t)] + [V(t - \Delta t)]]}{2}$$

Apéndice E

Arreglo matricial de inductancias y resistencias para modelar la falla monofásica dentro del estator

Las matrices de inductancias y resistencias de la línea que une el generador con la barra infinita cuando ocurre una falla monofásica interna se expresan como:

$$R_E = \begin{bmatrix} r_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad L_E = \begin{bmatrix} l_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Arreglo matricial para la puesta a tierra del generador

$$R_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_g & r_g & r_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_g & r_g & r_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_g & r_g & r_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad L_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_g & l_g & l_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_g & l_g & l_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_g & l_g & l_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Resistencias de los bobinados presentes en el generador

$$R_a = \begin{bmatrix} -r_s(1 - \%falla) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_s(\%falla) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix}$$

Arreglo matricial resistencia de falla

$$R_{fa} = \begin{bmatrix} r_{falla} & -r_{falla} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_{falla} & r_{falla} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Los elementos de las matriz de inductancias características del estator y el rotor de la máquina, se pueden expresar como sigue:

$$L_{ss11} = -N_1^2(L_{G0} + L_{aa2}\cos(2\theta - 2\varphi_1))$$

$$L_{ss22} = -N_2^2(L_{G0} + L_{aa2}\cos(2\theta - 2\varphi_2))$$

$$L_{ss33} = -(L_{G0} + L_{aa2}\cos2(\theta - \frac{2\pi}{3}))$$

$$L_{ss44} = -(L_{G0} + L_{aa2}\cos2(\theta + \frac{2\pi}{3}))$$

$$L_{ss12} = L_{ss21} = -N_1N_2(L_{G0}\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + L_{aa2}\cos(2\theta - \varphi_1 - \varphi_2))$$

$$L_{ss13} = L_{ss31} = N_1(L_{G0}\cos(\varphi_1 + \frac{\pi}{3}) + L_{aa2}\cos(2\theta - \varphi_1 + \frac{\pi}{3}))$$

$$L_{ss14} = L_{ss41} = N_1(L_{G0}\cos(\varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) + L_{aa2}\cos(2\theta - \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}))$$

$$L_{ss23} = L_{ss32} = N_2(L_{G0}\cos(\varphi_2 - \frac{\pi}{3}) + L_{aa2}\cos(2\theta - \varphi_2 - \frac{\pi}{3}))$$

$$L_{ss42} = L_{ss24} = (\frac{L_{G0}}{2} + L_{aa2}\cos(2\theta - \pi))$$

$$L_{ss34} = L_{ss43} = (\frac{L_{G0}}{2} + L_{aa2}\cos(2\theta - \pi))$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} N_1L_{afd}\cos(\theta - \varphi_1) & N_1L_{afd}\cos(\theta - \varphi_1) & -N_1L_{afd}\sin(\theta - \varphi_1) \\ N_2L_{afd}\cos(\theta - \varphi_2) & N_2L_{afd}\cos(\theta - \varphi_2) & -N_2L_{afd}\sin(\theta - \varphi_2) \\ L_{afd}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_{afd}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -L_{afd}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{afd}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_{afd}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -L_{afd}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ffd} & L_{afd} & 0 \\ L_{afd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix} \quad (E.1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ \frac{2}{3}L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix}$$

Apéndice F

Manual del usuario

F.1. Introducción

La obtención de resultados de las fallas analizadas, se hizo mediante un modelo implementado en MATLAB, el cual cuenta con una interfaz gráfica para una mejor comunicación con el usuario. Por lo tanto se dará a conocer el modo de uso y sus principales áreas de datos y requerimientos.

F.2. Inicio

Para ejecutar la interfaz como primera medida se debe guardar la carpeta ARCHIVOS DEL PROGRAMA. En ella se encuentra el archivo presentación1.m. Abriendo este por medio de MATLAB 7.0 y ejecutandolo mediante la tecla F5, se da inicio a la interfáz.

Para ejecutar la interfaz es necesario contar con el software MATLAB 7.0.

F.3. Entrada de datos

Para simular las fallas se cuenta con la ventana de simulación , la cual requiere la entrada de los datos característicos de la máquina, los datos del circuito externo, las condiciones de carga, y los respectivos valores de las puestas a tierra tanto del generador como del circuito externo figura F.1.

