



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

Consideraciones para la sustitución de sistemas de excitación  
rotativos por sistemas de excitación estáticos  
en generadores síncronos

Jorge Ricardo Marcello Estrada Vides  
Asesorado por Ing. Armando Gálvez Castillo

Guatemala, enero de 2005



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONSIDERACIONES PARA LA SUSTITUCIÓN DE SISTEMAS DE  
EXCITACIÓN ROTATIVOS POR SISTEMAS DE EXCITACIÓN  
ESTÁTICOS EN GENERADORES SÍNCRONOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JORGE RICARDO MARCELLO ESTRADA VIDES**

ASESORADO POR ING. ARMANDO GALVEZ CASTILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, enero de 2005

## 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:

Consideraciones para la sustitución de sistemas de excitación rotativos por sistemas de excitación estáticos en generadores síncronos

Tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 21 de abril de 2004

Jorge Ricardo Marcello Estrada Vides

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	ING. SYDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
VOCAL I	ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
VOCAL II	LIC. AMAHÁN SÁNCHEZ ÁLVAREZ
VOCAL III	ING. JULIO DAVID GALICIA CELADA
VOCAL IV	BR. KENNETH ISSUR ESTRADA RUIZ
VOCAL V	BR. ELISA YAZMINDA VIDES LEIVA
SECRETARIO	ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	ING. SYDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
EXAMINADOR	INGA. INGRID RODRÍGUEZ DE LOUCKOTA
EXAMINADOR	ING. MARVIN HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
EXAMINADOR	ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOLLA BARRIOS
SECRETARIO	ING. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y a todas las personas que me brindaron su apoyo durante estos años de esfuerzo que llevaron a la culminación de mi carrera.

A mi esposa Melissa porque ha estado a mi lado desde el inicio de mi carrera, por vivir junto a mí las buenas y malas experiencias, por dejarme invertir en mis estudios todo ese tiempo que dejé de compartir a su lado y por ser el motor de esa voz interior que me ha permitido salir adelante.

A mi hija Marcellita porque desde que nació ha sido una razón más para superarme y porque con sus gestos y sonrisas logra que los esfuerzos más grandes parezcan insignificantes.

A mi padre Minor por ser la llama que despertó mi vocación hacia la carrera, por compartir sus anécdotas y reflexiones y por el ejemplo que su vida profesional y personal ha significado para mí.

A mi madre María Estela por estar siempre pendiente de mis pasos, por sus enseñanzas, por el apoyo moral que me ha brindado y por animarme a seguir siempre adelante.

A mis abuelos Amando y Estela, por apoyarme y brindarme sus sabios consejos, por preocuparse con mis dificultades y por alegrarse con mis logros.

A mis suegros Jorge y Rosana, por estar siempre pendientes de mi persona y por todas las muestras de cariño que me han brindado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	X
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVI
1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL GENERADOR SÍNCRONO Y FUNCIÓN DE LA EXITACIÓN DEL DEVANADO DE CAMPO	
1.1. Conceptos básicos del generador síncrono.....	1
1.1.1. Campo magnético giratorio.....	3
1.1.2. Componentes del generador síncrono.....	9
1.1.3. Velocidad de rotación.....	13
1.1.4. Voltaje interno generado.....	14
1.1.5. Circuito eléctrico equivalente y diagrama fasorial...	18
1.2. Función de la excitación del devanado de campo.....	25
1.2.1. Control de voltaje en barras aisladas.....	26
1.2.2. Control de potencia activa y potencia reactiva en barras infinitas.....	30
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN	
2.1. Conceptos básicos de los sistemas de excitación rotativos.....	36
2.1.1. Sistemas de excitación rotativos sin escobillas.....	38
2.1.2. Sistemas de excitación rotativos con escobillas.....	42

2.2.	Sistemas de excitación estáticos.....	51
2.2.1.	Funcionamiento.....	52
2.2.2.	Transformador de potencia.....	54
2.2.3.	Contactador ac de desconexión del campo.....	55
2.2.4.	Activador del campo del generador.....	56
2.2.5.	Puente rectificador de potencia.....	57
2.2.6.	Transformadores de sensado.....	62
2.2.7.	Señal de paralelismo.....	62
2.2.8.	Regulador automático de voltaje.....	63
2.2.9.	Limitador de baja frecuencia.....	63
2.2.10.	Arrancador suave de voltaje.....	64
2.2.11.	Control base y circuito de encendido.....	65
2.2.12.	Fuente de alimentación regulada.....	66
3.	ASPECTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR EN EL REEMPLAZO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN ROTATIVO POR UN SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO	
3.1.	Consideraciones mecánicas.....	68
3.2.	Consideraciones eléctricas.....	69
3.2.1.	Medición de voltaje y corriente del estator... ..	69
3.2.2.	Parámetros del campo del generador.....	72
3.2.3.	Potencia para el sistema de excitación.....	73
3.2.4.	Control del sistema de excitación.....	78
3.2.5.	Modos de operación.....	79
3.2.6.	Limitadores.....	81
3.2.7.	Protecciones del sistema de excitación.....	84
3.2.8.	Tolerancia a las fallas.....	87

4.	APLICACIÓN EN UN GENERADOR DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA	
4.1.	Datos del generador.....	92
4.2.	Consideraciones mecánicas.....	93
4.3.	Consideraciones eléctricas.....	94
4.4.	Ventajas económicas.....	102
	CONCLUSIONES.....	109
	RECOMENDACIONES.....	110
	BIBLIOGRAFÍA.....	112

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Corte de un generador síncrono	2
2.	Trayectoria de flujo magnético debido a la rotación del rotor	8
3.	Forma de onda de flujo magnético y forma de onda del voltaje inducido	9
4.	Estator de una máquina síncrona	11
5.	Rotor de un generador síncrono	12
6.	Paso polar en un estator de cuatro polos	15
7.	Estator con embobinado distribuido	17
8.	Circuito equivalente del generador síncrono	22
9.	Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia unitario	23
10.	Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia en atraso	23
11.	Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia en adelanto	24
12.	Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia unitario	27
13.	Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia en atraso	28
14.	Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia en adelanto	29
15.	Diagrama fasorial de un generador sobreexcitado	32
16.	Diagrama fasorial de un generador subexcitado	33
17.	Curva de capacidad de carga	34

18.	Esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas	39
19.	Esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas auto excitado	41
20.	Esquema de un sistema de excitación rotativo con escobillas	43
21.	Fotografía de sistema de excitación rotativo conectado directamente	44
22.	Esquema de un sistema de excitación rotativo conectado directamente o <i>shunt</i>	44
23.	Fotografía de un generador síncrono conectado a una barra común de corriente directa para su excitación	47
24.	Sistema de excitación con barra común de corriente directa	47
25.	Esquema de un sistema de excitación motor generador	49
26.	Diagrama de bloques de los elementos que forman parte de un sistema de excitación estático	53
27.	Esquema de un puente rectificador de potencia de 3 SCR	57
28.	Onda de salida de un puente rectificador de 3 SCR	58
29.	Esquema de un puente rectificador de 6 SCR	59
30.	Cambio en la onda de salida de un puente rectificador de 6 SCR	59
31.	Desempeño de un puente rectificador de 6 SCR para un generador hidroeléctrico de 42 MW	60
32.	Característica voltaje / frecuencia de un limitador de baja frecuencia	64
33.	Curva producida cuando se energiza el sistema de excitación	65
34.	Medición de una fase para el sistema de excitación	71
35.	Medición con conexión delta abierta para el sistema de excitación	71
36.	Medición con un transformador por fase para el sistema de excitación	72

37.	Alimentación de un sistema de excitación por medio de una conexión en paralelo	74
38.	Esquema del transformador de alimentación para el sistema de excitación con sus protecciones	75
39.	Alimentación de un sistema de excitación por medio de la barra o línea de salida del interruptor principal del generador	76
40.	Alimentación del sistema de excitación por medio de una planta externa de potencia eléctrica	77
41.	Esquema de alimentación por medio del sistema <i>current boost</i>	78
42.	Gráfica de la operación del limitador de sobre excitación	82
43.	Gráfica de la operación del limitador de sub excitación	83
44.	Esquema de la protección de falla a tierra del campo del generador	85
45.	Esquema de retroalimentación típico	89
46.	Esquema de transferencia entre modos de operación con <i>null-meter</i>	90
47.	Esquema de transferencia automática entre modos de operación	91
48.	Fotografía del sistema de excitación estático contenido en los gabinetes tipo NEMA 1	94
49.	Fotografía del puente rectificador de 6 SCR	95
50.	Fotografía del activador del campo del generador	96
51.	Diagrama de bloques de la conexión del controlador basado en microprocesadores	97
52.	Fotografía del controlador basado en microprocesadores	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
ac	Corriente alterna
$ACP$	Ahorro en costos de operación
$A_r$	Área
B	Densidad de flujo magnético
$C_{SER}$	Capacidad en kW del sistema de de excitación rotativa
dc	Corriente directa
$DER$	Disipación de energía del reóstato en kW
$dl$	Diferencial de longitud
$\frac{d\phi}{dt}$	Flujo magnético variable
$\frac{d\theta}{dt}$	Variación de la posición angular
$e$	Voltaje inducido
$E_A$	Voltaje generado
$E_I$	Caída de voltaje por la reacción de inducido
$E_{ESTATOR}$	Voltaje en el estator
$E_R$	Caída de voltaje por la resistencia de las bobinas
$f_e$	Frecuencia eléctrica

$FMEO$	Factor de mejora en la eficiencia de operación
$h$	Horas
$H$	Intensidad de campo magnético
$HOA$	Horas de operación al año del generador
$Hz$	Hertz
$i$	Corriente de excitación
$I_A$	Corriente del inducido
$l_c$	Longitud media
$I_{net}$	Corriente neta
$K$	Constante de construcción
$K_D$	Factor de distribución
$K_p$	Factor de paso
$KV$	Kilo voltio
$KVA$	Kilo voltampere
$KW$	Kilo watt
$L_A$	Autoinductancia
$MVA$	Mega voltamperes
$n$	Velocidad mecánica
$N$	Número de vueltas del devanado de una bobina
$N_p$	Número de espiras por fase
$p$	Paso
$P$	Potencia activa
$P$	Número de polos
$Q$	Potencia reactiva

$R_A$	Resistencia de las bobinas del devanado inducido
RPM	Revoluciones por minuto
S	Potencia aparente
VA	Voltamperes
Vac	Voltaje de corriente alterna
Vdc	Voltaje de corriente directa
$VE$	Valor de la energía en \$/kWh
$V\phi$	Voltaje de fase
X	Reactancia
$X_A$	Reactancia asociada a la autoinductancia
$X_s$	Reactancia asociada con la la reacción del inducido
$\phi$	Flujo magnético
$\mu$	Permeabilidad
$\omega$	Velocidad angular
$\theta$	Ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje
$\gamma$	Espacio en grados entre cada ranura del estator
\$	Dólares
%	Porcentaje

## GLOSARIO

**Anillos deslizantes** Piezas metálicas en forma de anillo que envuelven completamente al eje del generador, pero se encuentran aislados de él, están conectados a la bobina del rotor del generador y hacen contacto eléctrico con las escobillas. Su función es alimentar con potencia eléctrica proveniente de las escobillas, a la bobina del rotor no importando la posición angular del eje del generador.

**Armónicas** Ondas de voltaje o corriente cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia de la onda fundamental. Las cargas no lineales conectadas a un sistema eléctrico generan armónicas resultando en la distorsión de la onda de voltaje resultante.

**Autoinductancia** Inducción de la propia corriente sobre sí misma, cuando en una bobina circula corriente alterna se induce un campo magnético que a su vez induce un voltaje, el voltaje inducido provoca que una componente de corriente adicional a la corriente original circule en la bobina.

**Barra aislada** Barra que no está conectada a un sistema de potencia, por lo tanto, su voltaje y frecuencia son las mismas del generador que le suministran potencia eléctrica.

<b>Barra infinita</b>	Barra conectada a un sistema de potencia, por lo tanto, su voltaje y frecuencia son constantes e iguales a las del sistema de potencia.
<b>Bobina</b>	Elemento formado por un núcleo forrado con un devanado de varias vueltas de alambre de cobre, en la mayor parte de los casos el núcleo es de un material ferromagnético. Introduce inductancia en un circuito eléctrico.
<b>Campo magnético</b>	Fuerza producida por unidad de polo magnético en un espacio determinado. Puede ser generado por un imán permanente o por una corriente variable que fluye en un conductor eléctrico. Su dimensional es el ampere por metro (A/m).
<b>Carga</b>	Demanda de potencia eléctrica para un sistema de potencia o generador.
<b>Conductor</b>	Material que en su estructura molecular tiene varios electrones libres que facilitan la circulación de corriente cuando se le aplica un voltaje.
<b>Conexión en paralelo</b>	Conexión en la que dos elementos tienen dos puntos en común, por lo que el voltaje en ambos elementos es el mismo.
<b>Conmutador</b>	Dispositivo electromecánico que tiene como función convertir los voltajes y las corrientes alternas en voltajes y corrientes continuas.

<b>Constante de tiempo</b>	Retraso introducido en la respuesta de un generador consecuencia del control de la corriente de excitación del generador principal y del sistema de excitación rotativo.
<b>Contactador</b>	Interruptor eléctrico para baja tensión utilizado principalmente para control, tiene un mecanismo electromecánico que permite que opere respondiendo a señales de corriente.
<b>Contacto normalmente abierto</b>	Contacto eléctrico que en condiciones normales de operación está abierto, cuando se le aplica una determinada señal, se cierra.
<b>Contacto normalmente cerrado</b>	Contacto eléctrico que en condiciones normales de operación está cerrado, cuando se le aplica una determinada señal, se abre.
<b>Corriente</b>	Rapidez con la que la carga eléctrica se transfiere a través de un conductor. Su dimensional es el ampere (A).
<b>Corriente alterna</b>	Corriente cuya forma de onda cambia entre dos niveles prescritos, fluye cíclicamente de un nivel positivo a un nivel negativo.
<b>Corriente de excitación</b>	Corriente directa aplicada al devanado de campo de un generador síncrono para inducir un campo magnético.

<b>Corriente directa</b>	Corriente que fluye en una sola dirección, su forma de onda puede ser una línea recta o una onda pulsante que siempre se mantiene en un nivel positivo.
<b>Curva de capacidad de carga</b>	Gráfica en donde se muestra el comportamiento de un generador síncrono operando con diferentes factores de potencia, así como sus límites de operación en cada condición.
<b>Delta abierta</b>	Conexión de dos transformadores que permite que la carga pueda tomar potencia trifásica, la capacidad de carga de esta conexión es el 57.7% de la de una conexión delta.
<b>Devanado</b>	Parte de la bobina que envuelve al núcleo, está formado por varias espiras.
<b>Devanado de campo</b>	Devanado al que se le aplica la corriente de excitación para inducir el campo magnético necesario para la conversión de energía en un generador síncrono, generalmente se encuentra en el rotor.
<b>Devanado inducido</b>	Devanado en el que se induce el voltaje eléctrico, generalmente se encuentra en el estator del generador síncrono.
<b>Diagrama fasorial</b>	Representación instantánea en un plano bidimensional de uno o varios fasores.

<b>Diodo</b>	Dispositivo semiconductor formado por una unión pn, su función es permitir el flujo de corriente en una sola dirección.
<b>Dispositivo de estado sólido</b>	Dispositivo formado por elementos semiconductores, por lo que basa su funcionamiento en la física de estado sólido de los materiales semiconductores.
<b>Entrehierro</b>	Espacio existente entre el rotor y el estator de un generador síncrono.
<b>Escobilla</b>	Dispositivo destinado a mantener contacto eléctrico por frotación con los anillos deslizantes del generador. Se conecta a una fuente de potencia eléctrica para que por medio de los anillos deslizantes se alimente el devanado de campo, no importando la posición angular del rotor.
<b>Espira</b>	Pieza de cobre o vuelta de alambre de cobre que en conjunto forma el devanado de una bobina.
<b>Estator</b>	Parte del generador síncrono que se encuentra en su carcasa, está formado por varias ranuras diseñadas para alojar al devanado inducido.
<b>Factor de potencia</b>	Razón de la potencia activa a la potencia reactiva. Se puede expresar como el coseno del ángulo entre la potencia activa y la potencia reactiva.

<b>Fasor</b>	Radio de un vector giratorio representado en un plano bidimensional con un extremo fijo en el origen.
<b>Ferromagnético</b>	Material con una permeabilidad muy alta que le permite una fácil magnetización.
<b>Flujo magnético</b>	Líneas de campo magnético que pasan a través de un área determinada, su dimensional es el weber (Wb).
<b>Flujo de dispersión</b>	Flujo magnético presente entre las espiras de un devanado producto de la circulación de corriente en él.
<b>Frecuencia eléctrica</b>	Ciclos por segundo de una onda de voltaje o corriente. Su dimensional es el Hertz (Hz).
<b>Generador</b>	Máquina eléctrica que convierte energía mecánica en energía eléctrica.
<b>Generador síncrono</b>	Generador cuyo voltaje de salida tiene su frecuencia eléctrica sincronizada con la velocidad mecánica de rotación de su eje.
<b>Impedancia</b>	Magnitud que representa a una carga eléctrica. Es un número complejo cuya parte real es la resistencia y cuya parte imaginaria es la reactancia. Su dimensional es el ohmio ( $\Omega$ ).
<b>Interruptor</b>	Dispositivo diseñado para abrir un circuito eléctrico bajo condiciones de carga.

<b>Máquina eléctrica</b>	Artefacto que convierte energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica.
<b>Nivel básico al impulso</b>	Potencia eléctrica de aislamiento expresada en términos de valores de cresta de un valor estándar de impulso por descarga electro atmosférica o por maniobra.
<b>Onda senoidal</b>	Forma de onda semejante a la función trigonométrica seno.
<b>Par mecánico</b>	Producto de la fuerza aplicada a un objeto y la distancia más corta entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del objeto. Su dimensional es el newton por metro (Nm).
<b>Permeabilidad</b>	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/Am).
<b>Potencia activa</b>	Componente real de la potencia aparente, al ser absorbida por una carga puede efectuar trabajo. Su dimensional es el watt (W).
<b>Potencia alterna</b>	Potencia eléctrica cuya forma de onda cambia entre dos niveles prescritos, fluye cíclicamente de un nivel positivo a un nivel negativo.

- Potencia aparente** Potencia alterna 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 directa** Potencia eléctrica que fluye en una sola dirección, su forma de onda puede ser una línea recta o una onda pulsante que siempre se mantiene en un nivel positivo.
- Potencia eléctrica** Capacidad de conversión de la energía eléctrica en otra forma como energía mecánica, calor o luz. Su dimensional es el watt (W).
- Potencia mecánica** Capacidad de conversión de la energía mecánica en otra forma, como trabajo mecánico, energía eléctrica o calor. Su dimensional es el caballo de fuerza (hp).
- Potencia reactiva** Componente imaginaria de la potencia aparente, es el flujo de energía que en forma alternada va hacia la carga y regresa de ella. Su dimensional es el voltampere reactivo (VAR).
- Primotor** Fuente de potencia mecánica para la rotación del eje de un generador.

<b>Reactancia</b>	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 ( $\Omega$ ).
<b>Reactancia capacitiva</b>	Reactancia que resulta en el adelanto de la corriente respecto al voltaje en un circuito eléctrico. Es inverso del producto de la capacitancia con la frecuencia eléctrica.
<b>Reactancia inductiva</b>	Reactancia que resulta en el atraso de la corriente respecto al voltaje en un circuito eléctrico. Es producto de la inductancia con la frecuencia eléctrica.
<b>Rectificador</b>	Dispositivo que convierte corriente alterna en corriente directa.
<b>Relevador</b>	Dispositivo utilizado en esquemas de protección y en esquemas de control, tiene como función modificar las condiciones de operación de un circuito eléctrico mediante la respuesta a una señal externa o del mismo circuito.
<b>Reóstato</b>	Elemento cuya resistencia en terminales puede variarse en forma lineal o no lineal.
<b>Resistencia</b>	Medida de la oposición al flujo de carga a través de un material, su dimensional es el ohmio ( $\Omega$ ).

<b>Retroalimentación</b>	Señal que tiene como propósito la reducción del error entre la entrada de referencia de un sistema de control y su salida.
<b>Rotor</b>	Elemento del generador síncrono ubicado en su eje, contiene al devanado de campo. Como su nombre lo indica es la parte de la máquina que rota.
<b>SCR</b>	Dispositivo semiconductor de tres terminales cuyas siglas en inglés significan rectificador controlado de silicio. Su función es conducir corriente en una sola dirección siempre y cuando el voltaje que se le aplique sea mayor a su voltaje de umbral, su voltaje de umbral se controla con la corriente que ingresa en una de sus terminales llamada compuerta.
<b>Semiconductor</b>	Material que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo del campo eléctrico en el que se encuentre. Los materiales semiconductores más comunes son el silicio y el germanio, si se les añade impurezas se modifica la cantidad de electrones y huecos de su estructura molecular, si hay más electrones el material se denomina tipo n y si hay más huecos el material se denomina tipo p.
<b>Sistema de excitación</b>	Conjunto de elementos cuya función es suministrar y controlar la corriente directa que circula en el devanado de campo de un generador síncrono.

<b>Sistema de potencia</b>	Red de generación y transmisión de potencia eléctrica formada por la interconexión de líneas de transmisión, subestaciones, plantas de generación y centros de carga.
<b>Sobreexcitación</b>	Condición en la que un generador síncrono produce potencia activa y potencia reactiva positiva en proporción a la magnitud de la corriente de excitación.
<b>Subexcitación</b>	Condición en la que un generador síncrono produce potencia activa y potencia reactiva negativa en proporción a la magnitud de la corriente de excitación.
<b>Tap</b>	Dispositivo que forma parte de un transformador, su función es cambiar la relación de transformación para modificar la magnitud del voltaje en el lado del primario o en el lado del secundario del transformador.
<b>Tierra</b>	Potencial eléctrico cero con respecto al cual se miden todos los voltajes.
<b>Transformador</b>	Artefacto que mediante la acción de un campo magnético, cambia la energía eléctrica alterna de un nivel de voltaje a energía eléctrica alterna de otro nivel de voltaje.
<b>Transformador de corriente</b>	Transformador diseñado para reducir magnitudes altas de corriente a magnitudes con las que pueden ser alimentados directamente instrumentos de medición o protección.

<b>Transformador de voltaje</b>	Transformador diseñado para reducir magnitudes altas de voltaje a magnitudes con las que pueden ser alimentados directamente instrumentos de medición o protección.
<b>Transiente</b>	Pico de voltaje de gran magnitud producto de una descarga electroatmosférica o de un disturbio en la red eléctrica.
<b>Voltaje</b>	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, su dimensional es el voltio (V). El potencial eléctrico es la capacidad de trabajo por unidad de carga.
<b>Voltaje nominal</b>	Magnitud de voltaje de diseño para la operación de un dispositivo o artefacto eléctrico o electrónico.

## RESUMEN

El presente trabajo consta de cuatro capítulos. En el primer capítulo se exponen los conceptos básicos del generador síncrono y 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. Los conceptos básicos tratados son: campo magnético giratorio, componentes del generador síncrono, velocidad de rotación, voltaje interno generado, diagrama fasorial y circuito equivalente.

El segundo capítulo trata sobre sistemas de excitación rotativos y sistemas de excitación estáticos. Se hace una descripción general de los sistemas de excitación rotativos sin escobillas, se exponen los principios de funcionamiento de los diferentes tipos de sistemas de excitación rotativos con escobillas que se pueden encontrar en operación actualmente. Para los sistemas de excitación estáticos se hace una descripción general de su funcionamiento y se analiza cada uno de sus componentes.

En el tercer capítulo se exponen las consideraciones a tomar en cuenta cuando se sustituye un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático. Se hace referencia a las consideraciones mecánicas para proteger al sistema de excitación estático de factores ambientales. Se analizan las consideraciones eléctricas para su instalación, características y modo de operación.

En el cuarto capítulo se aplican las consideraciones expuestas en el tercer capítulo para el caso de un generador del sistema nacional interconectado de Guatemala. Incluye un análisis de las ventajas económicas que implica la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático.

## **OBJETIVOS**

- **General**

Plantear las consideraciones para la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático en generadores síncronos.

- **Específicos**

1. Exponer los conceptos básicos del generador síncrono para entender el papel que juega la excitación del devanado de campo en su funcionamiento.
2. Exponer los conceptos generales de los sistemas de excitación rotativos más comunes y el funcionamiento de los sistemas de excitación estáticos con sus componentes.
3. Exponer las consideraciones técnicas para el reemplazo de sistemas de excitación rotativos por sistemas de excitación estáticos en generadores síncronos.
4. Aplicar las consideraciones del objetivo anterior para el caso de un generador del sistema nacional interconectado de Guatemala y analizar las ventajas económicas que se obtienen con la sustitución.

## **HIPÓTESIS**

La sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático en un generador síncrono con anillos de rozamiento y escobillas es una buena alternativa para mejorar su funcionamiento.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que en los últimos años ha tomado la continuidad del servicio eléctrico y la calidad de la energía que se suministra, los sistemas de potencia modernos requieren de generadores que respondan lo más rápido posible ante los diferentes eventos que constantemente ocurren en un sistema de potencia. Adicionalmente el costo de la producción de energía eléctrica se ha incrementado, por lo tanto se ha vuelto indispensable mejorar la eficiencia en el funcionamiento de los generadores.

En un generador síncrono el voltaje de salida y la potencia reactiva generada se controlan por medio de la corriente que alimenta su devanado de campo, llamada corriente de excitación. Por lo tanto, es de suma importancia que cuando se suscite un evento en el sistema de potencia, la corriente de excitación varíe su magnitud lo más rápido posible para mantener la salida del generador constante.

La corriente de excitación es suministrada por el sistema de excitación del generador. Existen dos tipos de sistemas de excitación, sistemas de excitación rotativos y sistemas de excitación estáticos.

Los sistemas de excitación rotativos son generadores que rectifican su salida para proporcionar la corriente de excitación. Hay dos tipos de sistemas de excitación rotativos, los que utilizan escobillas y anillos deslizantes y los que no los utilizan.

Los sistemas de excitación estáticos se basan en dispositivos de estado sólido y electrónica de potencia, requieren de escobillas y anillos deslizantes para su funcionamiento.

En la actualidad la mayor parte de generadores síncronos utilizan sistemas de excitación rotativos. Debido a que los sistemas de excitación rotativos básicamente son generadores, para variar la corriente de excitación del generador principal es necesario variar la corriente de excitación propia del sistema de excitación rotativo, por lo tanto, la respuesta del generador principal es lenta. Adicionalmente, los sistemas de excitación rotativos tienen asociadas las mismas pérdidas que una máquina rotativa común, por lo que se disminuye la eficiencia del sistema de generación.

Debido a que el funcionamiento de los sistemas de excitación estáticos se basa en dispositivos de estado sólido y electrónica de potencia, el control de la corriente de excitación del generador es casi instantáneo. Además la eficiencia del sistema mejora sustancialmente ya que los sistemas de excitación estáticos no tienen asociadas las pérdidas de una máquina rotativa. Por lo anterior, la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático, es una buena alternativa para mejorar el funcionamiento y la eficiencia de un generador síncrono.

El presente trabajo contiene los fundamentos para comprender el papel que juega el sistema de excitación en el comportamiento de un generador síncrono, la descripción del funcionamiento y características de los sistemas de excitación rotativos y estáticos, las consideraciones a tomar en cuenta para la sustitución de un sistema de excitación rotativo por uno estático y un caso práctico que incluye un análisis de las ventajas económicas que se obtienen con la utilización de un sistema de excitación estático.

