Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

SISTEMA DE EXCITACIÓN DE MAQUINAS SINCRONICAS

Apuntes Curso EM 737 Fenómenos Dinámicos de Redes de Potencia

Luis Vargas

Versión Primavera 2008

INDICE

1. DESCRIPCION GENERAL 3
1.1 Introducción 3
1.2 Historia 3
2. Elementos de un SCE 4
3. Tipos de Sistemas de Excitación 5
3.1 Excitación de Corriente Continua 5
3.2 Excitación de Sistemas de Corriente Alterna 6
3.2.1 Sistemas de Rectificación Estacionarios 6
3.2.2 Sistemas de Rectificación Rotacional 7
3.3 Sistemas de Excitación Estática 9
3.3.1 Sistema de fuente de potencial y rectificador controlado 9
3.3.2 Sistema de Fuente Compuesta y rectificador 9
3.3.3 SCE Compuesto Controlado 10
4. ANÁLISIS del desempeño de SCE 12
4.1 Caracterización del Desempeño de Señales Grandes 12
4.2 Caracterización del Desempeño de Pequeña Señal 14
4.2.1 Indices Temporales 14
4.2.2 Indices de la Respuesta de Frecuencia 15
5 Control y Funciones de Protección 17
5.1 Regulador AC y DC 17
5.2 Circuitos Estabilizadores del SCE 18
5.3 Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS) 18
5.4 Compensador de Carga 18
5.5 Limitador de Excitación Baja (UEL) 19
5.6 Limitador de Sobreexcitación (OXL) 20
5.7 Limitador y Protección Volts/Hertz 21
5.8 Circuito de Campo-Reducido 21
6. Modelos de SCE 23
6.1 Sistema por Unidad 23
6.2 Modelamiento de la Componentes del SCE 26
6.2.1 Excitación Independiente DC 26
6.2.2 Excitador DC Autoexcitado 31
6.2.3 Excitador AC y Rectificadores 32
6.2.4 Amplifidores CA 34
6.2.5 Circuito Estabilizador del SCE 35
6.2.6 Limites Windup y Non-Windup 36
6.2.7 Funciones de Accionamiento 38
6.2.8 Transductor del Voltaje de Terminales y Compensado de Carga 38
6.3 Modelamiento Completo del SCE 39
6.3.1 Tipo DC1A 40
6.3.2 Tipo AC1A 40
6.3.3 Tipo AC4A 41
6.3.4 Tipo ST1A 41
6.3.5 Tipo ST2A 42
6.4 Modelamiento de Limitadores 43
6.4.1 Limitador de Baja excitación:Se presenta en la Figura Nº44 44
6.4.2 Limitador de sobrecorriente o corriente de campo: figura Nº46 44
7. EJEMPLO SIMPLIFICADO MODELO AVR 46

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

REFERENCIAS 47

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

1. DESCRIPCION GENERAL

1.1 Introducción

El objetivo fundamental del control de excitación o sistema de excitación, o sistema de control de excitación (usaremos estas denominaciones indistintamente) es realizar el ajuste automático de la corriente de campo del generador sincrónico de modo que se mantenga el voltaje de salida de acuerdo a los valores especificados de consigna (generalmente lo mas constante posible).

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

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

1.2 Historia

Históricamente los sistemas de excitación fueron controlados manualmente para mantener el voltaje deseado en bornes del generador y la carga de potencia reactiva. Cuando primeramente fue automatizado, fue muy lento, y básicamente ocupaba el rol de una alerta de operación. En los años 20, se aplicó para mejorar la estabilidad transiente y de pequeña señal a través de un uso continuo y de activación rápida de reguladores.

Posteriormente, debido al avance en los lazos de control realimentado se automatizaron e incorporaron masivamente a los sistemas. El siguiente paso fue la introducción de la electrónica de potencia, con la cual se usaron rectificadores de gran eficiencia. En la actualidad existen sofisticados esquemas de control de excitación, basados en numerosos lazos de control y electrónica de potencia de última generación.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

2. ELEMENTOS DE UN SCE

En la Figura Nº 1 se puede observar el diagrama de bloques tradicional de un sistema de control de excitación para un generador sincrónico.

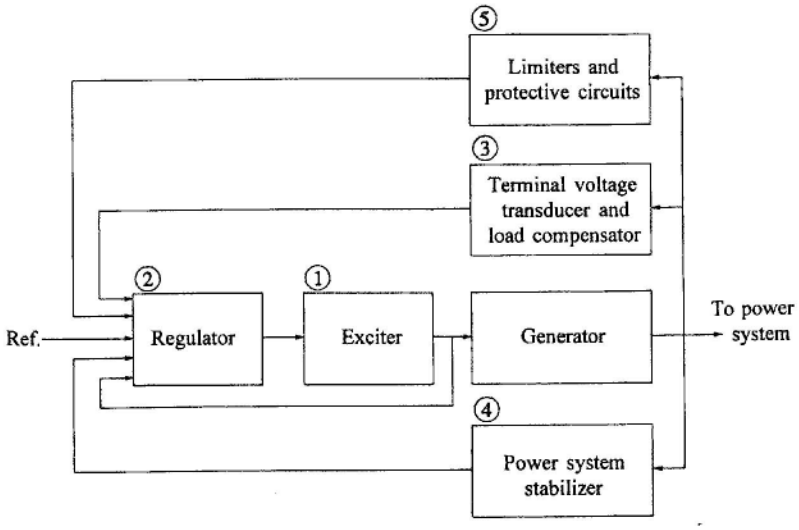


Figura Nº1

La función da cada bloque es la siguiente:

1) Excitador (Exciter): Este bloque proporciona la energía eléctrica de alimentación del campo rotatorio del generador sincrónico, constituyendo la fuente de poder del SCE.
2) Regulador (Regulator): Este bloque procesa y amplifica la señal de entrada a un nivel y forma apropiada para el control. Este incluye ambas regulaciones y funciones de estabilidad del SCE.
3) Terminal de Voltaje Transductor y Compensador de Carga (Terminal voltaje transducer and load compensator). Mide el voltaje en bornes del generador y, opcionalmente, estima la diferencia de voltaje hasta el nodo de inyección a la red. Posteriormente rectifica y filtra estos valores a una cantidad dc.
4) Estabilizador de Potencia del Sistema (Power System Stabilizer PSS). Este bloque provee una señal de salida adicional hacia el regulador, la cual se usa para amortiguar las oscilaciones del sistema. Es opcional su activación.
5) Limitadores y circuitos de protección (Limiters and protective devices) Esta unidad incluye un extenso arreglo de control y funciones de protección para garantizar que los limites de capacidad del excitador y el generador no se excedan. Algunas de las funciones más usadas son los limitadores de corriente de campo, limite máximo de excitación, limitador de voltaje, regulación y protección de

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

Volts/Hertz y limitador de bajo voltaje.

3. TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Los sistemas de excitación han tomado muchas formas a través de los años de su evolución. En términos generales, dependiendo de la fuente de poder usada en la excitación se pueden clasificar en tres categorías :

- Corriente continua (SCE DC)
- Corriente Alterna (SCE AC)
- Estática

3.1 Excitación de Corriente Continua

La excitación de este tipo utiliza generadores DC como fuentes de excitación de poder para proveer la corriente al rotor de la máquina síncrona. El excitador puede ser impulsado por un motor o, aprovechando la energía primaria, por el mismo eje del generador. Puede ser excitada por si misma o excitada en forma separada.

Los SCE DC representan los primeros sistemas, desde los años 20 a 60. Estos pierden importancia a mediados de los 60 cuando aparecieron fuertemente los de excitación AC. Por ello en la actualidad los SCE DC están desapareciendo gradualmente, debido a la antigüedad de algunos están siendo reemplazados por excitación AC o estáticos. En algunos casos los reguladores de voltaje son reemplazados por modernos dispositivos electrónicos. Muchos de los SCE DC están aún en servicio, y requieren de modelos de estabilidad en estudio. La Figura Nº2 muestra la representación de un SCE DC típico. Este cuenta con un conmutador el cual abastece de corriente continua al campo del generador principal. El excitador es controlado por un amplidyne.

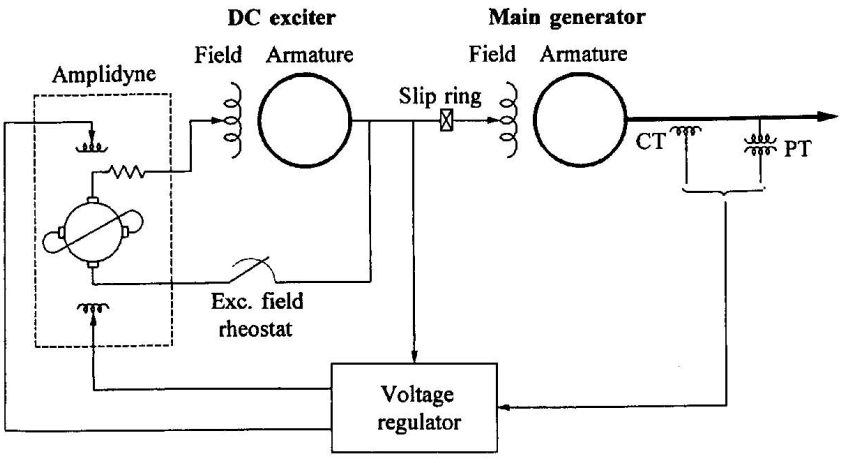


Figura Nº2

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

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

3.2 Excitación de Sistemas de Corriente Alterna

La excitación de esta categoría utiliza alternadores (maquinas AC) como fuentes para la excitación del generador de poder. Generalmente, el excitador esta montado sobre el mismo eje de la turbina del generador. La salida AC del excitador es rectificada por rectificadores controlados o no controlados, la que produce la corriente continua necesaria para el campo del generador. Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotacionales. Los primeros sistemas de excitación AC usaron una combinación de amplificadores magnéticos y rotacionales como reguladores. Hoy en día se usan dispositivos electrónicos. A continuación una descripción de las diferentes formas de excitación AC.

3.2.1 Sistemas de Rectificación Estacionarios

En este esquema la etapa de rectificación se realiza fuera del generador mediante rectificadores estacionarios. Aquí, la salida DC alimenta al campo principal del generador a través de anillos deslizantes (slip ring). En la Figura Nº3 se muestra un diagrama unilineal del control de campo del alternador con rectificador para la excitación del sistema.

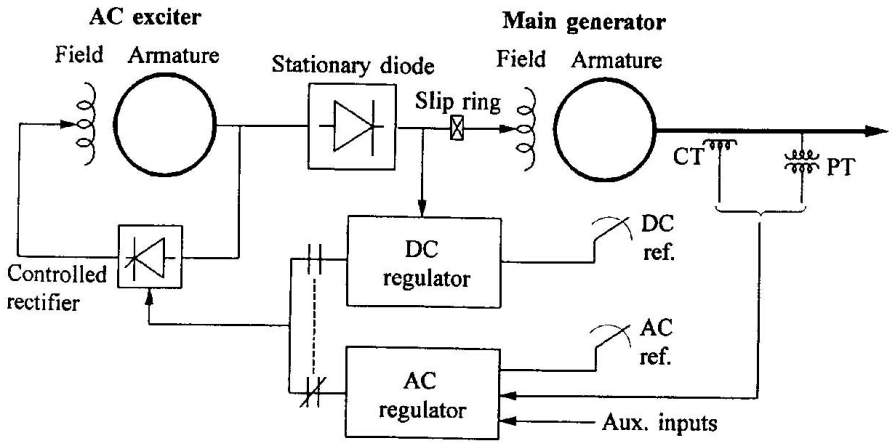


Figura Nº3

La Figura 3 representa el SCE ALTERREX de GE. Este alternador excitador (AC exciter), el cual a su vez es un generador sincrónico, esta impulsado por el eje del generador principal. El excitador opera en la modalidad autoexcitado, esto es, su campo se obtiene a

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

través de un rectificador con tiristores que toma la energía en bornes del propio excitador. De esta forma, lo rectificadores tienen control sobre la excitación del alternador excitador, el cual modifica el voltaje en bornes y, en consecuencia, cambia el voltaje continuo de alimentación del campo del generador principal. Notar que los diodos no tienen posibilidad de control, sólo rectifican la señal de entrada. Otra alternativa es usar un excitador dirigido como fuente para excitador de campo del poder.

