



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE CAMBIO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN
DINÁMICO EN UN GENERADOR SINCRÓNICO, POR UN
SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO DE UNA PLANTA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

Carlos Eduardo Fuentes Soto

Asesorado por Ing. Enrique Ruiz Carballo

Guatemala, noviembre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE CAMBIO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN
DINÁMICO EN UN GENERADOR SINCRÓNICO, POR UN
SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO DE UNA PLANTA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS EDUARDO FUENTES SOTO

ASESORADO POR ING. ENRIQUE RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, noviembre de 2005.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Inga. Ingrid Rodríguez de Louckota
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi
EXAMINADOR	Ing. Francisco Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE CAMBIO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN DINÁMICO EN UN GENERADOR SINCRÓNICO, POR UN SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 2 de agosto de 2005.

CARLOS EDUARDO FUENTES SOTO.

DEDICATORIA A:

- DIOS** Mi guía y fuerza en cada paso de mi vida y amigo siempre fiel.
- Mis padres** Abelino Fuentes y Eduvina Soto, por su apoyo constante, los consejos y guía en los momentos de dificultad y sobre todo por su amor, Dios y la Virgen María los bendiga siempre.
- Mis hermanos** Rosy, Francisco, Mari y Victoria, por su apoyo y cariño.
Lidita (Q.E.P.D.), por sus consejos, apoyo y su compañía en esta vida.
- Mis sobrinos** Mayte, Alexandra, Cristian, Josselyn, Diana, Irving, Iván, José, Madelein y Diego, por su cariño y los momentos de felicidad que me han dado.
- Mis amigos y amigas** por todos los momentos de convivencia, su compañía, consejos y su amistad sincera.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por el regalo de la vida.
Mis padres	Por su apoyo y amor.
Mari Fuentes y familia	Por permitirme permanecer en su hogar durante el estudio de mi carrera, Dios y la Virgen María los bendigan.
Mi asesor	Por su colaboración y apoyo para la realización de este trabajo.
Personal de Hidroeléctrica Santa María.	Especialmente a Ing. Alvaro Morataya y Marvin Salanic, por su desinteresada colaboración en el presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Máquinas eléctricas rotativas.....	1
1.1.1. Principio de funcionamiento.....	1
1.1.2. Máquinas sincrónicas.....	5
1.1.3. Máquinas de inducción.....	8
1.2. Generador sincrónico.....	10
1.2.1. Devanado de campo.....	12
1.2.2. Devanado de armadura.....	14
1.2.3. Excitación del generador.....	14
2. EL GENERADOR SINCRÓNICO EN UN SISTEMA DE GENERACIÓN	17
2.1. Generación eléctrica.....	17
2.2. Generador sincrónico.....	19
2.2.1. Sistemas de excitación.....	23
2.2.2. Sistema de excitación dinámico.....	26
2.2.3. Sistema de excitación estático.....	28
2.3. Función de los sistemas de excitación.....	29
2.3.1. Control del voltaje en terminales del generador, caso de un generador aislado.....	30

2.3.2. Control de la potencia activa y reactiva, caso de un generador conectado a una barra infinita.....	36
3. SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO (SEE).....	41
3.1. Modelo básico del SEE.....	41
3.1.1. Elementos principales del SEE.....	43
3.1.2. Disposición física de los elementos del SEE, caso de un SEE Basler Electric.....	44
3.2. Funcionamiento.....	45
3.2.1. Transformador de potencia.....	46
3.2.2. Chasis de rectificación.....	47
3.2.2.1. Contactor de desconexión.....	47
3.2.2.2. Excitación del campo (función de cebado).....	47
3.2.2.3. Puente rectificador de potencia.....	48
3.2.3. Chasis de control.....	50
3.2.3.1. Transformadores de sensado.....	50
3.2.3.2. Comparador de compensación en paralelo.....	50
3.2.3.3. Regulador automático de voltaje (AVR).....	51
3.2.3.4. Limitador de baja frecuencia.....	52
3.2.3.5. Arranque suave.....	53
3.2.3.6. Circuito de control de encendido de la excitación.....	53
3.2.3.7. Fuente de poder.....	54
3.2.4. Sistema de control digital de la excitación (DECS).....	54
3.3. Estabilidad del SEE.....	57
3.3.1. Modelo matemático.....	59
3.3.2. Factores que afectan la estabilidad del sistema generador....	61
3.3.2.1. Ganancia.....	61
3.3.2.2. Red de estabilidad.....	61
3.3.2.3. Constante de tiempo del campo.....	61

3.3.2.4. Velocidad de respuesta del gobernador.....	62
3.4. Protección del SEE.....	62
4. PROPUESTA DEL CAMBIO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DINÁMICO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO POR UN SEE, EN UNA PLANTA DE GENERACIÓN HIDROÉLECTRICA.....	65
4.1. Datos generales de la planta.....	65
4.2. Datos del generador al que se efectuará el cambio.....	66
4.2.1. Excitación actualmente usada.....	67
4.2.2. Desventajas del sistema de excitación.....	67
4.3. SEE.....	69
4.3.1. Cambios a considerar.....	72
4.3.1.1. Mecánicos.....	72
4.3.1.2. Eléctricos.....	74
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Corriente inducida en un conductor en movimiento dentro de un campo magnético.	2
2.	Fuerza que se ejerce sobre un conductor portador de una corriente, el cual se encuentra dentro de un campo magnético.	3
3.	Componentes de una máquina síncrona y su función, caso de un generador	7
4.	Corte de un motor de inducción.	10
5.	Corte de una planta de generación hidroeléctrica.	18
6.	Diagrama fasorial de un generador síncrono con cargas de factor de potencia unitario.	22
7.	Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia: (a) en atraso; (b) en adelante.	23
8.	Diagrama de bloques básico de la regulación de voltaje en un generador.	25
9.	Circuito de un sistema de excitación sin escobillas.	28
10.	Variación del voltaje de fase, para cargas con factor de potencia unitario.	33
11.	Variación del voltaje de fase, para cargas con factor de potencia: (a) en atraso, (b) en adelante.	34
12.	Excitación de un generador síncrono con fuente de potencia con rectificadores controlados.	42
13.	Diagrama funcional de bloques del generador con un SEE desglosando el equipo principal del SEE.	43
14.	Interior del panel de un SEE y ubicación de equipo principal.	45

15. Diagrama de un puente rectificador de potencia de onda completa, con 3 SCR.	49
16. Formas de onda de voltaje a la salida del puente rectificador de tres SCRs.	49
17. Diagrama esquemático del control de voltaje automático y manual.	52
18. Curvas características del voltaje en terminales, al excitar el campo del generador.	54
19. Diagrama de bloques del DECS-15 de Basler Electric.	56
20. Un SEE Basler Electric.	59
21. Modelo de control del SEE, clasificación ST1.	60
22. Unidad de generación de hidroeléctrica Santa María, a la que se propone el cambio de excitación.	66
23. Excitación dinámica acoplada al eje del generador principal, Hidroeléctrica Santa María.	67
24. Cubículo tipo NEMA 1 del equipo del SEE.	74
25. Vista de uno de los transformadores de potencial y de los fusibles en alta tensión para protección del SEE.	75
26. Transformador tipo seco para alimentación del sistema de excitación y devanado de campo del generador.	77
27. Sistema de escobillas y anillos deslizantes para alimentación del devanado de campo del generador.	78

GLOSARIO

- Anillo deslizando** Anillo de metal por medio del cual se hace llegar la corriente al devanado de campo del generador por medio del contacto eléctrico del anillo con las escobillas. Montado sobre el eje del generador y aislado del mismo.
- Barra aislada** Sistema de potencia aislado alimentado por uno o varios generadores, pero no es considerado un sistema de barra infinita. Su voltaje y frecuencia son las mismas del generador que le suministran potencia eléctrica.
- Barra infinita** Sistema de potencia alimentado por un número grande de generadores conectados en paralelo, su voltaje y frecuencia son constantes y no pueden ser modificados por un solo generador.
- Bobina** Arrollamiento de alambre de cobre o aluminio aislado, con un número considerable de vueltas y montado sobre un núcleo de aire o hierro. Es sobre el que se aplica e induce el voltaje del generador sincrónico.
- Campo magnético** Fuerza producida por unidad de polo magnético, dado por el movimiento relativo entre cargas eléctricas. Se puede encontrar en forma natural en un imán permanente o establecerse por un electroimán por medio de una corriente variable que fluye en un conductor eléctrico. Su unidad es el ampere por metro (A/m).

Carga	Se considera a la demanda de potencia eléctrica en un sistema de potencia o generador.
Conductor	Material que ofrece poca resistencia al flujo de electricidad pues con varios electrones libres en su capa de conducción facilita la conducción de energía eléctrica.
Conmutador	Rectificador de tipo mecánico que convierte corrientes de tipo alterno a corrientes continuas.
Contactador	Actuador de tipo electromecánico utilizando para control, compuesto de una bobina con núcleo de hierro que al accionarse abre o cierra, mecánicamente, contactos eléctricos; generalmente, su bobina de accionamiento funciona con bajos voltajes y sus contactos mecánicos pueden soportar grandes voltajes y corrientes.
Corriente	Flujo de carga que recorre un conductor, medida por el número de columbios por segundo que pasan por una sección determinada del cable. Un columbio por segundo equivale a un amperio (A) que es su unidad de medida.
Corriente alterna	Corriente cuya forma de onda cambia en forma constante y cíclica de un nivel positivo a un nivel negativo.
Corriente de excitación	Corriente directa que es aplicada al devanado de campo, por medio de ella se induce un voltaje al devanado de armadura por medio del movimiento del rotor y el fenómeno de inducción magnética.

Corriente directa	Corriente cuya forma de onda, generalmente, es una línea recta o una onda pulsante que se mantiene constantemente, sobre un nivel determinado y fluye en una sola dirección.
Devanado	Número determinado de espiras de alambre conductor, que componen una bobina.
Diagrama fasorial	Representación de uno o varios fasores en un plano bidimensional.
Diodo	Dispositivo de naturaleza semiconductor formada por una unión pn, en condiciones normales permite el flujo de corriente en una sola dirección.
Escobilla	Dispositivo, generalmente, de carbón, cuya función es la de conducir por medio del contacto con el anillo deslizante la corriente de excitación al devanado de campo.
Espira	Vuelta de alambre de cobre o aluminio que en conjunto forma el devanado de una bobina.
Factor de potencia	Razón de la potencia activa a la potencia reactiva, proporciona la eficiencia de realizar trabajo por la potencia entregada por el generador. Se puede expresar como el coseno del ángulo entre la potencia activa y la potencia reactiva.

Flujo magnético	Líneas de campo magnético que pasan a través de un área determinada, su unidad de medida es el weber (Wb).
Frecuencia eléctrica	Número de veces por segundo que se repite la onda eléctrica de voltaje o corriente, su unidad de medida es el hertzio (Hz).
Impedancia	Número complejo cuya parte real es la resistencia y cuya parte imaginaria es la reactancia, representando la carga eléctrica. Su dimensional es el ohmio (Ω).
Nivel básico al impulso (BIL)	Nivel de aislamiento, fijado en función de la tensión nominal de operación, normas correspondientes y de los niveles de sobre tensiones existentes en el sistema.
Permeabilidad	Medida de la facilidad con la que se pueden establecer líneas de flujo magnético en un material. Su dimensional es el weber por amperio metro (Wb/A m).
Potencia activa	Potencia que al ser absorbida por una carga puede efectuar trabajo, es la componente real de la potencia aparente. Su dimensional es el watt (W).
Potencia aparente	Producto del voltaje y la corriente aplicados a una carga. Es una magnitud compleja, su parte real es la potencia activa y su parte imaginaria es la potencia reactiva. Su dimensional es el voltampere (VA).

Potencia reactiva	Flujo de energía que en forma alternada va hacia la carga y regresa de ella, no efectúa un trabajo real, pero es necesaria para el funcionamiento de máquinas con núcleo, como transformadores, motores y otros, es la componente imaginaria de la potencia aparente. Su dimensional es el voltampere reactivo (VAR).
Primotor	Componente mecánico en un sistema de conversión de energía electromecánica, transmite la potencia mecánica al rotor del generador.
Reactancia	Parte imaginaria de la impedancia. En un circuito eléctrico su magnitud resulta en el atraso o adelanto de la corriente respecto al voltaje, consecuencia de una carga inductiva o capacitiva, respectivamente. Su dimensional es ohmio (Ω).
Rectificador	Dispositivo electromecánico o electrónico que convierte corriente alterna en corriente directa.
Potenciómetro	Dispositivo cuya resistencia en terminales puede variarse en forma lineal o no lineal.
Resistencia	Medida de la oposición al flujo de carga a través de un material, su dimensional es el ohmio (Ω).
Retroalimentación	Señal que tiene como propósito la reducción del error entre la entrada de referencia de un sistema de control y su salida.

SCR	Rectificador controlado de silicio, dispositivo semiconductor de tres terminales, cuya función es conducir corriente en una sola dirección por medio del control de una de sus terminales llamada compuerta,
Tierra	Potencial eléctrico cero con respecto al cual se miden todos los voltajes.
Voltaje	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, su dimensional es el voltio (V).

RESUMEN

El presente trabajo consta de cuatro capítulos. El primer capítulo se refiere al funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas, sus principios de funcionamiento, además de las diferencias de las máquinas de corriente alterna, para establecer la ventaja de utilizar las máquinas de tipo sincrónico en la generación de energía eléctrica. Se menciona, también, el funcionamiento del generador sincrónico, sus partes y funciones principales, devanado de campo, de armadura y su sistema de excitación.

El segundo capítulo se refiere al funcionamiento del generador sincrónico en un sistema de generación, se menciona que es la generación eléctrica, el papel del generador sincrónico, se expone que es un sistema de excitación del generador, se mencionan los dos tipos principales de sistemas de excitación dinámico y estático y sus principales características, además de exponer la función del sistema de excitación del control de la corriente de excitación del generador exponiendo los dos casos que generalmente se presentan: la función de la excitación del devanado de campo cuando el generador opera conectado a una barra aislada y cuando opera conectado a una barra infinita.

El capítulo tres es acerca de los sistemas de excitación estáticos. Se hace una descripción general del sistema de excitación estáticos, se expone el modelo del sistema de excitación y sus componentes, se mencionan los elementos principales, disposición física de los elementos del sistema de excitación estático, funcionamiento y se describe cada uno de sus componentes. Se mencionan, también, los factores que influyen en su funcionamiento y afectan su estabilidad, se expone un modelo matemático según los estándares de normalización propuestos por la IEEE y, por último, se mencionan las consideraciones para la protección del sistema de excitación.

El capítulo cuatro se refiere a la propuesta del cambio del sistema de excitación de tipo dinámico por un sistema de excitación estático de una unidad de generación de una planta del sistema nacional interconectado. Se mencionan las características generales de la planta, los datos del generador al que se propone el cambio, la excitación que, actualmente, usa y las desventajas que presenta. Se expone el sistema de excitación estático que se considera para el cambio, sus características y funciones principales, las ventajas que representaría el uso de este sistema de excitación y, por último, los cambios necesarios que implicaría el cambio propuesto, ya sean mecánicos o eléctricos. Se expone las consideraciones mecánicas para proteger al sistema de excitación estático de factores ambientales y se analizan las consideraciones eléctricas para su instalación.

OBJETIVOS

- **General**

Considerar la sustitución de un sistema de excitación dinámico por un sistema de excitación estático de un generador sincrónico, para mejorar el desempeño, rendimiento y control de la unidad de generación a la cual se propone el cambio.

- **Específicos**

1. Documentar los conceptos básicos de los principios de funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas, la ventaja del uso de un generador sincrónico en un sistema de generación y mencionar los componentes de éste.
2. Determinar el papel del generador y su sistema de excitación dentro de un sistema de generación y la función del sistema de excitación en el caso de que el generador este funcionando aislado o conectado a un sistema de barra infinita.
3. Exponer la información relacionada con los componentes, funcionamiento y otros términos relacionados al sistema de excitación estático.
4. Proponer el cambio de un sistema de excitación dinámico por un sistema de excitación estático de un generador sincrónico, exponiendo las ventajas y desventajas, además de la consideración de los cambios a realizar.

INTRODUCCIÓN

Con el continuo desarrollo de la tecnología se han podido desarrollar equipos y aparatos que satisfacen estándares de calidad, cada vez más exigentes por parte de la industria y la sociedad en general. Con estas exigencias una de las demandas que se presentan, frecuentemente, es la de la calidad de la energía eléctrica, la cual como es conocido es un eslabón fundamental, si no es que indispensable, en el funcionamiento, economía, progreso y calidad de vida de una nación.

Es por ello que las compañías que generan, transportan y comercializan, dicha energía, tratan de mantener y actualizar el equipo que utilizan para tales fines. Por ejemplo, las empresas generadoras buscan equipos que puedan proporcionar continuidad en el servicio y rápida respuesta ante la constante variabilidad de las cargas conectadas a un sistema de potencia o perturbaciones no previstas del sistema, además de mejoras en el funcionamiento y rendimiento de los generadores para obtener mayores beneficios.

En un sistema de generación, regularmente, se utilizan generadores de tipo sincrónico por la facilidad que presentan para el control de parámetros de generación, como voltaje, frecuencia y potencia activa o reactiva. Estos parámetros pueden ser controlados a través del sistema de excitación del generador que controla la corriente de excitación del campo del generador. Con lo que al ocurrir una variación en el sistema de potencia el sistema de excitación debe ser capaz de modificar y regular, adecuadamente, con una determinada velocidad el voltaje o potencia que el generador este proporcionando y evitar variaciones que puedan perjudicar la estabilidad del sistema de potencia o modificar los parámetros preestablecidos de voltaje y frecuencia.

