



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

T E S I S

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA
EXCITATRIZ CON ELEMENTOS DE
SEMICONDUCTORES**

PRESENTA

ALEJANDRA ESTÉFANY MIRANDA TALAVERA

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR

DR. EN CIENCIAS GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

Morelia, Michoacán, agosto del año 2018



Agradecimientos

A mi padre Felipe de Jesús Miranda,

por el tiempo, la distancia,

el esfuerzo que pusiste

en cada paso que diste conmigo,

gracias sobre todo

por la inspiración.

A mi madre Gloria Talavera

por los sueños,

el sacrificio y el amor.

A mis hermanas Tzitti, Valeria y Dany,

por existir, por inspirarme

y hacerme reír.

A mis profesores de la facultad,

especialmente al Dr. Gilberto González Ávalos.

¡Gracias!

Dedicatoria

A mi papá, a mi madre

y a mi abuelito Silverio.

Índice

Agradecimientos i

Índice iii

Resumen.....vi

Palabras Clavevi

Abstractvii

Keywords.....vii

Glosario de términosviii

Capítulo 1

Introducción 1

 1. Importancia de la electrónica de potencia..... 1

 2. Objetivo 2

 3. Justificación..... 2

 4. Metodología..... 3

Capítulo 2

Antecedentes de Generadores Síncronos..... 4

 2.1 ¿Qué es un generador síncrono?..... 4

 2.2 Aplicación del generador síncrono 4

 2.3 Generador trifásico..... 6

 2.4 Construcción de un generador síncrono 7

 2.4.1 Rotor..... 8

 2.4.2 Rotor de polos salientes..... 8

 2.4.3 Rotor de polos lisos 9

 2.4.4 Estator 10

 2.4.5 Núcleo magnético del Estator 10

 2.4.6 Devanados..... 12

 2.5 Excitación de campo 12

 2.6 Circuito equivalente..... 13

2.7	Impedancia base, reactancia síncrona X_s por unidad.....	16
2.8	Curvas características	17
2.8.1.	Curva de Saturación sin carga	17
2.8.2.	Curvas de regulación	18
2.8.3.	Conexión en paralelo del Generador Síncrono.	20
Capítulo 3		
	Modelado y Simulación de un Generador Síncrono	23
3.1	Introducción.....	23
3.2	Transformación de Park.....	24
3.2.1	Ecuaciones de enlaces de flujo.....	28
3.2.2	Auto inductancias en el estator	29
3.2.3	Auto inductancias en el rotor.....	30
3.2.4	Inductancias mutuas del estator.....	30
3.2.5	Inductancias mutuas del Rotor	30
3.2.6	Inductancias mutuas de estator a rotor.....	31
3.2.7	Transformación de inductancias	32
3.2.8	Ecuaciones de voltaje	34
3.2.9	Ecuación de onda	38
3.3	Simulación en 20Sim.....	41
3.3.1	Entorno 20SIM.....	41
3.3.2	Introducción del sistema de ecuaciones	42
3.3.3	Simulación del modelo de Park de un generador Síncrono	45
Capítulo 4		
	Modelado y simulación de un generador síncrono con excitatriz.	49
4.1	Sistemas de Excitación.....	49
4.2	Excitatriz de un Generador Síncrono.....	51
4.3	Modelado y simulación de una excitatriz.....	51
Capítulo 5		
	Conclusiones y Recomendaciones	55

Bibliografía 58

Resumen

El presente trabajo está enfocado a la creación de un antecedente de indagación de los métodos de excitación más prácticos para un generador síncrono: la excitatriz estática de elementos rectificadores semiconductores.

Su estudio se complementa con la introducción de un software simulador práctico, didáctico y sencillo: 20SIM, que permite al usuario modelar circuitos eléctricos, electrónicos y mecánicos a través de diferentes entradas de datos como podrían ser: diagramas de bloques, ecuaciones de estado, diagramas eléctricos y diagramas de bond graph.

Iniciaremos este trabajo describiendo el comportamiento de un generador síncrono, su estructura física interna y los métodos de excitación de campo que utiliza.

Para el modelado en computadora se utilizará la transformación de Park para reducir la complejidad del sistema y facilitar la interacción del usuario con el modelo del generador síncrono en 20SIM.

Palabras Clave

Excitatriz, Generador síncrono, 20SIM, Transformación de Park, Diagrama de bloques.

Abstract

The present work is focused on the creation of an antecedent of investigation of the most practical methods of excitation for a synchronous generator: the static exciter of semiconductor rectifier elements.

Its study is complemented with the introduction of a practical, didactic and simple simulator software: 20SIM, which allows the user to model electrical, electronic and mechanical circuits through different data inputs such as: block diagrams, state equations, diagrams electrical and bond graph diagrams.

We will begin this work by describing the behavior of a synchronous generator, its internal physical structure and the field excitation methods it uses.

For computer modeling, the Park transformation will be used to reduce the complexity of the system and facilitate user interaction with the synchronous generator model in 20SIM.

Keywords

Exciter, Synchronous Generator, 20SIM, Park transformation, block diagram.

Glosario de términos

Término	Descripción
Ω	Ohm
V	Volt
MW	Mega watt
rpm	revoluciones por minuto
Hz	Hertz
mm	milímetros
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
kW	kilo-Watt
Kva	kilo Volt Amper
W	Watt
VA	Volt Amper

Capítulo 1

Introducción

1. Importancia de la electrónica de potencia.

La tecnología de potencia es en términos prácticos la aplicación de dispositivos electrónicos para controlar o regular sistemas que involucren variables eléctricas en niveles significativos de potencia.

Sistemas y controles electrónicos han hecho de la electrónica de potencia materia de estudio indispensable en la actualidad.

Principalmente la importancia de la electrónica de potencia radica en el uso que se le ha dado en la construcción de sistemas y estructuras procesadoras de energía, la popularidad que ha tomado en años recientes en la utilización de fuentes de energía renovable, fuentes alternas de energía, bancos de baterías y la transmisión de energía eléctrica en corriente directa; sin dejar de lado la gran cantidad de productos tecnológicos en el mercado que consumen energía a niveles diferentes de los que se tiene en el servicio eléctrico. La electrónica de potencia también ha traído consigo soluciones en la industria, para el accionamiento de motores, generadores, control de máquinas y conversión de frecuencias.

La electrónica de potencia moderna es aplicada a través de dispositivos semiconductores como diodos y tiristores los cuales tienen aplicaciones útiles e

importantes para la conversión de corriente de alterna a directa o de corriente directa a alterna. La diferencia más importante entre estos dos dispositivos es la posibilidad de controlar el accionamiento de los tiristores, ventaja que no presentan los diodos. Otros dispositivos controlables son los GTO (Tiristores con puerta de corte rápido), BJT's (transistores de unión bipolar), MOSFET's (transistores de efecto de campo de metal- oxido- semiconductor), pero su comportamiento como los circuitos utilizados para conversión de potencia con estos elementos, es suficientemente parecido al comportamiento de circuitos armados por tiristores. Por esta razón, nos centraremos en explicar el funcionamiento de diodos y tiristores.

2. Objetivo

Utilizar el espacio de simulación 20-Sim para modelar una excitatriz conectada a un generador síncrono, utilizando elementos semiconductores de electrónica de potencia.

3. Justificación

La operación de máquinas eléctricas síncronas en la industria lleva procesos establecidos y cuida minuciosamente aspectos como la excitación del devanado de campo. En el caso de un generador síncrono es necesario utilizar un generador de corriente directa que suele adaptarse al rotor del generador para lograr la excitación del mismo, sin embargo es posible llevar a cabo dicha excitación con métodos más prácticos e igual de eficientes para máquinas síncronas de gran capacidad y éste es el propósito del presente documento.

Utilizando elementos semiconductores que nos permitan realizar una conversión de corriente alterna a corriente directa es posible diseñar una excitatriz eficiente. El

modelado en espacio de estados y la simulación del sistema convencional de excitación y la excitatriz con elementos semiconductores que diseñaremos, nos permitirá observar las ventajas que representa una sobre otra y analizar su comportamiento para ampliar el panorama en cuanto a soluciones en excitación de máquinas síncronas.

4. Metodología

Se realizó una investigación y recopilación de ideas y conocimientos acerca de los elementos principales que componen el proyecto de simulación, los cuales son:

- Elementos semiconductores de electrónica de potencia. En este caso tiristores, debido a la posibilidad de ser controlados y la sencillez de funcionamiento.
- Características y principios de funcionamiento del generador síncrono.
- Funcionalidad y principio de operación de la excitatriz.

También será utilizado el método de la transformación de Park para modelar el circuito completo, que comprende por supuesto la excitatriz conectada al generador síncrono y que facilitará su simulación en espacio de estados en el software 20-sim.

Capítulo 2

Antecedentes de Generadores Síncronos

2.1 ¿Qué es un generador síncrono?

Dentro de los generadores eléctricos existen diversas clasificaciones, dependiendo del tipo de energía primaria que utilizan estos dispositivos, así como de la forma de onda de voltaje que se observa a la salida del generador. Este documento comprende únicamente el generador síncrono trifásico y específicamente este capítulo explica la estructura, principio de funcionamiento y características de los generadores síncronos comerciales.

2.2 Aplicación del generador síncrono

Actualmente, existen diferentes procesos para la obtención de la energía eléctrica, algunos utilizan fuentes de energía renovable y algunos otros no, sin embargo, para cada uno de ellos es una prioridad satisfacer en la medida de lo posible las necesidades de continuidad y calidad en el suministro de potencia.

Para satisfacer estas demandas el generador síncrono es fundamental en las plantas generadoras, ya que convertir energía mecánica en energía eléctrica en potencias de hasta 1500MW se posicionan como los convertidores de energía más grandes del mundo.

Los generadores síncronos trifásicos pueden trabajar tanto a bajas revoluciones (en centrales hidroeléctricas) como a altas revoluciones (en turbinas de vapor o gas).

Un generador que se encuentra conectado a la red, presenta una velocidad en el eje que depende directamente de la frecuencia del voltaje y la corriente y del número de polos que tenga. Por eso se dice que el generador está en sincronía con la red, y de ahí que pueda identificarse a las máquinas con esta estructura como máquinas síncronas (específicamente cuando operan como generadores, generadores síncronos).

Cuando el generador se encuentra operando sin estar acoplado a la red, la velocidad mecánica del eje influye directamente sobre la frecuencia de las corrientes generadas. Esta aplicación ha sido particularmente relevante en el desarrollo de centrales de generación a partir de recursos renovables como la energía eólica.

En cuanto a los generadores síncronos comerciales, podemos encontrar con campo magnético estacionario o rotatorio. Comúnmente se utiliza un circuito de excitación, el cuál alimenta los polos del rotor a través de anillos colectores que giran con el rotor y a los cuales llega la corriente de excitación de la máquina. Aunque los generadores síncronos comerciales se construyen con estas variantes, tomaremos el ejemplo de un generador sencillo, síncrono trifásico de campo giratorio para explicar el principio de funcionamiento básico del generador síncrono.

2.3 Generador trifásico

Como punto de partida se tomará en cuenta que el lector conoce ya los principios básicos de generación de electricidad y circuitos eléctricos, además es importante recalcar que la conversión de energía que se analiza es del tipo mecánica – electromagnética.

El generador trifásico cuenta con tres devanados idénticos en el estator, los cuales están colocados a 120° entre sí. El rotor es un imán (o electroimán) que al girar a velocidad constante induce voltajes en los devanados, cada uno alcanzado su máximo en diferentes instantes, defasados en la gráfica de lectura de voltajes también 120° .