Cuando se usa rectificadores controlados, el regulador controla directamente el voltaje de salida DC del excitador. La figura Nº4 ilustra este caso.

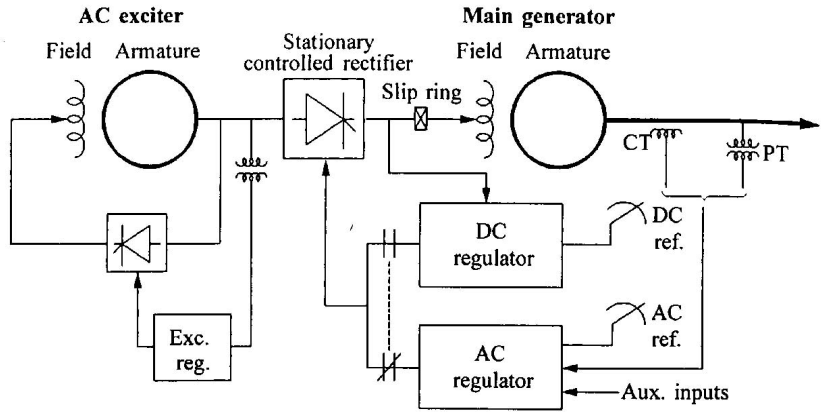


Figura Nº4

El regulador de voltaje controla el encendido de los tiristores. El excitador alternador es autoexcitado y usa un regulador estático de voltaje independiente para mantener su voltaje de salida. Dado que los tiristores son controlados directamente por la salida del excitador, este sistema de modo inherente provee una alta respuesta inicial (pequeña respuesta en el tiempo).

Como se mostró anteriormente en las figuras 3 y 4, hay dos modos independientes de regulación: uno AC que regula automáticamente y mantiene el voltaje en bornes del estator del generador principal a un voltaje de referencia AC, y otro un regulador DC que mantiene constante el voltaje en el campo del generador de acuerdo a una referencia determinada. El regulador DC o modo de control manual actúan cuando del regulador AC falló o necesita ser desabilitado. La entrada de las señales al regulador AC incluyen entradas auxiliares las cuales permiten un control adicional y funciones de protección.

3.2.2 Sistemas de Rectificación Rotacional

Con este tipo de rectificación los anillos rozantes y escobillas son eliminados, y la salida DC alimenta directamente al campo del generador, como se muestra en la figura Nº5. Aquí, la armadura del excitador AC y el rectificador de diodos rotan con el campo del generador. Un pequeño excitador piloto AC, con un rotor de imán permanente, rota con la armadura y el rectificador de diodos. La salida del rectificador del estator del excitador

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

piloto energiza el campo estacionario del excitador AC. El regulador de voltaje controla el campo del excitador AC, el cual controla el giro del campo del campo del generador principal.

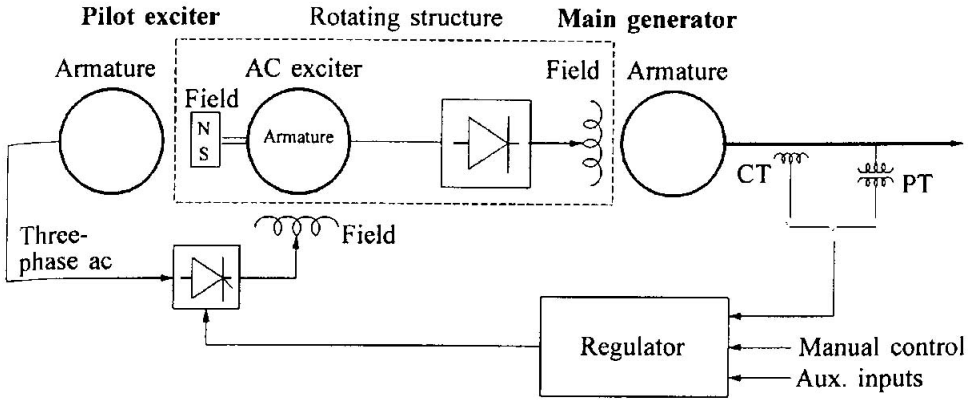


Figura Nº5

Este sistema fue desarrollado para evitar problemas con el uso de escobillas. Los sistemas de excitación sin escobillas no permiten medir directamente la corriente de campo o voltaje del generador. El control manual del generador principal está provisto por una entrada ajustable DC para poner el circuito gatillador del tiristor.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

3.3 Sistemas de Excitación Estática

Todas las componentes en este sistema son estáticos o estacionarias, tanto los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, como las fuentes de excitación DC para el campo del generador sincrónico principal a través de anillos deslizantes (o rozantes). La fuente de alimentación para los rectificadores se obtiene del generador principal a través de un transformador que baja el voltaje a un nivel apropiado.

3.3.1 Sistema de fuente de potencial y rectificador controlado

En este sistema, la excitación del generador es abastecida a través de un transformador (exciter transformer) desde los terminales del generador o la estación auxiliar, y esta regulada por un control del rectificador. Este tipo de sistema de excitación es también comúnmente conocido como *bus-fed o transformer-fed.* Se puede observar en la figura Nº6.

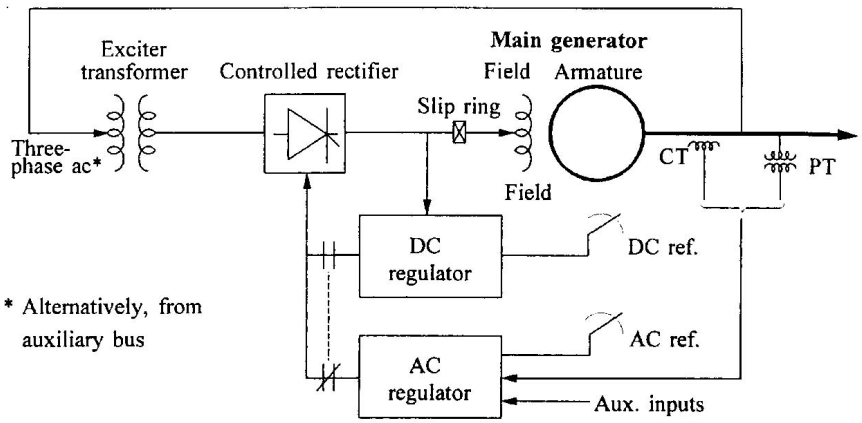


Figura Nº6

La máxima salida de voltaje que puede entregar este excitador es dependiente de la entrada de voltaje AC. De aquí que durante condiciones de falla en el sistema, las cuales provocan una caída de voltaje en los terminales del generador, el voltaje en el excitador se reduce (y con ello la capacidad del generador principal para subir el voltaje en bornes). Esta limitación del SCE, es en gran medida equilibrado por su respuesta instantánea y alta capacidad de almacenamiento de campo electromagnético post falla. Además es barato y de fácil mantención. Para generadores conectados en un gran sistema estos SCE responden satisfactoriamente.

3.3.2 Sistema de Fuente Compuesta y rectificador

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

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

potencial. La figura Nº7 muestra este sistema.

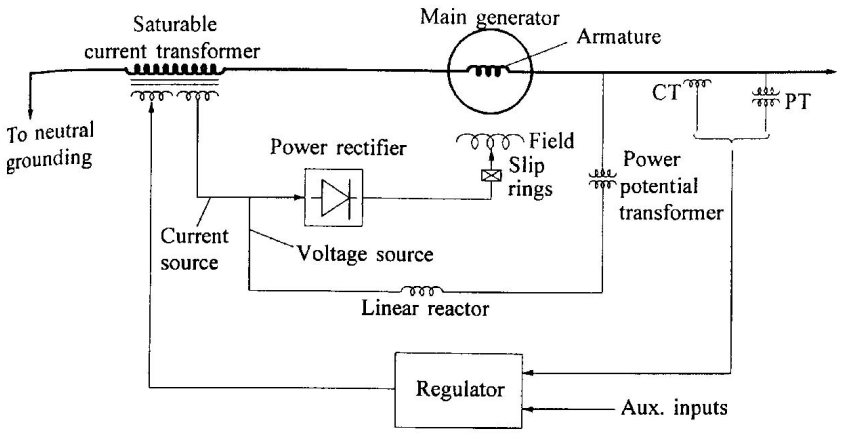


Figura Nº7

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

3.3.3 SCE Compuesto Controlado

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

La figura Nº8 muestra este sistema. El voltaje de la fuente esta formado por un conjunto de tres fases puestas en las tres ranuras del estator del generador y en serie a la línea del reactor. La fuente de corriente es obtenida desde un transformador de corriente en el neutro del estator. Estas fuentes están combinadas a través de un transformador y la resultante de la salida AC es rectificada por semiconductores de poder. El medio de control esta provisto de una combinación puente de diodos y rectificadores conectados en paralelo. Un regulador de voltaje controla con un circuito de encendido de tiritores y de este modo regula la excitación del campo del generador.

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

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

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

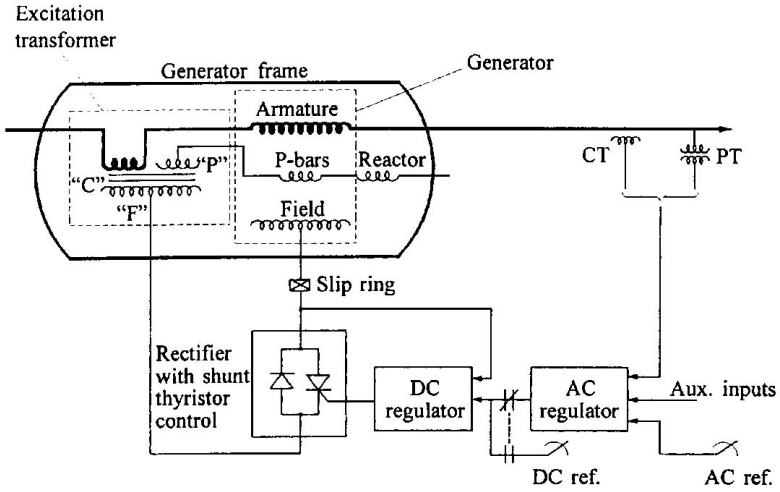


Figura Nº8

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

4. ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SCE

En esta sección se presenta la caracterización de un SCE en el mejoramiento de la estabilidad de un sistema de potencia. La figura Nº9 muestra la representación clásica de un sistema de control para estudios de estabilidad.