# 1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL GENERADOR SÍNCRONO Y FUNCIÓN DE LA EXCITACIÓN DEL DEVANADO DE CAMPO

## 1.1. Conceptos básicos del generador síncrono

Un generador síncrono es una máquina eléctrica que convierte energía mecánica en energía eléctrica, el nombre de síncrono se debe a que su frecuencia eléctrica está sincronizada a su velocidad mecánica de rotación.

El principio de conversión de energía utilizado por el generador síncrono está basado en la Ley de Inducción Eléctrica de Faraday, esta ley establece que si un conductor es movido a través de un campo magnético se induce un voltaje eléctrico en el conductor, o bien, el voltaje eléctrico puede ser inducido 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 1. Ley de Faraday

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

En donde:

e es el voltaje inducido en la bobina

N el número de vueltas de la bobina

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

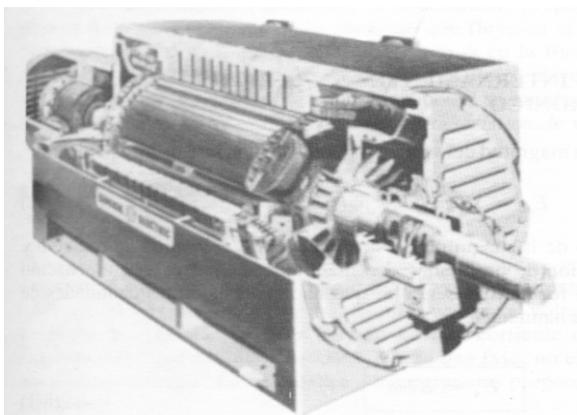
En el caso del generador síncrono el voltaje es inducido mediante un campo magnético variante en el tiempo.

El generador síncrono consta de dos partes principales: el rotor y el estator. El rotor se encuentra en el eje del generador y cumple el papel de un electroimán generando un campo magnético, este campo magnético es consecuencia de un flujo de corriente directa que circula en él debido al suministro de potencia continua por medio de un sistema de excitación. La necesidad de que una fuente externa proporcione potencia directa al devanado del rotor es una característica propia de los generadores síncronos.

La potencia mecánica es aplicada al eje del generador por medio de un primotor, consecuentemente el rotor gira convirtiendo a su campo magnético en un campo magnético giratorio, cuya densidad de flujo varía en el tiempo a razón de la velocidad angular del rotor induciendo un voltaje senoidal en la bobina del estator.

El estator ubicado en la carcasa del generador, tiene un sistema de devanados trifásicos en los cuales se induce el voltaje que será aprovechado para el suministro de energía eléctrica. A continuación se muestra el corte de un generador síncrono.

**Figura 1. Corte de un generador síncrono**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 447.

Los generadores síncronos pueden operar conectados a una barra aislada, o conectados a una barra infinita de un sistema de potencia operando en paralelo con otros generadores.

Cuando el generador síncrono opera conectado a una barra aislada, el voltaje en la barra estará definido por el voltaje en los terminales del generador, este voltaje se puede controlar mediante la variación de la corriente de excitación del devanado de campo.

Cuando opera en paralelo con otros generadores conectado a una barra infinita el voltaje en sus terminales estará definido por el voltaje en la barra. En esta condición de operación variando la corriente de excitación del devanado de campo, lo que se controla es la potencia reactiva que el generador suministra o absorbe del sistema.

La razón principal por la cual el generador síncrono es preferentemente utilizado para la generación de energía eléctrica, es la facilidad que se tiene para el control de su frecuencia eléctrica, el voltaje en sus terminales y la potencia que suministra al sistema.

### **1.1.1. Campo magnético giratorio**

Según la Ley de Faraday un campo magnético que varía en el tiempo produce líneas de flujo que inducen un voltaje eléctrico en un conductor, por lo tanto si un campo magnético se hace girar a una velocidad angular constante inducirá un voltaje eléctrico en un conductor. En un generador síncrono el campo magnético debe estar presente en el rotor, ya que éste es la parte del generador que se encuentra montada en el eje, que es en donde se aplicará la potencia mecánica o par motor.

Para que exista un campo magnético en el rotor que pueda girar es necesario que éste tenga un devanado, este devanado se denomina devanado de campo ya que es el responsable de la formación del campo magnético que inducirá el voltaje. El voltaje será inducido en un devanado ubicado en el estator del generador llamado devanado inducido.

El campo magnético formado en el devanado de campo del rotor es originado por la aplicación de potencia eléctrica continua por medio de una fuente externa al generador que se denomina sistema de excitación.

El principio de la formación de un campo magnético a partir de la circulación de flujo de corriente continua en un conductor está dado por la Ley de Ampere. La Ley de Ampere establece que la intensidad de flujo magnético en una superficie cerrada es igual a la corriente continua que fluye a través de la superficie.

Fórmula 2. Ley de Ampere

$$\oint H \cdot dl = I_{net}$$

En donde:

$H$  es la intensidad de flujo magnético

$dl$  es el diferencial de longitud del recorrido de la superficie cerrada

$I_{net}$  es la corriente que fluye a través de la superficie

El núcleo del devanado de campo del rotor está fabricado de un material ferromagnético, consecuentemente el campo magnético producido por la corriente suministrada por el sistema de excitación permanecerá en su interior, en forma de magnetismo remanente o residual. Debido a esto el recorrido de la integración en la Ley de Ampere es la longitud media del recorrido que hace la corriente de excitación en el núcleo  $l_c$ .

Ya que el objetivo de la presente sección es formar una idea general de la relación entre corriente de excitación y el campo magnético giratorio, se despreciarán los fenómenos que pudieran distorsionar el campo magnético producido en el rotor y el voltaje inducido en el estator.

El devanado de campo está formado por un sistema de bobinas de  $N$  vueltas, por lo que la corriente que fluye a través de él  $I_{net}$  es igual a  $Ni$ , en donde  $i$  es la corriente de excitación suministrada al devanado de campo por el sistema de excitación del generador.

Por lo tanto, la intensidad del campo magnético producido por la corriente de excitación del devanado de campo se expresa por la siguiente relación.

Fórmula 3. Campo magnético en el rotor

$$H = \frac{Ni}{l_c}$$

En donde:

$H$  es la intensidad de campo magnético en el rotor

$N$  es el número de vueltas del embobinado del devanado de campo

$i$  es la corriente de excitación

$l_c$  es la longitud media del núcleo del devanado del rotor

La intensidad del campo magnético en el rotor produce que su flujo atraviese el entrehierro o espacio de aire que hay entre el devanado de campo en el rotor y el devanado de inducido en el estator. El próximo paso será encontrar la relación entre el flujo producido por el campo magnético en el rotor y la corriente de excitación.

Como primera instancia se expone la relación existente entre la densidad de flujo magnético  $B$  y la intensidad de campo magnético  $H$ .

Fórmula 4. Densidad de flujo magnético

$$B = \mu H$$

Donde:

$H$  es la intensidad del campo magnético del rotor

$\mu$  es la permeabilidad del material del núcleo del devanado de campo

$B$  es la densidad de flujo magnético del rotor

Sustituyendo la intensidad de campo magnético  $H$  en la Fórmula 4 por la expresión de la Fórmula 3, se obtiene la densidad de flujo magnético en función de la corriente de excitación.

Fórmula 5. Densidad de flujo magnético en función de la corriente de excitación

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c}$$

En donde:

$B$  es la densidad de flujo magnético

$\mu$  es la permeabilidad del material del núcleo del devanado de campo

$N$  es el número de vueltas del embobinado del devanado de campo

$i$  es la corriente de excitación

$l_c$  es la longitud media del núcleo del rotor

Por otro lado se sabe que el flujo magnético  $\phi$  que hay en un área cerrada  $A$ , es igual a la densidad de flujo magnético  $B$  multiplicado por el área cerrada  $A$ . Esto se expresa a continuación.

Fórmula 6. Densidad de flujo magnético

$$\phi = B \cdot A$$

En donde:

$\phi$  es el flujo magnético inducido en el devanado de campo

$B$  es la densidad de flujo magnético

$A$  es el área del núcleo del devanado de campo

Mediante la sustitución de la densidad de flujo magnético  $B$  presente en la fórmula 6 por lo expresado en la fórmula 5, se obtiene la expresión final que relaciona el flujo magnético del devanado de campo y la corriente de excitación.

Fórmula 7. Relación entre el flujo magnético y la corriente de excitación

$$\phi = BA = \frac{\mu Ni A}{l_c}$$

En donde:

$\phi$  es el flujo magnético

$\mu$  es la permeabilidad del material del devanado de campo

$N$  es el número de vueltas del embobinado del devanado de campo

$i$  es la corriente de excitación

$A$  es el área del núcleo del devanado de campo

$l_c$  es la longitud media del núcleo del rotor

Ya que se conoce la relación entre la corriente de excitación y el flujo magnético producido se procederá a analizar su comportamiento cuando el rotor gira.

El rotor gira a una velocidad angular constante  $\omega$  impulsado por la fuente de energía mecánica que está acoplada a su eje. Como resultado de la rotación del rotor, el campo magnético del devanado de campo, se convierte en un campo magnético giratorio.

Las líneas de flujo magnético producto de la intensidad del campo magnético giratorio del devanado de campo, se desplazan sobre la superficie del entrehierro pasando al devanado inducido en el estator. El devanado del inducido es barrido por estas líneas de flujo magnético que cambian su posición angular en el tiempo a razón de la siguiente expresión.

Fórmula 8. Razón de cambio de la posición angular del flujo magnético

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

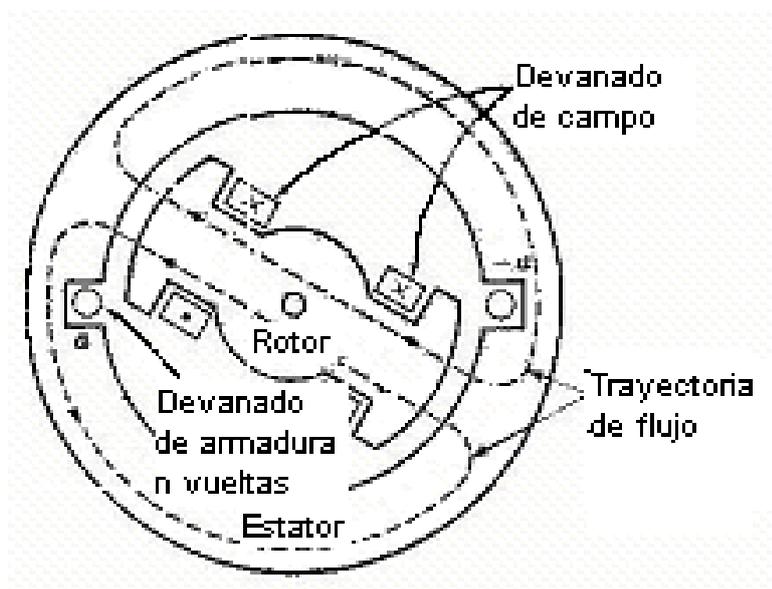
En donde:

$\omega$  es la velocidad angular de rotación del rotor en Rad/seg

$\frac{d\theta}{dt}$  es la variación de posición angular en el tiempo del flujo magnético

En la figura 2, se representa un generador síncrono con un devanado inducido o devanado de armadura que tiene una sola bobina de N vueltas, los lados de la bobina son  $a$  y  $-a$ , éstos están diametralmente opuestos en las ranuras presentes en el estator. Las líneas punteadas representan la trayectoria que seguirá el flujo magnético, como consecuencia de la rotación del rotor.

**Figura 2. Trayectoria de flujo magnético debido a la rotación del rotor**



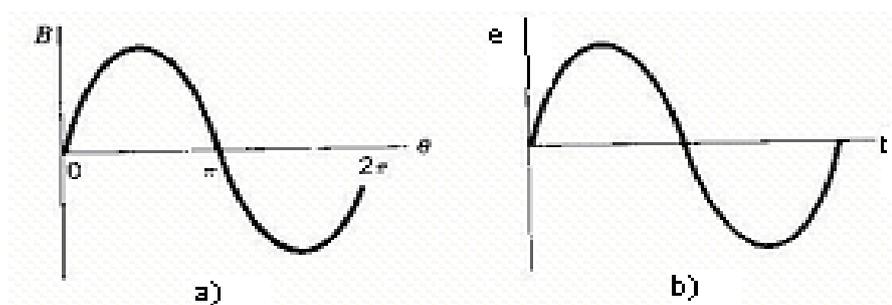
Fuente: A. E. Fitzgerald. **Máquinas eléctricas**. Página 167.

La variación del flujo magnético en el tiempo producto de la rotación del rotor forma una onda de densidad de flujo magnético  $B$  que se puede aproximar a una onda senoidal.

El voltaje resultante en el devanado inducido es una función variable en el tiempo que tiene la misma forma de onda que la de la densidad de flujo magnético  $B$ .

En la siguiente figura se ilustra la forma de onda producida por la distribución espacial de la densidad del flujo magnético y la forma de onda del voltaje generado en el devanado inducido.

**Figura 3. a) forma de onda de flujo magnético**  
**b) forma de onda del voltaje inducido**



Fuente: A. E. Fitzgerald. **Máquinas eléctricas**. Página 167.

Como el voltaje generado en el devanado inducido varía siguiendo la distribución angular de la onda de densidad de flujo magnético  $B$  generada por la rotación del rotor, éste completará un ciclo por cada revolución completada por el rotor. Debido a esto es que la frecuencia eléctrica producida por un generador síncrono está atada o sincronizada a la velocidad mecánica de rotación.

### **1.1.2. Componentes del generador síncrono**

Un generador síncrono está formado básicamente de dos partes principales que son el estator y el rotor, el estator está en la carcasa y el rotor en el eje.

Cuenta con otros componentes que complementan su funcionamiento, entre éstos está el sistema de excitación, los anillos deslizantes y las escobillas.

El estator se encuentra en la carcasa o bastidor principal, la carcasa es el cimiento de la máquina y sostiene a los demás componentes. El estator está formado por ranuras de hierro, que son capas delgadas de hierro o acero unidas entre sí que tienen como función sostener a las bobinas del estator.

Las ranuras de hierro están diseñadas para producir un campo magnético concentrado, además por ser capas delgadas unidas entre sí forman una laminación que tiene como propósito evitar la formación de corrientes parásitas en el estator.

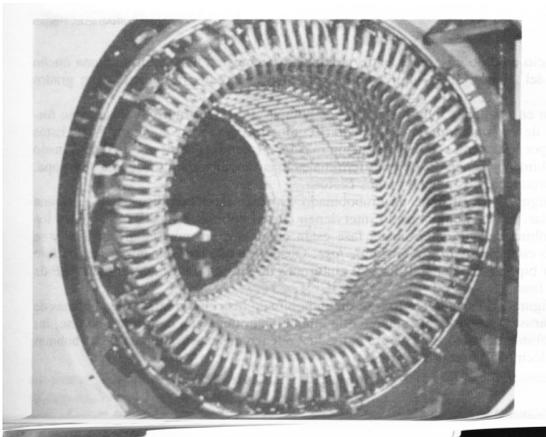
Las bobinas del estator están en el interior de ranuras de hierro, y son las que conforman el devanado inducido. Las bobinas están formadas de una gran cantidad de espiras en serie, con el arreglo en serie de las espiras se consigue un voltaje que puede ser utilizado para fines prácticos, ya que el voltaje inducido en cada espira individual es muy pequeño.

Las ranuras de hierro se encuentran separadas de manera equidistante una de la otra, por lo que el espacio físico entre cada bobina se puede medir en grados mecánicos o en grados eléctricos.

Los lados de la bobina de una determinada fase se encuentran ubicados en ranuras de hierro adyacentes y se les da el nombre de cinturón de fase o grupo de fase.

En general, el número de cinturones de fase de un estator se obtiene multiplicando el número de polos que el estator tiene, por tres. En la siguiente figura se puede observar un estator y sus bobinas alojadas en las ranuras de hierro.

**Figura 4. Estator de una máquina síncrona**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 425.

El rotor se encuentra ubicado en el eje del generador síncrono, contiene un embobinado trifásico generalmente conectado en estrella, este embobinado está conectado a los anillos rozantes.

El embobinado del rotor forma el devanado de campo del generador síncrono, el devanado de campo es el responsable de la formación del campo magnético necesario para la conversión de energía efectuada por la máquina. Este campo es producido por la inyección de corriente continua al devanado de campo. De allí la denominación de esta corriente como corriente de campo inductor o corriente de excitación.

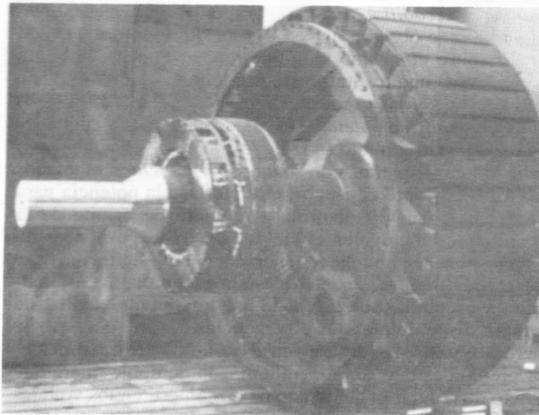
Hay dos tipos de rotores, rotores de polos salientes y rotores cilíndricos.

Los rotores de polos salientes son generalmente utilizados en generadores cuyos ejes se mueven a velocidades relativamente bajas, como en el caso de los generadores hidroeléctricos. La razón obedece a que este tipo de rotor puede contener varios polos, que debido a la baja velocidad de operación serán necesarios para obtener la frecuencia eléctrica deseada.

Los rotores cilíndricos, por lo general, tienen únicamente dos o cuatro polos, por lo que son adecuados en generadores que operan a velocidades relativamente altas como en el caso de los generadores con turbinas de gas o vapor.

El rotor básicamente cumple la función de un gran electroimán que genera un campo magnético a partir de la inyección de corriente continua a su devanado. Cuando el rotor gira forma un campo magnético giratorio, cuyas líneas de flujo inducen un voltaje en el devanado de inducido en el estator. La frecuencia del voltaje inducido está sincronizada con la velocidad mecánica de la rotación del rotor. En la siguiente figura se puede observar el rotor de un generador síncrono.

**Figura 5. Rotor de un generador síncrono**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 425.

Para inyectar la corriente de excitación es necesario suministrar potencia continua al devanado de campo. Esta potencia continua es suministrada por una fuente de potencia auxiliar llamada sistema de excitación.

Debido a que el devanado de campo gira junto con el rotor, para que el sistema de excitación pueda suministrar la potencia continua requerida, es necesario recurrir a los anillos deslizantes y a las escobillas.

Los anillos deslizantes son anillos metálicos que envuelven completamente al eje de la máquina, pero se encuentran aislados de él. Cada extremo del embobinado del devanado de campo se encuentra conectado a cada anillo deslizante, y sobre cada anillo deslizante hay montado un sistema o juego de escobillas.

Gracias al sistema de anillos deslizantes y escobillas se puede alimentar potencia continua al devanado de campo no importando la posición angular del eje. Esto se debe a que siempre hay contacto eléctrico entre las escobillas y la salida del sistema de excitación, si el extremo positivo de la salida del sistema de excitación se conecta a una escobilla el extremo negativo se conectará a la otra, existiendo siempre suministro de potencia continua al devanado de campo.

### **1.1.3. Velocidad de rotación**

El generador síncrono tiene este nombre debido a que su frecuencia eléctrica está sincronizada con la velocidad mecánica de rotación de su eje. Esto es consecuencia de que el campo magnético del rotor produce líneas de flujo que varían en el tiempo a razón de la velocidad angular de rotación del eje, e inducen una onda de voltaje en el devanado de inducido que varía su posición angular en el tiempo de acuerdo a la variación de las líneas de flujo.

La velocidad mecánica de rotación del rotor se relaciona con la frecuencia eléctrica del voltaje inducido por medio de la siguiente fórmula:

Fórmula 9. Relación entre velocidad mecánica y frecuencia eléctrica

$$f_e = \frac{nP}{120}$$

En donde:

$f_e$  es la frecuencia eléctrica Hz

$n$  es la velocidad mecánica de rotación del rotor rad/seg

$P$  es el número de polos del rotor

Debido a que la frecuencia eléctrica requerida por los sistemas de potencia debe ser constante, la velocidad de rotación también debe serlo para no variarla, consecuentemente la frecuencia eléctrica queda en función del número de polos del rotor. Esto quiere decir, por ejemplo, que si un generador gira a 3,600 rpm debe tener dos polos para generar a 60 Hz.

#### **1.1.4. Voltaje interno generado**

El voltaje inducido en un generador síncrono está en función de la velocidad de rotación del rotor y del flujo magnético generado por el devanado de campo. Esto se observa en la siguiente fórmula.

Fórmula 10. Voltaje interno generado

$$E_A = K\phi\omega$$

En donde:

$E_A$  es el voltaje generado en V

$K$  es una constante que representa la construcción de la máquina

$\phi$  es el flujo magnético en Wb

$\omega$  es la velocidad de rotación en rad/seg

La constante  $K$  es diferente para cada máquina y se llama constante de construcción. Para enunciar una expresión para  $K$  es necesario exponer brevemente las constantes que la conforman.

La primera constante que conforma a  $K$  es  $K_p$  que es el factor de paso. El paso de una máquina se define como la distancia angular entre dos polos adyacentes, se puede expresar en grados mecánicos dividiendo 360 dentro del número de polos de la máquina. La constante de paso se expresa de la siguiente manera.

Fórmula 11. Factor de paso

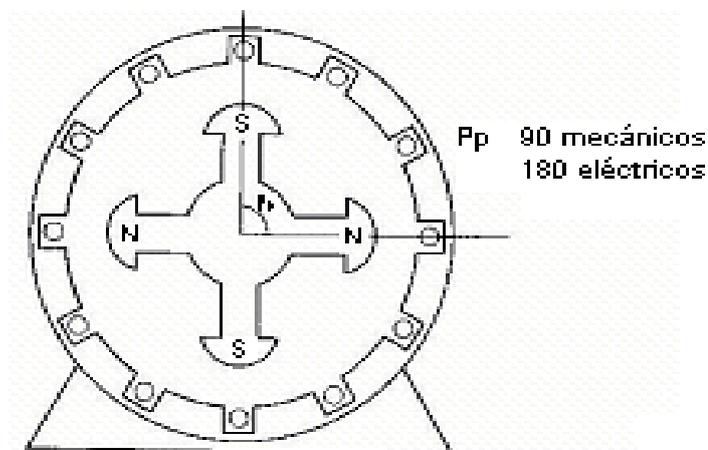
$$k_p = \text{sen} \frac{P}{2}$$

En donde:

$P$  es el paso de la máquina

En la siguiente figura se puede observar un generador de cuatro polos cuyo paso polar es de 90 grados mecánicos o 180 grados eléctricos. Según la fórmula 11 la constante de paso  $K_p$  para este estator es 0.7.

**Figura 6. Paso polar en un estator de cuatro polos**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 416.

Hay otra constante que forma parte de la constante de construcción  $K$ , ésta es llamada factor de amplitud o factor de distribución  $K_D$ . El factor de distribución se define como la razón entre el voltaje real en una fase de un embobinado distribuido y su valor esperado en un embobinado concentrado con igual número de espiras.

La diferencia entre el voltaje en un embobinado distribuido y el voltaje en un embobinado concentrado se debe a que las bobinas que conforman las fases en un embobinado distribuido se encuentran a diferentes ángulos, por lo que el voltaje es levemente menor al que habría en un embobinado concentrado.

La mayor parte de los generadores usan estatores con embobinados distribuidos, ya que se logra una mayor eficiencia en la utilización de la superficie interior del estator, además se proporciona mayor resistencia estructural ya que las piezas polares pueden ser más pequeñas. La expresión para  $K_D$  es.

Fórmula 12. Factor de distribución

$$K_D = \frac{\text{sen}(n\gamma/2)}{n\text{sen}(\gamma/2)}$$

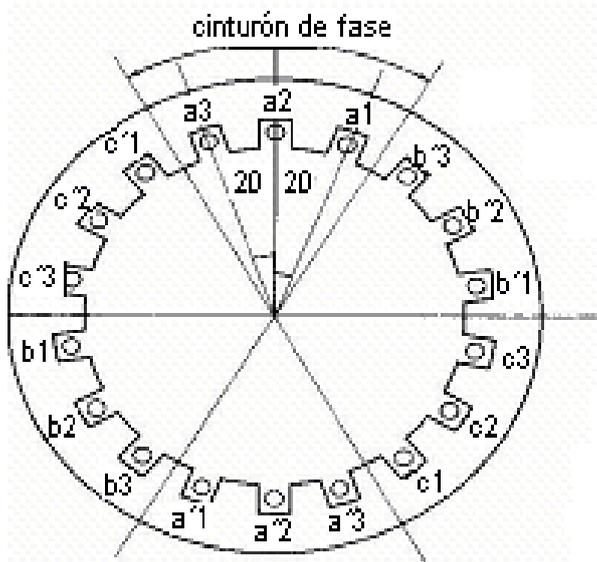
En donde:

$n$  es el número de piezas polares por cinturón de fase

$\gamma$  es el espacio en grados entre cada ranura

En la siguiente figura se puede observar el esquema de un estator con un embobinado distribuido de tres polos, el cinturón de fase de este estator está formado por tres piezas polares separadas 20 grados. Según la expresión de la fórmula 12 el factor de distribución  $K_D$  para este estator es 0.96.

**Figura 7. Estator con embobinado distribuido**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 428.

La última constante que interviene en la formación de  $K$  es  $N_p$ , que es el número total de espiras que hay por fase. La constante  $N_p$  se obtiene al multiplicar la cantidad de bobinas por fase por la cantidad de espiras que tiene cada bobina.

Ya que se conocen las constantes que forman a la constante de construcción  $K$ , se puede escribir la expresión que la define.

Fórmula 13. Constante de construcción

$$K = \frac{N_p P K_p K_D}{2\sqrt{2}}$$

En donde:

$N_p$  es el número de espiras por fase

$P$  es el número de polos

$K_p$  es el factor de paso

$K_D$  es el factor de distribución

Como se mencionó al principio de esta sección, el voltaje generado es función del flujo magnético producido por el devanado de campo y la velocidad de rotación, siendo  $K$  una constante de proporcionalidad.

Debido a que al variar la velocidad de rotación varía la frecuencia eléctrica que para fines prácticos debe ser constante, el control del voltaje se debe efectuar mediante la variación del flujo magnético del devanado de campo. Para variar la magnitud del flujo magnético es necesario variar su corriente de excitación, quedando entonces el voltaje interno generado en función del control de la corriente de excitación.

### **1.1.5. Circuito equivalente y diagrama fasorial**

El voltaje generado internamente en el generador no es el que se obtiene en la salida de sus terminales, esto se debe a que hay varios fenómenos que lo distorsionan modificando su valor. La única condición cuando el voltaje generado internamente es el mismo que el voltaje en terminales es cuando el generador opera en vacío, ya que no hay circulación de corriente en el devanado inducido.

Los principales fenómenos que causan la diferencia entre el voltaje en terminales y el voltaje interno generado son:

- A. La reacción de inducido.
- B. La autoinductancia de las bobinas del inducido.
- C. La resistencia de las bobinas del inducido.

Para formar el circuito equivalente del generador síncrono estos tres fenómenos deben ser tomados en cuenta por lo que en los párrafos siguientes se tratará brevemente cada uno de ellos.