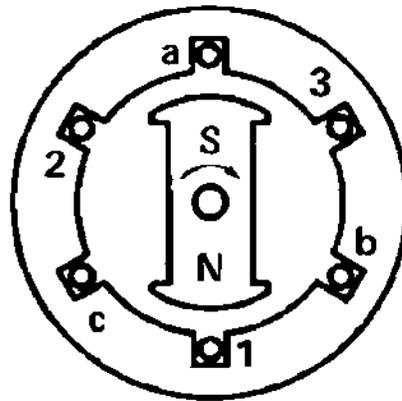


Figura 2.1 Devanados de generador síncrono

Obsérvese la figura 2.1 Con el rotor en esta posición, sólo el voltaje E_{a1} ente a y 1 está en su valor máximo positivo. Cuando el rotor gire 120° , el voltaje E_{b2} entre b y 2 sería ahora el único que estaría en su nivel máximo; igualmente el voltaje E_{c3} alcanzará el máximo valor cuando el rotor gire 240° a partir de la posición inicial mostrada en la

figura. En una gráfica de voltaje también es posible observar este defasamiento de 120° entre voltajes, observe la figura 2.2

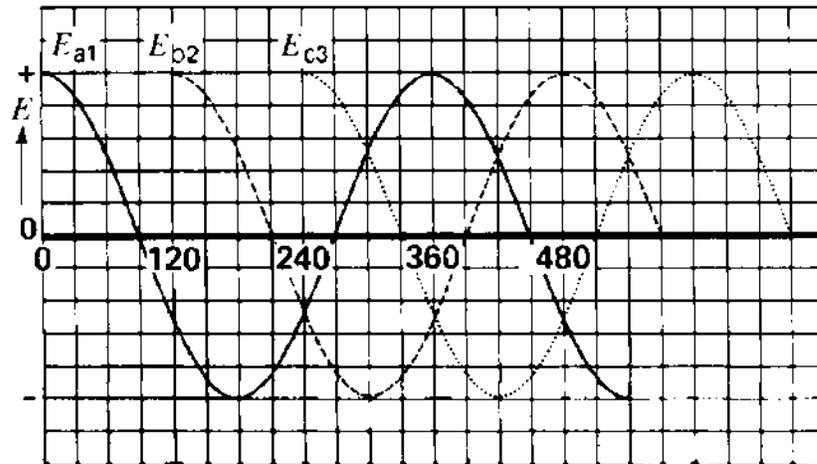


Figura 2.2 Voltajes trifásicos

2.4 Construcción de un generador síncrono

Para los sistemas eléctricos de potencia, el generador síncrono es parte fundamental en las plantas de generación de energía eléctrica. De ahí la importancia del conocimiento de los principios básicos de su estructura y operación para el seguimiento de esta tesis. A continuación se presenta una descripción de sus componentes principales.

2.4.1 Rotor

A groso modo, el generador síncrono es un convertidor de energía compuesto de una parte móvil (rotor o inductor) y una parte fija (estator o inducido). Entre estos dos componentes fundamentales encontraremos el entrehierro. Los polos magnéticos forman al sistema inductor, al ser excitados con corriente continua crean el flujo inductor. Para alimentar a los polos del rotor es común que se utilicen circuitos de excitación. Los sistemas de excitación serán presentados más adelante en este capítulo.

Dependiendo del tipo de rotor, podemos distinguir dos tipos de generadores: con rotor de polos salientes o rotor de polos lisos. Uno u otro se utiliza según la planta de generación que lo necesite, la velocidad síncrona, etc. Por ejemplo para una planta hidroeléctrica un generador de polos salientes es más adecuado porque se requieren velocidades más bajas, mientras que en una termoeléctrica los generadores de polos lisos cubren demandas más altas en cuanto a velocidad.

2.4.2 Rotor de polos salientes

En esta estructura los polos del rotor se asientan sobre una masa sólida con una estructura como soporte. De acuerdo a la frecuencia y velocidad síncrona deseadas a la salida del rotor, se establece el número de polos que necesitamos. Rotores de esta estructura se utilizan para turbinas hidráulicas que alcanzan velocidades hasta 1200 rpm y con frecuencias esperadas de 50 o 60 Hz.

El tamaño al igual que la estructura del generador dependen de la potencia del mismo, si el diámetro del rotor es grande la franja superficial del rotor estará

compuesta de paquetes de laminaciones con una debida distribución para fijarse al núcleo.

2.4.3 Rotor de polos lisos

Para este tipo de rotores se utilizan conductores de cobre de sección rectangular como bobinas. Estas son colocadas en forma radial en las ranuras del rotor y utilizan mica micarta de fibra de vidrio como aislador; la correcta distribución de bobinas permite que la fuerza magnetomotriz esté mejor distribuida en cada polo y resulte una mejor onda senoidal de la fuerza electromotriz generada.

Sobre el entrehierro, este deberá tener un espesor uniforme una óptima distribución de las ranuras. Para generadores de gran capacidad los rotores de esta estructura son más grandes y alcanzan velocidades máximas de 3600 rpm con 2 polos o 1800 rpm con 4 polos.

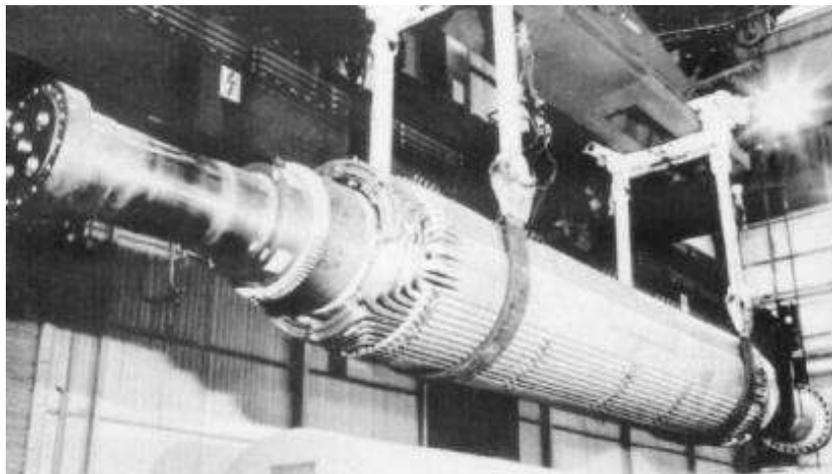


Figura 2.3 Rotor de polos lisos

2.4.4 Estator

El estator o inducido, está constituido principalmente de las siguientes partes:

- Carcasa
- Núcleo magnético
- Devanados
- Accesorios mecánicos y eléctricos

La carcasa es el soporte metálico que sostiene y centra el núcleo magnético del estator.

Dependiendo de las dimensiones del generador, el material que la constituya y el sistema de ventilación y mantenimiento que necesite, la carcasa puede variar en estructura. Sin embargo se ha de priorizar la necesidad de que el generador quede completamente fijo y no exista vibración, sobre todo en centrales como las termoeléctricas donde se manejan altas velocidades.

Para centrales hidroeléctricas el montaje se hace en forma vertical mientras que para centrales termoeléctricas el montaje es horizontal.

2.4.5 Núcleo magnético del Estator

El núcleo magnético, mostrado en la figura 2.4, está constituido por un conjunto de coronas circulares de laminación y que cuenta con ranuras que contendrán los devanados del estator. Este conjunto de laminaciones se encuentra centrado en la

carcasa. Para formar este conjunto de laminaciones se puede utilizar láminas de acero al silicio de 0.35 a 0.5 mm de espesor ya que presenta pérdidas bajas.

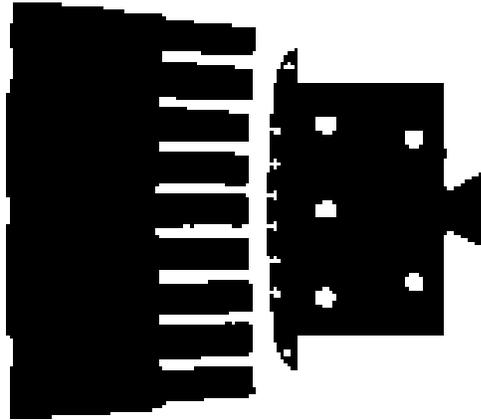


Figura 2.4 Ranuras en una fase del estator

Para disminuir el efecto de las corrientes que circulan por las laminaciones se aíslan, ya sea con una capa de papel muy delgado y una capa delgada de barniz aislante.

Las ranuras del núcleo del estator en donde se alojan los conductores del devanado pueden ser de dos tipos fundamentalmente: abierto y semicerradas.

Las ranuras del tipo abierto presentan la ventaja de que las bobinas pueden ser prefabricadas y después ser instaladas en el núcleo y permite simplificar la reparación de bobinas dañadas. Para las ranuras de tipo semicerradas no permiten prácticamente el uso de bobinas prefabricadas, pero permite una perfecta ejecución del aislamiento por lo que las máquinas pueden operar a tensiones mayores.

2.4.6 Devanados

Los devanados siempre son conectados en estrella y el neutro es conectado a tierra.

La conexión en estrella es preferible por los siguientes motivos:

1. El voltaje por fase es solo $1/\sqrt{3}$ ó 58% del voltaje entre líneas, lo que significa que el voltaje mayor entre un conductor del estator y el núcleo del estator aterrizado es solo 58% del voltaje de línea. Por lo que se puede reducir el nivel de aislamiento entre las ranuras, por lo que nos permite incrementar la sección transversal de los conductores. Un conductor mayor nos permite incrementar la corriente y por ende permite aumentar la potencia de la máquina.
2. Cuando un generador está bajo carga, el voltaje inducido en cada fase tiende a distorsionarse y la forma de onda no es del todo senoidal. La distorsión es debido al voltaje de tercera armónica. Con la conexión en estrella la distorsión por armónicas de línea a neutro no aparece entre las líneas porque ellas se cancelan. Consecuentemente, los voltajes de línea permanece senoidal bajo cualquier condición de carga.

2.5 Excitación de campo

Al diseñar o estudiar un generador síncrono, es importante considerar su sistema de excitación de campo, pues éste debe garantizar la estabilidad del voltaje de CA en la salida, así como responder a cambios repentinos en la carga para mantener la estabilidad del sistema; todo esto priorizando la prontitud de respuesta. Ante este

requerimiento suelen utilizarse dos sistemas de excitación (generadores de CD), el excitador principal y el llamado excitador piloto.

El excitador principal alimenta la corriente de excitación al campo del generador síncrono por medio de escobillas y anillos colectores. En condiciones normales el voltaje del excitador queda entre 125 y 600 V. La capacidad de potencia del excitador principal depende de la capacidad del generador síncrono. Por lo general se requiere un excitador de 25kW para excitar un alternador de 1000kVA (2.5% de su capacidad), mientras que un excitador de 2500kW es suficiente para un alternador de 500 MW (solo 0.5% de su capacidad).

En condiciones normales la excitación varía automáticamente, responde a los cambios de carga con el objetivo de mantener un voltaje de línea de CA constante o para controlar la potencia reactiva suministrada al sistema de servicio eléctrico.

2.6 Circuito equivalente

Para la siguiente figura, considérese que el generador es excitado por una corriente directa I_x y que además existe una turbina que lo impulsa. El generador es trifásico, síncrono y sus terminales A, B y C alimentan una carga trifásica equilibrada conectada en Y.