Existen dos tipos de sistema de excitación de un generador sincrónico, sistemas de excitación dinámicos y sistemas de excitación estáticos, los cuales tienen la misma función de proporcionar la corriente de excitación al devanado de campo del generador, pero por la naturaleza de funcionamiento se propone a los sistemas estáticos con un mejor rendimiento y funcionamiento para proporcionar, adecuadamente, de manera más efectiva, la corriente de excitación al generador.

Un sistema de excitación de tipo dinámico, generalmente, es un pequeño generador montado sobre el generador principal, rectifican su salida en forma mecánica o por medio de un puente rectificador para proporcionar la corriente de excitación al devanado de campo del generador principal. Se conocen, entonces, dos tipos de excitaciones dinámicas con escobillas y sin escobillas.

Un sistema de excitación estático, como indica su nombre, no contiene partes móviles con lo que la rectificación y control de la corriente de excitación es por medio de dispositivos de estado sólido y circuitos electrónicos de potencia, aunque aún requieren de un sistema de escobillas y anillos deslizantes para proporcionar la corriente de excitación al devanado de campo.

Debido a la mejora en el rendimiento de un generador, en el aspecto de control, estabilidad y funcionalidad con un sistema de excitación estático, en las unidades generadoras que es posible realizar el cambio de un sistema de tipo dinámico por uno de tipo estático, se evalúa la posibilidad de realizar tal proyecto, pues, debido a la demanda de mejorar la calidad de la electricidad y que un sistema de tipo dinámico no puede responder con la velocidad que se necesitaría para tal fin, están siendo sustituidos por sistema de tipo estático.

Con el uso de dispositivos de estado sólido y electrónica de potencia para la construcción de sistemas de excitación, cuya tecnología representa un mayor grado de confiabilidad en su funcionamiento y rendimiento para diversidad de procesos, el control de la corriente de excitación de un generador mejora, sustancialmente, además de dar mayor confiabilidad en la estabilidad del voltaje en terminales del generador por los cambios del sistema de potencia por la variabilidad de las cargas conectadas a éste. Además, el sistema de excitación utiliza un microprocesador lo que introduce el uso de programación para el control y regulación del voltaje, dándose mayor flexibilidad para el manejo del generador.

Con el presente trabajo se manifiestan los conceptos de funcionamiento de una máquina síncrona y su papel en un sistema de generación, el papel de su sistema de excitación en el control del voltaje y potencia proporcionada a un sistema de cargas, se mencionan las ventajas del uso de un sistema de excitación estático comparado a uno de tipo dinámico, se documentan los principios de funcionamiento del sistema de excitación estático y la propuesta de cambio de un sistema dinámico, usado, actualmente, por una unidad generadora y en funcionamiento en una central generadora del país, por un sistema de excitación estático.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1. Máquinas eléctricas rotativas.

En el campo de la electricidad existen diferentes formas y tipos de producción y consumo de la energía eléctrica y uno de los medios por el cual se consiguen es la conversión de energía electromecánica; es necesario recordar que las formas de energía no se crean sino que solo se transforman de una forma a otra, las máquinas eléctricas rotativas comprenden parte del equipo que se basa en el principio de conversión electromecánica de energía para su funcionamiento, comprendiendo una categoría que es la de “equipo de conversión continua de energía” (Fitzgerald, A. E. y otros, 1999. 106).

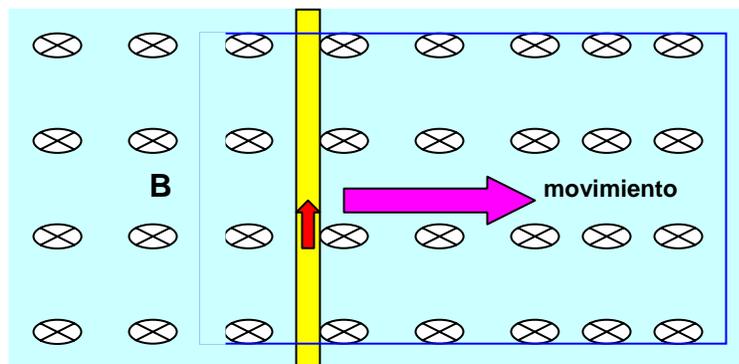
De lo anterior podemos decir entonces que la maquinaria eléctrica rotativa básicamente convierte energía mecánica a eléctrica, caso de un generador eléctrico, o de eléctrica a mecánica, caso de un motor eléctrico. Podríamos concluir de lo anterior que la maquinaria eléctrica rotativa es básicamente un transformador de energía, ya sea de mecánica a eléctrica o viceversa.

1.1.1. Principios de funcionamiento.

Como se mencionó en el apartado anterior existe una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica a la cual se le denomina generador, alternador o dinamo, y además una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica que se le denomina motor.

Generadores y motores eléctricos basan su funcionamiento sobre dos principios físicos relacionados entre sí. Uno de ellos es el principio de la inducción electromagnética descubierto por el científico e inventor británico Michael Faraday en 1831, que se describe a continuación: “Si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se establece o se induce una corriente eléctrica en el primer conductor” (Microsoft Corporation®, Encarta® 2003).

Figura 1. **Corriente inducida en un conductor en movimiento dentro de un campo magnético.**



Campo magnético uniforme entrando a la página.



Corriente que circula por el circuito, producida por la fuerza electromotriz inducida por el movimiento del conductor.



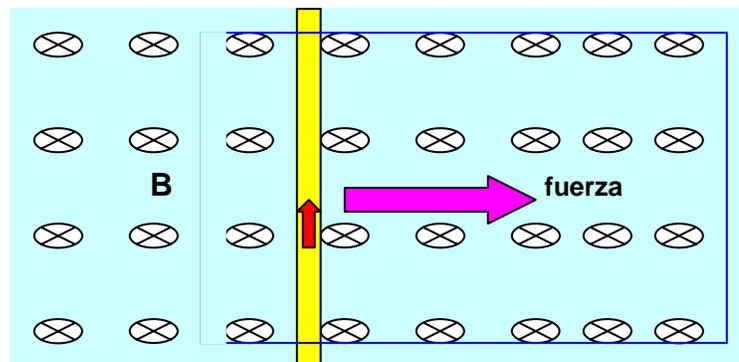
Dirección del movimiento del conductor.



Conductor fijo.

El otro principio y opuesto al primero fue observado en 1820 por el físico francés André Marie Ampère, el cual indica lo siguiente: “Si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica sobre el conductor” (Microsoft Corporation®, Encarta® 2003).

Figura 2. Fuerza que se ejerce sobre un conductor portador de una corriente, el cual se encuentra dentro de un campo magnético.



- ⊗ Campo magnético uniforme entrando a la pagina.
- ↑ Corriente que circula por el circuito.
- Fuerza ejercida sobre el conductor por el campo B.
- Conductor fijo.

Los primeros experimentos sobre el fenómeno de la inducción eléctrica fueron reflejados en un invento desarrollado por Faraday, una máquina dinamoeléctrica, la dinamo de disco, la cual consiste de un disco de cobre montado de tal forma que la parte del disco que se encuentra entre el centro y el borde quede situada entre los polos de un imán de herradura. Al girar dicho

disco, aparece una corriente inducida entre el centro del disco y su borde debido a la acción del campo del imán. También se puede hacer funcionar dicha máquina como un motor, el disco se puede fabricar de manera que se pueda realizar la aplicación de un voltaje entre el borde y el centro del disco, lo que hace que el disco gire gracias a la fuerza producida por el campo magnético.

Debido a que el campo magnético de un imán permanente no es lo suficientemente fuerte para hacer funcionar máquinas de tamaños elevados, la construcción de maquinaria eléctrica de mayores capacidades tanto mecánicas como eléctricas se logra a través de un electroimán, dejándose los imanes permanentes para aplicaciones de menores tamaños, aunque con el avance, desarrollo de nuevas tecnologías y nuevas técnicas de fabricación se han conseguido nuevas constituciones de materiales con lo que se ha ido logrando la aplicación de imanes permanentes a máquinas de considerable tamaño.

Tanto los generadores como los motores tienen dos componentes básicas: el inductor o campo, donde se crea el campo magnético y que suele ser un electroimán, y la armadura o inducido, que es la estructura que sostiene los conductores que cortan el campo magnético y transporta la corriente inducida en un generador, o la corriente de excitación en el caso del motor. La armadura es por lo general un núcleo compuesto por varias laminas de material de alta permeabilidad como el hierro dulce, sobre éste se realizan varias ranuras sobre las que van montados los cables conductores en los que se induce o conecta una diferencia de potencial, ya sea como generador o motor respectivamente. La construcción en laminas es para evitar algunos efectos no deseados como la inducción de corrientes parásitas que se inducen en el

núcleo provocando el aumento de la temperatura del mismo y la constitución por materiales de alta permeabilidad es para confinar el flujo magnético sobre una trayectoria determinada y conseguir mayor eficiencia del circuito magnético.

Las máquinas eléctricas rotativas han sido clasificadas de varias formas, ya sea por su construcción, tipo de alimentación o funcionamientos específicos. A continuación se mencionan dos tipos de máquinas las cuales no son la única opción dentro del campo de las mismas, pero debido a la finalidad de la tesis se hace referencia de ellas a manera de introducir la comprensión del funcionamiento de la máquina sincrónica y específicamente del generador sincrónico.

1.1.2. Máquinas sincrónicas.

Dentro de la diversidad de clasificaciones de las cuales han sido objeto las máquinas eléctricas, hallamos la clasificación de máquinas de corriente alterna; en las máquinas de corriente alterna encontramos las máquinas sincrónicas y las máquinas asincrónicas o de inducción. Vemos en las máquinas sincrónicas que como las demás máquinas eléctricas basan su funcionamiento en el principio de conversión electromecánica de energía, es decir la interacción de un conductor portando una corriente o en el movimiento de éste dentro de un campo magnético y los fenómenos asociados a esta interacción, como se mencionó en párrafos anteriores.

La máquina sincrónica consta de dos partes principales: el devanado de campo y el devanado de armadura, generalmente el primero es montado sobre el rotor de la máquina y el segundo sobre el estator, esto debido a que sobre el

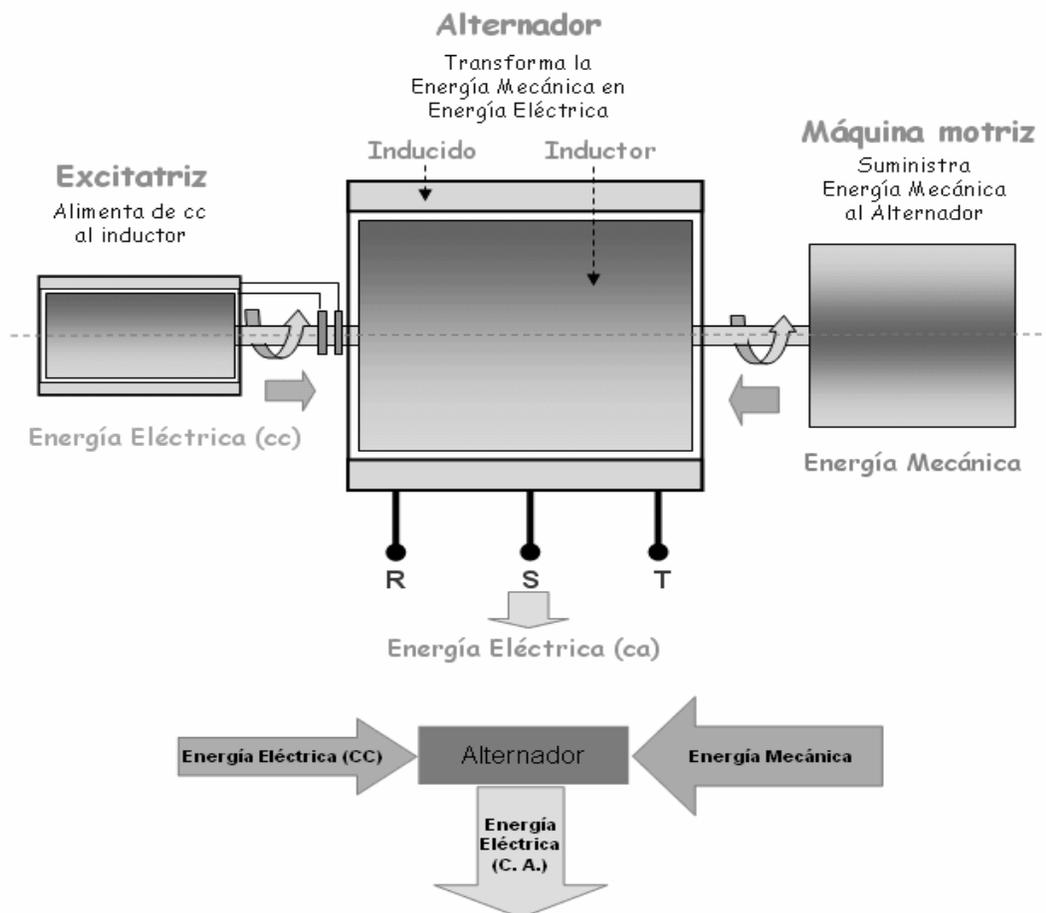
devanado de armadura aparecen mayores esfuerzos, tanto de tipo mecánico como principalmente de naturaleza eléctrica; por lo que es más práctico y seguro montar el devanado de armadura sobre el estator el cual presenta mayor resistencia mecánica además de encontrarse fijo; el devanado de campo es alimentado con un voltaje continuo a modo de establecer un campo magnético, que en caso de funcionar como generador se hará girar a través de un medio mecánico o cuando funcione como motor se basará su funcionamiento en el segundo principio establecido por Ampère y se hará alimentar el devanado de armadura con un voltaje alterno, dándose la conversión de energía electromecánica. El devanado de armadura es el que por inducción magnética, en el caso de funcionar como generador, presenta en sus terminales una diferencia de potencial; en el caso de funcionar como motor es sobre el cual se inyecta un voltaje de naturaleza alterna y así aparecerá un campo magnético variable y rotatorio para hacerlo funcionar.

Podemos decir pues que una máquina sincrónica está formada básicamente de dos partes principales que son el estator y el rotor; sobre el estator esta montado el devanado de armadura y en el rotor va montado el devanado de campo. La máquina sincrónica cuenta con otros componentes que complementan su funcionamiento, entre éstos está el sistema de excitación, los anillos deslizantes y las escobillas. Estos últimos componentes sirven principalmente para hacer llegar al rotor la corriente directa y poder controlar la cantidad de corriente de campo, necesaria para establecer un campo magnético en el rotor.

El objeto de mencionar a las máquinas sincrónicas y las de inducción es con el fin de establecer la funcionalidad y facilidad que representa utilizar la

máquina síncrona en un sistema de generación, en específico como un generador. Por ejemplo una de las características principales por las cuales se utilizan generadores síncronos es por la facilidad de manejar los parámetros de control dentro de un sistema de generación tales como el voltaje en el caso de un generador aislado y la potencia activa en el caso de un generador conectado a una barra infinita.

Figura 3. **Componentes de una máquina síncrona y su función, caso de un generador.**



Fuente: <http://zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/maquinas/paginas/home.html>

1.1.3. Máquinas de inducción.

Las máquinas de inducción básicamente tienen los mismos principios de funcionamiento de las máquinas sincrónicas, una de las características que las diferencian de las máquinas sincrónicas es que no necesitan de una corriente de campo de corriente continua para funcionar, como la que necesita la máquina sincrónica; (en un motor de inducción, por ejemplo) un flujo magnético giratorio es aplicado al estator por medio de un sistema de voltajes trifásicos de alimentación, generalmente; en el rotor se utiliza el fenómeno de inducción (acción transformadora) para establecer voltajes inducidos, dando como resultado la aparición de corrientes circulantes en el rotor, con lo que dichas corrientes también producen un flujo que rota a la misma velocidad del flujo del estator, pero retrasado con respecto a éste; al aplicar un voltaje trifásico a un devanado trifásico se ocasiona un flujo rotatorio a una velocidad angular, dada por la siguiente fórmula:

Fórmula 1. Velocidad angular de flujo magnético

$$\omega = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{P}$$

donde:

ω = velocidad angular del flujo.

f = frecuencia del voltaje aplicado.

P = número de polos de la máquina.

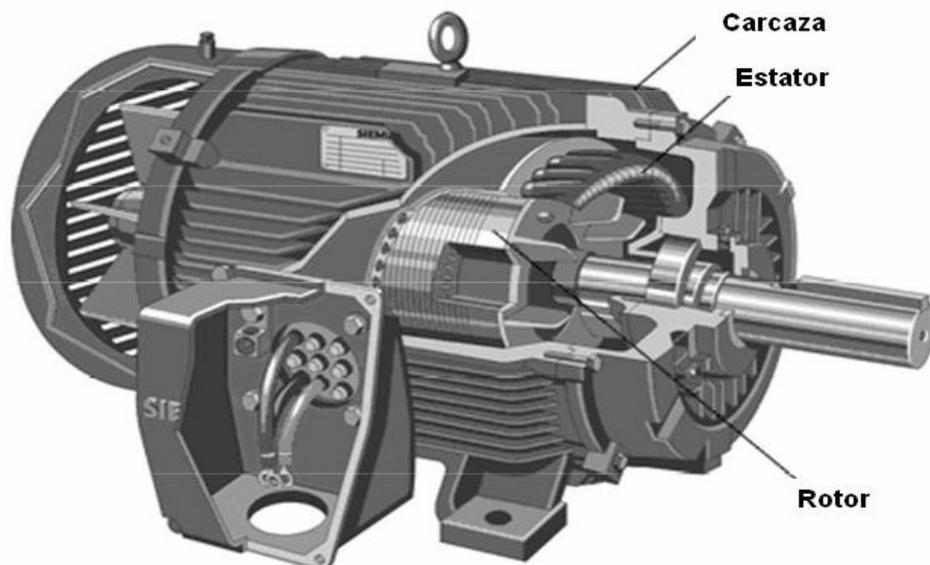
Dado que para inducir un voltaje es necesario un movimiento relativo entre el flujo del estator y el rotor, a cualquier velocidad del rotor inferior a la del flujo del estator, se inducirá voltaje, haciendo circular corrientes que crearan el

flujo en el rotor produciendo torque en éste, debido al arrastre que ejercerá el flujo del estator sobre el del rotor. La diferencia entre la velocidad de flujo y la velocidad mecánica del rotor es lo que se conoce como deslizamiento. Con ello podemos deducir que la velocidad mecánica del rotor será menor a la del flujo del estator y con ello a la velocidad de sincronismo, razón por la cual la máquina de inducción es conocida también como máquina asincrónica.

