

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Eléctrica

**Modelado y Simulación de una Excitación
Básica de un Generador Síncrono**

Tesis

Presenta:

Arturo Velázquez Vázquez

Asesor:

Dr. Gilberto González Avalos

**Modelado y Simulación de una Excitación
Básica de un Generador Síncrono**

Tesis

Que para Obtener el Título de
Ingeniero Electricista

Presenta

Arturo Velázquez Vázquez

Asesor:

Dr. Gilberto González Avalos

Marzo de 2011

Agradecimientos

Es mi gratitud y un gesto pero muy noble agradecerle a Dios por haber me dado la existencia e iluminarme en cada instante de mi tiempo profesional.

A mi asesor que sin él no habría concluido esta tesis, además que con sus respectivos consejos se aclararon dudas.

En especial a aquellos personajes que me brindaron su confianza, ayuda, amistad y atención para concluir la licenciatura que pese a condiciones lo logre.

Dedicatoria

Esta tesis lo dedico a mi progenitor y a todos aquellos que permanentemente me apoyaron con su espíritu alentador contribuyendo a lograr mis metas y objetivos.

A los que creyeron en mí y en especial aquellos individuos que me brindaron su ayuda, confianza, atención y lo más importante su amistad.

A mis amigos a la institución que me ha formado a la amabilidad de esas personas que contribuyeron para sobrevivir a este nivel.

Contenido

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria	i
Contenido	I
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 La Excitación de las Máquinas Síncronas	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Justificación	3
1.4 Metodología Científica	3
1.5 Estructura de la Tesis	4
Capítulo 2. Las centrales de Generación	5
2.1 Introducción	5
2.2 Centrales Termoeléctricas	6
2.3 Centrales Hidroeléctricas	7
2.4 Central Nuclear	11
2.5 Centrales Eólicas	13
2.6 Centrales Solares Termoeléctricas	15
2.7 Centrales Solares Fotovoltaicas	16
2.8. Centrales Maremotrices	18
Capítulo 3. Los Sistemas de Excitación en Centrales Eléctricas	19
3.1 Introducción	19
3.2 Clasificación de Sistemas de Excitación	20
3.2.1 Excitación de Corriente Continua	20
3.2.2 Excitación de Sistemas de Corriente Alterna	21
3.2.2.1 Sistemas de Rectificación Estacionarios	22
3.2.2.2 Sistemas de Rectificación Rotacional	24
3.2.3 Sistema de Excitación Estática	25
3.2.3.1 Sistema de Fuente de Potencial y Rectificador Controlado	25
3.2.3.2 Sistema de Fuente Compuesta y Rectificador	26
3.2.3.3 SCE Compuesto Controlado	27
3.3 Sistemas de Excitatrices	28

Capítulo 4. Modelado y Simulación de una Excitatriz	33
4.1 Introducción	33
4.2 Descripción Matemática de la Máquina Síncrona	33
4.3 Ejes Directo y en Cuadratura	34
4.4 Representación Esquemática de los Circuitos de la Máquina Síncrona	35
4.5 Transformación de Park	36
4.6 Ecuaciones de Enlace de Flujo	37
4.7 Ecuaciones de Voltaje	40
4.8 Formulación de Ecuaciones de Espacio en el Estado	41
4.9 Formulación de Corriente	41
4.10 La Ecuación de Onda Normalizada	42
4.11 Diodo	44
4.12 Rectificador de Media Onda Monofásico	45
4.13 Rectificador de Onda Completa Monofásico	47
4.14 Rectificador de Media Onda Trifásico	49
4.15 Rectificador de Onda Completa Trifásico	49
4.16 Simulación Dinámica en Diagrama de Bloques en 20-Sim	51
4.16.1 Señal de Entrada Senoidal	51
4.16.2 Ganancia	52
4.16.3 Graficador	52
4.16.4 Sumador	53
4.16.5 Bloque Dinámico	53
4.17 Simulación de un Generador Síncrono Trifásico	53
4.18 Simulación de un Rectificador de Onda Completa	58
4.19 Simulación de un Rectificador Trifásico	61
4.20 Simulación del Generador con el Rectificador	62
4.21 Simulación del Generador con el Rectificador	62
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	67
5.1 Conclusiones	67
5.2 Recomendaciones	68
Bibliografía	69

Capítulo 1

Introducción

La mayor parte de las Industrias Eléctricas se basan en utilizar corriente alterna, se transmite como tal y se consume de la misma forma, además se utiliza en la mayoría de aparatos electrónicos, por lo tanto, si bien, es importante el estudio de la corriente alterna para comprender los fundamentos de la electricidad el análisis de la corriente continua es necesario para la comprensión de la tecnología que en práctica se utiliza energía eléctrica, para una buena comprensión en cuanto a la generación de la corriente alterna es necesario entender el siguiente fundamento. “Cuando un conductor se mueve en un campo magnético de tal forma que corta las líneas de flujo se crea la fuerza electromotriz”, la dirección de la fuerza electromotriz depende del sentido del movimiento del conductor. Una excitatriz se le llama al movimiento de un imán frente a un embobinado.

Para el análisis de la corriente alterna es importante estudiar la aplicación de la excitatriz y para ello es necesario entender una gran parte de los fenómenos físicos en sus diferentes circunstancias (vibración, respuesta de energía de un circuito amortiguado, etc.).

Desde el punto de vista de los sistemas de potencia, el sistema de excitación contribuye a un control efectivo de voltaje y por ello es ampliamente usado para mejorar la estabilidad del sistema. En particular, se usa en coordinación con estabilizadores de potencia (Power System Stabilizer) para amortiguar oscilaciones y el control rápido ante un disturbio de manera que mejora la estabilidad transitoria.

1.1 La Excitación de las Maquinas Síncronas

El control de la tensión de una maquina síncrona se realiza modificando la corriente de su devanado de campo para ello se requiere una excitatriz la cual está conformado por un circuito rectificador monofásico basado en tiristores.

La excitación es la encargada de controlar las variaciones o perturbaciones temporales, tanto transitorias como estacionarias sin alterar la operación normal del generador.

Este tipo de excitación suministra tensión continua al devanado de campo de la máquina síncrona y puede tener diferentes tipos de operación y así adquirir niveles de tensión requerido en el sistema eléctrico y cumplir con las especificaciones de un buen funcionamiento.

En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de excitación para un generador síncrono.

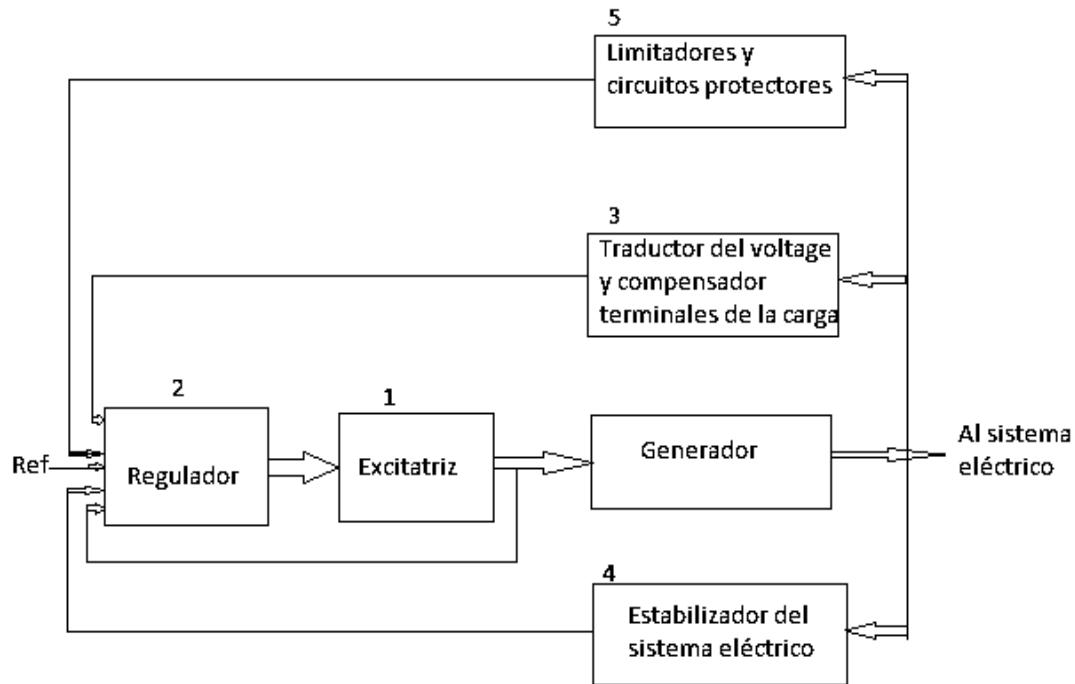


Figura 1.1 Diagrama de excitación de un generador síncrono

Los principios físicos tanto de generadores como de motores son exactamente lo mismo y se basan en la interacción electromagnética entre campos y corrientes variables. La aplicación principal de las máquinas síncronas es en generación, prácticamente todos los generadores son síncronos, exceptuando la generación eólica que utiliza generador asíncrono y un sincronizador para conectarse a la red. La principal diferencia entre los generadores síncronos se encuentra en su sistema de alimentación en continua para la fuente de excitación situada en el rotor.

1.2 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es analizar y comprender las excitatrices en centrales de generación de energía eléctrica. Se propone el modelado de un generador síncrono en coordenadas $d - q$ en diagramas de bloques basado en el software 20 - Sim. Así mismo, la transformación de Park y el modelado de excitación se introducen al generador, y finalmente se presenta la simulación del sistema completo comprobándose la operación del sistema de generación con excitación.

1.3 Justificación

El modelado y análisis de la excitación de un generador síncrono es un tema de todo ingeniero electricista. Sin embargo, en muchas ocasiones no se le da la atención debida en análisis de simulación o prácticas de laboratorio experimentales, ya que esta excitación generalmente se reduce a una fuente de corriente directa que requiera la máquina.

No obstante, en sistemas de generación de gran potencia es indispensable el análisis detallado de su sistema de generación. Por lo tanto, esta tesis pretende contribuir en el modelado de un sistema de excitación que pueda servir de base para el análisis del sistema de generación.

1.4 Metodología Científica

Se realiza una breve introducción de análisis de excitación en centrales de generación así como el enfoque de las principales centrales generadoras para continuar con los diferentes sistemas de excitatrices en las plantas eléctricas, por lo que se analiza el generador síncrono en corriente directa y corriente alterna.

También se realiza el modelado y la descripción matemática en los ejes $d - q$, continuando con la simulación del generador síncrono trifásico para agregarle el modelado de rectificador de onda completa y rectificador trifásico.

En la simulación del generador con el rectificador se le conecta una señal de entrada, para finalmente realizar las conclusiones y recomendaciones.

1.5 Estructura de la Tesis

En el capítulo 1 se realiza una breve introducción de los fundamentos de la generación de energía eléctrica así como la excitación de las maquinas síncronas, continuando con las partes principales de la que debe estar compuesta una tesis.

En el capítulo 2 se describen las principales centrales de generación al igual que las partes más importantes que las componen, también se ilustra y muestra los componentes de un generador en la Figura 2.4 que es el equipo que analizaremos en su tipo de excitación.

En el capítulo 3 se analiza los sistemas de control de excitación en las plantas eléctricas así como su tipo de clasificación de corriente alterna o directa que se esté analizando, y con ello se describen de manera general los tipos de excitatrices de un generador síncrono con una maquina motriz o usando rectificadores dependiendo del sistema a ocupar.

En el capítulo 4 Se propone un modelado y simulación de una excitatriz para lo cual se hace la descripción matemática de la máquina síncrona con ejes directo o en cuadratura al igual que su representación esquemática de los circuitos de la misma, transformación de Park, ecuaciones flujos de voltaje y de corriente.

Se describe de manera breve los rectificadores, de media y onda completa monofásico y trifásico. Se continúa con la descripción general del software que se utiliza para la simulación de un generador síncrono trifásico al igual que la simulación de los rectificadores de onda completa, trifásico y así completar la simulación del generador con el rectificador agregándole el devanado de campo.

Capítulo 2

Las Centrales de Generación

2.1 Introducción

Una central de generación de Energía Eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras, en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas Centrales Eléctricas, que ejecutan algunas de las transformaciones citadas. Desde que Nikola Tesla descubrió la corriente alterna se han desarrollado infinidad de actividades para distribuir la energía eléctrica a casi todos los lugares habitados, por lo que, junto a la construcción de grandes y variadas centrales eléctricas, se han construido sofisticadas redes de transporte y sistema de distribución. Sin embargo, el aprovechamiento ha sido y sigue siendo desigual en todo el planeta.

La demanda eléctrica de una ciudad o región o país tiene una variación a lo largo del día, este tipo de variación está en función de muchos factores, entre los que destacan: tipo de industrias existentes en la zona y turnos en que realizan en su producción, climatología frío o calor, electrodomésticos utilizados frecuentemente, horas de demanda. La generación de energía debe seguir la curva de demanda y a medida que aumenta la potencia demandada, se debe incrementar la potencia suministrada. En general los sistemas de generación se diferencian por el periodo del ciclo en el que está planificado que sean utilizados; se consideran de base la nuclear y la eólica, de valle la termoeléctrica de combustibles fósiles, y de pico la hidroeléctrica principalmente (los combustibles fósiles y la hidroeléctrica también pueden usarse como base si es necesario). Dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada, las centrales generadoras se clasifican en *termoeléctricas*, *hidroeléctricas*, *nucleares*, *eólicas*, *solares termoeléctricas*, *solares fotovoltaicas* y *mareomotrices*. La mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de los tres primeros tipos de centrales reseñados.

Todas estas centrales, excepto las fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador, movido mediante una turbina será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada.

Para la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean generadores eléctricos, que constan de dos piezas fundamentales: el estator y el rotor. El estator es un cilindro metálico hueco en forma de cañón, cuya superficie interior dispone de ranuras que alojan un bobinado de cobre interconectado. El rotor es un eje macizo, también metálico, que se aloja con capacidad de giro en el interior del estator y cuya superficie también dispone de ranuras que alojan otro bobinado de cobre interconectado que actúa como un electroimán cuando se les aplica una pequeña corriente eléctrica continua proveniente de un tercer equipo exterior llamado excitatriz. La turbina, el alternador y la excitatriz están alineados y comparten el mismo eje de rotación. Cuando el rotor gira a cierta velocidad rpm (necesaria para generar con frecuencia), impulsado por el eje que comparte con la turbina, se produce una corriente inducida en los hilos de cobre del interior del estator. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de proporcionar energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él.

2.2 Centrales Termoeléctricas

Una central termoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede obtenerse tanto de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) como de la fisión nuclear del uranio u otro combustible nuclear. Una planta Termoeléctrica está compuesta de las siguientes partes, citadas en el mismo orden en que intervienen el proceso de producción de energía eléctrica;

- a) Sistema de enfriamiento: Condensadores o Intercambiadores de calor Torres de enfriamiento.
- b) *Plantas de Aguas*: En ella se recibe el agua cruda, se filtra y se trata para despojarla de lodos, minerales, para llevarla a las calderas en forma apta para producir el vapor.
- c) *La caldera*: En ella se hace la combustión para producir el vapor.
- d) *La Turbina de Vapor*: El vapor proveniente de la caldera mueve el rotor de la turbina para producir la fuerza motriz requerida para mover el generador.
- e) *El Generador*: Consta de su rotor y excitatriz o campo y su estator. El movimiento del rotor y su interacción con la excitatriz, posibilitan producir la fuerza electromotriz inducida, en el estator mediante la cual se convierte la energía mecánica proveniente de la turbina en energía eléctrica.

f) *La Subestación*: En ella se recibe la energía proveniente del generador, mediante equipos como transformadores de potencia y equipos de maniobra, se establecen los niveles de voltaje y las conexiones a líneas transporte para llevar la electricidad a los usuarios.

g) *Sala de Control*: Es el recinto donde están quienes operan la termoeléctrica, juntos con los dispositivos de control, de medida y de protecciones.

h) *El Sistema de Enfriamiento*: Cumple la función de enfriar el vapor exhortado o que sale de la turbina para su reutilización como agua condensada; los generadores pueden ser enfriados por aire o por una combinación de aire/agua como en los radiadores de los carros, estos equipos deben operar a temperaturas controladas para no sufrir daños.

El agua utilizada en el enfriamiento es llevada a torres para bajar la temperatura y retornarla a los equipos de generación.

i) *Equipos Auxiliares*: Son los equipos que permiten arrancar la termoeléctrica cuando esta parte de cero o ha estado apagada. Generalmente son pequeños generadores o grupos electrógenos que operan como un motor diesel. También forma parte del banco de baterías que provee de energía a los sistemas de control de la planta ya sea como fuente primaria o de respaldo.

En su forma más clásica de estas centrales tiene caldera en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos por donde circula el agua, la cual se evapora.

El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, se expande a continuación en una turbina de vapor movimiento impulsa un alternador que genera la electricidad. Luego el vapor es enfriado en un condensador donde circula por tubos agua fría de un caudal abierto de un río o por torre de refrigeración.

Las centrales térmicas que usan combustibles fósiles liberan a la atmósfera dióxido de carbono (CO_2), considerado el principal gas responsable del calentamiento global.

2.3 Centrales Hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es aquella que se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a más alto nivel que la central.

El agua se lleva por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central, donde mediante enormes turbinas hidráulicas se produce la electricidad en alternadores.

Las dos características principales de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

La potencia, que es función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la central, y del caudal máximo turbinable, además de las características de la turbina y del generador.

La energía garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, que está en función del volumen útil del embalse, de la pluviometría anual y de la potencia instalada.

La potencia de una central hidroeléctrica puede variar desde unos pocos MW, hasta varios GW.

En la Figura 2.1 se ilustra un embalse de agua de energía renovable, por obtenerse de fuentes naturales virtualmente inagotables.

Este tipo de central es aquella que se utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica, se le aprovecha su energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel también conocido como salto geosico.



Figura 2.1 Embalse de una hidroeléctrica

En la Figura 2.2 se ilustra una represa hidroeléctrica y nombres de algunas partes importantes.

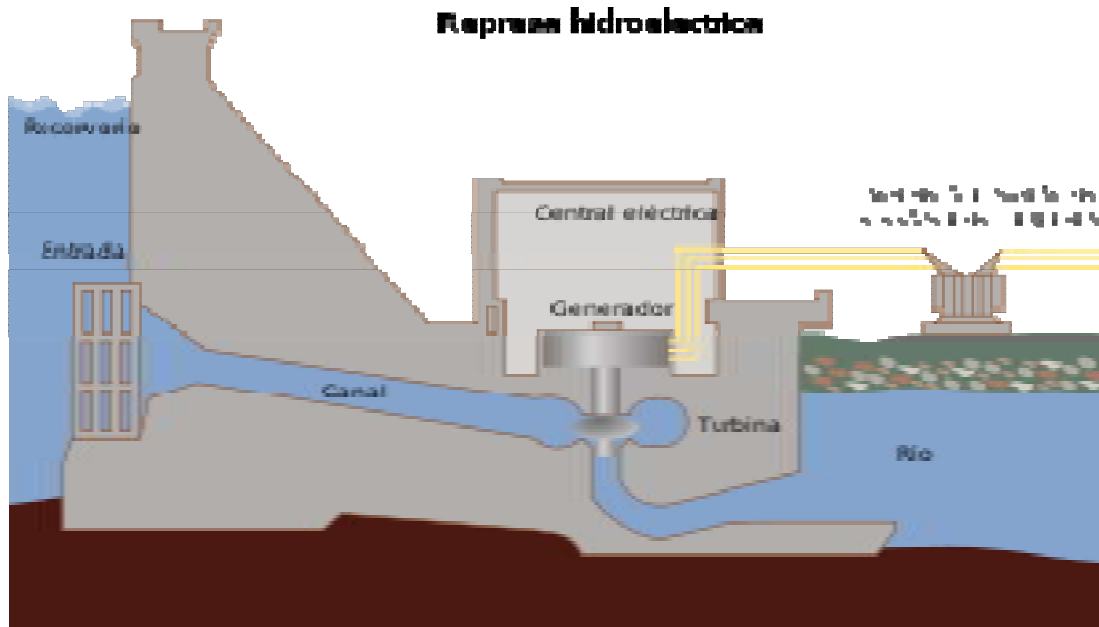


Figura 2.2 Corte transversal de una represa hidroeléctrica

La demanda eléctrica varía constantemente y es necesario que las centrales eléctricas generen la energía demandada en cada instante. Existen centrales que debido a la tecnología de generación que emplean, no pueden variar fácilmente la energía generada mientras que otras centrales tienen diversas restricciones técnicas y económicas sobre estas variaciones. Las centrales hidroeléctricas son una de las tecnologías que menores restricciones presentan a la variación de carga.

Estas centrales se integran en el sistema de "Almacenamiento energético en red" ayudando a adaptar la generación a la curva de la demanda con lo que se reducen las variaciones de energía que tienen que realizar las tecnologías menos apropiadas.

En la Figura 2.3 se ilustra las partes de un generador así como el nombre de cada una de los fragmentos que componen a dicha máquina.