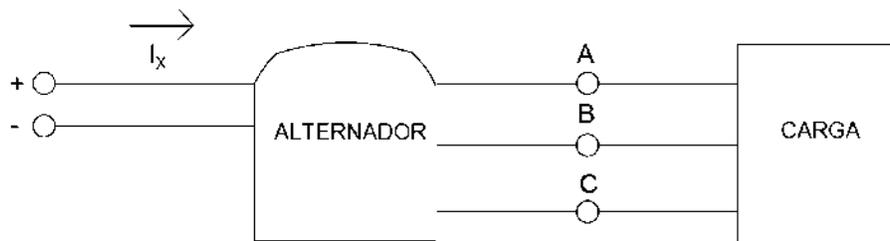


Figura 2.5 Generador conectado a una carga

La siguiente figura muestra el circuito formado en la conexión Y

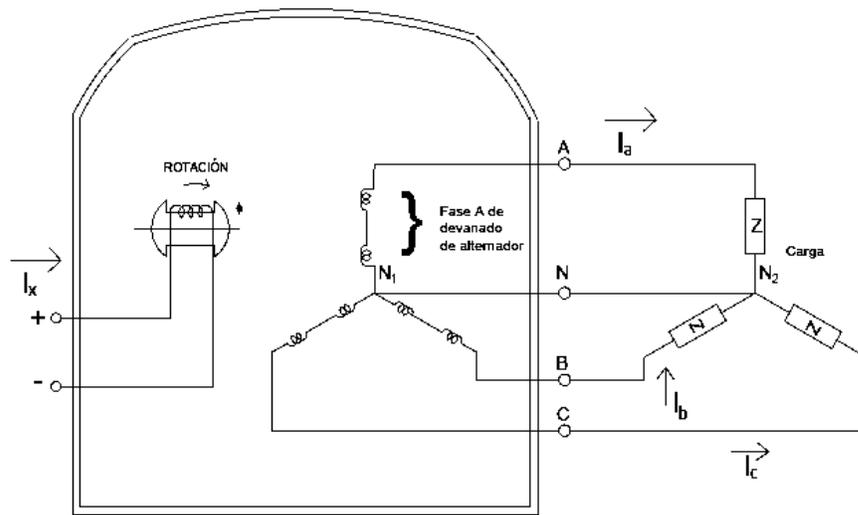


Figura 2.6 Circuito eléctrico que representa la instalación de la figura 2.5

Los neutros están conectados (línea punteada) porque la carga es equilibrada, entonces no afecta el comportamiento de los voltajes.

Acerca del campo, la corriente de excitación que conduce, genera un flujo ϕ . Conforme el campo gira, en el estator se inducen voltajes debido al flujo ϕ , estos voltajes además de ser iguales estarán defasados 120° entre ellos.

Respecto al estator, sus devanados poseen cada uno resistencia e inductancia. La inductancia, como en el caso de máquinas de CD se presenta como una reactancia síncrona X_s que dependerá tanto de la frecuencia del generador como de la inductancia aparente del devanado:

$$X_s = 2\pi fL \tag{2.1}$$

La reactancia síncrona al igual que la resistencia interna del generador, componen su impedancia. En condiciones normales R es de 10 a 100 veces menor a X_s y en realidad R no se considera como parte de la impedancia interna cuando no se están haciendo análisis de eficiencia o calentamiento en el generador.

Para hacer un análisis efectivo del circuito equivalente de la conexión generador – carga, podemos enfocarnos simplemente en el análisis de una sola de las fases, puesto que la carga es balanceada y las variables eléctricas solo estarán defasadas 120° de una fase a otra es sencillo trabajar con el circuito mostrado en la figura 2.7.

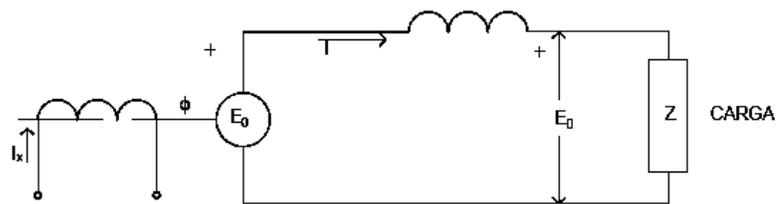


Figura 2.7 Circuito equivalente de un generador trifásico que muestra solo una fase.

Observe que se ha omitido la resistencia del devanado. La corriente I_x genera el flujo ϕ que induce E_0 (voltaje inducido, interno); I es la corriente de línea, E el voltaje de línea a neutro que depende tanto de E_0 como de la impedancia que en este caso sería la reactancia X_s .

Para determinar el valor no saturado de X_s se hace una prueba de cortocircuito y circuito abierto. Empecemos con la prueba de circuito abierto, el generador a velocidad nominal y la corriente se eleva hasta alcanzar voltaje nominal de línea a línea. Se registran corriente de excitación I_{xn} y voltaje de línea a neutro E_n .

A continuación habrá que reducir la corriente de excitación gradualmente y hasta llegar a cero, con este valor de corriente podemos cortocircuitar las terminales del estator. Con el generador nuevamente a velocidad nominal elevamos el valor de la corriente de excitación hasta su valor inicial I_{xn} . Medimos la corriente de cortocircuito en los devanados (I_{sc}) y procedemos a calcular X_s .

$$X_s = E_n / I_{sc} \quad (2.2)$$

Es importante tomar en cuenta que X_s no es un valor constante. Depende del grado de saturación. Sin embargo el valor de X_s cuando no está saturada nos es útil para la mayoría de los casos.

También es necesario dar prioridad a mantener un cálculo sencillo en el análisis de los circuitos equivalentes de generadores, así como permitir que los valores obtenidos puedan interpretarse fácilmente en una lectura breve de los parámetros de cada generador estudiado. Con este objetivo, se utiliza el sistema por unidad.

2.7 Impedancia base, reactancia síncrona X_s por unidad

Siempre que se utiliza el sistema por unidad se definen valores base. Para este caso dichos valores corresponden al voltaje nominal de línea a neutro y a la potencia nominal por fase (voltaje base E_B y potencia base S_B).

A conveniencia, también puede obtenerse la impedancia base si la potencia base se selecciona de tal manera que sea igual a la potencia nominal del generador, y el

voltaje base se elige igual al voltaje de línea a línea. En cualquier caso la impedancia base Z_B tendrá el mismo valor.

$$Z_B = \frac{E_B^2}{S_B} \quad (2.3)$$

Teniendo el dato de la impedancia base Z_B podemos utilizarlo como punto de comparación para otras impedancias que posea el generador.

Ahora bien, en lugar de expresar la reactancia síncrona X_s como valor por unidad de Z_B comúnmente se utiliza la relación de cortocircuito, que es básicamente la relación de la corriente de campo I_{x1} necesaria para tener un voltaje nominal de circuito abierto en la armadura y la corriente de campo I_{x2} necesaria para obtener corriente nominal en un cortocircuito sostenido:

$$\frac{I_{x1}}{I_{x2}} \quad (2.4)$$

La relación de cortocircuito es igual al recíproco de la reactancia síncrona en valor por unidad.

2.8 Curvas características

2.8.1. Curva de Saturación sin carga

Tenemos un generador síncrono de dos polos, opera sin carga y es impulsado a velocidad constante por una turbina. El estator es trifásico, alimentado por A, B, C y N y conectado en Y. El flujo en el entrehierro es producido por la corriente I_x .

Si observamos el comportamiento del voltaje inducido E_0 entre A y N cuando variamos I_x de manera incremental, nos daremos cuenta que siempre que I_x incremente suavemente el voltaje también se incrementará en una relación directamente proporcional a la corriente de excitación. Una vez saturado el hierro, si mantenemos iguales las variaciones de I_x , el voltaje incrementará mucho menos. Al tomar mediciones de estas corrientes y voltajes es posible presentar este fenómeno en la gráfica de la curva de saturación sin carga de la Figura 2.8.

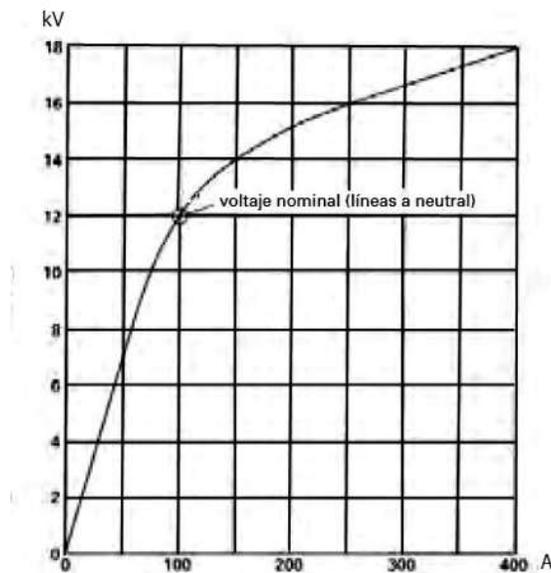


Figura 2.8 Curva de Saturación sin carga real de un generador de 36MW trifásico, con voltaje nominal de 12 KV.

2.8.2. Curvas de regulación

Una curva de regulación describe la relación entre el voltaje terminal E y la corriente I de la carga. Esto interesa porque podemos observar lo que sucede cuando un sólo generador síncrono alimenta una carga variable. Para trazar la curva de generación es importante que se considere un factor de potencia FP dado y que la excitación de campo se mantenga fija.

Por ejemplo, para un generador trifásico de 36 MVA y 21kV consideramos las curvas de regulación de la figura 2.9, las cuales se han trazado considerando factores de potencia de 0.9 adelantado, 0.9 atrasado y factor de potencia unitario.

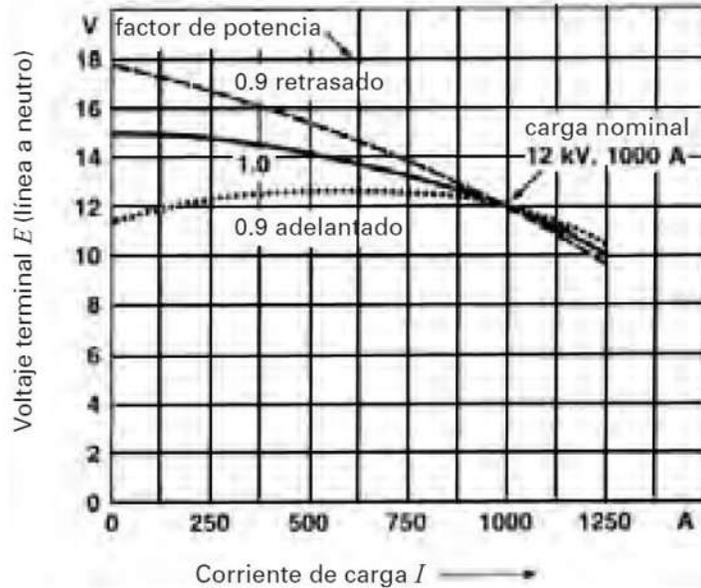


Figura 2.9 Curvas de regulación de un generador síncrono con tres factores de potencia de carga diferentes.

El cambio de voltaje que se observa cuando tenemos una situación con carga y otra sin carga se describe mediante una regulación porcentual expresada como:

$$\text{Regulación en \%} = \frac{E_{NL} - E_B}{E_B} \times 100 \tag{2.5}$$

Donde E_{NL} es el voltaje sin carga y E_B el voltaje nominal.

2.8.3. Conexión en paralelo del Generador Síncrono.

La conexión en paralelo de dos o más generadores síncronos se lleva a cabo con el propósito de suministrar la potencia requerida por una carga común, la cual no puede cubrir un sólo generador. Este tipo de conexiones con frecuencia presenta circuitos conectables y desconectables, por ejemplo en subestaciones eléctricas que cubren la demanda adicional en horas pico de consumo de energía eléctrica pero cuya potencia no es necesaria en horarios en los que la demanda disminuye.

Es importante que los generadores que entran y salen del circuito de suministro de potencia respeten y mantengan la frecuencia y el nivel del voltaje del denominado “bus infinito” (que es básicamente el circuito de infinitos generadores conectados en paralelo), para esto cada generador debe estar “sincronizado” es decir, debe tener la misma frecuencia que maneja el bus al que se conectará y cumplir las condiciones de voltaje en nivel, fase y secuencia de fases.

Ahora bien, para sincronizar un generador el procedimiento es el siguiente:

- 1.1 Se regula la velocidad de la turbina, la frecuencia del generador deberá aproximarse a la frecuencia del sistema.
- 1.2 Se lleva el nivel de voltaje E_0 en el generador al nivel de E (voltaje del sistema).
- 1.3 Hay que igualar la frecuencia del generador y la del bus, para esto se utilizan instrumentos como los sincronoscopios. En palabras sencillas, leen las frecuencias del generador y el bus; lleva la primera al nivel de la segunda y conecta inmediatamente el generador al circuito bus infinito.

Aunque sucede que la conexión en paralelo ocurra sólo entre dos generadores síncronos, con mayor frecuencia es sólo un generador el que se conecta a un gran sistema de generadores en paralelo. El bus infinito es muy robusto, tiene un nivel de potencia tal que a los elementos conectados les demanda su mismo voltaje y frecuencia. La carga que impone el bus al nuevo generador conectado se considera impredecible e incognoscible, por lo tanto la potencia que pueda entregar el generador puede variarse al variar la corriente de excitación I_x y el par que ejerce la turbina (recordemos que el voltaje en las terminales del generador lo impone el bus infinito).

