

8. SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA

- **Función básica**

Provee corriente continua al arrollamiento de campo (I_{fd}) de la máquina síncrona (generador).

A través del control de la tensión y corriente de campo realiza funciones de control y de protección para una operación satisfactoria del sistema de potencia.

- **Funciones de control**

Control de tensión en terminales del generador.

Control de flujo de potencia reactiva.

Mejorar la estabilidad del sistema de potencia.

- **Funciones de protección**

Control de límites de capacidad de la máquina síncrona, del sistema de excitación y de otros equipamientos.

8.1 Requerimientos al sistema de excitación

Los requerimientos del desempeño al sistema de excitación están determinados por:

- **Consideraciones del generador**

Suministro y ajuste automático de la corriente del campo del generador síncrono para mantener la tensión en terminales en el marco de la curva de capacidad del generador.

El sistema de excitación debe responder a perturbaciones transitorias forzando el campo en forma consistente con la capacidad de respuesta del generador sin exceder sus límites.

- Límite de tensión de campo → falla de la aislación del rotor
- Límite de la corriente de campo → calentamiento del rotor

- Límite de carga MVA → calentamiento del estator
- Límite de subexcitación → calentamiento región final del estator

Los límites térmicos son dependientes del tiempo y un corto plazo de sobrecarga puede extenderse por 15 a 60 segundos.

- **Consideraciones del sistema de potencia**

El sistema de excitación debe contribuir al efectivo control de la tensión y a mejorar la estabilidad transitoria del sistema (respondiendo rápidamente ante perturbaciones) y la estabilidad de pequeña señal (modulando el campo del generador).

Para cumplir con estos requisitos satisfactoriamente el sistema de excitación debe satisfacer los siguiente requerimientos:

- Satisfacer el criterio de respuesta especificado (velocidad de respuesta).
- Proveer límites y protección para prevenir daños propios, de la máquina y de otros equipamientos.
- Satisfacer requerimientos de una operación flexible.
- Satisfacer una deseable disponibilidad y confiabilidad, con la incorporación del nivel de redundancia necesario y de funciones de detección y aislación de fallas internas.

Debido a la gran importancia de los sistemas de excitación para el funcionamiento del sistema se recomienda ■► definir los requerimientos y no aceptar sólo lo que ofrece el fabricante.

Históricamente la funcionalidad del sistema de excitación en cuanto a la mejora del sistema de potencia ha estado en continuo crecimiento:

- Los primeros sistemas de excitación eran controlados manualmente (E_t y Q).
- En la década del 20 se reconoce el gran potencial de la actuación rápida de los reguladores de tensión y de excitación para mejorar la estabilidad de pequeña señal y la estabilidad transitoria.

- La tecnología de diseño y desarrollo de los sistemas de excitación continúa avanzando, logrando respuestas cada vez más rápida.
 - En la década del 60 se amplía la funcionalidad de los sistemas de excitación con el uso de señales auxiliares estabilizantes para amortiguar oscilaciones. Power System Stabilizer (PSS)
 - Los modernos sistemas de excitación son capaces de una respuesta prácticamente instantánea con altas tensiones de excitación (tensión de techo), y con una amplia variedad de circuitos de control de protección.
- Contribuyen a una mejora substancial del desempeño dinámico de todo el sistema.