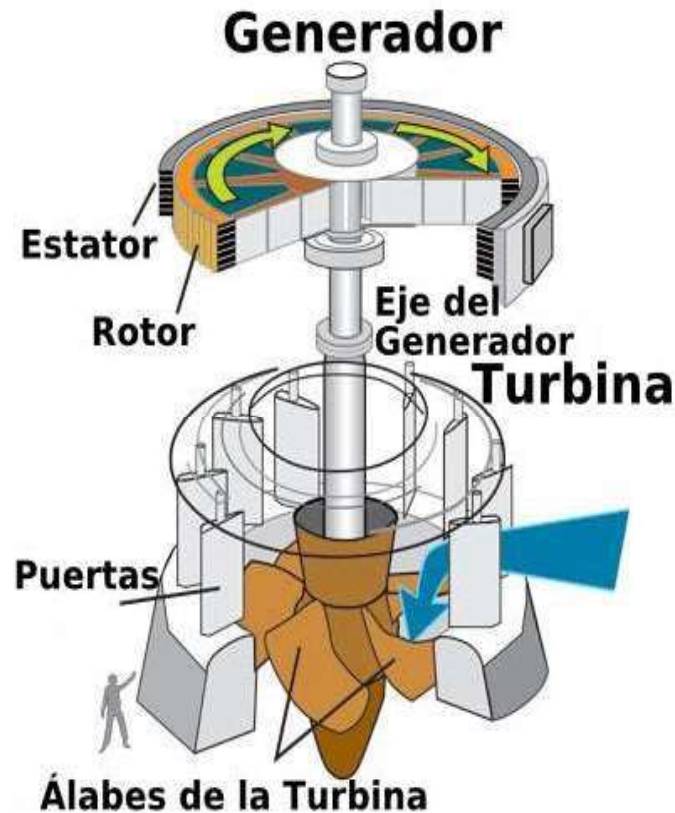


Figura 2.3 Componentes de un generador

Una vez que el agua ha cedido, gran parte de su energía, es restituida al río, aguas abajo de la central, controlándose que la energía residual de la misma forma que no destruya el hecho del río (mediante cuencas de amortiguación, colocación de dientes rompimientos). Solidario con el eje de la turbina y del alternador, gira un generador de corriente alterna llamado excitatriz, utilizado para excitar los polos del rotor del alternador. De esta forma en las terminales del estator aparece una corriente alterna de media tensión y alta intensidad, esta corriente es convertida a continuación, mediante un transformador, en una corriente de baja intensidad y alta tensión para poder ser transportada en adecuadas condiciones físicas y técnicas a los centros de consumo. Normalmente una central dispone de más de un grupo de turbina-alternador. El conjunto de turbinas suelen estar alojado en una sala de máquinas o del edificio central.

2.4 Central Nuclear

Una central nuclear es empleada para la generación de energía eléctrica nuclear y se caracteriza por utilizar materiales fisionables que mediante reacciones nucleares proporcionan calor, esta reacción es usado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica. Estas centrales constan de varios reactores que son contenedores (llamados vasijas) en cuyo interior se albergan varillas u otras configuraciones geométricas de minerales con el elemento fisil(es decir que puedan fisionarse) o fértil (que pueda convertirse en fisil(es decir que puedan fisionarse) por reacciones nucleares, usualmente el uranio y en algunos combustibles el plutonio, generado a partir de la activación del uranio. El proceso de fisión radiactiva, se establece en reacción que es sostenida y moderada mediante el empleo de elementos auxiliares dependiendo del tipo de tecnología empleada. Las instalaciones nucleares son construcciones complejas por la variedad de tecnologías industriales utilizadas y por la elevada seguridad con la que se les denota, su característica hace que sean peligrosa si se pierde su control y prolifera por encima de una determinada temperatura a la que funden los materiales empleados en el reactor, así como si se producen escapes de radiación nociva por esa u otra causa.

Las centrales nucleares constan principalmente de cuatro partes.

- a) El reactor nuclear, donde se produce la reacción nuclear.
- b) El generador de vapor de agua (solo en las centrales PWR).
- c) La turbina, que mueve un generador eléctrico para producir electricidad con la expansión del vapor.
- d) El condensador, un intercambiador de calor que enfría el vapor transformado nuevamente en líquida.

El reactor nuclear es el encargado de realizar la fisión o fusión de los átomos del combustible nuclear, como uranio o plutonio, liberando una gran cantidad de energía calorífica por unidad de masa de combustible. El generador de vapor es un intercambiador de calor que transmite calor del circuito primario, por el que circula el H_2O que se calienta en un reactor, el circuito secundario, transforma el agua en vapor de agua que posteriormente se expande a las turbinas, produciendo el movimiento de estas que a la vez hacen girar los generadores, produciendo la energía eléctrica.

Mediante un transformador se aumenta la tensión eléctrica a la de la red de transporte de energía eléctrica. Después de la expansión en la turbina el vapor es condensado en el condensador donde cede calor al agua fría refrigerante, que en las centrales PWR (*Pressurized Water Reactor*) procede de las torres de refrigeración.

Existen muchos tipos de centrales nucleares cada una con sus ventajas e inconvenientes, existen centrales basadas en fisión nuclear y en fusión nuclear.

En la Figura 2.4 se ilustra una central nuclear con un reactor de agua a presión así como los nombres de cada una de las partes que los componen.

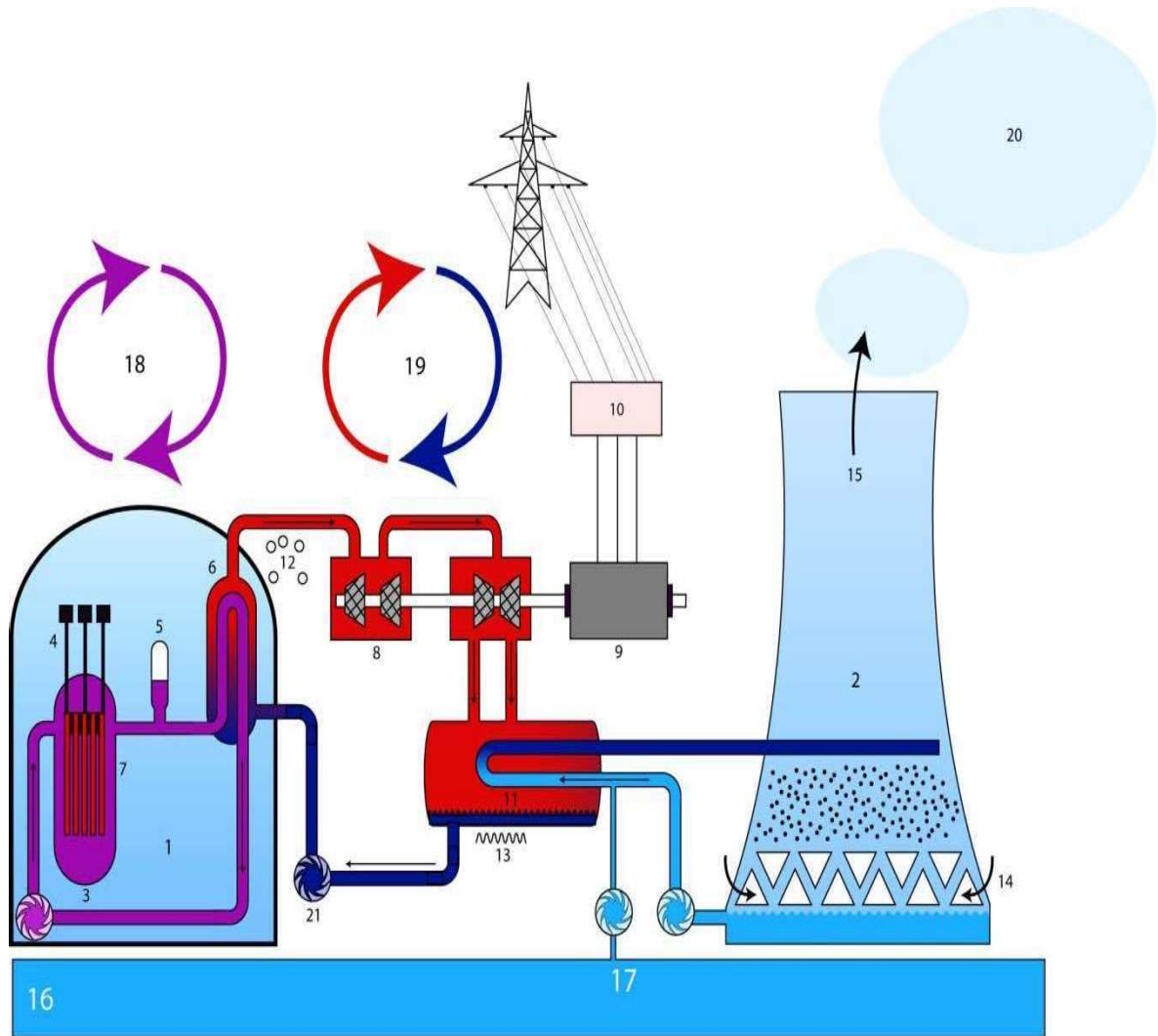


Figura 2.4 Central nuclear con un reactor de agua de presión (PWR)

1-Edificio de contención. 2- Torre de refrigeración. 3- Reactor nuclear. 4- Barras de control. 5- Acumulador de presión. 6- Generador de vapor. 7- Combustible nuclear. 8- Turbina. 9- Generador eléctrico. 10- Transformador. 11- Condensador. 12- Vapor. 13- Líquido saturado. 14- Aire ambiente. 15- Aire húmedo. 16- Río. 17- Circuito de refrigeración. 18- Circuito primario. 19- Circuito secundario. 20- Emisión de aire húmedo (con vapor de agua).

2.5 Centrales Eólicas

La energía eólica es la energía obtenida por el viento, es decir la energía cinética generada por las corrientes de aire y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

El termino eólico viene de latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Eolo, dios del viento en la mitología griega.

La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas.

En la actualidad la energía eólica es utilizada para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores.

Las partes que componen una central eólica son:

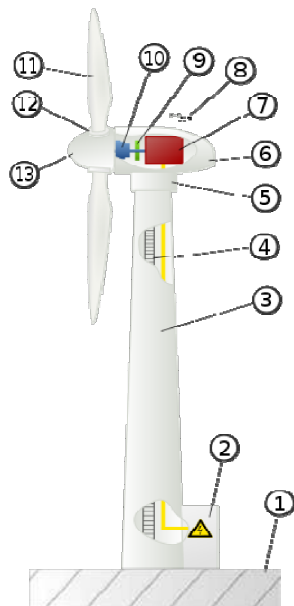
- a) Parque eólico: Conjunto de molinos (hay entre 30 y 100 molinos.)
- b) Cables enterrados.
- c) Centro de control: Se en carga de las condicione de seguridad y el funcionamiento sean los correctos.
- d) Transformadores: Son los encargados de que la tensión de salida hacia la red sea la adecuada.
- e) Líneas de distribución: Encargada de transportar la electricidad.
- f) Accesos: Son las carreteras, caminos y plataformas que permiten el acceso a los generadores con la maquinaria necesaria.
- g) Casas e industrias: Son las construcciones que protegen a los equipos eléctricos de control, transformadores, servicios generales, servicios de vigilancia, etc.

En la Figura 2.5 se ilustra un parque eólico. Un parque consta de una agrupación aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica. Los aerogeneradores se mueven a causa del viento y aprovechan el máximo esta energía natural.



Figura 2.5 Parque eólico

En la Figura 2.6 se ilustra una turbina de viento accionada por la energía eólica, se trata de una turbomáquina que intercambia movimiento con el viento haciendo girar un motor.



1. Cimientos, 2. Conexión a la red eléctrica, 3. Torre, 4. Escalera de acceso, 5. Sistema de orientación, 6. Góndola, 7. Generador, 8. Anemómetro, 9. Freno, 10. Transmisión, 11. Pala, 12. Inclinación de la pala, 13. Bujes del rotor.

Figura 2.6 Turbina de viento

2.6 Centrales Solares Termoeléctricas

Mediante las Centrales Solares Termoeléctricas (CET) podemos conseguir un aporte considerable de electricidad no contaminante a medio plazo, ya que en las tecnologías no contaminantes primero hay que generar una energía igual a la energía gastada en fabricar todos los materiales de los que la central termoeléctrica está compuesta. Suponiendo que en el proceso de fabricación de estos materiales se haya usado algún tipo de energía no renovable.

Esta tecnología solar termoeléctrica emplea la radiación solar incidente sobre la superficie de un captador para calentar un fluido que circulará posteriormente por una etapa de turbina, el vapor producido se empleará entonces para mover estas turbinas y generar electricidad.

Actualmente se usan concentradores solares por reflexión para alcanzar las altas temperaturas necesarias en los ciclos termodinámicos.

En las centrales termoeléctricas suelen usarse principalmente tres sistemas de concentración solar por reflexión:

- a) Concentradores cilindro-parabólicos: Estos concentradores siguen al sol en un sólo eje y transmiten esta radiación a un tubo situado en el centro de la parábola, su capacidad de concentración es de 30 a 80 veces.
- b) Sistemas de torre o de receptor central: Consisten en un campo de espejos helióstatos que siguen la posición del sol en dos ejes y dirigen el rayo reflejado a un receptor que se sitúa en la parte superior de la torre, la concentración de estos helióstatos es de 200 a 1.000 veces.
- c) Discos parabólicos: Estas unidades independientes que siguen al sol en dos ejes, reflejan el calor en un motor Stirling que se sitúa en la parte central del foco.

Su capacidad de concentración es entre 1000 y 4000 veces, generando una potencia por unidad que puede variar de 5 a 25 kW.

2.7 Centrales Solares Fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica es un tipo de electricidad renovable obtenida directamente de los rayos del sol gracias al efecto fotoeléctrico de un determinado dispositivo; normalmente una lámina metálica semiconductora llamada célula fotovoltaica, o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina.

También están en fase de laboratorio métodos orgánicos. Se usa para alimentar innumerables aparatos autónomos, para abastecer refugios o casas aisladas y para producir electricidad para redes de distribución.

Los módulos o paneles fotovoltaicos están formados por un cristal o lámina transparente superior y un cerramiento inferior entre los que queda encapsulado el sustrato conversor y sus conexiones eléctricas. La lámina inferior puede ser transparente, pero lo más frecuente es un plástico de tedlar. Para encapsular se suele añadir unas láminas finas y transparentes de EVA que se funden para crear un sellado antihumedad, aislante, transparente y robusto. La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un aparato electrónico llamado inversor e inyectar en la red eléctrica, operación actualmente sujeta a subvenciones en muchos lugares para una mayor viabilidad. El proceso, simplificado, sería el siguiente: Se genera la energía a bajas tensiones (380-800 V) y en corriente continua.

Se transforma con un inversor en corriente alterna. Mediante un centro de transformación se eleva a *Media tensión* (15 ó 25 kv) y se inyecta en las redes de transporte de la compañía.

En entornos aislados, donde se requiere poca potencia eléctrica y el acceso a la red es difícil, como estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones, se emplean las placas fotovoltaicas como alternativa económicamente viable.

Para comprender la importancia de esta posibilidad, conviene tener en cuenta que aproximadamente una cuarta parte de la población mundial no tiene acceso a la energía eléctrica.

En la Figura 2.7 se ilustra un panel solar fotovoltaico que capta la energía del sol.



Figura 2.7 Panel fotovoltaico

En la Figura 2.8 se ilustra una central de energía renovable, del tipo de sistema de torre o de receptor central.



Figura 2.8 Sistema de receptor central

2.8 Centrales Maremotrices

La energía maremotriz es la que se obtiene aprovechando las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la tierra y la luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del Sol sobre las masas de agua de los mares.

Esta diferencia de alturas puede aprovecharse poniendo partes móviles al proceso natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. Es un tipo de energía renovable limpia. La energía maremotriz tiene la cualidad de ser renovable, en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia, ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos. Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía. Otras formas de extraer energía del mar son: las olas, la energía undimotriz; de la diferencia de temperatura entre la superficie y las aguas profundas del océano, el gradiente térmico oceánico; de la salinidad; de las corrientes submarinas o la eólica marina.

En la Figura 2.9 se ilustra una central maremotriz instalación que produce energía eléctrica partir del desnivel creado por las mareas, esta presa consiste en un dique que cierra una bahía o estuario.



Figura 2.9 Central maremotriz

Capítulo 3

Los Sistemas de Excitación en Centrales Eléctricas

3.1 Introducción

El sistema de excitación es entendido como la fuente de la corriente de campo para la excitación principal de una máquina, incluyendo los medios de control. El sistema de excitación incluye entonces todos los equipos para suministrar la corriente de campo a la excitación principal de la máquina eléctrica así como cualquier equipo que permita la regulación y el control de la corriente de campo entregada. Dada la operación de plantas relativamente antiguas en operación en el medio se revisan los esquemas tradicionales de excitación con base a máquinas rotativas acopladas al eje principal de la máquina. Se considera el arreglo de la excitatriz principal y auxiliar.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, el sistema de control de excitación (SCE) debe ser capaz de responder a perturbaciones, tanto transitorias como estacionarias, sin alterar la operación normal del generador. Así mismo, debe ser capaz de integrarse con el resto de los sistemas de protección de los generadores, tales como las protecciones ante fallas de aislación en el rotor debido a altos voltajes, calentamientos en el rotor debido a corrientes de campo, calentamientos en el estator debido a corrientes de armadura, calentamiento por baja excitación de operación y debido a exceso de flujo, etc.

Desde el punto de vista de los sistemas de potencia, el sistema de excitación contribuye a un control efectivo de voltaje y por ello es ampliamente usado para mejorar la estabilidad del sistema. En particular, se usa en coordinación con estabilizadores de potencia (Power System Stabilizer (PSS) para amortiguar oscilaciones y en el control rápido ante un disturbio de manera de mejorar la estabilidad transitoria. Históricamente, los sistemas de excitación fueron controlados manualmente para mantener el voltaje deseado en bornes del generador y la carga de potencia reactiva.

Cuando primeramente fue automatizado, fue muy lento, y básicamente ocupaba el rol de una alerta de operación.

Posteriormente, debido al avance en los lazos de control retroalimentado se automatizaron e incorporaron masivamente a los sistemas.

El siguiente paso fue la introducción de la electrónica de potencia, con la cual se usaron rectificadores de gran eficiencia.

En la actualidad existen sofisticados esquemas de control de excitación, basados en numerosos lazos de control y electrónica de potencia de última generación.

3.2 Clasificación de Sistemas de Excitación (MS)

Los sistemas de excitación han tomado muchas formas a través de los años de su evolución.

En términos generales, dependiendo de la fuente de poder usada en la excitación se pueden clasificar en tres categorías:

- a) Corriente Directa, Sistema de control de excitación de corriente directa (SCE CD).
- b) Corriente Alterna, Sistema de control de excitación de corriente alterna (SCE CA).
- c) Estática.

3.2.1 Excitación de Corriente Continua

La excitación de este tipo utiliza generadores CD como fuentes de excitación de poder para proveer la corriente al rotor de la máquina síncrona.

El excitador puede ser impulsado por un motor y aprovechando la energía primaria, por el mismo eje del generador.

Puede ser excitada por si misma o excitada en forma separada. En la actualidad los SCE CD están desapareciendo gradualmente, debido a la antigüedad de algunos están siendo reemplazados por excitación CA o estáticos.

En algunos casos los reguladores de voltaje son reemplazados por modernos dispositivos electrónicos.

Muchos de los SCE CD están aún en servicio, y requieren de modelos de estabilidad en estudio.

La Figura 3.1 muestra la representación de un SCE CD típico. Este cuenta con un conmutador el cual abastece de corriente continua al campo del generador principal. El excitador es controlado por un amplidina.

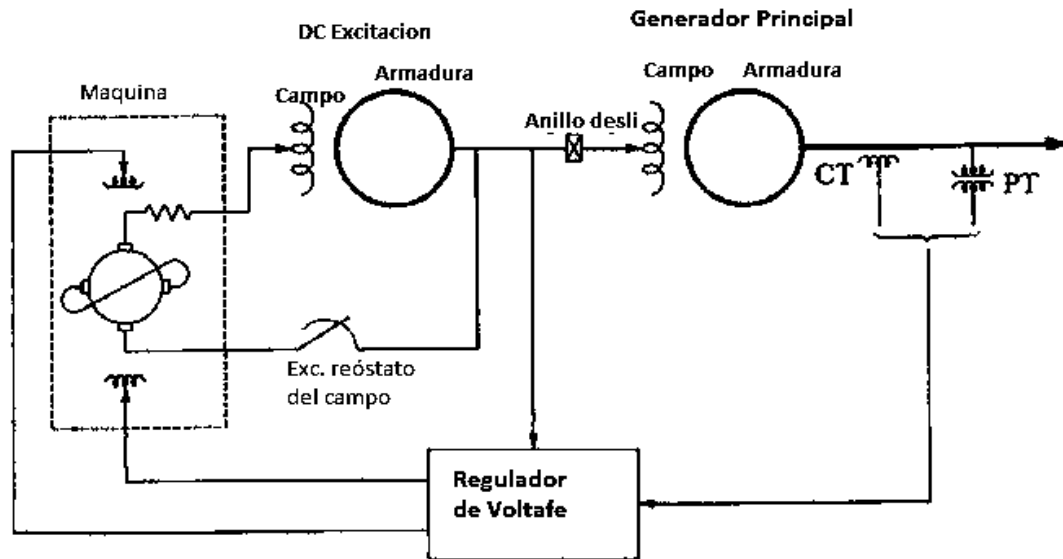


Figura 3.1 Esquema de un SCE CD típico

La amplidina es una máquina CD de construcción especial que tiene un conjunto de escobillas separadas en 90° eléctricos, uno sobre su eje directo (d) y otro sobre su eje de cuadratura. El control del campo de giro es localizado sobre el eje d. Una carga de compensación de giro en serie con el eje d produce un flujo igual y opuesto al de la corriente de armadura del eje d.