The screenshot shows a window titled "DATOS DEL CIRCUITO" with a subtitle "PARÁMETROS ESTANDAR EN PU DE LA MÁQUINA". It contains two columns of input fields for various parameters:

Parameter	Value	Parameter	Value
L_d	1.81	L_q	1.76
L_d'	0.3	L_q'	0.65
L_d''	0.23	L_q''	0.25
T_{d0}'	8	T_{q0}'	1
T_{d0}''	0.03	T_{q0}''	0.07
L_l	0.15	r_a	0.003

Figura F.2: Área para introducir los parámetros del generador

F.3.2. Circuito externo

Se introducen los valores de las impedancias de puesta a tierra tanto del generador, como del circuito externo o barra infinita figura F.3.

The screenshot shows a window titled "CIRCUITO EXTERNO" with input fields for external circuit parameters:

Parameter	Value	Parameter	Value
R_{ground}	1	$L_{LÍNEA}$	0.19
L_{ground}	0.1	$R_{LÍNEA}$	0.082
R_{Gext}	0	L_{Gext}	0

Figura F.3: Área de datos para el circuito externo al generador

F.3.3. Condiciones de carga

Introducir los valores del flujo de potencia en P.U en estado estable del generador, los cuales serán el punto de partida para hallar las condiciones iniciales, para el sistema estable. El voltaje en los terminales se supone a la salida del generador.

CONDICIONES DE CARGA	
<i>P activa</i>	0.9
<i>Q Reactiva</i>	0.43
<i>Voltaje en terminales</i>	1
<i>Frecuencia(Hz)</i>	60

Figura F.4: Área de las condiciones de carga

F.3.4. Condiciones de simulación

Esta área está dividida en tres secciones F.5:

Falla: Se dan las características de la falla, posición y la resistencia de falla. Existen dos modos de localizar la falla : mediante el cursor se ubica el porcentaje correspondiente, ó editando el valor en porcentaje. Se supuso que la falla siempre se produce en el bobinado de la fase A.

Gráficas: para visualizar cada una de las corrientes presentes en el generador, se puede seleccionar el botón correspondiente. Cada gráfica se obtendrá en una ventana aparte.

Se introduce el tiempo de simulación, mediante el tiempo final.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Falla

Porcentaje de falla:

Terminal Fase A

Posición de falla:

R Falla

GRÁFICAS

Ia *Ifalla*

Ib *IN*

Ic *VN*

If *Va1*

Ikd *vfalla*

Ikd *Vb*

Ikd *Vc*

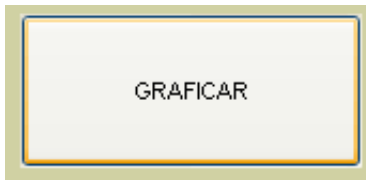
TIEMPOS DE SIMULACIÓN

tiempo inicial

tiempo de falla

tiempo final

Figura F.5: Condiciones de la simulación



Mediante este comando se dará inicio a la simulación, la cual mostrará los resultados del comportamiento de las corrientes en el generador que fueron seleccionadas F.6.

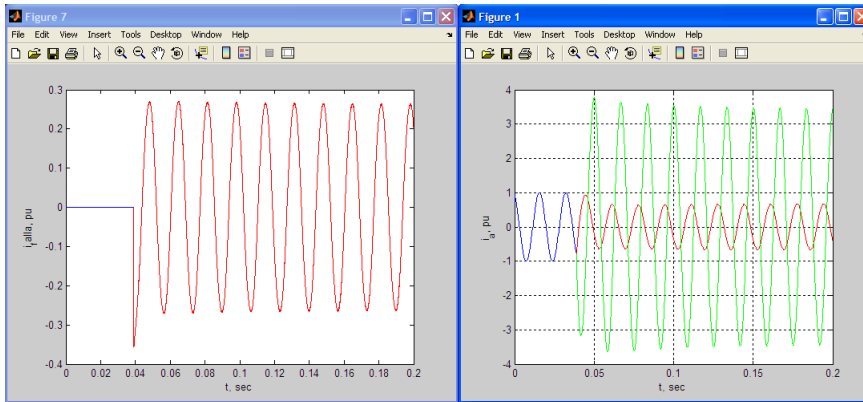
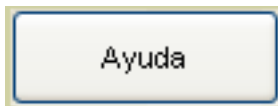


Figura F.6: Gráficas seleccionadas para el caso ejemplo



Este comando abre una ventana que resume los datos a ingresar en la interfaz para su respectiva simulación, y contiene el circuito base del sistema.