La reacción de inducido es el fenómeno que más influye en la modificación del voltaje en terminales. Se produce cuando se conecta una carga al generador provocando que fluya corriente en el devanado de inducido, esta corriente forma un campo magnético propio del estator que distorsiona el campo magnético del rotor modificando el voltaje de fase resultante. El nombre de reacción de inducido se debe a que la corriente que circula en el inducido es la que modifica el voltaje de fase resultante.

El campo magnético propio del estator consecuencia de la reacción del inducido genera un voltaje adicional en el estator por lo que el voltaje de fase será la suma del voltaje generado internamente y el voltaje adicional del estator.

Fórmula 14. Voltaje de fase resultante

$$V\phi = E_A + E_{ESTATOR}$$

En donde:

$V\phi$  es el voltaje de fase

$E_A$  es el voltaje generado internamente

$E_{ESTATOR}$  Voltaje adicional de estator producto de la reacción de inducido

El voltaje  $E_{ESTATOR}$  está siempre atrasado un ángulo de 90 grados eléctricos en relación a la corriente del inducido  $I_A$ . Este voltaje propio del estator se puede expresar según la siguiente fórmula agregando una constante de proporcionalidad que se puede relacionar con la reactancia del inducido denominada  $X$ .

Fórmula 15. Voltaje propio del estator

$$E_{ESTATOR} = -jXI_A$$

En donde:

$X$  reactancia asociada a reacción del inducido

$I_A$  es la corriente que circula en el inducido

Sustituyendo la expresión de la fórmula 15 en la fórmula 14, se obtiene el voltaje de fase en función del voltaje interno generado, la corriente que circula en el inducido y la reactancia del inducido  $X$ .

Fórmula 16. Voltaje de fase producto de reacción de inducido

$$V\phi = E_A - jXI_A$$

En donde:

$E_A$  es el voltaje interno generado

$X$  es la constante de proporcionalidad que relaciona la reactancia del inducido

$I_A$  es la corriente que circula en el inducido

El siguiente fenómeno a considerar es la autoinductancia en las bobinas del inducido, esta autoinductancia se denomina  $L_A$  y se debe a los flujos de dispersión de las bobinas. Se le puede relacionar con una reactancia  $X_A$  que es la reactancia de las bobinas y causa una caída de voltaje expresada en la siguiente ecuación.

Fórmula 17. Caída de voltaje por la autoinductancia en bobinas del inducido

$$E_I = -jX_A I_A$$

En donde:

$L_A$  es la autoinductancia en las bobinas del inducido

$X_A$  es la reactancia asociada con la autoinductancia

$I_A$  es la corriente que circula por el inducido

El tercer y último fenómeno que influye en la diferencia que hay entre el voltaje interno generado y el voltaje en terminales o voltaje de fase, es la resistencia propia de los conductores de las bobinas del inducido  $R_A$ , esta resistencia también provoca una caída de voltaje que está expresada a continuación.

Fórmula 18. Caída de voltaje por resistencia de bobinas del inducido

$$E_R = R_A I_A$$

En donde:

$E_R$  es la caída de voltaje por la resistencia de las bobinas del inducido

$R_A$  es la resistencia de las bobinas del devanado del inducido

$I_A$  es la corriente que circula por el inducido

Como se puede observar los tres fenómenos expuestos anteriormente tienen asociados caídas de voltaje, por lo que el voltaje resultante en terminales o voltaje de fase se puede escribir como en la siguiente expresión.

Fórmula 19. Voltaje de fase resultante

$$V\phi = E_A - E_I - E_R$$

En donde:

$E_A$  es el voltaje interno generado

$E_I$  es la caída de voltaje por reacción de inducido

$E_R$  es la caída de voltaje por resistencia de bobinas de inducido

Expresando el voltaje resultante en función de la corriente que circula por el inducido  $I_A$ , la reactancia asociada con la reacción del inducido  $X$ , la reactancia asociada con la autoinductancia  $X_A$  y la resistencia de las bobinas del inducido  $R_A$ , la fórmula 19 se puede escribir de la siguiente forma.

Fórmula 20. Voltaje de fase resultante en función de corriente de inducido

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$

En donde:

$E_A$  es el voltaje interno generado

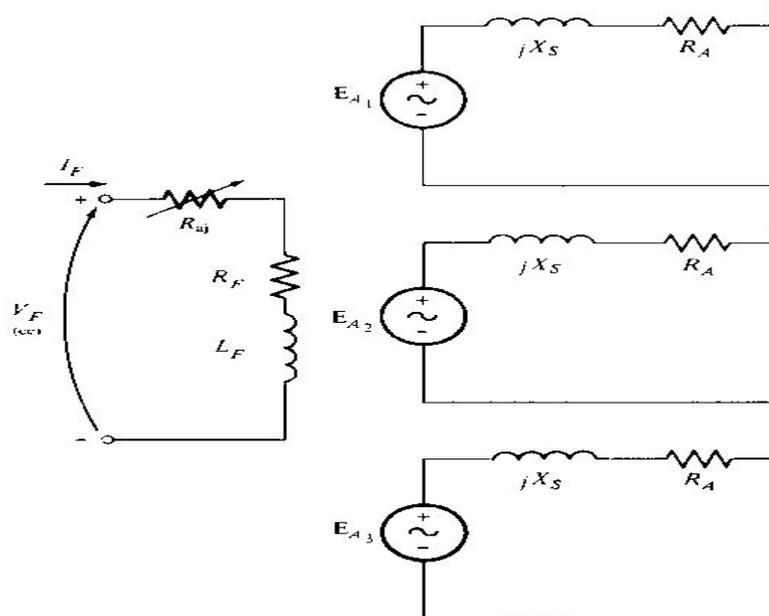
$I_A$  es la corriente que circula en el inducido

$X_S$  es reactancia asociada con la reacción del inducido

$R_A$  es la resistencia de las bobinas del estator

A partir de la fórmula 20 se puede modelar el circuito equivalente del estator del generador síncrono. El rotor se representa como una fuente de potencia continua ajustable por medio de una resistencia variable, la resistencia variable está conectada en serie con la resistencia y la reactancia del embobinado de campo. En la siguiente figura se observa el circuito equivalente para el generador síncrono, nótese que hay tres circuitos equivalentes del estator ya que cada uno representa a una fase diferente.

**Figura 8. Circuito equivalente del generador síncrono**

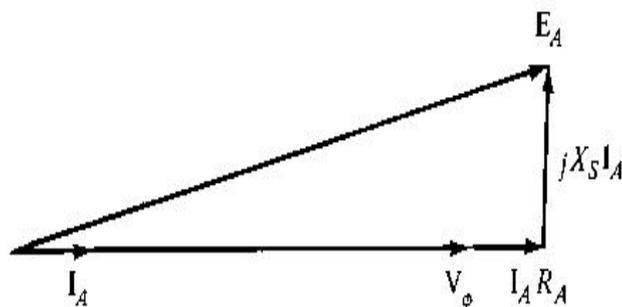


**Fuente:** Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas.** Página 453.

Para finalizar con esta sección se formará el diagrama fasorial del generador síncrono en diferentes condiciones de operación. Los fasores presentes en el diagrama son el voltaje interno generado  $E_A$ , el voltaje de fase  $V_\phi$ , la caída de voltaje debido a la reacción de inducido  $jX_S I_A$  y la caída de voltaje provocada por la resistencia del devanado de inducido  $R_A I_A$ .

El diagrama fasorial se construye a partir de la fórmula 20. Cuando el generador opera suministrando potencia a cargas con factor de potencia unitario, el diagrama fasorial es el de la siguiente figura.

**Figura 9. Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia unitario**

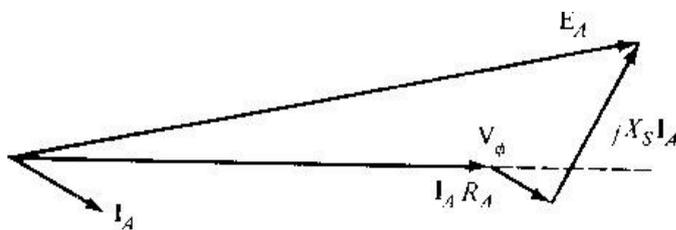


Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 455.

Como se puede observar claramente en el diagrama fasorial, el voltaje interno generado  $E_A$  es la suma vectorial del voltaje de fase  $V_\phi$  y las caídas de voltaje asociadas con la corriente del inducido  $I_A$ .

Cuando el generador se conecta a cargas con factor de potencia en atraso la corriente del inducido  $I_A$  se atrasa respecto al voltaje de fase  $V_\phi$ , por lo tanto, las caídas de voltaje asociadas con la corriente del inducido  $I_A$  también se desfazarán el mismo ángulo que ésta. El diagrama fasorial para un generador conectado a cargas con factor de potencia en atraso se puede observar en la siguiente figura.

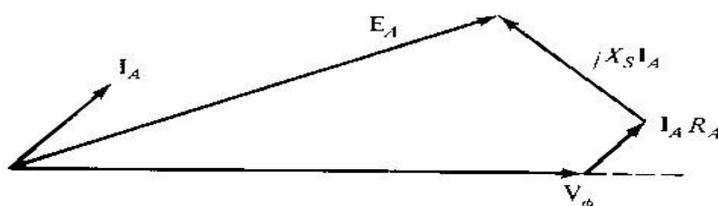
**Figura 10. Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia en atraso**



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

Si el generador es conectado a cargas con factor de potencia en adelanto ocurre el fenómeno opuesto al caso anterior, ya que la corriente del inducido  $I_A$  se adelantará respecto al voltaje de fase, consecuentemente las caídas de voltaje asociadas con  $I_A$  también lo harán. El diagrama fasorial para un generador conectado a cargas en adelanto se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 11. Diagrama fasorial con cargas de factor de potencia en adelanto**



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

Mediante la comparación del diagrama fasorial de operación con factor de potencia en atraso y el diagrama fasorial de operación con factor de potencia en adelanto, se puede observar que para una misma corriente de campo y una misma carga, la tensión de fase del generador es menor para cargas con factor de potencia en atraso que para cargas de potencia en adelanto.

De la observación anterior surge el término compensación de voltaje, la compensación de voltaje no es más que agregar reactancia capacitiva a la carga del generador con el objetivo de adelantar el factor de potencia y así subir el voltaje en terminales.

## **1.2. Función de la excitación del devanado de campo**

Una de las características propias de los generadores síncronos es que necesitan de una fuente externa de potencia continua para excitar su devanado de campo, esta fuente externa es llamada sistema de excitación. Cuando el sistema de excitación suministra potencia continua al devanado de campo circula en él una corriente llamada corriente de excitación.

El control del voltaje de salida del generador se puede realizar de dos formas, una es variando su velocidad de rotación y la otra es variando la excitación del devanado de campo, la variación de la excitación del devanado de campo se efectúa variando la corriente de excitación.

Como se mencionó en la sección 1.1.3 si se varía la velocidad de rotación cambia la frecuencia eléctrica que debe ser constante. Por esta razón, el método correcto para controlar la salida del generador es la variación de la excitación del campo.

Si el generador opera en una barra aislada, el voltaje en sus terminales puede ser controlado con la excitación del campo. Si el generador opera en paralelo con otros generadores conectado a una barra de un sistema de potencia, el voltaje en los terminales del generador será el voltaje de la barra. En esta condición de operación al variar la excitación del campo lo que se controlará es la potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema.

La facilidad que se tiene sobre el control del voltaje de salida del generador síncrono hace que sea la máquina mayormente utilizada para la generación de energía eléctrica.

A continuación se tratará el control del voltaje del generador cuando opera conectado a una barra aislada y el control de la potencia reactiva cuando opera conectado a una barra de un sistema de potencia.

### **1.2.1. Control de voltaje en barras aisladas**

La condición de operación del generador síncrono en una barra aislada es cuando la barra no está conectada a un sistema de potencia, siendo el generador el que suministra la potencia que requieren las cargas conectadas a la barra.

En esta condición de operación el voltaje de barra es el mismo que el voltaje en las terminales del generador, por lo tanto, el voltaje de la barra se controla variando la excitación del campo del generador.

El objetivo cuando se suministra potencia eléctrica a una carga es que el voltaje se mantenga en el valor nominal, debido a esto la excitación del campo se debe ajustar a las condiciones de carga existentes.

La carga eléctrica puede presentar tres condiciones:

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

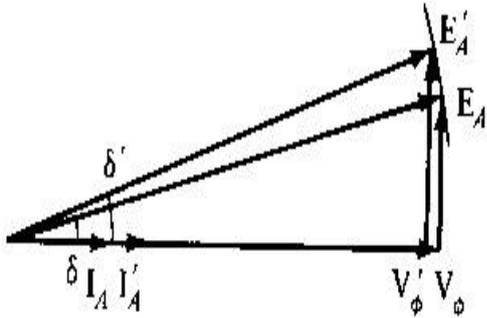
Cada condición de carga afecta de diferente forma al voltaje en terminales del generador por lo que para mantener el voltaje nominal, la excitación del campo debe variar de la forma demandada por la condición de carga.

Cuando se conecta una carga circula corriente en el inducido, provocando una caída de voltaje, debido a que el fenómeno que más aporta a esta caída de voltaje es la reacción del inducido, por simplificación se despreciará la resistencia en los devanados del inducido.

Según lo expuesto en la sección 1.1.5 y despreciando la resistencia del devanado del inducido el voltaje en terminales del generador síncrono o voltaje de fase  $V\phi$ , es igual a la suma vectorial del voltaje interno generado  $E_A$  y la caída de voltaje debido a la corriente del inducido  $jX_S I_A$ .

Si la carga presenta una condición con factor de potencia unitario la corriente que circula en el inducido  $I_A$  estará en fase con el voltaje de fase  $V\phi$ . Por lo tanto, la caída de voltaje debido a la corriente del inducido estará desfasada 90 grados, esto implica que el voltaje de fase  $V\phi$  disminuirá levemente. Lo expuesto anteriormente se puede entender mejor observando la siguiente figura.

**Figura 12. Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia unitario**

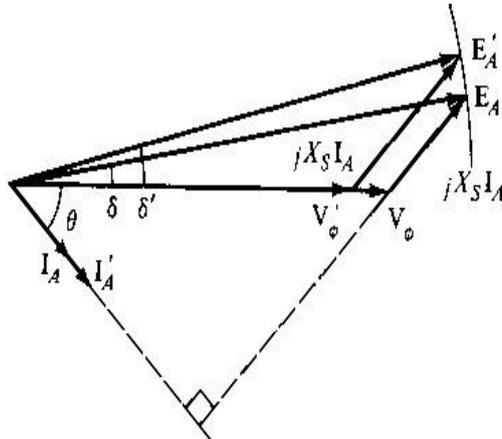


Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 466.

Como se pudo observar cuando la carga presenta una condición de factor de potencia unitario el voltaje de fase  $V_\phi$  disminuye levemente. Para mantener constante el valor nominal del voltaje es necesario variar la excitación del devanado de campo, incrementándola en proporción al leve decremento del voltaje de fase  $V_\phi'$ .

Cuando la carga presenta una condición de factor de potencia en atraso la corriente  $I_A$  se retrasará respecto al voltaje de fase  $V_\phi$ . Por lo tanto, la caída de voltaje debido a la corriente de inducido  $jX_s I_A$  estará desfasada un ángulo mayor a 90 grados respecto al voltaje de fase  $V_\phi$ . Como consecuencia se tendrá que el voltaje de fase  $V_\phi$  disminuirá significativamente. Este fenómeno se visualiza mejor en la siguiente figura.

**Figura 13. Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia en atraso**



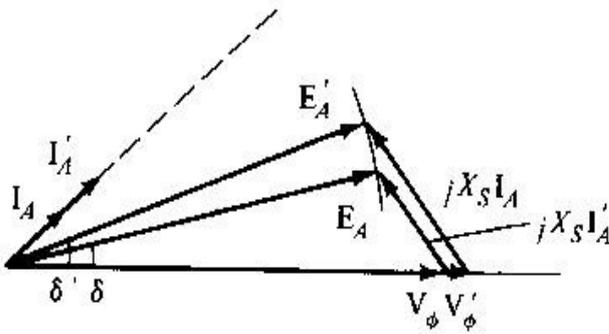
Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 466.

Según lo anterior, con cargas que presentan la condición de factor de potencia en atraso el voltaje de fase  $V\phi$  disminuye significativamente.

Por lo tanto, para mantener constante el valor nominal del voltaje de fase  $V\phi$ , es necesario realizar un incremento significativo en la excitación del campo. El incremento de la excitación del campo se debe realizar en proporción a la disminución del voltaje de fase  $V\phi'$ . Esta condición de carga es la que más comúnmente se presenta, ya que la mayoría de carga en un sistema eléctrico es inductiva.

Si la carga tiene factor de potencia en adelanto, la corriente  $I_A$  se adelantará respecto al voltaje  $V\phi$ , por lo tanto, la caída de voltaje  $jX_S I_A$  se desfasará en un ángulo menor a 90 grados respecto al voltaje de fase  $V\phi$ . Consecuentemente se tendrá que el voltaje de fase  $V\phi$  aumentará. Esto se observa en la figura siguiente.

**Figura 14. Voltaje de fase cuando la carga tiene factor de potencia en adelanto**



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

Debido a que el voltaje de fase  $V_\phi$  aumenta cuando la carga presenta un factor de potencia en adelanto, para mantener el valor nominal del voltaje constante es necesario disminuir la excitación del devanado de campo en proporción al aumento del voltaje.

Por lo anterior se concluye, que para efectuar el control del voltaje cuando el generador opera en una barra aislada la excitación de campo se debe variar según el tipo de carga. La variación de la excitación del campo para mantener el valor nominal del voltaje debe cumplir las condiciones listadas a continuación.

- A. Si la carga presenta una condición de factor de potencia unitario, la excitación del devanado de campo se debe aumentar levemente en proporción a la disminución del voltaje.

- B. Si la carga presenta una condición de factor de potencia en atraso, la excitación del devanado de campo se debe incrementar significativamente en proporción a la disminución del voltaje.
- C. Si la carga presenta una condición de factor de potencia en adelanto, la excitación del devanado de campo se debe disminuir en proporción al aumento del voltaje.

### 1.2.2. Control de potencia activa y reactiva en barras infinitas

La potencia en la salida de un generador síncrono es una potencia aparente  $S$ , esta potencia aparente está formada por la potencia real  $P$  y la potencia reactiva  $Q$ . La potencia real  $P$  corresponde a la parte real de la potencia aparente  $S$  y la potencia reactiva  $Q$  corresponde a la parte imaginaria. Esto se observa en la siguiente ecuación.

Fórmula 21. Potencia aparente

$$S = P + jQ = [V\phi] \times [I_A] \times (\cos\theta + j\text{sen}\theta)$$

En donde:

$S$  es la potencia aparente

$P$  es la potencia real

$Q$  es la potencia reactiva

$[V\phi]$  es la magnitud del voltaje de fase o voltaje en terminales del generador

$[I_A]$  es la magnitud de la corriente en el inducido

$\theta$  es el ángulo de desfase entre la corriente en el inducido y el voltaje de fase

Cuando un generador síncrono opera conectado a una barra infinita de un sistema de potencia el voltaje en sus terminales no puede variar ya que será el mismo que el voltaje de la barra. Adicionalmente, la velocidad de rotación del generador debe permanecer constante pues la frecuencia debe ser la misma del sistema.

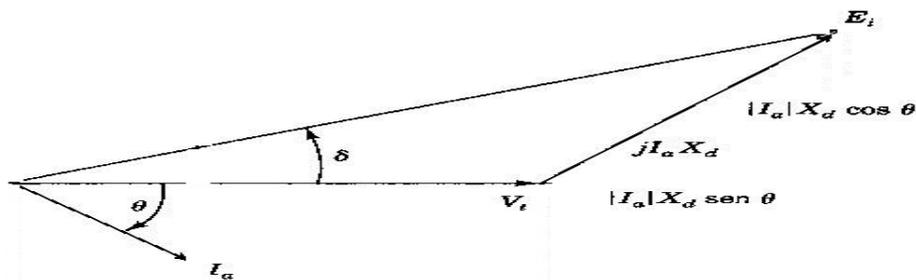
Bajo esta condición de operación los únicos parámetros en el generador que pueden ser variados son el par mecánico aplicado al eje y la corriente de excitación suministrada al devanado de campo.

El par mecánico controla la potencia activa que el generador entrega, por lo que si el sistema demanda que el generador provea más potencia activa, el gobernador del generador tiene que actuar incrementando el par mecánico aplicado proporcionalmente a la demanda de potencia activa.

La corriente de excitación del devanado de campo controla la potencia reactiva que el generador suministra o absorbe del sistema de la forma en que se expone a continuación.

Si se incrementa la corriente de excitación el voltaje interno generado  $E_A$  será mayor. Debido a que el voltaje de fase  $V_\phi$  permanece constante y es igual a la suma vectorial de la caída de tensión debido a la corriente del inducido  $jI_A X$  con el voltaje interno generado  $E_A$ , al incrementarse el voltaje interno generado  $E_A$  la corriente del inducido  $I_A$  se retrasará respecto al voltaje de fase. Lo descrito anteriormente se puede visualizar claramente en la siguiente figura.

**Figura 15. Diagrama fasorial de un generador sobreexcitado**

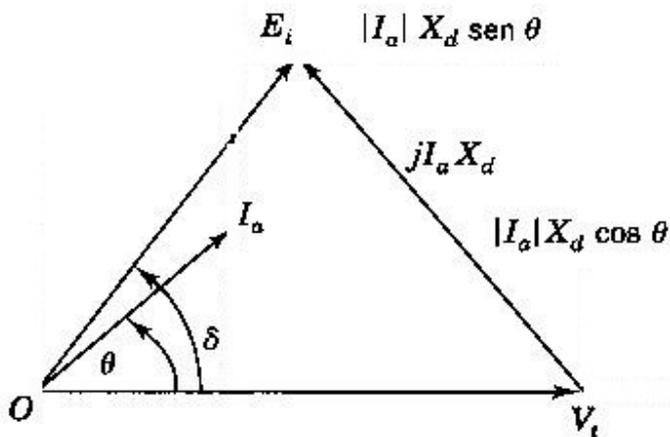


Fuente: William D., Stevenson. **Análisis de sistemas de potencia**. Página 99.

Si la corriente del inducido  $I_A$  está retrasada respecto al voltaje de fase  $V\phi$  el generador estará suministrando potencia reactiva positiva. Desde el punto de vista del sistema el generador sería una carga inductiva, en esta condición de operación el generador estaría sobreexcitado.

Si la corriente de excitación disminuye el voltaje interno generado  $E_A$  también disminuirá. A diferencia del caso anterior, la condición de que el voltaje de fase  $V\phi$  permanezca constante y que disminuya el voltaje interno generado  $E_A$ , provocará que la corriente del inducido  $I_A$  se adelante respecto al voltaje de fase  $V\phi$ . Esto se observa en la siguiente figura.

**Figura 16. Diagrama fasorial de un generador subexcitado**



Fuente: William D., Stevenson. **Análisis de sistemas de potencia**. Página 99.

Si la corriente del inducido  $I_A$  se adelanta respecto al voltaje de fase  $V\phi$  el generador suministrará potencia reactiva negativa. Desde el punto de vista del sistema de potencia el generador sería una carga capacitiva, en esta condición de operación el generador estaría subexcitado.

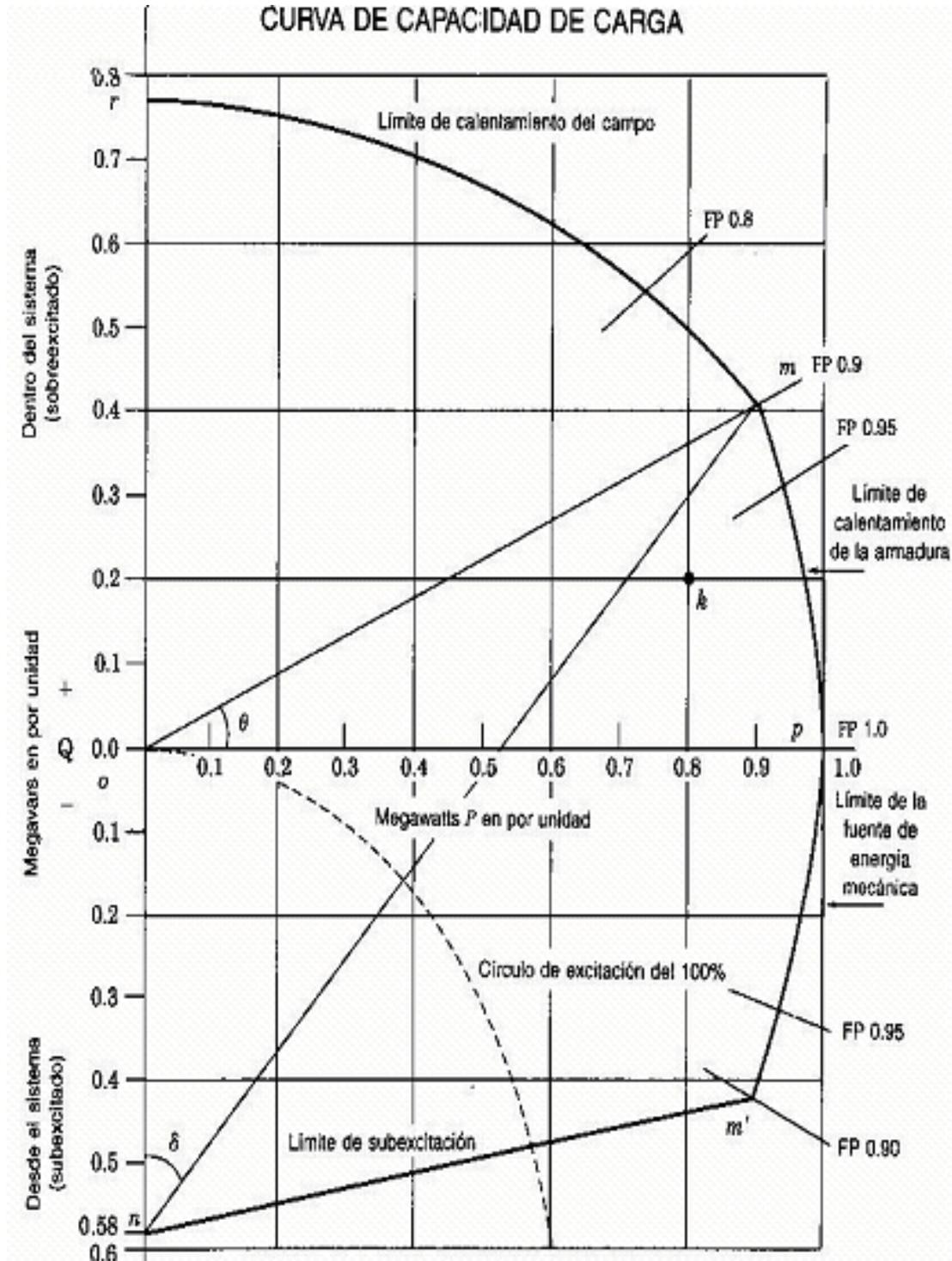
De lo anterior se concluye que:

1. Incrementando la corriente de excitación, se puede incrementar la cantidad de potencia reactiva positiva que el generador suministra al sistema, ya que operará con un factor de potencia positivo.
2. Disminuyendo la corriente de excitación, el generador puede pasar de suministrar potencia reactiva positiva a suministrar potencia reactiva negativa. Esto se debe a que el generador pasaría de operar con un factor de potencia positivo a operar con un factor de potencia negativo. Desde el punto de vista del sistema el generador pasaría de ser una carga inductiva a ser una carga capacitiva.