3.2.2 Excitación de Sistemas de Corriente Alterna

La excitación de esta categoría utiliza alternadores (máquinas CA) como fuentes para la excitación del generador de poder. Generalmente, el excitador está montado sobre el mismo eje de la turbina del generador. La salida CA del excitador es rectificada por rectificadores controlados o no controlados, lo que produce la corriente continua necesaria para el campo del generador.

Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotacionales. Los primeros sistemas de excitación CA usaron una combinación de amplificadores magnéticos y rotacionales como reguladores. Hoy en día se usan dispositivos electrónicos. A continuación una descripción de las diferentes formas de excitación CA.

3.2.2.1 Sistemas de Rectificación Estacionarios

En este esquema la etapa de rectificación se realiza fuera del generador mediante rectificadores estacionarios.

Aquí, la salida CD alimenta al campo principal del generador a través de anillos deslizantes (slip ring).

En la Figura 3.2 se muestra un diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador para la excitación del sistema.

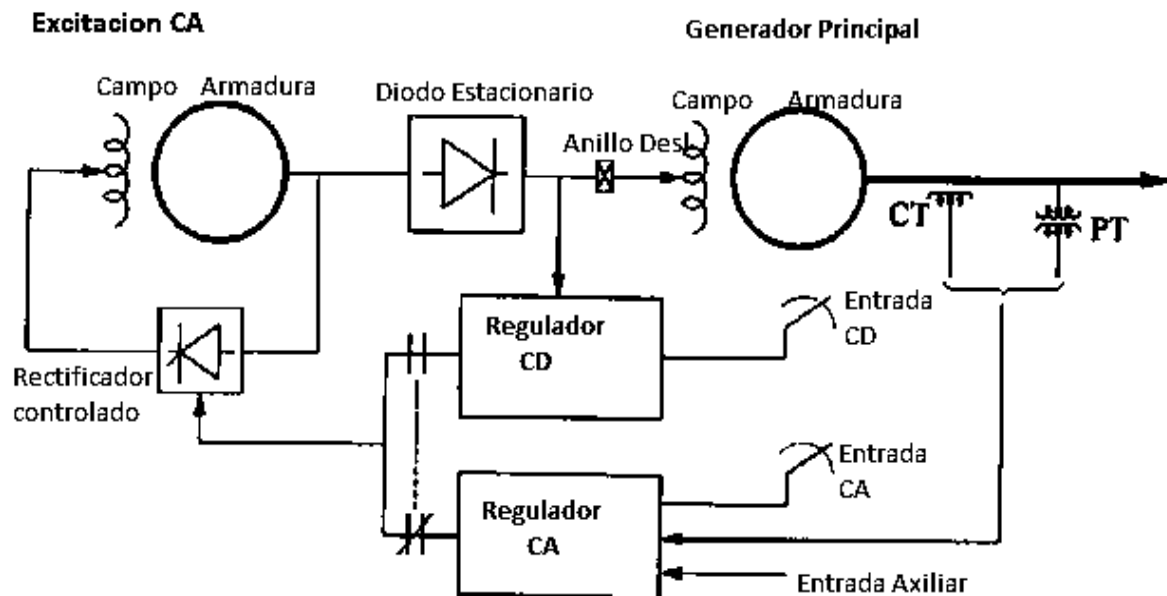


Figura 3.2 Diagrama de rectificación Estacionarios

La Figura 3.2 representa el SCE ALTERREX de general electric (GE). Este alternador excitador, el cual a su vez es un generador síncrono, está impulsado por el eje del generador principal.

El excitador opera en la modalidad autoexcitado, esto es, su campo se obtiene a través de un rectificador con tiristores que toma la energía en bornes del propio excitador. De esta forma, los rectificadores tienen control sobre la excitación del alternador excitador, el cual modifica el voltaje en bornes y, en consecuencia, cambia el voltaje continuo de alimentación del campo del generador principal.

Notar que los diodos no tienen posibilidad de control, sólo rectifican la señal de entrada.

Otra alternativa es usar un excitador dirigido como fuente para excitador de campo del poder. Cuando se usa rectificadores controlados, el regulador controla directamente el voltaje de salida CD del excitador, la figura 3.3 ilustra este caso.

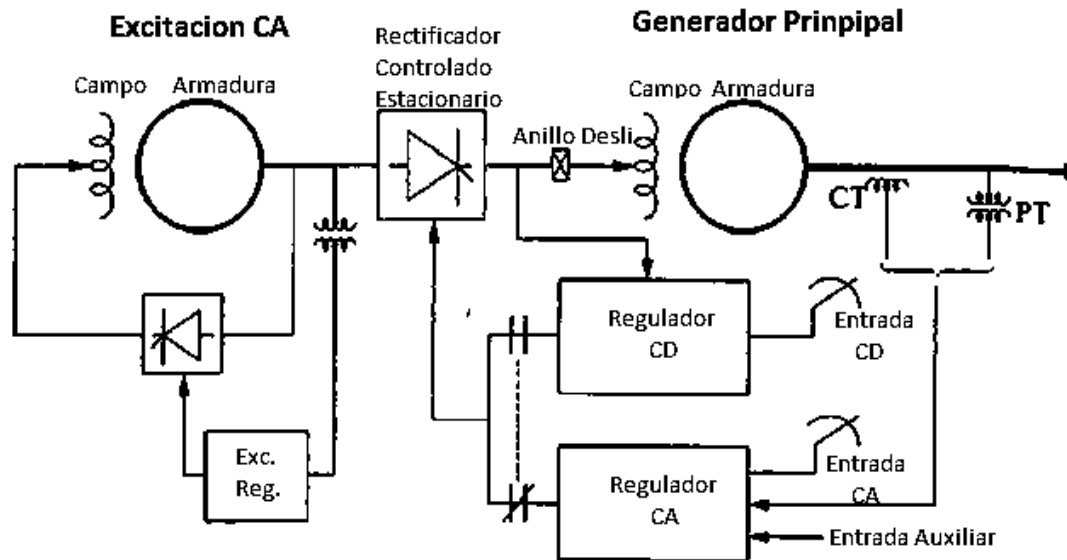


Figura 3.3 Diagrama de un regulador de excitación controlado

En la Figura 3.3 el regulador de voltaje controla el encendido de los tiristores. El excitador alternador es autoexcitado y usa un regulador estático de voltaje independiente para mantener su voltaje de salida.

Dado que los tiristores son controlados directamente por la salida del excitador, este sistema de modo inherente provee una alta respuesta inicial (pequeña respuesta en el tiempo).

Como se mostró anteriormente en las Figuras 3.2 y 3.3, hay dos modos independientes de regulación:

Una CA que regula automáticamente y mantiene el voltaje en bornes del estator del generador principal a un voltaje de referencia CA, y otro un regulador CD que mantiene constante el voltaje en el campo del generador de acuerdo a una referencia determinada.

El regulador CD o modo de control manual actúan cuando del regulador CA falló o necesita ser deshabilitado.

La entrada de las señales al regulador CA incluyen entradas auxiliares las cuales permiten un control adicional y funciones de protección.

3.2.2.2 Sistemas de Rectificación Rotacional

Con este tipo de rectificación los anillos rozantes y escobillas son eliminados, y la salida CD alimenta directamente al campo del generador, como se muestra en la Figura 3.4. Aquí, la armadura del excitador CA y el rectificador de diodos rotan con el campo del generador.

Un pequeño excitador piloto CA, con un rotor de imán permanente, rota con la armadura y el rectificador de diodos. La salida del rectificador del estator del excitador piloto energiza el campo estacionario del excitador CA.

El regulador de voltaje controla el campo del excitador CA, el cual controla el giro del campo del generador principal.

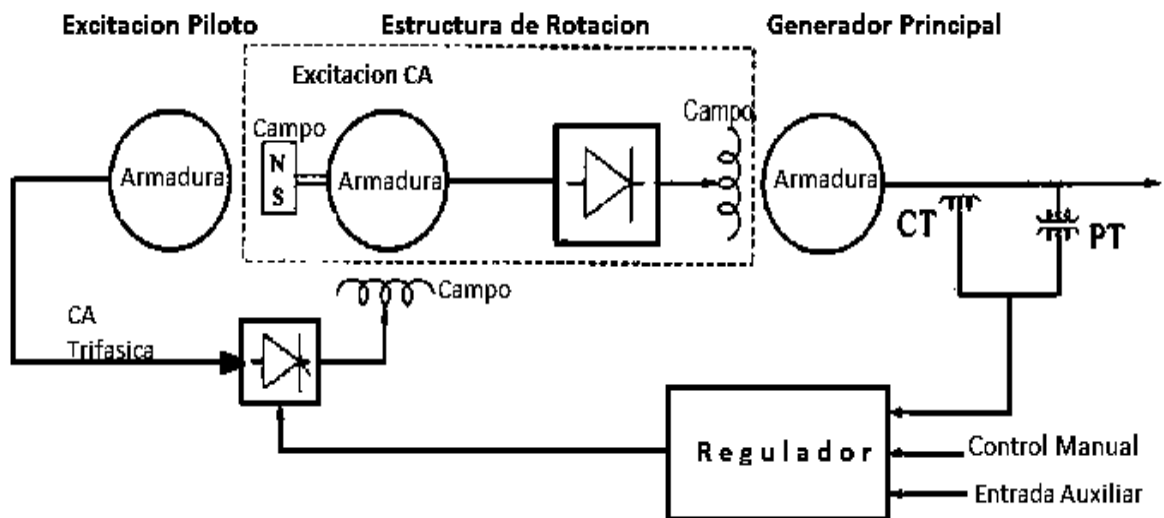


Figura 3.4 Diagrama de un Sistema de Rectificación Rotacional

En la Figura 3.4 se ilustra un sistema que fue desarrollado para evitar problemas con el uso de escobillas.

Los sistemas de excitación sin escobillas no permiten medir directamente la corriente de campo o voltaje del generador.

El control manual del generador principal está provisto por una entrada ajustable CD para poner el circuito gatillador del tiristor.

3.2.3 Sistema de Excitación Estática

Todas las componentes en este sistema son estáticos o estacionarios, tanto los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, como las fuentes de excitación CD para el campo del generador síncrono principal a través de anillos deslizantes (rozantes).

La fuente de alimentación para los rectificadores se obtiene del generador principal a través de un transformador que baja el voltaje a un nivel apropiado.

3.2.3.1 Sistema de Fuente de Potencial y Rectificador Controlado

En este sistema, la excitación del generador es abastecida a través de un transformador (transformador excitador) desde los terminales del generador o la estación auxiliar, y está regulada por un control del rectificador. Este tipo de sistema de excitación es también comúnmente conocido como *bus-fed* o *transformer-fed*, se puede observar en la Figura 3.5.

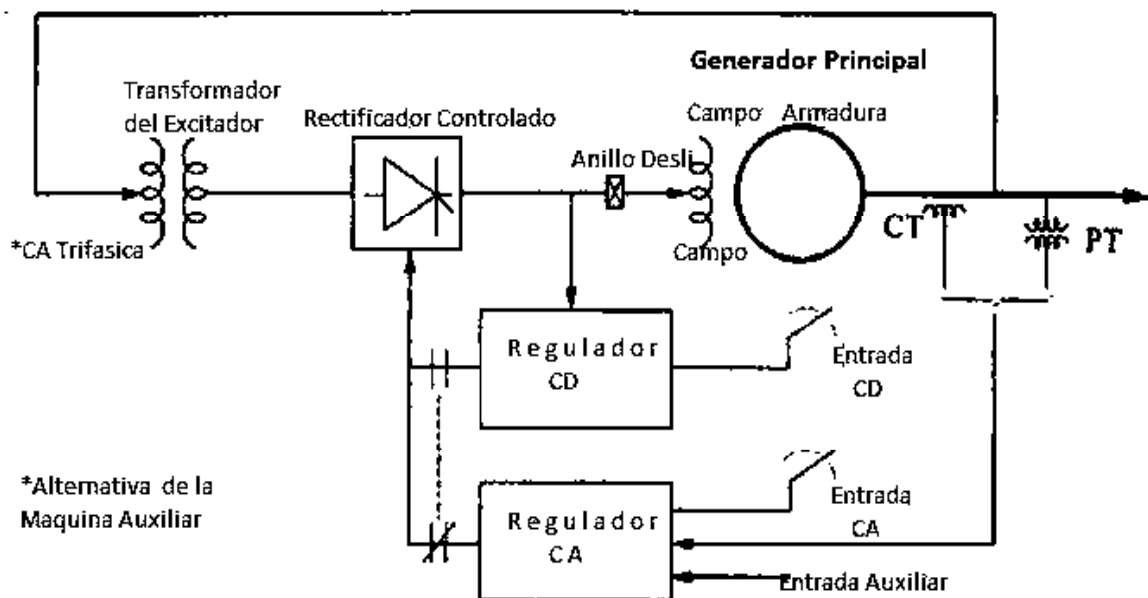


Figura 3.5 Diagrama de un sistema de fuente de potencial y rectificador controlado

En la Figura 3.5 se ilustra la máxima salida de voltaje que puede entregar este excitador es dependiente de la entrada de voltaje CA.

De aquí que durante condiciones de falla en el sistema, la cual provoca una caída de voltaje en los terminales del generador, el voltaje en el excitador se reduce (el generador principal puede subir el voltaje en bornes).

Esta limitación del SCE, es en gran medida equilibrado por su respuesta instantánea y alta capacidad de almacenamiento de campo electromagnético por falla.

Además es económico y de fácil mantención. Para generadores conectados en un gran sistema, estos SCE responden satisfactoriamente.

3.2.3.2 Sistema de Fuente Compuesta y Rectificador

La potencia para el SCE en este caso está formada por la utilización de la corriente y el voltaje del generador principal. Esta puede ser ejecutada por medio de un transformador de potencia (TP) y un transformador de corriente con núcleo saturable (TC). Alternativamente, las fuentes de voltajes y de corrientes pueden ser combinadas por la utilización de un solo transformador, llamado como transformador de corriente saturable y potencial. La Figura 3.6 muestra este sistema.

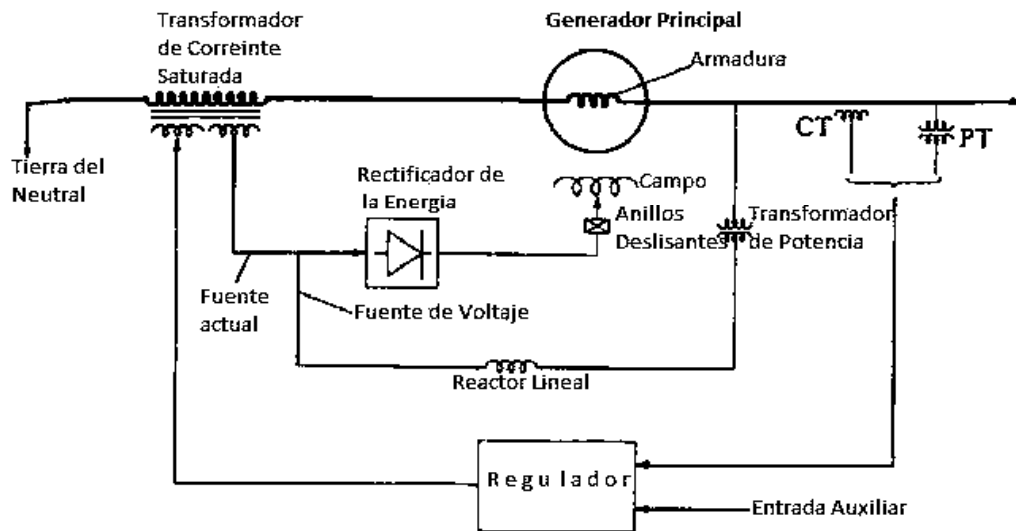


Figura 3.6 Diagrama de un Sistema de Fuente Compuesta y Rectificador

El regulador controla la salida del excitador a través del control de saturación del transformador en la excitación.

Cuando el generador está en vacío, la corriente por la armadura es cero y la fuente de potencial abastece completamente a la excitación del generador. Bajo condiciones de carga, parte de la excitación del generador es derivada desde la corriente del generador. Durante condiciones de falla, con una gran baja de voltaje en bornes del generador, la corriente entra a habilitar el excitador provisto de un campo con alta capacidad de campo fuerza.

3.2.3.3 SCE Compuesto Controlado

Este sistema utiliza un rectificador controlado en la salida del circuito del excitador y compuesto de fuentes de voltaje y corriente dentro del estator del generador para proveer el excitador de él. El resultado es una alta respuesta inicial. La Figura 3.7 muestra este sistema.

El voltaje de la fuente está formado por un conjunto de tres fases puestas en las tres ranuras del estator del generador y en serie a la línea del reactor.

La fuente de corriente es obtenida desde un transformador de corriente en el neutro del estator. Estas fuentes están combinadas a través de un transformador y la resultante de la salida CA es rectificada por semiconductores de poder.

El medio de control está provisto de una combinación puente de diodos y rectificadores conectados en paralelo.

Un regulador de voltaje se controla con un circuito de encendido de tiristores y de este modo regula la excitación del campo del generador.

El transformador de excitación consiste de una unidad de tres fases y tres enrollados: corriente (C) y potencia (P) (enrollados primarios), y la salida del enrollado secundario (F). Bajo condición de falla, la corriente fluye a través del enrollado del transformador “C” que provee una fuerza de campo cuando el voltaje del generador cae.

El reactor cumple dos funciones: contribuye a compensar la característica del SCE y reduce la corriente de falla en el SCE o el generador.

La Figura 3.7 ilustra un sistema que utiliza un rectificador controlado en la salida del circuito del excitador y compuesto de fuentes de voltaje y corriente dentro del estator del generador para proveer el excitador de él.

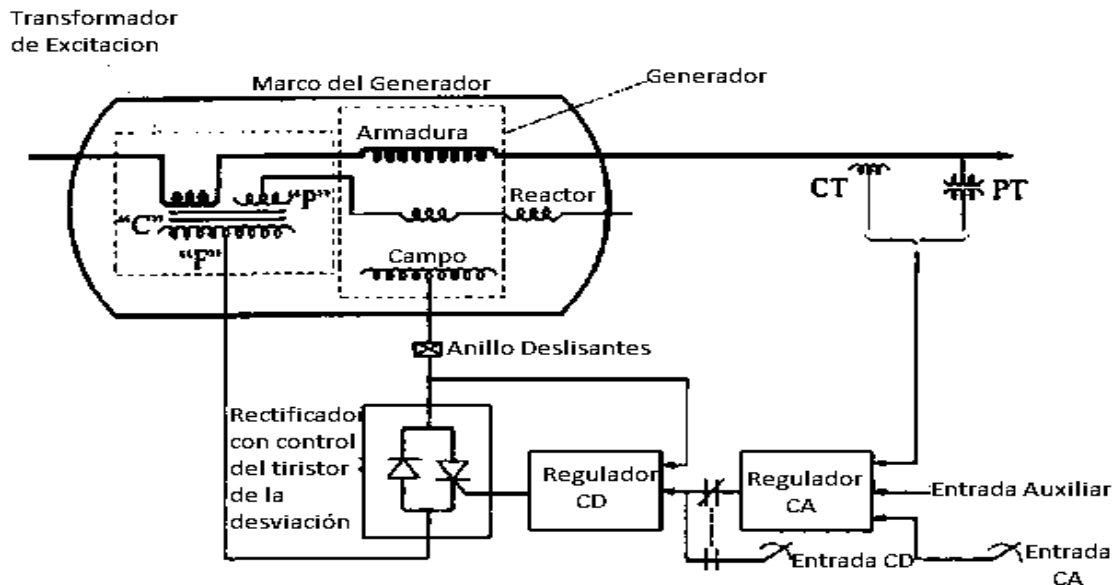


Figura 3.7 Diagrama de un SCE compuesto controlado

Los sistemas de excitación de uso general en el momento actual son los siguientes: (1) generadores de corriente continua acoplados directamente o a través de engranajes; (2) generadores de corriente continua independiente de la maquina principal o accionados por motor; (3) alimentación en corriente alterna a través de rectificadores estáticos o de arco de mercurio.