Una de las razones por las cuales la máquina de inducción es utilizada ampliamente en la industria es su aplicación como motor, debido a su simplicidad de construcción, velocidad relativamente constante, robustez, confiabilidad y costo relativamente bajo. Dado que la máquina de inducción carece de circuito de campo separado, un generador de inducción no puede producir potencia reactiva, de hecho éste la absorbe, es necesario conectarle una fuente de potencia externa que proporcione entonces la potencia reactiva necesaria para mantener el campo magnético de su estator, además por medio de esta fuente externa se controla el voltaje en terminales del generador de inducción; sería posible conectar una máquina de inducción como generador de forma aislada, pero se necesitaría de un medio que proporcionará la potencia reactiva (como un banco de capacitores), que necesitará el generador, tanto para establecer su flujo en el estator, como para las cargas que se le conectarán y que requieren de potencia reactiva para su funcionamiento, además de una forma de controlar la variación de las cargas, ya que por ejemplo al conectar una carga inductiva, el voltaje de las terminales del generador decae muy rápidamente, además de la variación de la frecuencia; por lo que otra de las razones para no utilizar la máquina de inducción como generador es que se hace difícil el control de los parámetros de generación de energía eléctrica (voltaje, frecuencia).

Es entonces posible utilizar la máquina de inducción como generador en circunstancias especiales pero no como fuente de potencia única, pues es necesaria una fuente trifásica, la cual debe proporcionar la componente de corriente de excitación, es decir se necesita la inyección de potencia reactiva para su funcionamiento.

Figura 4. **Corte de un motor de inducción.**



Fuente: <http://zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/maquinas/paginas/home.html>

1.2. Generador sincrónico.

Un generador sincrónico es una máquina eléctrica rotativa la cual tiene la finalidad de convertir energía mecánica en energía eléctrica. El generador sincrónico es la máquina mayormente utilizada en el campo de generación eléctrica debido a las ventajas que presenta para el control de los parámetros que se manejan en el control de la generación de energía eléctrica. El nombre

de sincrónico se debe a que su frecuencia eléctrica está directamente relacionada con su velocidad mecánica de rotación, es decir la frecuencia eléctrica esta sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador. Esto puede comprobarse a través de la siguiente fórmula, la cual proporciona la relación de la frecuencia eléctrica con la velocidad mecánica de rotación.

Fórmula 2. Frecuencia eléctrica del generador sincrónico

$$f_e = \frac{n_m \times P}{120}$$

donde:

f_e = frecuencia eléctrica. En Hz.

n_m = velocidad mecánica del rotor de la máquina sincrónica. En rpm.

P = número de polos.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la máquina sincrónica basa su funcionamiento en dos principios físicos relacionados, la inducción electromagnética, propuesta por Michael Faraday, y el segundo y opuesto al primero, propuestos por André Marie Ampère, los cuales a manera de recordatorio se mencionan a continuación, respectivamente: “Si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se establece o se induce una corriente eléctrica en el primer conductor” y el segundo que dice: “Si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica sobre el conductor”.

La conversión electromecánica de energía en el generador síncrono esta basada entonces en la Ley de Inducción Eléctrica de Faraday, esta ley establece, como lo indica el principio antes citado, que si un conductor se mueve a través de un campo magnético se inducirá un voltaje eléctrico en dicho conductor; es también posible inducir el voltaje eléctrico en un conductor que permanece estático si éste es barrido por líneas de flujo magnético generadas por un campo magnético variante en el tiempo.

Fórmula 3. Ley de Faraday

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

donde:

e = voltaje inducido en la bobina

N = número de vueltas de la bobina

$\frac{d\phi}{dt}$ = flujo magnético variable en el tiempo

En el caso del generador síncrono el voltaje es inducido mediante un campo magnético variante en el tiempo.

El generador síncrono consta de dos partes principales: el rotor y el estator, en los cuales se encuentran alojados los devanados de campo y armadura respectivamente.

1.2.1. Devanado de campo.

El devanado de campo tiene la finalidad de establecer un campo magnético por medio de una corriente directa, inyectada al devanado por una fuente de potencia externa.

El devanado de campo de un generador generalmente se encuentra alojado en el rotor del generador, esto debido a que este devanado sufre menos esfuerzos tanto eléctricos como mecánicos, en comparación con el devanado de armadura del que se demanda en mayor magnitud esfuerzo de tipo eléctrico, exponiendo a la máquina a menores riesgos y fallas por corto circuitos de gran magnitud.

El rotor es parte del eje del generador y cumple la función de un electroimán, el cual genera un campo magnético que gira junto al rotor y a la velocidad mecánica de éste, el campo magnético es establecido por un flujo de corriente directa circulante en el devanado de campo la cual es suministrada por una fuente de potencia externa, a través de un sistema denominado de excitación. La necesidad de que una fuente externa proporcione potencia directa al devanado de campo del rotor es una característica propia de los generadores sincrónicos.

Al aplicar potencia mecánica al eje del generador, por medio de un primotor con el fin de hacer girar el devanado de campo alojado en el rotor, se logrará que el rotor al girar convierta su campo magnético, establecido a través del devanado de campo, en un campo magnético giratorio (lo que lo hará un campo variante con relación a las espiras del devanado de armadura (estático)), cuya densidad de flujo varía en el tiempo a razón de la velocidad angular del rotor, estableciendo en las terminales del devanado de armadura, alojado en el estator una diferencia de potencial o voltaje de naturaleza senoidal por medio de la inducción magnética.

1.2.2. Devanado de armadura.

El devanado de armadura está alojado en el estator del generador el cual está ubicado en la carcasa del generador. Generalmente el devanado de armadura es un sistema de devanados trifásicos, es en el cual se induce el voltaje debido al movimiento o variación del flujo magnético establecido en el devanado de campo y que será aprovechado para el suministro de energía eléctrica; el devanado de armadura es al cual se conectan las cargas que demandan energía eléctrica, y sobre el cual se ejercen los mayores esfuerzos tanto de tipo eléctrico, como mecánico, ya que es en éste devanado donde aparecen corrientes de magnitud elevada, sufriendo elevaciones de temperatura mayor que el devanado de campo, necesitando sistemas de enfriamiento que no se podrían colocar en el rotor, razón por la cual el orden de los devanados es establecido de la forma mencionada, aunque no existe impedimento para colocar un devanado de campo en el estator y el de armadura en el rotor.

1.2.3. Excitación del generador.

Otro de los componentes necesarios y característico del generador sincrónico para su funcionamiento es su excitación, que no es más que un sistema para la inyección de una corriente directa al devanado de campo, alojado en el rotor del generador, la cual origina el campo magnético que se hace girar junto al rotor, y que es proporcionada a la máquina de forma independiente, ya sea a través de una fuente de potencia externa (banco de baterías, un fuente de potencia alterna rectificadas), o por realimentación por

medio del mismo generador al conectar en sus terminales de armadura una derivación, que luego de rectificadada se aplica al devanado de campo.

Una de las características a destacar de la excitación del generador sincrónico, es que a través de ésta es posible controlar el voltaje en terminales del generador, ya que al variar la corriente de campo que proporciona, se podrá mantener el voltaje en terminales del generador, al variar la carga que esté alimentando.

2. EL GENERADOR SINCRÓNICO EN UN SISTEMA DE GENERACIÓN.

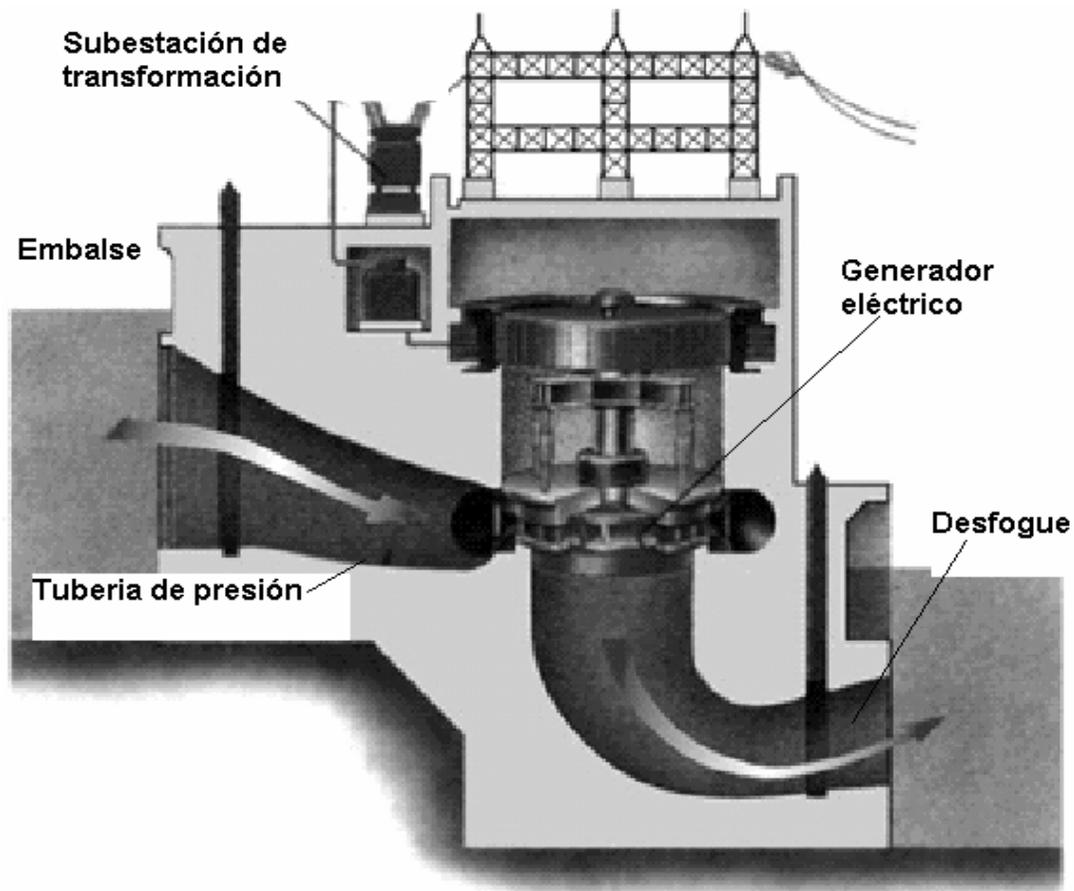
2.1. Generación eléctrica.

Con el estudio de los fenómenos eléctricos y el desarrollo de diferentes tipos de aparatos y medios que utilizan sus propiedades, se inicio el desarrollo y el interés profundo de darle uso generalizado a la generación de energía eléctrica; la electricidad una propiedad de la naturaleza, ahora buscaba ser controlada si no en su totalidad, pero si para varios fines que vinieron a satisfacer diversas necesidades y actividades del ser humano. La generación de energía eléctrica de forma comercial, dio inicio con el estudio de varios fenómenos de tipo eléctrico y su aplicación en la invención de aparatos que aprovecharon las propiedades de éstos. Con la invención del generador de corriente directa (dinamo) por el año de 1868 y de la lámpara incandescente en 1879, inventada por Thomas Alva Edison, toma mayor interés el uso de la electricidad dándose paso a la iluminación de calles, grandes fábricas, almacenes y otras aplicaciones.

Inicialmente la generación y distribución de energía eléctrica era en corriente continua, con lo que debido a las perdidas que ocasionaba el uso de este tipo de corriente, se necesitaba tener los generadores lo más cercano posible de las cargas, para proporcionar un servicio de calidad razonable. La invención del motor de inducción dio paso a la generación y distribución de energía eléctrica alterna, pues la transición de utilizar corriente continua a corriente alterna no se daba, debido a que no existía un motor para la industria que pudiera se utilizado con corriente alterna.

Dado que la corriente alterna representaba mayores ventajas en la transmisión y distribución de energía eléctrica, sumando el uso del transformador eléctrico que proporcionaba una solución para transmitir a grandes distancias la energía eléctrica requerida, fue posible aprovechar fuentes de energía que se encontraba a distancias considerables de los centros de carga, tales como saltos hidráulicos, fuentes geotérmicas y otras.

Figura 5. Corte de una planta de generación hidroeléctrica.



Fuente: <http://www.rincondelvago.com/>

Demostradas las ventajas de la corriente alterna y el uso del transformador, se dio el rápido desarrollo de sistemas de generación de corriente alterna, aunque no con ello se desechó el uso de corriente directa, la cual es utilizada muy ampliamente en diferentes aplicaciones y en las que la corriente alterna no puede sustituirla.

Un sistema de generación eléctrica básicamente está formado por: una máquina motriz o primotor (el cual transmite energía mecánica de la fuente de energía primaria al generador), el generador, la regulación y equipo de control, además de un sistema de protección. Son entonces los generadores, los que representan la parte central de un sistema de generación, pues son el eslabón principal en la transformación de una forma de energía a energía eléctrica.

2.2. Generador sincrónico.

En el inicio de la generación eléctrica, como se mencionó anteriormente, fue utilizado el generador de corriente continua para proporcionar la demanda de energía eléctrica, el cual fue sustituido por el generador sincrónico al darse la transición de generación de corriente continua a corriente alterna.

El que el generador sincrónico haya sido y es actualmente, ampliamente utilizado en los sistemas de generación de corriente alterna se debe mayormente a que es una máquina de corriente alterna que permite un control más preciso de la frecuencia y del voltaje de la electricidad generada, pero principalmente por el control efectivo de la potencia reactiva y la potencia activa demandada por las cargas que alimenta el sistema, lo cual se describió en

párrafos anteriores y en donde se hizo referencia de la máquina de inducción o asincrónica a manera de comparación para describir así las ventajas del uso del generador sincrónico en un sistema de generación.

Dentro de las plantas de generación es posible entonces encontrar con frecuencia generadores de tipo sincrónico, aunque también no se descarta la aplicación de generadores asincrónicos, los cuales como se mencionó también tienen una difundida popularidad. La mayoría de los generadores sincrónicos son trifásicos, es decir su devanado de armadura es trifásico, son muy poco comunes los generadores de tipo monofásico, debido a que la construcción de tipo trifásico reduce el tamaño y costo del generador, además de proporcionar un sistema trifásico de voltajes, cuya aplicación y utilidad es provechosa dentro de la industria, principalmente.

El motor primario o máquina motriz proporciona energía mecánica al rotor del generador con el fin de ser transformada en energía eléctrica, al mismo tiempo el devanado de campo es alimentado por una corriente directa, conocida también como corriente de excitación, para producir el flujo giratorio necesario para inducir voltaje al devanado del estator; ésta corriente se hace llegar al devanado de campo por medio de escobillas y anillos deslizantes o anillos colectores desde una excitación rotativa con escobillas, una excitación estática o una excitación dinámica sin escobillas.

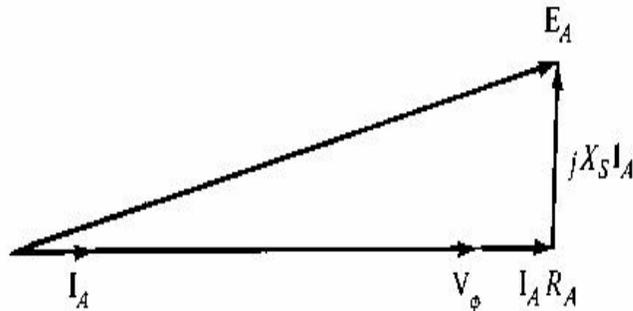
Es posible controlar por medio de la cantidad de corriente directa que circula en el devanado de campo proporcionada por la excitación, la magnitud del voltaje de CA en las terminales del devanado de armadura del generador, es decir con la regulación de la corriente de campo podemos controlar el voltaje

en terminales. Si la excitación del campo es constante, también se podría controlar el voltaje en terminales con la variación de la velocidad del rotor del generador, aunque esto haría que se proporcionará una frecuencia variable al sistema, situación que no es deseable en la mayoría de las aplicaciones y utilidades de la electricidad generada donde se requiere una frecuencia estable, con lo que este tipo de regulación no es frecuentemente utilizada. Para solucionar tal situación se utiliza entonces reguladores de voltaje de estado sólido o reguladores de excitación para controlar la corriente de excitación, pudiendo controlar de forma más exacta el voltaje en el generador.

La variabilidad en el voltaje del generador se debe a que las cargas conectadas en él no son constantes, con lo que la excitación requerida para mantener el voltaje constante es función de la variación de la carga conectada al generador. Como no es posible regular las cargas conectadas al generador, las cuales dependen del usuario, la regulación se realiza por medio del sistema de excitación. Por ejemplo las cargas reactivas con factor de potencia en atraso requieren de una mayor excitación del campo que cargas con factor de potencia unitario, así como las cargas con factor de potencia en adelanto requieren de menos excitación que las cargas con factor de potencia unitario.

Lo anterior queda demostrado a través de los siguientes diagramas fasoriales con los diferentes factores de potencia que demanda las cargas conectadas a un sistema de generación.