Ahora, considerando que las condiciones de voltaje en el generador son las mismas que en el bus, no existe diferencia de potencial en la reactancia síncrona y por lo tanto la corriente de carga no existe. Se dice que el generador está flotando en la línea, no suministra potencia. Si se varía la corriente de excitación el voltaje inducido se incrementará por lo que la caída de potencial en la reactancia síncrona será:

$$E_x = E_0 - E \quad (2.6)$$

La corriente del circuito está dada por:

$$I = \frac{E_x}{X_s} \quad (2.7)$$

Entendamos que la corriente se atrasa 90° de E_x debido a la naturaleza inductiva de X_s , por lo cual el circuito representa una reactancia inductiva para el generador.

Ante una elevación de la corriente de excitación en el generador, habrá un flujo de potencia reactiva desde el generador y hacia el sistema de bus infinito aumentando dicho flujo a medida que aumenta la excitación en el generador.

Si la corriente de excitación en el generador decrementa hasta que E_0 sea menor que E , E_x se volverá negativo y el flujo de potencia reactiva irá esta vez del sistema de bus infinita hacia el generador, esto significa que I se adelanta 90° respecto a E , lo que para el generador significará que el sistema de bus infinito se comporta como un capacitor.

Capítulo 3

Modelado y Simulación de un Generador Síncrono

3.1 Introducción

En este capítulo se desarrollará un modelo matemático de la máquina síncrona que suele ser utilizado en cálculos de estabilidad. Se utiliza la formulación en espacio de estados de las ecuaciones de la máquina y pueden desarrollarse dos modelos, uno utilizando las corrientes como variables de estado y otro utilizando enlaces de flujo.

En este estudio se considerará una máquina síncrona con tres devanados de estator, un devanado de campo y dos devanados de amortiguamiento. Estos seis devanados están magnéticamente acoplados. El acoplamiento magnético así como el enlace de flujo de cada devanado están en función de la posición del rotor y el voltaje instantáneo v en las terminales de cada devanado está dado por:

$$v = \pm \sum ri \pm \sum \dot{\lambda} \quad (3.1)$$

Donde λ es el enlace de flujo, r es la resistencia del devanado e i es la corriente, considerando la dirección positiva de las corrientes del estator cuando salen de las terminales del estator. La notación $\pm \Sigma$ indica la sumatoria de todos los términos tomando en cuenta su polaridad. La expresión para los voltajes de devanados es complicada debido a la variación de λ con la posición del rotor.

3.2 Transformación de Park

La simulación de un generador síncrono implica la introducción de datos y ecuaciones a menudo complejas y extensas, cuando se quiere realizar una serie de cálculos de esta naturaleza, es práctico llevar a cabo la introducción de datos al ordenador de la manera más sencilla posible; es preciso recurrir a operaciones previas que permitan la reducción de datos de entrada y los tiempos de cómputo (aunque esto suele ser una prioridad cuando trabajamos con sistemas robustos, en este caso nos será útil la simplificación del sistema para lograr una explicación completa).

Una herramienta útil es la transformación de Park, esta consiste en determinar un nuevo conjunto de variables como corrientes, voltajes o enlaces de flujo pero en términos de las variables de los devanados. El nuevo conjunto de variables resulta de la proyección de las variables conocidas (corrientes, voltajes, enlaces de flujo) en tres ejes; el primero a lo largo de del eje neutral del devanado de campo del rotor, llamado 'eje directo'; el segundo en el eje neutral del devanado de campo, llamado el eje de cuadratura; y el tercero es un eje estacionario.

A continuación se desarrolla matemáticamente la transformación de Park. Se define el eje d del rotor para algún instante de tiempo, designando el ángulo θ en radianes, al que se encuentra respecto a la posición de referencia.

El objetivo de la transformación de Park es sencillamente, expresar todas las cantidades de las fases a, b y c en el estator, como nuevas variables cuyo marco de referencia se mueve con el rotor. Entonces, debemos considerar que necesitamos tres nuevas variables para cada una de las variables i_a , i_b e i_c . La transformación de Park utiliza dos de las nuevas variables como componentes de los ejes d y q, la tercera variable es una corriente estacionaria que es proporcional a la corriente de secuencia cero.

Como trabajaremos con un generador síncrono las corrientes en las terminales de la máquina i_a , i_b e i_c , se suponen saliendo de dichas terminales. La proyección de estas corrientes a lo largo de los ejes d y q del rotor, están dadas por:

$$i_{qaxis} = (2/3)[i_a \sin\theta + i_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c (\sin\theta + 2\pi/3)] \quad (3.2)$$

$$i_{daxis} = (2/3)[i_a \cos\theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c (\cos\theta + 2\pi/3)] \quad (3.3)$$

Por conveniencia se elige el eje de la fase a como el eje de referencia, evitando así la consideración de un ángulo de desplazamiento entre la fase a y la referencia arbitraria y la complicación de las ecuaciones al tener que referenciar todos los términos.

Por definición

$$i_{0dq} = P i_{abc} \quad (3.4)$$

$$i_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \quad i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Y la transformada de Park (P) está definida como:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

El flujo principal del devanado de campo está en dirección del eje *d* del rotor. Esto produce una FEM que retrasa este flujo 90°. Por lo tanto la FEM *E* de la máquina se encuentra principalmente a lo largo del eje *q* del rotor.

Consideremos una máquina síncrona con un voltaje constante *v* en terminales. Cuando opere como generador el fasor \bar{E} debe estar adelantado al fasor \bar{v} . El ángulo entre \bar{E} y \bar{v} es igual al ángulo de torque δ de la máquina cuando el fasor \bar{v} está en dirección de la referencia (fase a, fig 3.1).

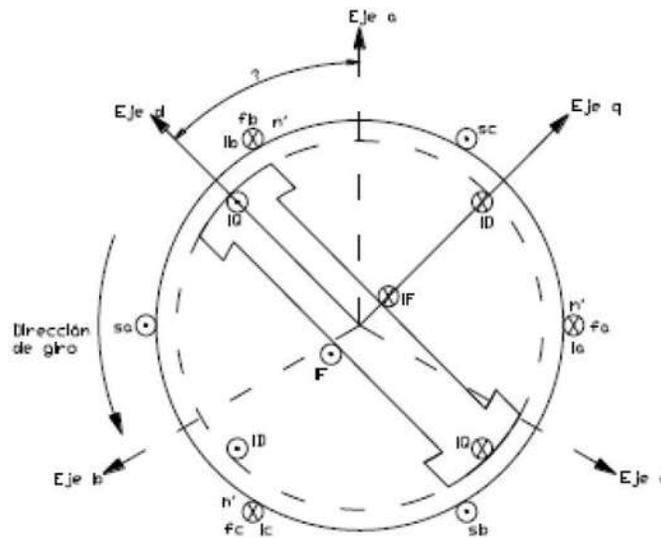


Fig. 3.1 Representación esquemática de la Máquina síncrona

Para un instante $t=0$, se considera que el fasor \bar{v} se localiza en el eje de fase a , a un ángulo δ se localiza el eje q y el eje d esta en $\theta = \delta + \pi/2$.

Cuando $t>0$, el eje de referencia se localiza a un ángulo $\omega_R t$ con respecto del eje de la fase a . El eje d del rotor está entonces en:

$$\theta = \omega_R t + \delta + \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (3.7)$$

Donde $\omega_R t$ es la tasa de frecuencia angular síncrona en rad/seg y δ el ángulo de torque síncrono en radianes eléctricos.

Similar a 3.3 cuando se toman en cuenta voltajes o enlaces de flujo tenemos las expresiones:

$$\begin{aligned} v_{0dq} &= P v_{abc} \\ \lambda_{0dq} &= P \lambda_{abc} \end{aligned} \quad (3.8)$$

También, la inversa de P es:

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta & \sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Note que $P^{-1} = P^t$, lo que significa que la transformación de Park es ortogonal. Que P sea ortogonal también significa que en la transformación P la potencia es invariante

y debemos esperar utilizar la misma expresión de potencia ya sea en el marco de referencia a-b-c ó en el marco 0-d-q. Así

$$\begin{aligned}
 p &= V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = (V^t_{abc} i_{abc}) = (P^{-1} V_{0dq})^t \\
 &= V^t_{0dq} (P^{-1})^t (P^{-1} i_{0dq}) = V^t_{0dq} P (P^{-1} i_{0dq}) \\
 &= V^t_{0dq} i_{0dq} = V_0 i_0 + V_d i_d + V_q i_q
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

3.2.1 Ecuaciones de enlaces de flujo

La situación descrita en la figura 3.2 es la de una red consistente en seis bobinas mutuamente acopladas. Estas son los tres devanados de fase $sa - fa, sb - fb$ y $sc - fc$; el devanado de campo $F - F'$; y los dos devanados de amortiguamiento $D - D'$ y $Q - Q'$ (Los devanados de amortiguamiento son frecuentemente designados como kd y kq sin embargo se prefiere la notación que hemos utilizado porque es más práctica). Las denominaciones s y f para los devanados de fase se refieren al extremo donde inicia y finalizan las bobinas (del inglés start y finish respectivamente)

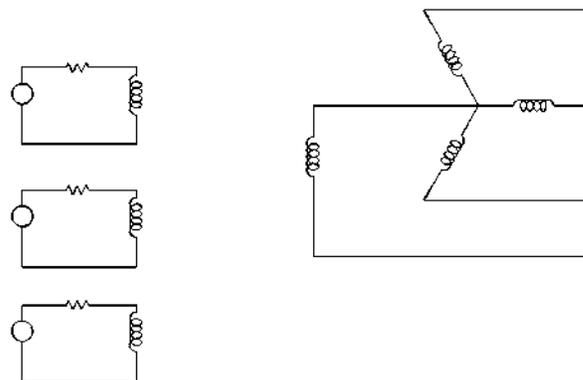


Fig. 3.2 Diagrama esquemático de una máquina síncrona

Escribimos las ecuaciones para los seis circuitos como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Donde L_{jk} representa la auto inductancia cuando $j = k$ y la inductancia mutua cuando $j \neq k$, y donde $L_{jk} = L_{kj}$ en cualquier caso. Podemos deducir por la naturaleza del generador que la mayoría de las inductancias en la matriz anterior son función del ángulo de posición del rotor, estas inductancias pueden ser escritas como explicamos a continuación.

3.2.2 Auto inductancias en el estator

Las autoinductancias de los devanados de fase están dadas por:

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_j + L_m \cos 2\theta \quad H \\ L_{bb} &= L_j + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad H \\ L_{cc} &= L_j + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad H \end{aligned} \quad (3.12)$$

Donde $L_j > L_m$ y ambas son constantes (Vamos a definir desde ahora, que para todas las inductancias cuya notación contenga un subíndice de una sola letra se considerará un valor constante).

3.2.3 Auto inductancias en el rotor

Todas las autoinductancias del rotor se consideran constantes y de acuerdo a la notación que hemos estado utilizando, los subíndices incluirán una sola letra.

$$\begin{aligned}L_{FF} &= L_F H \\L_{DD} &= L_D H \\L_{QQ} &= L_Q H\end{aligned}\tag{3.13}$$

3.2.4 Inductancias mutuas del estator

Las inductancias entre fases son funciones de θ , pero son simétricas:

$$\begin{aligned}L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \pi/6) H \\L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \pi/6) H \\L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + 5\pi/6) H\end{aligned}\tag{3.14}$$

Donde $|M_s| > L_m$.

Es importante mencionar que la polaridad de los términos de inductancias mutuas (L y M) dependen de lo que hemos asumido sea el sentido de la corriente y la orientación de las bobinas.

3.2.5 Inductancias mutuas del Rotor

La inductancia mutua entre los devanados F y D es constante y no varía con θ . El coeficiente de acoplamiento entre los ejes d y q es cero y ningún par de devanados con desplazamiento de 90° presenta inductancia mutua.