3.3 Sistemas de Excitatrices

a) Las excitatrices directamente acopladas al generador principal constituyen la variante que, en principio, se utilizó y gozan de un favor casi general, adaptándose, en especial, al “sistema de bloque” de explotación de las centrales.

Los principales argumentos de este procedimiento son su simplicidad de pérdida de la excitación, en más de una unidad al mismo tiempo, queda reducida al mínimo. Las excitatrices individuales facilitan la instalación de reguladores automáticos de tensión. Cada excitatriz se construye, en algunos casos, de potencia suficiente para alimentar la excitación de dos generadores en caso de emergencia.

Los inconvenientes principales es el posible cese de una unidad de gran potencia debido a que se presenta una avería en su excitatriz y que las fluctuaciones de tensión, en tanto por ciento, son de doble magnitud que las variaciones de velocidad.

b) Las excitatrices accionadas por máquinas motrices independientes pueden construirse por cualquier tipo de máquina motriz. Teniendo en cuenta su reducido tamaño, el rendimiento de la unidad es muy pobre, lo cual constituye el principal inconveniente de su utilización.

En los casos en que es necesario el escape de vapor para el calentamiento del agua de alimentación, la reducción del rendimiento es lo de menos, pero la tendencia actual no se inclina hacia este sistema.

A veces, es necesario instalar excitatrices accionadas por máquinas motrices por necesidades de arranque.

c) Las excitatrices accionadas por motor funcionan en muchas centrales. Son económicas, eficientes y seguras, pero deben completarse, por lo menos, con una unidad arrastrada con una máquina primaria a fin de efectuar la apuesta en marcha. Los motores de inducción son utilizados casi invariablemente, constituyendo el mejor tipo de accionamiento de la excitatriz, siempre que se tenga una razonable seguridad en la alimentación de corriente alterna; tal tipo de motores pueden entrar en servicio inmediatamente, la cual constituye un factor importante.

Una central eléctrica con un sistema de alimentación bien equilibrado se compone de unidades accionadas por motor y por máquinas primarias.

En algunos casos, las unidades accionadas por motor se consideran como auxiliares de las accionadas por máquinas primarias y, en otros casos, las unidades accionadas por motor son consideradas de importancia primordial.

d) Accionamiento dúplex. Otro método de asegurar la continuidad de servicio se está empleando con un buen resultado.

La excitatriz se dispone de una forma que pueda ser accionada indistintamente por un motor o por una máquina primaria.

El motor dispone de un relé que corta la alimentación al mismo, si se reduce la tensión en corriente alterna. El regulador se dispone, en la práctica de, forma que corte el paso de vapor cuando se alcanza la velocidad normal.

Pero cuando el relé indicado anteriormente actúa cortando la alimentación del motor, la máquina primaria continua accionando la unidad a una velocidad ligeramente inferior, evitando, de este modo, cualquier interrupción en la corriente de excitación.

Esta disposición se utiliza, a veces, en función del rendimiento térmico total, valiéndose de la máquina primaria para accionar la excitatriz, cuando las condiciones de funcionamiento de la central así lo exigen.

e) Las excitatrices electrónicas pueden ser rectificadores de tipo seco (de silicio) o rectificadores en cuba de mercurio, aunque ninguno de los dos tipos se ha utilizado de forma amplia hasta la fecha. Actualmente se presta gran atención a una construcción que lleva un gran arrollamiento de inducido rotativo de corriente alterna y unos rectificadores secos rotativos situados sobre el mismo eje, efectuándose la alimentación directa de la corriente de excitación al arrollamiento del rotor del generador sin necesidad de anillos colectores o escobillas. La regulación de la tensión se efectúa controlando la corriente de excitación del campo fijo de la estructura polar del generador-excitatriz de corriente alterna. La regulación de la tensión de los rectificadores de vapor de mercurio se efectúa variando el instante de encendido en la onda de corriente alterna de la fuente de alimentación.

f) La potencia del equipo de excitación depende de la potencia de la central y del tipo de generadores. Los generadores de reducida y de baja velocidad necesitan hasta un 3% de su potencia para la excitación. Los turboalternadores de gran potencia y de alta velocidad pueden requerir hasta un mínimo del 0.5%. Las necesidades exactas deben ser indicadas por su constructor. La potencia total ha de ser suficientemente holgada para abastecer la totalidad de la carga de excitación con los aparatos de reserva fuera de servicio. La magnitud del equipo de reserva necesario no está bien definido; en la práctica, esta reserva pueda estar comprendida entre la estrictamente necesaria para sustituir la excitatriz del generador de mayor potencia hasta el disponer de una excitatriz de reserva para cada unidad generadora.

g) La tensión de excitación de uso normal es, para las centrales pequeñas, de 125V, y para las grandes centrales 250, 375, o 500V. Los generadores suelen ser de excitación-derivación, resultando excitados por excitatrices piloto de excitación compuesta de características planas.

Con las excitatrices normales, es posible trabajar con una tensión que no rebase del 15% de la tensión normal de servicio, lo cual es suficiente para satisfacer las necesidades de excitación de los alternadores de corriente a plena carga. En los casos en los que se prevean sobrecarga, es conveniente, con frecuencia, elevar la tensión de excitación hasta un 25% durante las puntas de carga. Las excitatrices pueden adaptarse para proporcionar esta tensión con muy pequeñas modificaciones respecto al tipo normal de construcción para ello el constructor debe mostrar las especificaciones interiores.

h) El costo de las excitatrices acopladas al eje de los generadores principales puede expresarse como un tanto por ciento del costo de dichos generadores, pudiendo variar desde el 3 al 5 %, dependiendo, en cierto grado, de la velocidad y su tipo de construcción.

i) La excitación de alta velocidad o de respuesta rápida ha sido objeto de una gran atención en los últimos años, debido a la importancia del comportamiento de la tensión del generador en relación con la transmisión de energía y la estabilidad del sistema. Para aumentar la estabilidad transitoria del sistema en condiciones de cortocircuito, se utilizan excitatrices con una tensión de techo relativamente elevada y una gran velocidad de aumento de la tensión.

j) Las excitatrices usuales con autoexcitación normal tienen una tensión de techo de aproximadamente el 135% de la tensión nominal y una velocidad de crecimiento de la misma del orden de 125 V/s. El régimen de trabajo se halla comprendido entre el 75 y el 25 % de la excitación normal de la excitatriz.

k) En la excitación de respuesta rápida, la velocidad de aumento de la tensión es del orden de 400 a 600 V/s, siendo la máxima tensión alcanzable con excitatrices normales de unos 320V para una excitatriz de 250V. De ordinario, al campo de la excitatriz se alimenta independientemente con una principal.

l) Superexcitación: La aplicación eficaz del principio de la excitación de respuesta rápida a condensadores síncronos y a generadores ha conducido a velocidades de crecimiento de la tensión del orden de 6000 a 7000 V/s, habiéndose denominado “superexcitación” a tal sistema.

Las excitatrices construidas por tal tipo de servicio son de una tensión nominal más elevada, como por ejemplo 600V para una excitación de 250V, y tiene, por consiguiente, una tensión de techo más elevada, de aproximadamente 1000V.

El empleo de relés y de interruptores ultrarrápidos para eliminar con gran rapidez los cortocircuitos en los sistemas de corriente alterna ha disminuido la tendencia hacia el tipo de excitación de muy elevada velocidad.

2) La velocidad de crecimiento de la tensión depende de la velocidad de aumento de la corriente en el campo de la excitatriz, siendo, por consiguiente, aconsejable utilizar una excitatriz piloto en caso de que el propio generador no se autoexcite y así alimentar la excitación de la excitatriz principal.

Tales excitatrices piloto son o bien unidades auxiliares acopladas al eje del generador principal o bien son accionadas por motor.

m) La potencia de las excitatrices piloto para la excitación de respuesta rápidas es, de aproximadamente, del 1.5, al 5% de la potencia nominal de la excitatriz principal.

Para la superexcitación, la excitatriz piloto debe tener un excitatriz comprendida entre el 15 y el 25 % de la potencia nominal de la excitatriz principal.

n) La estabilidad del sistema mejora con la excitación de respuesta rápida debido al aumento de los KVA de cortocircuitos en el sistema durante la perturbación que existe en el medio de distribución que se utilice.

Sin embargo, los efectos que las perturbaciones podrían ocasionar sobre los aparatos y equipos, se debe estudiar cuidadosamente antes de utilizar cualquier tipo de sistema que se vaya a utilizar para así hacer un diagnóstico muy explícito y proteger los equipos.

ñ) La regulación de la tensión, cuando las variaciones rápidas de cargas no sobrepasan el 25% de la potencia de la máquina y el factor de potencia es relativamente elevado, puede aplicarse eficazmente en la excitatriz del generador, debiendo construirse esta para mantener la estabilidad al reducir la tensión hasta un 30% de la tensión nominal. Si las variaciones de carga son del orden del 50% de la potencia de la máquina o superiores, suele ser excitar el campo de la excitatriz mediante una excitatriz piloto.

La regulación automática de la tensión es aconsejable y en muchos casos esenciales para centrales que alimentan cargas con amplias fluctuaciones o que se hallan conectadas a líneas de alta tensión, o bien cuando los reguladores se construyen con una relación de cortocircuito baja.

Capítulo 4

Modelado y Simulación de una Excitatriz

4.1 Introducción

Los dispositivos síncronos como generadores son utilizados para grandes cargas eléctricas, los condensadores son usualmente compensadores de potencia reactiva y control de voltaje estos equipos complementan el generador síncrono. El modelo y análisis del generador síncrono con sus debidas atenciones y análisis en sus diferentes estudios de laboratorios con sus sistemas de excitación, durante mucho tiempo seguirá siendo un reto a deducir.

En el presente capítulo abordaremos el modelo matemático de la máquina síncrona, al igual como sus diagramas esquemáticos de los ejes directos y en cuadratura, que en ellos se presentan las variables y constantes a deducir, para así agregarle un rectificador de media onda y también un rectificador trifásico, con sus respectivos componentes como son diodos, fuente de voltaje e inductancia para concluir con un sistemas de excitación que en los capítulos anteriores se han mencionados y así obtener la simulación del generador síncrono en el software 20sim.

4.2 Descripción Matemática de la Máquina Síncrona

Para deducir las ecuaciones de una máquina síncrona se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

- S1.- Los devanados del estator están sinusoidalmente distribuidos.
- S2.- Las ranuras del estator no causan variación apreciable de las inductancias del rotor con la posición del rotor.
- S3.- La máquina es de polos salientes en el rotor.
- S4.- Se analiza una máquina de dos polos.
- S5.- La histéresis magnética es despreciable.
- S6.- Los efectos de la saturación magnética son despreciable.

En la Figura 4.1 se ilustra un esquema de una máquina síncrona.

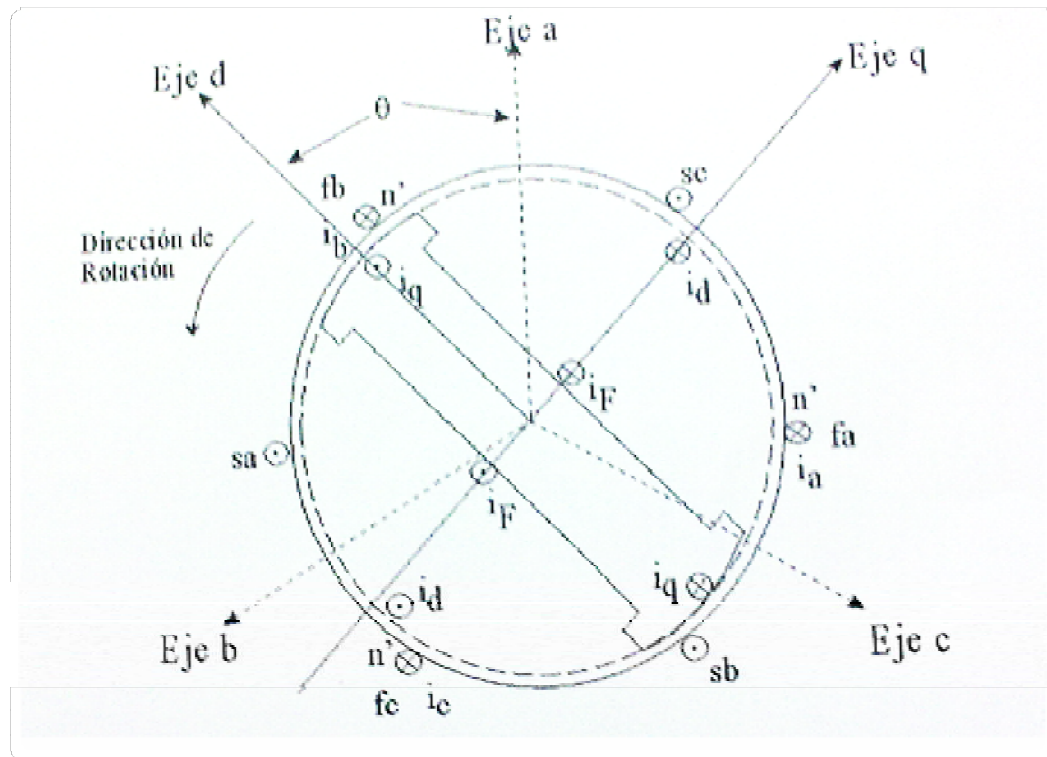


Figura 4.1 Esquema de una máquina síncrona

En la Figura 4.1, los circuitos del estator consisten de un devanado de armadura trifásico $sa - fa, sb - fb$ y $sc - fc$ que conducen a corrientes alternantes i_a, i_b, i_c .

Los circuitos del rotor comprenden devanados de campo $F - \dot{F}$ y de amortiguamiento $D - \dot{D}$ y $Q - \dot{Q}$.

El devanado de campo se conecta a una fuente de cd.

Para propósitos de análisis las corrientes de amortiguamiento se suponen fluyendo en dos conjuntos de circuitos cortocircuitados: un conjunto cuyo flujo está en la línea en el eje-d y el otro conjunto en el eje-q.

4.3 Ejes Directo y en Cuadratura

A continuación se definen los ejes mostrados en la Figura 4.1.

- El eje, d, alineado al eje del polo norte magnético.
- El eje de cuadratura, q, se encuentra a 90 grados eléctricos del eje-d.

4.4 Representación Esquemática de los Circuitos de una Máquina Síncrona

En la Figura 4.2 se ilustran los circuitos del estator y rotor de una máquina síncrona.

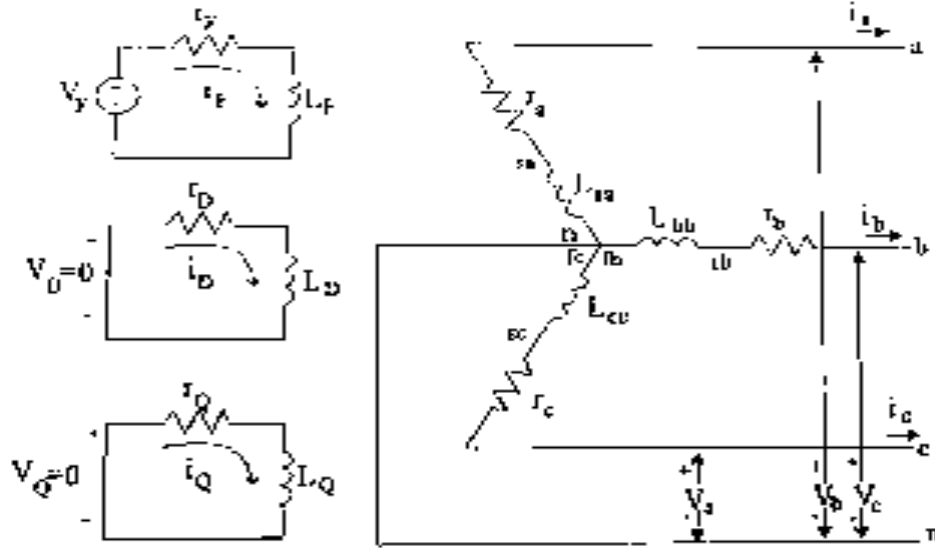


Figura 4.2 Ilustración esquemática de una máquina síncrona

- a, b, c, denotan devanados de fase del estator. Así $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$, se denotan corrientes de fase del estator, $V_a(t), V_b(t), V_c(t)$, voltajes de fase del estator, r_a, r_b, r_c , resistencias de fase del estator y L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} , inductancias propias de fase del estator.
- F denota el devanado de campo. Así, $i_f(t)$ denota corriente en F, $v_f(t)$: voltaje en F, r_f , resistencia de F y L_F inductancia propia de F.
- D denota el circuito de amortiguamiento en el eje-d. Así $i_D(t)$, denota corriente en D, $v_D(t)$, voltaje en D, r_D , resistencia de D y L_D inductancia propia de D.
- Q denota el circuito de amortiguamiento en el eje-q. Así $i_Q(t)$ denota corriente en Q, $v_Q(t)$, voltaje en Q, r_Q resistencia de Q y L_Q inductancia propia de Q.
- $\theta(t)$ es el ángulo donde el eje-d adelanta el eje magnético del devanado de la fase a.
- $\omega_r(t)$ denota la velocidad angular del rotor en rad/seg.
- $\omega(t)$ denota la velocidad angular del campo magnético en rotación en rad/seg.

La Figura 4.2 está formada por 6 devanados magnéticamente acoplados.

El acoplamiento magnético entre los devanados es una función de la posición del rotor $\theta(t)$.

El voltaje instantáneo en las terminales $v(t)$ de cualquier devanado está dado por.

$$v(t) = \pm \sum r i(t) \pm \sum \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (4.1)$$

donde $\lambda(t)$ es el enlace de flujo, r es la resistencia en los devanados e $i(t)$ es una corriente en los devanados, con direcciones positivas de las corrientes del estator fluyendo hacia fuera de las terminales si opera como generador síncrono.

4.5 Transformación de Park

Usualmente una gran simplificación en la descripción de la máquina síncrona se obtiene mediante la transformación de variables, esto es la transformación de Park. Esta transformación expresa las variables del estator como corrientes, voltajes o enlaces de flujo en un nuevo conjunto de variables.

Los nuevos resultados son obtenidos a partir de variables actuales en los tres ejes; eje-d, eje-q, y eje estacionario.

Esta transformación convierte las cantidades del estator a partir de las fases a, b y c en otras variables de referencia las cuales se mueven con el rotor.

Teniendo las variables $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$, para ello se ocupan tres nuevas variables de la transformación de Park, dos para los ejes d y q, las cuales son proporcionales a la corriente de secuencia cero. Un multiplicador es utilizado para reducir los cálculos numéricos.

$$i_{0dq}(t) = P i_{abc}(t) \quad (4.2)$$

$$i_{0dq}(t) = \begin{bmatrix} i_0(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} ; \quad i_{abc}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

donde la transformación de Park está definida por

$$P = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta(t) & \cos[\theta(t) - 2\pi/3] & \cos[\theta(t) + 2\pi/3] \\ \sin \theta(t) & \sin[\theta(t) - 2\pi/3] & \sin[\theta(t) + 2\pi/3] \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

En $t = 0$, el eje de q está localizado en un ángulo $\delta(t)$ y el eje d está localizado en $\theta(t) = \delta(t) + \pi/2$.

En $t > 0$, el eje de referencia está localizado en un ángulo $\omega_r(t)t$ con respecto al eje de la fase a .

El eje d del rotor esta por lo tanto localizado en:

$$\theta(t) = \omega_r(t)t + \delta(t) + \pi/2, \quad (4.5)$$

donde $\delta(t)$ es el ángulo de par síncrono en radianes eléctricos.

Dado que la transformación (4.4) es única, su transformación inversa está dada por:

$$i_{abc}(t) = P^{-1}i_{0dq}(t), \quad (4.6)$$

dónde:

$$P^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta(t) & \sin \theta(t) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos[\theta(t) - 2\pi/3] & \sin[\theta(t) - 2\pi/3] \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos[\theta(t) + 2\pi/3] & \sin[\theta(t) + 2\pi/3] \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Notamos que $P^{-1} = P^T$ lo cual significa que la transformación P es ortogonal.

Teniendo P ortogonal también significa que la transformación P es de potencia invariante, y entonces se tiene la misma expresión de potencia en términos de $a-b-c$ ó $o-d-q$, es decir, se tiene

$$p(t) = v_{abc}^T(t)i_{abc}(t) = v_{odq}^T(t)i_{odq}(t). \quad (4.8)$$

4.6 Ecuaciones de Enlace de Flujo

Considerando la Figura 4.1 la cual es una red de seis bobinas acopladas mutuamente.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a(t) \\ \lambda_b(t) \\ \lambda_c(t) \\ \lambda_F(t) \\ \lambda_D(t) \\ \lambda_Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_Q(t) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Anderson muestra que la mayoría de las inductancias son funciones de la posición angular del rotor $\theta(t)$. La descripción física de estas inductancias se menciona a continuación.