Figura 6. Diagrama fasorial de un generador sincrónico con cargas de factor de potencia unitario.



Fuente: Stephen J., Chapman. **Máquinas eléctricas**. Página 455.

donde,

E_A = voltaje generado internamente.

I_A = corriente que circula en el devanado de armadura.

V_θ = voltaje de fase.

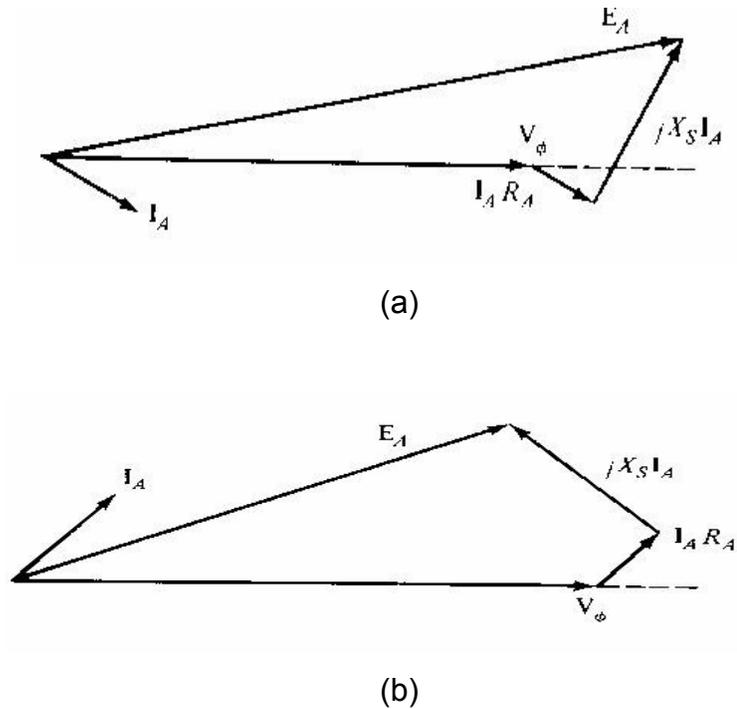
X_S = reactancia sincrónica de la máquina.

R_A = resistencia del devanado de armadura.

Como se puede observar el voltaje generado internamente es aproximadamente el mismo que el voltaje en terminales del generador, diferenciados únicamente por las caídas internas de la máquina y donde se ve que la corriente del devanado de armadura esta en fase con el voltaje en terminales. A continuación se observa las graficas con factor de potencia en atraso y en adelante, respectivamente, donde se puede observar la diferencia de ángulo de la corriente de armadura, lo cual implica un cambio tanto en la posición angular como en la magnitud del voltaje generado, así como en la magnitud del voltaje en terminales, con lo que para mantener el valor

predeterminado de éste es necesario disminuir o aumentar la excitación del campo y así modificar el valor del voltaje generado internamente.

Figura 7. **Diagrama fasorial de un generador sincrónico con factor de potencia: (a) en atraso; (b) en adelanto.**



Fuente: Stephen, Chapman. **Máquinas eléctricas**. Página 456.

Con lo expuesto hasta ahora podemos empezar a reconocer el papel e importancia de un sistema de excitación en un generador sincrónico.

2.2.1. Sistemas de excitación.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores para que en el generador sincrónico se pueda dar el proceso de conversión de energía electromecánica

es necesario excitar su devanado de campo y establecer un flujo rotante que inducirá un voltaje en el devanado de armadura. Ésta corriente es posible suministrarla al devanado de campo por medio de un sistema denominado de excitación; son pues estos sistemas de excitación por los cuales podemos manejar la cantidad de corriente requerida por el generador, ya que dada la naturaleza variable de las cargas es necesaria la continua regulación de la corriente de excitación, con lo cual se conseguirá mantener constante el voltaje en terminales del generador y el flujo de potencia que demande el sistema de carga.

Básicamente los sistemas de excitación de los generadores sincrónicos son clasificados como dinámicos y estáticos. Los primeros sistemas utilizados fueron los sistemas dinámicos con los cuales el control de la corriente de excitación era controlada manualmente, pero con el avance de la tecnología de los materiales semiconductores y su aplicación en la electrónica de potencia fue posible desarrollar sistemas de excitación de tipo estático, con los que fue posible implementar controles de tipo automático.

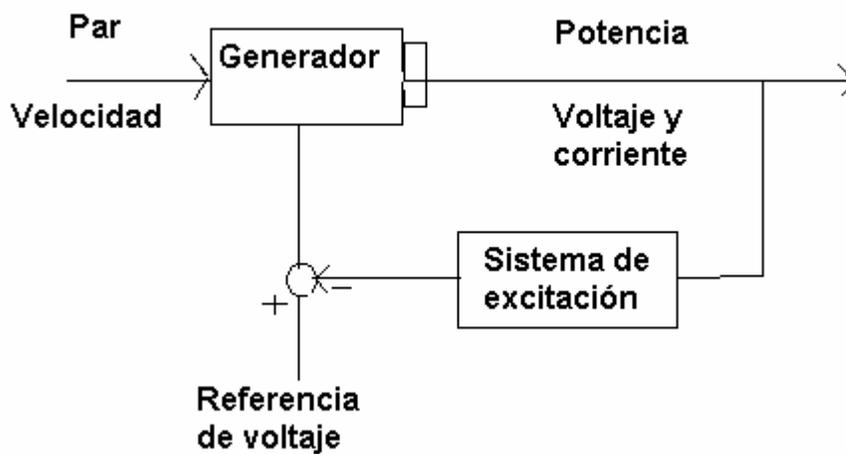
Podemos concluir que el objetivo principal de los sistemas de excitación es entonces el de mantener un voltaje en terminales del generador relativamente estable ya se en régimen estable o transitorio.

Los elementos que conforman un sistema de excitación son:

- Excitador: provee el voltaje de DC para formar el campo del generador.

- Regulador: procesa y amplifica las señales del control de entrada a un nivel y forma apropiada para el control del excitador.

Figura 8. Diagrama de bloques básico de la regulación de voltaje en un generador.



- Transductor de la terminal de voltaje y compensador de carga: mide, rectifica y filtra el voltaje de la terminal del generador a un valor de voltaje de DC; y lo compara con una referencia que representa el voltaje deseado en la terminal del generador.
- Estabilizador del sistema de potencia: provee una señal adicional de entrada al regulador para mejorar las oscilaciones del sistema de potencia. Algunas de las señales de entrada comúnmente usadas son la desviación de la velocidad del rotor, poder de aceleración y desviación de frecuencia.

- Circuitos protectores y limitadores: son funciones protectoras que aseguran que los límites de la capacidad del excitador y el generador sincronizado no sean excedidos. Algunas de las funciones comúnmente usadas son limitador de la corriente de campo, limitador de la corriente de excitación máxima, limitador de la terminal de voltaje, protección y regulador de Voltio por Hz., limitador de baja excitación.

2.2.2. Sistema de excitación dinámico.

Generalmente los sistemas de excitación dinámicos son pequeños generadores sincrónicos los cuales basan su funcionamiento en los mismos principios que hemos mencionado con anterioridad para las máquinas sincrónicas.

Una de sus diferencias principales con el generador principal es que la corriente alterna generada es rectificadas a corriente continua con el fin de poder proporcionar ésta al devanado de campo del generador principal.

Estos pequeños generadores regularmente son montados en el mismo eje del generador principal o acoplados a través de algún medio mecánico como una faja; pueden tener su devanado de campo ya sea en el rotor o en el estator; entonces encontramos dos tipos de excitación dinámica: con escobillas y sin escobillas.

La excitación dinámica con escobillas tiene su devanado de campo en el rotor, de su devanado de armadura se obtiene la corriente que luego de ser

rectificada a corriente directa es proporcionada por medio de las escobillas y contactos deslizantes al devanado de campo del generador principal.

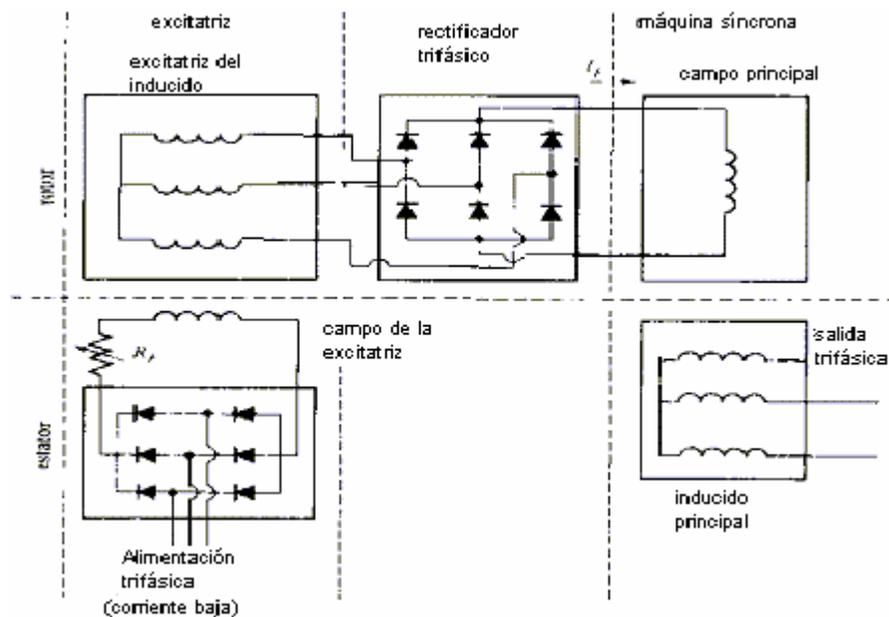
La regulación de la excitación del generador principal se ejerce con la regulación de la excitación del pequeño generador, que se puede realizar por medio de un reóstato conectado en serie entre los conductores que proporcionan la corriente continua al devanado de campo del generador principal, con lo que se introduce un tiempo de retraso en la regulación del sistema que se denomina constante de tiempo del sistema de excitación.

El otro tipo de excitación dinámica sin escobillas es también un generador sincrónico acoplado directamente al eje del generador principal, tiene su devanado de campo en el estator y su devanado de armadura en el rotor, además de un puente rectificador también montado sobre el rotor el cual rectifica la corriente alterna inducida en el devanado de armadura de la excitación para proporcionar la corriente continua de manera directa al devanado de campo del generador principal, con ello se evita la necesidad de escobillas y contactos deslizantes, además de la necesidad de un mantenimiento continuo.

La regulación del generador principal al igual que en el caso anterior se realiza desde la excitación dinámica, en este caso con la regulación de la corriente aplicada al devanado de campo que se encuentra ubicado en el estator, con lo que se modifica la corriente inducida en el rotor del pequeño generador y consecuentemente la corriente de excitación del campo del generador principal.

En el caso de la excitación dinámica sin escobillas no es posible acceder al devanado de campo con el fin de sustituir este tipo de excitación por una de tipo estático, ya que como se menciona esta excitación carece de escobillas y contactos deslizantes, los cuales son necesarios en el caso de usar una excitación de tipo estático.

Figura 9. Circuito de un sistema de excitación sin escobillas.



Fuente: Stephen, Chapman. **Máquinas eléctricas**. Página 446.

2.2.3. Sistema de excitación estático.

Un sistema de excitación estático está compuesto por diversos componentes de estado sólido aplicados a la electrónica de potencia cuya función y aplicaciones no requieren de movimiento como el caso de las

excitaciones de tipo dinámico; y es de ello que se deriva el nombre de excitación estática.

En la excitación estática la regulación de voltaje es aplicada al devanado de campo del generador directamente y no al campo de una excitatriz rotativa, se realiza entonces la misma función con componentes de estado sólido eliminando la necesidad de partes móviles. La corriente de excitación se suministra al devanado de campo por medio de escobillas y contactos deslizantes.

Un sistema de excitación estático realiza la misma función de la excitación de tipo dinámico, pero con el uso de componentes de estado sólido se mejora la velocidad de respuesta a las variaciones que presenta la carga conectada al generador, con ello no se ve el retraso adicional debido a la constante de tiempo del sistema de excitación; siendo muy pequeña esta constante en el caso de un sistema de excitación estático se desprecia generalmente.

2.3. Función de los sistemas de excitación.

La función de un sistema de excitación es la de regulación de la corriente de excitación del devanado de campo de un generador sincrónico. Según sea el caso del generador de estar aislado o conectado a un sistema de barra infinita, el sistema de excitación cumplirá con la misma función, pero según la situación del generador, en sus terminales se controlará el voltaje o la cantidad de potencia entregada a la carga.

Entonces si el generador opera en forma aislada, el voltaje en sus terminales de salida se puede controlar con la regulación de la excitación del campo. Ahora si el generador esta conectado en paralelo con otros generadores conectado a una barra infinita de potencia, el voltaje en los terminales del generador quedará determinada por el voltaje de dicha barra.

2.3.1. Control del voltaje en terminales del generador, caso de un generador aislado.

Al operar un generador sincrónico de forma aislada o alimentando una barra aislada, el voltaje en sus terminales de salida puede ser controlado con la regulación de la excitación del devanado de campo.

En un generador sincrónico el control del voltaje en sus terminales de salida es posible realizarla de dos formas. Una de ellas es por medio de la variación de la velocidad de rotación de la máquina, aunque este tipo de regulación es muy poco usado ya que generalmente los sistemas de carga conectados al generador necesitan de una frecuencia estable, que en el caso de regulación del generador por velocidad hace que la frecuencia sea variable, cosa que no se desea.

La otra forma de conseguir el control del voltaje en terminales del generador es por medio de la variación de la excitación del devanado de campo, esta variación de la excitación del devanado de campo, como se mencionó anteriormente, se puede efectuar con la variación de la corriente de

excitación con que se alimenta el devanado de campo. Esto podemos reafirmarlo a través del análisis de las siguientes ecuaciones, que relacionan el voltaje con la corriente de excitación además de la velocidad de rotación de la máquina.

Fórmula 4. Voltaje RMS que genera el flujo producido por el devanado de campo rotatorio del generador.

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}}$$

donde:

E_{af} = voltaje RMS inducido en el devanado de armadura por el flujo del devanado de campo, en la fase a .

ω = velocidad sincrónica del rotor.

L_{af} = inductancia mutua entre el devanado de campo y la fase a del devanado de armadura.

I_f = corriente directa o de excitación del devanado de campo.

Fórmula 5. Voltaje en terminales del generador.

$$V_{ta} = -R_a I_a - jX_s I_a + E_{af}$$

donde:

V_{ta} = voltaje en terminal del generador de la fase a .

R_a = resistencia del devanado de armadura.

I_a = corriente circulante en el devanado de armadura.

X_s = reactancia sincrónica.

E_{af} = voltaje RMS inducido en el devanado de armadura por el flujo del devanado de campo, en la fase a .

Al momento de conectar una carga o cargas a un generador se produce un pequeña variación en el voltaje en terminales del generador; debido a que el voltaje interno generado permanece constante pues no se ha variado la excitación del campo, al igual que la velocidad de rotación de la máquina, el efecto de conectar una carga se refleja entonces en la variación del voltaje en terminales, con lo que para lograr nuevamente el voltaje preestablecido como nominal es necesario aumentar el voltaje interno generado o la velocidad de la máquina, optándose por el primer método por razones que se han expuesto.

Debido a que al suministrar energía eléctrica a un sistema de cargas se desea que el voltaje en terminales sea constante, es necesario el control y la regulación del generador que suministra este servicio, pues como se ha expuesto es posible realizar el control del voltaje en terminales por medio de la regulación de la corriente de excitación; ésta se realizará según el tipo de cargas conectadas al generador, que en este caso se expone como elemento único para la alimentación de las cargas.

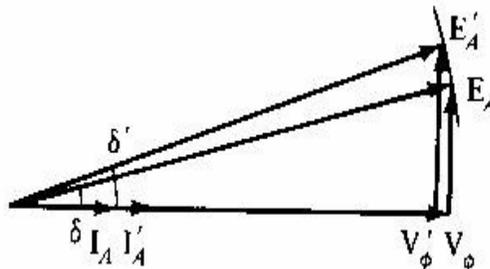
Los sistemas de carga conectados al generador pueden ser de tres naturalezas diferentes, cargas resistivas, reactivas inductivas y capacitivas, y a lo que la regulación de la corriente de excitación será también diferente para mantener el voltaje nominal en terminales del generador. Estas cargas también se denominan en base al factor de potencia que presenta el generador, siendo:

1. Carga con factor de potencia unitario.
2. Carga con factor de potencia en atraso.
3. Carga con factor de potencia en adelanto.

Como se demostró en la fórmula No.5, el voltaje de fase V_ϕ o voltaje en terminales del generador, es igual a la suma vectorial del voltaje interno generado E_A , la caída de voltaje debido a la resistencia del devanado de armadura $I_A R_A$ (la cual se puede despreciar debido a su pequeño valor respecto a la reactancia de la máquina) y la caída de voltaje debido a la corriente del inducido $jX_S I_A$. Con lo anterior a continuación se expone con la ilustración de los diagramas fasoriales, la variación de voltaje que cada carga conectada presenta al generador según su naturaleza y la regulación necesaria para mantener el voltaje constante en terminales del generador.

Con cargas de factor de potencia unitario, la corriente que circula en el inducido I_A estará en fase con el voltaje de fase V_ϕ . Por lo tanto, la caída de voltaje debido a la corriente del inducido estará desfasada 90 grados, esto implica que el voltaje de fase V_ϕ disminuirá levemente, como lo muestra la siguiente figura.