Cuando se varía la corriente de excitación para controlar la potencia reactiva es de utilidad tomar en cuenta la curva de capacidad de carga del generador. En la curva de capacidad del generador aparece el comportamiento de la máquina operando con diferentes factores de potencia y los límites de operación en cada condición.

En la siguiente figura se puede observar una curva de capacidad típica para un generador síncrono.

Figura 17. Curva de capacidad de carga



Fuente: William D., Stevenson. **Análisis de sistemas de potencia.** Página 105.

Según se puede observar en la curva de capacidad de carga del generador sincrónico las condiciones críticas de operación son las que se describen a continuación.

- A. Cuando el generador opera sobreexcitado, el límite para entregar potencia reactiva positiva será el límite de calentamiento de la armadura (inducido). Esto se debe a que en esta condición la corriente en el devanado de armadura será alta.
- B. Si la potencia a entregar por el generador es casi totalmente activa o con un factor de potencia cercano a la unidad, la limitante será la fuente de energía mecánica. Esto es porque el suministro del par mecánico en esta condición debe ser el máximo.
- C. Cuando el generador opera subexcitado el límite para la entrega de potencia reactiva negativa será la misma subexcitación. Esto se debe a que en esta condición se puede caer en que la excitación no sea suficiente para inducir el voltaje. Si la máquina excede el límite de subexcitación, existe la posibilidad de pérdida de sincronismo y de que se produzca una falla en la máquina debida al deslizamiento de sus polos.

## **2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN**

Para que exista el campo magnético necesario para que el generador síncrono realice la conversión de energía mecánica a energía eléctrica su devanado de campo tiene que tener un suministro de corriente directa. Esta corriente directa es suministrada por medio de los sistemas de excitación. Normalmente los sistemas de excitación proveen al generador del 0.5% al 3% de su potencia nominal a un potencial de 125 Vdc o 250 Vdc.

Básicamente los sistemas de excitación pueden ser rotativos o estáticos. Los primeros sistemas de excitación que se utilizaron fueron los sistemas de excitación rotativos. Posteriormente con el desarrollo de los dispositivos de estado sólido y la electrónica de potencia surgieron los sistemas de excitación estáticos. Actualmente se utilizan tanto sistemas de excitación rotativos como sistemas de excitación estáticos.

### **2.1. Conceptos básicos de los sistemas de excitación rotativos**

Los sistemas de excitación rotativos reciben este nombre debido a que son pequeños generadores eléctricos que tienen como función suministrar la corriente de excitación al devanado de campo del generador síncrono. Utilizan como fuente de energía mecánica el mismo primotor que el generador principal, comúnmente su eje está acoplado al del generador principal o a una faja que transfiere la rotación del eje del generador principal al eje del sistema de excitación rotativo.

Son máquinas eléctricas rotativas que se asemejan a los generadores síncronos ya que el voltaje que generan es alterno, la diferencia radica en que este voltaje alterno es rectificado a corriente directa.

Se pueden clasificar en dos categorías, sistemas de excitación rotativos sin escobillas y sistemas de excitación rotativos con escobillas. Los sistemas de excitación rotativos sin escobillas suministran la potencia al devanado de campo del generador directamente, gracias a que su circuito inducido junto a un rectificador trifásico están instalados en el eje del generador. Los sistemas de excitación rotativos con escobillas se valen de éstas para el suministro de la corriente directa al circuito de campo del generador.

En ambos casos los sistemas de excitación rotativos pueden ser auto excitados o utilizar una fuente de excitación externa. Al igual que con los generadores síncronos la salida del sistema de excitación rotativo depende de la corriente de excitación en su devanado de campo.

La corriente de excitación de los sistemas de excitación rotativos puede ser controlada por un reóstato que se encuentra en serie con su devanado de campo o por medio de un regulador automático de voltaje.

El hecho de que la salida de los sistemas de excitación rotativos sea controlada por la corriente de excitación de su devanado de campo, implica un retardo en la respuesta del generador síncrono ante los fenómenos dinámicos que se presentan en los sistemas de potencia. Este retardo en la respuesta de los generadores síncronos consecuencia del sistema de excitación rotativo se conoce como constante de tiempo del sistema de excitación.

La constante de tiempo del sistema de excitación en los sistemas de excitación estáticos es muy pequeña y por lo general se desprecia, esto es debido a que el control de su salida se realiza con dispositivos de estado sólido.

### **2.1.1. Sistemas de excitación rotativos sin escobillas**

Los sistemas de excitación rotativos sin escobillas no pueden ser reemplazados por sistemas de excitación estáticos, ya que éstos últimos necesitan escobillas y anillos de deslizantes para alimentar de corriente directa al campo del generador síncrono. Debido a esto en el presente trabajo los sistemas de excitación rotativos sin escobillas se tratarán brevemente.

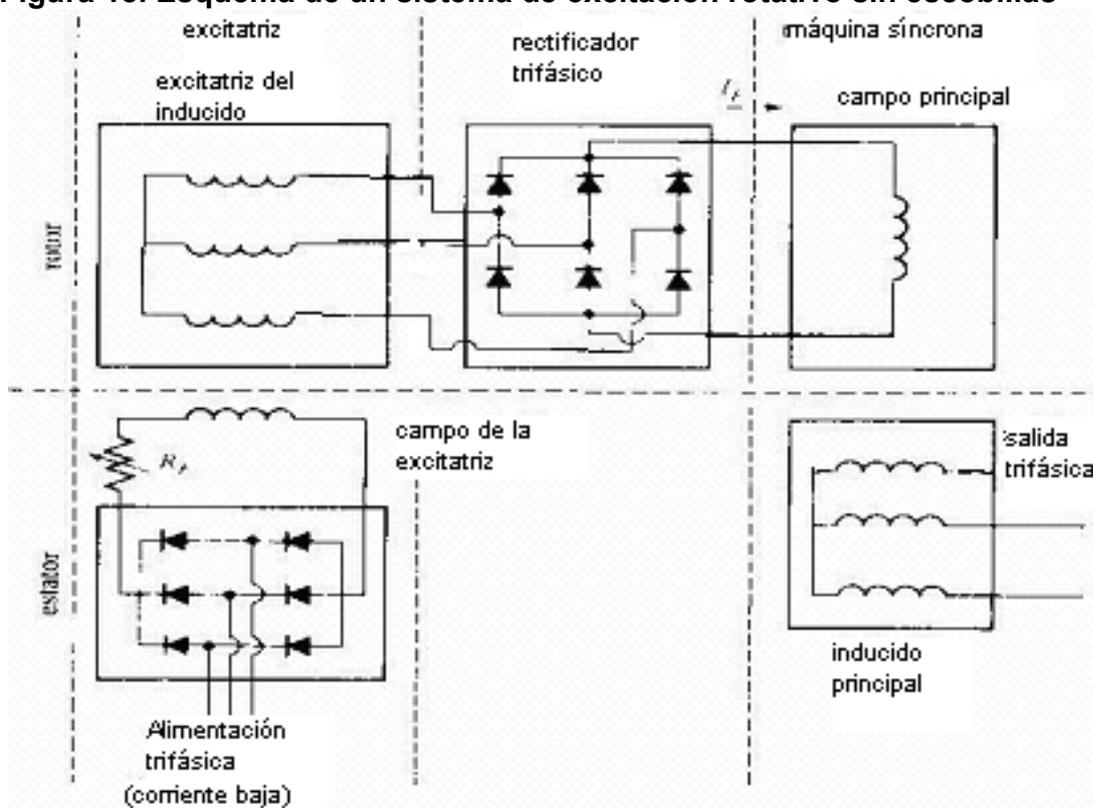
Un sistema de excitación rotativo sin escobillas es un generador de potencia alterna pequeño, con la peculiaridad de que su circuito de campo está en el estator y su circuito inducido en el rotor. El rotor del sistema de excitación se encuentra acoplado al rotor del generador síncrono, en éste se encuentra montado un rectificador trifásico.

La salida del devanado inducido en el rotor del sistema de excitación, se conecta al rectificador trifásico para proveer la corriente directa que necesita el devanado de campo en rotor del generador síncrono.

Controlando la corriente de excitación del devanado de campo en el estator del sistema de excitación es posible controlar la corriente de campo de la máquina principal sin la necesidad de escobillas. El hecho de que no haya un contacto físico entre el rotor del generador síncrono y la salida del sistema de excitación hace que estos sistemas requieran de muy poco mantenimiento.

En la figura 18 se muestra un esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas. En su parte superior se muestra el esquema del rotor del sistema de excitación y el esquema del rotor del generador síncrono. En su parte inferior el estator del sistema de excitación y el esquema del estator del generador síncrono.

**Figura 18. Esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas**



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

Como se observa en la parte superior de la figura 18 en el rotor del generador síncrono se encuentra montado el inducido de la excitación, cuya salida está conectada a un rectificador trifásico, que también se encuentra montado en el mismo eje. De la salida del rectificador trifásico se obtiene la corriente de excitación para el devanado de campo del generador síncrono.

En la parte inferior de la figura 18 se observa que en el estator del sistema de la excitación está su devanado de campo, tiene una resistencia variable y está alimentado con un rectificador trifásico. La resistencia variable sirve para el control de la corriente de excitación que entra al devanado de campo de la excitación. Se puede observar también que en el estator del generador síncrono está el devanado inducido del cual sale la potencia eléctrica generada.

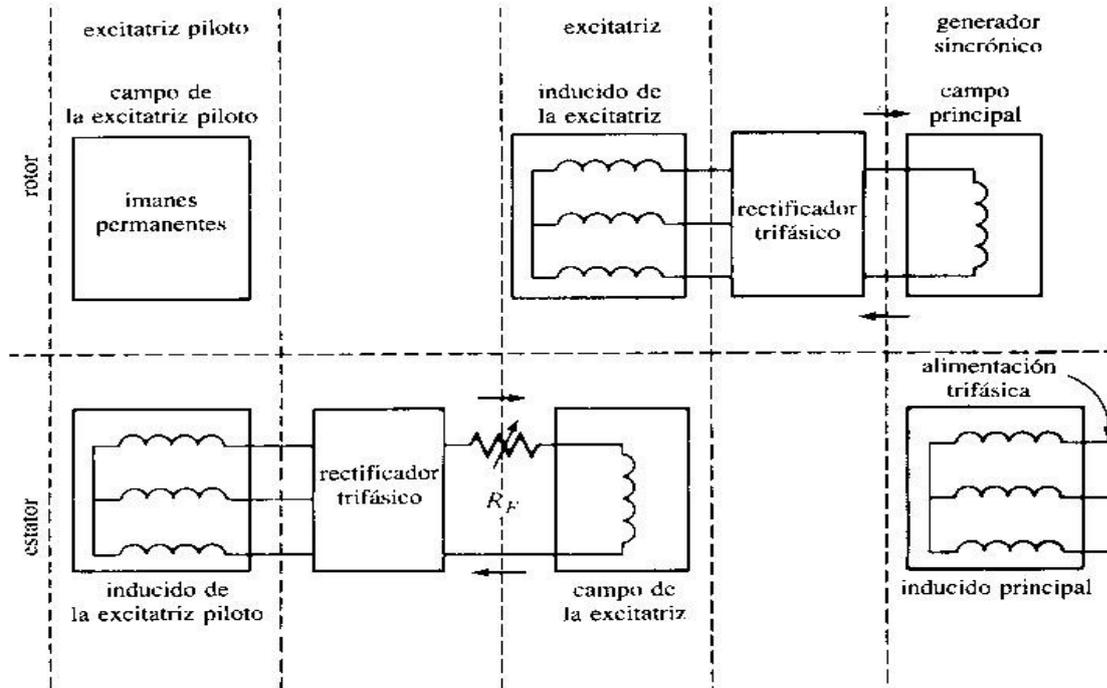
Los sistemas de excitación rotativos sin escobillas pueden ser excitados por una fuente externa de potencia o pueden ser auto excitados. La corriente de excitación necesaria por lo general es pequeña y no se necesitan equipos muy robustos para proveerla.

Cuando el sistema de excitación es auto excitado es completamente independiente de cualquier fuente externa de potencia. Para este propósito se utiliza un pequeño sistema de excitación que proporciona corriente continua al devanado de campo en el estator de la excitación principal, este pequeño sistema de excitación es llamado excitador piloto.

El excitador piloto es un pequeño generador de corriente alterna cuya salida es rectificada. A diferencia de la excitación principal el campo del excitador piloto está en el rotor y el inducido en el estator.

El campo del excitador piloto está formado por imanes permanentes que son los que generan el campo magnético rotativo que induce el voltaje en su devanado inducido. A continuación, se muestra un esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas autoexcitado.

**Figura 19. Esquema de un sistema de excitación rotativo sin escobillas autoexcitado**



Fuente: Stephen, Chatman. **Máquinas eléctricas**. Página 447.

Como se puede observar en la figura 19 en la parte superior se muestra el esquema del rotor del excitador piloto, del rotor de la excitación principal y del rotor del generador síncrono. En la parte inferior se muestra el esquema del estator del excitador piloto, del estator de la excitación principal y del estator del generador síncrono.

Según se observa en el esquema de rotores de la figura 19, en el rotor del excitador piloto está el devanado de campo que está formado por imanes permanentes. En el rotor de la excitación principal está el devanado inducido cuya salida se conecta a un rectificador trifásico, del rectificador trifásico sale la corriente de excitación del generador síncrono. En el rotor del generador síncrono se encuentra el devanado de campo.

En el esquema de estatores de la figura 19, se observa que en el estator del excitador piloto se encuentra su devanado inducido cuya salida está conectada a un rectificador trifásico. En el estator de la excitación principal está el devanado de campo que se alimenta de la salida del rectificador trifásico que le suministra la corriente de excitación. En el estator del generador síncrono está el devanado inducido del cual sale la potencia generada.

En los sistemas de excitación rotativos sin escobillas con excitador piloto la constante de tiempo del sistema se incrementa, esto se debe a que se le añade el retardo que introduce al sistema el control del excitador piloto.

En general, los sistemas de excitación rotativos sin escobillas requieren de menor mantenimiento que los sistemas de excitación que utilizan escobillas rotativas o estáticos. Pero presentan la desventaja ante los sistemas de excitación estáticos del retardo por la constante de tiempo del sistema de excitación, además el consumo de potencia que efectúan es mucho mayor.

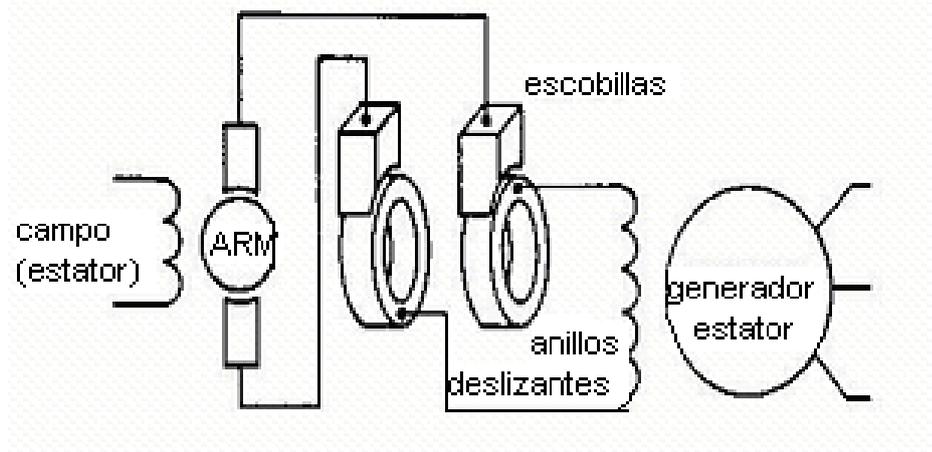
### **2.1.2. Sistemas de excitación rotativos con escobillas**

Los sistemas de excitación rotativos con escobillas son pequeños generadores que suministran la corriente de excitación al devanado de campo del generador síncrono por medio de escobillas y anillos deslizantes.

Hay varios tipos de sistemas de excitación rotativos con escobillas que se han desarrollado a través de los años. En la presente sección se expondrán los tipos de sistemas de excitación rotativos con escobillas más comunes que se pueden encontrar actualmente.

En la siguiente figura se muestra el esquema básico de un sistema de excitación rotativo con escobillas.

**Figura 20. Esquema de un sistema de excitación rotativo con escobillas**



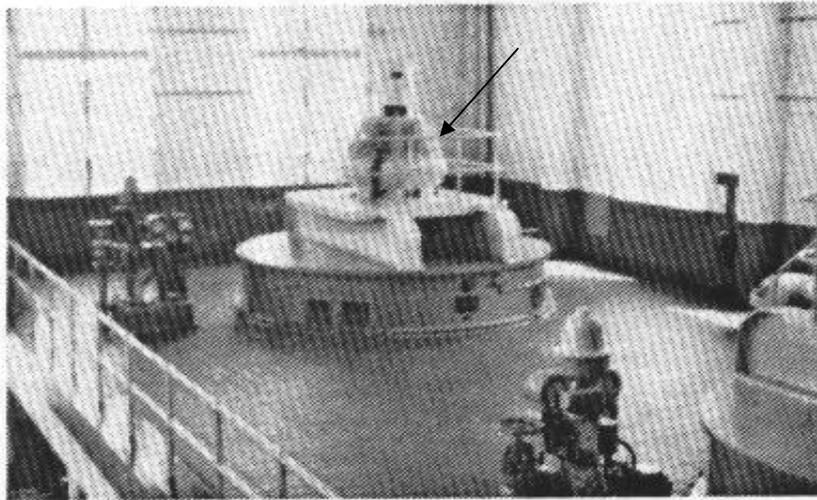
Fuente: Basler Electric Company. **Why estatic excitation.** Página 7.

Como se observa en la figura 20 el devanado de campo del sistema de excitación está en su estator, el devanado inducido se encuentra en su rotor y a la salida del inducido están conectadas las escobillas. Las escobillas hacen contacto eléctrico con los anillos deslizantes que están conectados al devanado de campo del generador síncrono. Por medio de los anillos deslizantes es que se suministra la corriente de excitación al generador síncrono.

El primer sistema de excitación rotativo con escobillas a tratar es el tipo denominado *excitación rotativa conectada directamente*, es el más común.

Su nombre se debe a que la excitación rotativa está acoplada directamente en el eje del primotor del generador síncrono. En la siguiente figura se muestra una fotografía de una *excitación rotativa conectada directamente*, en este caso se trata de una hidroturbina con eje vertical en cuya parte superior está montada la excitación rotativa.

**Figura 21. Fotografía de sistema de excitación rotativo conectado directamente**

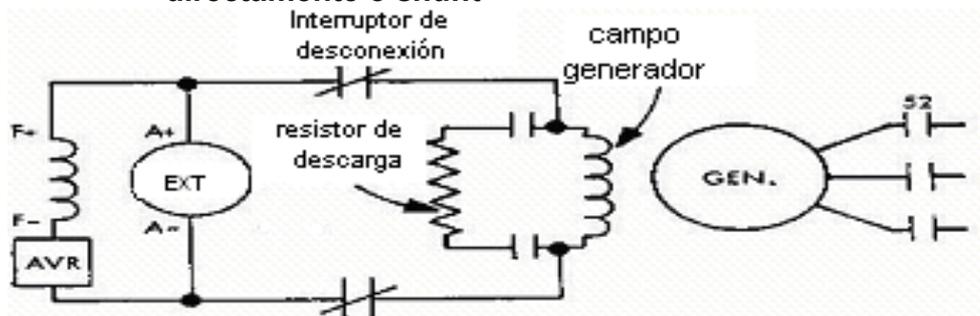


Fuente: Basler Electric Company. **Why estatic excitation.** Página 7.

La potencia que requiere este tipo de excitación rotativa es tomada directamente de la salida del generador síncrono, debido a esto no se necesita de una fuente de energía externa. Para suministrar la corriente de excitación al generador síncrono, la excitación utiliza escobillas y anillos deslizantes.

En la siguiente figura se muestra un esquema típico de una *excitación rotativa conectada directamente*.

**Figura 22. Esquema de un sistema de excitación rotativo conectado directamente o *shunt***



Fuente: Basler Electric Company. **Why estatic excitation.** Página 7.

En la figura 22 se observa que el campo de la excitación está controlado con un regulador de voltaje automático. La salida del sistema de excitación tiene contactos normalmente cerrados que se abren únicamente en caso de que se requiera interrumpir la excitación del generador síncrono. Los contactos normalmente cerrados están eléctricamente enclavados con los contactos normalmente abiertos que se observan en la figura. Cuando se cierran los contactos normalmente abiertos se pone en paralelo con el devanado de campo una resistencia de descarga.

Al abrirse los contactos normalmente cerrados la excitación del generador se interrumpe, simultáneamente se cierran los contactos normalmente abiertos para que el remanente de la corriente de excitación se disipe a través de la resistencia de descarga, protegiéndose de esta forma el devanado de campo del generador síncrono.

En sistemas de excitación de este tipo más modernos son utilizados reguladores de voltaje de estado sólido. Cuando se desconecta la excitación el devanado de campo del generador es protegido por medio de un diodo y el regulador de voltaje de estado sólido provee un decaimiento gradual de la excitación del campo del generador.

Los generadores síncronos que utilizan una *excitación rotativa conectada directamente* tienen su velocidad de respuesta limitada por el tiempo de respuesta promedio de diseño del sistema de excitación, por la constante de tiempo del sistema de excitación y por la constante de tiempo propia del generador. Anteriormente se mencionó que la constante de tiempo es el retardo que se introduce en la respuesta del sistema debido al control de la corriente de excitación.

Consecuentemente, los generadores que utilizan una *excitación rotativa conectada directamente*, son más susceptibles a anomalías como fallas en las líneas causadas por sobrecargas, lo que resulta en un tiempo mayor de pérdida de generación. Estos generadores dependen en gran medida de la existencia de protección externa por relevación de alta velocidad, a efecto de mantener la continuidad de la barra infinita. Una excitación estática simple puede ser utilizada para reemplazar a una *excitación rotativa conectada directamente*.

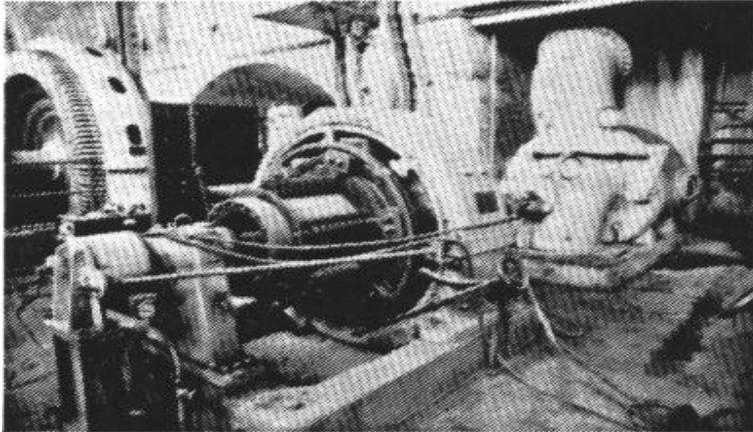
Otro tipo de sistema de excitación rotativo menos común que el anterior, pero que se puede encontrar en instalaciones antiguas es la *excitación con barra común de corriente directa*.

Este sistema de excitación consiste en un generador sencillo de corriente directa que suministra su potencia a una barra común que provee la excitación de campo a múltiples generadores.

En este sistema de excitación se suelen incluir típicamente dos excitaciones rotativas conectadas a la barra, estas excitaciones proveen respaldo en caso de que el generador de corriente directa falle. La rotación del generador de dc y de las excitaciones rotativas se obtiene por medio del acople de sus rotores a diferentes turbinas.

En la siguiente figura se puede observar la fotografía de un generador síncrono con su devanado de campo alimentado por una *excitación con barra común de corriente directa*.

**Figura 23. Fotografía de un generador síncrono conectado a una barra común de corriente directa para su excitación**

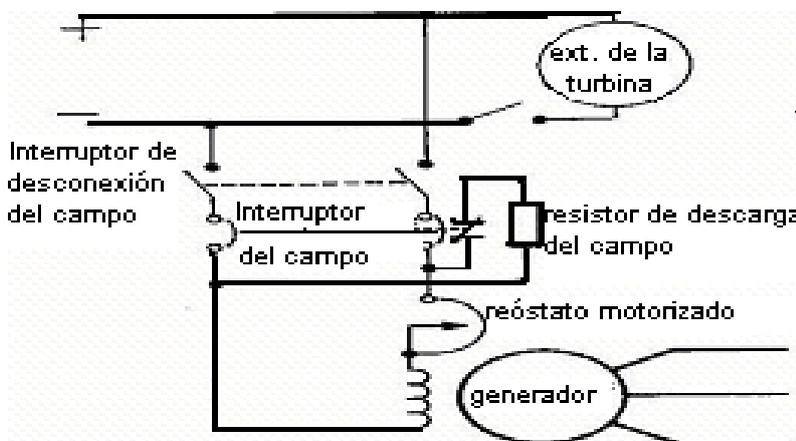


Fuente: Basler Electric Company. **Why estatic excitation.** Página 8.

En la fotografía de la figura 23 se puede distinguir que del rotor del generador sale un cable, este cable es el que lleva la corriente de excitación proveniente de la barra común de corriente directa.

A continuación se muestra el esquema típico de una *excitación con barra común de corriente directa*.

**Figura 24. Sistema de excitación con barra común de corriente directa**



Fuente: Basler Electric Company. **Why estatic excitation.** Página 9.

En este sistema de excitación la cantidad de corriente de excitación inyectada al devanado de campo del generador es ajustada por reóstatos controlados por un operador, estos reóstatos por lo general son motorizados.

El sistema de desconexión de la *excitación con barra común de corriente directa* es muy similar al sistema de desconexión de la *excitación rotativa conectada directamente* mencionado con anterioridad. Su funcionamiento se basa en contactos normalmente abiertos y contactos normalmente cerrados que están enclavados. Cuando se acciona el mecanismo de desconexión se desconecta la excitación y se protege al devanado de campo del generador de la corriente de excitación remanente por medio de una resistencia de descarga.

El hecho de que la mayoría de las *excitaciones con barra común de corriente directa* no cuentan con reguladores de voltaje, vuelve a los generadores que los utilizan muy susceptibles a las sobre velocidades de rotación, especialmente en turbinas hidráulicas en donde podrían resultar voltajes muy altos en la máquina.

Algunas veces hasta seis máquinas pueden obtener su excitación de la barra común de corriente directa. En estos sistemas la corriente de excitación puede ser desviada de la barra común de corriente directa y alimentar directamente al campo del generador.

En los generadores que utilizan este tipo de excitaciones es muy importante contar con una buena y confiable relevación para asegurar la longevidad de los generadores y prevenir fallas prematuras en su aislamiento consecuencia de sobre voltajes. La cantidad de sobre voltajes que la máquina experimenta en este caso es proporcional a las sobre velocidades de rotación.

El reóstato de campo utilizado para controlar la corriente de excitación consume grandes cantidades de potencia y genera muchos watts que se pierden en calor. La mayoría del tiempo estos sistemas de excitación son irregulares, y por lo tanto, susceptibles a fluctuaciones en las barras del sistema resultando que los generadores pierdan la sincronización.