1. Inductancias propias del estator. Las inductancias propias de cada devanado están dada por:

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2\theta(t) \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2\left[\theta(t) - 2\pi/3\right] \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2\left[\theta(t) + 2\pi/3\right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

donde $L_s > L_m$ y ambos L_s y L_m son constantes.

2. Inductancias propias del Rotor.

$$L_{FF} = L_F; L_{DD} = L_D; L_{QQ} = L_Q \quad (4.11)$$

donde L_F, L_D y L_Q son constante.

3. Inductancias Mutuas del Estator.

Las inductancias mutuas entre fases son funciones de $\theta(t)$ y son simétricas

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2\left[\theta(t) + \pi/6\right] \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2\left[\theta(t) + 5\pi/6\right] \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2\left[\theta(t) + 5\pi/6\right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

donde $|-M_s| > L_m$.

4. Inductancias Mutuas del rotor.

La inductancia mutua entre devanados F y D son constantes y todos los pares de devanados con desplazamiento de 90° tienen inductancia mutua igual a cero.

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R; L_{FQ} = L_{QF} = 0; L_{DQ} = L_{QD} = 0. \quad (4.13)$$

5. Inductancias Mutuas entre Estator y rotor.

Las inductancias mutuas entre estator y rotor, son funciones del ángulo del rotor $\theta(t)$.

Del devanado de fase al devanado de campo se tiene:

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_f \cos \theta(t) \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_f \cos \left[\theta(t) - 2\pi/3\right] \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_f \cos \left[\theta(t) + 2\pi/3\right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

Similarmente del devanado de fase al devanado de amortiguamiento D,

$$\begin{aligned} L_{aD} &= L_{Da} = M_D \cos \theta(t) \\ L_{bD} &= L_{Db} = M_D \cos [\theta(t) - 2\pi/3] \\ L_{cD} &= L_{Dc} = M_D \cos [\theta(t) + 2\pi/3] \end{aligned} \quad (4.15)$$

finalmente, de los devanados de fase al devanado de amortiguamiento Q,

$$\begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = M_Q \sin \theta(t) \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = M_Q \sin [\theta(t) - 2\pi/3] \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = M_Q \sin [\theta(t) + 2\pi/3] \end{aligned} \quad (4.16)$$

6. Modelo de inductancias compacto. Utilizando una notación simplificada, reescribiendo del modelo compacto.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc}(t) \\ \lambda_{FDQ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}(t) \\ i_{FDQ}(t) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

donde:

L_{aa} denota una matriz cuyos elementos son las inductancias en el estator-rotor, L_{aR} , L_{Ra} las inductancias estator-rotor y L_{RR} las inductancias rotor-rotor.

7. Transformación de inductancias.

Se observa que con inductancias variantes en el tiempo pueden ser simplificadas refiriendo todas las cantidades al marco de referencia del rotor a través de la transformación de Park aplicada a la transformación a – b – c.

Pre multiplicando (4.9) por $\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ donde P es la transformación de Park,

Tenemos

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc}(t) \\ \lambda_{FDQ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}(t) \\ i_{FDQ}(t) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

efectuando la operación obtenemos

$$\begin{bmatrix} \lambda_o(t) \\ \lambda_d(t) \\ \lambda_q(t) \\ \lambda_F(t) \\ \lambda_D(t) \\ \lambda_Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & M_{dF} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & M_{dF} & 0 & L_F & M_{DF} & 0 \\ 0 & M_{dD} & 0 & M_{DF} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_F(t) \\ i_D(t) \\ i_Q(t) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

donde:

$$L_d = L_s + M_s + (3/2)L_m; M_{dF} = \sqrt{3}/2M_F; M_{dD} = \sqrt{3}/2M_D \\ L_q = L_s + M_s - (3/2)L_m; L_o = L_s - 2M_s; M_{qQ} = \sqrt{3}/2M_D$$

En (4.19), $\lambda_d(t)$ es el enlace de flujo de un circuito moviéndose con el rotor y centrado en el eje. Similarmente $\lambda_q(t)$ es centrado en el eje q y $\lambda_o(t)$ es completamente un circuito que permite conocer si un sistema esta desbalanceado. La matriz de la ecuación (4.19) es una matriz de constantes. Así la transformación de Park de potencia remueve los coeficientes variantes en el tiempo de la ecuación (4.9), también se nota que la matriz transformada (4.19) es simétrica lo cual es realizada por un circuito equivalente.

4.7 Ecuaciones de Voltaje

Considerando los circuitos de una máquina síncrona que se muestran en la Figura 4.2, por las condiciones indicadas por la Figura 4.1, la ecuación matricial participada está dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{abc}(t) \\ v_{FDQ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc}(t) \\ i_{FDQ}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{abc}(t) \\ \lambda_{FDQ}(t) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

donde:

$$v_{FDQ}(t) = \begin{bmatrix} V_F(t) \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}; R_{abc} = \text{diag}\{r_a, r_b, r_c\}$$

$$R_{FDQ} = \text{diag}\{r_F, r_D, r_Q\} \quad (4.21)$$

Aplicando la transformación de Park a (4.20) tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{odq}(t) \\ V_{FDQ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odq}(t) \\ i_{FDQ}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{odq}(t) \\ \lambda_{FDQ}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} PP^{-1} \dot{\lambda}_{odq}(t) \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

donde; $\dot{P}P^{-1}\lambda_{odq}(t) = \begin{bmatrix} 0 - \omega(t)\lambda_q(t) - \omega(t)\lambda_d(t) \end{bmatrix}^T$ (4.23)

Analizando para condiciones balanceadas, siendo la componente de secuencia cero o igual a cero (4.22) obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{dq}(t) \\ V_{FDQ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dq} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq}(t) \\ i_{FDQ}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{dq}(t) \\ \dot{\lambda}_{FDQ}(t) \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

donde; $R_{dq} = \text{diag}\{r_d, r_q\}; S(t) = \begin{bmatrix} -\omega(t)\lambda_q & \omega(t)\lambda_d \end{bmatrix}^T$

4.8 Formulación de Ecuaciones de Espacio en el Estado

Recordar que nuestro objetivo es derivar un conjunto de ecuaciones que describan la máquina síncrona en la forma;

$$\dot{x}(t) = f[x(t), v(t), t], \quad (4.25)$$

donde $x(t) \in R^n$ denota un vector de variables de estado $u(t) \in R^p$ las funciones de entrada del sistema y $f[x(t), v(t), t]$, es un conjunto de funciones no lineales, representadas por el producto de algunas variables de estado.

El conjunto basado en corrientes en variables de estado;

$$x(t)^T = [i_d(t) i_D(t) i_F(t) i_Q(t) i_q(t)]$$

El conjunto basado en enlaces de flujo como variables de estado

$$x(t)^T = [\lambda_d(t) \lambda_D(t) \lambda_F(t) \lambda_Q(t) \lambda_q(t)]$$

4.9 Formulación de Corriente

Un modelo basado en corrientes como variables de estado tiene la ventaja de ofrecer relaciones simples entre los voltajes y las variables de estado.

Podemos remplazar los términos en $\lambda(t)$ y $\dot{\lambda}(t)$ por términos en $i(t)$ y $\frac{di(t)}{dt}$ utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{dDFq}(t) = (M_{Ddf})[i_{dDF}(t)] \quad (4.26)$$

$$\lambda_{Qq}(t) = (M_{Qq})[i_{Qq}(t)] \quad (4.27)$$

dónde:

$$M_{DdF} = \begin{bmatrix} L_d & M_{dD} & M_{dF} \\ M_{dD} & L_D & M_{DF} \\ M_{dF} & M_{DF} & L_F \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$M_{Qq} = \begin{bmatrix} L_Q & M_{qQ} \\ M_{qQ} & L_q \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Rescribiendo (4.24) para sustituir (4.26) y (4.27) en (4.24), seleccionando las cantidades base para voltaje, corriente y tiempo en el sistema por unidad (pu) e incorporando todas las ecuaciones normalizadas en una expresión matricial y conservando la misma notación para las variables en p.u. que para las variables en la base original, dado que todos los valores son en p.u. escribimos:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_D = 0 \\ v_F(t) \\ v_Q = 0 \\ v_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rDF} & T_2 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{2 \times 2} \\ T_1 & R_{Qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_D(t) \\ i_F(t) \\ i_Q(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{dDF} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & M_{Qq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_D(t) \\ i_F(t) \\ i_Q(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}, \text{ en pu} \quad (30)$$

dónde:

$$R_{rDF} = \text{diag}\{r_r, r_D, r_F\}, \quad R_{Qq} = \text{diag}\{r_Q, r_q\},$$

$$T_1 = [-\omega(t)L_d - \omega(t)M_{dF} - \omega(t)M_{dD}],$$

$$T_2 = [\omega(t)M_{qQ} - \omega(t)M_{dD}],$$

4.10 La Ecuación de Onda Normalizada

Existen muchas formas de escribir la ecuación de onda en la dinámica de un sistema de potencia mientras el Park está dado en pu, y no es muy claro para $\omega(t)$ y t .

Empezamos con $\omega(t)$ en rad/seg, t en seg. y T_a en pu tenemos:

$$\frac{2H}{\omega_B(t)} \frac{d\omega(t)}{dt} = 2H \frac{d\omega(t)}{dt_u} = T_a(t) \quad (4.31)$$

donde; H la constante de inercia en pu, $d\omega(t)$ la velocidad angular base y T_a el par acelerado en pu.

Siendo $t_u = \omega_B(t)t$;

Si t y $\omega(t)$ está en pu, entonces,

$$T_j \frac{d\omega(t)}{dt} = T_a(t) \quad (4.32)$$

donde: $T_j = 2H\omega_B \quad (4.33)$

Los pares aplicados a un generador síncrono se muestra en la Figura 4.3

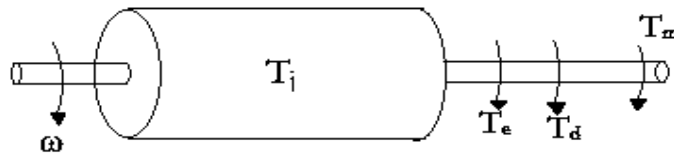


Figura 4.3 Pares aplicados al rotor de un generador síncrono

De la Figura 4.3 se tiene en pu.

$$T_a(t) = T_m(t) - T_e(t) - T_d(t), \quad (4.34)$$

donde:

$$T_e(t) = i_d(t)\lambda_d(t) - i_d(t)\lambda_q(t), \quad (4.35)$$

$$T_d(t) = D_\omega(t), \quad (4.36)$$

siendo D_ω la constante de amortiguamiento.

Sustituyendo (4.26), (4.27), (4.34) a (4.36) en (4.32), tenemos:

$$T_{j\omega}(t) = T_m(t) + \begin{bmatrix} L_d i_q(t) - M_{Dd} i_q(t) - M_{dF} i_q(t) M_{qQ} i_q(t) L_q i_d(t) - D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_D(t) \\ i_F(t) \\ i_Q(t) \\ i_q(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}, \quad (4.37)$$

Finalmente podemos obtener la formulación completa de corriente de la máquina síncrona incluyendo la ecuación angular de potencia la cual es

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t) \quad (4.38)$$

Tomando (4.37), (4.38) y (4.30) el modelo completo está dado por:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_D = 0 \\ v_F(t) \\ v_Q = 0 \\ v_q(t) \\ T_m(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{dDF} & T_2 & & & \\ 0_{1 \times 3} & 0_{2 \times 2} & 0_{5 \times 1} & & \\ T_1 & R_{Qq} & D & & \\ T_3 & T_4 & 1 & & \\ 0_{1 \times 5} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_D(t) \\ i_F(t) \\ i_Q(t) \\ i_q(t) \\ \omega(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{dDF} & 0_{3 \times 2} & 0_{5 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & T_j & 0 \\ 0_{2 \times 5} & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_D(t) \\ i_F(t) \\ i_Q(t) \\ i_q(t) \\ \omega(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}, \text{pu.} \quad (4.39)$$

donde:

$$T_3 = \begin{bmatrix} L_d i_q & M_{Dd} i_q & M_{dF} i_q \end{bmatrix},$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} -M_{Qq} i_d & -L_q i_d \end{bmatrix}$$

Esta ecuación matricial está en la forma (4.25), es claro que el sistema es no lineal, donde la no linealidad se debe al producto de variables de estado.

4.11 Diodo

Un diodo es un dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente eléctrica en una única dirección con características similares a un interruptor, su curva característica consta de dos regiones una por debajo de cierta diferencia de potencial se comporta como un circuito abierto y la otra por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña debido a estos comportamientos se les denomina rectificadores, ya que son dispositivos de suprimir la parte negativa de cualquier señal.

También, es un elemento de comportamiento cuando se le induce una corriente eléctrica a través de él, pero depende de las características de esta corriente para que el dispositivo tenga un comportamiento que nos sea útil.

El diodo es un dispositivo de dos terminales que, en una situación ideal, se comporta como un interruptor común con la condición especial de que sólo puede conducir en una dirección. Tiene un estado encendido, el que en teoría parece ser simplemente un circuito cerrado entre sus terminales y otro apagado. Cuando el voltaje tiene valores positivos de V_D ($V_D > 0V$) el diodo se encuentra en el estado de circuito cerrado ($R=0\Omega$) y la corriente que circula a través de este está limitada por la red en la que esté instalado el dispositivo.

Para la polaridad opuesta ($V_D < 0V$), el diodo se encuentra en el estado de circuito abierto ($R=\infty\Omega$) e $I_D=0\text{ma}$. Durante su fabricación de los diodos rectificadores, se consideran tres factores: la frecuencia máxima en que realizan correctamente su función, la corriente máxima en que puede conducir en sentido directo y las tensiones directa e inversa máximas que soportan.

4.12 Rectificador de Media Onda Monofásico

El rectificador de media onda generalmente se usa sólo para aplicaciones de baja corriente, o de alta frecuencia ya que requiere una capacitancia de filtrado mayor para mantener el mismo voltaje de rizado que un rectificador de onda completa.

Debido a que un diodo mantiene el flujo de corriente en una dirección, se puede cambiar una señal de ca a cd. Cuando la tensión de entrada es positiva, el diodo se polariza en directa y se puede sustituir por un corto un cortocircuito.

Si la tensión de entrada es negativa el diodo se polariza en inversa y se puede remplazar por un circuito abierto. Por tanto, cuando el diodo se polariza en directa, la tensión de salida a través del resistor se realiza por medio de la relación de un divisor de tensión sabemos que el diodo requiere 0.7 volts para polarizarse así que la tensión de salida está reducida en esta cantidad.

Cuando la polarización es inversa, la corriente es cero y la tensión de salida es cero. Este rectificador no es muy eficiente debido a que durante la mitad de cada ciclo la entrada se bloquea completamente desde la salida, perdiendo la mitad de la alimentación. Por dicha razón este circuito tiene un alto factor de rizo.

En la siguiente Figura 4.4 se ilustra un circuito que su función es eliminar unos de los dos semiperiodos de una señal alterna senoidal proveniente del secundario del transformador como se muestra en el esquema el componente principal es el diodo que tiene la propiedad de conducir en un sólo sentido.

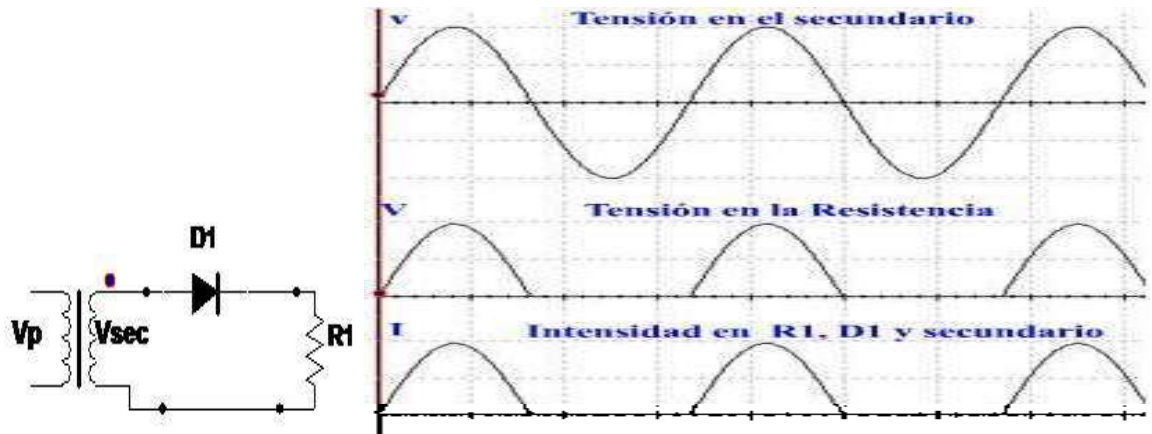


Figura 4.4 Un rectificador de media onda y sus señales

Como se muestra en la primera gráfica de la Figura 4.4 R_1 carga el elemento que vamos a alimentar con la tensión rectificada v_{sec} , tensión de entrada en el rectificador, en la segunda gráfica $v_{sec} = v_D + v_{R1}$, aplicamos una onda senoidal a la entrada (transformador reductor). En el semiciclo positivo el diodo queda polarizado directamente y se comporta como un interruptor cerrado, esto hace que circule una corriente cuya forma de onda esta representada en la tercera gráfica, $v_{R1} = v_{sec} - 0.6$ (para $v_{sec} \geq 0.6V$). En el semiciclo negativo, el diodo se polariza inversamente (ánodo más negativo que el cátodo), comportándose como un interruptor abierto.

No existe corriente por el circuito y en la resistencia de carga R_1 no hay caída de tensión, esto supone que toda la tensión de entrada estará en extremos del diodo como se ilustra en la Figura 4.5 $V_{R1}=0V$ $V_{D1}=V_{sec}$

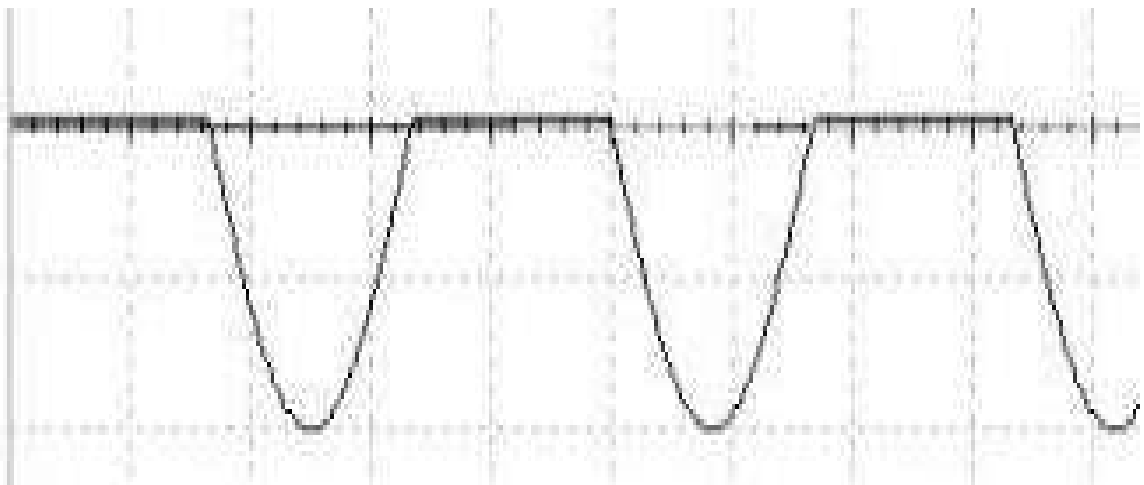


Figura 4.5 Inverso en el diodo

4.13 Rectificador de Onda Completa Monofásico

El rectificador de onda completa utiliza ambas mitades de la onda senoidal de entrada; para obtener una salida unipolar, invierte los semiciclos negativos de la onda senoidal. En esta aplicación se utiliza el devanado central del transformador con la finalidad de obtener dos voltajes vs iguales, en paralelo con las dos mitades del devanado secundario con las polaridades indicadas. Cuando el voltaje de línea de entrada, que alimenta al devanado primario, es positivo, ambas señales marcadas como vs serán positivas. En esta caso D1 conduce y D2 esta polarizado inversamente. La corriente que pasa por D1 circula por la carga y regresará a la derivación central del secundario. El circuito se comporta como rectificador de media onda, y la salida durante los semiciclos positivos será idéntica a la producida por el rectificador de media onda.

Ahora durante los semiciclos negativos del voltaje de ca de la línea, los voltajes marcados como vs serán negativos. Entonces D1 estará en corte y D2 conduce. La corriente conducida por D2 circulará por la carga y regresa a la derivación central. Se deduce que durante que los semiciclos negativos el circuito se comporta como un rectificador de media onda, excepto que ahora el diodo D2 es el que conduce. Lo más importante es que la corriente que circula por la carga siempre pasa por la misma dirección y el voltaje Vo será unipolar.

La onda de salida se obtiene suponiendo que un diodo conductor tiene una caída constante de voltaje, es decir, se desprecia el efecto de la carga.