8.2. Elementos de un sistema de excitación

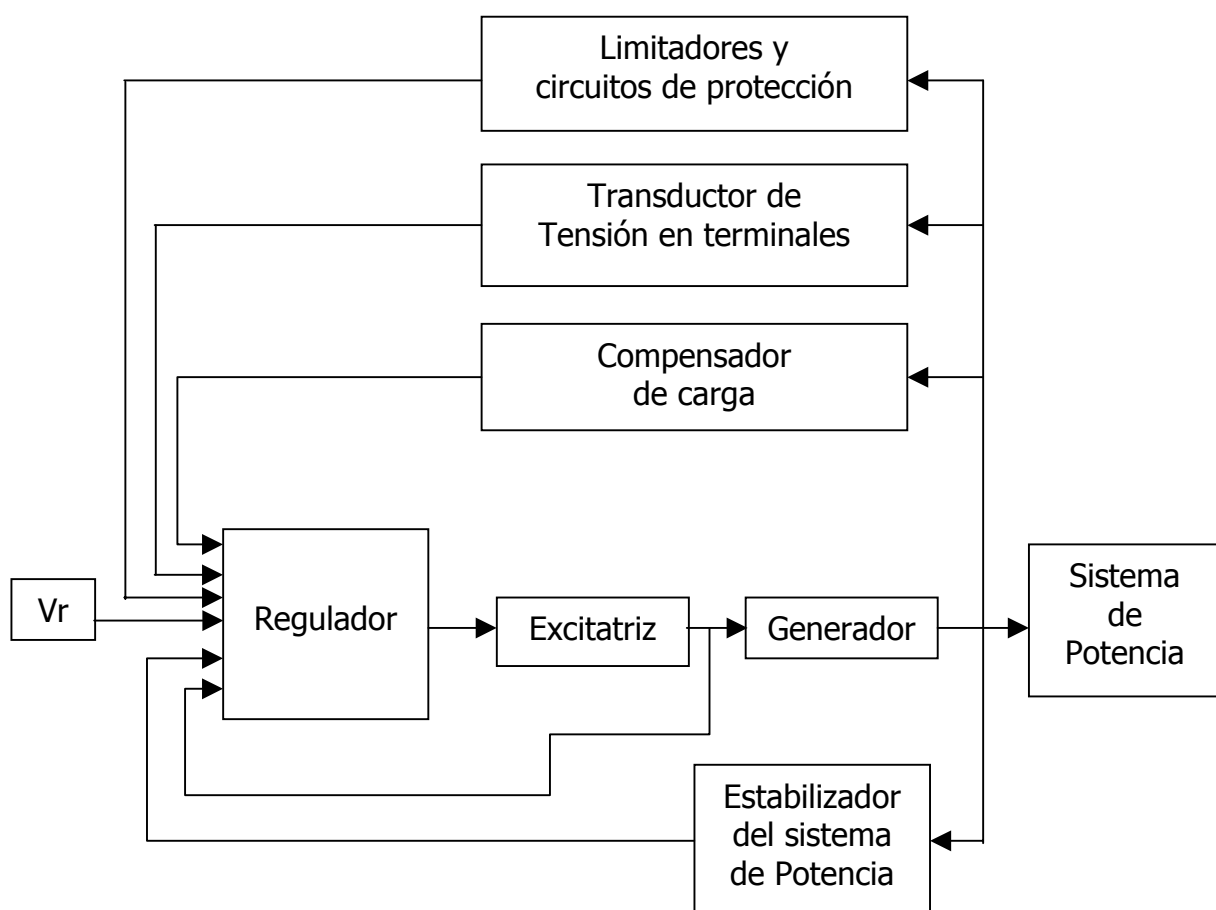


Diagrama de bloques funcional del sistema de control de excitación.

Excitatriz: provee la potencia de corriente continua al arrollamiento de campo de la máquina síncrona, constituye la etapa de potencia.

Regulador: procesa y amplifica la señal de control de entrada a un nivel y forma adecuado para el control de la excitatriz. Incluye función de regulación y estabilizador.

Transductor de tensión en bornes: censa la tensión en bornes, la rectifica y la filtra para obtener un valor de corriente continua que se compara con una referencia, la cual representa la tensión deseada en bornes.

Compensador de carga: se utiliza cuando se desea controlar la tensión en un punto eléctrico remoto respecto a los terminales del generador.

Estabilizador del sistema de potencia: provee una señal adicional de entrada al regulador para amortiguar las oscilaciones de potencia del sistema. Tiene como entradas el deslizamiento de velocidad del rotor, la potencia acelerante y/o la desviación de frecuencia.

Circuitos limitadores y de protección: asegura que los límites de capacidad de la máquina sincrónica no sean excedidos. Límites de la corriente de campo, de tensión de excitación, de tensión en terminales, de subexcitación y sobreexcitación, etc. Se aplica al control de excitación en puntos de suma o en compuertas.

8.3. Tipos de sistemas de excitación

En base a la fuente de potencia de excitación utilizada se clasifican en:

- Sistema de excitación rotativo de corriente continua.
- Sistema de corriente rotativo de excitación alterna.
- Sistema de excitación estático.

Potencia de excitación: del orden de 2. a 3.5 kW / MVA de potencia nominal.

8.3.1. Sistema de excitación rotativo de corriente continua (DC)

- Representan los primeros sistemas de excitación (1920-1960), fueron superados a mediados de los 60 por los sistemas de excitación de AC.
 - ▀ aún se encuentran algunos en servicio en unidades antiguas
 - ▀ conocer su modelo para estudios de estabilidad
- Utiliza generadores de continua (excitatriz) como fuente de la potencia de excitación.
- Provee la corriente del rotor I_{fd} a través de anillos rozantes.
- La excitatriz es impulsada por un motor o por el eje del generador.
- La excitatriz puede ser autoexcitada o con excitación separada.
- Con excitatriz autoexcitada la salida de la excitatriz provee su propia tensión de campo.
- Con excitación separada el campo de la excitatriz es provisto por una excitatriz piloto (generador de imán permanente).
- Los reguladores de tensión de esta tecnología utilizan desde reóstatos hasta varias etapas de amplificación magnética o rotativa.

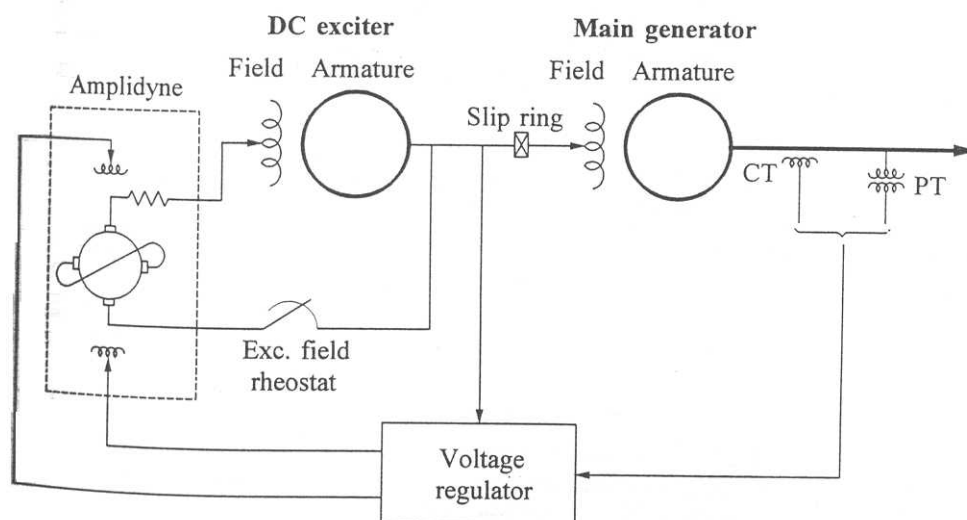


Figura 8.2: Sistema de excitación DC con regulador de tensión con amplificación rotativa (amplidina) [P.Kundur].