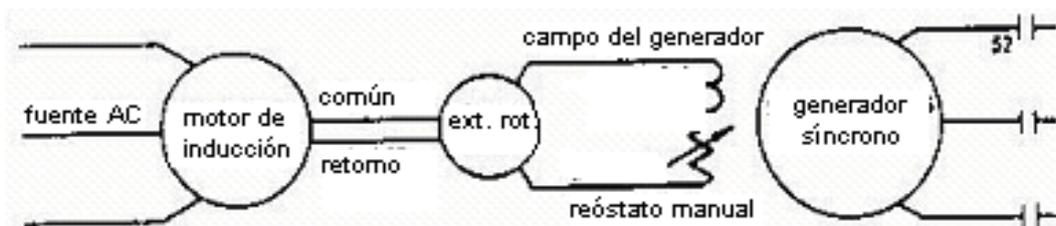
Los sistemas de *excitación con barra común de corriente directa* representan una filosofía muy atrasada para excitar el campo de los generadores síncronos, posteriormente a su implementación fue descubierto que se obtiene una mejor confiabilidad mediante excitaciones individuales para cada máquina.

Siguiendo este criterio, para mejorar el comportamiento de los generadores, este tipo de excitación puede ser reemplazado por una excitación estática para cada máquina.

El siguiente sistema de excitación rotativo a tratar es la *excitación motor generador* conocida también simplemente como excitación (MG).

Este tipo de sistema de excitación consiste en una excitación rotativa que es manejada con un motor de inducción o un motor síncrono. En la siguiente figura se muestra un esquema de la *excitación motor generador*.

**Figura 25. Esquema de un sistema de excitación motor generador**



Fuente: Basler Electric Company. **Why static excitation.** Página 10.

Como se observa en la figura 25 el motor de inducción tiene una fuente de corriente alterna que lo alimenta, el eje del motor de inducción es el mismo que el de la excitación rotativa. La corriente de excitación del campo del generador principal puede ser controlada mediante un reóstato, en sistemas más modernos la corriente de excitación se controla con un regulador de voltaje de estado sólido.

El diseño de los motores utilizados en este tipo de excitaciones debe ser conservador y muy frecuentemente son 2 a 3 veces mayores que la excitación. Tienen que poseer características especiales, la más importante es que puedan manejar la excitación a velocidades relativamente constantes a pesar de que existan fluctuaciones de voltaje en la entrada del motor.

La constante de inercia de la *excitación motor generador* debe ser relativamente alta para prevenir un desbocamiento, además se asegura una velocidad constante durante diferentes condiciones de carga y caídas momentáneas de voltaje.

Una *excitación motor generador* debe ser diseñada especialmente para cada generador, y al igual que los tipos de excitación descritos anteriormente este sistema puede ser reemplazado por una excitación estática.

Por último están las excitaciones del tipo amplificador rotativo llamadas *rototrol* y *regulex*. Éstas están directamente conectadas a generadores de corriente continua que están diseñados para proveer los requerimientos de excitación del campo del generador síncrono.

En una excitación rotativa común, la energía necesaria para producir un cambio del 100% en la salida del generador, usualmente está en el orden del 1% al 3% de la capacidad del generador. Esto resulta en una amplificación de la energía de entrada de la excitación respecto a la energía de salida del generador con factores entre 30 y 100.

En el caso de los amplificadores rotativos esta amplificación resulta en factores que pueden exceder a  $10^6$  dependiendo del diseño de la máquina. El resultado es una reducción sustancial de la corriente de excitación que se tiene que manejar comparándola con las corrientes que manejan las excitaciones rotativas comunes.

## **2.2. Sistemas de excitación estáticos**

Los sistemas de excitación estáticos deben su nombre a que no tienen partes móviles como en el caso de las excitaciones rotativas, basan su funcionamiento en semiconductores capaces de proveer la corriente directa requerida por el campo del generador para mantener constante su salida de voltaje.

Con la utilización de una excitación estática el desempeño del sistema de generación se mejora sustancialmente debido a que se elimina la constante de tiempo de la excitación rotativa, además se añade la precisión y velocidad de la tecnología de estado sólido.

La combinación de ambos factores logra que el sistema de generación responda de una forma mucho más rápida y eficiente ante cambios dinámicos en las condiciones del sistema de potencia.

### 2.2.1. Funcionamiento

Básicamente una excitación estática se comporta como un regulador de voltaje. Cuando censa un bajo voltaje en la salida del generador incrementa la corriente de campo, cuando censa un voltaje alto en la salida del generador reduce la corriente de campo. La diferencia entre un regulador de voltaje y una excitación estática es la capacidad de potencia que manejan sus semiconductores.

Un sistema de excitación estático consta de cuatro componentes básicos que son:

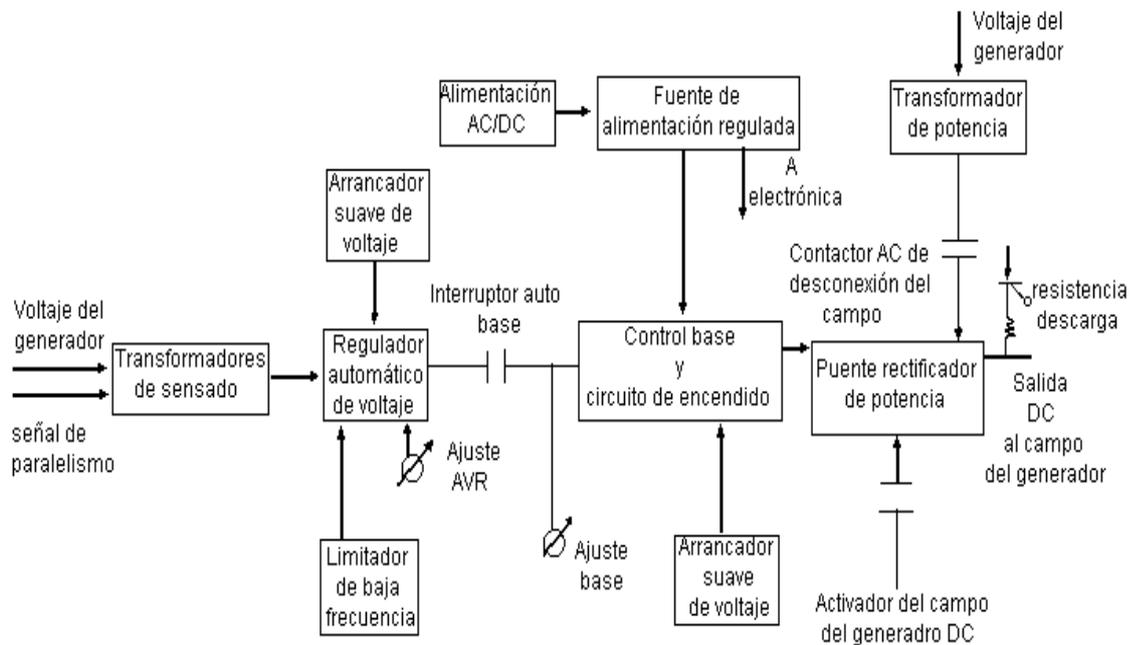
- Transformador de potencial.
- Contactor ac de desconexión del campo.
- Activador del campo del generador.
- Puente rectificador de potencia.

Adicionalmente el sistema de excitación estático debe ser equipado con componentes auxiliares que le permitan un control automático del voltaje de salida del generador, éstos componentes auxiliares son:

- Transformadores de sensado.
- Señal de paralelismo.
- Regulador automático de voltaje.
- Limitadores de sobre y baja frecuencia.
- Arranque suave de voltaje.
- Control base y circuito de encendido.
- Fuente de alimentación regulada.

La siguiente figura es un diagrama de bloques que muestra la interacción de los componentes mencionados anteriormente, este diagrama de bloques permite comprender mejor el funcionamiento de un sistema de excitación estático.

**Figura 26. Diagrama de bloques de los elementos que forma parte de un sistema de excitación estático**



Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 1.

Con base en el diagrama de bloques de la figura 26 se puede visualizar que la forma básica en que opera un sistema de excitación estático es la descrita en los siguientes párrafos.

El voltaje de las terminales del generador es reducido a un voltaje manejable por la excitación por medio del transformador de potencia, la salida el transformador de potencia está conectada a un contactor que tiene como función cortar la potencia al sistema de excitación para des-excitar la máquina.

El puente rectificador de potencia recibe tres señales, la señal de potencia del transformador de potencia, una señal que viene del activador del campo del generador y una señal de error proveniente del control base y circuito de encendido. La señal del activador del campo del generador se tiene únicamente cuando se energiza el sistema. La salida del puente rectificador de potencia es la corriente de excitación que se inyecta al campo del generador.

La señal de error de la salida del control base y circuito de encendido se forma a partir de la señal de la fuente de alimentación regulada, de la señal del arrancador suave de voltaje y de la señal que proviene del regulador automático de voltaje. La señal del arrancador suave de voltaje interviene cuando se energiza al sistema de excitación

El regulador automático de voltaje desarrolla su señal de salida a partir de la entrada de la señal que proviene de los transformadores de sensado, la señal de paralelismo, la señal del arrancador suave de voltaje y la señal del limitador de baja frecuencia. El limitador de baja frecuencia es alimentado por los transformadores de sensado. Los transformadores de sensado son alimentados por el voltaje del generador.

La función básica de cada dispositivo que conforma al sistema de excitación estático se ampliará brevemente en las siguientes secciones.

### **2.2.2. Transformador de potencia**

El primer componente a tratar es el transformador trifásico de potencia que reduce el voltaje en las terminales del generador a un nivel compatible con los requerimientos de voltaje del campo del generador.

Por ejemplo, un transformador con un voltaje secundario de 160 Vac puede ser usado para un campo que requiera 125 Vdc. Otros voltajes de campo que se pueden requerir son 250, 375 y 500 Vdc; para cada nivel de voltaje es apropiado utilizar múltiplos de 160 Vac, según el caso.

El transformador de potencia provee aislamiento eléctrico al circuito de campo del circuito de alto voltaje del generador. Estos transformadores son especificados con un BIL (nivel básico de impulso) según lo establecido en las normas ANSI C57.13. Esto asegura que el aislamiento eléctrico soporte cualquier pico de voltaje provocado por descargas electro atmosféricas o transientes de voltaje introducidos por operación de interruptores.

### **2.2.3. Contactor ac de desconexión del campo**

Como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 26 la salida del transformador de potencia está conectada en la entrada de un contactor de ac cuya salida está conectada al puente rectificador de potencia. El contactor es usado para interrumpir la potencia ac del sistema de excitación con el objeto de des-excitar al generador.

Cuando los sistemas de generación son bastante grandes y se manejan altas corrientes de excitación en lugar del contactor se utiliza un interruptor de corriente alterna.

Cuando el contactor se abre la energía del campo es forzada a fluir a través de un SCR hacia una resistencia de descarga que facilita una rápida des-excitación y protege al campo del generador.

#### **2.2.4. Activador del campo del generador**

Cuando una excitación estática de estado sólido es conectada directamente al campo del generador, una fuente externa de energía es necesaria para levantar su voltaje. Por lo general, la fuente de energía externa es el banco de baterías de 125 VDC existente en la planta de generación.

En el diagrama de bloques de la figura 26 se observa que el activador del campo del generador se conecta mediante un contactor al puente rectificador de potencia.

Sin energía externa el voltaje residual del generador disponible es insuficiente para activar a los SCR de potencia del puente rectificador. Esto se debe a que la inductancia del campo impide inicialmente el flujo de corriente. El voltaje residual del generador es el voltaje disponible en las terminales de la máquina cuando ésta no está excitada. El banco de baterías suministra la corriente necesaria para que los SCR empiecen a conducir.

Un diodo en serie con el terminal positivo del banco de baterías previene que la corriente de los SCR de potencia regrese al banco de baterías cuando los SCR están conduciendo.

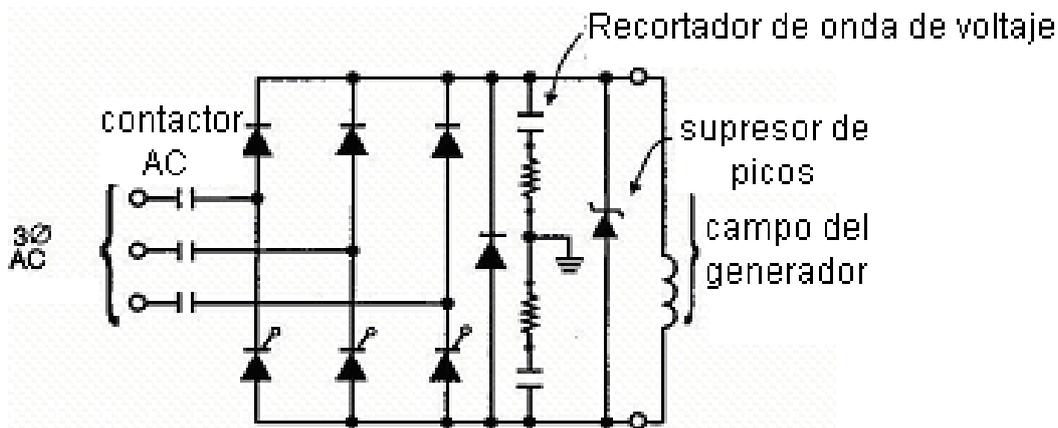
Típicamente el banco de baterías es de 125 Vdc, menos comúnmente se utilizan bancos de baterías de 250 Vdc. En casos especiales, una fuente de ac puede ser utilizada complementándose con un rectificador como una forma alternativa de activador del campo del generador.

### 2.2.5. Puente rectificador de potencia

El puente rectificador de potencia está formado por los semiconductores de potencia, por tres fusibles limitadores de corriente y un supresor de picos para proteger al campo del generador de sobre voltajes. Estos dispositivos están montados en un chasis que se conoce como chasis del rectificador. Hay dos tipos de puentes rectificadores de potencia, el *puente rectificador de 3 SCR* y el *puente rectificador de 6 SCR*.

El *puente rectificador de 3 SCR* como su nombre lo indica se encuentra formado por un circuito que contiene tres SCR, tres diodos de potencia y un diodo de seguridad. Es equipado con fusibles de potencia y un circuito RC amortiguador para propósitos del control de la potencia de los SCR. En la siguiente figura se muestra el esquema de un *puente rectificador de 3 SCR*.

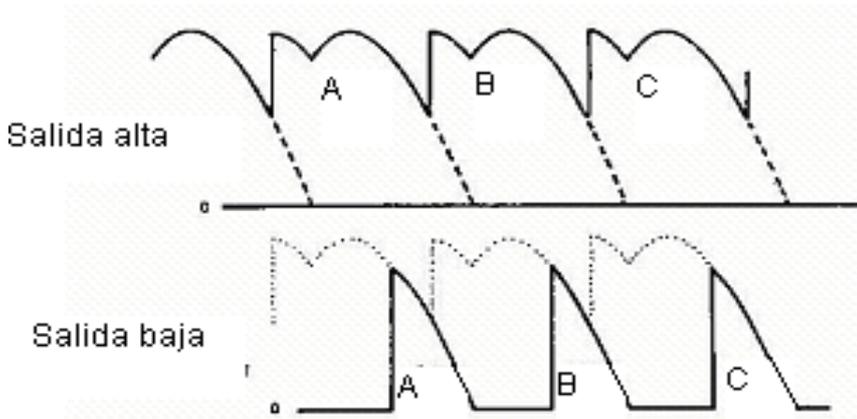
**Figura 27. Esquema de un puente rectificado de potencia de 3 SCR**



Fuente. Basler Electric Company. **Aplication of static excitation.** Página 3.

Con la utilización del *puente rectificador de 3 SCR* se obtiene una salida de dc como la que se muestra en la siguiente figura. Esta salida tiene una forma de onda de se controla desde cero hasta un valor máximo de voltaje.

**Figura 28. Onda de salida de un puente rectificador de 3 SCR**



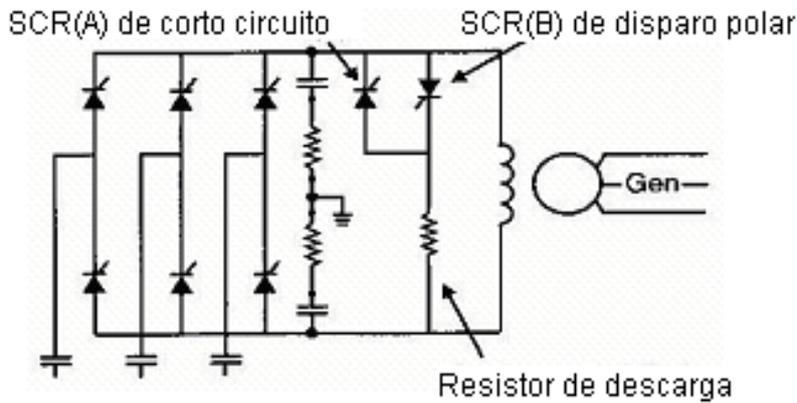
Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 4.

Aunque el tiempo de reacción de un *puente rectificador de 3 SCR* es muy bueno su desempeño es limitado de cero a un voltaje máximo. Consecuentemente cuando un cambio rápido en el voltaje del generador es requerido el voltaje mínimo cero del *puente rectificador de 3 SCR* limita la velocidad de caída del voltaje, y el tiempo de recuperación será referido al valor de la caída del voltaje de campo causada por el diodo de seguridad.

La aplicación del *puente rectificador de 3 SCR* puede ser para cualquier tamaño de generador, aunque su uso predominante es en máquinas debajo de 10 MVA o debajo de 150 amperios en el campo.

El *puente rectificador de 6 SCR* es mejor para máquinas mayores de 10 MVA o con una corriente de campo cerca de 150 amperios. En la siguiente figura se muestra el esquema de un *puente rectificador de 6 SCR*.

**Figura 29. Esquema de un puente rectificador de 6 SCR**

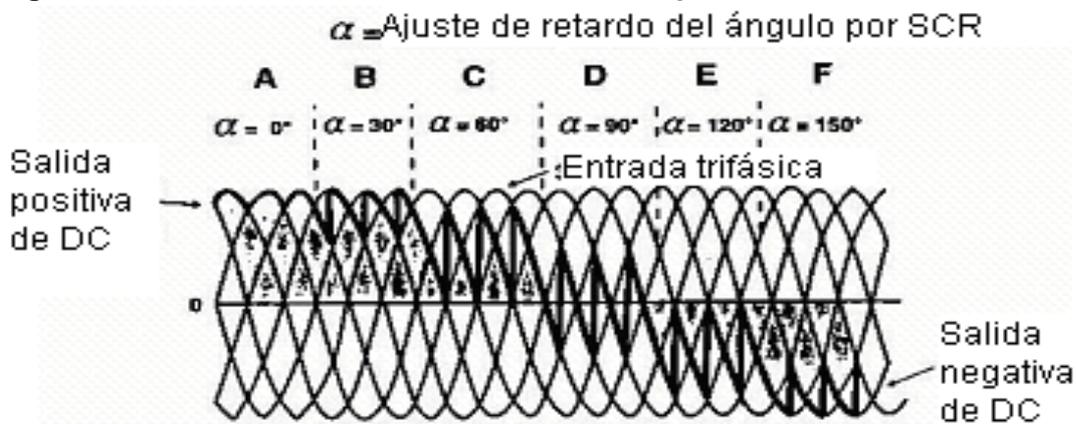


Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 5.

El *puente rectificador de 6 SCR* mostrado proporciona una salida con dos formas de onda de voltaje, una positiva y otra negativa. Esto elimina la limitación que se tenía con el *puente rectificador de 3 SCR* permitiendo una rápida recuperación del voltaje del generador.

En la siguiente figura se muestra el cambio en la salida del *puente rectificador de 6 SCR* con diferentes ángulos de conducción en los SCR.

**Figura 30. Cambio en la onda de salida de un puente rectificado de 6 SCR**

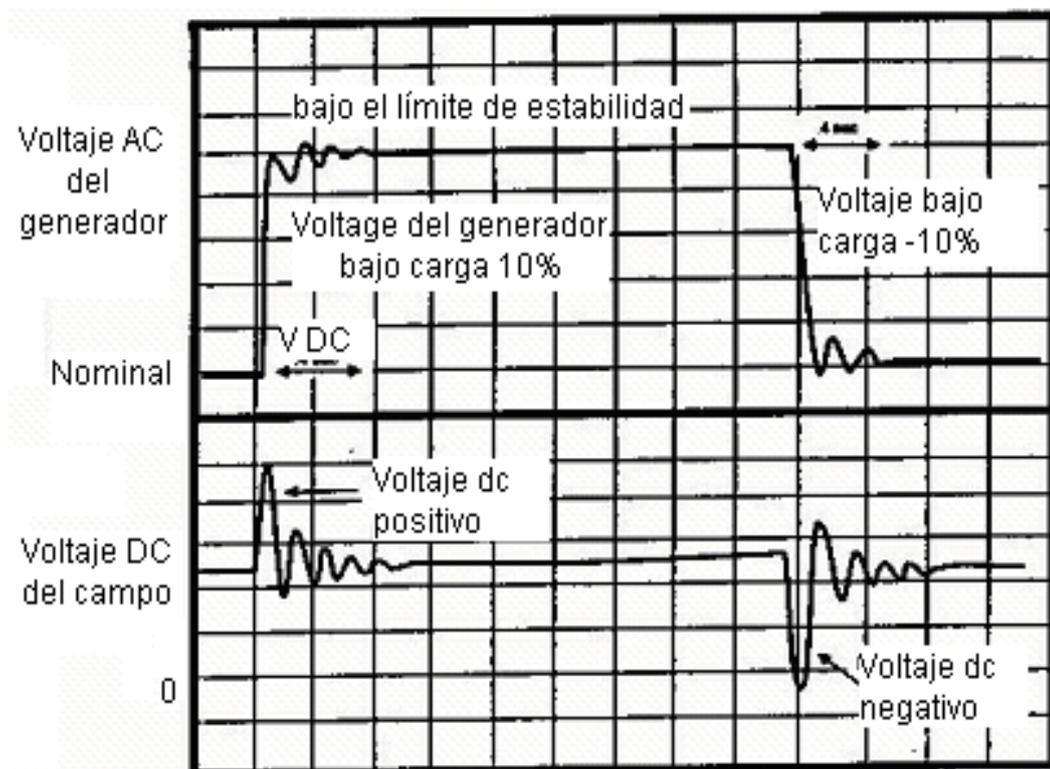


Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 5.

La condición de máxima conducción del SCR ocurre cuando el voltaje del generador empieza a caer tal como ocurre durante una falla en el sistema. En la figura 30 se muestra la salida típica de un *punte rectificador de 6 SCR* en un sistema en el que el voltaje del generador ha caído en los puntos A, B y C. Nótese cómo el ángulo de conducción cambia de 0 a 60 grados positivos consecuencia de que los comandos del regulador automático de voltaje suben la potencia de excitación del campo.

La figura 31 muestra el desempeño de un *punte rectificador de 6 SCR* para un generador hidroeléctrico de 42 MW.

**Figura 31. Desempeño de un puente rectificador de 6 SCR para un generador hidroeléctrico de 42 MW**



Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 5.

Nótese que en la figura 31 con un incremento del 10% del voltaje, la excitación estática fuerza momentáneamente el voltaje positivo máximo en el campo para una normalización rápida del nuevo voltaje del generador. El voltaje nominal se recupera en 0.4 segundos con menos del 1% de pérdida de carga.

Durante un transiente por conexión de carga, el comportamiento del *punteo rectificador de 3 SCR* y el del *punteo rectificador de 6 SCR* es básicamente idéntico. Ambos fuerzan momentáneamente el voltaje positivo dentro del campo.

El desempeño en un transiente por rechazo de carga diferencia al *punteo rectificador de 3 SCR* del *punteo rectificador de 6 SCR*. Con un *punteo rectificador de 3 SCR* el sobrevoltaje de terminales podría haber subido de 10% a 20% arriba del voltaje nominal de terminales y el tiempo de recuperación del voltaje sería de 2 a 3 veces mayor al que se tendría con un *punteo rectificador de 6 SCR*.

En máquinas pequeñas la diferencia del desempeño del *punteo rectificador de 6 SCR* comparado con el *de 3 SCR* es relativamente mínima, porque la constante principal de tiempo tiende a ser menor que 2 segundos. Con máquinas mayores que 20 MVA estas constantes de tiempo tienden a ser más largas.

El ajuste de tiempo mayor que introduce un *punteo rectificador de 3 SCR* disminuye la habilidad del sistema de proveer una recuperación rápida del voltaje. Una recuperación lenta durante oscilaciones en el sistema de potencia no es recomendable cuando la estabilización óptima es crítica.

Debido a que con un *punte rectificador de 6 SCR* el voltaje de campo puede variar en ambas direcciones, positiva y negativa, el sistema de excitación se convierte más receptivo a cambios de carga en el sistema de potencia, obteniéndose una reducción rápida del flujo de campo del generador, por lo tanto, una recuperación de extrema rapidez del voltaje del generador.

### **2.2.6. Transformadores de sensado**

Los transformadores de sensado proveen aislamiento eléctrico y el voltaje requerido por los instrumentos del generador y el regulador automático de voltaje. Se pueden sensar una o las tres fases de voltaje del generador dependiendo de las necesidades de diseño que se presenten. Regularmente los transformadores de sensado son transformadores de potencial equipados con taps para ajustes que van de 100 a 600 voltios.

### **2.2.7. Señal de paralelismo**

Cuando los generadores operan en paralelo ya sea entre sí o en una barra infinita, es deseable que compartan en proporciones iguales la carga reactiva común. Esto se logra con la adición de la señal de paralelismo al regulador de voltaje del sistema de excitación de cada generador que opera en paralelo.

Esta señal es una cantidad de corriente derivada de un transformador de corriente instalado en la salida principal del generador, generalmente ubicado en la fase central, que se suma vectorialmente con el voltaje derivado de los transformadores de sensado. Esta señal habilita a la excitación permitiendo corregir la salida del generador para balancear la cantidad de potencia reactiva que se genera entre máquinas sincronizadas.

### **2.2.8. Regulador automático de voltaje**

La función del regulador automático de voltaje es rectificar y filtrar una muestra del voltaje del generador y compararla con una referencia estable de Vdc. Si la comparación de la muestra de voltaje del generador con el voltaje de referencia determina que el voltaje del generador es incorrecto se produce una señal de error.

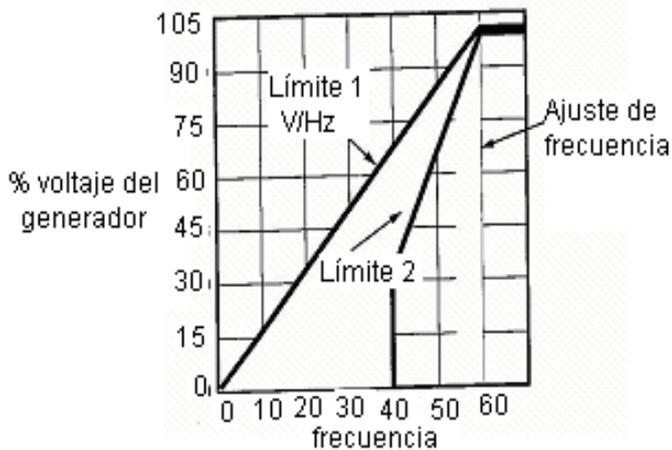
Si el interruptor auto base está cerrado la señal de error pasa al circuito de ajuste según se observa en el diagrama de bloques de la figura 26. Aquí se maneja la señal de control para que la salida del puente rectificador de potencia cambie adecuadamente para restaurar el nivel de voltaje deseado.