El valor medio o promedio de la rectificación de onda completa, es

$$\frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\pi} V_p \sin \alpha * d\alpha = \frac{V_p}{\pi} [\pm \cos \alpha]_0^{\pi} = \frac{2V_p}{\pi}$$

El valor eficaz de la rectificación de la onda completa, se determina por

$$V_{ef} = \left[\frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\pi} V_p^2 \sin^2 \alpha * d\alpha \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

El factor triple de rectificación de onda completa esta dada por

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad V_{med} = \frac{2V_p}{\pi} \quad r = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)^2 - 1} \approx 0.48$$

En la Figura 4.6 se muestra la gráfica de un rectificador de onda completa con derivación central.

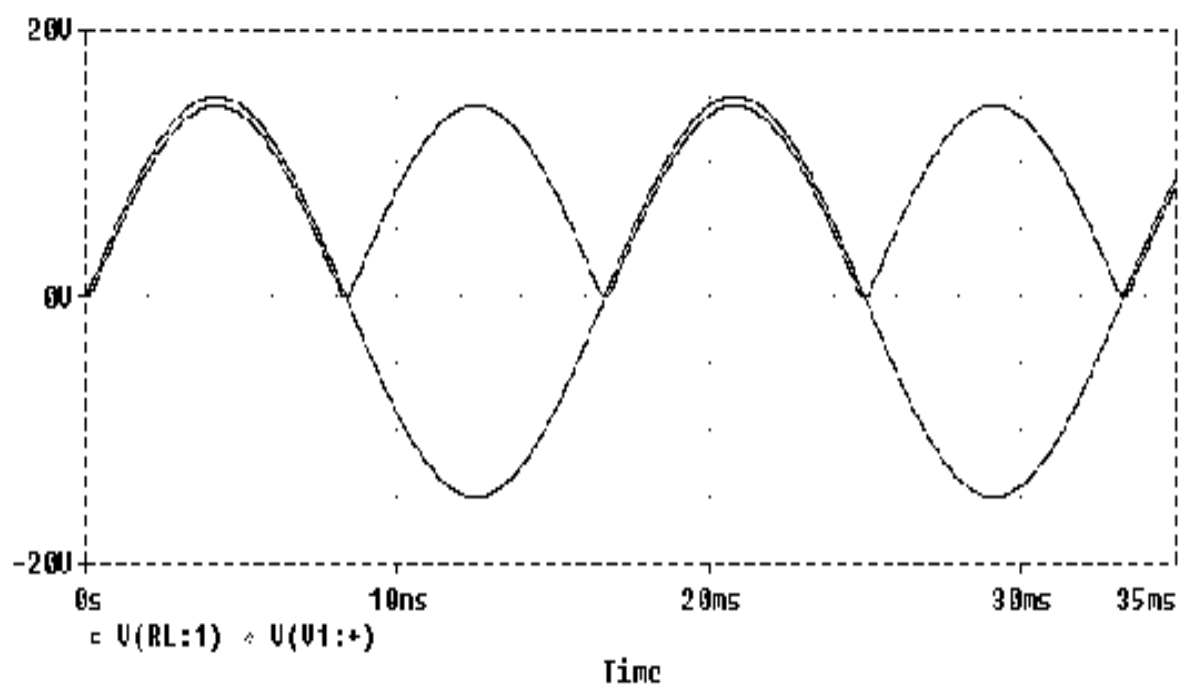


Figura 4.6 Gráfica de un rectificador de onda completa

En la Figura 4.7 se muestra un rectificador de onda completa con tap central.

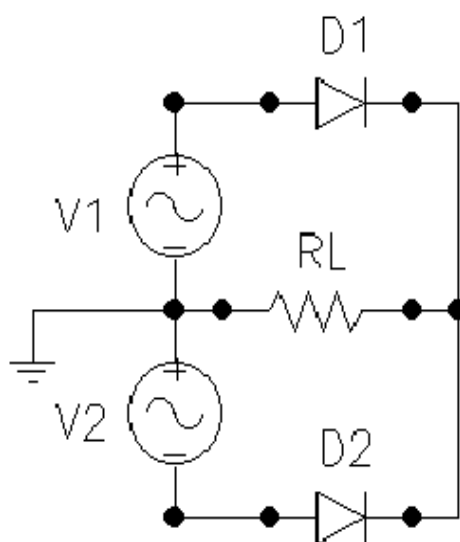


Figura 4.7 Rectificador de onda completa con tap central

4.14 Rectificador de Media Onda Trifásico

Este tipo de circuito es muy poco utilizado, porque los aparatos suelen ser bastante exigentes en cuanto a la calidad de la onda, la cual deja mucho que desear en este circuito. La onda sale de un rizado muy pronunciado.

En la Figura 4.8 se muestra un rectificador de media onda trifásico.

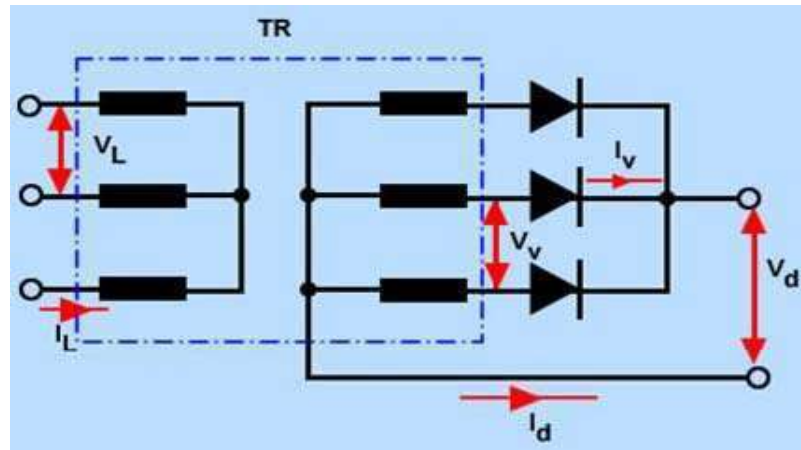


Figura 4.8 Rectificador de media onda trifásico

Como se observa, el transformador tiene un punto intermedio que es donde se descarga la carga que alimenta el rectificador. En cuanto a la relación entre las distintas tensiones e intensidades tenemos,

$$V_d = 0.6 * V_v$$

$$I_d = 1.7 * I_v$$

4.15 Rectificador de Onda Completa Trifásico

Los rectificadores trifásicos se utilizan normalmente en las industrias para producir tensión y corriente para grandes cargas.

En el siguiente circuito de la Figura 4.9 muestra un rectificador de onda completa con secundario en estrella y carga fuertemente inductiva. La tensión en el punto A es idéntica a la tensión de un rectificador controlado de media onda y tensión en B es negativa. El rectificador de onda completa es en realidad dos rectificadores controlados de media onda ensamblados, en el que uno de los de media onda tiene los tiristores invertidos (estos dispositivos dependen si son o no controlados).

La tensión AB es por tanto la diferencia de tensión en A y tensión en B.

$$V_{AB} = V_A - V_B = V_{picoface} * \frac{q}{\pi} * \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{q}\right) * \cos(\alpha) - \left(-V_{picoface} * \frac{q}{\pi} * \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{q}\right) * \cos(\alpha)\right) = \frac{2V_{picoface}}{\pi * q * \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{q}\right) * \cos(\alpha)}$$

La intensidad para la carga es: $I = \frac{V_{AB}}{R}$

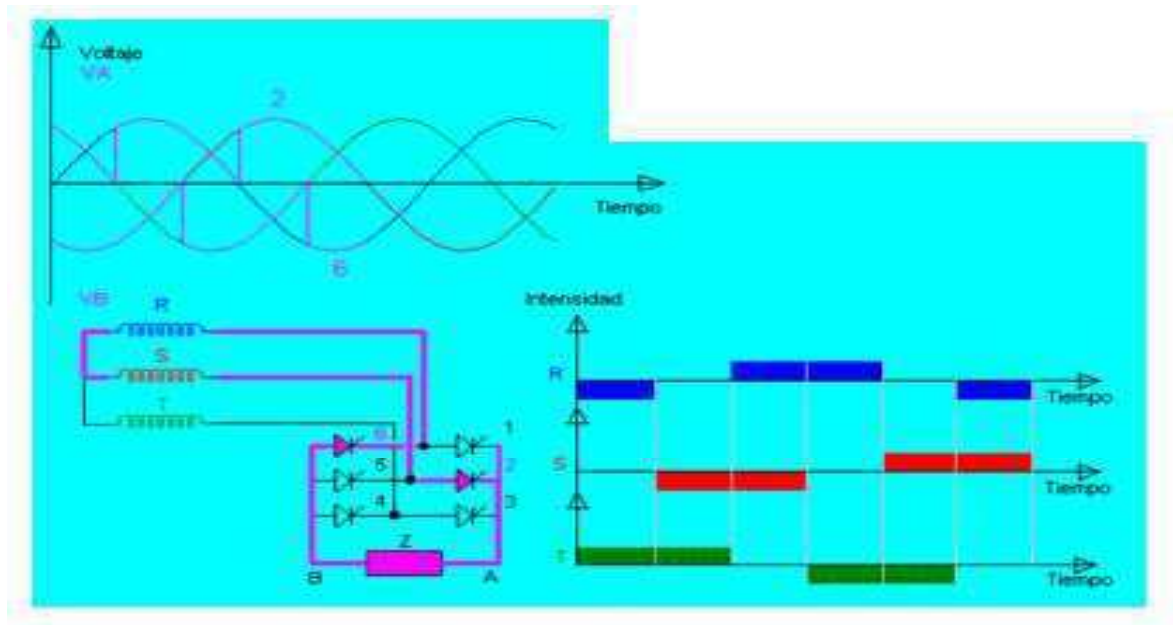


Figura 4.9 Circuito y graficas de un rectificador trifásico de onda completa

Como se puede observar en la Figura 4.9 siempre funciona con dos tiristores funcionando a la vez esto significa que es un circuito controlado.

Los rectificadores controlados reciben este nombre porque utilizan un dispositivo de control el elemento llamado tiristor.

Para el caso de los rectificadores no controlados se utilizan la misma topología pero sustituyendo los diodos por tiristores, la ventaja de utilizar tiristores viene dada por la capacidad que tienen de retardar en una supuesta conducción, sucediendo esta cuando la tensión anodo-catodo sea positiva y además reciba un pulso adecuado de tensión y corriente en su puerta. Al retardar el ángulo de disparo es posible variar la tensión rectificada de salida, de ahí el calificativo de “controlados”.

En los rectificadores controlados, por lo tanto, se controla la puesta en conducción del tiristor y el bloqueo se realiza de forma natural cuando se anula la corriente por el dispositivo.

4.16 La Simulación Dinámica en Diagrama de Bloques en 20-Sim

El software de 20-sim es un programa de modelado y simulación que funciona en la plataforma de Windows, se pueden simular el comportamiento de sistemas eléctricos mecánicos, hidráulicos y cualquier combinación de estos de manera fácil e intuitiva.

El diagrama de bloques es una representación del funcionamiento interno de un sistema que se hace mediante bloques y sus relaciones, además definen la organización de todo el proceso interno, sus entradas y sus salidas del sistema. Un diagrama de modelo matemático es utilizado para representar el control de sistemas físicos en el cual intervienen gran cantidad de variables que se relacionan en todo proceso.

4.16.1 Señal de Entrada Senoidal

Es una señal senoidal que representa una función alterna, esta puede ser considerada como voltaje o corriente para el análisis del sistema a analizar.



V_{a_p}

20-sim 4.1 Viewer (c) CL

Figura 4.10 Bloque de señal senoidal

En la Figura 4.10 representa una de una señal senoidal, esta tiene como parámetros la amplitud de la onda y velocidad angular de la misma.

A continuación se muestra el programa que identifica a este bloque en 20-Sim.

Parameters

real Frec = 60.0 {Hz};

variables

boolean hidden change;

real hidden half;

equations

"calculate at least 2 points per cycle to get a triangle"

half = pi / (2 * pi * Frec); change = frequency event (half, half / 2);

"calculate the sine wave"

output = amplitude * sin ((2 * pi * Frec) * time + (pi / 2) + 0);

4.16.2 Ganancia

En 20-Sim se cuenta con un bloque que representa la ganancia de un sistema, en el cual la señal de entrada será afectada por dicha ganancia obteniendo así su salida. Este bloque se representa en la Figura 4.11.

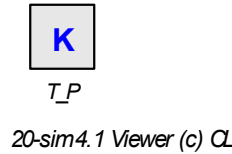


Figura 4.11 Bloque de ganancia

En la Figura 4.11 se muestra un bloque que representa una ganancia en el diagrama de bloques de un sistema, el bloque de ganancia tiene como argumento un número real. En el programa que se muestra a continuación las señales inicial, directa y cuadratura están siendo afectadas por la ganancia del bloque llamado T_P.

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));

4.16.3 Graficador

El bloque graficador muestra el comportamiento de las variables presentes en el modelo representado en el diagrama de bloques, y nos permite observar el desempeño de estas y realizar el análisis del mismo. El bloque que representa el graficador se muestra en la Figura 4.12, a diferencia de los anteriores este bloque no recibe argumentos por parte del usuario, ya que estos los recibe por parte del programa para representar el comportamiento en un punto dado.

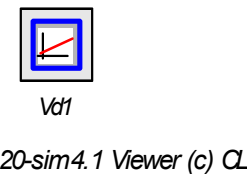


Figura 4.12 Bloque del graficador

4.16.4 Sumador

En 20-Sim existe un bloque para representar una suma o diferencia de funciones, este bloque se representa en la Figura 4.13 donde los argumentos de entrada representa las funciones de entrada las cuales serán utilizadas para obtener la salida dependiendo de la función a realizar ya sea suma o diferencia.

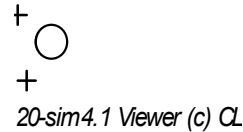


Figura 4.13 El sumador

4.16.5 Bloque Dinámico

El bloque dinámico es un encapsulamiento que nos permite modificar sin tener que referirnos ni editarlos en forma específica estos contienen por lo menos un parámetro o acción asociada al parámetro en ellos se definen las propiedades, posiciones, distancias y ángulos para la geometría del bloque como se ilustra en la Figura 4.14.

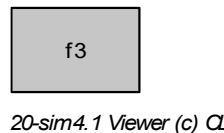


Figura 4.14 Bloque dinámico

4.17 Simulación de un Generador Síncrono Trifásico

En la Figura 4.15 se ilustra un generador síncrono trifásico, el devanado de campo es alimentado con un voltaje de 1.9V de corriente directa, así se tiene un voltaje de alterna en el devanado de armadura el cual es conectado a un bus infinito.

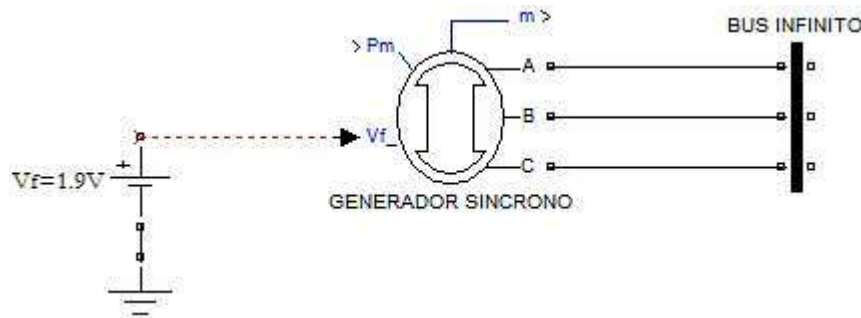


Figura 4.15 Generador síncrono conectado a un bus infinito

En el apartado 4.4 de la ecuación 4.1 se hace referencia al voltaje $v(t)$ instantáneo en las terminales del devanado de armadura, este voltaje se encuentra en el dominio en el tiempo o secuencia a, b y c. Aplicando la transformación de Park se pueden expresar las variables del estator como corrientes, voltajes o enlaces de flujo en un nuevo conjunto de variables independientes del tiempo, con estos resultados se obtienen las variables en los tres ejes, d, q y estacionario.

La ecuación de estado $\dot{x} = Apx + Bpu$ que rige el comportamiento de la corriente en el eje directo, en el devanado de campo, en eje de cuadratura y la velocidad angular del generador síncrono sin el devanado de amortiguamiento se muestra en la ecuación (4.40) de forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d L_1 & -r_F L_2 & 0 & -\lambda_q L_1 \\ -r_d L_3 & -r_F L_4 & 0 & -\lambda_q L_3 \\ 0 & 0 & \frac{-r_q}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{-\lambda_d}{T_J} & -\frac{0}{T_J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 e_1 + L_2 e_6 \\ L_3 e_1 + L_4 e_6 \\ \frac{1}{L_q} e_{12} \\ \frac{1}{T_J} e_{16} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} e_1 + b_{12} e_6 \\ b_{21} e_1 + b_{22} e_6 \\ b_{31} e_{12} \\ b_{41} e_{16} \end{bmatrix}; \quad (4.40)$$

donde; $f_3 = I_d$; Corriente en el eje directo, $f_5 = I_f$; Corriente en el devanado de campo, $f_{11} = I_q$; Corriente en el eje de cuadratura, $f_{18} = w$; Velocidad angular.

Esta es la simulación de un generador síncrono trifásico en la cual se puede observar tres señales con voltaje de entrada del estator de onda senoidal V_a, V_b y V_c con su Eje de cuadratura, Eje directo y eje inicial a través de la ganancia unitaria, con la que se tiene diferentes bloques dinámicos como f3, f5, f11 y f18 mostrado en la Figura 4.19 con sus diferentes sumatorias y sus respectivas ganancias.

En la Figura 4.16 se muestra el bloque que representa al voltaje de alimentación en la fase a, de la misma forma se utiliza el bloque para la fase b y c.



V_{a_p}

20-sim4.1 Viewer (c) CL

Figura 4.16 Señal de entrada de onda senoinal V_{a_p}

Parameters

real Frec = 60.0 {Hz};

Variables

boolean hidden change;

real hidden half;

equations "calculate at least 2 points per cycle to get a triangle"

half = $\pi / (2 * \pi * \text{Frec})$;

change = frequency event (half, half / 2); "calculate the sine wave"

output = amplitude * $\sin((2 * \pi * \text{Frec}) * \text{time} + (\pi / 2) + 0)$;

En la Figura 4.17 se ilustra el bloque de ganancia donde la salida de este será afectada por la ganancia que se le dé a este, en el punto a utilizar. Este bloque es modificado para su programación y así introducir la transformación de Park.



T_P

20-sim4.1 Viewer (c) CL

Figura 4.17 Ganancia

variables

real teta;

Equations

teta = $2 * \pi * F * \text{time}$;

$V_{o1} = \sqrt{2/3} * (V_{a1}/\sqrt{2} + V_{b1}/\sqrt{2} + V_{c1}/\sqrt{2})$;

$V_{d1} = \sqrt{2/3} * (V_{a1} * \cos(\text{teta}) + V_{b1} * \cos(\text{teta} - 2 * \pi / 3) + V_{c1} * \cos(\text{teta} + 2 * \pi / 3))$;

$V_{q1} = \sqrt{2/3} * (V_{a1} * \sin(\text{teta}) + V_{b1} * \sin(\text{teta} - 2 * \pi / 3) + V_{c1} * \sin(\text{teta} + 2 * \pi / 3))$;

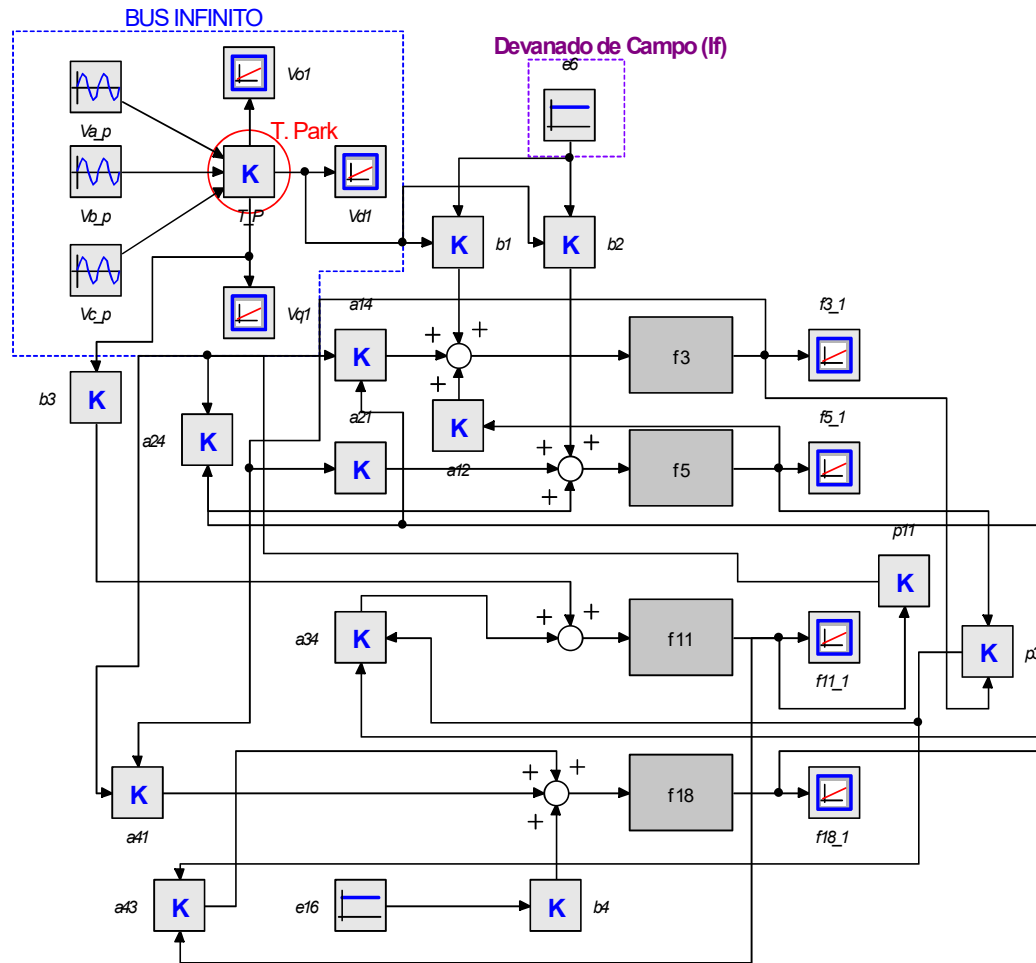


Figura 4.18 Generador síncrono trifásico

En la Figura 4.19 se ilustra el diagrama de flujo donde $f_{11} = I_q$ en el conjunto del eje q, (eje de cuadratura).