3.2.6 Inductancias mutuas de estator a rotor

Finalmente, consideramos las inductancias mutuas entre devanados de rotor y estator, todas ellas en función del ángulo θ del rotor. Desde los devanados de fase hasta el devanado de campo tenemos que

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_F \cos \theta H \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_F \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) H \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_F \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) H \end{aligned} \quad (3.15)$$

De forma similar, de los devanados de fase a los devanados de amortiguamiento D tenemos

$$\begin{aligned} L_{aD} &= L_{Da} = M_D \cos \theta H \\ L_{bD} &= L_{Db} = M_D \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) H \\ L_{cD} &= L_{Dc} = M_D \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) H \end{aligned} \quad (3.16)$$

Y finalmente, de los devanados de fase a los devanados de amortiguamiento Q tenemos

$$\begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = M_Q \cos \theta H \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = M_Q \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) H \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = M_Q \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) H \end{aligned} \quad (3.17)$$

También aquí los signos de cada término de inductancia dependen del sentido que hayamos asignado al sentido de la corriente y la orientación de las bobinas.

3.2.7 Transformación de inductancias

Conociendo todos los términos de la matriz de inductancias, observamos que la mayoría son variantes con el tiempo, ya que θ es función del tiempo. Solo 4 de los términos de la diagonal se desvanecen debido al comportamiento de las inductancias mutuas del rotor. Así en las ecuaciones de voltaje como 3.1 el término $\dot{\lambda}$ no es una simple L_i sino que debe ser calculada como

$$\dot{\lambda} = L\dot{i} + \dot{L}i \quad (3.18)$$

Ahora observemos que la matriz 3.9 con sus inductancias variables en el tiempo puede ser simplificada remitiendo todas las cantidades a un marco de referencia en el rotor a través de la transformación de Park aplicada al conjunto en $a - b - c$.

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Donde

L_{aa} = inductancia estator – estator

L_{Ra}, L_{aR} = inductancias rotor – estator

L_{RR} = Inductancia rotor – rotor

La ecuación 3.16 se obtiene de una multiplicación previa de la matriz 3.9 por

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Donde P es la transformada de Park y U_3 es la matriz unitaria de 3x3.

Realizando la operación mencionada se obtiene

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Donde hemos definido las nuevas constantes

$$L_d = L_s + M_s + (3/2)L_m \quad [H] \quad (3.22)$$

$$L_q = L_s + M_s - \left(\frac{3}{2}\right)L_m \quad [H] \quad (3.23)$$

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad [H] \quad (3.24)$$

$$k = \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (3.25)$$

En 3.17 λ_d es el enlace de flujo de un circuito moviéndose con el rotor y centrado en el eje d. De forma similar λ_q está centrado en el eje q. El enlace de flujo λ_0 está completamente desacoplado de los otros circuitos, la primera fila y la primera columna tienen solo un término.

Es importante también observar que la matriz de inductancias de 3.17 es una matriz de constantes. Esto podemos saberlo a simple vista porque todos los términos tienen un subíndice con una sola letra, conforme a la notación que hemos definido para inductancias constantes. Precisamente la razón por la que resulta útil la transformación de Park es que elimina de la ecuación los coeficientes que varían con el tiempo.

También notemos que la matriz transformada (3.18) es simétrica y por lo tanto puede describir perfectamente un circuito equivalente.

3.2.8 Ecuaciones de voltaje

Las ecuaciones de voltaje del generador son de la forma 3.1. Esquemáticamente el circuito se muestra en la figura 3.2, donde las bobinas se identifican exactamente igual que en la figura 3.1 y con las terminales de las bobinas como se muestra. Las inductancias mutuas se omiten del esquema para que este sea claro, pero se asume que están presentes en los valores dados en la sección 3.2.7. Note que las corrientes de estator están indicadas con dirección positiva cuando salen de las terminales de la máquina ya que se supone esta opera como generador. (Figura 3.2)

Para las condiciones que se han indicado podemos escribir la ecuación de la matriz como

$$v = -ri - \dot{\lambda} + v_n \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Si $r_a = r_b = r_c = r$, como sucede regularmente también podemos definir

$$r_{abc} = rU_3 \text{ ohms} \quad (3.28)$$

Donde U_3 es la matriz unitaria de 3x3 y podemos reescribir 4.23 de manera particionada como

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Donde

$$v_{FDQ} = \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$i_{FDQ} = \begin{bmatrix} i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad \lambda_{FDQ} = \begin{bmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Así, 3.21 se complica por la presencia de coeficientes variantes en el tiempo en el término $\dot{\lambda}$, pero esos términos pueden ser eliminados aplicando la transformación de Park al conjunto de elementos en el estator. Esto requiere que ambos lados de 3.21 sean previamente multiplicados por

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Por definición

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Esto aplica para el lado izquierdo de 3.21. Para la caída de tensión de la resistencia, calculamos:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P R_{abc} P^{-1} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.33)$$

El segundo término del lado derecho de 3.21 es transformado como

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}\lambda_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Evaluamos $P\dot{\lambda}_{abc}$ utilizando nuevamente la definición $\lambda_{0dq} = P\lambda_{abc}$, por lo que calculamos

$$\dot{\lambda}_{0dq} = P\dot{\lambda}_{abc} + \dot{P}\lambda_{abc} \quad (3.35)$$

Luego

$$P\dot{\lambda}_{abc} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}\lambda_{abc} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \quad (3.36)$$

Podemos mostrar que

$$\dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega\lambda_q \\ \omega\lambda_d \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Que es el termino de voltaje – velocidad.

Finalmente el tercer término del lado derecho de 3.21 es transformado como se muestra

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pv_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Donde por definición n_{0dq} es la caída de voltaje desde el neutro a tierra en el sistema de coordenadas $0dq$. Y su representación matricial es:

$$n_{0dq} = - \begin{bmatrix} 3r_n i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3L_n i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Y observamos que esta caída de voltaje ocurre solamente en la secuencia cero, como se esperaba. Resumiendo sustituimos 3.24 en 3.25 y 3.30 en 3.21 para obtener

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Note que todos los términos en esta ecuación son conocidos. La matriz de resistencias es diagonal. En condiciones balanceadas el voltaje de secuencia cero, es cero. Para simplificar la notación hacemos que

$$R = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$R_R = \begin{bmatrix} r_R & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$s = \begin{bmatrix} -\omega\lambda_q \\ \omega\lambda_d \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Entonces para condiciones balanceadas el voltaje de secuencia cero es cero

$$\begin{bmatrix} v_{dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{dq} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Formulación de corriente

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{0dq} & L_m \\ L_m & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Que puede escribirse como

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dq} \\ \lambda_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dq} & L_m \\ L_m & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \\ i_F \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Además

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q \\ 0 & r_f & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & r_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 \\ kM_F & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 \\ kM_F & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

3.2.9 Ecuación de onda

Hasta ahora se han tomado en cuenta únicamente los parámetros eléctricos del generador, sin embargo no podemos ignorar las características mecánicas de la máquina y las variables que las describen.

La ecuación de torques para un generador síncrono está dada por:

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_a \quad (3.49)$$

Donde

T_J = constante del rotor.

T_m = par mecánico de entrada.

T_e = par electromagnético.

T_d = par de amortiguamiento.

T_a = par acelerante.

El par eléctrico T_e está definido como

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.50)$$

Y el par de amortiguamiento T_d

$$T_d = D\omega \quad (3.51)$$

Sustituyendo 3.37 y 3.38 en la ecuación 3.36 obtenemos

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - D\omega = T_a \quad (3.52)$$

Donde

$$\lambda_d = L_d i_d + kM_F i_F$$

$$\lambda_q = L_q i_q$$

Así,

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [L_d i_d i_q + kM_F i_F i_q - L_q i_q i_d] - D\omega \quad (3.53)$$

De aquí que $\dot{\omega}$ pueda definirse como

$$\dot{\omega} = \frac{T_m}{T_J} + \left[\frac{-3P}{4T_J} L_d i_q - \frac{3P}{4T_J} kM_F i_q; \frac{3P}{4T_J} i_d; -\frac{D}{T_J} \right] \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Donde el término

$$\frac{-3P}{4T_J} L_d i_q - \frac{3P}{4T_J} kM_F i_q \quad (3.55)$$

es la descripción de par electromecánico que nos permite introducir la ecuación de onda en el modelo dinámico del generador síncrono, dicho modelo es

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q & 0 \\ 0 & r_f & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & r_q & 0 \\ \frac{-3P}{4} L_d i_q & -\frac{3P}{4} kM_F i_q & \frac{3P}{4} i_d & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 & 0 \\ kM_F & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Resulta práctico expresar este modelo como una ecuación de la forma $\frac{dx}{dt} = Mx + Bu$, donde el vector de las derivadas de las corrientes es el término izquierdo de la igualdad y puede apreciarse con facilidad la variación de las corrientes de salida

debido al voltaje de excitación, el torque de entrada y los voltajes en devanados del generador. El modelo previo se desarrolla a continuación.

Los voltajes a la salida del generador se describen como:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q & 0 \\ 0 & r_f & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & r_q & 0 \\ \frac{-3P}{4} L_d i_q & \frac{3P}{4} kM_F i_q & \frac{-3P}{4} i_d & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & 0 & 0 \\ kM_F & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Y la variación de corrientes en cada devanado genera voltajes que pueden entenderse como resultado de:

$$\begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ \lambda_q & 0 & -\lambda_q & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_q \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Despejando el vector de corrientes variantes en el tiempo:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ G\lambda_q & 0 & G\lambda_q & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_F \\ v_q \\ T_L \end{bmatrix} \right\} \quad (3.59)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d L_1 & -r_f L_2 & 0 & -\lambda_q L_1 \\ -r_d L_3 & -r_f L_4 & 0 & -\lambda_q L_3 \\ 0 & 0 & \frac{-r_q}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{G\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{G\lambda_q}{T_J} & \frac{-D}{T_J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 v_d + L_2 v_F \\ L_3 v_F + L_4 v_q \\ \frac{1}{L_q} v_q \\ \frac{1}{T_J} T_L \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Finalmente la transformación de Park queda como:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_q \\ -\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}e_1 + b_{12}e_6 \\ b_{21}e_1 + b_{22}e_6 \\ b_{31}e_{12} \\ b_{41}e_{16} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Donde

$$\begin{bmatrix} b_{11}e_1 + b_{12}e_6 \\ b_{21}e_1 + b_{22}e_6 \\ b_{31}e_{12} \\ b_{41}e_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_f \\ V_q \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

3.3 Simulación en 20Sim

3.3.1 Entorno 20SIM

20 Sim es un programa de modelado y simulación para sistemas mecánicos, electrónicos y eléctricos. Este software permite la introducción de modelos de sistemas mediante ecuaciones o gráficamente, utilizando diagramas de bloques, componentes físicos y diagramas de bond graph, incluso si resulta práctico para el diseñador pueden interconectarse elementos de un tipo de diagrama con otros elementos de diagramas diferentes, así el proceso de introducción de datos para la creación de un modelo en 20 sim se realiza de forma similar a dibujar un esquema de ingeniería.

20sim cuenta con diferentes cajas de herramientas que permiten simular y analizar el comportamiento de sistemas sencillos hasta sistemas dinámicos de dominios

múltiples y crear sistemas de control. Mientras que el alcance de este programa es bastante amplio utilizaremos únicamente las herramientas necesarias para concluir este documento de manera precisa y satisfactoria.

3.3.2 Introducción del sistema de ecuaciones

Como mencionamos anteriormente la introducción de un modelo de un sistema en 20 sim puede realizarse mediante ecuaciones o diagramas; dependiendo de la complejidad del sistema y de la naturaleza y propósito del mismo, puede resultar más sencillo hacerlo de una u otra manera.

Para el modelado del generador síncrono pudiera resultar igual de sencillo o complejo la introducción de datos mediante un diagrama de bloques que si lo hiciéramos con matrices de ecuaciones, pero como el propósito de este documento es el diseño de una excitatriz, considero que un diagrama de bloques puede ofrecernos la estructura más simple y nos permite visualizar con mayor facilidad cada sección del sistema que analizaremos.