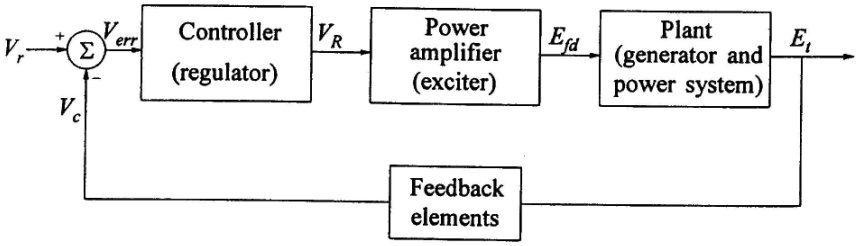


Figura Nº9

En esta figura las variables relevantes son las siguientes:

- V_r es el voltaje de referencia del regulador,
- E_t es la variable a controlar (el voltaje en bornes del generador o corregido mediante la caida de tensión de la línea de alimentación)
- V_c señal filtrada y adaptada en el loop de control
- V_r es la señal del excitador
- E_{fd} es el voltaje aplicado al rotor de la máquina sincrónica

El desempeño del sistema de control de excitación depende de las características de la excitación del sistema, el generador, y el sistema de potencia. En el estudio del desempeño dinámico de los SCE es usual separar los temas de estabilidad (o respuesta) ante grandes perturbaciones y ante perturbaciones pequeñas, también conocidas como pequeña y gran señal, respectivamente. En señales “grandes” la nolinealidad de las componentes es significativa, mientras que para pequeña señal, la respuesta es aproximadamente lineal.

4.1 Caracterización del Desempeño de Señales Grandes

En estos estudios es necesario representar el desempeño del SCE para transientes “severos”. Para permitir una máxima flexibilidad en el diseño, manufactura y aplicación de equipos de excitación, se ha caracterizado el desempeño de los SCE mediante los siguientes parámetros:

a. Voltaje Máximo (o Tope): Es el máximo voltaje continuo que el SCE es capaz de abastecer desde sus terminales bajo condiciones específicas. El “voltaje máximo (o tope)” es indirectamente un indicador de la capacidad del campo electromagnético al interior de la máquina para almacenar energía. Así, un alto “voltaje máximo” tiende a mejorar la estabilidad transiente.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

Para la fuente de potencial y fuente compuesta del SCE estático, cuya fuente depende del voltaje y corriente del generador, el "voltaje máximo" esta definido por la fuente de corriente y de voltaje. Para SCE con excitación rotacional, el "voltaje máximo" esta determinado por la razón de velocidad.

b. Corriente Máxima. Es la máxima corriente continua que el SCE es capaz de abastecer desde los terminales para un tiempo específico.

c. Respuesta nominal del SCE. Se acostumbra a usar la curva de respuesta de voltaje del SCE presentado en la Figura 10.

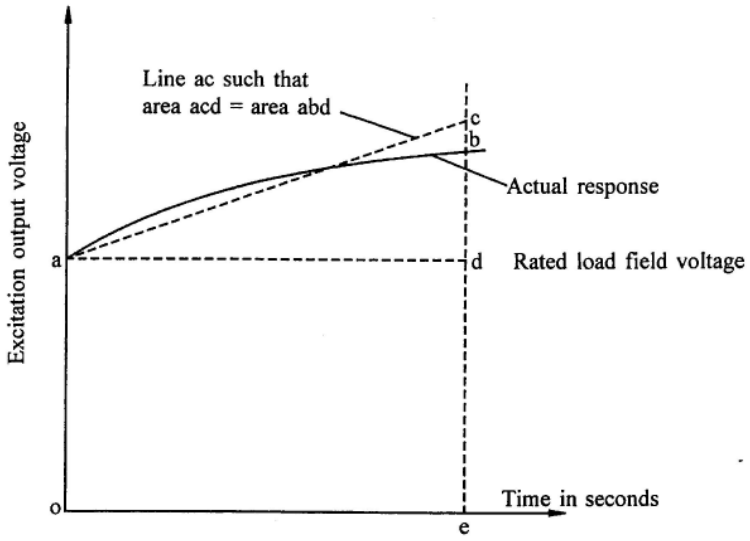


Figura Nº10

La respuesta de la Figura 10 usa los valores oe = 0.5 s y ao es fijado por la carga del voltaje de campo. Las bases para considerar un tiempo nominal de 0.5 s, es que en una perturbación severa el rotor del generador normalmente tiene peaks entre 0.4 y 0.75s.

A partir de esta curva la respuesta nominal se caracteriza mediante la razón entre el incremento del voltaje de salida del SCE dividido por la razón del voltaje de campo de la siguiente forma:

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

d. Respuesta Rápida. Es la respuesta del SCE: en una ventana temporal de 0.1 s o menos.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

4.2 Caracterización del Desempeño de Pequeña Señal

Esta caracterización entrega una manera de evaluar la respuesta de lazo cerrado del sistema de control de excitación para cambios incrementales pequeños en condiciones de operación normal del sistema. Además provee una manera conveniente para determinar o verificar los parámetros del modelo del SCE para el sistema en estudio.

El comportamiento de pequeña señal utiliza índices clásicos de la teoría de control realimentado de sistemas., por ello se los clasifica en :

- Indices asociados con la respuesta en el tiempo
- Indices asociados con la respuesta en frecuencia

A continuación presentamos ambos indicadores.

4.2.1 Indices Temporales

Se utilizan las definiciones asociadas a la respuesta típica de un sistema de segundo orden frente a un escalón. La respuesta en el tiempo típica de SCE, frente a un escalón en la entrada (referencia), es el mostrado en la figura Nº11:

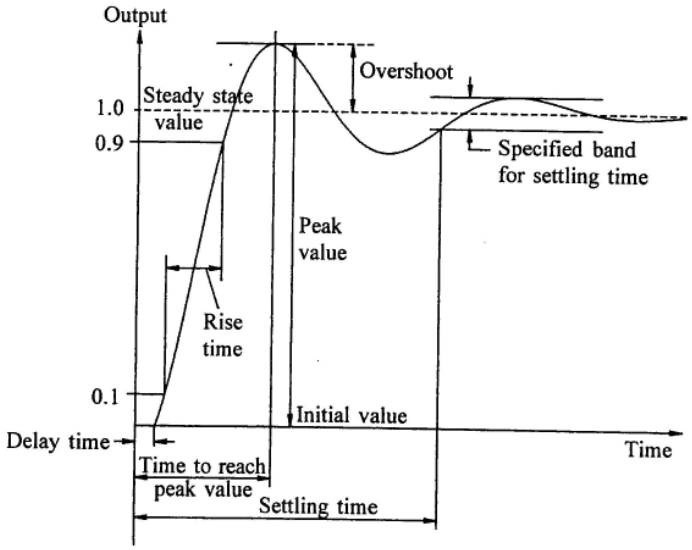


Figura Nº11

Así, los indicadores son los valores numéricos de las medidas en la Figura 11, a saber:

- Valor de régimen permanente (Steady State value). Valor estacionario de la salida.
- Porcentaje de Sobrepaso (overshoot). Porcentaje del valor máximo transitorio con respecto al valor permanente.
- Tiempo de subida (Rise time). Tiempo en alcanzar el valor máximo transitorio, usualmente tomado entre 0.1 y 0.9 del valor de régimen permanente,
- Banda de tiempo de régimen (band for settling time). Usualmente 2% del valor de regimen permanente.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

- Etc.

4.2.2 Indices de la Respuesta de Frecuencia

Similar a lo ocurrido para los índices temporales, la respuesta en frecuencia sigue la caracterización típica de la teoría de control, separando las respuestas de lazo abierto y realimentado, respectivamente..

Así, la respuesta en frecuencia de lazo abierto de un sistema de control de excitación, junto con sus principales indicadores, se muestra en la Figura Nº12:

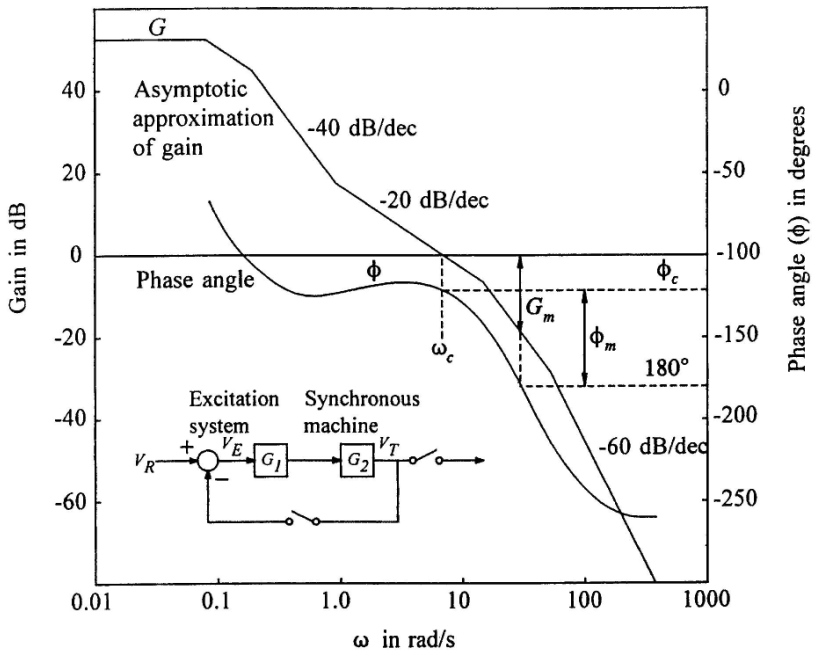


Figura Nº12

Los índices asociados con el lazo abierto para la respuesta en frecuencia son:

- Ganancia de baja frecuencia G,
- Frecuencia de corte ω_c,
- Margen de fase ϕ_m,
- Margen de ganancia G_m.
- Etc.

El efecto de estas variables en SCE muestran que valores grandes de G mejoran la regulación de voltaje en estado estacionario, una valor grande de ω_c indica una rápida respuesta, valores elevados de ϕ_m y G_m proveen una mayor estabilidad sobre el loop de control de excitación, etc.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

La respuesta de lazo cerrado con el circuito del generador abierto se muestra en la Figura Nº13.

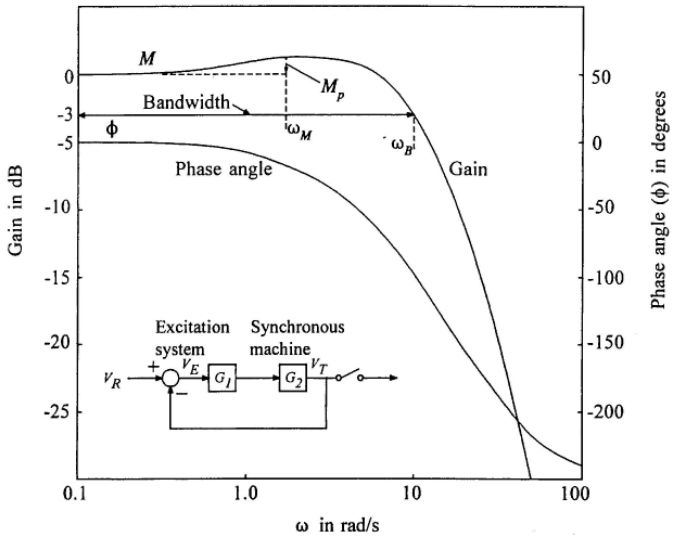


Figura Nº13

Los índices más importantes asociados con el lazo cerrado son ω_b (ancho de banda) y el valor peak Mp.

Un alto valor de Mp (>1.6) es indicativo de un sistema oscilatorio exhibiendo un gran sobrepaso en su respuesta traniente. En general Mp está entre 1.1 y 1.5.

Un ancho de banda grande indica una rápida respuesta.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

5 CONTROL Y FUNCIONES DE PROTECCIÓN

Un moderno sistema de control es mucho más que un simple regulador de voltaje. Este incluye un numero de controles, limitadores, y funciones de protección las cuales cumplen los requerimientos deseados. La naturaleza y de estas funciones y la manera con la cual interactúan con cada una de las otras se puede ver en la figura Nº14. Un sistema puede requerir funciones de protección de acuerdo de los requerimientos específicos de esta aplicación y el tipo de excitador.