20-sim 4.1 Viewer (c) CLP 2010

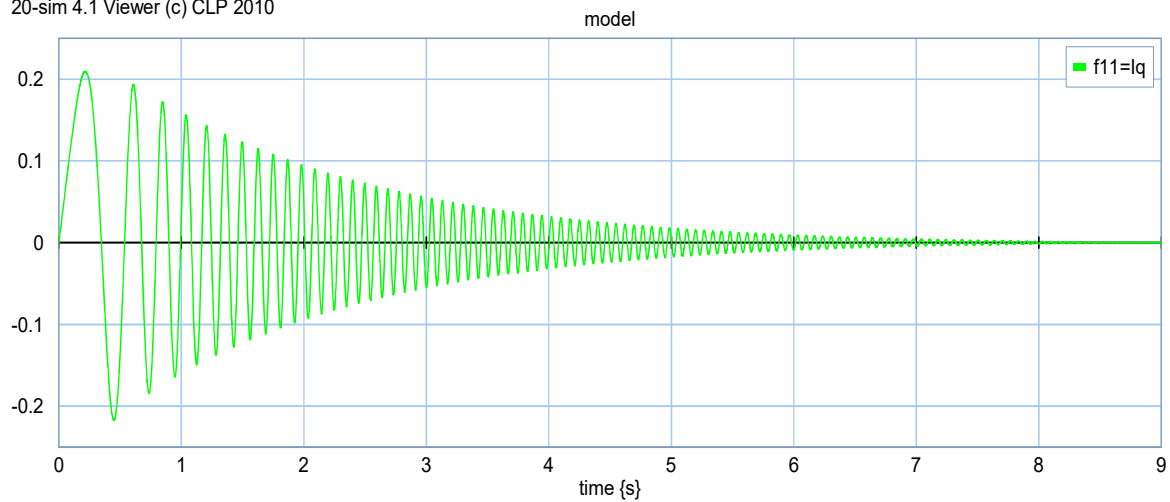


Figura 4.19 El comportamiento de la corriente del eje de cuadratura

En la Figura 4.20 se ilustra la corriente en el eje de cuadratura $f_3 = i_d$.

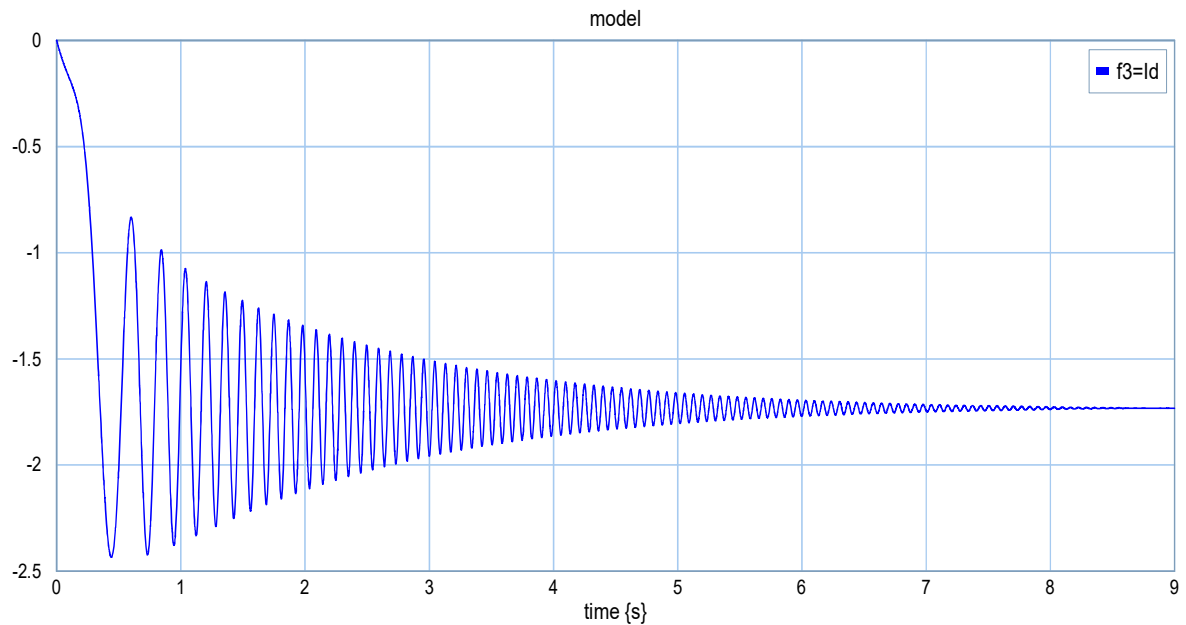


Figura 4.20 Comportamiento de la corriente del eje directo

En la Figura 4.21 se ilustra la corriente en el devanado de campo $f_5 = i_F$ son corrientes así, $i_f(t)$ denota corriente en F, $v_f(t)$: voltaje en F, r_f , resistencia de F y L_F inductancia propia de F.

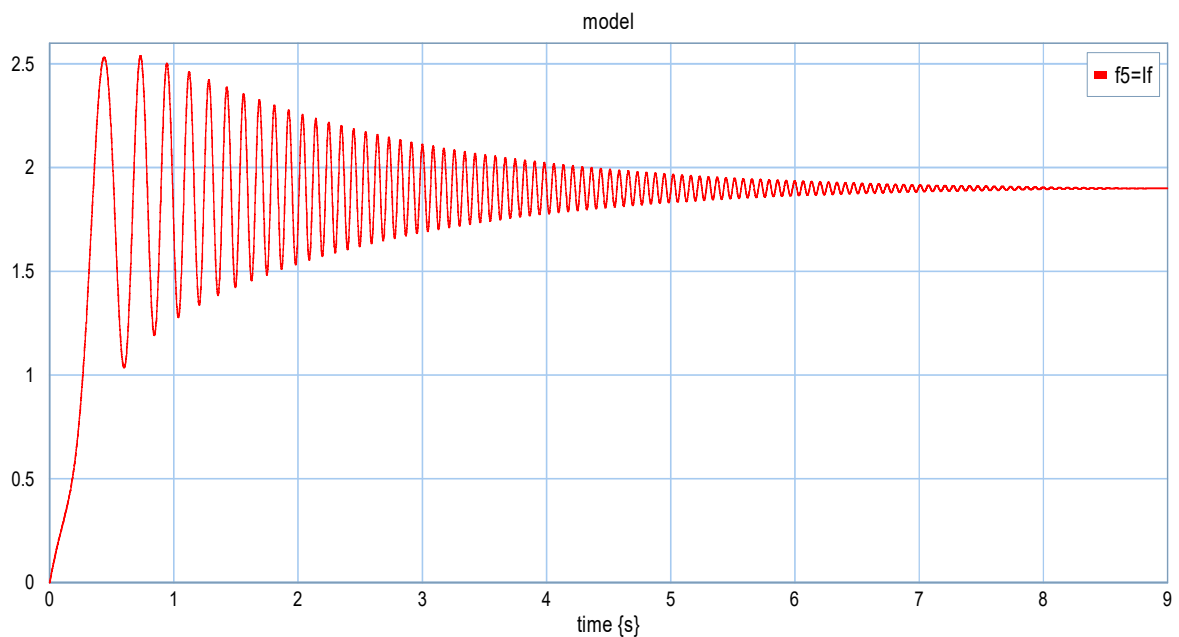


Figura 4.21 Gráfica del devanado de campo

En la Figura 4.22 se ilustra $f_{18} = \omega$, denota la velocidad angular del rotor en rad/seg.

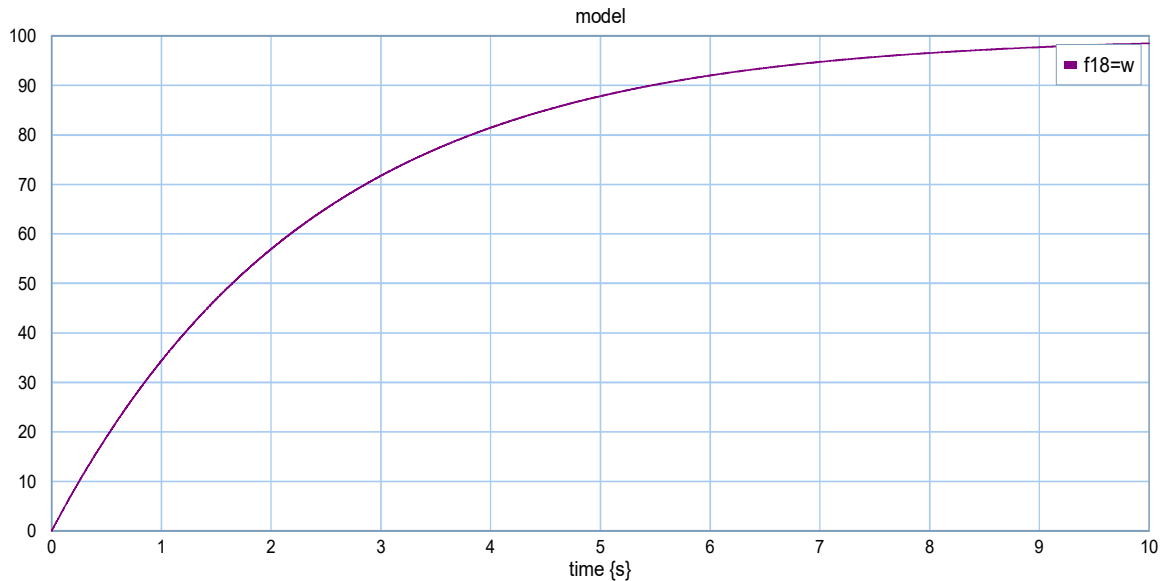


Figura 4.22 Gráfica del comportamiento de la velocidad

En la Figura 4.23 se ilustra los bloques de la transformación inversa de Park.

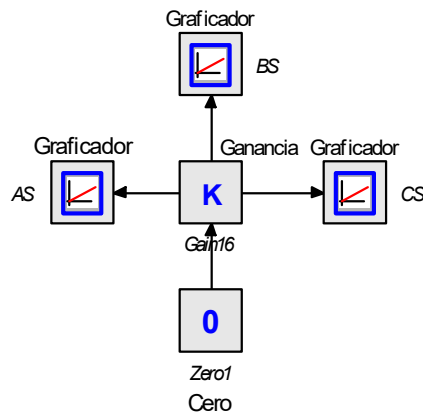


Figura 4.23 Transformación inversa de Park

4.18 Simulación de un Rectificador de Onda Completa

Esta es una simulación de un rectificador de onda completa en la que se realiza a través de bloques de switcheo, se tiene una retroalimentación para obtener la rectificación tanto de la parte superior como de la inferior de la onda como se ilustra en la figura 4.27, para abrir y cerrar, también está conectado hacia un bloque que se llama cero al igual a una sumatoria para sumar la parte negativa de la onda senoidal y la parte positiva de la onda senoidal, obteniendo la rectificación de la onda completa.

En la Figura 4.24 se ilustra el bloque llamado switch que se encarga de abrir o cerrar dependiendo del tipo de retroalimentación que se esté utilizando para los diferentes rectificadores.

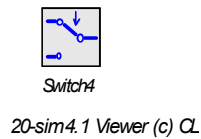


Figura 4.24 Switch

A continuación se muestra el programa que describe a la Figura 4.25.

```
equations
output = if condition >= 0.0 then
input high;
else
if condition < 0.0 then
input low;
else ; 0.0 ;
end;
end
```

La Figura 4.25 representa la referencia el cual el switch interrumpe la forma de onda.

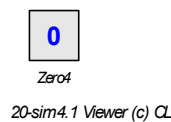


Figura 4.25 Cero

A continuación se muestra el programa que describe a la Figura 4.26.

```
equations
output = 0;
```

En la Figura 4.27 se ilustra un bloque de una ganancia igual a menos uno, este permitirá invertir el ciclo para el rectificador de onda completa.



Figura 4.26 Parte negativa

A continuación se muestra el programa que describe a la Figura 4.27

Equations

output = - input;

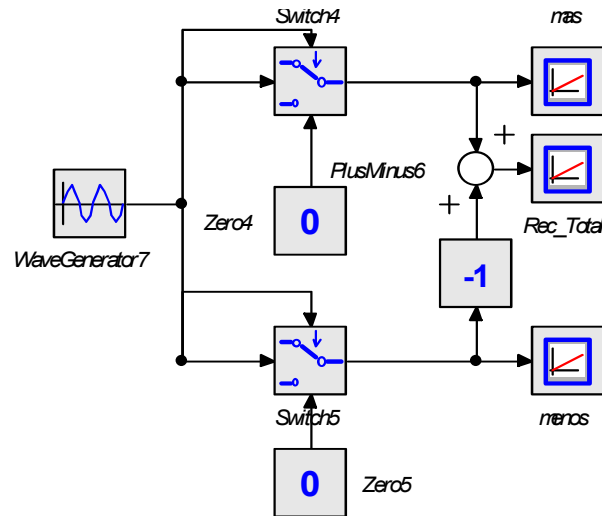


Figura 4.27 Modelado Rectificador de Onda Completa

En la Figura 4.28 se ilustra la parte negativa y positiva del rectificador, así como la suma de estas para formar la rectificación de onda completa.

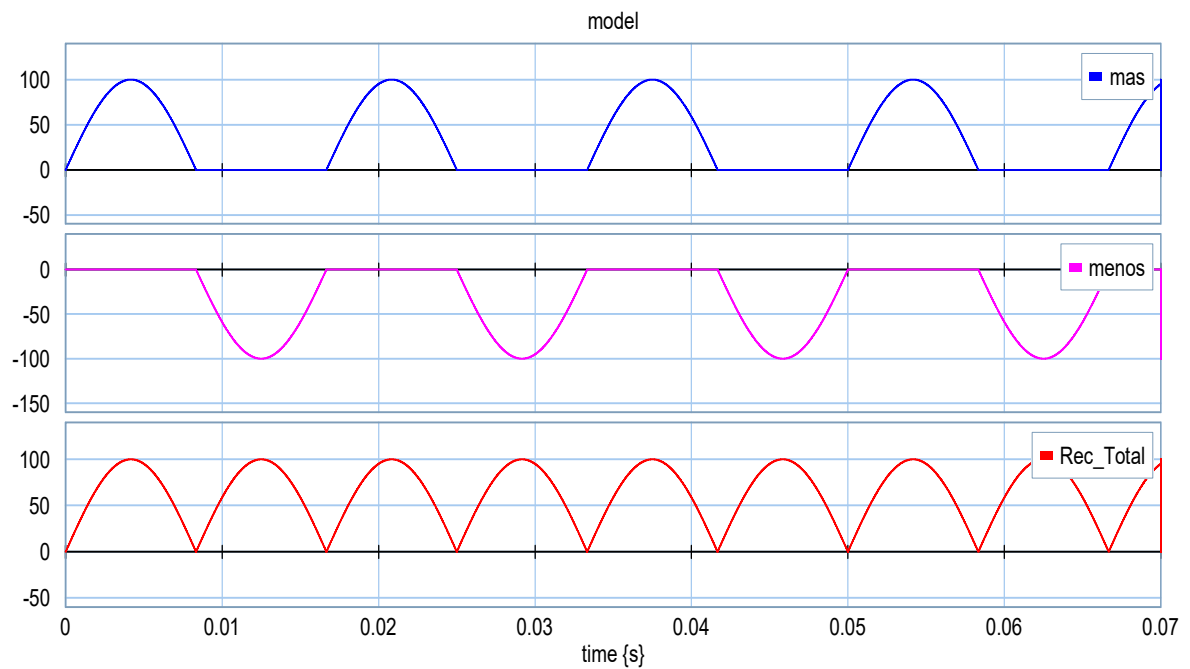


Figura 4.28 Rectificación de onda completa

4.19 Simulación de un Rectificador Trifásico

A continuación se muestra en la Figura 4.29 el modelo a utilizar para lo que es el rectificador trifásico, en el cual se tiene tres entradas V_a , V_b y V_c de onda senoidal, estas pasan a través de un rectificador monofásico como se ilustra en la Figura 4.27, obteniendo un semiciclo positivo para cada uno de ellos finalmente se suman a través de un bloque de sumatoria para obtener la rectificación completa de la onda trifásica, como se ilustra en la Figura 4.31.

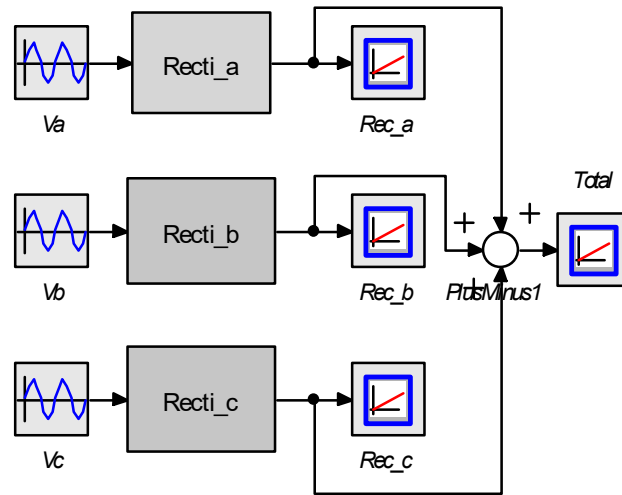


Figura 4.29 Rectificador trifásico

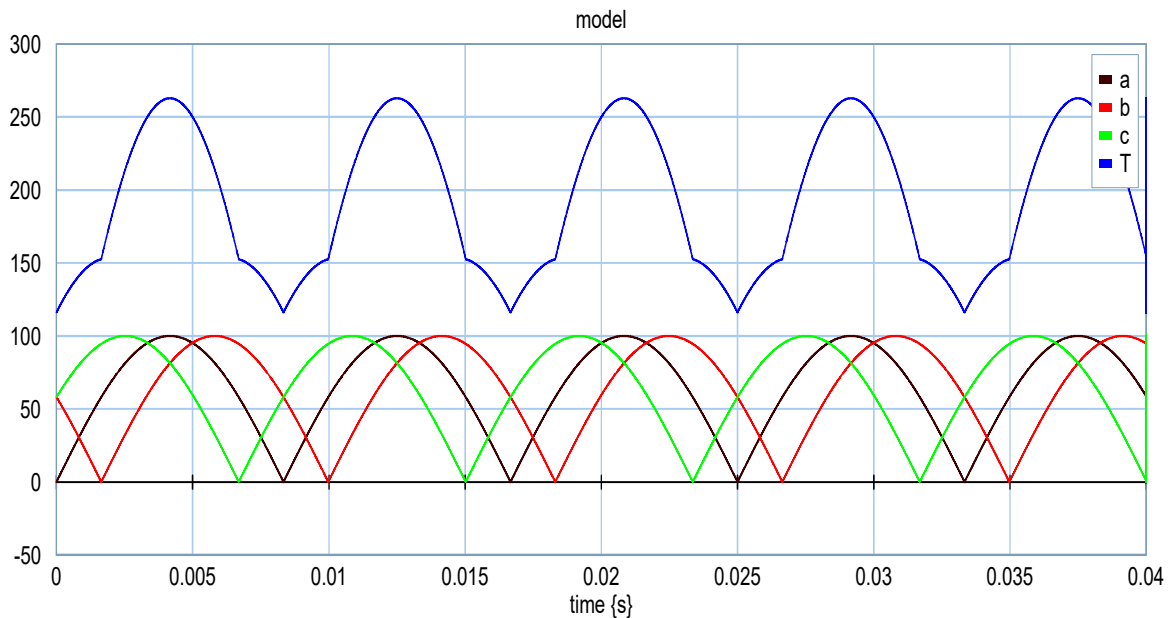


Figura 4.30 Respuesta del rectificador trifásico

4.20 Simulación del Generador con el Rectificador

En la Figura 4.31 se ilustra el generador síncrono con el rectificador, ambos están conectados trifásicamente el cual tiene una alimentación de voltaje de corriente directa, obteniendo un voltaje de alterna en el devanado de armadura pero conectado a un bus infinito.