Figura 10. **Variación del voltaje de fase, para cargas con factor de potencia unitario.**

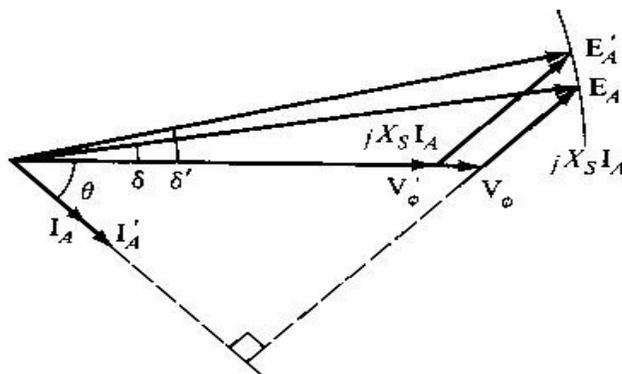


Fuente: Stephen, Chapman. **Máquinas eléctricas**. Página 466.

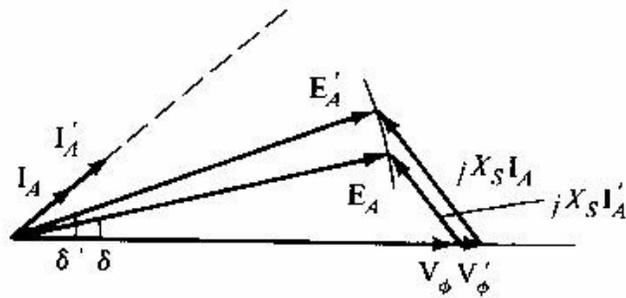
Se puede observar de la anterior figura que cuando la carga es puramente resistiva presenta un de factor de potencia unitario, con lo que el voltaje de fase V_ϕ varia levemente. Con lo que para restablecer el voltaje preestablecido es necesario variar la corriente de excitación del devanado de campo, incrementándola o decrementándola, según sea la necesidad, de manera que se llegue nuevamente al voltaje en terminales nominal.

En el caso de que la carga conectada al generador presente una condición de factor de potencia en atraso o en adelanto, la corriente I_A se retrasará o adelantará respecto al voltaje de fase V_ϕ . Con lo que la caída de voltaje debido a la corriente circulante en el inducido $jX_S I_A$ estará desfasada un ángulo mayor o menor a 90 grados respecto al voltaje de fase V_ϕ ; con esta situación se tendrá que el voltaje de fase V_ϕ disminuirá o aumentará significativamente, según sea el caso. Estas situaciones podemos observarlas con el análisis de las siguientes figuras.

Figura 11. **Variación del voltaje de fase, para cargas con factor de potencia (a) en atraso, (b) en adelanto.**



(a)



(b)

Fuente: Stephen, Chapman. **Máquinas eléctricas**. Página 466.

De las figuras anteriores podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Con cargas que presentan la condición de factor de potencia en atraso el voltaje de fase V_ϕ disminuye significativamente, con lo que es necesario para mantener constante el valor nominal del voltaje de fase realizar un incremento significativo en la corriente de excitación del devanado de campo; este incremento se realiza en forma proporcional a la disminución del voltaje de fase.
- Ahora si la carga tiene factor de potencia en adelanto, el voltaje de fase aumenta, entonces para mantener el valor del voltaje preestablecido como nominal se necesita disminuir la corriente de excitación del devanado de campo en proporción al aumento del voltaje.

Como se expuso, la regulación de la corriente directa proporcionada al devanado de campo del generador sincrónico permite el control del voltaje en terminales cuando el generador es el único que proporciona la potencia

requerida por las cargas, según sea el tipo de carga se necesitará un aumento o disminución de la cantidad de corriente proporcionada al devanado de campo.

La variación de la excitación del campo dependerá del tipo de carga conectada al generador para mantener el valor nominal del voltaje, así: Si la carga presenta factor de potencia unitario la excitación del devanado de campo se debe aumentar levemente a razón de llegar a suplir la disminución del voltaje. Con cargas que presentan factor de potencia en atraso o adelanto, la excitación se debe incrementar o disminuir significativamente a modo de llevar nuevamente el valor del voltaje en terminales al valor preestablecido.

2.3.2. Control de la potencia activa y reactiva, caso de un generador conectado a una barra infinita.

En casos muy especiales el generador sincrónico se tiene como único alimentador de un sistema de cargas eléctricas, es decir conectado de forma aislada; generalmente un generador sincrónico esta conectado en paralelo con otros generadores conformando un gran sistema de potencia; esta configuración o interconexión entre los generadores se lleva a cabo con el fin de tener un sistema de potencia estable y confiable; estos grandes sistemas de generación generalmente se denominan sistema de barra infinita, debido a que las variaciones razonables de los parámetros básicos de generación de un pequeño generador conectado al sistema no pueden tener efecto considerable en los parámetros prefijados del sistema de barra infinita y tampoco al conectar o desconectar una carga al sistema; otra de las cualidades de utilizar generadores en sistemas de barra infinita es porque se obtiene una mayor eficiencia de cada uno de los generadores conectados al sistema pues éstos

operan cercanos a su límite de eficiencia, lo cual no ocurre en un generador funcionando aisladamente.

Al tener un generador sincrónico conectado a un sistema de barra infinita el voltaje y frecuencia de éste quedará fijada por el sistema, con lo que los parámetros a manejar del generador sincrónico son la potencia activa y reactiva entregada al sistema.

Los generadores sincrónicos son catalogados generalmente por su “potencia máxima aparente, kilovatios o megavatios, a determinado voltaje y factor de potencia (a menudo de 80, 85 o 90% atrasado) que pueden manejar sin sobrecalentarse”. (Fitzgerald, A. E. y otros, 1999. 265). La potencia entregada por el generador, denominada potencia aparente S , esta compuesta por dos términos que son la potencia activa P y la potencia reactiva Q . Esta relación se puede observar por la siguiente fórmula.

Fórmula 6. Potencia aparente.

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

La potencia que entrega entonces el generador al sistema de barra infinita, esta compuesta por las dos componentes de potencia activa y reactiva, estas dos componentes como se ha mencionado son las que se pueden manejar en el generador conectado a una barra infinita, las cuales respectivamente están manejadas por el motor primario del generador y por la corriente del devanado de campo o corriente de excitación, su límite esta fijado por su motor primario para la potencia activa y para la reactiva “el calentamiento de la armadura es el factor limitante en la parte del factor de potencia unitario

hasta el nominal. Para menores factores de potencia, el factor limitante es el calentamiento del campo” (Fitzgerald, A. E. y otros, 1999. 265).

Otra de las características de los motores primarios de los generadores y la cual es la misma en todos ellos es la de la disminución de su velocidad al incrementarse la potencia que entrega el generador. Con lo que la característica frecuencia-potencia forma un papel importante en el funcionamiento de generadores en paralelo (recordando que la velocidad mecánica esta relacionada con la frecuencia por la ecuación 2).

Aunque la disminución de la velocidad es no lineal, se puede llegar a obtener un control de la misma tratando de hacerla lineal a través de un regulador de velocidad. La relación entre la frecuencia y la potencia del generador se puede describir cuantitativamente a través de la siguiente fórmula.

Fórmula 7. Relación de potencia-frecuencia en un generador sincrónico.

$$P = S_P (f_{sc} - f_{sist.})$$

donde:

P = potencia activa proporcionada por el generador.

S_P = pendiente de la curva Kw./Hz o MW/Hz.

f_{sc} = frecuencia del generador en vacío.

$f_{sist.}$ = frecuencia de funcionamiento del sistema.

De lo anterior podemos deducir que el aumento de potencia activa demandada a el generador por la barra infinita se suple a través del aumento de la velocidad del motor primario; ya que, como se expuso, el aumento de potencia demandada se traduce en una disminución de velocidad, pero como

en el sistema de barra infinita la velocidad de funcionamiento es inmodificable, el generador debe funcionar a la misma velocidad del sistema, el aumento de la frecuencia (velocidad mecánica) se traducirá en un aumento en la potencia activa suministrada por el generador.

A medida que aumenta la potencia generada aumenta también la corriente de armadura I_A , con lo que se demuestra el aumento de la demanda o consumo de la potencia $V\phi I_A$, aumentando el ángulo de par; entonces la variación solamente de la potencia activa P , manteniendo constante la corriente de excitación del devanado de campo hará que el generador trabaje como una carga capacitiva, es decir absorbiendo potencia reactiva, aunque entregue potencia activa.

Con lo anterior es necesario realizar alguna maniobra para que el generador pueda entregar potencia reactiva al sistema. Esto lo podemos lograr a través del aumento de la corriente de excitación del devanado de campo del generador pues la característica voltaje-potencia reactiva es similar a la de la frecuencia-potencia anteriormente descrita. Es decir que al aumentar el valor de la corriente de excitación del generador se aumenta el voltaje en terminales del generador, pero al igual que la frecuencia del sistema de barra infinita el voltaje de la barra infinita es inmodificable lo que traduce el aumento de la excitación del devanado en el generador en potencia reactiva entregada al sistema. Esto puede describirse de la siguiente manera: el aumento de la corriente de excitación I_f se traduce en un aumento del flujo Φ en el generador, según la siguiente relación.

Fórmula 8. Relación entre la corriente de excitación y el flujo magnético en el generador sincrónico.

$$I_f \propto \phi$$

Con lo anterior al aumentar la corriente de excitación habrá un aumento en el flujo del generador, lo cual se traduce en un aumento en el voltaje interno generado E_A , demostrado por la siguiente relación.

Fórmula 9. Voltaje interno generador en un generador sincrónico.

$$E_A = K\phi\omega$$

donde

E_A = voltaje interno generado.

K = constante de construcción de la máquina.

ω = velocidad sincrónica.

Φ = flujo magnético.

Podemos concluir de lo anterior que en el caso de un generador sincrónico conectado a un sistema de barra infinita, su voltaje en terminales y su frecuencia (velocidad mecánica) quedaran fijados por el voltaje y frecuencia del sistema, los cuales son considerados inmodificables a los cambios razonables del generador que se conecta en paralelo. Por lo anterior los parámetros que se podemos modificar son la potencia activa y reactiva entregada por el generador, las cuales son controladas por el motor primario y la excitación del devanado de campo del generador.

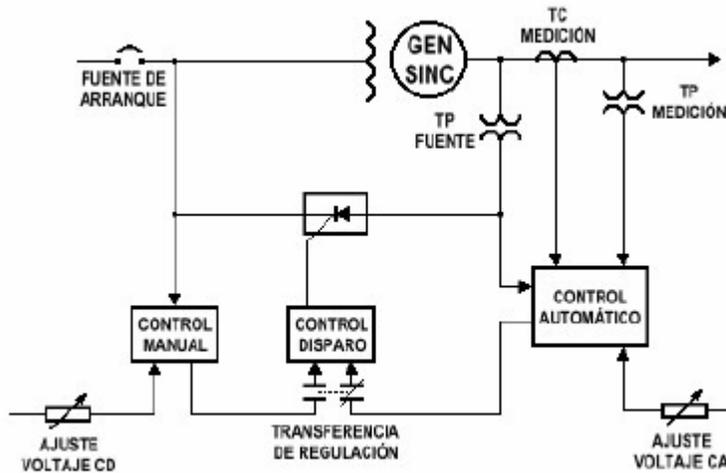
3. SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO (SEE).

Los sistemas de excitación estática son usados actualmente en reemplazo de los sistemas dinámicos de excitación de los generadores sincrónicos. El reemplazo y utilización de este nuevo tipo de excitación es principalmente por la disminución de tiempo en la respuesta que presenta este sistema para restaurar a los valores nominales el voltaje en terminales del generador por medio del control de la corriente de excitación en las variaciones que presenta el sistema de potencia al cual el generador esté conectado, sumándose la precisión y confiabilidad del uso de componentes electrónicos, los cuales han tenido un avance significativo en el ramo de electrónica de potencia. La función del sistema de excitación sigue siendo la misma, proveer la corriente de excitación al devanado de campo del generador sincrónico.

3.1. Modelo básico del SEE.

Los sistemas de excitación estáticos están basados según descripciones de la norma estándar de la IEEE 421.1 1986, para sistemas de excitación con fuente de potencia con rectificadores controlados, a continuación se presenta el diagrama de bloques funcional, éste presenta la idea básica del funcionamiento del sistema de excitación conectado al generador, sin distinguir las líneas de control y potencia. Se puede notar que es un sistema de control de lazo cerrado, que toma la alimentación de consumo propio y para la corriente de excitación del campo del generador del voltaje de salida en terminales del generador mismo. La rectificación se efectúa por medio de rectificadores controlados de silicio (SCR).

Figura 12. **Excitación de un generador sincrónico con fuente de potencia con rectificadores controlados.**

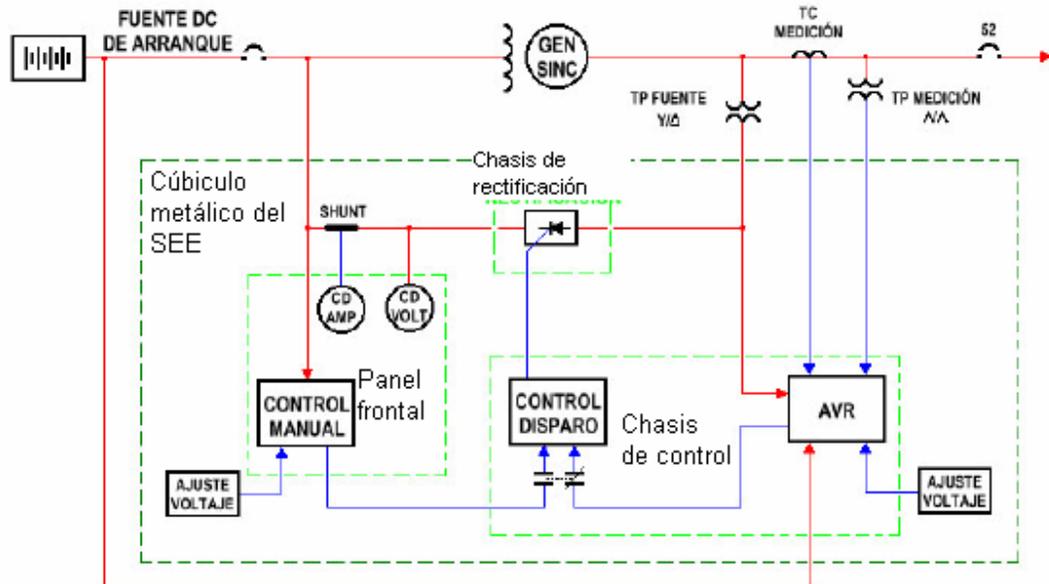


Fuente: Cubillos, Fabián. Sistemas de excitación estática de generadores sincrónicos. Pagina 14

En la figura 13 se presenta una figura del diagrama de bloques anterior, mostrando los principales equipos que constituyen el sistema, además de diferenciar las líneas de potencia y control.

La mayor parte del equipo del sistema de excitación estático esta montado sobre un panel metálico clase NEMA 1. La fuente de excitación primaria DC es externa y no suministrada con el panel, el transformador de potencia que alimenta el panel del SEE se conecta a las líneas de salida del generador y viene montado en el mismo panel metálico, pero separado por una pared metálica del mismo panel y con las libranzas debidas, siendo este transformador de tipo seco, además se tiene montados los sistemas de protección del transformador y del SEE.

Figura 13. Diagrama funcional de bloques del generador con un sistema de excitación estático, desglosando el equipo principal del sistema de excitación.



Fuente: Cubillos, Fabián. Sistemas de excitación estática de generadores sincrónicos. Pagina 15

3.1.1. Elementos principales del SEE.

Un sistema de excitación estático esta compuesto principalmente de tres componentes: transformador de potencia, chasis de rectificación y chasis de control, además de equipos auxiliares para su funcionamiento. A continuación se enumera algunos de estos componentes basados en la figura 13.

- Transformador de potencia para la excitación.
- Transformador de potencial, para la medición del voltaje trifásico en terminales del generador.

- Transformador de corriente, para la medición monofásica de la corriente en las líneas del transformador.
- Chasis de control con el regulador automático de voltaje (AVR) y control de disparo de los SCR.
- Sistema de control digital de la excitación (DECS).
- Chasis de rectificación o excitatriz, donde se encuentran montados los SCR.
- Acceso al control y verificación de datos manual, ubicado en la parte frontal del panel.
- Ajustes electrónicos de voltaje de referencia para modo manual y automático.
- Dispositivos electrónicos de control y protección.

3.1.2. Disposición física de los elementos del SEE, (caso de un SEE Basler Electric).

El equipo que conforma el SEE esta protegido por un panel metálico tipo NEMA 1, dentro del cual se asegura el equipo de agentes externos contaminantes y de maniobras inapropiadas de personal, además de proteger al personal que circula cerca del equipo de accidentes por exposición a altas corrientes y voltajes. El panel esta diseñado para protección de explosiones internas y golpes mecánicos de equipo móvil de la planta.

En la parte externa del panel se tiene acceso a una pantalla con un tablero digital, por el cual se tiene acceso a mando manual, acceso a

indicadores de funcionamiento e información que puede proporcionar equipo de medición del equipo.

Figura 14. Interior del panel de un SEE, ubicando equipo del mismo.



Fuente: Cubillos, Fabián. Sistemas de excitación estática de generadores sincrónicos. Pagina 17

3.2. Funcionamiento.

Como se ha mencionado anteriormente la función del sistema de excitación es la de controlar la corriente de excitación del devanado de campo

del generador sincrónico en los diferentes casos de variación de la carga, es decir controlando el voltaje de terminales o la potencia reactiva proporcionada según el caso de funcionamiento del generador, aislado o conectado a una barra infinita respectivamente. Según el documento de la aplicación de una excitación estática: “Básicamente, un sistema de excitación, funciona como un regulador de voltaje. Cuando detecta bajo voltaje del generador, este incrementa la corriente de excitación del campo, cuando detecta alto voltaje del generador, hay un decremento de la corriente de campo” (Basler Electric Company, 1999. 1).