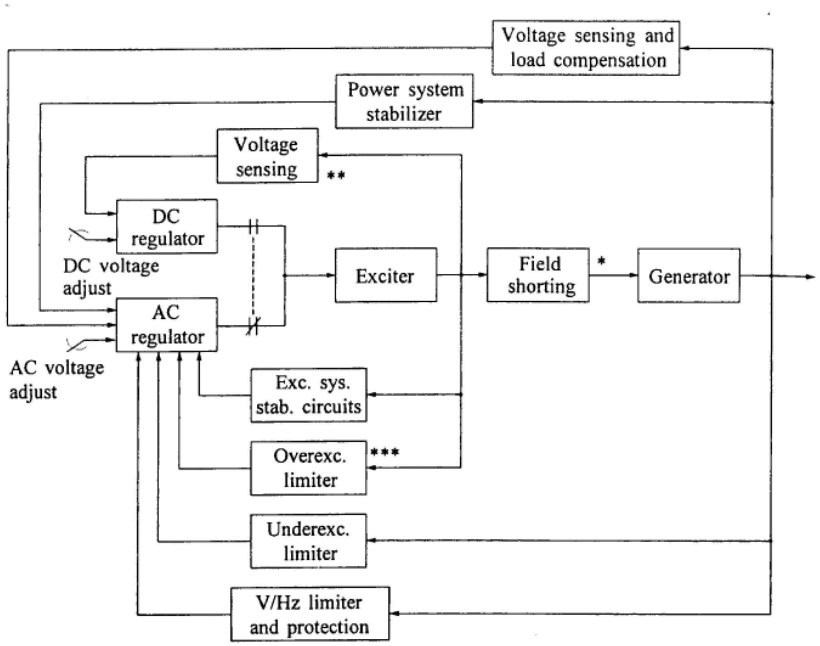


Figura Nº14

5.1 Regulador AC y DC

La función del regulador AC es mantener el voltaje en el estator del generador, otros controles auxiliares y funciones de protección que se ejecutan a través del regulador AC para controlar el voltaje de campo del generador.

El regulador DC mantiene constante el voltaje en el campo del generador y comúnmente referido como un control manual. Es usado para pruebas y cuando el regulador AC falla. Solo interviene el operario para ajustar el voltaje del campo.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

5.2 Circuitos Estabilizadores del SCE

El SCE está compuesto con elementos con retardos significativos sosteniendo un pobre desempeño dinámico. Esto es válido para sistemas DC y AC. El control de excitación es inestable cuando el generador está en circuito abierto. Por lo tanto el control de estabilización del sistema de excitación incluye una compensación serie o en feedback, que es usado para mejorar el desempeño dinámico del sistema de control. Este esta mostrado en la figura Nº15

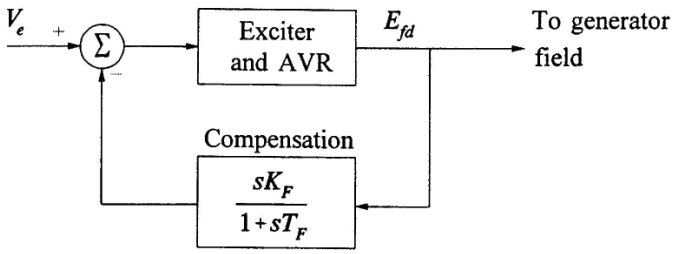


Figura Nº15

El efecto de la compensación es minimizar el cambio de fase introducido por los retardos de tiempo sobre la selección del rango de frecuencia. Dependiendo del tipo de excitación, este pueden ser muchos niveles estabilización.

5.3 Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS)

Usa una señal estabilizadora auxiliar para controlar el SCE, para mejorar el comportamiento dinámico del sistema de potencia. Comúnmente utiliza una señal de entrada para estabilizar velocidad, frecuencia y potencia. El comportamiento dinámico es mejorado por el amortiguamiento de las oscilaciones el sistema. Este es un método eficaz en el mejoramiento de la estabilidad en pequeña señal.

5.4 Compensador de Carga

El regulador automático de voltaje (AVR) normalmente controla el voltaje en terminales del estator. Algunas veces, la compensación de carga es usada para controlar el voltaje representativo, ya sea dentro o fuera del generador. Este es ejecutado por un circuito adicional en el loop AVR como e muestra en la figura Nº16. El compensador es ajustable por una resistencia y/o reactancia variable que simulan la impedancia entre los terminales del generador y el punto de control del voltaje. Con esto se mide la corriente por armadura, la caída de voltaje es sumada o restada al voltaje en terminales. La magnitud resultante Vc es la que llega al AVR, la expresión queda:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

$$Vc = \left| E_t + (R_c + jX_c) I_c \right| \quad (0)$$

Con Rc y Xc positivos, la caída de voltaje en el compensador es sumada al voltaje en bornes del generador. El compensador regula el voltaje en un punto dentro del generador y de este modo previene la caída.

Con Rc y Xc negativos, el compensador regula el voltaje en un punto al otro lado de los terminales. Esta forma de compensación es usada para compensar las caídas de voltaje a través del transformador de subida.

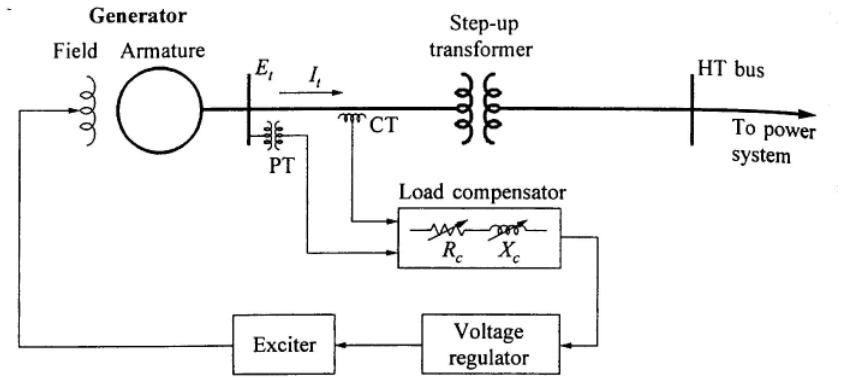


Figura Nº16

5.5 Limitador de Excitación Baja (UEL)

Intenta prevenir la reducción de excitación del generador hasta los límites de estabilidad y calentamiento.

La señal de control del UEL esta derivada de una combinación de corriente y voltaje o potencia activa y reactiva del generador. Los límites de la señal se presentan cuando excede un valor de referencia.

La figura Nº17 muestra la coordinación entre ambas.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

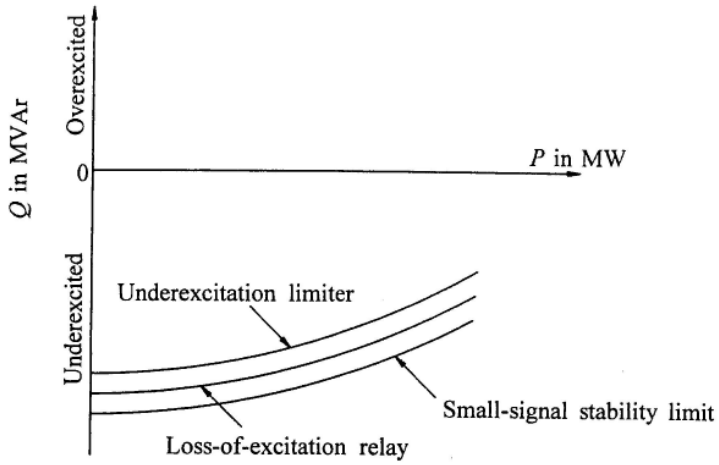


Figura Nº17

5.6 Limitador de Sobreexcitación (OXL)

Este protege al generados de los sobre calentamientos debido a la prolongada sobrecorriente de campo. Este también determina el límite de máxima excitación. El campo del generador esta diseñado para operar a un valor de carga correspondiente. El límite de sobre carga en el rotor del generador esta normalizado por ANSI Standard C50.13-1977, la cual entrega la siguiente curva:

Tiempo (s)	10	30	60	120
Voltaje/corriente en el Campo (razón de porcentaje)	208	146	125	112

La función límite de sobreexcitación típica, detecta la condición de corriente de campo, y luego de un retardo, actúa a través del regulador AC. Si esto no es exitoso, lo transfiere al regulador DC. Si este tampoco reduce la excitación simplemente desconecta el campo.

Existen dos tipos de retardos en el tiempo: fijo e inverso. El tiempo límite fijo opera cuando la corriente de campo excede el valor pick. El inverso opera de acuerdo a la capacidad térmica del campo. Esto se muestra en la figura Nº18

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

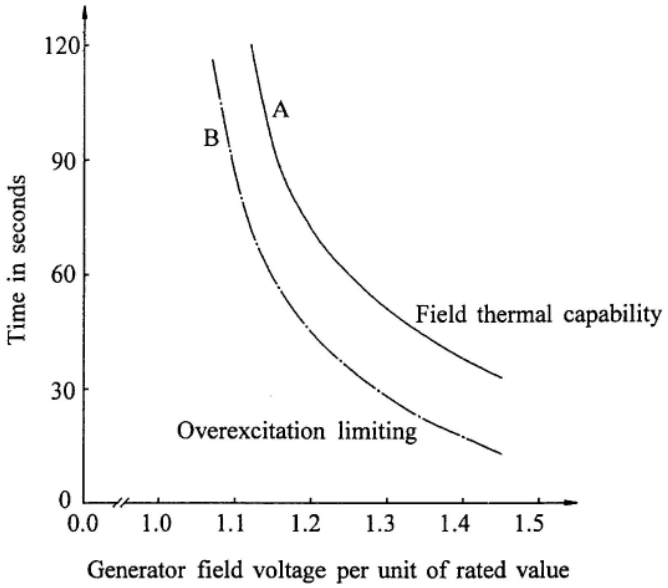


Figura Nº18

5.7 Limitador y Protección Volts/Hertz

Este se usa para proteger al transformador debido a un daño provocado por un flujo magnético resultante debido a baja de frecuencia o sobrevoltaje. Un excesivo flujo magnético provoca una saturación en el núcleo lo que lleva a un sobrecalentamiento, lo que provoca daños en el núcleo del generador y transformador.

Típicamente los limitadores V/Hz para generadores (GEN) y transformadores de subida (XFMR) se muestran continuación:

V/HZ		1.25	1.2	1.15	1.10	1.05
Daño en el	GEN	0.2	1.0	6.0	20.0	inf
Tiempo Min.	XFMR	1.0	5.0	20.0	inf	

5.8 Circuito de Campo-Reducido

Permite que la corriente rectificada no fluya en sentido inverso. La figura Nº19 muestra el esquema característico. Hay un circuito provisto con un bypass en la excitación que permite que la corriente negativa fluya por él.

Este cuanta con un tiristor y una resistencia de descarga de campo (FDR).

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

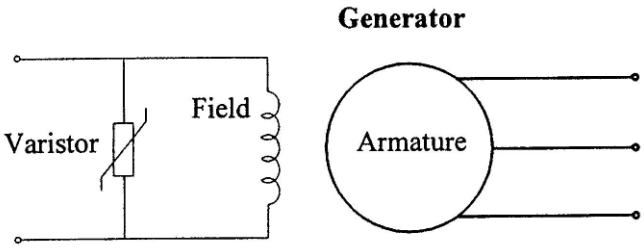


Figura Nº19

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

6. MODELOS DE SCE

Los modelos matemáticos son importantes para el diseño y coordinación de los circuitos complementarios y funciones de protección, y para el estudio es estabilidad y operación de sistemas.

6.1 Sistema por Unidad

Este sistema nos permite varias opciones para el voltaje y corriente de salida en el excitador.