Previamente, obtuvimos el modelo matemático general para un generador síncrono (ecuación 3.48). Dicho modelo es un arreglo matricial de la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.63)$$

Que si bien no representa una solución complicada del sistema, cuando tenemos suficientes parámetros en la ecuación el diagrama de bloques que la representa puede resultar difícil de leer; sin embargo la solución de este sistema es básicamente el incremento de operaciones con el mismo procedimiento. Para que el lector pueda comprender fácilmente el proceso de solución del diagrama de bloques utilizado en el modelo del generador síncrono, a continuación se presenta la resolución de un sistema de ecuaciones con una matriz de 2x2 y que respeta la forma $\dot{x} = Ax + Bu$ con la que estaremos trabajando. Asumiremos que el lector está familiarizado con las

operaciones de multiplicación de matrices y vectores y la lectura de un diagrama de bloques sencillo.

Para un sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & -10 \\ 2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} u \tag{3.64}$$

Su diagrama de bloques:

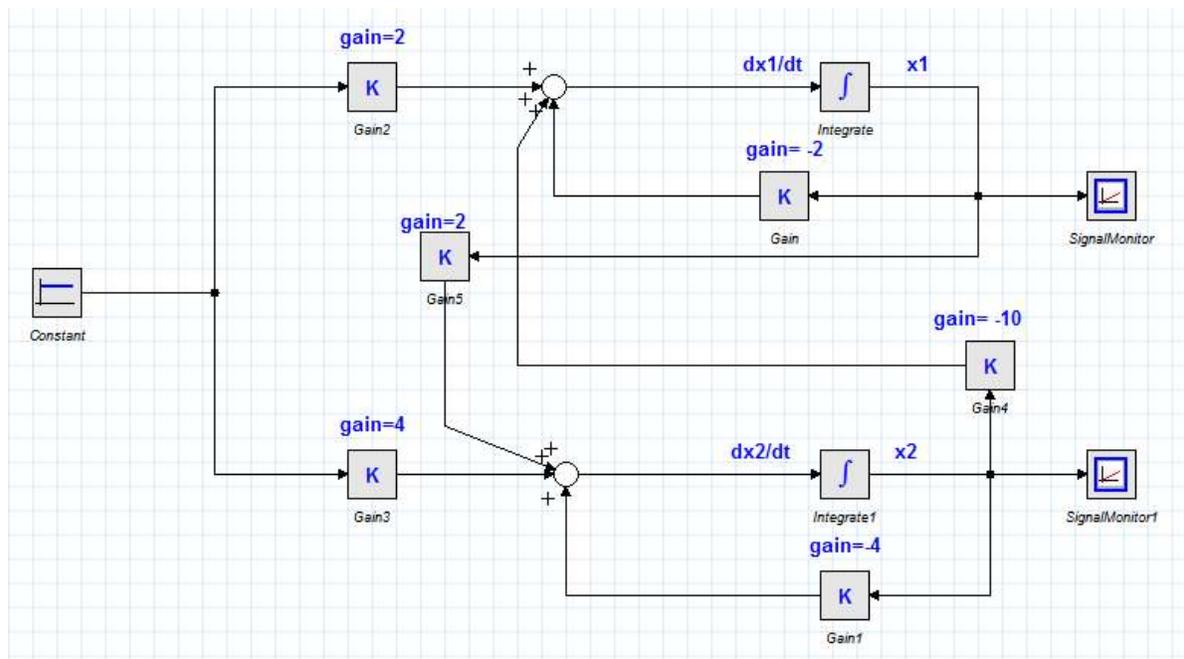


Figura 3.3 Representación en diagrama de bloques de la ecuación 3.64

Y las señales a la salida

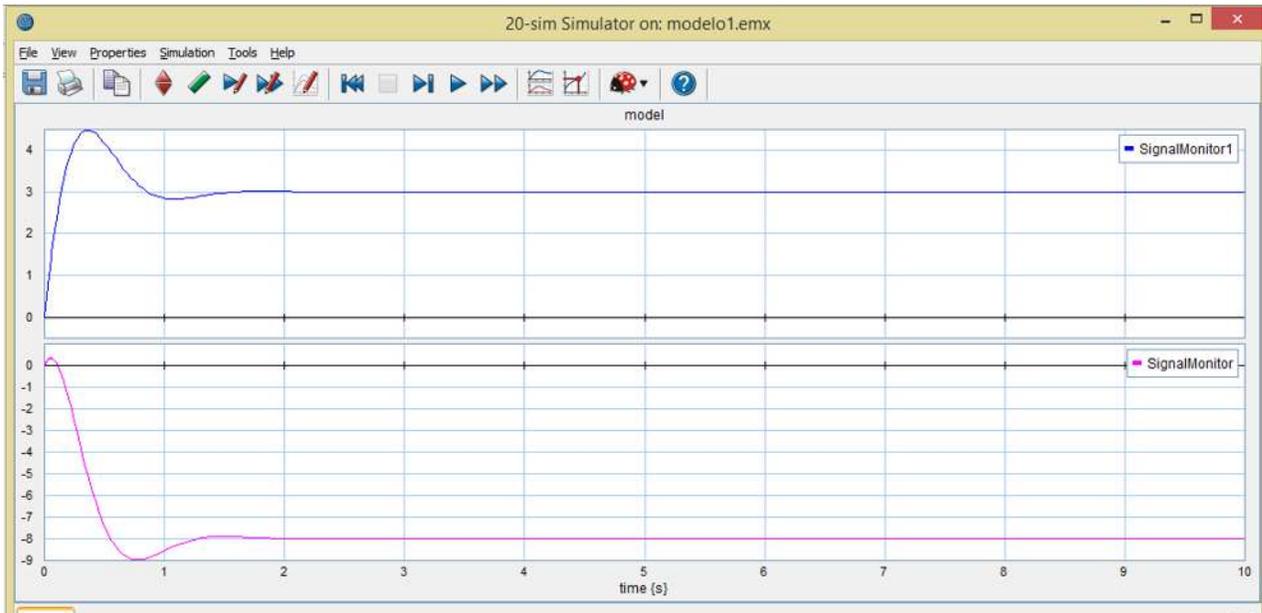


Fig. 3.4 Señales resultantes de la simulación de la ecuación 3.49

La figura 3.4 es sencillamente la respuesta del sistema para cada una de las variables x_1 y x_2 que representan, en este caso, los valores de corriente para los que se cumplen las ecuaciones resultantes en el modelo de Park (ecuación 3.48).

En cuanto al diagrama de bloques observe que son sólo dos sistemas de integración y sus respectivas ganancias, la entrada es constante y tiene un valor inicial de 7. La introducción de datos al simulador fue únicamente mediante el diagrama.

3.3.3 Simulación del modelo de Park de un generador

Síncrono

Una vez comprendido el proceso de introducción de datos a 20sim podemos enfocarnos en el modelo del generador síncrono que definimos anteriormente.

El sistema que se explicará a continuación es la simulación de un Generador síncrono alimentado con las señales de voltaje de directa V_d y V_q que como podemos recordar son las obtenidas de la transformación de Park de los voltajes V_a , V_b y V_c de alterna (la transformación de Park para V_c resulta en $V_0=0$, así que se considera como una salida a tierra). Dicha transformación de Park queda resumida en un bloque K que realiza las siguientes ecuaciones:

```
variables
  real teta;
equations
  teta=2*pi*F*time;
  Vo1 = sqrt(2/3) * (Va1/sqrt(2)+Vb1/sqrt(2)+Vc1/sqrt(2));
  Vd1 = sqrt(2/3)* (Va1*cos(teta)+Vb1*cos(teta-2*pi/3)+Vc1*cos(teta+2*pi/3));
  Vq1= sqrt(2/3)* (Va1*sin(teta)+Vb1*sin(teta-2*pi/3)+Vc1*sin(teta+2*pi/3));
|
```

Fig. 3.5 Ecuaciones de la transformación de Park introducidas al sistema en 20SIM

Podemos observar que se toman en cuenta las tres entradas sinusoidales que representan la entrada de corriente alterna en el sistema y el ángulo θ de la posición del rotor respecto a la referencia a .

Inicialmente se considera el voltaje de excitación V_f como independiente de la salida del sistema y así es como tomará en cuenta para la simulación del sistema mostrado a continuación.

La matriz obtenida en la sección 3.2.8 (ecuación 3.48) se traduce para su introducción a 20sim en diagrama de bloques en 4 procesos de integración de variables que se relacionan entre sí de la misma forma en que lo hacen las variables de un sistema de ecuaciones de 4×4 .

El diagrama de bloques resultante para el modelo del generador alimentado es el siguiente:

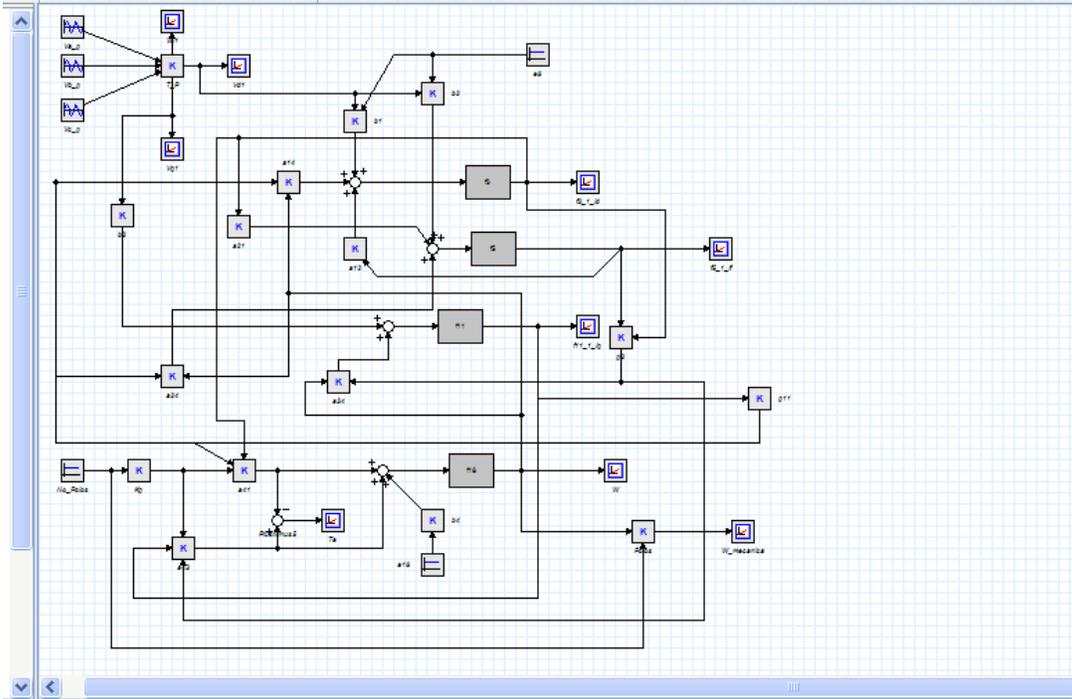


Fig. 3.6 Diagrama completo del modelo de Generador Síncrono

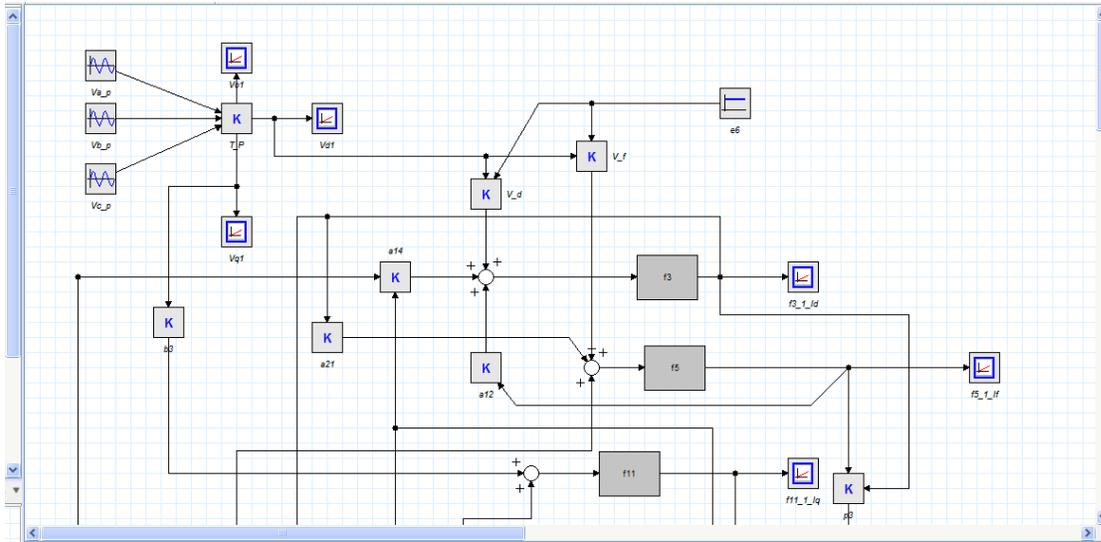


Fig. 3.7 Zoom de la parte superior del modelo de Generador

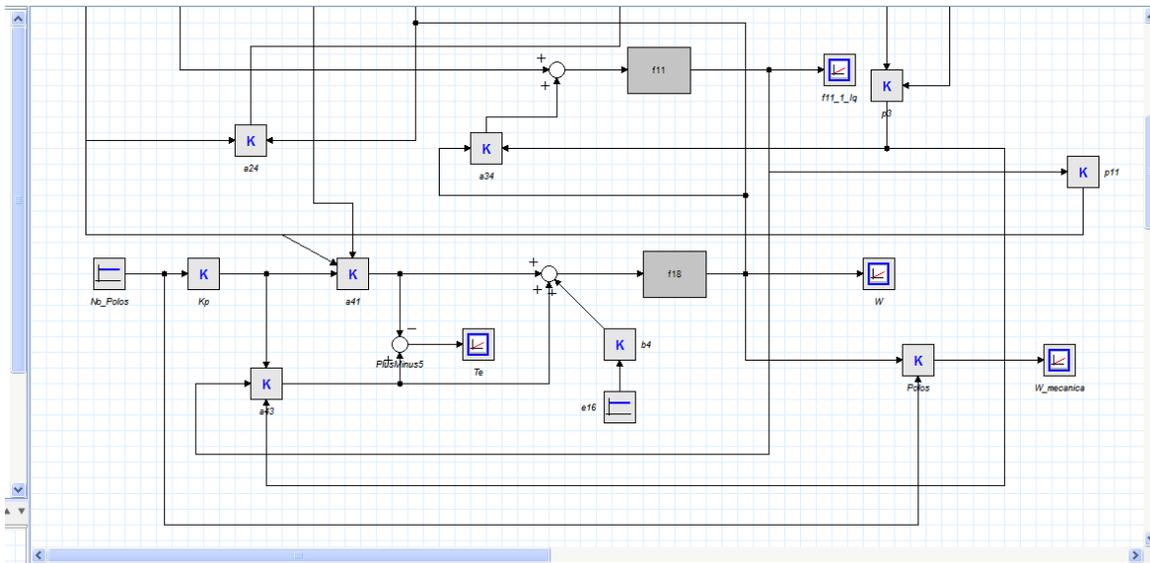


Fig. 3.8 Zoom de la parte inferior del modelo de Generador

Los bloques f3, f5, f11 y f18 son sistemas de integración, cada uno es una representación del siguiente diagrama (fig.3.9)

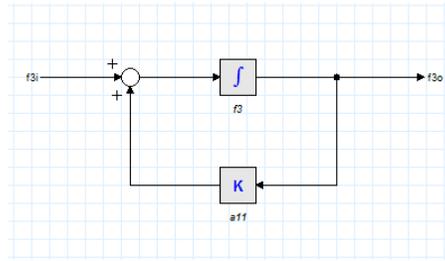


Fig 3.9 Diagrama en el interior de f3, f5, f11 y f8

(Para la variable de corriente con la misma denominación del bloque integrador).

Las tres entradas Va, Vb y Vc son ondas sinusoidales de 60 Hz, cada una defasada 120° de la otra y considerando que if sea igual a cero.

Al correr la simulación del sistema las salidas del generador se ven como:

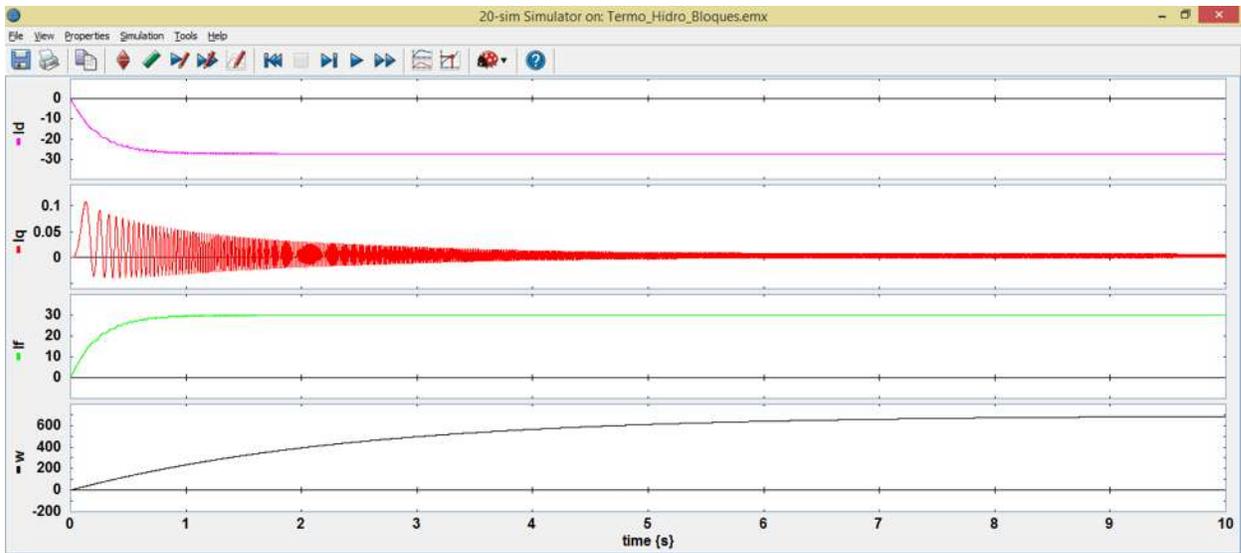


Fig. 3.10 Señales a la salida del generador síncrono en la simulación en 20SIM

Capítulo 4

Modelado y simulación de un generador síncrono con excitatriz.

4.1 Sistemas de Excitación.

El sistema de excitación de una máquina comprende la fuente de corriente de excitación de campo conectada y los elementos de control y regulación de dicha corriente. El sistema de excitación debe contribuir al efectivo control de la tensión y responder rápida y adecuadamente a las perturbaciones que pudieran ocurrir en el sistema.

Un diseño eficiente de un sistema de excitación debe cumplir con los requerimientos a continuación descritos:

- Velocidad de respuesta.
- Proveer límites y protección para prevenir daños propios y de la máquina.
- Confiabilidad y accesibilidad.

Históricamente los sistemas de excitación han mejorado su sistema de potencia, yendo desde el control manual antes de la década del 20, la evolución de sistemas que permitían una respuesta más rápida ante perturbaciones, la inclusión del PSS (Estabilizador de Potencia del Sistema) para la amortización de oscilaciones y finalmente los sistemas de excitación actuales que permiten una respuesta

prácticamente instantánea con altas tensiones de excitación y que incluyen circuitos de control y protección del sistema.

Los componentes de un sistema de excitación se ordenan como se describe en la siguiente figura:

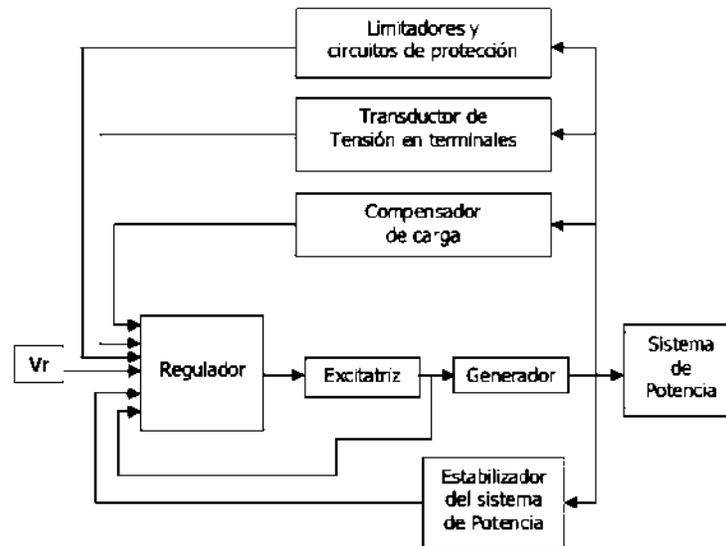


Fig. 4.1 Diagrama de bloques representativo de la conformación de un sistema de excitación.

Específicamente la excitatriz y el regulador son los elementos que conciernen a éste documento, por esta razón no profundizaremos en la explicación de la relación de los demás elementos en el sistema de excitación (elementos cuya función en el sistema se describe en el propio nombre) y nos centraremos en la justificación de la excitatriz que se propone en la sección 4.3.

4.2 Excitatriz de un Generador Síncrono.

La excitatriz de un Generador síncrono es la encargada de suministrar y regular la corriente necesaria en el rotor para convertir a este en un electroimán. Sin embargo, suministrar corriente y voltaje a un elemento rotor representa algunas dificultades mecánicas al conectarse a los devanados de dicho elemento. La solución ante estas limitantes puede ser mecánica o eléctrica y da lugar a diferentes tipos de excitatriz. Todas ellas deben tener idealmente la capacidad de regular la tensión de alimentación del rotor, para variar el campo magnético de acoplamiento.

En la excitatriz estática o de anillos rotativos y escobillas, que es la más habitual en generadores de gran tamaño, el voltaje de la energía eléctrica se modifica mediante transformadores y se rectifica, obteniendo una corriente continua de un voltaje y una intensidad máxima determinada. Para conectar esta tensión continua regulada al rotor, que normalmente estará girando, se utilizan dos anillos concéntricos al eje rotor, cada uno de ellos conectados a un extremo de la bobina del rotor, y un conjunto de escobillas de grafito, que es un material conductor y autolubricado. Las escobillas se desgastan con el tiempo, por lo que se requiere su sustitución cada cierto tiempo. Con la ayuda de componentes electrónicos, diodos y rectificadores es posible variar la tensión continua.

4.3 Modelado y simulación de una excitatriz.

Como ya vimos en la sección 3.3 la introducción de datos en 20SIM es más práctica mediante el uso de diagrama de bloques, sin embargo una de las ventajas de éste software es que permite la conexión entre diagramas diferentes, por ejemplo entre diagramas de bloques y circuitos eléctricos.

La excitatriz que simularemos rectifica las corrientes a la salida del generador que hemos simulado anteriormente y las utiliza para la modulación del voltaje de excitación suministrado al campo del generador de acuerdo al diagrama de la figura 4.1.

El diseño de esta excitatriz en 20SIM se realizó como un diagrama de circuito eléctrico utilizando diodos semiconductores y fuentes moduladas de voltaje. Además se añadió un filtro RC en la salida del rectificador como se muestra en la figura 4.2.