Una operación manual o un control remoto ajustable permite el ajuste del voltaje del generador local o remotamente. Otra señal generada en el circuito de ajuste y derivada del estabilizador de la red, puede ser dirigida al regulador automático de voltaje para prevenir inestabilidad en el sistema.

### **2.2.9. Limitador de baja frecuencia**

Cuando un generador está manteniendo un voltaje promedio de salida, pero la frecuencia cae debajo de los límites recomendables, equipos como motores y transformadores conectados a su salida pueden ser dañados. La función del limitador de baja frecuencia es tratar de evitar sobre flujos de corriente en el generador, causados por un decrecimiento en el voltaje de terminales cuando la frecuencia del generador cae abajo del 90% del valor establecido. La característica voltaje / frecuencia típica de un limitador de baja frecuencia se muestra en la figura 32.

**Figura 32. Característica voltaje / frecuencia de un limitador de baja frecuencia**



Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 8.

Como se puede observar en la figura 32 este limitador de baja frecuencia tiene dos pendientes. La pendiente 1 puede ser aplicada a un sistema primotor de gas, vapor o hidroeléctrico mientras que la pendiente 2 puede ser aplicada a un diesel.

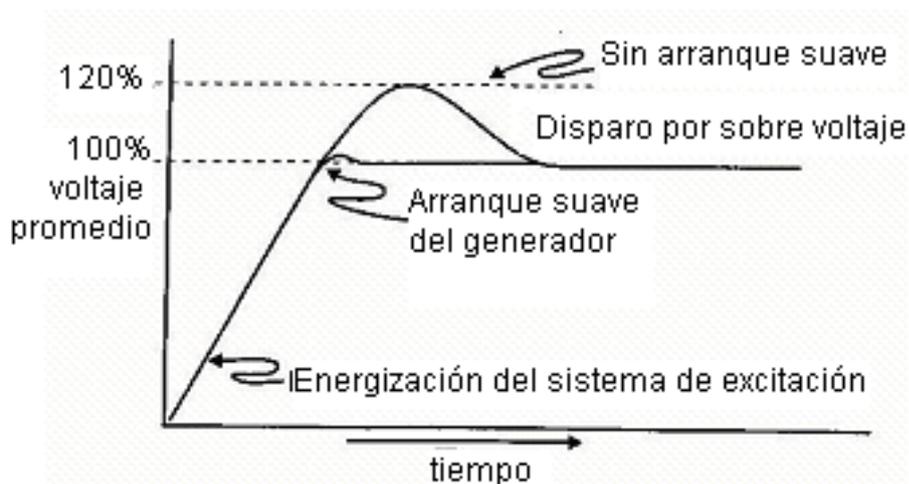
### 2.2.10. Arrancador suave de voltaje

En muchos sistemas es común ver que el voltaje del generador sube bastante cuando se energiza el sistema de excitación. El voltaje del generador puede llegar a subir hasta un 15% ó 20% arriba de su valor nominal antes de estabilizarse en el valor de estado estable.

Este sobre tiro del voltaje o sobrevoltaje en el generador se produce cuando el sistema de excitación está iniciando la energización, se debe a que la excitación estática inyecta al campo del generador una gran cantidad de potencia para llegar a alcanzar el voltaje de estado estable.

El arranque suave de voltaje es importante porque los sobre voltajes pueden estresar a los devanados de la máquina y también pueden provocar efecto corona (ionización del aire debido a un alto voltaje que afecta la vida del aislamiento). En la siguiente figura se muestra la curva que se produce cuando se energiza el sistema de excitación y el recorte que se consigue con el arrancado suave de voltaje.

**Figura 33. Curva producida cuando se energiza el sistema de excitación**



Fuente: Basler Electric Company. **Application of static excitation.** Página 9.

En la figura 33 se observa claramente que cuando se energiza la excitación hay un sobre voltaje que llega al 120% del valor nominal que se logra recortar con el arrancador suave de voltaje.

### **2.2.11. Control base y circuito de encendido**

La función del control base y circuito de encendido es generar pulsos de encendido con un tiempo ajustable relacionado con el disparo de los SCR.

Gracias a los pulsos generados por el control base y circuito de encendido es que hay una salida balanceada del puente rectificador de potencia que se incrementa o reduce respondiendo a las señales de comando enviadas por el circuito de disparo.

Una de estas señales tomada del potenciómetro control base, controla la excitación del generador cuando el regulador automático de voltaje no está en uso.

#### **2.2.12. Fuente de alimentación regulada**

La función de la fuente de alimentación regulada es abastecer al regulador automático de voltaje con una señal de Vdc estable para que los circuitos electrónicos no sean afectados por las variaciones del voltaje del generador.



### **3. ASPECTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR EN EL REEMPLAZO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN ROTATIVO POR UN SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICO**

Los sistemas de excitación estáticos facilitan una rápida recuperación del voltaje del generador minimizando las variaciones de voltaje que éste pudiera introducir al sistema. Esto se debe a que la corriente dc es aplicada directamente al campo del generador en lugar de aplicarse al campo de la excitación como ocurriría con un sistema de excitación rotativo.

La anterior consideración es una de las principales ventajas que se tiene con la utilización de los sistemas de excitación estáticos, ya que se elimina la constante de tiempo del sistema de excitación rotativo, con esto la respuesta del sistema de generación ante las variaciones dinámicas del sistema de potencia mejora sustancialmente.

Por otro lado, el hecho de que el funcionamiento del sistema de excitación estático sea a base de semiconductores de potencia implica una mayor eficiencia en la operación del sistema de generación. Esto se debe a que se reduce el número de watts perdidos en calor, por lo que una cantidad mayor de kilowatts útiles se tendrán en la salida del generador por cada caballo de potencia en su entrada.

En las siguientes secciones del presente capítulo se tratarán los aspectos técnicos que se deben de tomar en cuenta cuando se reemplaza un sistema de excitación rotativo por uno estático para mejorar el sistema de generación.

### **3.1. Consideraciones mecánicas**

Cuando se implementa un nuevo dispositivo eléctrico o electrónico por lo general no se toman en cuenta las consideraciones mecánicas, a pesar de que son importantes debido a que inciden en el funcionamiento y tiempo de vida del dispositivo.

En el caso de un sistema de excitación estático se deben tomar en cuenta las temperaturas máxima y mínima a la que estará expuesto, ya que operará bajo el mismo rango de temperatura ambiente que el generador. La mayoría de sistemas de excitación estáticos están diseñados para operar a temperaturas que van desde  $-40$  hasta  $70$  grados centígrados.

Si las condiciones ambientales exceden los límites de temperatura de diseño es necesario controlar el medio ambiente en donde será instalado el sistema de excitación, una alternativa podría ser calentar o enfriar el interior del panel en donde esté instalado. Con el control de la temperatura se logra mejorar la confiabilidad del sistema en comparación con un sistema instalado en un ambiente no controlado.

La humedad es otro factor que puede afectar la operación del sistema de excitación. Generalmente la humedad es un problema cuando alcanza niveles de condensación. Una práctica común para corregir este problema es utilizar calefactores y termostatos ajustados para mantener el interior del panel del sistema de excitación levemente más caliente que la temperatura ambiente del exterior, de ese modo se evita que la humedad se condense en el sistema de excitación.

El polvo y la suciedad que pudieran existir en la planta generadora afectan a los dispositivos del sistema de excitación. Con un sistema de aire acondicionado se puede mantener el equipo bajo una condición de temperatura óptima, además se puede filtrar el aire evitando que polvo y suciedad contaminen al sistema de excitación. El filtro del sistema de aire acondicionado debe ser limpiado periódicamente para que su funcionamiento sea el adecuado.

El último factor a tomar en consideración, pero no menos importante que los anteriores, es el espacio físico del que se dispone para instalar el sistema de excitación estático. En instalaciones nuevas esto no es un problema ya que en el diseño debería estar considerado el espacio para la ubicación de la excitación estática. Cuando el sistema de excitación estático sustituye a un sistema de excitación rotativo, existe la posibilidad de que se pueda utilizar el espacio que ocupa el sistema de excitación rotativo, de lo contrario se debe proceder a estudiar cuál sería la mejor solución para el caso en particular.

### **3.2. Consideraciones eléctricas**

En la presente sección se expondrán los requerimientos eléctricos que hay que tomar en cuenta para la instalación de un sistema de excitación estático en un generador síncrono.

#### **3.2.1. Medición de voltaje y corriente del estator**

Un sistema de excitación estático debe contar con un medio para medir el voltaje y la corriente del estator del generador síncrono.

El voltaje y la corriente del estator tienen magnitudes que no pueden ser medidas directamente por el sistema de excitación, por lo tanto es necesario utilizar transformadores de potencial y transformadores de corriente, para reducir el voltaje y la corriente respectivamente, a niveles adecuados que puedan ser utilizados por el sistema de excitación estática.

Estos transformadores generalmente no forman parte del sistema de excitación estática. Usualmente se encuentran ubicados cerca del interruptor principal o en los paneles de conexión del generador.

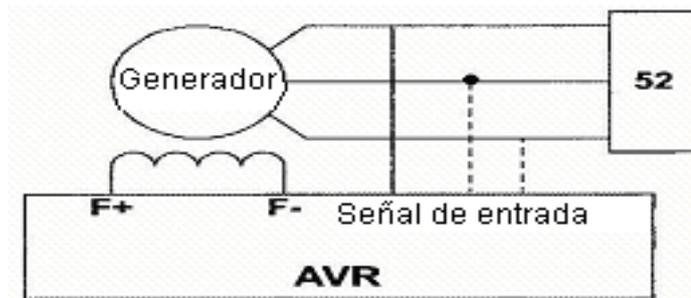
Dado que el desempeño del sistema de excitación debe ser óptimo, la calidad de la medición del voltaje y la corriente del estator del generador debe ser precisa. En un sistema de excitación estático el máximo error permitido en la precisión de medición de los transformadores de potencial y de los transformadores de corriente es del 1%, por lo que al instalar un sistema de excitación estático es necesario tomar en cuenta que se cumpla con este requerimiento.

Cuando se sustituye un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático es casi seguro que pueden ser utilizados los transformadores de potencial y los transformadores de corriente existentes. Esto se debe a que el sistema de excitación estático representa una carga mucho menor para los transformadores de voltaje y de corriente que la que representa el sistema de excitación rotativo, por lo tanto el porcentaje de error en la medición tiende a reducirse a menos del 1%, que es lo requerido.

Las señales de los transformadores de potencial y de los transformadores de corriente pueden ser tomadas de tres formas diferentes dependiendo de los criterios de diseño y de las condiciones existentes en la instalación.

Cuando las condiciones presentadas en el generador permiten que únicamente sea medida una fase, las señales entran en el sistema de excitación como se muestra en la siguiente figura.

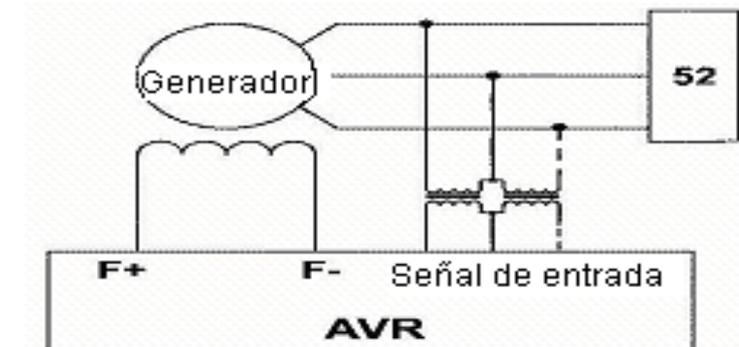
**Figura 34. Medición de una fase para el sistema de excitación**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 4.

Hay instalaciones en donde la medición del voltaje del generador se realiza por medio de dos transformadores de potencial conectados en delta abierta. Esta conexión permite tomar la muestra del voltaje de las tres fases del generador utilizando únicamente dos transformadores tal y como se muestra en la siguiente figura.

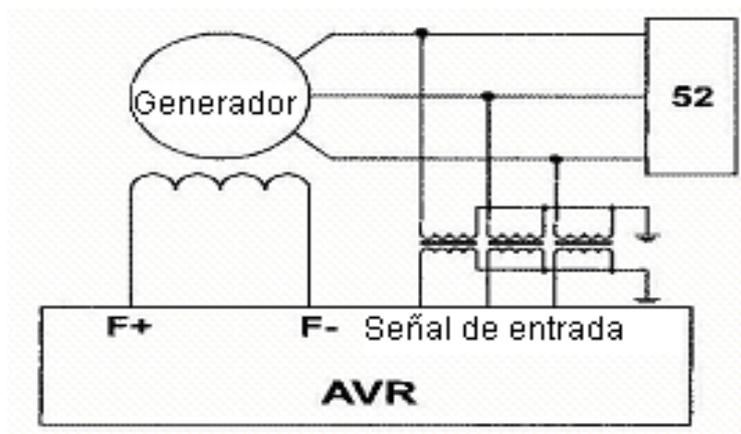
**Figura 35. Medición con conexión delta abierta para el sistema de excitación**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 4.

La medición también puede ser tomada mediante el uso de un transformador de potencial por cada fase, esta conexión aumenta la confiabilidad del sistema de excitación en comparación con las dos conexiones mencionadas anteriormente.

**Figura 36. Medición con un transformador por fase para el sistema de excitación**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 5.

### 3.2.2. Parámetros del campo del generador

Para especificar una excitación estática es necesario conocer los valores de la corriente y el voltaje del campo del generador, estos valores por lo general se pueden leer de la placa de características del generador o pueden ser consultados al fabricante.

Otro parámetro determinante para la especificación del sistema de excitación estático es la resistencia de campo del generador, cuyo valor debe ser medido utilizando un medidor de resistencias bajas (mili-ohmímetro), un tipo puente de Weasthone o tomarse de la información técnica proporcionada por el fabricante.

Es importante tomar en cuenta que los conductores utilizados para realizar las conexiones de la excitación con el campo del generador pudieran introducir una resistencia adicional. Debido a esto se debe tomar en cuenta la resistencia que los conductores puedan introducir, por lo que es necesario dimensionarlos para que sea la menor posible. La resistencia que los conductores introducen al sistema de excitación estático típicamente está en el rango de 0.25 a 1 ohmio.

El cableado del sistema de excitación estático a las escobillas y a los anillos deslizantes debe ser muy corto para prevenir que la corriente de campo sea limitada por la resistencia de los cables.

### **3.2.3. Potencia para el sistema de excitación**

Existen algunas alternativas para el suministro de potencia eléctrica a un sistema de excitación estático. La más común es tomar la potencia eléctrica del estator del generador por medio de una conexión en paralelo. Debido a que las plantas generadoras normalmente tienen voltajes entre 5 y 15 kV, se necesita de un transformador para reducir el voltaje a valores que puedan ser utilizados por el sistema de excitación estático.

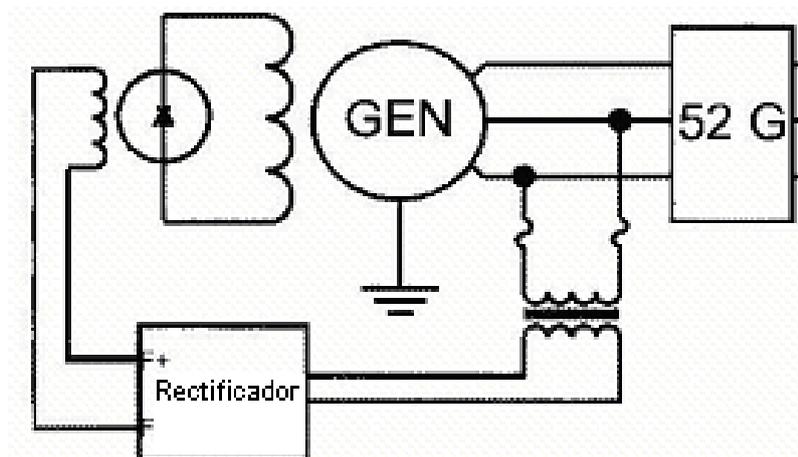
En sistemas de excitación rotativos la potencia eléctrica requerida puede ser lo suficientemente pequeña como para ser tomada de una sola fase del generador, también puede ser que se requiera potencia trifásica, esto dependerá del diseño del sistema. En sistemas de excitación estáticos la potencia eléctrica requerida es trifásica.

Cuando se obtiene la potencia eléctrica directamente del estator del generador, durante el arranque de la unidad un sistema de excitación estático necesita una fuente externa que le suministre corriente directa durante un período corto. Esta fuente externa es llamada activador del campo del generador dado la función que realiza.

La activación del campo del generador normalmente es mediante un banco de baterías, éste suministra la potencia eléctrica necesaria al sistema de excitación mientras se levanta el voltaje del generador durante su excitación inicial.

En la siguiente figura se muestra el esquema del suministro de potencia eléctrica al sistema de excitación por medio de una conexión en paralelo.

**Figura 37. Alimentación de un sistema de excitación por medio de una conexión en paralelo**



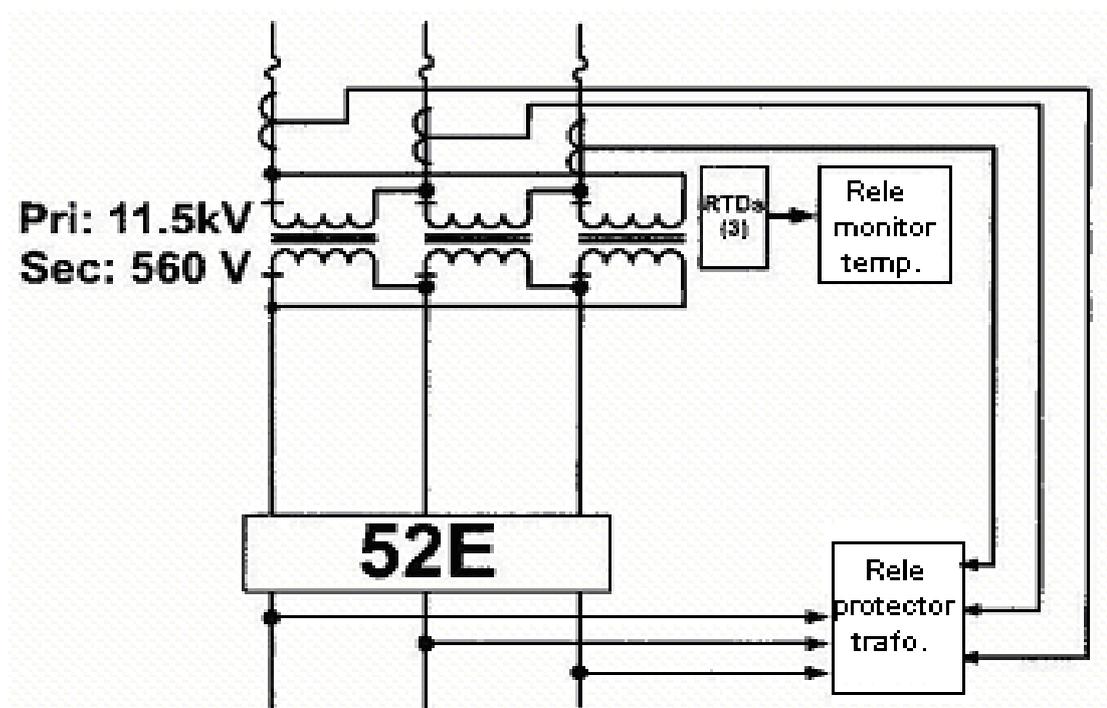
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 8.

Como se observa en la figura 37 el transformador es protegido con fusibles. Los fusibles pueden venir incluidos como parte del equipo del sistema de excitación estático o pueden ser suministrados por la planta generadora.

El transformador utilizado para este propósito normalmente es diseñado con un blindaje entre los devanados del primario y los del secundario, el blindaje se debe aterrizar. Con esto se logra que una falla en el aislamiento de alta tensión fluya a tierra por el blindaje y los fusibles del primario actúen, protegiendo a los devanados del transformador y al equipo conectado en baja tensión.

El transformador podría incluir para mayor seguridad, protección térmica en sus devanados, interruptor de desconexión del primario, fusibles y transformadores de corriente para protección diferencial por sobre corrientes. En la siguiente figura se muestra el esquema del transformador con sus protecciones.

**Figura 38. Esquema del transformador de alimentación para el sistema de excitación con sus protecciones**

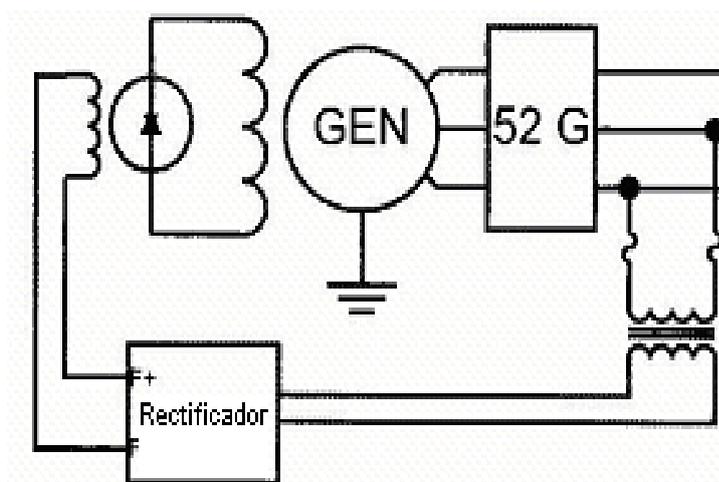


Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 8.

Una segunda opción para obtener potencia eléctrica para el sistema de excitación es mediante la línea o barra de salida del interruptor principal del generador. Utilizando esta forma de energizar al sistema de excitación se evita la necesidad del uso del banco de baterías para activar al sistema durante el arranque de la unidad. Este método puede ser utilizado únicamente si el generador es arrancado cuando la barra que lo alimenta está energizada.

En la siguiente figura se muestra el esquema de la alimentación por medio de barra o línea.

**Figura 39. Alimentación de un sistema de excitación por medio de la barra o línea de salida del interruptor principal del generador**



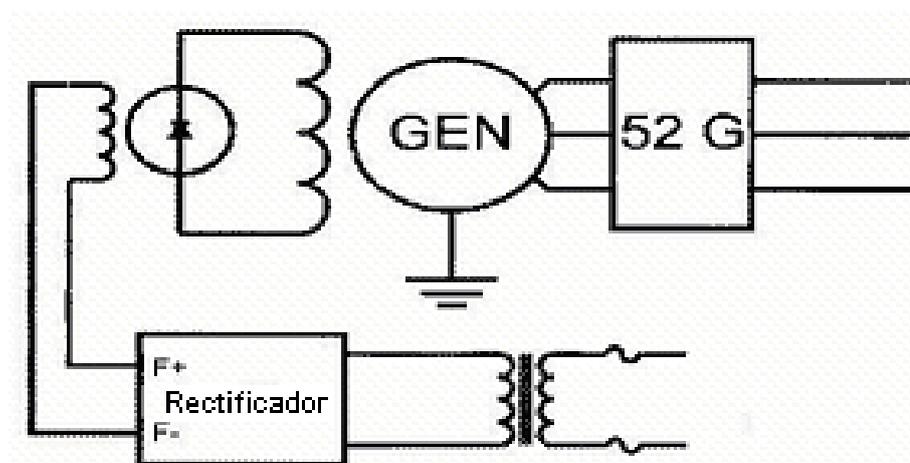
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 9.

Como tercera opción para el suministro de potencia eléctrica a un sistema de excitación estático, se puede utilizar una planta de potencia eléctrica de bajo voltaje. La principal razón para el uso de la planta de potencia eléctrica, es que se ahorra el costo del transformador requerido para tomar la potencia eléctrica del estator del generador o de la línea de salida del interruptor principal, además se elimina la necesidad de las baterías para activar al campo del generador durante el arranque de la unidad.

Hay que tener el cuidado de que la planta de potencia eléctrica no tenga otras cargas conectadas además del sistema de excitación estático. Esto debido a que el funcionamiento del sistema de excitación estático se basa en técnicas de conmutación y control por medio de SCRs de potencia, lo que genera una gran cantidad de armónicas que pudieran afectar a otras cargas conectadas a la planta de potencia eléctrica.

En la siguiente figura se muestra un esquema de la alimentación del sistema de excitación estático por medio de una planta externa de potencia eléctrica.

**Figura 40. Alimentación del sistema de excitación por medio de una planta externa de potencia eléctrica**



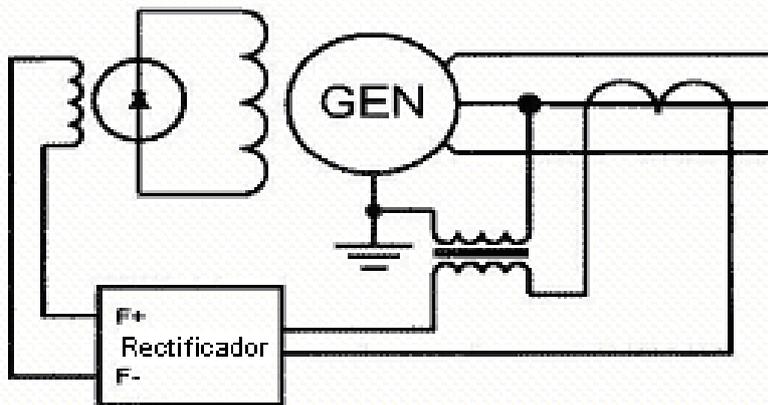
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 10.

La última opción para suministrar potencia eléctrica a un sistema de excitación estático es mediante un esquema conocido como *current boost*. Este sistema utiliza la corriente del estator del generador para alimentar al sistema de excitación.

El sistema *current boost* consiste en un transformador de corriente conectado en cada fase del generador, los transformadores bajan la corriente del generador al nivel requerido por la excitación, antes de entrar al sistema de excitación la corriente es rectificadora.

El sistema *current boost* se puede aplicar también a sistemas de excitación rotativos. En la siguiente figura se muestra el esquema de una excitación alimentada por medio de un sistema *current boost*.

**Figura 41. Esquema de alimentación por medio del sistema *current boost*.**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 11.

### 3.2.4. Control del sistema de excitación

Los sistemas de excitación estáticos son diseñados para el uso de tecnología basada en microprocesadores para su control; sin embargo, también son compatibles con los sistemas de control tradicionalmente utilizados ya que en muchas plantas generadoras los operadores los prefieren.

Entre estos sistemas de control tradicionalmente utilizados está el control de la excitación por medio del interruptor de ajuste subir- bajar con el que se controla la salida de la excitación.

Para ajustar el regulador de voltaje tradicionalmente se utiliza un interruptor con manivela que con un movimiento rápido hacia arriba y regresándolo nuevamente a su posición original, ajusta la salda del regulador de voltaje, este ajuste depende de la precisión que el operador tenga en la lectura de los instrumentos de medición del generador.

Las funciones de control pueden ser conectadas desde el cuarto de control de la planta generadora al sistema de excitación estático usando las técnicas de cableado tradicionales.

El cableado tradicional puede ser sustituido utilizando las ventajas que presenta la comunicación digital, reduciendo el número de cables a dos que conectan el puerto de comunicación del controlador basado en microprocesadores a una computadora.

Utilizando un software gráfico de interfase se pueden crear pantallas con las gráficas de las plantas generadoras con su medición, alarmas y otras funciones que se necesiten. El control de la unidad se puede realizar por medio de botones en la pantalla para efectuar cambios, restablecer alarmas, incrementar o disminuir el punto de ajuste de la excitación y muchas otras funciones. Todo esto es posible gracias a la utilización de la tecnología basada en microprocesadores disponible para los sistemas de excitación estáticos.