Luego para una máquina sincrona operando en vacío sus corrientes son cero id=iq=0,

$$e_d = -\Psi_q = -L_q i_q = 0 \qquad (1)$$
$$e_q = \Psi_d = L_{ad} i_{fd}$$

Referido a la figura Nº20, la corriente de campo debe producir un voltaje de 1%u en el estator.

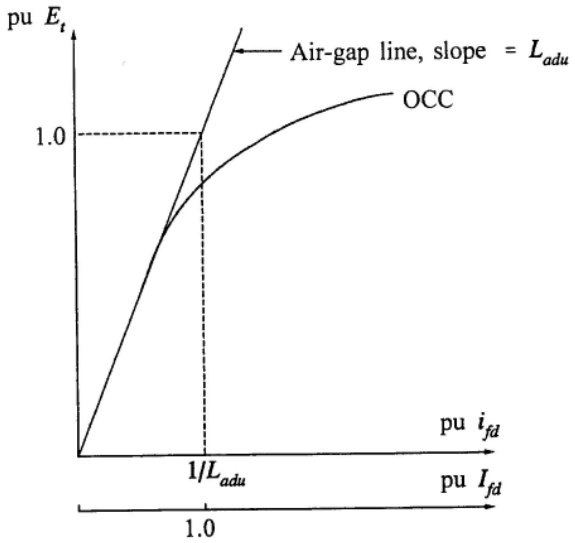


Figura Nº20

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

$$E_t = e_q = L_{adu} i_{fd} = 1.0\,pu$$
$$\Rightarrow i_{fd} = \frac{1}{L_{adu}}\,pu \qquad (2)$$
$$\Rightarrow e_{fd} = R_{fd} i_{fd} = \frac{R_{fd}}{L_{adu}}\,pu$$

Por definición I_{fd} corresponde a la corriente de campo a la salida del excitador que es igual a 1.0pu.

$$I_{fd} = L_{adu} i_{fd}$$
$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{rf}} e_{fd} \qquad (3)$$

Físicamente la salida voltaje/corriente del excitador y el generador son las mismas. Distinguidas sólo por su valor por unidad para modelar la excitación y la máquina síncrona. Esto se ilustra en la siguiente figura Nº21.

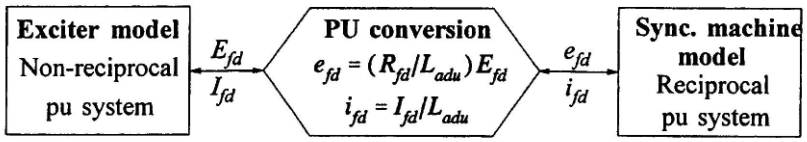


Figura Nº21

En estado estacionario Efd e Ifd son iguales. Pero durante un tranSCEnte, Efd e Ifd son diferentes, Efd esta determinado por el sistema de excitación e Ifd por la dinámica del circuito de campo. Algunas observaciones interesantes para una apropiada conversión:

- El factor Ladu/Rfd están en estado estacionario, en ausencia de saturación
- La ecuación en términos de ΔEfd es:

$$\Delta\Psi_d(s) = \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT_{d0}^{'})(1 + T_{d0}^{''})}\Delta E_{fd} \qquad (4)$$
$$\Delta\Psi_d(s) = \overline{G}(s)\Delta E_{fd}$$

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

En estado estacionario G(s)= es igual a 1.0pu. Así la relación entre ambas es:

$$\Delta\Psi_d(s) = \frac{1}{(1+sT'_{d0})}\Delta E_{fd} \quad (5)$$

- Las ecuaciones considerando el generador como un circuito abierto:

$$\Delta\Psi_d(s) = \Delta e_q = \Delta E_t \quad (6)$$

Sustituyendo y encontrando la función de transferencia tenemos:

$$\frac{\Delta E_t(s)}{\Delta E_{fd}(s)} = \frac{1}{1+sT'_{d0}} \quad (7)$$

Especificación de temperatura

La salida de voltaje del excitador depende de la resistencia de campo de la máquina síncrona, la cual depende de la temperatura del campo. El valor de la resistencia de campo usada correspondería a la resistencia bajo la actual condición de operación en simulación. El valor de T'do estaría relacionado con la resistencia de campo.

La resistencia de campo corregida sería:

$$R_S = R_t\left(\frac{t_s + k}{t_t + k}\right) \quad (8)$$

donde ts= temperatura de operación ºC
tt= temperatura a la cual se desea conocer el valor de la resistencia
Rt= Resistencia a temperatura ts
Rs= resistencia a temperatura tt

El valor de k es constante y depende del material.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

6.2 Modelamiento de la Componentes del SCE

Dependen del tipo de excitación: DC, AC, rectificada, magnética, rotacional, o electrónico.

6.2.1 Excitación Independiente DC

El circuito se muestra en la figura Nº22:

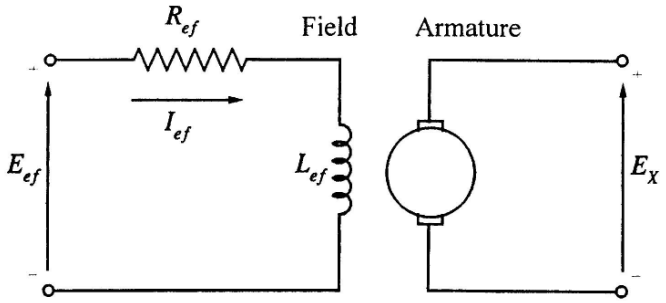


Figura Nº22

Para la excitación de campo del circuito escribimos:

$$E_{ef} = R_{ef} I_{ef} + \frac{d\psi}{dt} \qquad (9)$$
$$\psi = L_{ef} I_{ef}$$
$$\Rightarrow E_X = K_X \psi$$

Donde Kx depende de la velocidad y configuración de la armadura del excitador.

La salida de voltaje Ex es una función no lineal de la corriente de campo Ief debido a la saturación. El voltaje Ex esta también afectado por la carga en el excitador. Es común en modelos de excitador DC es considerado para saturación y regulación de carga aproximadamente por una combinación de dos efectos y usando la resistencia-constante de la curva carga-saturación, en la figura Nº23 se puede observar esta curva:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

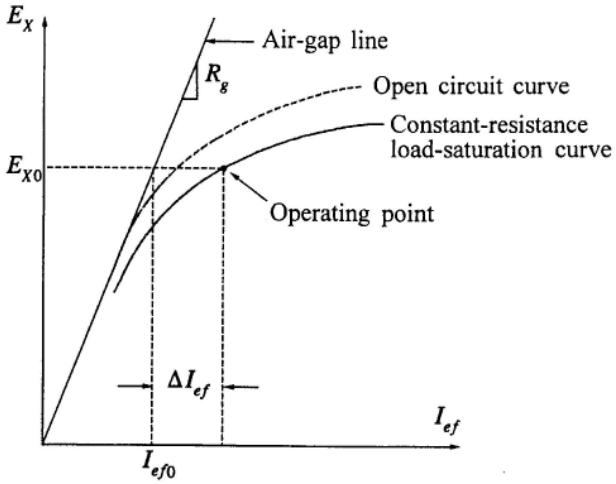


Figura Nº23

Con esto tenemos:

$$I_{ef} = \frac{E_X}{R_G} + \Delta I_{ef} \quad (10)$$

donde ΔIef es una función no lineal de Ex y puede ser expresada como:

$$\Delta I_{ef} = E_x S_e(E_X) \quad (11)$$

Donde Se(Ex) es la función de saturación dependiente de Ex.
De las ecuaciones anteriores tenemos:

$$E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X + R_{ef} S_e(E_X) E_X + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt} \quad (12)$$

Arriba tenemos el voltaje de salida Ex en función del voltaje de entrada Eef. Llevando a por unidad, eligiendo los valores bases de Ex e Ief igual a los valores requeridos por la máquina síncrona:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

$$E_{Xbase} = E_{fdbase}$$
$$I_{efbase} = \frac{E_{fdbase}}{R_g} \quad (13)$$
$$R_{gbase} = R_g$$

Dividiendo por Exbase tenemos:

$$\frac{E_{ef}}{E_{Xbase}} = \frac{R_{ef}}{R_g}\frac{E_X}{E_{Xbase}} + R_{ef}S_e(E_X)\frac{E_X}{E_{Xbase}} + \frac{1}{K_X}\frac{d}{dt}\left(\frac{E_X}{E_{Xbase}}\right) \quad (14)$$

En por uno tenemos

$$\overline{E}_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g}\overline{E}_X(1+\overline{S}_e(\overline{E}_X)) + \frac{1}{K_X}\frac{d\overline{E}_X}{dt} \quad (15)$$

La ecuación de saturación la podemos definir como:

$$\overline{S}_e(\overline{E}_X) = \frac{\Delta\overline{I}_{ef}}{\overline{E}_X} = R_g S_e(E_X) \quad (16)$$

La ecuación de saturación expresada en por unidad queda, de acuerdo a la figura Nº24:

$$\overline{S}_e(\overline{E}_X) = \frac{A-B}{B} \quad (17)$$

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

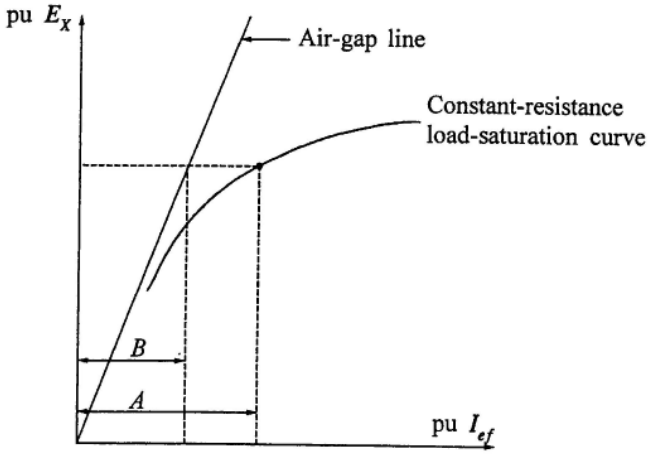


Figura Nº24

El parámetro Kx queda:

$$K_X = \frac{E_X}{\psi} = \frac{E_X}{L_{ef} I_{ef}} = \frac{R_g \bar{E}_X}{L_{ef} \bar{I}_{ef}} \quad (18)$$

Trabajando en un punto de operación (Ief0,Ex0) queda:

$$L_{fu} = L_{ef} \frac{\bar{I}_{ef\,0}}{\bar{E}_{X\,0}} \quad (19)$$

Por esto, Kx=Rg/Lfu. Sustituyendo en la ecuación 15 tenemos

$$\bar{E}_{ef} = K_E \bar{E}_X + \bar{S}_E(\bar{E}_X)\bar{E}_X + T_E \frac{d\bar{E}_X}{dt} \quad (20)$$

Donde:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g}$$

$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \qquad (21)$$

$$S_E(\overline{E}_X) = \overline{S}_E(\overline{E}_X)\frac{R_{ef}}{R_g}$$

La ecuación 20 representa la relación de entrada salida del excitador. Para una excitación independiente, la entrada de voltaje Eef es la salida del regulador Vr. La salida de voltaje Ex de una excitación DC esta directamente aplicado al campo del generador sincronica. Por lo tanto queda expresado en el siguiente diagrama de bloques de la figura Nº25

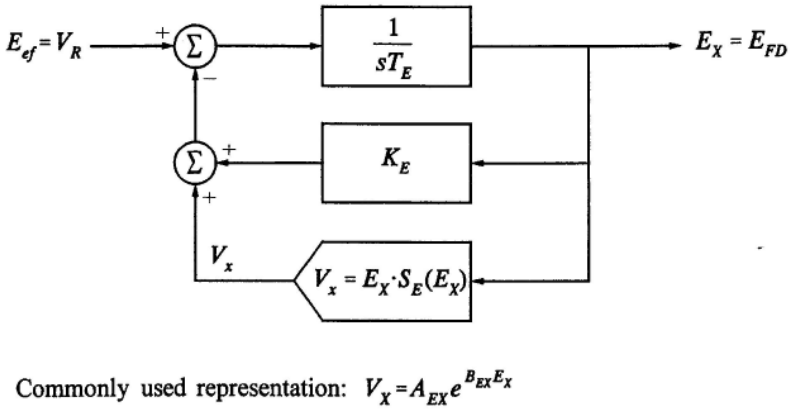


Figura Nº25

El ajuste de la resistencia del circuito del campo Ref afecta al Ke también a la función de saturación Se(Ex), pero no al tiempo de integración T_E del forward del loop.