A continuación se describen algunos de los componentes de un SEE de la marca Basler Electric.

3.2.1. Transformador de potencia.

Uno de los componentes principales de un SEE es el transformador de potencia o potencial. Es un transformador de tipo seco, enfriado por circulación natural de aire y conectado en configuración estrella-delta y por medio del cual es posible proporcionar al sistema de campo y componentes del panel del SEE para su funcionamiento el voltaje y corriente requeridos. El transformador puede obtener la potencia requerida de las terminales de salida del generador o del sistema de potencia al cual este conectado el mismo, en el caso de ser un sistema de barra infinita. El secundario del transformador se diseña de modo que proporciona un nivel de voltaje compatible o requerido por el campo del generador. Generalmente un transformador con voltaje secundario de 160 voltios es usado para alimentar un campo que requiere 125 voltios de corriente directa. Para otros voltajes de campo requeridos, según NEMA de 63, 250,

375 y 500 voltios de corriente directa, el transformador proporciona voltajes apropiados en múltiplos de 160 voltios de corriente alterna en su salida. El transformador es diseñado para soportar la excitación a plena carga con un margen para proporcionar por lapsos cortos de duración sobrecargas en el sistema que demandan mayor cantidad de corriente de excitación del campo.

3.2.2. Chasis de rectificación.

3.2.2.1. Contactor de desconexión.

La salida de voltaje en terminales del transformador de potencia, pasa por los contactos de un contactor de desconexión antes de llegar al puente de rectificación para convertir la corriente de alterna a directa. El contactor es usado para interrumpir el flujo de potencia de corriente alterna al puente rectificador de corriente en modelos de 250 voltios de DC. Este método es utilizado en lugar de un resistencia de choque y un interruptor de interrupción. En estos modelos se utiliza el contactor ya que la capacidad de desconexión que se necesita requiere un interruptor de mayor tamaño, en cambio el contactor es más compacto y de ocupa menos espacio. En los SEE de modelo determinado para 63 y 125 voltios, se utiliza un interruptor para interrumpir el flujo de corriente al puente rectificador cuando es requerido.

3.2.2.2. Excitación del campo (función de cebado).

Al iniciar la operación del generador el panel del SEE no tiene energía para proporcionar la corriente de excitación al devanado de campo del generador e iniciar el proceso de generación o conversión de energía

electromecánica, dado el caso que el generador esta aislado y que inicialmente no se encuentra conectado al sistema de potencia de barra infinita, por lo que se necesita de un sistema auxiliar de corriente directa que proporciona la corriente de campo necesaria para iniciar el funcionamiento del generador, lo más común es un banco de baterías de 125 voltios DC, en el caso del campo de 250 voltios. Con el banco de baterías se inicializa el funcionamiento del generador controlado por un pequeño contactor el cual permutará contactos en un punto determinado y en el cual el generador es capaz de auto excitarse y funcionar con la alimentación proporcionada por el transformador de potencia del SEE, con lo que el contactor tiene la función de cebado del generador a través de la conmutación de sus contactos, estando inicialmente alimentando el campo del generador por el banco de baterías.

3.2.2.3. Puente rectificador de potencia.

El puente rectificador de potencia consiste de tres diodos de potencia y tres triodos o SCRs (rectificadores controlados de silicio) conectados en una configuración de rectificación de onda completa. Adicionalmente el puente incluye un número de componentes adicionales para detener el paso de corriente por el puente a manera que no llegue al campo del generador, estos son tres fusibles de sobre corriente en cada línea de alimentación, un supresor de sobrecarga que corta y limita altos voltajes inducidos en el campo del generador, un contactor de desconexión y un contactor de excitación o cebado del campo. Estos componentes están montados juntos sobre un chasis que es llamado chasis de rectificación. La línea de SEE incluye un numero de chasis de rectificación separados, para su enfriamiento, según su voltaje y corriente de salida, su capacidad de potencia esta en un rango de 4.5 a 200 kilowatts.

A continuación se muestra el diagrama de un puente de rectificación de potencia con tres SCR y las formas de onda de voltaje a su salida.

Figura 15. **Diagrama de un puente rectificador de potencia de onda completa, con tres SCR.**

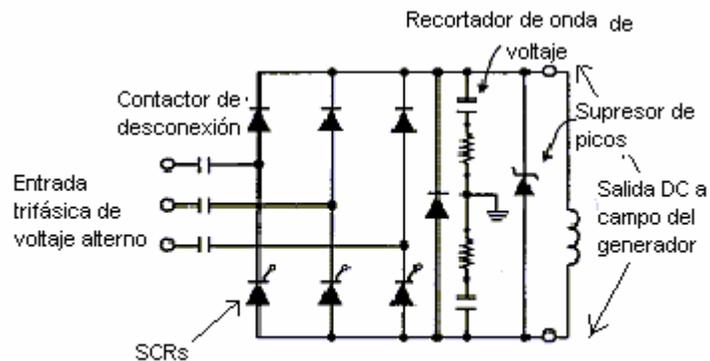
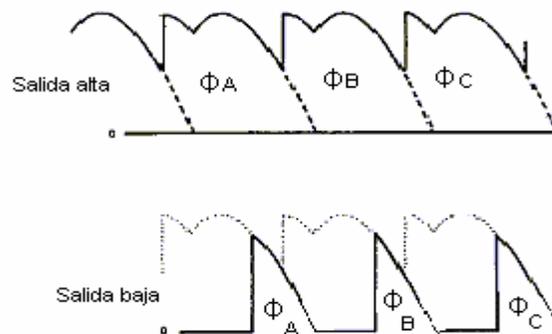


Figura 16. **Formas de onda de voltaje a la salida del puente rectificador de tres SCR.**



Fuente: Basler Electric. Application of static excitation. Página 3.

3.2.3. Chasis de control.

3.2.3.1. Transformador de sensado.

El transformador de sensado proporciona aislamiento eléctrico y el voltaje adecuado para alimentar los instrumentos de medición del generador y del regulador automático de voltaje. Tiene como opción la posibilidad de sensar los parámetros de una a las tres líneas terminales del generador. El transformador de sensado esta equipado con varios contactos para manejar un rango de ajuste de voltaje que va de 100 a 600 voltios a las frecuencias de 50/60 hertzios.

3.2.3.2. Comparador de compensación en paralelo.

Esta función es deseable para cuando el generador esta conectado en paralelo con otros generadores, ya sea aisladamente o funcionando con un sistema de potencia de barra infinita, para que compartan por igual la carga reactiva del sistema al cual alimenten. Esta es una señal que es tomada de un transformador de corriente instalado sobre una de las líneas de salida del generador, es una señal de respaldo de la tomada por los transformadores de sensado, al confrontar ambas señales se determina la necesidad de modificar la corriente de excitación de campo del generador para corregir y balancear la operación de proporcionar la potencia reactiva del sistema por los generadores, a través de la regulación del voltaje de salida.

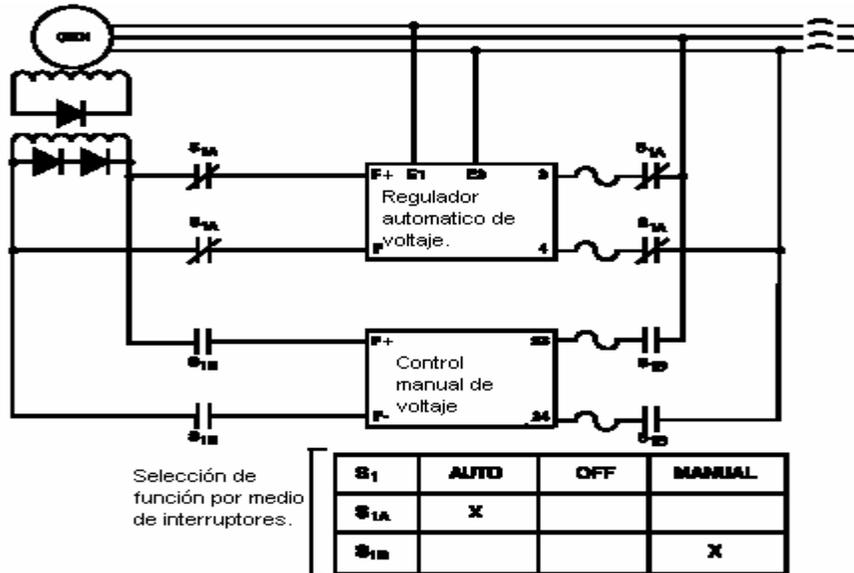
3.2.3.3. Regulador automático de voltaje (AVR).

La regulación de voltaje es una de las características básica y principal de un SEE. Esta función es posible realizarla de manera automática o manual por medio de un interruptor de selección para determinar la función a seguir. La función manual es deseable para respaldo del SEE, generalmente es utilizado el regulador automático de voltaje.

El regulador automático de voltaje es alimentado por varias señales que tienen el objetivo de mantener a la salida del generador el voltaje alterno preestablecido; de los transformadores de sensado llega una señal representativa del voltaje de línea del generador, esta señal es rectificadora y filtrada para ser comparada con un voltaje preestablecido como referencia, de corriente directa. Si la señal del generador no es concordante con el voltaje de referencia, se produce una señal de error. Si el interruptor de selección está en la posición de automático, la señal de error pasa al circuito de encendido. Allí, se anula la señal de control base y causa que la salida del puente de rectificación cambie apropiadamente para reestablecer el voltaje del generador al nivel deseado.

Un potenciómetro local o remoto operado manualmente permite ajustar el punto de referencia del regulador automático de voltaje, permitiendo el ajuste del voltaje del generador. Otra señal, generada en el circuito de encendido y formada para estabilizar el sistema, es introducida al regulador automático de voltaje previniendo oscilaciones y sobrepaso del voltaje del generador.

Figura 17. Diagrama esquemático de selección del control de voltaje automático y manual.



Fuente: Basler Electric. Designing an excitation system. Página 6.

3.2.3.4. Limitador de baja frecuencia.

Debido a que en un generador es deseable mantener un voltaje nominal en las terminales de salida constante, es posible que la frecuencia de funcionamiento disminuya sustancialmente, con lo que cargas susceptibles a este cambio, como motores y transformadores pueden sufrir daños. El SEE tiene una función de limite de baja frecuencia pues con el decaimiento de ésta progresivamente el voltaje del generador también puede decrecer, cuando la frecuencia baja de un 90% del valor preestablecido.

3.2.3.5. Arranque suave.

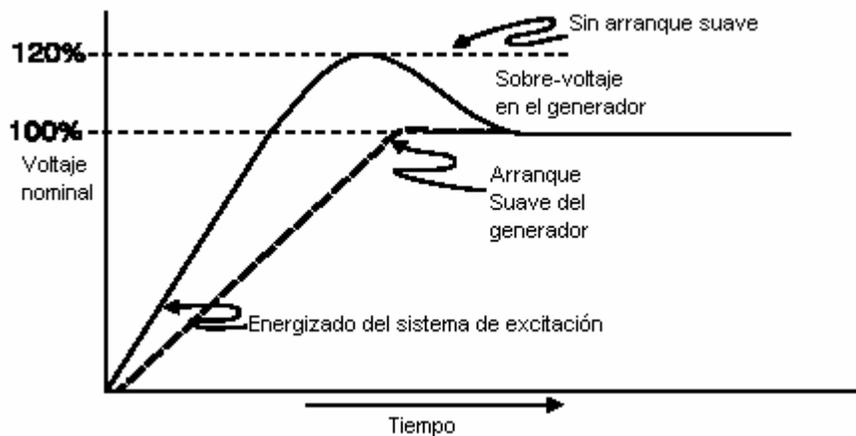
El SEE permite el arranque o encendido controlado de la excitación del campo, ya que se da generalmente el fenómeno de elevación de voltaje en terminales de salida del generador cuando la excitación del campo es realizada súbitamente, puede darse que el voltaje se incremente en un 15 a 20% del valor nominal antes de llegar a estabilizarse en éste. Esta función es denominada arranque suave del generador, la cual es posible programarla en un rango que permite variar la velocidad del arranque, desde un punto considerado “lento”, que es el arranque más suave y lento, hasta un punto considerado “rápido”, que es la función de arranque rápido, y puntos intermedios que pueden variar el tiempo de encendido de la excitación del generador. Esta función es de ayuda para evitar el esfuerzo en los devanados de la máquina además que es posible que se observe el efecto corona (efecto de ionización del aire, que puede afectar la vida de los aislamientos), perjudicial dado que significa un esfuerzo extra entre los puntos que se observa. La figura No.18 muestra el efecto de arrancar súbitamente el generador, comparado con la función del arranque suave del generador.

3.2.3.6. Circuito de control de encendido de la excitación.

La función del circuito de encendido es la de generar un tren de pulsos, con una relación tiempo ajustable, para el manejo de los SCRs. Esto causa un balance en la salida del puente para incrementos o decrementos para mandar las señales necesarias al circuito de encendido. Una de estas señales es posible manejarla desde un potenciómetro de control, el cual permite controlar

la excitación del generador cuando el regulador automático de voltaje no esta siendo usado.

Figura 18. **Curvas características del voltaje en terminales, al excitar el devanado de campo del generador.**



Fuente: Basler Electric. Application of static excitation systems for rotating exciter replacement. Página 11.

3.2.3.7. Fuente de poder.

El SEE tiene una fuente de poder o alimentación regulada, cuya función es la de proveer la potencia necesaria y estable para el funcionamiento de los circuitos electrónicos a pesar de las variaciones del voltaje en las terminales del generador.

3.2.4. Sistema de control digital de la excitación (DECS)

La evolución de los sistemas de excitación ha dado la posibilidad de proporcionar y controlar eficientemente la excitación del generador sincrónico.

Uno de los más recientes medios de control para proporcionar la corriente de excitación al campo del generador ha sido por medio de la introducción de tecnología digital; el uso e implementación de funciones lógicas ha permitido un aumento en el control, protección y funcionamiento de un generador por medio de su sistema de excitación, se introduce la flexibilidad de interactuar fácilmente con controles del generador, además de las funciones protectoras.

El sistema de control digital (DECS) es la base de funcionamiento del sistema de excitación estático, pues es por este que deben de llegar y ser procesadas las señales necesarias para el funcionamiento del SEE.

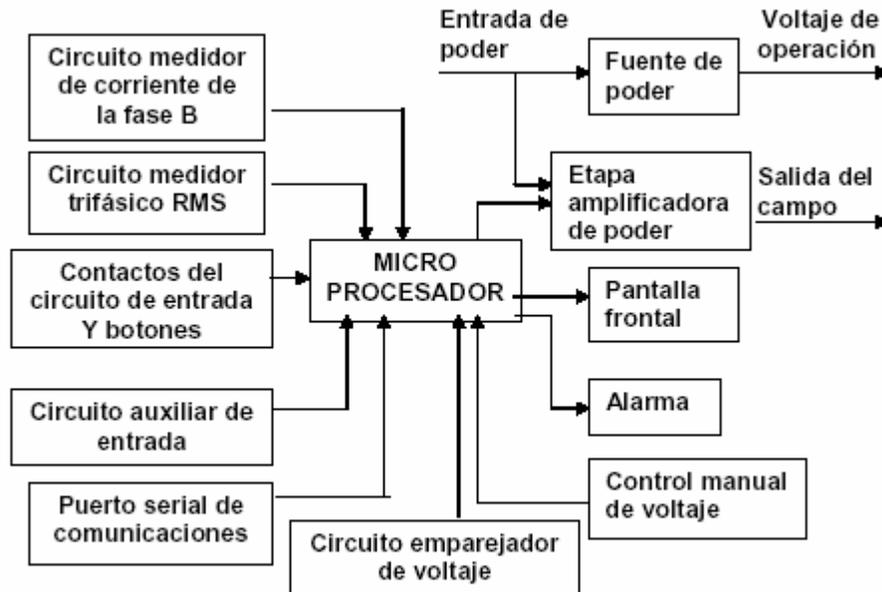
El DECS es un equipo compuesto de dispositivos de estado sólido componentes de una serie de circuitos digitales y analógicos, agregándose entonces el uso de la electrónica para el desarrollo de los diversos procesos que desarrolla un SEE y controlado por un microprocesador, consiguiendo alcanzar un mejor desempeño del sistema de excitación. La función que desarrolla el DECS es pues la de controlar el voltaje proporcionado al devanado de campo del generador.

En la figura No.19 se muestra un diagrama de bloques de un DECS de la marca Basler Electric.

Las funciones de cada uno de los bloque se mencionan a continuación:

- Fuente de poder: convierte, rectifica y filtra la entrada de voltaje requerida por los circuitos del DECS.

Figura 19. Diagrama de bloques del DECS-15 de Basler Electric.



Fuente: Orellana, José. Sistemas digitales de control de la excitación (DECS) y regulación primaria de voltaje en generadores eléctricos. Pagina 27.

- Etapa amplificadora de poder: circuito que proporciona la tensión y corriente de campo.
- Pantalla frontal: panel por el cual se indican las condiciones de operación, se realiza la selección de ajustes del sistema y monitoreo de operaciones seleccionadas.
- Circuito emparejador de voltaje: permite el control de la salida del voltaje del generador, emparejándolo con el nivel de voltaje de la barra o línea a que alimente el generador.
- Circuito medidor de corriente de fase: monitorea la corriente de salida de una fase del generador, es una señal convertida a digital en el DECS y usada por el microprocesador para el cálculo del factor de potencia y potencia reactiva.