### **3.2.5. Modos de operación**

Los modos en que normalmente puede operar un sistema de excitación, son en modo de regulación automática de voltaje (AVR) y en modo de control manual de voltaje (MVC). Ambos modos de operación pueden ser utilizados en sistemas de excitación estáticos y en sistemas de excitación rotativos.

En los sistemas de excitación modernos el control manual de voltaje es más sofisticado que el control de voltaje por medio de reóstatos utilizado por los sistemas de excitación antiguos.

El modo de control manual de voltaje se realiza por medio de ajustes disponibles en el regulador automático de voltaje. El regulador automático de voltaje está equipado con compensadores de caída de voltaje, estos compensadores facilitan al operador del generador el control de la potencia reactiva mientras el generador está en línea o sincronizado con el sistema de potencia.

En el modo de regulación automático de voltaje intervienen la mayoría de los dispositivos que forman parte del sistema de excitación, en este modo de operación el sistema de excitación censa las condiciones existentes en la salida del generador y las ajusta automáticamente a los valores requeridos.

Otros modos de operación existentes, son la regulación de potencia reactiva y el control del factor de potencia. Bajo estos modos de operación la salida de la unidad generadora cambia con pequeñas fluctuaciones de voltaje en la red del sistema de potencia.

En generadores pequeños con poca capacidad esta variación casi no se nota. En generadores grandes estos modos de operación no son adecuados debido a que una variación en su salida contribuiría a incrementar la magnitud de las fluctuaciones de voltaje.

### **3.2.6. Limitadores**

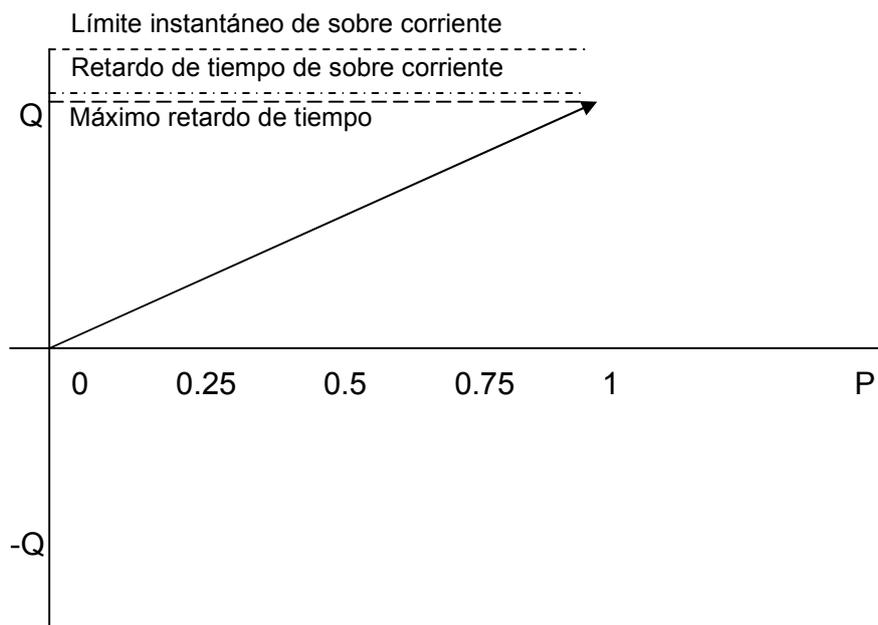
Como una forma de proteger al generador para que no exceda sus límites de operación, los sistemas de excitación estáticos están equipados con limitadores de sobre excitación y de sub excitación. Estas protecciones se hacen necesarias ya que cuando un generador se conecta a la red eléctrica, las condiciones de operación que se presentan pueden llevar al generador a operar más allá de sus límites.

La sobre excitación del generador está limitada por los efectos que puede causar el sobre calentamiento de los devanados del campo en el rotor. El calentamiento de los devanados de campo no es instantáneo, la condición de calentamiento puede durar entre uno y diez segundos. Si las características térmicas del devanado de campo son conocidas, es posible maximizar el uso de la capacidad de la máquina usando un limitador multi-nivel de la corriente de campo.

Regularmente el limitador de sobre excitación está ajustado para operar a dos o tres niveles diferentes de corriente de campo. En el nivel más alto el limitador actúa sin ningún retardo de tiempo para bajar la corriente de campo a un nivel adecuado de operación. En el nivel medio el limitador actúa con algún retardo de tiempo permitiendo que la corriente de campo conserve su magnitud por algunos segundos antes de ser reducida a un nivel adecuado de operación. En el nivel más bajo el retardo de tiempo es mayor y la corriente conserva su magnitud más tiempo. Gracias al limitador de sobre excitación el generador puede operar al máximo sin el riesgo de que los embobinados del campo sufran daño.

En la siguiente figura se muestra una gráfica que ilustra el modo de operación de un limitador de sobre excitación.

**Figura 42. Gráfica de la operación del limitador de sobre excitación**



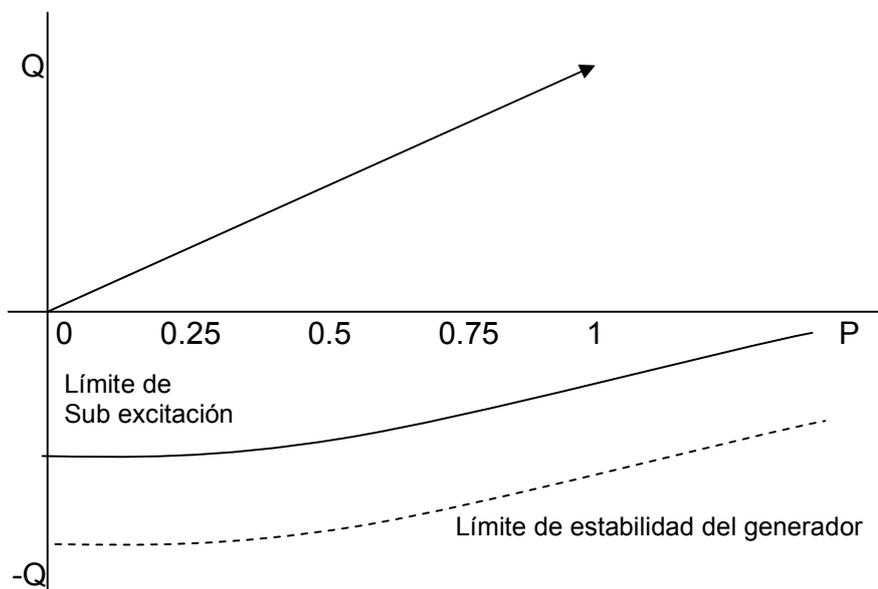
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 15.

Cuando el generador opera en paralelo en una red eléctrica, la reducción de la excitación en el generador reduce la potencia reactiva en atraso que el generador entrega. Si la excitación es menor, el generador puede llegar a entregar potencia reactiva con factor de potencia en adelanto, visto desde la red eléctrica, absorbería potencia reactiva en atraso. El limitador de sub excitación mantiene una mínima cantidad de excitación para prevenir que la unidad pierda el sincronismo o que se produzca en ella una falla causada por el deslizamiento de sus polos.

Monitoreando la carga activa y reactiva del generador, el limitador de sub excitación puede controlar la reducción de la corriente de excitación y prevenir que la operación de la unidad se acerque demasiado a una zona peligrosa.

En la siguiente figura se muestra una gráfica que ilustra el modo de operación de un limitador de sub excitación.

**Figura 43. Gráfica de la operación del limitador de sub excitación**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 16.

Un tercer tipo de limitador puede ser requerido para algunas aplicaciones. Este limitador es el de la corriente del estator. Cuando este limitador detecta que la corriente del estator excede su valor máximo, la excitación es reducida para mantener a la corriente del estator en su máximo valor de operación. Este limitador de corriente del estator es utilizado cuando la corriente de falla a la que el generador está expuesto es muy alta.

### **3.2.7. Protecciones del sistema de excitación**

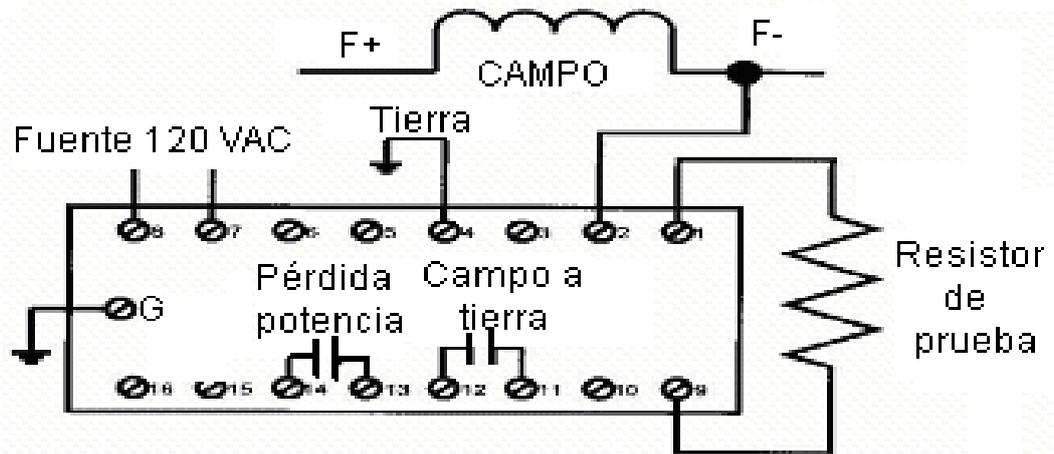
El generador debe ser protegido de fallas que el sistema de excitación o sus dispositivos asociados pudieran ocasionar. A continuación se describen las funciones de protección con que actualmente vienen equipados los sistemas de excitación estáticos.

La primera función de protección que será descrita es el relevador de falla a tierra en el campo. El funcionamiento de esta protección se basa en la conexión de una fuente de bajo voltaje entre un extremo del campo del generador y la tierra. El campo supuestamente debe estar aislado de la tierra, por lo tanto la fuente de voltaje no debe provocar bajo ninguna condición que una corriente fluya.

Si fluye alguna corriente significa que el aislamiento a tierra del campo ha fallado, esto es detectado por el relevador que se acciona desconectando al sistema de excitación. La corriente que fluye cuando falla el aislamiento de tierra por ser provocada por la fuente de bajo voltaje es muy pequeña, por lo tanto no representa ningún riesgo para el campo o para el sistema de excitación.

Es imperativo que se corrija la falla a tierra del campo lo antes posible, ya que el daño que éste podría sufrir puede ser muy grave y su reparación muy costosa. A continuación se muestra el esquema de la protección por falla a tierra en el campo.

**Figura 44. Esquema de la protección de falla a tierra del campo del generador**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 17.

La medición del voltaje para el regulador automático de voltaje es crítica, si se abre alguno de los fusibles de los transformadores de potencial la consecuencia sería una sobre excitación. Algunas unidades están equipadas con un doble banco de transformadores de potencial y utilizan un relevador de balance de fases para detectar la apertura de un fusible.

Debido a que la relevación y la protección dependen del voltaje de los transformadores de potencial, el relevador de balance de fases es usado para trasladar la carga de los transformadores de potencial fallados a los transformadores de potencial en servicio.

En un sistema de excitación estático, la pérdida de la señal de un transformador de voltaje podría significar que el sistema pase de operar en modo automático de regulación de voltaje a modo manual de control de voltaje. Debido a que el modo manual de control de voltaje no depende de la retroalimentación proveniente del voltaje de las terminales del generador, es seguro utilizarlo mientras se corrige la falla en los transformadores de potencial.

Si el control de la excitación automática incluye una función de monitoreo entre ambos modos de operación por lo regular se cuenta con un retardo de tiempo entre el cambio de un modo a otro, esto previene que el modo de operación manual siga incorrectamente la salida del regulador automático de voltaje.

Gracias al retardo de tiempo de la función de monitoreo, el modo de operación de control manual de voltaje inicia a funcionar en el mismo punto de operación en el que se encontraba el modo de regulación automático de voltaje antes de la falla en los transformadores de voltaje.

Los limitadores de la excitación también actúan para prevenir que el regulador automático de voltaje produzca que la excitación sea muy alta, pero normalmente su respuesta es muy lenta por lo que no son utilizados para librar fallas en los transformadores de potencial.

Un relevador de sobre excitación que realiza un monitoreo del voltaje del generador contra su frecuencia, generalmente es parte del sistema de protección del generador, sin embargo los sistemas de excitación estáticos incluyen relevadores de sobre corriente de campo y sobre voltaje de campo que pueden realizar esta función.

La protección de sobre corriente de campo es la que se utiliza mayormente, la razón es que normalmente existen variaciones significativas en el voltaje de campo que pudieran activar al relevador de sobre voltaje sin que necesariamente se trate de una falla, para que la relevación por sobre voltaje funcione correctamente es necesario incluir en el relevador un retardo de tiempo para que éste no se active con estas variaciones de voltaje de corta duración.

La operación del relevador de sobre corriente no es tan volátil, ya que la acción de la inductancia del campo impide cambios bruscos en la corriente. Bajo algunas condiciones de operación se hace necesario permitir que cantidades significativas de corriente fluyan, por lo que los relevadores de sobre corriente también incluyen algún retardo de tiempo.

En los sistemas modernos de excitación estáticos hay disponibles algunas funciones de protección no tradicionales por si fueran necesarias. Entre estas funciones de protección se encuentran relevadores de sobre y bajo voltaje del generador y un relevador de sobre temperatura. Estas funciones extras de protección, son una ventaja que brinda el uso de los sistemas de excitación estáticos.

### **3.2.8. Tolerancia a las fallas**

Si una máquina genera cantidades considerables de potencia eléctrica, el diseño del sistema de excitación debe contemplar la posibilidad de que parte de la excitación se pierda pero que la máquina permanezca en línea con la red del sistema de potencia. Para lograr esta tolerancia a las fallas hay que tomar en cuenta las consideraciones tratadas en los siguientes párrafos.

La electrónica de los sistemas de excitación estáticos y sus relevadores utilizan alguna fuente de potencia eléctrica para su control. Es imperativo que la pérdida de esta potencia eléctrica para control no inhabilite al sistema de excitación estático. Para lograr esto se pueden utilizar dos fuentes de potencia, una conectada permanentemente al sistema de excitación y la otra como una fuente de respaldo, la fuente de respaldo se conecta al sistema mediante una transferencia automática en caso de que la fuente de potencia permanente falle. La fuente de respaldo por lo general es un banco de baterías.

Una segunda opción para que la potencia eléctrica del sistema de excitación no falte es la utilización de una fuente de potencia ininterrumpida o UPS por sus siglas en inglés.

En la sección anterior se expuso que ante una falla que abra los fusibles de protección de los transformadores de potencial, el sistema de excitación estático puede cambiar de modo de operación en regulación automática de voltaje a control manual de voltaje. El modo de control manual de voltaje es una condición que no se desea ya que no se contribuye con la estabilidad del sistema de potencia, no obstante es de suma importancia como respaldo del regulador automático de voltaje para la tolerancia de fallas.

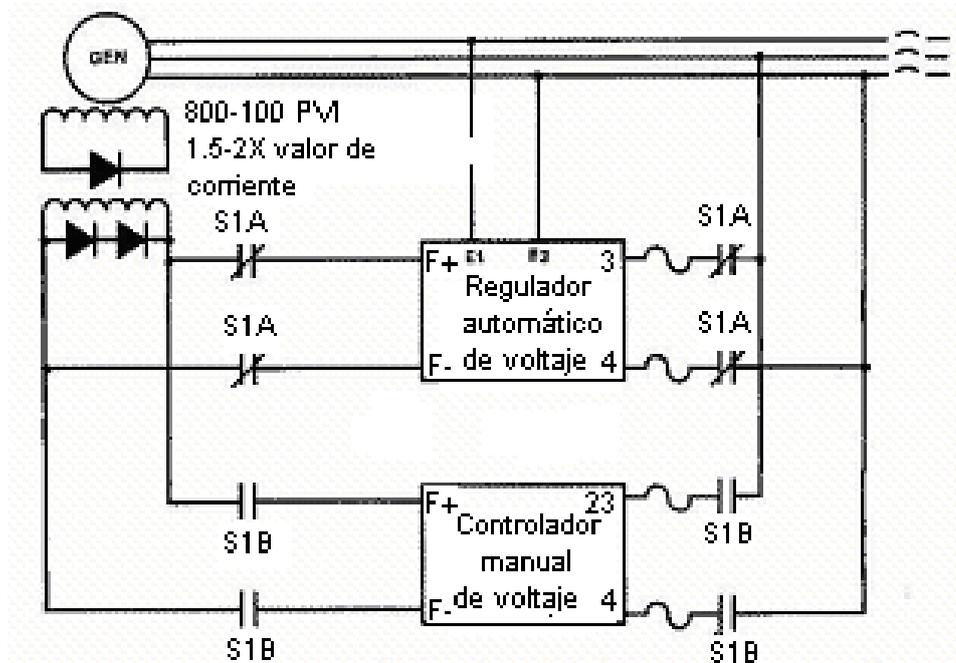
El respaldo del regulador automático de voltaje por medio del control automático de voltaje, se logra con esquemas implementados por el control a base de microprocesadores del sistema de excitación estático.

Un esquema comúnmente utilizado para respaldar al regulador automático de voltaje, es el llamado esquema de retroalimentación típico. Su operación consiste en cambiar al mismo tiempo la potencia del regulador automático de voltaje al control manual de voltaje y sus conexiones con el campo.

Este esquema se puede implementar también en sistemas de excitación rotativos, ya que las corrientes producidas durante los cambios son razonables y las funciones de regulación automática de voltaje y control manual de voltaje pueden ser localizadas en cajas negras separadas.

En la siguiente figura se muestra el esquema típico de retroalimentación utilizado para respaldar al regulador automático de voltaje con el control manual de voltaje.

**Figura 45. Esquema de retroalimentación típico**



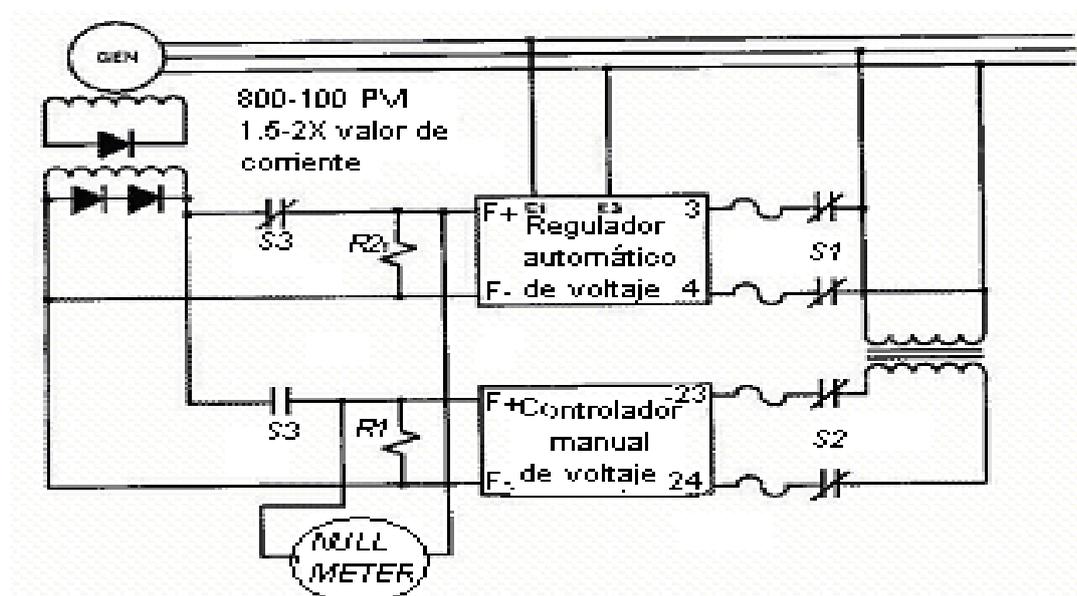
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 22.

Un dispositivo de medición conocido como *null-meter* o medición cero sirve para comparar dos señales de voltaje, su uso permite al operador cambiar la operación de la excitación de modo de regulación automático de voltaje a control manual de voltaje, esta transferencia es posible si el operador ajusta a cero la diferencia entre los dos señales de voltaje que entran al *null-meter*. Con este arreglo es posible realizar los cambios en el modo de operación del sistema de excitación cuando la máquina está a plena carga.

Para implementar este esquema se requiere de dos señales de voltaje, una proveniente del regulador automático de voltaje y la otra proveniente del control manual de voltaje. Adicionalmente, una resistencia de carga debe ser conectada en la salida de cada señal para que de ellas se tome la medición del *null-meter*.

Las salidas negativas de ambas señales son llevadas a un punto en común y el *null-meter* es conectado entre las dos señales positivas de voltaje. El *null-meter* indica la diferencia entre ambas señales de voltaje. En la siguiente figura se muestra un esquema de la transferencia con *null-meter*.

**Figura 46. Esquema de transferencia entre modos de operación con *null-meter*.**



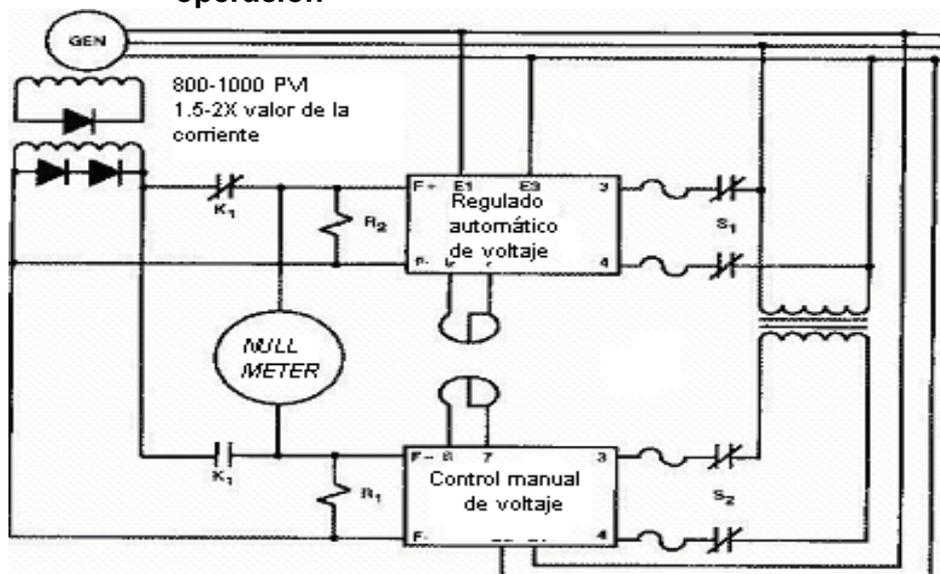
Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 22.

Si un operador puede realizar manualmente transferencias entre modos de operación con la ayuda de un *null-meter*, utilizando un dispositivo especialmente diseñado para monitorear la señal del regulador automático de voltaje y la señal del control manual de voltaje respaldado por el *null-meter*, se pueden realizar las transferencias automáticamente.

Una característica importante que presenta el esquema de transferencia automática entre modos de operación, es que incluye un retardo antes de que el control manual de voltaje siga al regulador automático de voltaje.

Un retardo de un segundo permite que un relevador de protección realice la transferencia. El retardo da al control manual de voltaje un lapso antes que opere, esto permite que el relevador se dispare y realice la transferencia sin que el control manual de voltaje siga la salida errónea del regulador automático de voltaje. En la siguiente figura se muestra el esquema de la transferencia automática entre modos de operación.

**Figura 47. Esquema de transferencia automática entre modos de operación**



Fuente: Basler Electric Company. **Designing and excitation system.** Página 24.

El esquema de transferencia automática entre modos de operación brinda al sistema de excitación una capacidad de retroalimentación óptima que permite que el generador contribuya confiablemente en la estabilidad del sistema.

Gracias a que los esquemas tratados anteriormente se pueden implementar con el control a base de microprocesadores, los sistemas de excitación estáticos ofrecen altos niveles de tolerancia a fallas mediante el soporte brindado al regulador automático de voltaje.



## **4. APLICACIÓN EN UN GENERADOR DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

En el presente capítulo se aplicarán las consideraciones técnicas para la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático expuestas en el capítulo III, para el caso de un generador del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

En la sección final del capítulo se tratarán las ventajas económicas que representa la implementación de un sistema de excitación estático.

### **4.1. Datos del generador**

Se trata de un generador síncrono que actualmente funciona con un sistema de excitación rotativo con escobillas. Se encuentra ubicado en la aldea de Santa María de Jesús del municipio de Zunil, del departamento de Quezaltenango, aporta al sistema nacional interconectado de Guatemala 2.75 MVA.

A continuación se listan los datos del generador.

Potencia aparente	2.75 MVA
Factor de potencia	0.8
Voltaje	2.3 KV
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de rotación	720 RPM
Corriente de excitación	288 A dc
Voltaje de excitación	115 V dc

## **4.2. Consideraciones mecánicas**

El sistema de excitación estático se ubicará en el interior de la casa de máquinas de la central generadora, por lo que la temperatura a la que estará expuesto se encuentra en un rango de 5 a 40 grados centígrados.

El sistema de excitación estático está diseñado para operar en un rango de temperatura de  $-25$  a  $50$  grados centígrados, por lo tanto la temperatura ambiente no será controlada.

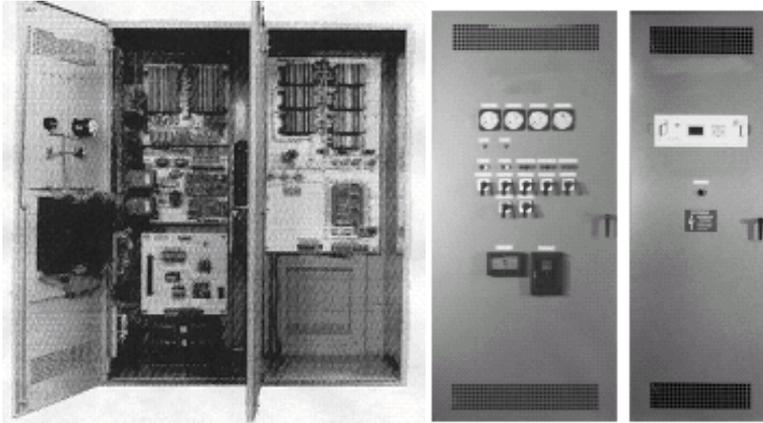
En la región en donde se encuentra ubicada la central generadora hay una humedad relativa promedio de 75%. Esto implica que existe un riesgo moderado de condensación sobre los dispositivos del sistema de excitación estático, por lo que en el interior de los gabinetes en donde se instalará el sistema habrá un calefactor con termostato para prevenir condensación.

El sistema de excitación estático deberá ser instalado en dos gabinetes tipo NEMA 1. Con esto se garantiza una adecuada ventilación y la protección de los dispositivos contra agentes ambientales externos como polvo y suciedad, que pudieran perjudicar su funcionamiento.

En uno de los gabinetes tipo NEMA 1 estará contenido el sistema de excitación estático y en el otro gabinete tipo NEMA 1 estará contenido el transformador que suministrará su potencia y los transformadores de voltaje para la medición del voltaje del estator.

En la siguiente figura se muestra el sistema de excitación estático contenido en los gabinetes tipo NEMA 1.

**Figura 48. Fotografía del sistema de excitación estático contenido en los gabinetes tipo NEMA 1**



Fuente: Basler Electric Company. **SSE instruction manual**. Página 1.