Hay varias expresiones matemáticas convenientes que pueden ser usadas para el efecto de la saturación del excitador. Una comúnmente usado es:

$$V_X = E_X S_E(E_X) = A_{EX} e^{B_{EX} E_X} \qquad (22)$$

El diagrama de bloques de la figura Nº26 provee la manera conveniente de representar el estudio de estabilidad.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

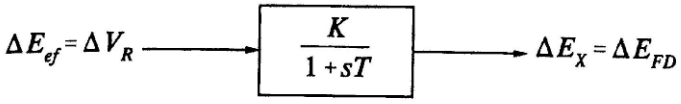


Figura Nº26

Para el punto de operación $E_X=E_{fd}=E_{fd0}$ la ganancia efectiva K y la constante de tiempo del excitador para pequeñas perturbaciones son:

$$K = \frac{1}{B_{EX} S_E(E_{FD0}) + K_E} \quad (23)$$

$$T = \frac{T_E}{B_{EX} S_E(E_{FD0}) + K_E}$$

Donde

$$S_E(E_{X0}) = A_{EX} e^{B_{EX} E_{FD0}} \quad (24)$$

6.2.2 Excitador DC Autoexcitado

Es el que muestra la figura Nº27.

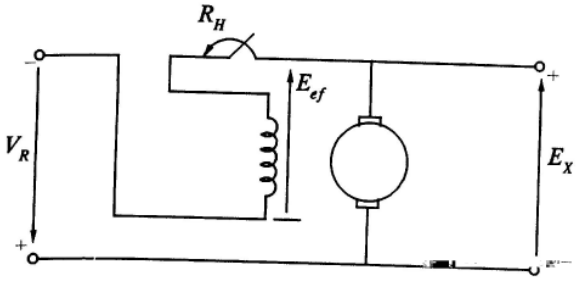


Figura Nº27

Para este regulador la salida V_R esta en serie con el excitador del campo shunt. Entonces:

$$E_{ef} = V_R + E_X \quad (25)$$

La relación entre E_{ef} y E_X se desarrollan separadamente en este caso.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

$$V_R + E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} E_X (1 + S_e(E_X)) + \frac{1}{K_X} \frac{dE_X}{dt} \quad (26)$$

Lo que se reduce a:

$$V_R = K_E E_X + S_e(E_X) E_X + T_E \frac{dE_X}{dt} \quad (27)$$

Donde:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} - 1$$
$$T_E = \frac{L_{fu}}{R_g} \quad (28)$$
$$S_E = S_e(E_X) \frac{R_{ef}}{R_g}$$

El Diagrama de bloques de la figura Nº25 también puede aplicarse a este caso, donde el valor de las constantes se detalla en las ecuaciones 28.

6.2.3 Excitador AC y Rectificadores

Se puede observar en la figura Nº28. La estructura general es similar al DC. Sin embargo en este caso la regulación de carga debido a la reacción en la armadura esta calculado de manera distinta, y la curva de saturación sin carga es usada para definir la función de saturación. El voltaje interno del excitador V_E es sin carga para determinar la función de saturación. La corriente de campo del generador principal I_{FD} representa la corriente de carga del excitador, y la retroalimentación negativa de $K_D I_{FD}$ la reacción de la armadura al efecto de desmagnetización. La constante K_D depende del excitador sincrónica AC y las reactancias transientes. La figura Nº29 ilustra el cálculo de la función de saturación $S_e$para un valor específico de V_E:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

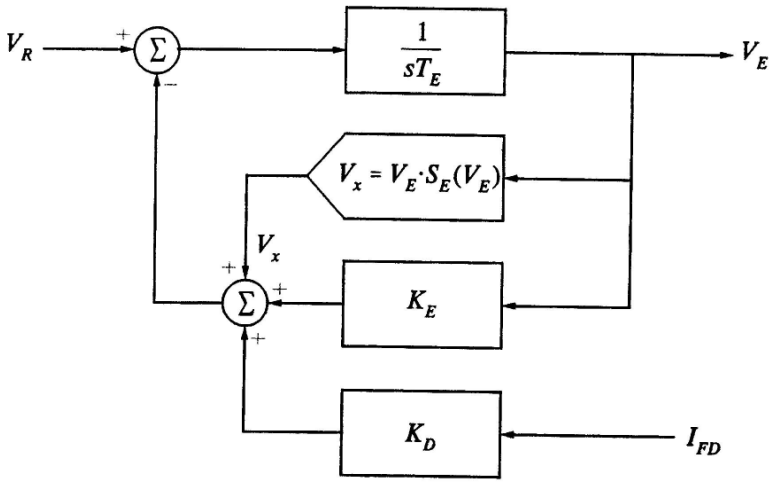


Figura Nº28

$$S_E(V_E) = \frac{A - B}{B} \quad (29)$$

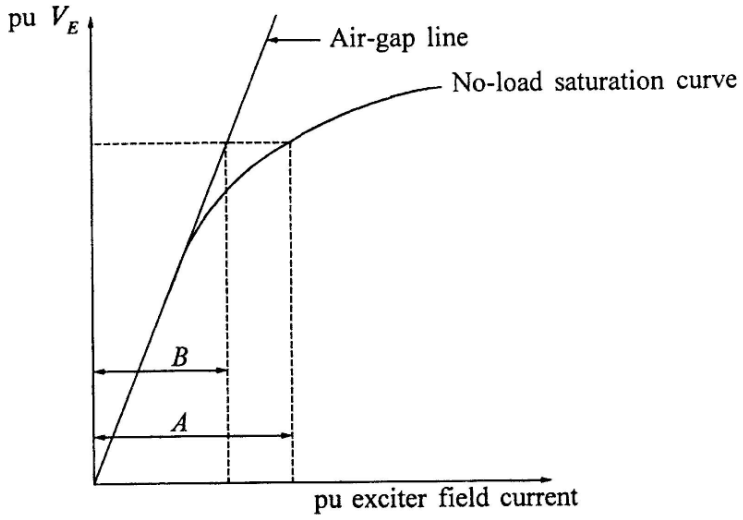


Figura Nº29

Se utilizará una expresión para V_X similar al de la ecuación 22.

El puente rectificador trifásico es comúnmente usado para rectificar la salida de voltaje del excitador.

El efecto de la reactacia en la rectificación incorpora retardos y demora el proceso de conmutación. Esto produce un decrecimiento en el promedio del voltaje de salida del rectificador, con un incremento de su carga.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

Las ecuaciones que definen al rectificador son:

$$E_{FD} = F_{EX} V_E \quad (30)$$
$$F_{EX} = f(I_N)$$
$$I_N = \frac{K_C I_{FD}}{V}$$

La constante Kc depende de la reactancia de conmutación. La expresión para la función $f(I_N)$ caracteriza los tres modos de operación del circuito rectificador los que son:

$$\begin{aligned} &Modo1: \quad f(I_N) = 1.0 - 0.577 I_N, \quad si\ I_N \le 0.433 \\ &Modo2: \quad f(I_N) = \sqrt{0.75 - I_N^2}, \quad si\ 0.433 < I_N < 0.75 \\ &Modo3: \quad f(I_N) = 1.732(1.0 - I_N), \quad si\ 0.75 \le I_N \le 1.0 \end{aligned} \quad (31)$$

Ahora I_N no excede 1.0, Pero para algunas ocasiones F_{EX} sería cero.
El Diagrama de bloque del efecto del rectificador se puede ver en la figura Nº30

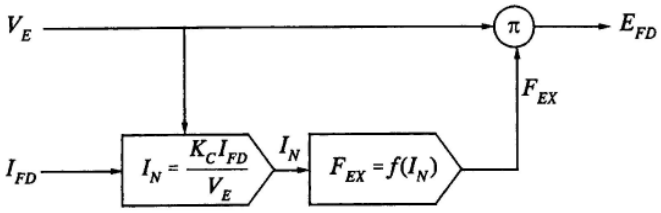


Figura Nº30

6.2.4 Amplifidores CA

Pueden ser magnéticos, rotacionales o electrónicos. Los magnéticos y los electrónicos son caracterizados por una ganancia y puede también incluir una constante de tiempo. Muchos de ellos pueden ser representados por el diagrama de la figura Nº31

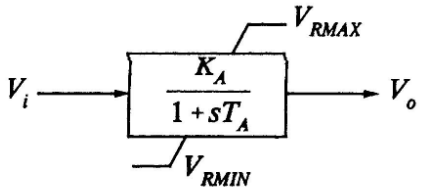


Figura Nº31

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

La salida del amplificador esta limitada por la saturación o las limitaciones de la fuente; esta representan los límites V_{RMAX} y V_{RMIN} en la figura Nº31.

6.2.5 Circuito Estabilizador del SCE

Hay varios caminos físicos para identificar la función estabilizadora identificada en la figura Nº15. Algunos SCE usan transformadores serie, como se muestra en la figura Nº32. Las ecuaciones del transformador aplicando Laplace son:

$$V_1 = R_1 i_1 + sL_1 i_1 + sMi_2 \quad (32)$$
$$V_2 = R_2 i_2 + sL_2 i_2 + sMi_1$$

Donde los subíndices 1 y 2 indican primario y secundario respectivamente. Además R,L y M son resistencia, inductancia e inductancia mutua respectivamente.

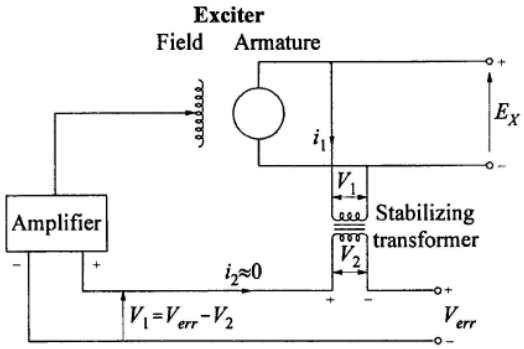


Figura Nº32

El secundario del transformador está conectado a un circuito de alta impedancia así tenemos

$$V_1 = (R_1 + sL_1)i_1 \quad (33)$$
$$V_2 = sMi_1$$

Luego

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{sM}{R_1 + sL_1}$$
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{sK_F}{1 + sT_F}$$

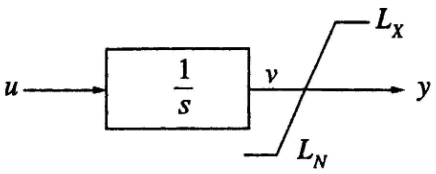
Donde K_F=M/R y T_F=L_1/R.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

6.2.6 Limites Windup y Non-Windup

Es importante distinguir entre límites "windup" y "non-windup". Este determina si los límites se encuentran en el bloque integrador, bloque de la constante de tiempo. Las figuras Nº33a y Nº33b muestran la diferencia entre ellos.