- Circuito medidor de voltaje RMS: circuito que monitorea las salida de voltaje del generador en una o las tres fases. Señal digitalizada para ser usada por el microprocesador.
- Circuito auxiliar de entrada: permite la adición de dispositivos de control externos a la salida del DECS.
- Puerto serial de comunicación: es un conector que permite la comunicación entre el DECS y una computadora, permitiendo la programación, reprogramación y solución de problemas con el uso del *software* de Basler Electric.
- Microprocesador: es el dispositivo que controla todas las funciones del DECS por medio de su programación. Provisto de una memoria no volátil que almacena los parámetros de programación, si quedara el DECS desenergizado. Permite el ajuste de la unidad antes y después de su instalación.
- Alarma: circuito controlado por el microprocesador y elementos de sobre excitación, vigila que los rangos de voltaje y corriente se encuentren en los rangos previstos.
- Circuito de control manual: permite el ajuste manual de la corriente continua de salida del control de la excitación del DECS. Al realizar el ajuste el DECS realizará automáticamente la regulación de ésta corriente.

3.3. Estabilidad del SEE.

Anteriormente se describió que el sistema de excitación estático junto al generador forman un lazo cerrado de retroalimentación, por medio del cual es

posible mantener constante el voltaje en terminales del generador. El regulador de voltaje es parte de este lazo cerrado uniendo la salida del generador con el devanado de campo del mismo. El devanado de campo del generador consiste en un bobinado de alambre enrollado sobre un núcleo de hierro, que tiene un valor de inductancia muy alto; la aplicación de voltaje al campo provoca el incremento sustancial de la corriente de campo. Consecuentemente existe un retardo de tiempo desde el cambio de voltaje del campo hasta que el voltaje del generador es restaurado al valor regulado. Debido a este retardo de tiempo y la alta sensibilidad del regulador de voltaje, es necesario un circuito de estabilidad del regulador de voltaje.

Como se mencionó anteriormente el regulador automático de voltaje es manejado por diferentes señales que son comparadas con un punto de referencia para mantener estable el voltaje de terminales del generador, operando directamente sobre la conducción de los SCRs. La sensibilidad del comparador que envía la señal de error es alta, característica de los reguladores de voltaje para mantener una alta exactitud en la regulación del voltaje; para evitar una continua corrección en la desviación del voltaje y evitar la oscilación del voltaje de salida se agrega un circuito de estabilidad, el cual retroalimenta una señal al comparador del AVR.

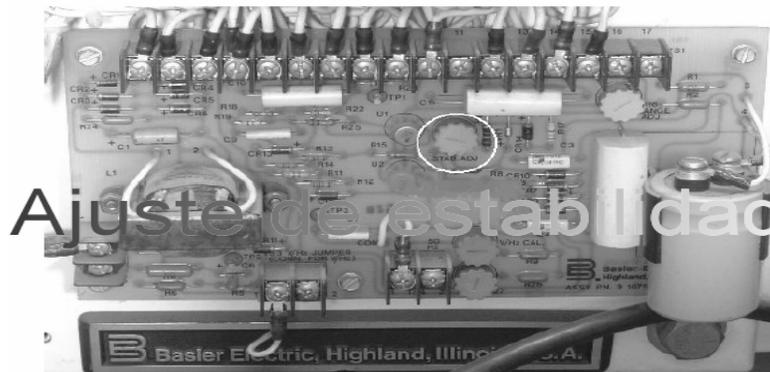
En el caso del sistema de excitación de la marca Basler Electric, el circuito de estabilidad esta incluido en la tarjeta del AVR, contando con un ajuste que permite la operación estable del generador, para una variedad de tamaños de máquinas, controlando la retroalimentación aplicada al AVR. Este ajuste es realizado de fabrica. El ajuste para una buena estabilidad tiende a hacer mayor el tiempo de respuesta en la recuperación del voltaje de salida del

generador, pero un menor tiempo de respuesta puede provocar que el voltaje se vuelva inestable e inicie la oscilación, con lo que un buen ajuste puede conseguirse justo por encima del punto de oscilación del generador en vacío, pues la estabilidad de tensión se torna más crítica en vacío.

3.3.1. Modelo matemático.

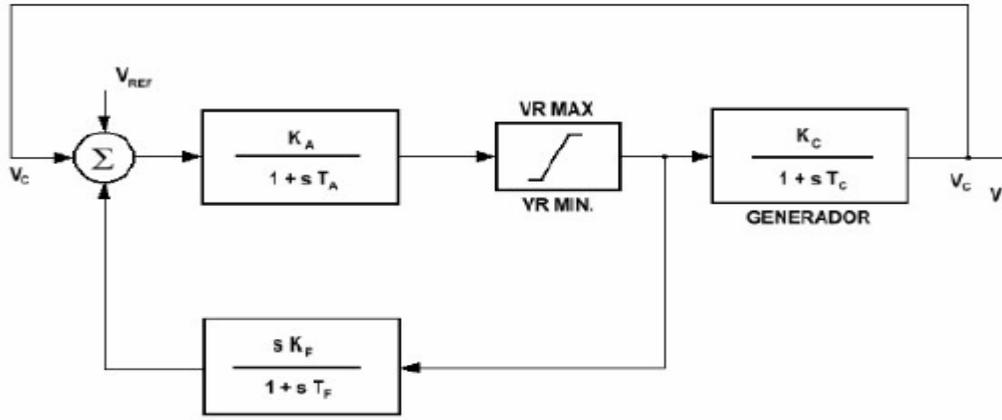
El SEE que se a descrito corresponde al tipo auto excitado, en el cual la potencia de excitación es tomada de las mismas terminales de salida del generador a través de un transformador el cual es conectado a un puente rectificador controlado que maneja la corriente de excitación en forma directa.

Figura 20. Tarjeta del AVR, de un SEE Basler Electric.



A continuación se describe parte del funcionamiento del SEE en base a el modelo de control del sistema de excitación, según el modelo propuesto en el estándar correspondiente publicado por IEEE, clasificado como ST1. El bloque de la izquierda corresponde al AVR y el bloque de la derecha al generador, el bloque inferior del lazo de retroalimentación corresponde al circuito de estabilidad, el cual es ajustable como se mencionó.

Figura 21. Modelo de control del SEE, clasificación ST1.



Fuente: Cubillos, Fabián. Sistemas de excitación estática de generadores síncronos. Pagina 26.

V_C = voltaje de salida del generador.

K_C = ganancia de la red de estabilidad.

T_C = constante de tiempo de la red de estabilidad.

K_A = ganancia del regulador.

T_A = constante de tiempo del regulador.

La estabilidad de los reguladores de voltaje es un factor afectado por tener ganancias muy altas, necesitando un circuito de estabilidad. La constante de tiempo propia de un SEE es muy pequeña, como se mencionó en paginas atrás, por lo que generalmente se desprecia y normalmente no es susceptible a inestabilidad.

3.3.2. Factores que afectan la estabilidad del sistema generador.

3.3.2.1. Ganancia.

Los sistemas de excitación estática tienen una ganancia muy alta con el fin de conseguir una regulación del voltaje con una alta exactitud, por lo que los circuitos electrónicos con los que se diseña el sistema tienen altas ganancias. La ganancia de un circuito esta dada en decibelios, magnitud con que se mide la salida, en un circuito amplificador, que puede producir una pequeña señal de entrada.

3.3.2.2. Red de estabilidad.

La red de estabilidad proporciona a través de un circuito de adelanto y atraso una señal de retroalimentación en el punto de suma (Σ) del regulador de voltaje, asegurando que el regulador corrija adecuadamente el cambio del voltaje en terminales de salida del generador, evitando la oscilación del sistema si lo hiciera demasiado rápido o retardando la recuperación del voltaje si la regulación fuese muy lenta.

3.3.2.3. Constante de tiempo del campo.

En párrafos anteriores se hizo mención que el devanado de campo esta constituido por un arrollamiento de alambre sobre un núcleo de hierro, por lo que su devanado puede caracterizarse por una impedancia, es decir resistencia más inductancia. La constante de tiempo de la máquina esta pues definida por

el cociente de la inductancia medida en henrios y la resistencia medida en ohmios, la cual caracteriza el tiempo en el cual cambia la corriente de campo, desde un “valor inicial del 63%” a un valor final requerido, luego que se inicia un cambio.

3.3.2.4. Velocidad de respuesta del gobernador.

El SEE tiene entre sus características el manejo de la potencia activa del sistema a través del control de la entrada de potencia hacia la máquina motriz por medio del control del gobernador que controla la apertura de los alabes y por consiguiente la incidencia del agua en la turbina de la máquina. Al detectarse un aumento de la carga en el sistema se envía una señal al gobernador de modo que se pueda proporcionar la potencia requerida. La respuesta del gobernador es también un factor que influye en la estabilidad del sistema pues como se expuso en apartados anteriores podría darse una disminución del voltaje en terminales de salida del generador y un aumento considerable de la corriente de armadura para suplir la potencia demandada.

3.4. Protección de los SEE.

Adicionalmente a las protecciones que se utilizan para el generador, existe una variedad de relevadores de protección para los SEE. La protección puede ser tan simple como fusibles limitadores de corriente de acción rápida hasta un sofisticado sistema de relevadores para monitorear diferentes anomalías en determinados parámetros del sistema de excitación. Dos factores son considerados cuando se agrega al sistema de excitación una protección por relevadores: el tamaño de la unidad y la accesibilidad al sistema.

En el tamaño de la unidad según crece el rango en kilovatios de la excitación estática, la importancia de la unidad en su totalidad incrementa, es decir incrementa la necesidad de proteger cada uno de los equipos del sistema.

En la accesibilidad del sistema, se toma en cuenta que generalmente las plantas de generación se encuentran en lugares poco accesibles, especialmente hidroeléctricas; esta situación demanda un mejor control en la protección de las unidades tanto en el generador como en el sistema de excitación. En estos casos son los relevadores los que establecen los límites de operación del sistema, determinan si la planta necesita mantenimiento o una suspensión del servicio de acontecer anomalías en el funcionamiento.

A continuación se menciona los parámetros considerados para la protección del SEE.

Protección del devanado de campo por falla a tierra, la circulación excesiva de corriente por una falla del devanado de campo a tierra puede decrementar el tiempo de vida del aislamiento del devanado además de causar otros fallos en el equipo.

Sobreexcitación, el SEE está diseñado para trabajar por tiempos cortos con sobrecargas en la excitación, pero excesivos esfuerzos pueden traducirse en daños permanentes para el campo del generador, el SEE, el transformador de potencia y otros equipos. Por lo que se recomienda el uso de protecciones en las aplicaciones siguientes:

- Relevador de sobre corriente DC del campo.
- Limitador de excitación máxima/mínima.

- Relevador de sobrevoltaje del generador.
- Relevador de sobrevoltaje DC del campo.
- Relevador de relación Voltaje vrs. Frecuencia.

Pérdida de una fase del transformador de potencia, ésta situación es posible dado que un fusible de una línea de potencia en la entrada del transformador se abra. Lo cual puede causar la sobrecarga del sistema de excitación y provocar un calentamiento excesivo del equipo ocasionando daño permanente al mismo. Para ello se utiliza un relevador de balance de voltaje, el cual monitorea el balance de las tres fases de alimentación del transformador de potencia, un relevador de sobre temperatura, en el caso de darse el desbalance de voltaje por la pérdida de una de las fases, y un relevador de sobre corriente de AC, que monitorea la corriente en las líneas de potencia.

Transferencia automática a manual, esta aplicación es deseable por la necesidad de continuidad de funcionamiento en las plantas generadoras, se requiere entonces de un sistema de transferencia que permita la regulación del voltaje en forma manual en el caso de que el regulador automático de voltaje falle o necesite mantenimiento. El sistema de transferencia esta coordinado con el sistema de protección que verifica el funcionamiento del sistema de excitación e inicia la transferencia a manual cuando ocurre un problema.

La importancia de la protección de la unidad de generación se incrementa con incremento en el tamaño del SEE, tanto para seguridad del personal como para el equipo en si.

4. PROPUESTA DEL CAMBIO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DINÁMICO DE UN GENERADOR SINCRÓNICO POR UN SEE, EN UNA PLANTA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.

El constante desarrollo de la tecnología y la creciente demanda de energía son dos de los aspectos principales que se han tomado en cuenta para proponer el cambio del sistema de excitación dinámico de un generador por un sistema de excitación estático. Se han considerado estos dos factores, el primero porque permite la posibilidad de mejorar el control y funcionalidad de varios procesos, en este caso el proceso de generación eléctrica, el segundo porque es una realidad a nivel nacional como internacional la obtención de energía eléctrica pues es un peldaño fundamental en el desarrollo de una sociedad y lo cual trae como consecuencia la mejora en la obtención de este bien buscando en lo posible maximizar la calidad de este servicio. Con lo que un mejor control en la generación de energía eléctrica se traducirá en un servicio de mejor calidad.

4.1. Datos generales de la planta.

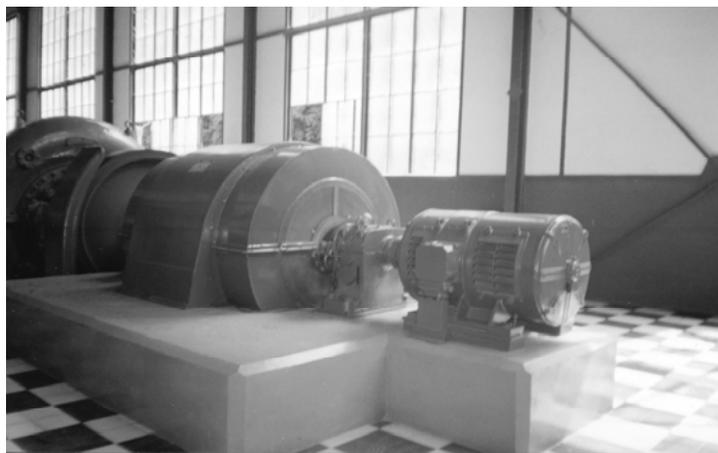
La unidad de generación a la que se propone efectuar el cambio de sistema de excitación pertenece a la Planta Hidroeléctrica Santa María, ubicada en el municipio de Zunil departamento de Quetzaltenango, a una altura de 1,540 MSNM; puesta en servicio en el año de 1926, con importantes mejoras recientemente; cuenta con 3 turbinas tipo Francis, de eje horizontal. Opera con una potencia de 6 MW. Esta central aprovecha la vertiente del río Samala. Su presa es de tipo vertedero, con una estructura construida de concreto y piedra.

4.2. Datos del generador al que se efectuará el cambio.

El generador de tipo sincrónico al que se propone el cambio tiene las características siguientes:

Marca:	Schorch.
Potencia:	3,100 Kva.
Tipo:	alternador trifásico.
Conexión:	estrella.
Voltaje:	2,300 +/-5%
Factor de potencia:	0.8.
Frecuencia:	60 Hz.
Velocidad:	720 RPM.
Corriente de excitación:	288 A DC.
Voltaje de excitación:	115 V DC.
Puesta en operación:	1926.

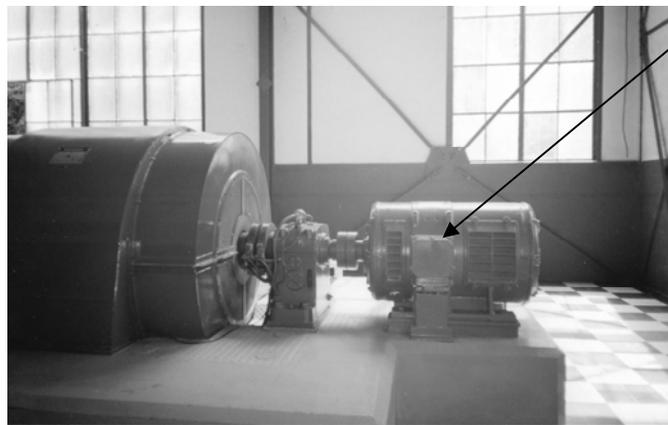
Figura 22. **Unidad de generación de Hidroeléctrica Santa María, a la que se propone el cambio de excitación.**



4.2.1. Excitación actualmente usada.

La excitación que alimenta al generador es de tipo dinámico con escobillas, marca AEG, acoplada directamente sobre el eje del generador, proporciona la corriente de excitación del generador rectificada mecánicamente por medio de escobillas y un colector montado sobre el eje de la excitación para luego alimentar a través de escobillas y contactos deslizantes el devanado de campo del generador sincrónico.

Figura 23. **Excitación dinámica acoplada sobre el eje del generador principal, Hidroeléctrica Santa María.**



4.2.2. Desventajas del sistema de excitación.

Como se describió en páginas anteriores los sistemas de excitación dinámicos tienen las mismas desventajas de un generador sincrónico, pues en realidad este tipo de excitación es un pequeño generador sincrónico.

- Además se agrega un retardo en la respuesta de regulación del voltaje en terminales del generador debido a que para controlar el voltaje en terminales del generador principal debe regularse primero el voltaje en terminales de la excitación.
- Debido a la naturaleza cambiante de las cargas conectadas a un sistema de potencia se necesita una continua regulación de la excitación, por lo que es necesario el continuo monitoreo de los parámetros del generador para regular el voltaje y potencia entregada por el regulador.
- Si el sistema de excitación es auto excitada puede ocasionarse un mayor retardo en la restauración del voltaje del generador principal en caso que existan oscilaciones del voltaje.
- La velocidad de respuesta del generador, a los cambios del sistema es limitada y puede haber tendencia a la oscilación, sobrecargas en las líneas o decaimiento del voltaje.
- Por el punto anterior hay un aumento en la necesidad de sistemas de protección para la unidad de generación, como para las cargas conectadas a las líneas del generador.
- Requiere un mayor mantenimiento de sus componentes por la necesidad de lubricación y el desgaste que sufren piezas móviles, por ejemplo: cojinetes, colector de la excitación, desgaste de escobillas y otros.