- Una máquina de continua provee cambios incrementales al campo de la excitatriz en una configuración “buck-boost” (reductor-elevador).
- Excitatriz autoexcitada, su salida provee el resto de su propio campo.
- Si el regulador está fuera de servicio la excitatriz es autoexcitada en forma manual a través de reóstato de campo.

8.3.2. Sistema de excitación rotativo de corriente alterna AC

- Utilizan máquinas rotativas AC (alternadores) como fuentes de potencia de excitación.
- Usualmente la excitatriz se encuentra en el mismo eje del generador.
- La salida AC de la excitatriz es rectificada para producir la corriente continua de campo del generador.
- El puente rectificador puede ser controlado o no controlado.
- Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotativos.
- Las primeras implementaciones del regulador de tensión utilizaban una combinación de amplificadores rotativos y magnéticos.
- Los sistemas más nuevos utilizan reguladores de tensión con amplificadores electrónicos.

Sistemas de excitación AC con rectificación estacionaria.

- La corriente DC alimenta el arrollamiento de campo del generador a través de anillos rozantes.
- Cuando se utiliza un rectificador no controlado, el regulador controla el campo de la excitatriz, con lo cual se controla la tensión de excitación.
- La excitatriz AC es impulsada por el eje del generador.
- Excitatriz autoexcitada con la tensión de campo obtenida de rectificador de tiristores controlados por el regulador. El regulador de tensión deriva su potencia de la tensión de salida de la excitatriz.

- Excitación separada: utiliza una excitatriz piloto.

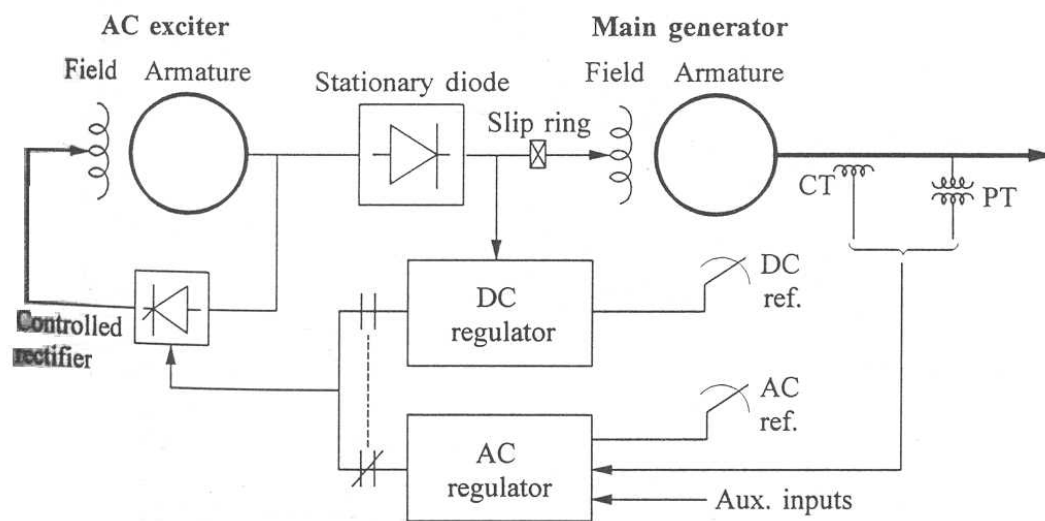


Figura 8.3: Sistema de excitación con campo controlado. General Electric ALTERREX [P.Kundur].

Cuando se utiliza un puente rectificador controlado, el regulador directamente controla la tensión DC de salida de la excitatriz.

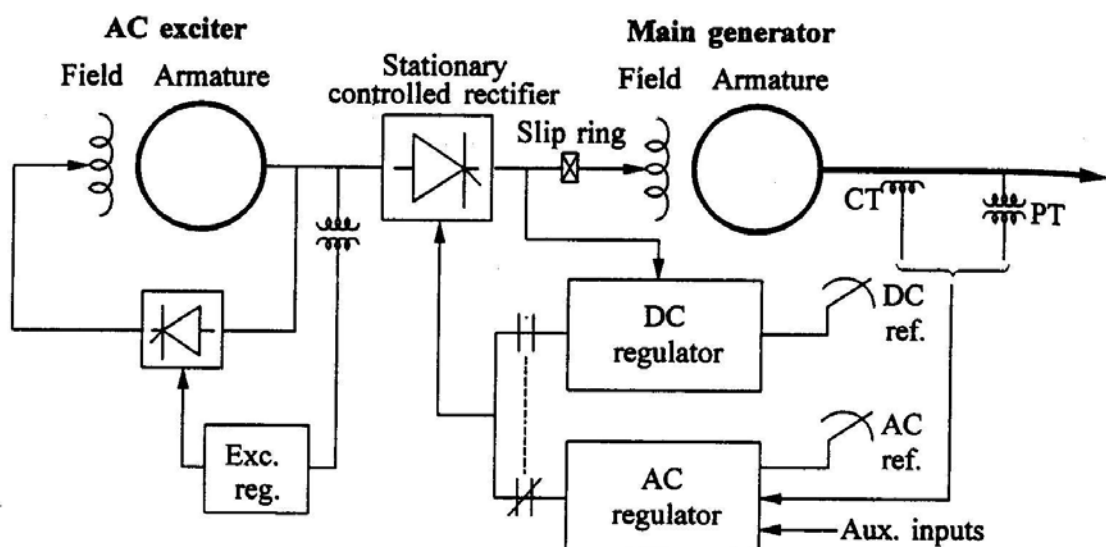


Figura 8.4: Sistema de excitación con rectificador controlado. General Electric ALTHYREX [P.Kundur].