Representation:



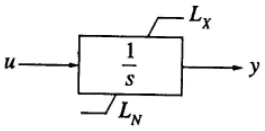
System equation: $\frac{dv}{dt} = u$

Limiting action:

If $L_N < v < L_X$, then $y = v$
If $v \geq L_X$, then $y = L_X$
If $v \leq L_N$, then $y = L_N$

Figura Nº33a

Representation:



System equation: $\frac{dy}{dt} = u$

Limiting action:

If $L_N < y < L_X$, then $\frac{dy}{dt} = u$
If $y \geq L_X$ and $\frac{dy}{dt} > 0$, then set $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_X$
If $y \leq L_N$ and $\frac{dy}{dt} < 0$, then set $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_N$

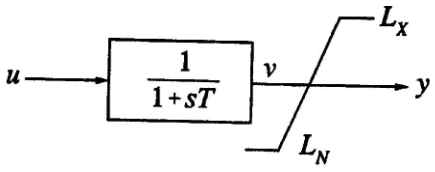
Figura Nº33b

Con el límite windup la variable ν no están limitados. Con límite nonwindup, la variable de salida y esta limitada.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

La figura Nº34a y Nº34b muestran la diferencia entre los dos tipos de límites. Cuando se aplican a un bloque de constante de tiempo.

Representation:



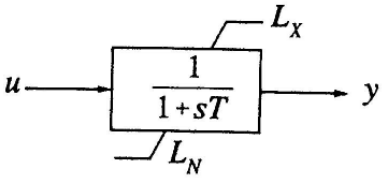
System equation: $\frac{dv}{dt} = \frac{u-v}{T}$

Limiting action:

If $L_N < v < L_X$, then $y = v$
If $v \geq L_X$, then $y = L_X$
If $v \leq L_N$, then $y = L_N$

Figura Nº34 A

Representation:



System equation: $f = \frac{u-y}{T}$

Limiting action:

If $L_N < y < L_X$, then $\frac{dy}{dt} = f$

If $y \geq L_X$ and $f > 0$, then set $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_X$

If $y \leq L_N$ and $f < 0$, then set $\frac{dy}{dt} = 0$, $y = L_N$

Figura Nº34b

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

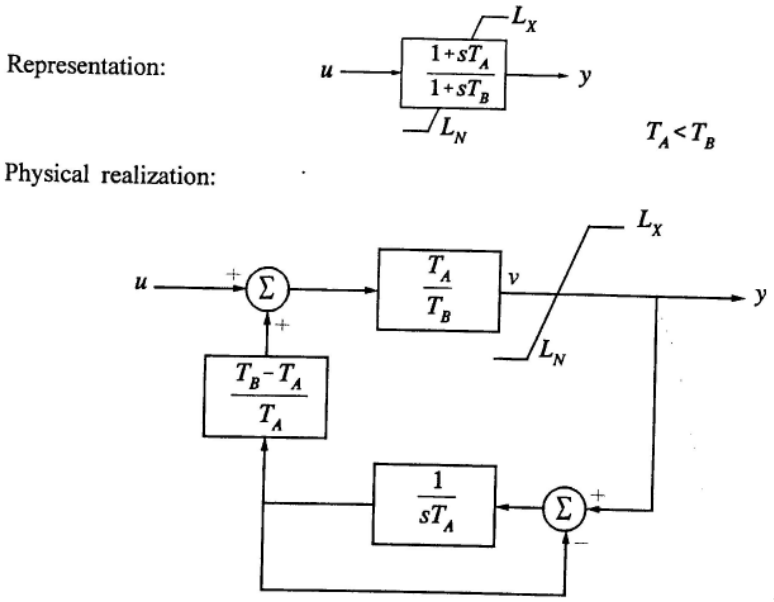


Figura Nº35

6.2.7 Funciones de Accionamiento

Estos circuitos son usados cuando es requerido controlar a una de dos señales de entrada, dependiendo de la relación de tamaño de una respecto a la otra. La figura Nº36 muestra las funciones LV de valor pequeño y HV de valor alto.

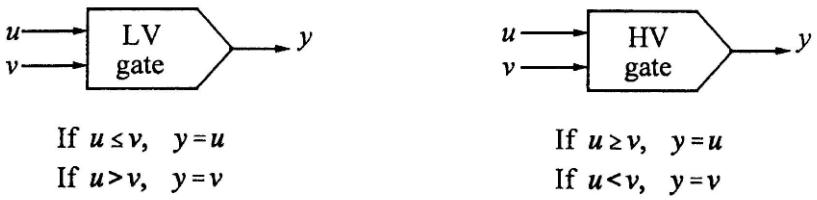


Figura Nº36

6.2.8 Transductor del Voltaje de Terminales y Compensado de Carga

El diagrama de la figura Nº38 representa este elemento. La constante de tiempo T_R representa la rectificación y el filtrado del voltaje en terminales del generador. Los parámetros del compensador de carga son R_C y X_C. Las variables de entrada E_t e I_t están en

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

fase. Cuando el compensador no actúa sus parámetros son cero.

El transductor del voltaje de salida V_C forma la principal señal al SCE. Si el compensador de carga y T_R es ignorado, $V_C=E_r$:

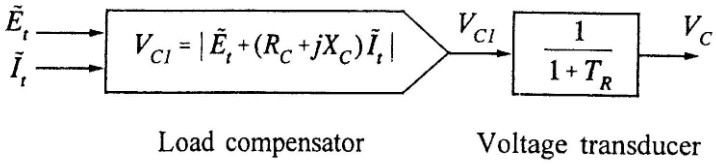


Figura Nº37

6.3 Modelamiento Completo del SCE

La Figura Nº39 detalla la estructura general del modelo de un SCE.

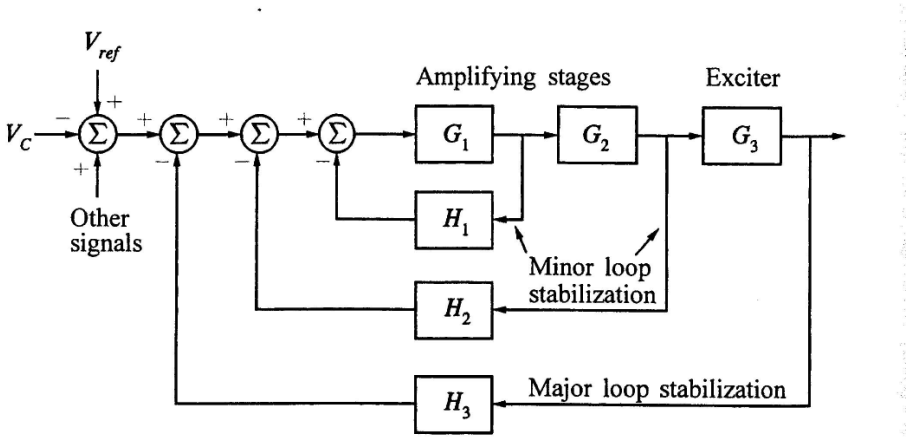


Figura Nº38

La apropiada estructura para el modelo reducido depende del tipo del SCE. La IEEE estandarizó 12 modelos en diagramas de bloques para representar la gran variedad de sistemas de excitación en uso.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

6.3.1 Tipo DC1A

Su muestra en la figura Nº39

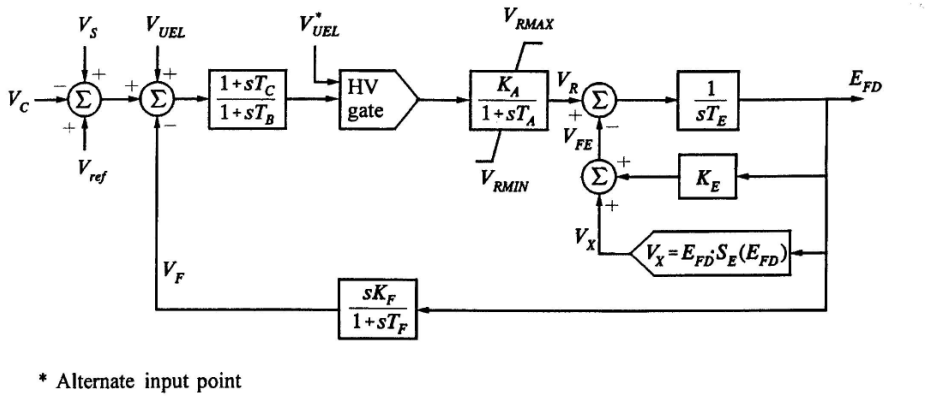


Figura Nº39

Representa el control de campo del conmutador del excitador. El excitador puede ser independiente o autoexcitado. Cuando es autoexcitado K_E es elegido tal que V_R=0.

6.3.2 Tipo AC1A

Se muestra en la figura Nº40

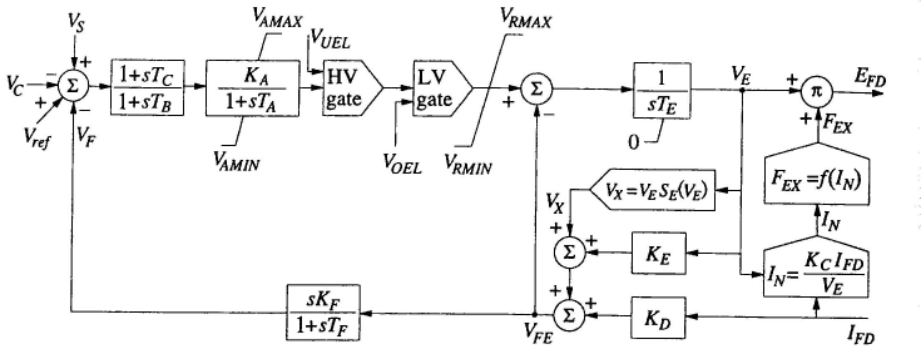


Figura Nº40

Este controla el alternador del campo del SCE con rectificación no controlado. La

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

fuente del excitador del campo es por un excitador “Pilot”, y la fuente del regulador de voltaje no está afectado por tranSCEntes externos.

6.3.3 Tipo AC4A

Se muestra en la figura Nº41

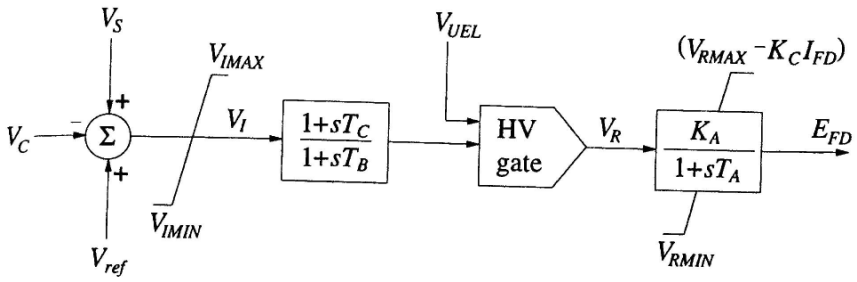


Figura Nº41

Representa una fuente alternador controlada por rectificación. La constante de tiempo asociada con el regulador y el encendido de los tiristores esta representada por T_A. K_A representa la ganancia. La operación del rectificador es en modo 1. Los efectos de la regulación del rectificador sobre la salida se representan por K_C.