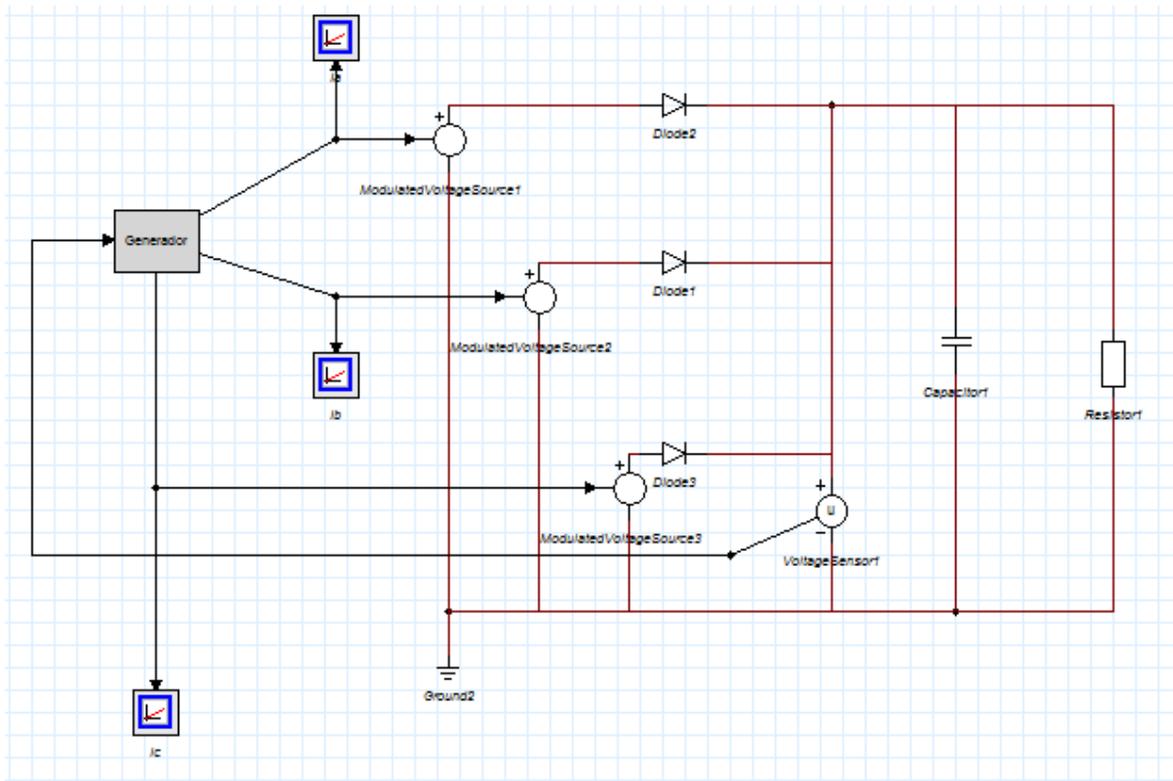


Fig 4.2 Simulación de excitatriz en 20SIM

El bloque *Generador* contiene el circuito diseñado en la sección 3.3.3 para el Generador síncrono mediante la transformación de Park, a éste circuito se le agregó un bloque K de ganancia, que funge como la transformación inversa de Park, así a la salida de dicho bloque podemos observar las mismas señales de voltaje a la entrada del generador.

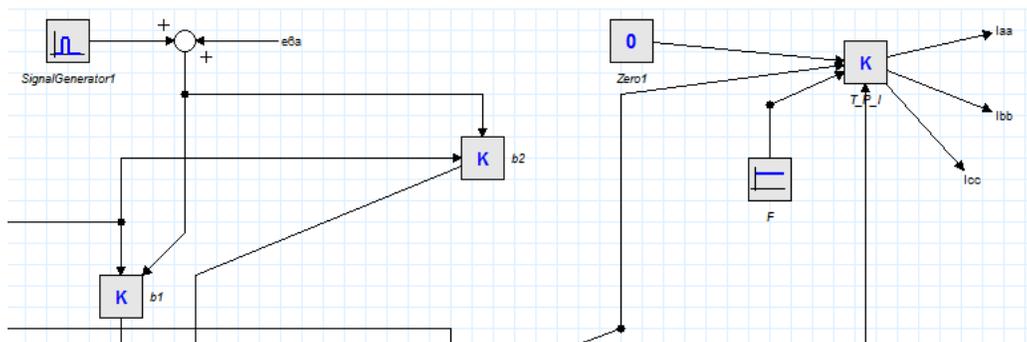


Fig 4.3 Cambios introducidos al modelo de Generador Síncrono

```

variables
  real teta;
equations
  teta=2*pi*F*time;
  Va = sqrt(2/3) * (V0/sqrt(2)+Vd*cos(teta)+Vq*sin(teta));
  Vb = sqrt(2/3)* (V0/sqrt(2)+Vd*cos(teta-2*pi/3)+Vq*sin(teta-2*pi/3));
  Vc = sqrt(2/3)* (V0/sqrt(2)+Vd*cos(teta+2*pi/3)+Vq*sin(teta+2*pi/3));
  
```

Fig 4.4 Ecuaciones del sistema de Generador y Excitatriz

La señal de retroalimentación al Generador, llega al interior del bloque sumándose a b1 y b2 además de una señal cuadrada, esta señal brinda el primer impulso de voltaje para la excitación del generador y se desactiva cuando el voltaje en terminales del generador es suficiente para mantener la alimentación constante del rectificador de la excitatriz. En este caso se ha considerado un tiempo de 8 segundos para su desactivación.

```
parameters
  real stop_time = 8.0 {s};
  real amplitude = 20.0 {};
```

```
variables
  boolean hidden change;
```

```
equations
  "calculate at least at the start and stop time"
  change = timeevent (start_time) or timeevent (stop_time);

  "calculate the block signal"
  output = amplitude * (step (start_time) - step (stop_time));
```

Fig 4.5 Parámetros de la señal de impulso de excitación

A la salida del rectificador se observan las siguientes gráficas, las primeras tres corresponden a los voltajes de salida los cuales de 0 a 8 segundos tienen un valor mayor debido a la intervención de la señal auxiliar, que se desactiva después del tiempo establecido. Las siguientes dos gráficas corresponden al voltaje en la resistencia del rectificador y el voltaje a la salida del mismo.

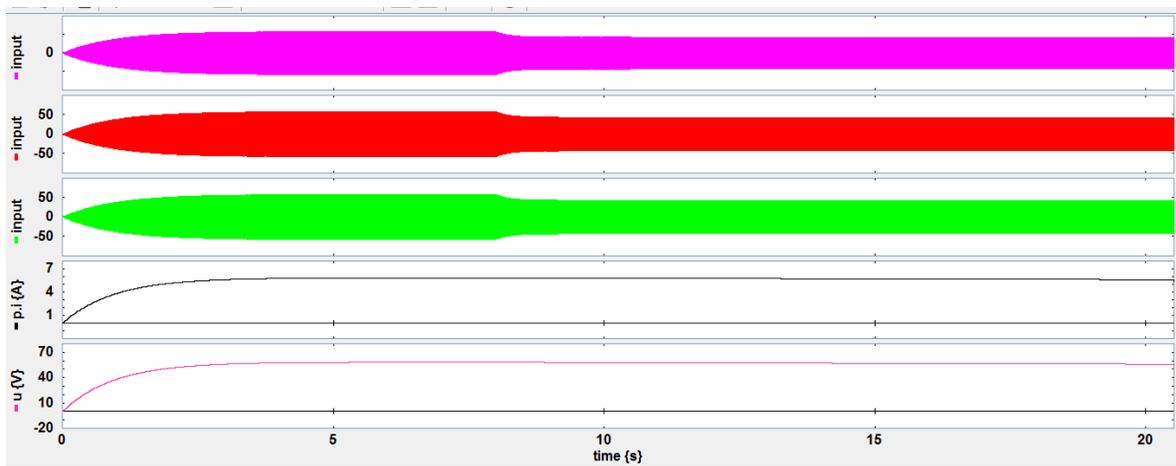


Fig 4.6 Señales rectificadas a la salida de la excitatriz

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Los sistemas de excitación estática, son una opción práctica en la utilización en conjunto con generadores de baja velocidad y alto rendimiento, por ejemplo en pequeños sistemas de generación hidráulica. Por sus ventajas también son utilizados en conjunto con generadores de mayor capacidad.

La ventaja de no tener partes móviles y la reducción en consecuencia del desgaste mecánico, facilita y economiza el mantenimiento del sistema mecánico. En cuanto a la parte eléctrica y de potencia, los sistemas de excitación cuentan con elementos de control electrónicos y microelectrónicos, útiles y sustituibles lo cual resulta ser una ventaja y una desventaja al mismo tiempo, pues dificulta los procesos de mantenimiento porque exige conocimiento de dichos componentes por el encargado del mantenimiento. Además el movimiento rápido del mercado actual dificulta encontrar repuestos específicos.

Este trabajo se enfocó únicamente en la creación de un antecedente de indagación acerca de la utilización de circuitos rectificadores de elementos semiconductores no controlados para la excitatriz de un sistema completo de excitación. Quedaron fuera del alcance de este documento el control, sincronización, y dimensionamiento de un sistema de excitación completo.

Al mismo tiempo el conocimiento teórico adquirido puede ser aplicado mediante la observación de un sistema simulado al que se le han introducido parámetros de un sistema hipotético estable, lo cual representa una ventaja en cuanto a tiempo y

materiales requeridos sobre una práctica de laboratorio en la que frecuentemente se está limitado en estos dos últimos factores.

Para éste proceso se eligió el simulador 20SIM, un software eficiente y novedoso en cuanto a interpretación e introducción de datos de un sistema relativamente complejo, ya que representa una ventaja sobre otros simuladores igualmente eficientes como MATLAB y PROTEUS pero cuyas interfaces y entradas de datos son más propensas al error humano por ser menos didácticas y visuales. El lenguaje sencillo e intuitivo de 20SIM permiten al usuario identificar fácilmente la presencia de un error en la programación de su circuito o esquema, permite la manipulación de entradas y salidas de información de manera visual, consciente y ordenada que lleva a la comprensión y deducción anticipada de los fenómenos que puedan observarse en el proceso de diseño y modelado de un sistema.

En éste trabajo, se ha creado una base para el desarrollo de simulaciones de sistemas estables sin falla, visualización de cambios en parámetros según sean afectadas variables independientes, simulación de fallas, pérdida de excitación, entre otros posibles escenarios. Como se ha mencionado párrafos arriba, el desarrollo de ésta tesis está centrada únicamente en la excitatriz de un sistema mucho más complejo de excitación, además de haber considerado que la excitatriz contiene un circuito rectificador no controlado.

Se recomienda tomar como este trabajo como punto de partida para el desarrollo de un algoritmo más complejo, que pudiera emplearse para el análisis de una excitatriz del tipo que actualmente es utilizada en la industria, o bien para modelar otros niveles más complejos del sistema de excitación en el que pueda utilizarse esta excitatriz. Tomando como base el algoritmo y el diagrama que aquí se han planteado es posible realizar los ajustes y modificaciones pertinentes para incluir un control de voltajes y corrientes a la salida de la excitatriz, esto se desarrollaría al considerar que el circuito rectificador estaría conformado por tiristores en lugar de diodos no controlados.

También es recomendable aprovechar el modelo matemático que se ha desarrollado y modificar las variables que describen los distintos parámetros de la máquina, haciendo lo mismo con el modelo matemático que sería desarrollado para la excitatriz con tiristores, para así observar las diferencias, ventajas y desventajas que tiene una excitatriz compuesta por elementos semiconductores controlados sobre una excitatriz con elementos semiconductores no controlados.

Bibliografía

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control, Mc Graw Hill, Inc., California, 1993, pp.45-198, 827-872.

[2] Chapman S. J., Máquinas eléctricas, Ed. McGraw-Hill, México 1995

[3] [Cortés, 2002] Cortés G., Control de Motores de Inducción Utilizando la Técnica de Rediseño de Lyapunov, Tesis Maestría, Cenidet, Cuernavaca, Mor., Diciembre 2002.

[4] Características del Generador Síncrono. Anónimo.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/630/A4.pdf?sequence=4>.

[5] GE GENERATORS - AN OVERVIEW J. J. Gibney, III GE Industrial & Power Systems Schenectady, NY

[6] Transformación de Park o D-Q. Apéndice B. B1: Expresión de la matriz de transformación.[Anónimo].

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6330/11Sam11de15.pdf>