- El regulador de tensión controla el ángulo de disparo de tiristores.
- La excitatriz AC es autoexcitada y utiliza un regulador de tensión independiente para mantener su tensión de salida.
- Al controlar directamente la salida de la excitatriz ese sistema tiene pequeños tiempos de respuesta.

Tiene dos modos independientes de regulación:

- El regulador AC para mantener automáticamente la tensión en terminales del generador en el valor deseado.
- El regulador DC o control manual para mantener constante la tensión de campo del generador, en situaciones de falla o deshabilitación del regulador AC.

Sistemas de excitación AC con rectificación rotativa.

- La salida DC del rectificador alimenta directamente al campo del generador sin necesidad de escobillas o anillos rozantes.
- Se evitan los problemas que se presentan en las escobillas cuando se proveen altas corrientes de campo al generador. Problemas superados.
- La potencia necesaria para proveer el campo de un generador de 600 MW es del orden de 1MW.
- La armadura de la excitatriz AC y el puente rectificador no controlado rotan junto al arrollamiento de campo del generador.
- La salida rectificadora de una excitatriz piloto energiza el campo estacionario de la excitatriz AC. La excitatriz piloto tiene rotor de imán permanente en el eje del generador.
- El regulador de tensión controla el campo estacionario de la excitatriz AC (controla el puente rectificador) con lo cual se controla la tensión de campo del generador.
- No permite medir directamente la tensión y corriente de campo del generador.

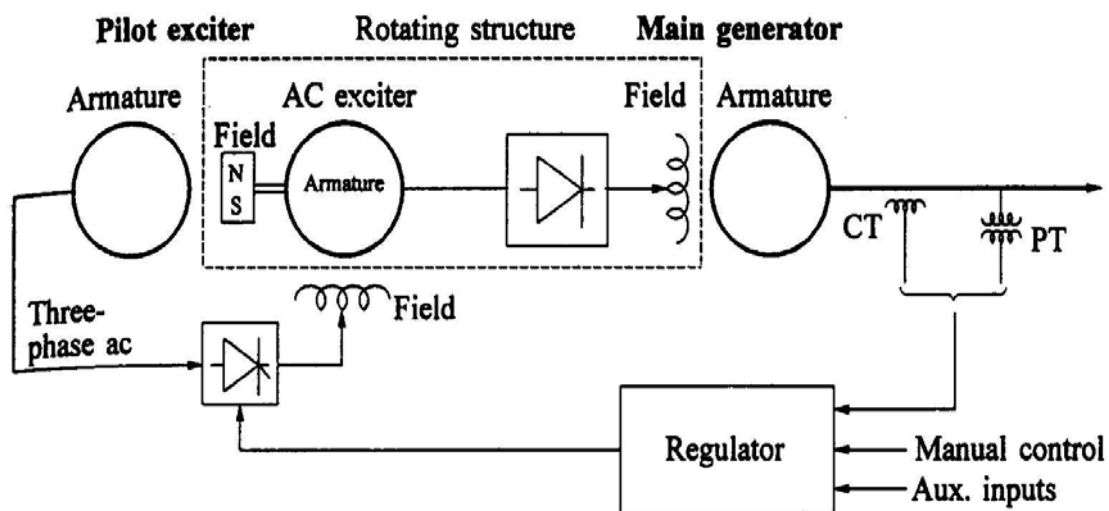


Figura 8.5: Sistema de excitación sin escobillas (brushless) [P.Kundur].

8.3.3. Sistemas de excitación estáticos.

- Todos los componentes son estáticos o estacionarios (no rotan).
- Los rectificadores estáticos proveen la corriente de excitación directamente al campo del generador con anillos rozantes, actualmente con mayores posibilidades de mantenimiento.
- La fuente de potencia de los rectificadores es el generador (o la barra de servicios auxiliares) a través de un transformador de rebaje que lleva la tensión al nivel adecuado, en algunos casos toma la tensión de arrollamientos auxiliares del generador.

Sistema de excitación a rectificador controlado con fuente de potencial.

- La potencia de excitación es suministrada a través de un transformador desde los terminales del generador o desde la barra de servicios auxiliares.
- Utiliza para regular un rectificador controlado (tiristores).
- Tiene constantes de tiempo muy pequeñas y una gran capacidad para forzar el campo en condiciones post falla.