4.3. SEE.

El sistema de excitación estático que ha sido considerado para el cambio propuesto al generador sincrónico de la planta hidroeléctrica Santa María esta constituido por equipo de la marca Basler Electric. El sistema de control digital de la excitación es el modelo DECS-300, el cual provee la potencia de excitación en corriente directa para la excitación del devanado de campo del generador, como se mencionó anteriormente el DECS es el mecanismo que controla y maneja a través de los diferentes chasis, como el de rectificación y control, etc., la excitación del campo del generador, manteniendo controlado el nivel de potencia del campo y consecuentemente manteniendo la salida de voltaje del generador con un $\pm 0.25\%$ de regulación sobre el punto base. Además el DECS incluye las funciones de:

- Limite de baja/sobre excitación.
- Protección de sobre voltaje y sobre corriente del campo.
- Protección bajo/sobre voltaje del generador.
- Regulación automática de voltaje, regulación de la corriente de campo, potencia reactiva, y modo de operación según el factor de potencia.
- *Software* BESTCOMS[®] de comunicación compatible.

El SEE esta contenido dentro de dos paneles tipo NEMA 1: un cubículo de excitación y uno de transformación.

Especificaciones:

Cubículo de excitación:

Dimensiones:

Altura:	2.29 metros.
Fondo:	758.8 milímetros.

Ancho:	1.75 metros.
Peso total:	1,900 libras.
Entrada de potencia:	2,300 V AC, 60 Hz., trifásico, 17 A AC. 120 V AC, 15 A AC mínimo. 125 V DC, 55 A DC.
Salida de potencia:	63 V DC, 600 A DC, 37.5 KW.
Disipación de potencia:	2,600 watts.
Temperatura de operación:	40°C ambiente máximo.

Cubículo de transformación:

Dimensiones:

Altura:	2.39 metros.
Fondo:	1.22 metros.
Ancho:	1.52 metros.
Peso total:	2,200 libras.
Entrada de potencia:	3 fases, 60 Hz.
Primario:	2,300 V, estrella, 71.2 KVA.
Secundario:	80 V, delta, 489 A, 67.76 KVA.
Disipación de potencia:	1800 watts.
Impedancia:	4.85% a 135°C.
BIL (Nivel básico al impulso):	25 KV (primario).
Enfriamiento:	Convección natural (según NEMA 1, CV)
Clase de aislamiento:	185°C.

Fuente: Basler Electric. SSE Instruction Manual. Paginas 1-2, 1-3.

Las ventajas de considerar un cambio de sistema de excitación dinámico por uno de tipo estático se listan a continuación:

- Una de las de las primeras ventajas de utilizar un sistema de excitación estática es que no contiene partes móviles, lo cual reduce considerablemente el mantenimiento.
- Los sistemas de excitación estáticos introducen el uso de circuitos electrónico para el control de varios parámetros en la actividad de generación de potencia.
- Los sistemas de control a base de circuiteria electrónica mejoran ampliamente el funcionamiento de una unidad de generación, hacen los proceso más exactos y disminuyen la suspensión del servicio por fallas en la operabilidad.
- Un SEE facilita la recuperación rápida del voltaje en terminales del generador pues la corriente de excitación es aplicada directamente al campo del generador, disminuyendo entonces variaciones que pudieran ocasionarse al sistema de potencia.
- La corriente de excitación aplicada al campo del generador es controlada con mayor exactitud, por la tecnología de los dispositivos en base a semiconductores que incrementan su velocidad de respuesta y disminución de fallas.
- El SEE introduce el concepto de retroalimentación por lazo cerrado, lo que se traduce en un constante monitoreo de la salida de voltaje del generador, retroalimentado esta salida a un detector de error encargado

de enviar las señales respectivas para que el voltaje en salida sea lo más allegado al voltaje preestablecido como nominal.

- Se maximiza el uso de la potencia de entrada al generador minimizando las pérdidas por calor, rozamiento, pérdidas extrañas (en la excitación dinámica por escobillas), aprovechándose una cantidad mayor de potencia útil a la salida del generador.
- El alto desempeño del procesador de la excitación estática desarrolla un alto grado de confianza en la aplicación del control de la excitación y otros parámetros asociados con el generador sincrónico pues introduce el uso de controles electrónicos, retroalimentación.

4.3.1. Cambios a considerar.

Como en todo proyecto de remodelado o cambio de equipo se deben de considerar los cambios en que pueda incurrir la instalación del nuevo equipo, la posibilidad de utilizar parte del equipo o instalaciones de éste, así como el espacio de ubicación, ambiente al que se someterá el equipo y las posibles consecuencias que pueda sufrir entre otros. A continuación se referencia los cambios que se consideraran en el cambio del sistema de excitación.

4.3.1.1. Mecánicos.

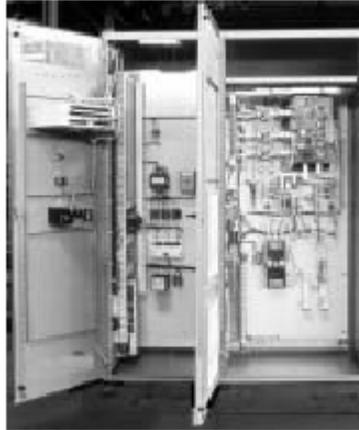
En las especificaciones del cubículo que contiene el sistema de excitación y el del transformador se han dado las medidas correspondientes a la

altura, fondo y ancho de los cubículos, además de su peso total, por lo que contando con suficiente espacio se ha considerado la ubicación de los mismos dentro de la casa de máquinas de la planta de generación, ubicándose un espacio adecuado para su ubicación, de fácil acceso, ventilación y no muy lejano a la unidad de generación, además de estar cercano a la fuente de potencia de respaldo (banco de baterías). La temperatura a la que estará expuesto el equipo varia en un rango de 5 a 40°C, revisando las especificaciones de funcionamiento se puede corroborar que el sistema funciona adecuadamente en un rango de temperatura de -40 a +50°C, no habiendo entonces problema en el caso de ventilación para el equipo, pero debido a que el grado de humedad es alto existe un riesgo de condensación sobre los componentes del sistema, por lo que se proveerá de un sistema de calefactor con termostato para prevenir tal situación, manteniéndose la temperatura interna del cubículo un poco más alta que la exterior.

El sistema como se mencionó anteriormente esta colocado en dos cubículos metálicos tipo NEMA 1, diseñados para la adecuada ventilación y protección del equipo contra el polvo y suciedad que pudiera hallarse en el ambiente.

La siguiente fotografía muestra los cubículos correspondientes del sistema de excitación y del transformador de potencia.

Figura 24. **Cubículo tipo NEMA 1 del equipo del SEE.**



La excitación dinámica con la que ha funcionado el generador esta directamente acoplada y mecánicamente asegurada sobre el generador principal por medio de pernos que al desmontarlos evitarán el movimiento del rotor de la excitación sin la necesidad de desmontar la misma del espacio que ocupa, por lo que se quedará en su posición por un tiempo no determinado y sin afectar el funcionamiento de la unidad; se procederá a desconectar también la conexión eléctrica del mismo para quedar totalmente aislada de la unidad de generación.

4.3.1.2. Eléctricos.

Una de las primeras consideraciones a tomar en cuenta es la del monitoreo de voltaje y corriente en terminales de salida del generador para lo cual se requerirá el uso de transformadores de potencial y corriente diseñados especialmente para medición, los cuales tienen la función de hacer un muestreo del voltaje de alta tensión a un nivel de voltaje requerido para el funcionamiento

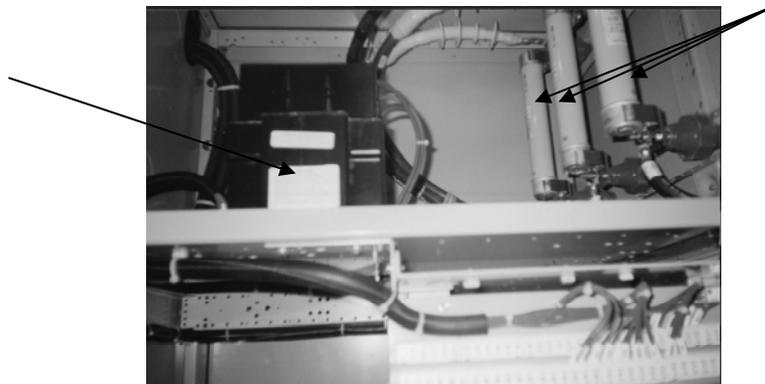
del equipo de medición, introduciendo muy bajos cambios de los parámetros muestreados, pues la calidad de la medición se requiere que sea precisa sin permitir un rango de error mayor al 1%.

Para el muestreo del voltaje y corriente se pueden utilizar diferentes formas, variando por el número de transformadores utilizados; esta situación dependerá del diseño o de la disponibilidad del equipo existente. Al utilizar un número mayor de transformadores aumenta la confiabilidad de la medición.

Una de las primeras formas es la obtención de la señal de muestreo por medio de un único transformador. Se puede utilizar también dos transformadores en conexión delta abierta o como última configuración utilizar un transformador por cada línea de salida del generador.

En el presente caso se ha considerado el uso de dos transformadores conectados en delta abierta, los cuales serán instalados dentro del panel del sistema de excitación y proporcionados junto con el equipo.

Figura 25. **Vista de uno de los transformadores de potencial y de los fusibles en alta tensión para protección del SEE.**



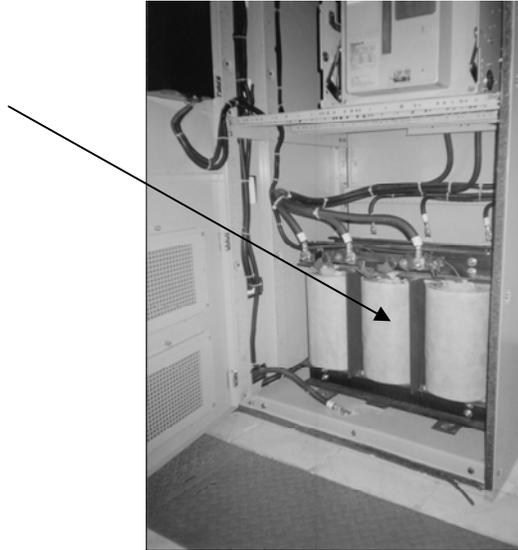
Otra consideración a tomar en cuenta es el servicio primario o de soporte para el arranque del generador, para ello se utilizará un banco de baterías que proporcionara el voltaje inicial de DC para la excitación inicial del generador a un voltaje de 130 voltios de DC.

Para las conexiones del sistema de control del SEE, que aun se requieran realizar, como controles remotos o de monitoreo, se recomienda el uso de un cable no menor al AWG 14, según recomendaciones del fabricante del SEE. Para el cable de alimentación del SEE al devanado de excitación, que se encontrará a una distancia aproximada de 20 a 25 metros se recomienda el cable de cobre calibre 500 kcmil (kilo circular mil) para evitar la caída de voltaje hasta el devanado del generador.

La alimentación de potencia del sistema de excitación será en forma paralela, a través de la conexión del transformador de potencia que se ha mencionado anteriormente y del cual se han mencionado sus características principales, en las líneas de salida del generador. El sistema será protegido del lado primario del transformador de potencia por medio de fusibles.

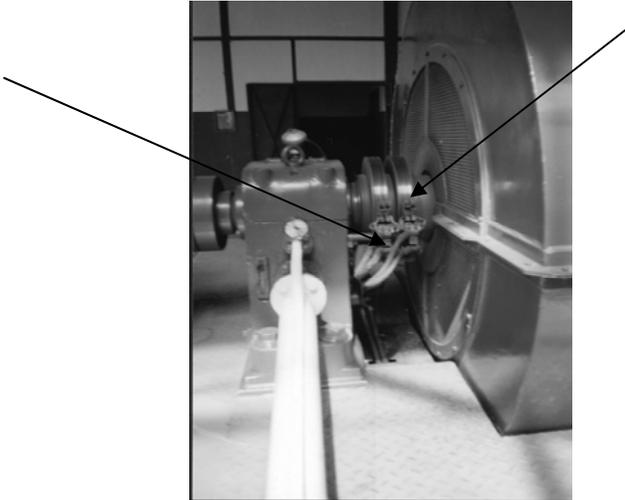
El sistema de excitación estático propuesto para sustituir la excitación de tipo dinámico, como se mencionó anteriormente esta ensamblado por la Marca Basler Electric, con un sistema digital de control de la excitación denominado DECS-300, alimentado dicho sistema por las líneas de salida del generador y auxiliado por el transformador de potencia que alimentara el SEE al nivel requerido.

Figura 26. Transformador tipo seco para alimentación del sistema de excitación estático y devanado de campo del generador.



El sistema de excitación dinámico es del tipo de anillos deslizantes y escobillas, por lo que no se requerirá de modificaciones para esta parte de la unidad, necesitándose únicamente de terminales adecuadas para realizar la conexión de los cables al sistema de escobillas que alimentarán el devanado, considerándose terminales de no menos de 30 amperios y 600 voltios. El gabinete que contiene el sistema de excitación estará ubicado a una distancia de 20 a 25 metros, por lo que el cable que se utilizará para la alimentación del campo deberá ser dimensionado tomando en cuenta la distancia y debido a que es alimentación por corriente directa se deberá de tomar muy en cuenta la caída de voltaje, y como se mencionó se recomienda utilizar el cable de cobre 500 kcmil.

Figura 27. **Sistema de escobillas y anillos deslizantes para alimentación del devanado de campo del generador.**



CONCLUSIONES

1. El uso del generador sincrónico, dentro de los sistemas de generación de energía eléctrica, es el que presenta mayores ventajas, tanto en el sentido de operabilidad y control.
2. El generador sincrónico no es la única alternativa para utilizarlo en un sistema de generación de potencia, pues con auxilio de diversos elementos una máquina de inducción puede funcionar, satisfactoriamente, como generador; pero con la variabilidad de las cargas conectadas al sistema que alimenta un generador, el control y estabilidad de dicho sistema es facilitado con el uso de un generador sincrónico.
3. El uso y manejo del sistema de excitación del generador sincrónico es lo que permite la adaptabilidad del generador a los cambios que presentan los sistemas de cargas, pues con la manipulación de la corriente que proporciona el sistema de excitación al devanado de campo del generador es posible dicha adaptabilidad.
4. Durante mucho tiempo, el uso de sistemas de excitación dinámicos ha estado ligado al funcionamiento de un generador sincrónico, pero con la introducción de la electrónica en el campo de la potencia ha sido posible la introducción y uso de sistema de excitación de tipo estático que mejoran en gran medida el control, operabilidad y rendimiento de un generador.

5. La propuesta de cambio del sistema dinámico de excitación por uno de tipo estático se prevé y puede asegurarse por documentación de proyectos realizados que puede ser de gran utilidad y mejora para la unidad de generación a la cual se propuesto.

RECOMENDACIONES

1. Una forma de mejorar el rendimiento y operabilidad de un generador sincrónico es a través de su sistema de excitación; el uso de un sistema de tipo dinámico introduce retardos de tiempo y mayor susceptibilidad a oscilaciones del sistema de potencia al que alimenta por la rapidez de la variabilidad de los sistemas de cargas, viéndose una solución a ello con el uso de un sistema de excitación de tipo estático.
2. El cambio de un sistema de excitación de tipo dinámico por un sistema de excitación estático requiere de observar que tipo de excitación se utiliza, si es con escobillas o sin escobillas, pues en el segundo caso dicho cambio no se considera posible, o, en el caso de querer darle viabilidad se necesitarían de modificaciones mayores al generador en si, incurriendo en gastos mayores y posiblemente innecesarios.
3. Al realizar un cambio de un sistema dinámico por uno estático, es necesario tomar en cuenta las modificaciones necesarias en que pudieran incurrir dicho cambio, considerando cambios mecánicos y eléctricos.
4. Actualmente, la necesidad de mejorar la calidad de la energía eléctrica, el soportar y contrarrestar satisfactoriamente los cambios presentes en un sistema de potencia, la tendencia a la automatización total de una planta de generación y además abre la posibilidad de aumentar el control de la misma, recomendando entonces la actualización con el uso de equipo más sofisticado en los casos que sea posible.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Basler Electric Company, **Publicación Técnica *Application of static excitation***. Estados Unidos: s.e., 1999.
2. Basler Electric Company, **Publicación Técnica *Application of static excitation systems for rotating exciter replacement***. Estados Unidos: s.e., s.a.
3. Basler Electric Company, **Publicación Técnica *Designing an excitation system***. Estados Unidos: s.e., 2003.
4. Basler Electric Company, **Publicación Técnica *Performance considerations for selecting a static excitation system (Waterpower '85)***. Estados Unidos: s.e., s.a.
5. Basler Electric Company, **Publicación Técnica *Protection for static excitation systems***. Estados Unidos: s.e., s.a.
6. Basler Electric Company, **SSE instruction manual**. Estados Unidos: s.e., 2002
7. Chapman, Stephen J. **Máquinas Eléctricas. 2^{da} ed.**, Colombia: Editorial McGraw-Hill Interamericana, S.A., 1995.

8. Cubillos Sánchez, Fabián Emerson. **Sistemas de excitación estática de generadores sincrónicos**. Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, 2004.
9. Fitzgerald, A. E. y otros. **Máquinas Eléctricas. 5^{ta} ed.**, México: Editorial McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., 1999.
10. Microsoft Corporation[®]. **Encarta[®] 2003**. © 1993-2002.
11. Orellana Pineda, José Carlos. **Sistemas digitales de control de la excitación (DECS) y regulación primaria de voltaje en generadores eléctricos**. Tesis de Ing. Eléctrica. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004.

BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

1. <http://endrino.cnice.mecd.es/~jhem0027/maquinaselectricas.html>.
2. <http://zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/maquinas/paginas/home.html>.
3. <http://www.basler.com/>
4. <http://www.rincondelvago.com/>