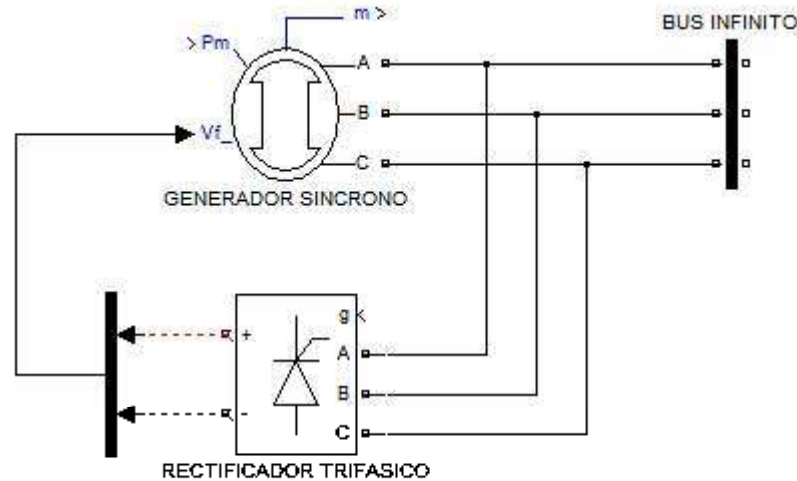


Figura 4.31 Generador con el rectificador de devanado de campo

En la sección 4.17 del capítulo 4 se describe de manera particular la simulación de un generador síncrono trifásico al igual que en este apartado (4.20), realizando las mismas condiciones con la diferencia que en esta simulación se le agrega el rectificador trifásico el cual tiene las consideraciones de la sección 4.19.

4.21 Simulación del Generador con el Rectificador

En la Figura 4.32 se ilustra la simulación del generador síncrono el cual está conectado al rectificador trifásico. Para así analizar cada una de las gráficas como se ilustra en la Figura 4.33 ($f_{11} = I_q$), Figura 4.34 ($f_3 = I_d$), Figura 4.35 ($f_5 = I_f$), y Figura 4.36 ($f_{18} = w$) con sus variaciones de corrientes y velocidad. También se ilustran las Figuras 4.37 (AS), 4.38 (BS) y 4.39 (CS).

En la Figura 4.33 se ilustra el diagrama de flujo donde $f_{11} = I_q$ en el conjunto del eje q.

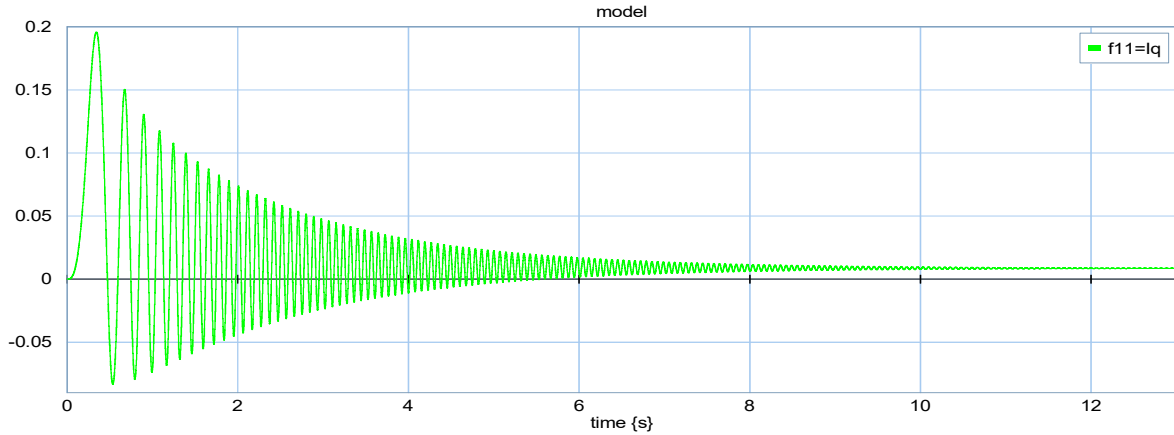


Figura 4.33 Comportamiento del eje de cuadratura

En la Figura 4.34 se ilustra la corriente en el eje directo $f_3 = i_d$.

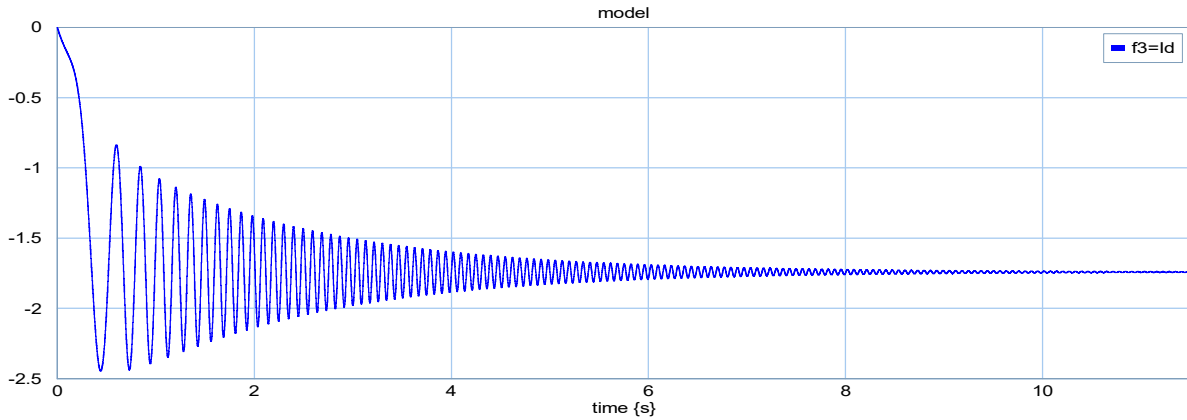


Figura 4.34 Comportamiento de la corriente de eje directo

En la Figura 4.35 se ilustra el devanado de campo $f_5 = i_F$ son corrientes así, $i_f(t)$ denota corriente en F, $v_f(t)$: voltaje en F, r_f , resistencia de F y L_F inductancia propia de F.

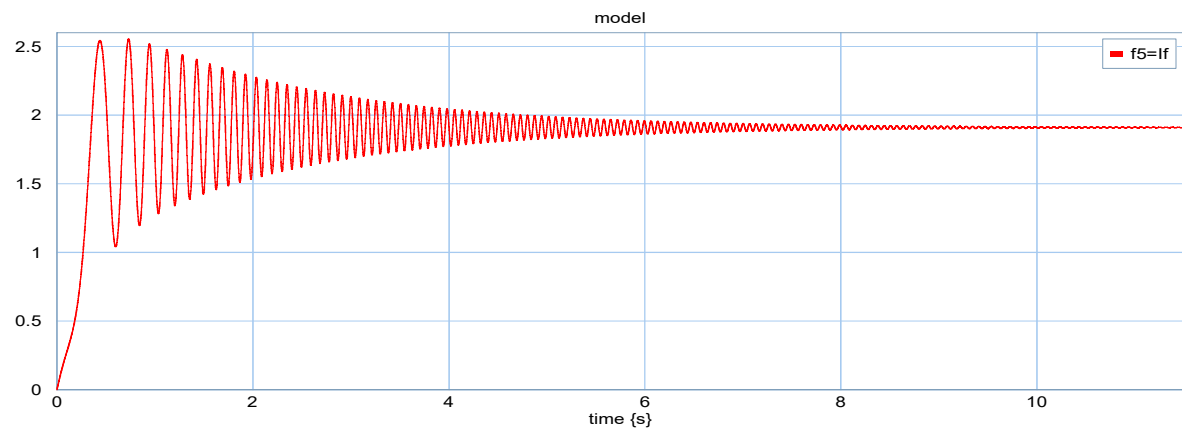


Figura 4.35 Gráfica del devanado de campo

En la Figura 4.36 se ilustra $f_{18} = \omega$, denota la velocidad angular del rotor en rad/seg.

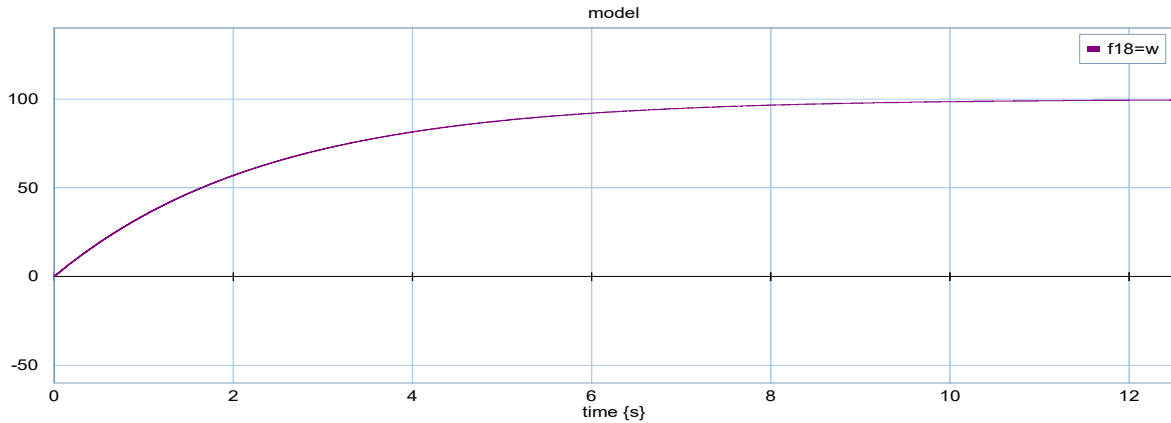


Figura 4.36 Comportamiento de la velocidad

En la Figura 4.37 se ilustra la corriente de fase en el estator del devanado de armadura de la fase A.

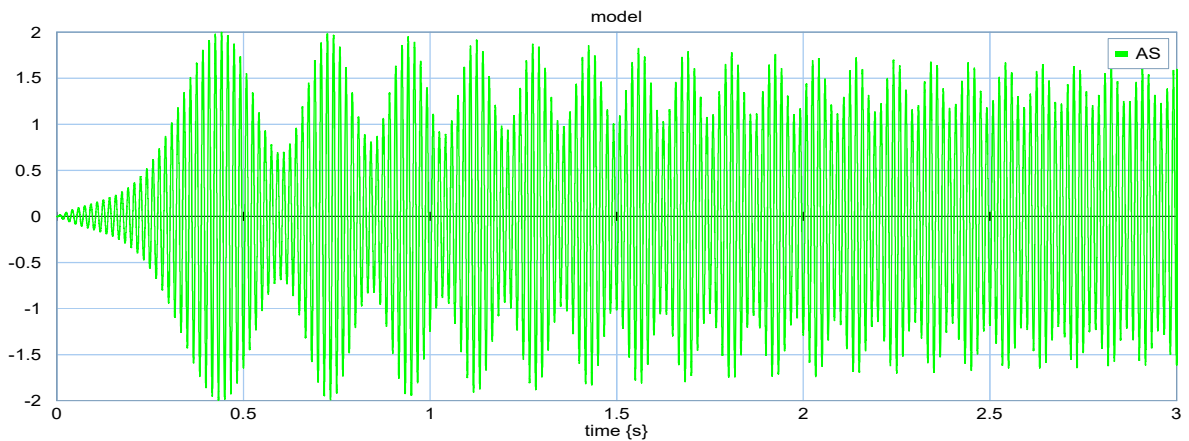


Figura 4.37 Comportamiento de la corriente, fase A

En la Figura 4.38 se ilustra la corriente del devanado de armadura de la fase B.

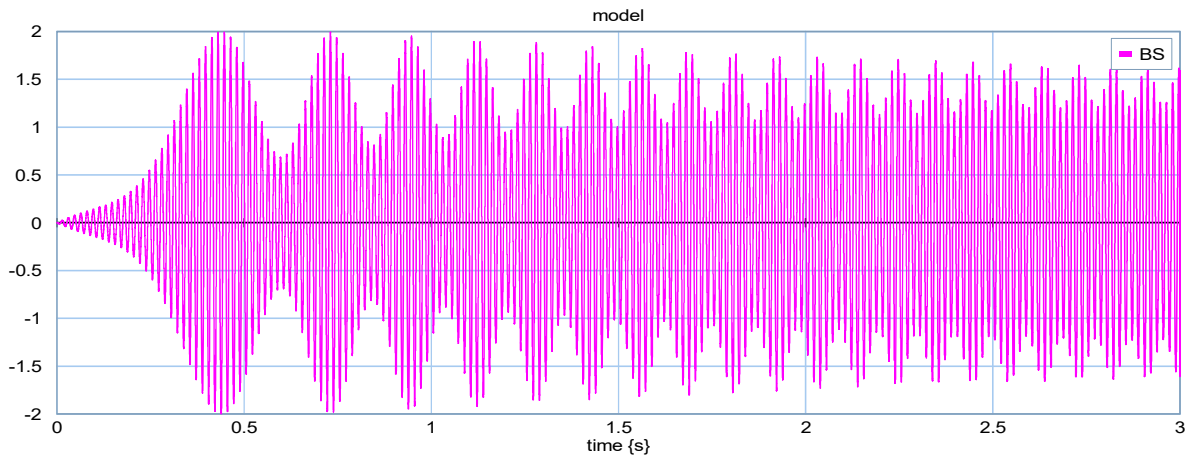


Figura 4.38 Comportamiento de la corriente, fase B

En la Figura 4.39 se ilustra la corriente en el estator del devanado de armadura de la fase C utilizando la transformación inversa de Park.

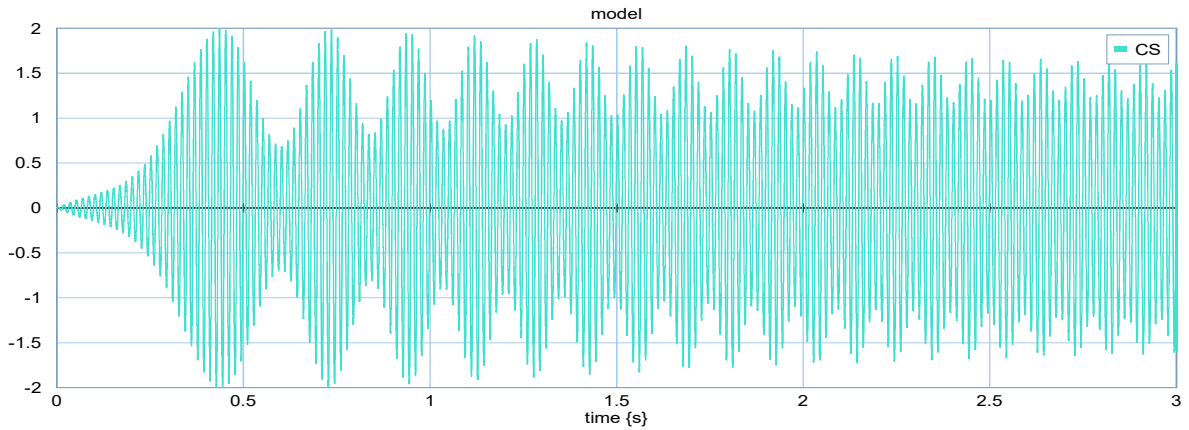


Figura 4.39 Comportamiento de la corriente, fase C

En la Figura 4.40 se ilustra las gráficas de las corrientes del estator en el devanado de armadura utilizando la transformación inversa de Park para las fases A, B y C.

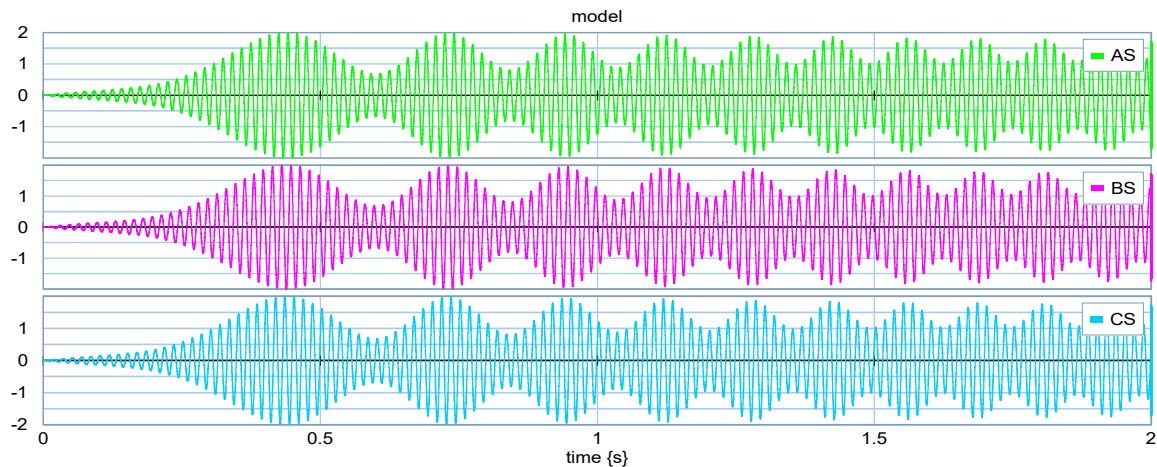


Figura 4.40 Comportamiento de las corrientes

En la Figura 4.41 se ilustra las tres fases defasadas.

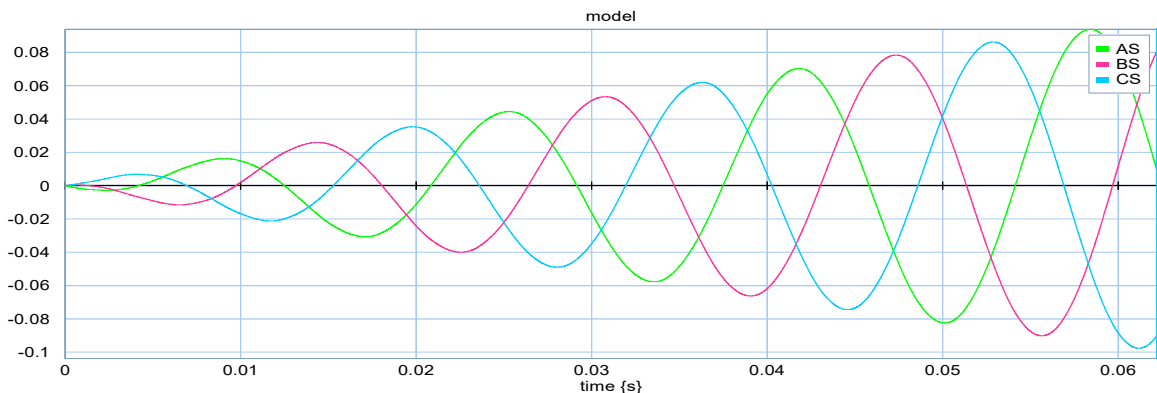


Figura 4.41 Comportamiento de las fases

Capítulo 5

Conclusiones Recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la presente tesis se describe la importancia de los sistemas de excitación en los generadores síncronos y en particular de las centrales de generación de energía eléctrica.

Así mismo, esta tesis analiza los diferentes tipos de centrales de generación, esto con la finalidad de realizar la descripción de sus componentes para la generación de energía eléctrica.

Con el objetivo de modelar y simular el comportamiento de un sistema de excitación en una central de generación; se propone el modelo de un generador síncrono en componentes d-q y conectado al bus infinito (Sistema Eléctrico Nacional) a través de la transformación de Park.

El modelo propuesto del generador y la transformación de Park se desarrolló en el software 20-Sim que permite en un ambiente gráfico con diagrama de bloques y la simulación de sistemas dinámicos.

Una vez modelado y simulado el sistema de generación, se diseñó y simuló un sistema de excitación básico basado en un rectificador trifásico de onda completa.

Finalmente, se concluye que el sistema de excitación modelado permite suministrar al devanado de campo, la corriente directa necesaria para la operación del generador síncrono.

5.2 Recomendaciones

La presente tesis describe el modelado y simulación de un sistema de excitación básico. Este sistema de excitación se describe como básico ya que se recomienda que a partir de esta excitación diseñada pueda modelarse un sistema de excitación más completo y real como los que existen en centrales de generación.

Finalmente, se recomienda el uso del software de simulación 20-Sim, ya que es muy versátil y completo para el modelado de sistemas dinámicos.

Bibliografía

1. - Power Electronics
Mohan Undeland Robbins

2. - Electrical Machines
Second Edition
Charles S. Siskind
McGraw Hill International Editions

- 3.- Máquinas Eléctricas
Stephen J. Chapman

- 4.- Máquinas Eléctricas
M. Kostenko y L. Piotrovsky

- 5.- Máquinas Eléctricas y Transformadores
Hüseyin R. Hiziroglu
Alfa Omega Oxford