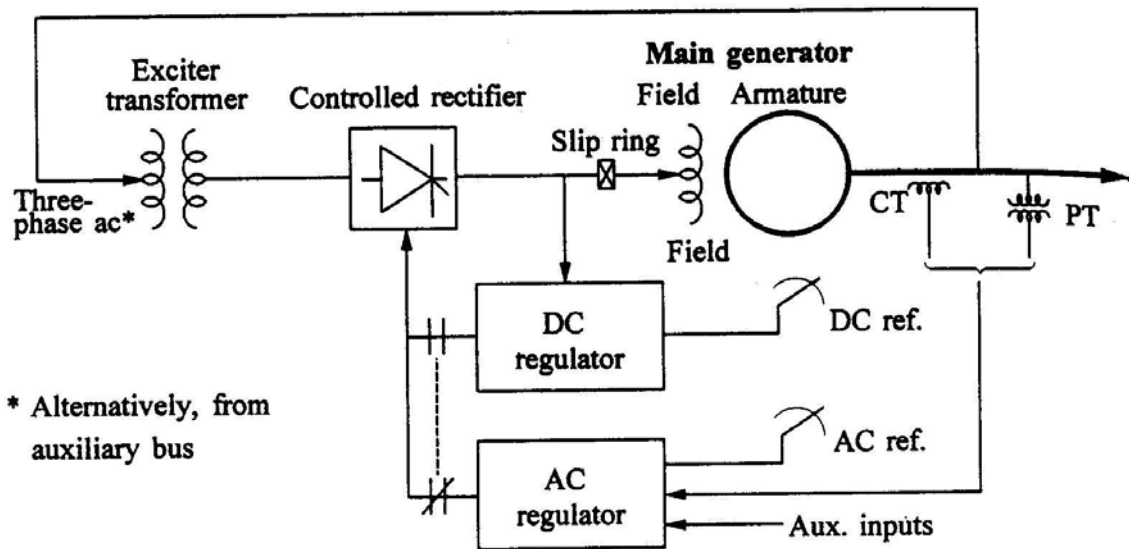
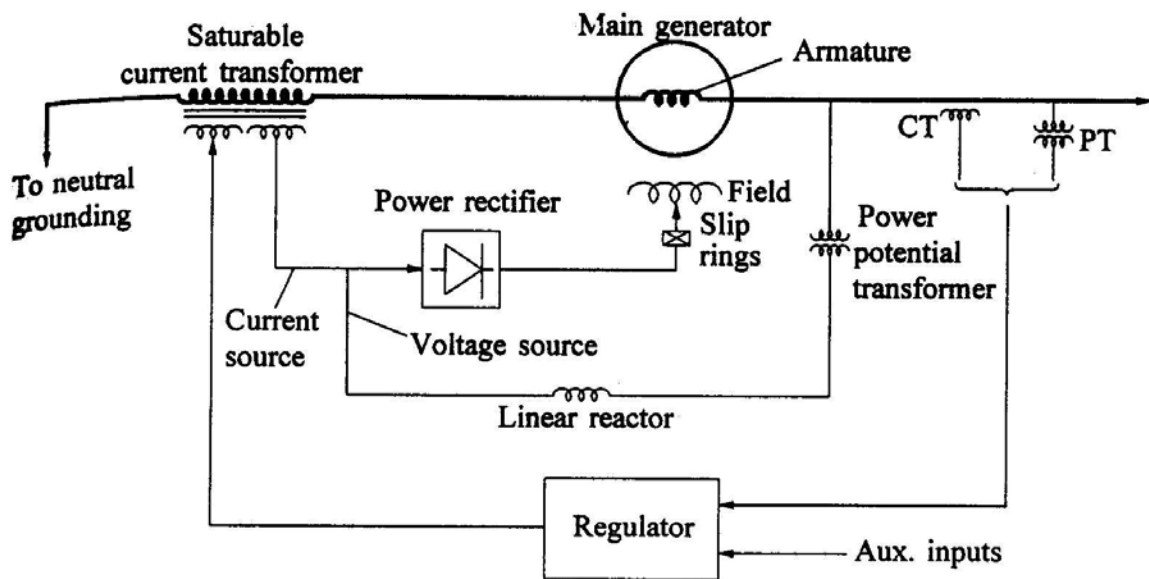


Figura 8.6: Sistemas de excitación estático alimentado por transformador (ABB static excitation systems) [P.Kundur].

- La máxima tensión de excitación depende de la tensión de entrada, en condiciones de falla con disminución de tensión en bornes, la tensión de techo se reduce $\Rightarrow$ limitación. Que se compensa con su muy rápida respuesta y capacidad para forzar el campo.
- Mantenimiento sencillo y poco costoso.
- En generadores conectados a sistemas de potencia funcionan satisfactoriamente.

Sistemas de excitación estáticos a rectificador con fuente compuesta.

- Se justifican en generadores que alimentan redes industriales pequeñas donde el despeje de falla es lento.
- Utiliza un transformador de potencia (PPT) y un transformador de corriente saturable (SCT).
- El regulador controla la salida de la excitatriz controlando la saturación del transformador de excitación.
- En vacío la fuente de tensión suministra la potencia de excitación.



Figuras 8.7: Sistemas de excitación estático con fuente compuesta GE SCT-PPT [P.Kundur].

- En condiciones de carga parte de la potencia de excitación se obtiene de la corriente de carga del generador.
- En falla con reducción de tensión en terminales, la entrada de corriente permite que la excitatriz mantenga una gran capacidad para forzar el campo.

Field-flashing de sistemas de excitación estática.

- Debido a que la fuente de potencia del sistema de excitación estático es el generador, este es en efecto autoexcitado.
- El generador no puede producir ninguna tensión hasta que haya corriente de campo.
- Es necesaria otra fuente de potencia durante unos pocos segundos para inicializar la provisión de corriente de campo y energizar el generador. Proceso conocido como field-flashing.
- Usualmente se utiliza como fuente de field-flashing un sistema de baterías.

8.3.4. Desarrollos recientes y nuevas tendencias.

- Los tiristores continúan siendo utilizados en la etapa de potencia.
- Introducción de tecnología digital en las funciones de control, protección y lógica → mayor confiabilidad y menor costo.
- Mayor flexibilidad, permitiendo la implementación de estrategias de control más complejas y la interconexión con otros sistemas de control y protección del generador.