Se constató que hay suficiente espacio físico para la ubicación del sistema de excitación estático, por lo que no se requiere el desmontaje del sistema de excitación rotativo que actualmente opera, únicamente su desconexión eléctrica para deshabilitarlo.

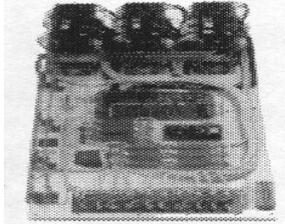
#### **4.3. Consideraciones eléctricas**

Tomando en cuenta los datos y características de operación del generador, el sistema de excitación estático será de 50 KW a un voltaje de 125 Vdc, con una capacidad nominal de corriente continua de 400 amperios. Su control será mediante un controlador basado en microprocesadores.

El sistema de excitación estático utilizará un puente rectificador de 6 SCR. Con el puente rectificador de 6 SCR se puede forzar el campo del generador positiva y negativamente para una rápida recuperación del voltaje.

En la siguiente figura se muestra la fotografía del puente rectificador de 6 SCR del sistema de excitación estático.

#### **Fotografía 49. Fotografía del puente rectificador de 6 SCR**



Fuente: Basler Electric Company. **SSE instruction manual**. Página 2.

La muestra de voltaje del estator del generador será tomada por medio de dos transformadores de voltaje 2400/120 Vac con una relación de 20:1, los transformadores serán protegidos con fusibles en el lado primario. La conexión a utilizar para los transformadores de voltaje será una conexión delta abierta.

La carga que el sistema de excitación estático representa para los transformadores de voltaje es de 10VA, éstos están diseñados para soportarla introduciendo un error en la medición menor al 1% requerido por el sistema de excitación estático.

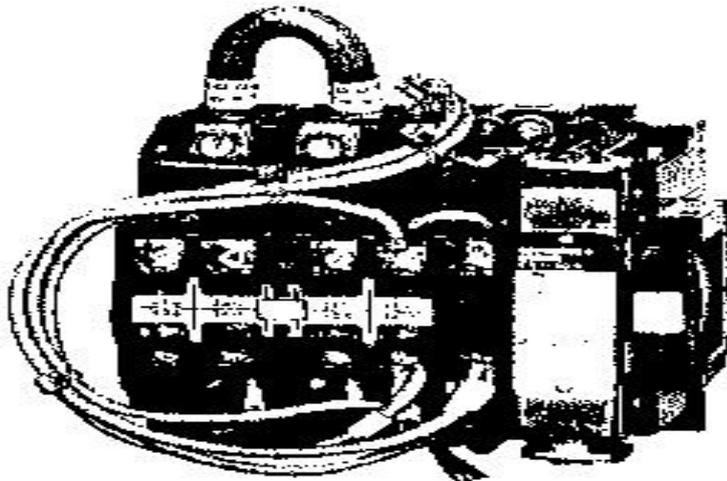
Para que la resistencia que introduce el cableado de control sea menor a 1 ohmio, se debe utilizar conductor de cobre calibre 16 AWG. El cableado del sistema de excitación a las escobillas del generador, se debe realizar con conductor de cobre calibre 500 kcmil con aislamiento para 600V, con este conductor se garantiza que la corriente de campo del generador no sea limitada por los conductores.

La potencia para el sistema de excitación estático será tomada con una conexión en paralelo a salida del generador, para este propósito se utilizará un transformador trifásico de 90KVA, 60 Hz, 2300 Vac en el lado primario y 160 Vac en el lado secundario. Su protección será por medio de fusibles en el lado del primario.

Dado que la alimentación del sistema de excitación estático se tomará de la salida del generador, para levantar el voltaje durante el arranque de la máquina se debe incluir un sistema de activación del campo del generador.

El sistema de activación del campo del generador estará formado por un banco de baterías de 125 Vdc con su salida conectada al activador del campo del generador. El activador del campo del generador será instalado en el gabinete en donde están los dispositivos del sistema de excitación estático, en la siguiente figura se muestra su fotografía.

**Figura 50. Fotografía del activador del campo del generador**

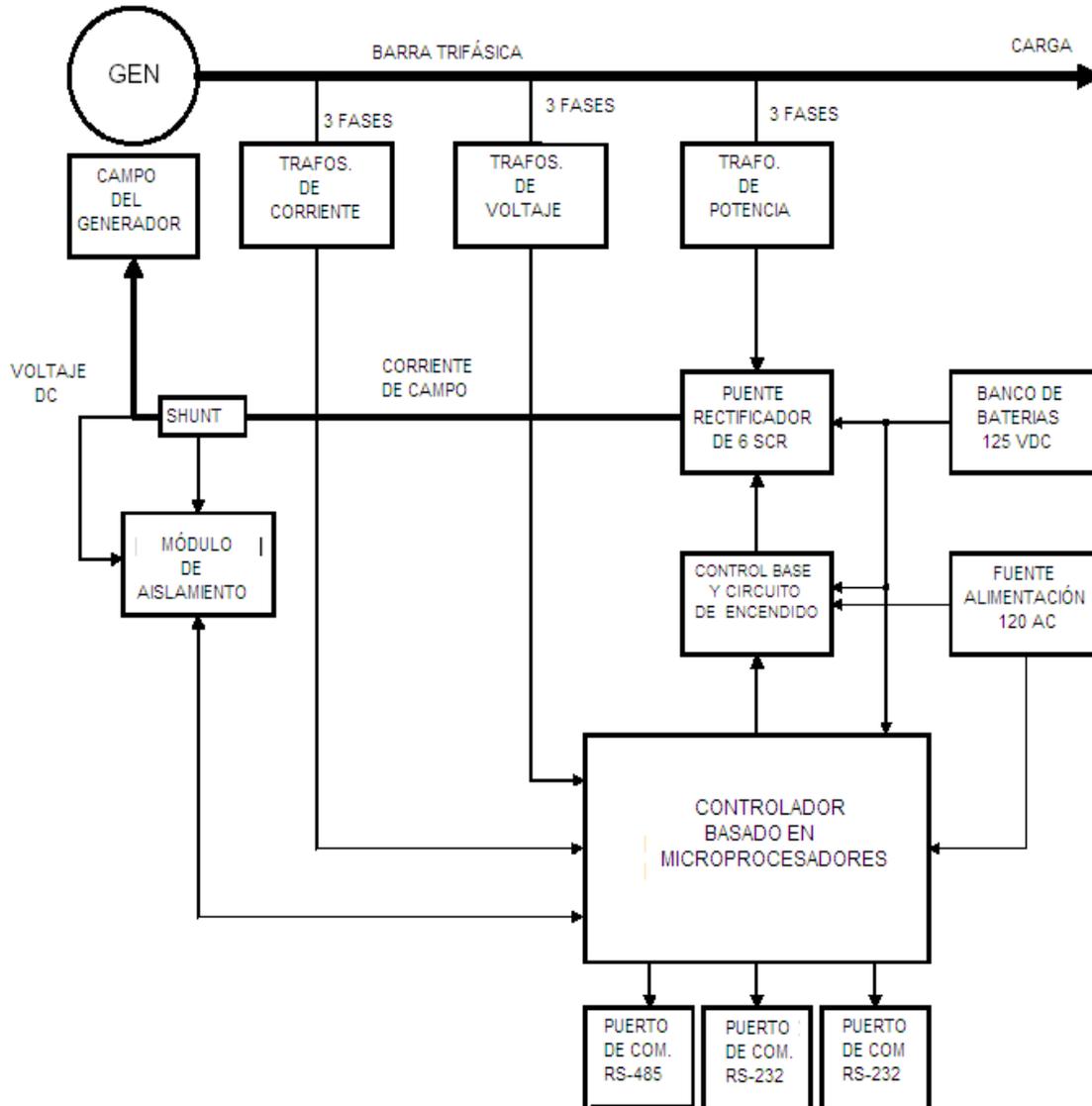


Fuente: Basler Electric Company. **SSE instruction manual**. Página 6.

El control del sistema de excitación estático se realizará por medio de un controlador basado en microprocesadores, este controlador recibe las señales de voltaje y corriente del estator del generador por medio de un transductor que convierte las señales analógicas en señales digitales.

La siguiente figura es un diagrama de bloques que muestra la forma en que quedará conectado el controlador basado en microprocesadores.

**Figura 51. Diagrama de bloques de la conexión de controlador basado en microprocesadores**



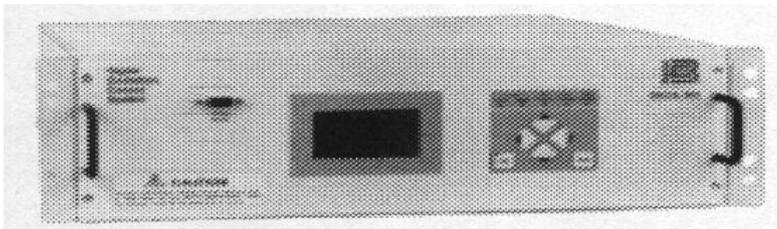
Fuente: Basler Electric Company. **DECS 300 instruction manual**. Página 4.

Basado en el estado de la salida del generador, el controlador manda una señal analógica al circuito de disparo del sistema de excitación estático, esta señal analógica controla el ángulo de fase de los pulsos producidos por los SCR del puente rectificador para obtener una regulación de voltaje de 0.25%.

El controlador basado en microprocesadores tiene tres puertos de comunicación, dos puertos RS232 y un puerto RS485. A uno de los puertos RS232 puede ser conectada una computadora que tenga Windows ® como sistema operativo para obtener medición en tiempo real o realizar ajustes al sistema. En el puerto RS485 se pueden conectar dispositivos, como un sistema scada, que tengan al lenguaje Modbus ® como protocolo de comunicación.

En la parte frontal del controlador basado en microprocesadores hay un teclado que permite realizar ajustes al sistema de excitación y una pantalla digital de cuarzo en la que se visualizan los parámetros del generador en tiempo real. En la siguiente figura se muestra la fotografía del controlador basado en microprocesadores.

**Figura 52. Fotografía del controlador basado en microprocesadores**



Fuente: Basler Electric Company. **DECS 300 instruction manual**. Página 2.

El sistema de excitación estático funcionará la mayor parte del tiempo en modo de regulación automática de voltaje, con el teclado del controlador basado en microprocesadores se puede deshabilitar al regulador automático de voltaje y quedar funcionando en modo manual de control de voltaje.

El sistema de excitación estático tiene la opción para funcionar en modo de regulación de potencia reactiva y en modo de control de factor de potencia, estos modos de operación también se habilitan y deshabilitan con el teclado del controlador a base de microprocesadores.

Como la capacidad del generador es relativamente pequeña, 2.75 MVA, se pueden utilizar estos modos de operación sin que las variaciones del voltaje de salida del generador afecten la estabilidad del sistema de potencia.

Los límites de sobre excitación, de sub excitación y de corriente del estator, deben ser ajustados según los valores indicados en la curva de capacidad del generador. Estos ajustes se realizan siguiendo los criterios que los ingenieros de la central generadora aplican en la operación de sus máquinas. Los ajustes de los límites en mención, pueden variar dependiendo del grado de esfuerzo al que se desea someter al generador. Estos tres ajustes también se realizan utilizando el teclado del controlador a base de microprocesadores del sistema de excitación estático.

Para prevenir que el generador se vea afectado por fallas en el sistema de excitación que pudieran ocasionarle algún daño, el controlador basado en microprocesadores incluye siete funciones de protección que se describen a continuación.

Protección por pérdida de la señal de los transformadores de voltaje. La pérdida de la señal de los transformadores de voltaje puede ocasionar una sobre excitación en el generador. Por lo tanto, el controlador a base de microprocesadores monitorea que la señal de los tres transformadores de voltaje esté presente, si una de las señales se pierde, el sistema de excitación pasa de operar en modo automático de regulación de voltaje a modo manual de control de voltaje.

Protección por sobre corriente de campo. Si el sistema de excitación pierde el control de su salida, el límite de calentamiento de los devanados de campo del generador puede ser excedido. Cuando el controlador a base de microprocesadores detecta que la corriente de campo excede su límite máximo dispara el generador.

Sobre voltaje de campo. Esta protección evita la sobre excitación del generador. El controlador basado en microprocesadores detecta cuando hay un voltaje excesivo en el campo del generador, si este voltaje excesivo continúa después de un tiempo específico disparará el generador.

Sobrevoltaje en la salida del generador. Para prevenir daños causados por un sobre voltaje en la salida del generador, si el controlador basado en microprocesadores detecta que algún sobrevoltaje en la salida del generador excede los límites lo disparará o pasará a modo de control manual de voltaje.

Pérdida de campo. Si el controlador basado en microprocesadores detecta que el circuito de campo del generador está inhabilitado debido a una falla disparará el generador inmediatamente.

Bajo voltaje en la salida del generador. Si el controlador basado en microprocesadores detecta que el voltaje de salida del generador es muy bajo lo disparará o pasará a modo de control manual de voltaje.

Calentamiento del campo del generador. Esta protección evita que se dañe el aislamiento del devanado de campo del generador a consecuencia de calentamientos excesivos. El controlador basado en microprocesadores monitorea que la temperatura del devanado de campo del generador no exceda el valor máximo establecido, si esto sucede disparará el generador.

Como complemento a las funciones de protección que incluye el controlador basado en microprocesadores, para mayor confiabilidad del sistema se agregarán las siguientes protecciones.

Un relevador 64, éste es un relevador de falla a tierra en el campo del generador. Está diseñado para detectar fallas en el aislamiento del circuito de campo del generador. La falla del aislamiento del circuito de campo del generador regularmente no es consecuencia de una falla en el sistema de excitación; sin embargo, esta protección debe ser incluida ya que una falla de este tipo puede ocasionar un daño importante.

Un relevador de bajo voltaje 27. Éste actuará si hay una condición de bajo voltaje en la entrada del regulador de voltaje que pudiera provocar un sobre voltaje en la salida del generador. Esta falla puede ser consecuencia de la desconexión accidental de alguno de los transformadores de voltaje del regulador de voltaje, o por la apertura de los fusibles que los protegen.

Si la activación del campo del generador falla, el sistema de excitación estático incluye una protección por sobre activación del campo del generador. Esta protección interrumpe la potencia que suministra el activador del campo del generador cuando el voltaje del generador no se ha levantado después de 25 segundos, protegiendo de esta forma al sistema de excitación estático.

Para la tolerancia a las fallas, la electrónica del sistema de excitación estático tendrá una fuente de respaldo que entrará en operación si la fuente principal falla. Esto elimina la posibilidad de que el generador pierda su excitación por falta de potencia en los elementos electrónicos de control del sistema de excitación estático. La fuente de respaldo será un banco de baterías de 125 Vdc.

Para realizar la transferencia de operación del sistema de excitación estático de modo automático de regulación de voltaje a modo manual de control de voltaje motivada por una falla, se implementará un esquema de retroalimentación típico por medio del controlador a base de microprocesadores.

Con el esquema de retroalimentación típico a implementar, cuando el controlador a base de microprocesadores detecte una falla, contactos normalmente cerrados en la entrada y en la salida del regulador automático de voltaje se abrirán, simultáneamente contactos normalmente abiertos en la entrada y en la salida del controlador manual de voltaje se cerrarán, realizándose de esta forma la transferencia entre ambos modos de operación simultáneamente.

Con el esquema de retroalimentación típico el cambio entre modos de operación será casi instantáneo, por tanto, el controlador manual de voltaje seguirá la salida que tenía el regulador automático de voltaje previo a la falla hasta ser ajustado. Como la capacidad del generador es relativamente pequeña, el esquema de retroalimentación típico se puede implementar sin afectar la estabilidad del sistema de potencia.

#### **4.4. Ventajas económicas**

Cuando se plantea la implementación de un nuevo sistema las consideraciones económicas son importantes en la toma de decisiones. En lo que respecta a la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático, como se verá a continuación, las consideraciones económicas resultan favorables.

Un sistema de excitación estático además de aumentar la confiabilidad operativa del generador, aumenta la eficiencia de su funcionamiento. Si la eficiencia en el funcionamiento del generador mejora, se generarán más kilowatts por caballo de fuerza aplicado a su eje, por lo tanto los costos de operación de la máquina disminuyen. Lo anterior es consecuencia de la reducción de la energía perdida en calor en el sistema de excitación.

La eficiencia es la medida de la potencia de entrada de la máquina contra la potencia de salida. Una pérdida grande de energía, baja la eficiencia del sistema. La expresión para la eficiencia se muestra a continuación.

Fórmula 22. Expresión para la eficiencia

$$Eficiencia = \frac{P_E}{P_S} \%$$

En donde:

$P_E$  es la potencia de entrada

$P_S$  es la potencia de salida

Una mayor eficiencia en el sistema significa una mejor transferencia de potencia. En un sistema de excitación rotativo existen varios factores que disminuyen la eficiencia del sistema, estos factores se listan a continuación.

- A. Pérdidas del tipo  $I^2R$  en los conductores de cobre de los embobinados del sistema de excitación rotativo, conocidas como pérdidas en el cobre.
- B. Pérdidas por fricción debido a la resistencia del aire durante la rotación del sistema de excitación rotativo.
- C. Pérdidas en las bobinas de los reóstatos manuales.
- D. Pérdidas varias como pérdidas por la fricción de la faja, flujos de dispersión, etc.

A continuación se determinará, para el generador en estudio, el ahorro en costos de operación que representa la sustitución del sistema de excitación rotativo existente por el sistema de excitación estático propuesto. La fórmula a utilizar para este propósito es la siguiente.

Fórmula 23. Ahorro en costos de operación

$$ACO = (FMEO)(C SER)(HOA)(VE)$$

En donde:

*ACO* es el ahorro en costos de operación

*FMEO* es el factor de mejora en la eficiencia de operación

*C SER* es la capacidad en kW del sistema de excitación rotativo

*HOA* son las horas de operación al año del generador

*VE* es el valor de la energía en \$/kWh

El sistema de excitación rotativo instalado actualmente tiene una capacidad de 50 kW, conservadoramente se asumirá que tiene un factor de eficiencia de operación de 0.78. El sistema de excitación estático a instalar es de 50 kW y su factor de eficiencia de operación es de 0.94.

El factor de mejora en la eficiencia de operación  $FMEO$ , se obtiene restando el factor de operación del sistema de excitación estático con el factor de operación del sistema de excitación rotativo, en este caso es de 0.161.

El número de horas que un generador opera durante un año se obtiene al multiplicar las 8,760 horas que tiene un año, por el factor de operación del generador que en este caso es de 0.8, por lo tanto las  $HOA$  son 7,008h.

En Guatemala actualmente, el valor promedio de la energía eléctrica producida por una central generadora es de 0.055 \$/kWh.

A continuación se procederá a sustituir los valores de las variables en la fórmula 23 para obtener el ahorro en costos de operación que se logra con la implementación del sistema de excitación estático.

$$ACO = (0.161)(50kW)(7,008h)(0.055\$/kWh) = \$3,102.79$$

El ahorro anual en costos de operación logrado sustituyendo el sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático para este generador es de \$3,102.79, este ahorro representa una ventaja económica importante.

Cuando el sistema de excitación rotativo no cuenta con un regulador automático de voltaje se utiliza un reóstato para su control, en este caso cierta cantidad de energía se disipa en el reóstato afectando negativamente la eficiencia del sistema. Con la sustitución del sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático se sustituye al reóstato por un regulador automático de voltaje. Esto representa otra ventaja económica que se obtiene implementando un sistema de excitación estático. El ahorro en costos de operación, derivado de la sustitución del reóstato por un regulador automático de voltaje se obtiene con la siguiente fórmula.

Fórmula 24. Ahorro en costos de operación por la sustitución del reóstato por un regulador automático de voltaje

$$ACOR = (DER)(HOA)(VE)$$

En donde:

*DER* es la disipación de energía del reóstato en kW

*HOA* son las horas de operación al año del generador

*VE* es el valor de la energía en \$/kWh

En el caso del generador en estudio el sistema de excitación rotativo tiene un regulador automático de voltaje, por lo que el reóstato es utilizado únicamente cuando el sistema de excitación pasa a modo de operación manual.

Dado que la mayor parte del tiempo el generador opera en modo de regulación automática de voltaje, la energía que se disipa en el reóstato en un año de operación no es significativa.

Para ejemplificar la ventaja económica que representa la sustitución de un sistema de excitación rotativo controlado con reóstato por un sistema de excitación estático, se supondrá que el sistema de excitación rotativo del generador en estudio no tiene regulador automático de voltaje y que su control es por medio de un reóstato con una disipación de energía de 5 kW.

Sustituyendo datos en la fórmula 24 se obtiene, para este caso hipotético, el ahorro en costos de operación por la sustitución del reóstato del sistema de excitación rotativo por el regulador automático de voltaje del sistema de excitación estático.

$$ACOR = (5kW)(7008h)(0.055kW/h) = \$1,927.20$$

Al ahorro obtenido en costos de operación por la sustitución del reóstato, hay que sumarle el ahorro en costos de operación obtenido por la implementación del sistema de excitación estático. Por lo tanto, la suma de los \$1,927.20 del ahorro en costos de operación por la sustitución del reóstato, más los \$3,102.79 del ahorro en costos de operación por la implementación del sistema de excitación estático, resulta en que el ahorro total en costos de operación es de \$5,029.99.

Como un sistema de excitación rotativo es una máquina eléctrica, requiere de un mantenimiento periódico como cualquier otra máquina. El mantenimiento básico consiste en revisarle la faja, ya que está expuesta a vibraciones que comúnmente la dañan, además el conmutador debe ser pulido y ajustado. Frecuentemente es necesaria la sustitución de la faja, la sustitución del conmutador o de ambos elementos.

Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, existen otras dos ventajas económicas que se obtienen con la implementación de un sistema de excitación estático. Una consiste en que se eliminan los gastos que implica el mantenimiento periódico del sistema de excitación rotativo y la otra consiste en que se eliminan los costos de los repuestos.

Los gastos que implica el mantenimiento de un sistema de excitación rotativo varían según las políticas de la compañía dueña de la planta generadora. Los costos de los repuestos de un sistema de excitación rotativo varían según su marca, tamaño e incidencia de falla.

Considerando las ventajas económicas expuestas, el ahorro anual total que representa la implementación del sistema de excitación estático en el generador en estudio, es la suma del ahorro en los costos de operación, la eliminación de los gastos de mantenimiento y la eliminación del costo de los repuestos.

Si se asume que el costo anual de los gastos por mantenimiento es de \$1,500.00 y que el costo anual de los repuestos es de \$500.00, el ahorro anual total para el generador en estudio será:

$$\text{Ahorro anual total} = \$3,102.79 + \$1,500.00 + \$500.00 = \$5,102.79$$

Si el sistema de excitación fuera controlado por reóstato habría que sumarle el ahorro en costos de operación obtenido por la sustitución del reóstato.

Suponiendo que el costo del sistema de excitación estático sea de \$75,000.00, con el ahorro anual total obtenido, éste se pagaría en un poco menos de 15 años.

Para finalizar con esta sección a continuación se listan las ventajas económicas que se obtienen con la sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático.

- A. Ahorro en costos de operación por la sustitución del sistema de excitación rotativo por el sistema de excitación estático.
- B. Eliminación de los gastos que implica el mantenimiento del sistema de excitación rotativo.
- C. Eliminación del costo de los repuestos para el sistema de excitación rotativo.
- D. En el caso de un sistema de excitación rotativo controlado con reóstato, ahorro en costos de operación por la sustitución del reóstato por el regulador automático de voltaje del sistema de excitación estático.

## CONCLUSIONES

1. Los sistemas de excitación estáticos se pueden implementar únicamente en generadores síncronos que cuenten con escobillas y anillos deslizantes.
2. Es factible la sustitución de cualquier tipo de sistema de excitación rotativo con escobillas por un sistema de excitación estático siempre y cuando se cumpla con lo descrito en la conclusión anterior.
3. La velocidad de respuesta de un generador síncrono ante los diversos eventos que se presentan en un sistema de potencia, mejora significativamente con la implementación de un sistema de excitación estático.
4. Las pérdidas de energía en un generador síncrono se reducen con la implementación de un sistema de excitación estático, por lo tanto, la eficiencia del generador se incrementa.
5. La sustitución de un sistema de excitación rotativo por un sistema de excitación estático, es una buena alternativa para mejorar el funcionamiento y la eficiencia de un generador síncrono con escobillas y anillos deslizantes.

## RECOMENDACIONES

1. Para mejorar la respuesta y eficiencia de un generador síncrono que utiliza un sistema de excitación rotativo con escobillas, se debe considerar la implementación de un sistema de excitación estático. Debido a que el sistema de excitación estático funciona a base de dispositivos de estado sólido, la variación de la corriente de excitación es prácticamente instantánea. Adicionalmente, la potencia que se disipa en los componentes del sistema de excitación estático, es mucho menor a la potencia que se pierde en un sistema de excitación rotativo.
2. Para que el funcionamiento de un sistema de excitación estático sea óptimo, se deben tomar en cuenta las consideraciones mecánicas y eléctricas expuestas en el capítulo 3 del presente trabajo. Cumpliendo con las consideraciones mecánicas el sistema de excitación no será afectado por factores ambientales que pudieran perjudicar su funcionamiento y reducir su tiempo de vida. Cumpliendo con las consideraciones eléctricas se asegura una buena operación del sistema de excitación, incrementando la confiabilidad de operación del generador.
3. En generadores que aportan cantidades significativas de potencia, conviene utilizar un sistema de excitación estático que opere en modo de regulación automático de voltaje. Con el sistema de excitación estático el control del generador se automatiza y se abre la posibilidad de tener una comunicación remota que permita control y medición. Con la operación en modo de regulación de automático de voltaje, el generador participará activamente en la regulación del voltaje del sistema de potencia.

4. La implementación de un controlador basado en microprocesadores facilita la puesta en servicio de un sistema de esta naturaleza e incorpora funciones adicionales de control, medición y protección que reducen la cantidad de dispositivos adicionales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, Paul, ***Análisis of faulted porwer systems***. Estados Unidos: Editorial de la Universidad del Estado Iowa., 1981.
2. Basler Electric Company, ***DECS 300 Instruction manual***. Estados Unidos: s.e., 2002.
3. Basler Electric Company, **Pubicación técnica *Application of static excitation***. Estados Unidos: s.e., 1999.
4. Basler Electric Company, **Pubicación técnica *Designing an excitation system***. Estados Unidos: s.e., 2003.
5. Basler Electric Company, **Pubicación técnica *Why static excitation***. Estados Unidos: s.e., 2000
6. Basler Electric Company, **Pubicación técnica *Voltage regulator and parallel operation***. Estados Unidos: s.e., 1999.
7. Basler Electric Company, ***SSE Instrucción manual***. Estados Unidos: s.e. 1994 .
8. Basler Electric Company, ***Technical presentation of power control and protection***. (Volumen 1 y 2). Estados Unidos: s.e., 1999.
9. Chapman, Stephen J. ***Máquinas eléctricas***. México: Editorial McGraw-Hill, 1993.
10. Fink, Donald G. ***Electronic engineers handbook***. Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill, 1975.
11. Fitzgerald, A. E. y otros. ***Máquinas eléctricas***. México: Editorial McGraw-Hill, 1992.

12. Grainger, John J. y William D. Stevenson Jr. **Análisis de sistemas de potencia**. México: Editorial McGraw-Hill, 1999.
13. Kimbark, Edward Wilson. **Power system stability: Synchronous machines**. Estados Unidos: Dover Publication, 1956.