6.3.4 Tipo ST1A

Representa una fuente de potencial con rectificación controlada. La excitación es abastecida desde un transformador desde los terminales del generador; por lo tanto el voltaje tope es directamente proporcional al voltaje en terminales del generador. El Efecto del rectificador está representado por K_C. La figura Nº42 muestra este tipo:

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

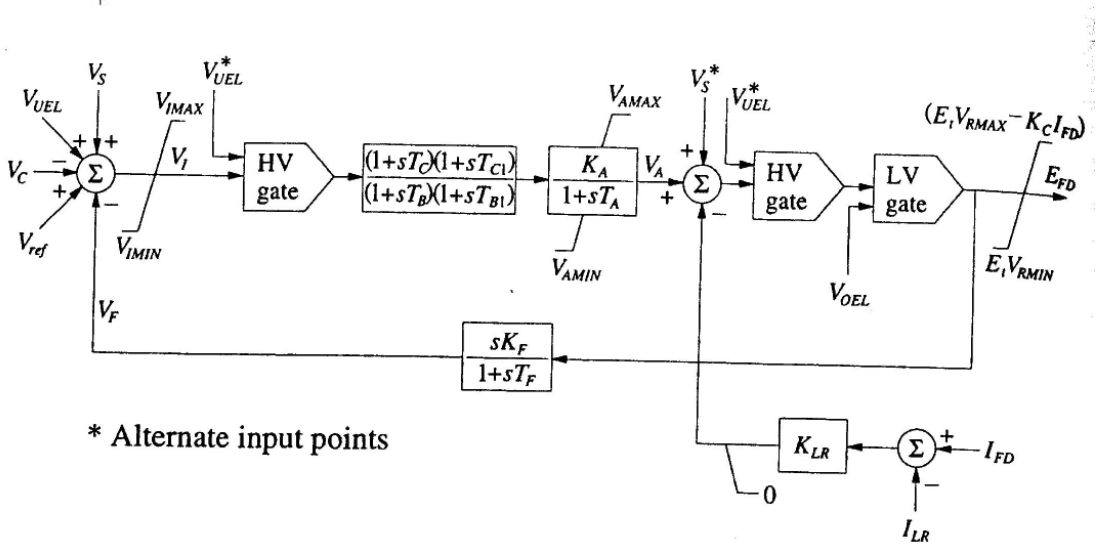
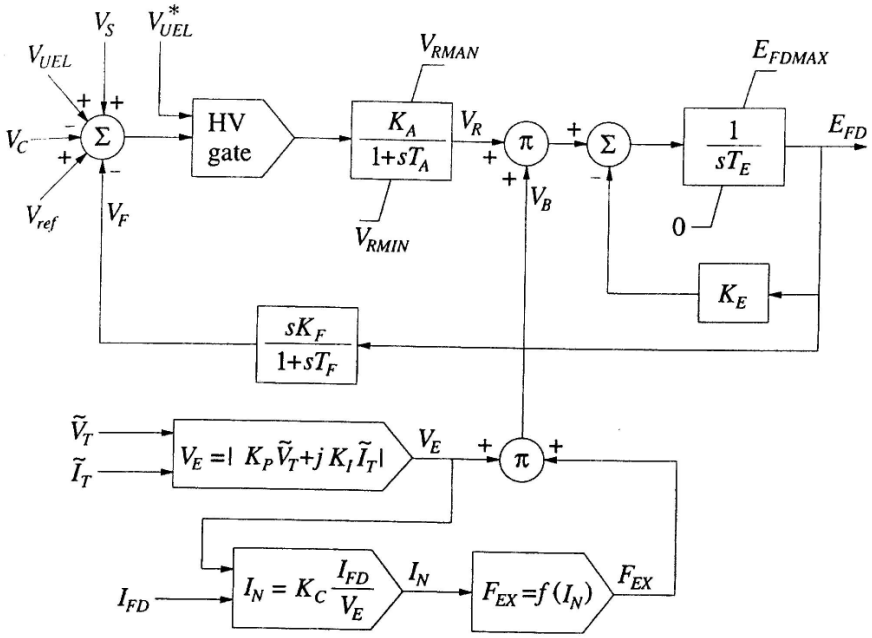


Figura Nº42

6.3.5 Tipo ST2A

Este tipo representa una fuente compuesta rectificada. La fuente de excitación está formada por la combinación fasorial del voltaje de armadura en el generador y la corriente. El control de regulación de la salida del excitador es a través del control de saturación del transformador de poder. El Parámetro T_E representa la razón de integración; E_{FDMAX} representa el límite de la salida debido a la saturación magnética. La figura Nº43 muestra este tipo.

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl



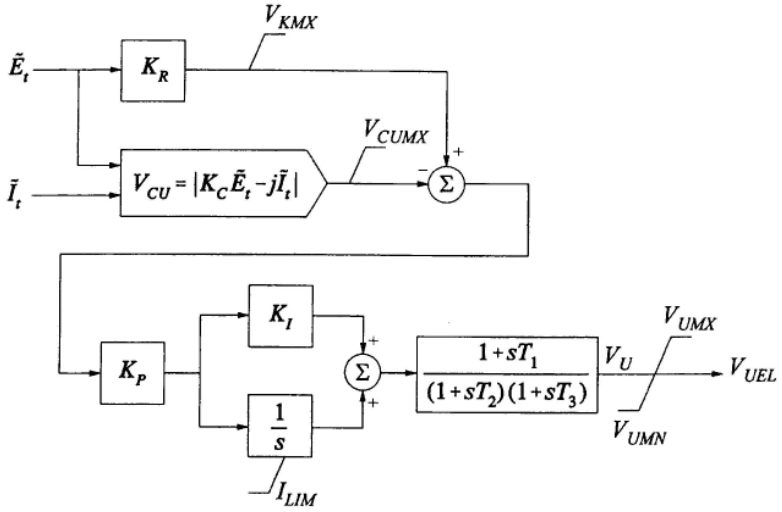
* Alternate input point

Figura N°43

6.4 Modelamiento de Limitadores

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

6.4.1 Limitador de Baja excitación:Se presenta en la Figura Nº44



Sample data:

K_P = 0.015 K_I = 10.0 T_1 = 6.4 s T_2 = 0.8 s
T_3 = 0.64 s V_{KMX} = 4.0 V_{CUMX} = 4.0
V_{UMX} = 0.2 V_{UMN} = -0.2 I_{LIM} = -0.012
K_R = Radius of UEL characteristic
K_C = Centre of UEL characteristic

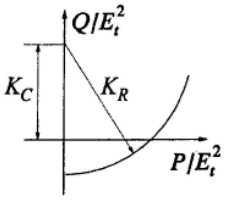


Figura Nº44

Limitador V/Hz: figura Nº45

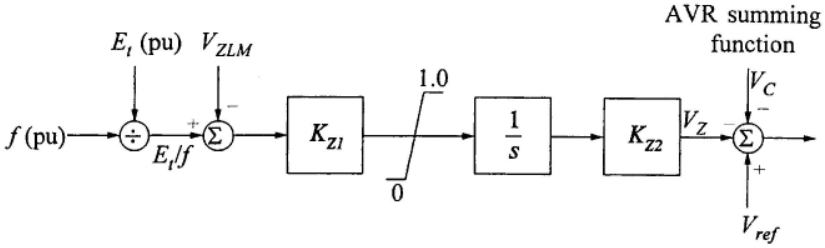
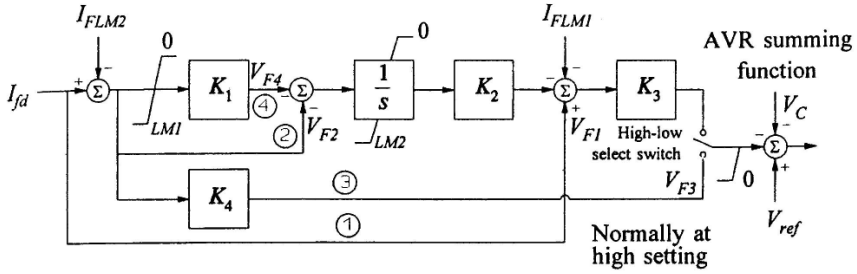


Figura Nº45

6.4.2 Limitador de sobrecorriente o corriente de campo: figura Nº46

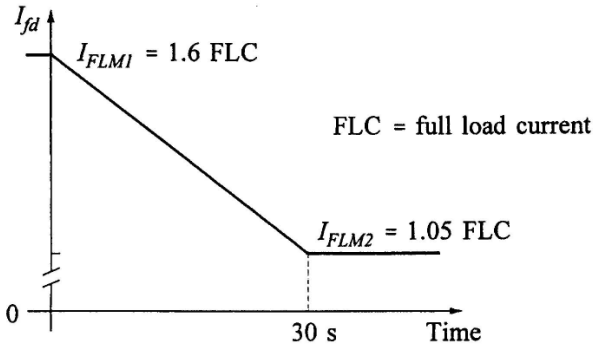
Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl



(a) Block diagram representation

Sample data:

I_{FLM1} = 1.6×full load I_{fd} I_{FLM2} = 1.05×full load I_{fd}
K_1 = 150 K_2 = 0.248 K_3 = 12.6
K_4 = 140 $LM1$ = −0.085 $LM2$ = −3.85



(b) Limiting characteristics

Figura Nº46

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

7. EJEMPLO SIMPLIFICADO MODELO AVR

Una de las versiones más simplificadas del modelo del regulador de tensión se muestra en la Figura 47.

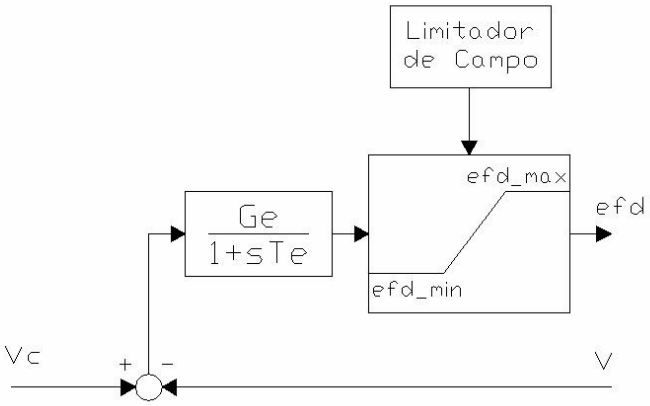


Figura 47. Modelo de AVR

Se puede ver que el modelo se compone de una ganancia y un retardo, los cuales se conectado en cascada con un limitador de tensión. De esta forma se puede determinar directamente la ecuación diferencial que modela su comportamiento como

$$\frac{\partial efd(i)}{\partial t} = \frac{-efd(i) + Ge(i)\cdot\left(Vc(i) - V(i)\right)}{Te(i)}$$

Se puede notar, que si se supone que la constante de tiempo del regulador de voltaje (Te) es igual a cero, entonces el voltaje de campo del generador (efd), ya no será una variable dinámica, porque se elimina una ecuación diferencial. En estas condiciones la determinación del voltaje de campo del generador se realiza mediante una sencilla ecuación algebraica.

$$efd(i) = Ge(i)\cdot\left(Vc(i) - V(i)\right)$$

La saturación del generador se produce cuando la tensión de campo, o de exitación de la máquina, excede un valor umbral ($efd_{per}(i)$), predefinido durante un cierto periodo (τ).

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl

REFERENCIAS

[1] P. M. Anderson and A. A. Fouad, " Power System Control and Stability ", The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, Ch. 4, 1977.
[2] J. Arrillaga, C. P. Arnold and B. J. Harker," Computer Modeling of Electrical Power Systems ",Jhon Wiley & Sons, 1983.
[3] IEEE Committee Report, “Excitation Systems Models for Power SystemsStability Studies”, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, pp 494-509, feb. 1981
[4] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, Standar 421.5-1992. .

Av. Tupper 2007
Casilla 412-3
Santiago – Chile
Tel.: (56-2) 978 42 03
Fax: (56-2) 695 38 81
lvargasd@ing.uchile.cl
www.die.uchile.cl
www.fcfm.uchile.cl