8.4 Desempeño dinámico del control de excitación.

La efectividad de los sistemas de excitación en mejorar la estabilidad del sistema de potencia está determinada por su característica de desempeño.

El desempeño del control de excitación depende de las características del sistemas de excitación. Al ser sistemas no lineales se diferencia su comportamiento dinámico ante pequeñas y ante grandes perturbaciones.

Se definen medidas de desempeño que se utilizan como base para evaluar y especificar el comportamiento de un sistema de control de excitación.

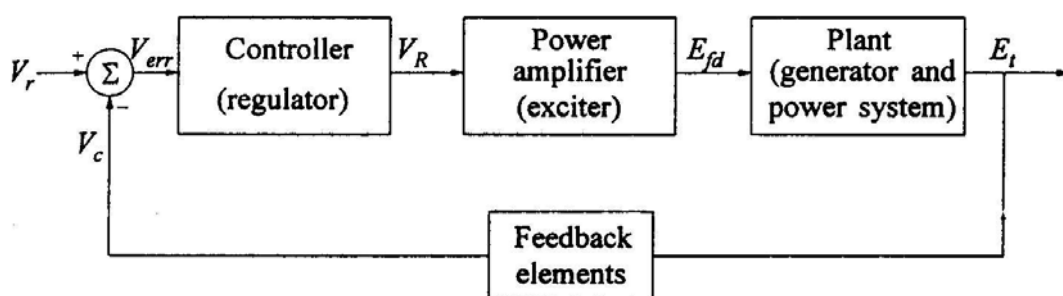


Figura 8.9: Diagrama de bloques del sistema realimentado de control de excitación [P.Kundur].

8.4.1. Medidas de desempeño ante grandes perturbaciones.

Las medidas de desempeño ante grandes perturbaciones proveen un medio para asegurar el comportamiento del control de excitación ante perturbaciones severas como las consideradas en estudios de estabilidad transitoria y de frecuencia.

Especificaciones:

- Tensión de techo (ceiling) es la máxima tensión que el sistema de excitación es capaz de suministrar en sus terminales. Indica la capacidad para forzar el campo, valores mayores tienden a mejorar la estabilidad transitoria.
- Corriente de techo es la máxima corriente DC que el sistema de excitación es capaz de suministrar en sus terminales por un tiempo especificado.
- Respuesta temporal de la tensión de excitación en determinadas condiciones.
- Tiempo de respuesta de la tensión de excitación: tiempo de respuesta de la tensión de excitación medido cuando ésta alcanza el 95% de la diferencia entre el valor de techo y el valor de la tensión de excitación en condiciones de operación continua con carga nominal.
- Rápida respuesta inicial del sistema de excitación, corresponde a sistemas con tiempo de respuesta de 0.1 s o menor ➡ indica una rápida actuación.
- Respuesta nominal del sistema de excitación: es la razón de crecimiento de la salida de tensión de excitación, determinada de la curva de respuesta del sistema de excitación, dividida por la tensión de campo nominal.

Se calcula inicializando el sistema en condiciones de tensión de excitación para carga nominal y produciendo un cambio brusco en la tensión de campo para que alcance su valor de techo.

Con $\text{área}_{acd} = \text{área}_{abd}$

$$\text{Respuesta nominal} = \frac{cd}{(ao)(oe)}$$

donde:

ao: tensión de campo a carga nominal

oe= 0.5 s tiempo nominal de actuación del sistema de excitación

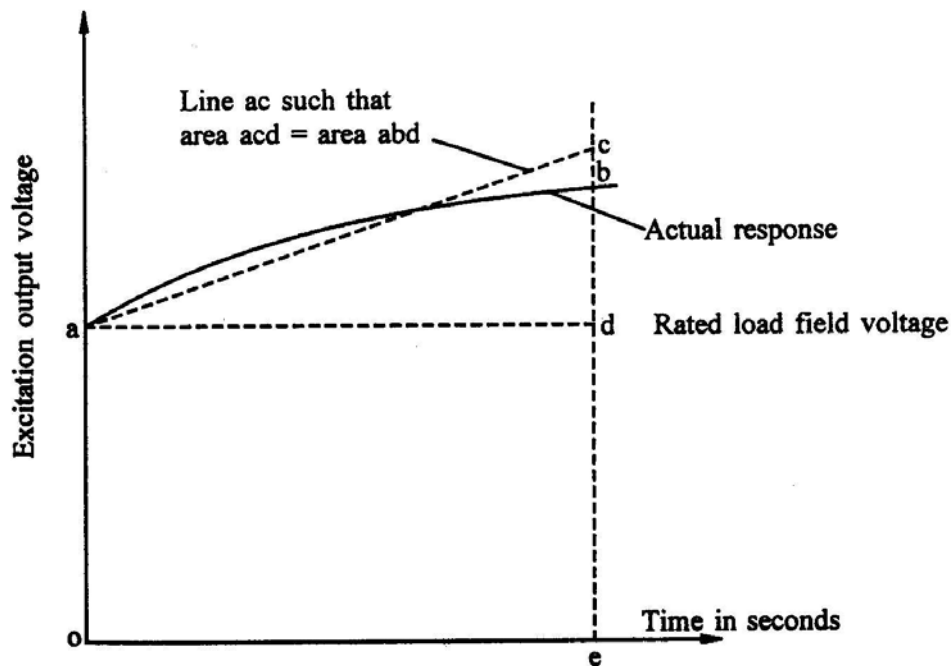


Figura 8.10: Respuesta nominal del sistema de excitación [P.Kundur].

Ante una perturbación severa la oscilación del ángulo del rotor normalmente alcanza el valor de pico entre 0.4 y 0.75 s ➡ el sistema de excitación debe actuar en este período para efectivamente mejorar la estabilidad transitoria ➡ tiempo nominal = 0,5 s en la definición de la respuesta nominal.

En los sistemas de excitación con una alta respuesta inicial la tensión de techo y el tiempo de respuesta son los parámetros más representativos.

8.4.2 Medidas de desempeño ante pequeñas perturbaciones

Proveen un medio para evaluar la respuesta del sistema de control de excitación en lazo cerrado ante pequeñas variaciones en las condiciones del sistema.

También son útiles para verificar los parámetros del sistema de excitación.

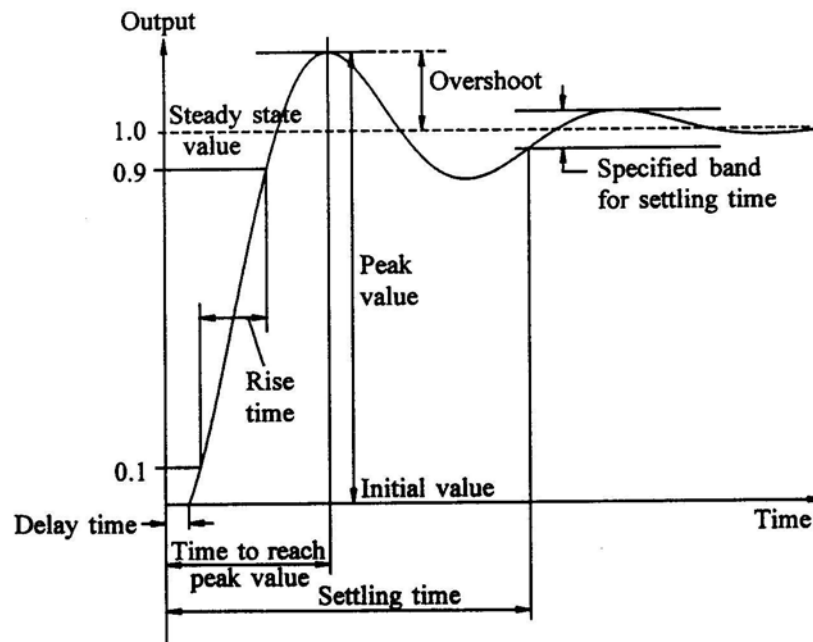


Figura 8.11: Respuesta temporal típica a una entrada escalón unitario [P.Kundur]

Índices asociados a la respuesta temporal:

- Tiempo de crecimiento t_r
- Tiempo de establecimiento t_s
- Máximo sobrepaso (5% - 15%)

Índices asociados a la respuesta en frecuencia de lazo abierto:

- Ganancia a baja frecuencia G : valores mayores de G aportan una mejor regulación en estado estable.
- Frecuencia de cruce de ganancia ω_c : valores mayores de ω_c indican una respuesta más rápida.

- Márgenes de fase ϕ_m y de ganancia G_m : valores mayores de márgenes indican una mayor estabilidad del sistema de excitación en lazo cerrado. Un buen criterio de diseño es obtener $\phi_m \geq 40^\circ$ y $G_m \geq 6$ dB para obtener una respuesta estable no oscilatoria del sistema.

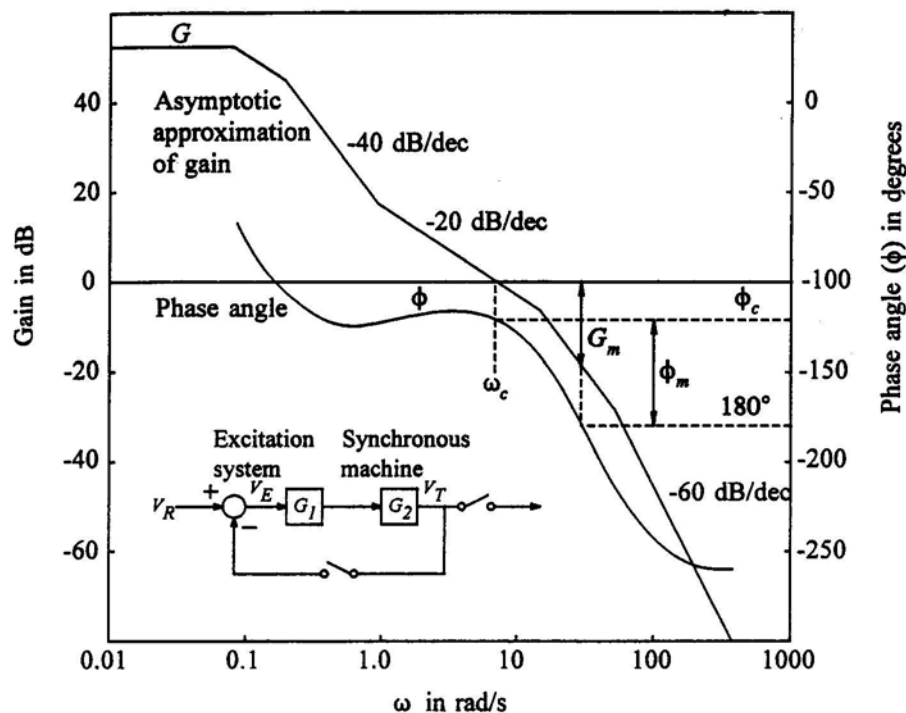


Figura 8.12: Respuesta en frecuencia típica de lazo abierto del conjunto sistema de excitación-máquina síncrona [P.Kundur]

Analizar el efecto de un aumento de ganancia del regulador en los márgenes de estabilidad ϕ_m y G_m .

Índices asociados a la respuesta en frecuencia de lazo cerrado:

- Ancho de banda ω_B : valores mayores de ω_B indican una respuesta más rápida. Describe las características de rechazo de ruido.
- Pico de resonancia M_p : criterio de diseño $1.1 \leq M_p \leq 1.5$.

M_p , ϕ_m , G_m y máximo sobrepaso son indicadores de la estabilidad del sistema de excitación con la máquina síncrona en vacío o alimentando una carga local.

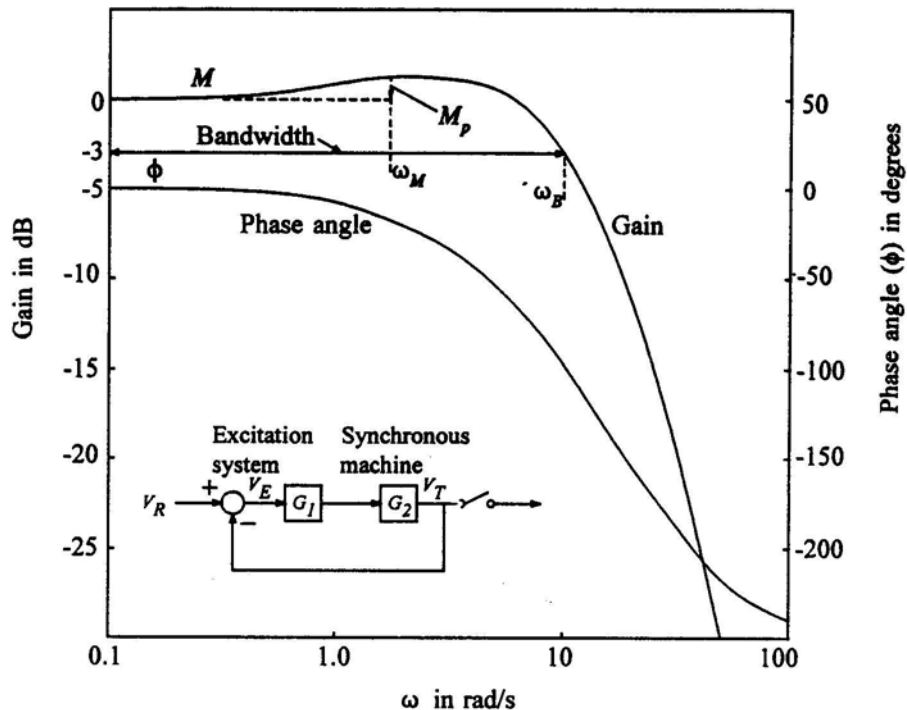


Figura 8.13: Respuesta en frecuencia típica de lazo cerrado del conjunto sistema de excitación-máquina síncrona [P.Kundur]

8.4.3. “Ingreso de nuevos generadores al MEM. Requisitos para solicitar su ingreso al MEM”. Procedimiento Técnico Nro 4 de CAMMESA, Argentina. Capítulo II.

Desempeño de la regulación de tensión en vacío

Desempeño exigido a la tensión en terminales en regulación automática de tensión ante un cambio en la referencia de tensión de pequeña amplitud:

- Respuesta rápida con un tiempo de crecimiento menor que 300 ms y un tiempo de establecimiento menor que 1,5 s. La sobreoscilación debe ser inferior al 15%.
- La ganancia estática tiene un límite máximo de 400 pu, lo que permite alcanzar una precisión aceptable de la regulación en estado estacionario.

Desempeño de la regulación de tensión en carga

- La tensión de techo E_{fdmax} debe ser como mínimo 2 veces la tensión de excitación a plena carga y factor de potencia nominal.
- El gradiente de aumento de la tensión ante fallas severas debe ser tal que la excitación alcance el techo antes de 10 mseg para una depresión de la tensión terminal del 50%.
- El error estático de la tensión deberá mantenerse por debajo del 0,5% al variar el estado de funcionamiento de vacío a plena carga y factor de potencia nominal.

8.4.4. Ejemplo de criterios de desempeño mínimo de la respuesta del Sistema de Excitación

- a) Respuesta Dinámica : Evolución sin sobrearmortiguamiento
- b) Sobreoscilación: $\leq 15 \%$
- c) Tiempo Máximo de Crecimiento (T_r) de la tensión terminal para pasar del 10 % al 90% del valor final (incremento de carga aplicado), luego de haber aplicado un incremento de tensión en la referencia del regulador:

Unidad Generadora	Tipo de Excitatriz	T_r
Existente	Excitatrices estáticas	$\leq 350 \text{ ms}$
	Excitatrices con rectificadores rotantes (Brushless)	$\leq 550 \text{ ms}$
	Otras excitatrices	$\leq 850 \text{ ms}$
Nuevas	Excitatrices estáticas	$\leq 250 \text{ ms}$
	Otras excitatrices	$\leq 350 \text{ ms}$

- d) Tiempo Máximo de Establecimiento (T_s), para el rango $\pm 5 \%$ del valor final del cambio en la tensión terminal: