

ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION Y REGULADORES DE VOLTAJE DE LAS MAQUINAS SINCRONICAS

ING. POVEDA MENTOR
ING. RIVERA PABLO
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Este trabajo está conducido a representar la máquina sincrónica en forma detallada, incluyéndose la saturación y adicionando la modelación del sistema de excitación. Se utiliza un sistema eléctrico compuesto de una máquina sincrónica con los respectivos sistemas de excitación conectada a una barra infinita a través de un transformador y una línea de transmisión.

Para cumplir con los objetivos propuestos se realiza la modelación de la máquina, se definen las características sobresalientes de los diferentes sistemas de excitación y se plantean sus modelaciones matemáticas válidas para la simulación digital. Asociadas, cada una de ellas, a la simulación de la máquina sincrónica, se presentan resultados del sistema completo a una perturbación que da origen a una respuesta dinámica. Se comparan las respuestas de los diferentes sistemas de excitación.

INTRODUCCION

La parte fundamental en un sistema eléctrico de potencia es la máquina sincrónica, por tanto es importante analizar y comprender la operación de los sistemas de excitación y reguladores de voltaje; así como, elaborar sus modelos matemáticos, para de esta manera entender su influencia sobre el comportamiento del sistema eléctrico de potencia.

El modelo matemático presentado en este trabajo para la simulación de los sistemas de excitación toma como variables de estado los voltajes.

Las ecuaciones que determinan los sistemas de excitación son acopladas a las ecuaciones que conforman el modelo de la máquina sincrónica, para de esta manera tomar un sistema global que será analizado en el computador digital.

El método empleado para la resolución de las ecuaciones diferenciales es el método Runge-Kutta de cuarto orden.

La modelación de la máquina sincrónica asociada a una línea de transmisión se ha tomado de la referencia [1] "Methods of Interfacing Synchronous Machine with Transmission Systems in a Digital Simulation", a esta modelación se añade la saturación de la máquina sincrónica.

Los sistemas de excitación a estudiarse son los sistemas de excitación de corriente continua (tipo DC), de corriente alterna (tipo AC) y sistemas de excitación estáticos (tipo ST) según el IEEE [2].

Una vez modelado el sistema general se presentan los resultados gráficos de las distintas variables para de esta manera comparar sus respuestas aplicando los diferentes sistemas de excitación.

1. MODELO DE LA MAQUINA SINCRONICA

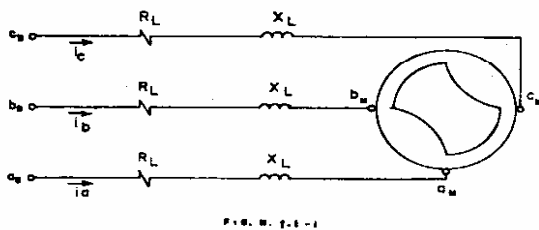
Las ecuaciones que determinan el modelo de la máquina sincrónica acoplada a una barra infinita en función de las concatenaciones de flujo mutuo saturado son [1, 4]

$$\frac{1}{\omega_b} |p\psi| = |V_{qdf}| + |x_{mch}| |\psi| + \psi^*_{md} |x_{ms}| \quad 1.1$$

1.1 Modelo de la Máquina Sincrónica asociada a una Línea de Transmisión

Para fines de este estudio es necesario modelar la máquina sincrónica con algo del sistema de potencia, por lo que incluye la representación de una línea de transmisión R-L entre la máquina y la barra infinita. (Fig. 1.1-1).

Existen dos métodos para la representación de este modelo [1], el uno consiste en mantener las ecuaciones de la máquina con sus parámetros inalterables y modelar la línea completamente aparte; el otro método incluye la resistencia y reactancia de la línea de transmisión como parte de la resistencia y reactancia de dispersión del estator, respectivamente. En este método se pierde la variable voltaje terminal por lo que es necesario recuperar esta variable por algún método; sin embargo, se utilizará este último, por cuanto el modelo resultante es el mismo que el correspondiente a la máquina sincrónica asociada a una barra infinita.



P. 6. 1. 1 - 1

Las ecuaciones que determinan el voltaje terminal de la máquina usando corrientes como variables de estado para acción motora son:

$$|V_{qdM}| = |V_{qdB}| - |Z_L| |i_{qd}| - |X_L| \cdot p |i_{qd}| \quad 1.2$$

donde:

$$|V_{qdM}|^T = |V_{qM}, V_{dM}| \quad \text{Voltaje terminal de la máquina sincrónica en ejes en cuadratura y directo.}$$

$$|V_{qdB}|^T = |V_{qB}, V_{dB}| \quad \text{Voltaje de la barra infinita en ejes en cuadratura y directo.}$$

Las corrientes de la ecuación 1.2 son corrientes de la máquina sincrónica, éstas pueden ser obtenidas en función de concatenación de flujo [1]. Reemplazando el valor de las corrientes de la ecuación 1.2, el voltaje terminal de la máquina en términos de concatenaciones de flujo y sus derivadas, se convierte en:

$$|V_{qdM}| = |V_{qdB}| + \frac{1}{x_{1s}} |Z_L| |x_i| |\psi| + \frac{1}{x_{1s}} |X_L| |x_i| |p\psi| \quad 1.3$$

Incluyendo la resistencia de la línea en la resistencia de la armadura y la reactancia de la línea en la reactancia de dispersión de la armadura se obtiene los siguientes parámetros [1].

$$r_s \text{ por } r_s' = r_s + R_L$$

$$x_{1s} \text{ por } x_{1s}' = x_{1s} + X_L$$

$$x_{mq} \text{ por } x_{mq}' = \left(\frac{1}{x_{1s}'} + \frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{1kq}} \right)^{-1}$$

$$x_{md} \text{ por } x_{md}' = \left(\frac{1}{x_{1s}'} + \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{1kd}} + \frac{1}{x_{1fd}} \right)^{-1}$$

Las ecuaciones 1.1 y 1.3 con los cambios realizados se convierten en:

$$\frac{1}{\omega_b} |p\psi| = |V_{q'df}| + |\overline{x'mch}| |\psi| + \psi' *_{md} |x'_{ms}| \quad 1.4$$

$$|V_{qdM}| = |V_{qdB}| + \frac{1}{x_{1s}'} |Z_L| |x_i| |\psi| + \frac{1}{x_{1s}'} |X_L| |x_i| |p\psi| \quad 1.5$$

Reemplazando la ecuación 1.4 en la ecuación 1.5, efectuando las multiplicaciones matriciales correspondientes y agrupando términos semejantes [2] se tiene:

$$|V_{qdM}| = \begin{vmatrix} K'_{vq} \cdot V_{qB} \\ K'_{vd} \cdot V_{dB} + K'_{vf} \end{vmatrix} + \frac{1}{x_{1s}'} \cdot$$

$$\begin{vmatrix} M_1(1) & M_1(2) & M_1(3) & M_1(4) & M_1(5) \\ M_1(6) & M_1(7) & M_1(8) & M_1(9) & M_1(10) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \psi_q \\ \psi_d \\ \psi_{kq} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{fd} \end{vmatrix} + |T_w|$$

Donde los elementos que conforman las matrices están en función de los parámetros de la máquina, de la línea de transmisión y de la velocidad angular eléctrica del rotor [2].

1.1.1 Representación del sistema mecánico

El torque en p.u. positivo para acción motora, está expresado por:

$$T_e = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d \quad 1.1.1.1$$

La velocidad del rotor viene expresada por:

$$\omega_r = \frac{1}{2H_p} (T_e - T_m) \quad 1.1.1.2$$

H = constante de inercia en segundos

T_m = torque de la máquina impulsora

El ángulo de potencia se obtiene de la ecuación

$$\delta = \frac{\omega_b}{p} (\omega_r - \omega_e) \quad 1.1.1.3$$

ω_e = velocidad angular eléctrica en p.u.

ω_r = velocidad angular eléctrica del rotor en p.u.

2. SISTEMAS DE EXCITACION

La fuente de voltaje de campo para la excitación de una máquina sincrónica es un sistema de excitación que incluye el excitador, regulador de voltaje y control manual. Los sistemas de control modernos para grandes máquinas sincrónicas son sistemas de control con realimentación. La capacidad para ajustar el funcionamiento transitorio y el de estado estable del sistema de potencia es una clara ventaja de los sistemas de control con realimentación. Estos sistemas incluyen también un filtro del voltaje terminal, elementos estabilizadores del sistema de excitación y en muchos casos un estabilizador del sistema de potencia (fig. 2.1).

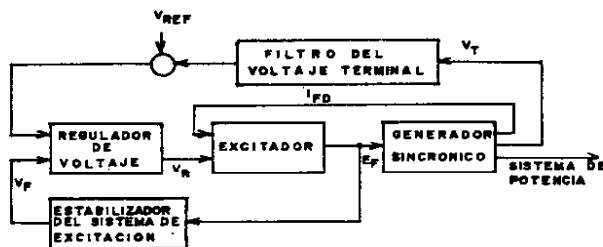


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE EXCITACION

FIG. N. 2.1

El regulador del generador sincrónico acopla las variables de salida del generador sincrónico a la entrada del excitador a través de elementos de realimentación y de control directo para controlar las variables de salida del generador sincrónico. Estas variables pueden ser controladas por medio de dos

entradas: la corriente de campo I_f y el torque mecánico en el eje. Cuando cualquiera de ellas o ambas entradas son alteradas, las siguientes magnitudes: Potencia activa generada, Potencia reactiva generada, voltaje terminal y frecuencia generalmente varían.

Los sistemas de excitación a estudiarse según denominación del IEEE son los sistemas de excitación de corriente continua tipo DC1 y DC2, sistemas de excitación de corriente alterna tipo AC1 y AC2 y los sistemas de excitación estáticos tipo ST1 y ST2.

2.1 Sistemas de Excitación de Corriente Continua

Estos sistemas en la actualidad están siendo menos empleados, pues son sistemas de respuesta lenta, pero para efectos de estudio se realiza el análisis de estos sistemas.

Los sistemas de excitación de corriente continua tienen como fuente de excitación para el generador sincrónico un excitador con conmutador de corriente continua.

En lo que se refiere a los excitadores de corriente continua, son de interés los excitadores de excitación independiente, autoexcitados y autoexcitados con amplificador rotativo.

La mayoría de los excitadores son autoexcitados y el regulador de voltaje opera comúnmente en el modo denominado "buck-boost" [3].

Los sistemas de excitación que se analizarán son sistemas de excitación con conmutador de corriente continua controlados por campo y la acción continua de reguladores de voltaje.

Según denominación del IEEE por facilidad a la identificación de los sistemas de excitación se denominan sistemas de excitación tipo DC.

2.2 Modelo del Sistema de Excitación de Corriente Continua tipo DC1

El modelo que se describe en el diagrama de bloques de la figura 2.2.1 es usado para representar excitadores controlados por campo con conmutador de corriente continua con la constante actuación de los reguladores de voltaje, especialmente la actuación directa de reóstatos, ciertos tipos de amplificadores rotóricos y amplificadores magnéticos.

Algunos ejemplos de este tipo de reguladores se dan a continuación:

GENERAL ELECTRIC.- Regulador Amplidina
 WESTINGHOUSE.- Regulador Mag-A-Stat
 Regulador Silverstat

del sistema de potencia, por lo que en estado estable V_F es cero, quedando solamente la señal de error de voltaje terminal. La señal resultante es amplificada en el regulador de voltaje. La constante de tiempo T_A y ganancia K_A , asociadas con el regulador de voltaje son incorporadas en los límites "nonwindup"

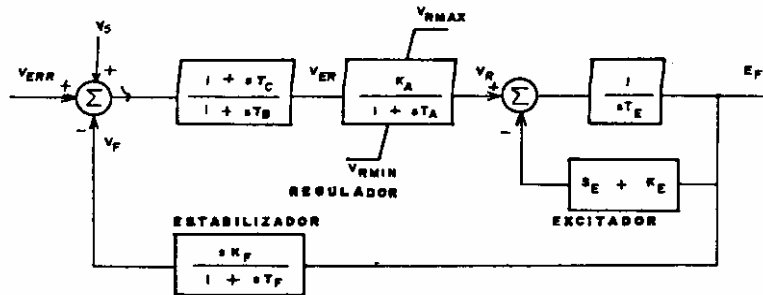


FIG. N. 2.2-1 SISTEMAS DE EXCITACION TIPO DCI
 EXCITADOR CON CONMUTADOR DE CORRIENTE CONTINUA

2.2.1 Modelo del Sistema de Excitación

El voltaje terminal del generador sincrónico es sensado y usualmente reducido a un valor continuo a través de un filtro, el mismo que puede ser muy complejo, pero para propósitos de estudio el filtro es una constante de tiempo simple (T_R). Para la mayoría de sistemas, T_R es muy pequeña y puede ser considerada como un valor cero $|s, \epsilon|$.

$|s|$ de saturación.

Estos reguladores de voltaje utilizan fuentes de potencia que son esencialmente inafectadas por oscilaciones cortas y pequeñas en el generador o entradas auxiliares. Las constantes de tiempo T_C y T_B pueden ser usadas en el modelo equivalente como constantes de tiempo inherentes en el regulador de voltaje; pero estas constantes de tiempo son bastante pequeñas, que para efectos de la modelación se desprecian.

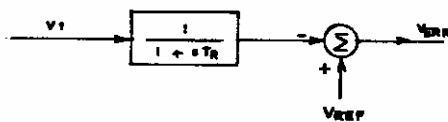


FIG. N. 2.2.1-1 FILTRO DEL VOLTAJE TERMINAL

La salida del filtro del voltaje terminal es comparada con un voltaje de referencia el mismo que representa el ajuste del voltaje terminal.(Fig.2.2.1-1).

La salida del regulador de voltaje (V_R), es utilizada en el control del excitador, el cual puede ser de excitación independiente o autoexcitado.

El voltaje de referencia es calculado para satisfacer las condiciones iniciales de operación. Debería, por lo tanto, dar un valor único a la condición de carga del generador.

Cuando se utiliza un sistema de excitación con excitador autoexcitado la constante K_E representa el ajuste del reóstato del campo shunt.

La señal de error resultante V_{ERR} es sumada con la realimentación del estabilizador del sistema de excitación (V_F).

Como se indicó anteriormente la mayoría de los excitadores utilizan campos shunt autoexcitados con el regulador de voltaje operando en el modo "buck - boost".

En el presente estudio no se analiza el estabiliza-

El regulador de voltaje opera manualmente hasta que el voltaje de salida del regulador sea cero. Esto puede ser simulado por la selección del valor de la constante K_E tal que satisfaga las condiciones iniciales con V_R en el valor cero.

El término S_E representa la saturación del excitador,

este valor es una función del voltaje de salida del excitador E_{FD} y se calcula como: [5]

$$S_E = A_{EXC} \cdot e^{B_{EXC} \cdot E_{FD}}$$

donde:

$$A_{EXC} = \frac{S_{E_{0.75 \text{ máx}}}^4}{S_{E_{\text{máx}}}^3}$$

$$B_{EXC} = \frac{4}{E_{FD \text{ máx}}} \cdot \ln \left(\frac{S_{E_{\text{máx}}}}{S_{E_{0.75 \text{ máx}}}} \right)$$

La señal V_F que se deriva de la señal de voltaje E_{FD} es utilizada para proveer la estabilización del sistema de excitación. Esta señal de realimentación es usada parcialmente para compensar la constante de tiempo del excitador y permitir una operación estable del sistema de control de excitación con altas ganancias del regulador en estado estable [7].

2.3 REPRESENTACION MATEMATICA

Del diagrama de bloques presentado en la figura 2.2-1 se realiza el análisis matemático para cada uno de los componentes del sistema de excitación.

Tomando en cuenta que la función de transferencia de un sistema cualquiera está definida por: [7]

$$F_T = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)}$$

Donde:

F_T es la relación entre la señal de salida y la señal de entrada

$G(s)$ señal de lazo directo

$H(s)$ señal de realimentación

Estas relaciones en términos de variables de estado dan la representación del sistema de excitación tipo DC1.

$$\dot{V}_F = 0 \cdot V_t - \frac{1}{T_F} V_F + \frac{K_F}{T_F \cdot T_E} V_R - \frac{K_F(S_E + K_E)}{T_F \cdot T_E} E_{FD}$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} V_t - \frac{K_A}{T_A} V_F - \frac{1}{T_A} V_R + 0 \cdot E_{FD} + \frac{K_A}{T_A} V_{REF}$$

$$\dot{E}_{FD} = 0 \cdot V_t + 0 \cdot V_F + \frac{1}{T_E} V_R - \frac{(S_E + K_E)}{T_E} E_{FD}$$

$$\text{Con } \dot{V}_R = f$$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{si } V_R \geq V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{si } V_R \leq V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ \dot{V}_R & \text{si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases} \quad 2.3.1$$

2.4 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE CONTINUA TIPO DC2

El modelo indicado en la figura 2.4-1 representa los excitadores con conmutador de corriente controlados por campo, con los reguladores de voltaje actuando continuamente teniendo abastecimientos desde el generador síncrono.

Estos sistemas de excitación difieren de los sistemas de excitación tipo DC1 solamente en los límites de salida del regulador de voltaje, los cuales son ahora proporcionales al voltaje terminal del generador síncrono.

Por lo tanto, el modelo matemático es el mismo grupo de ecuaciones 2.3.1, pero tomando en cuenta que:

$$\dot{V}_R = f$$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{si } V_R \geq V_t \cdot V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{si } V_R \leq V_t \cdot V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ \dot{V}_R & \text{si } V_t \cdot V_{RMIN} < V_R < V_t \cdot V_{RMAX} \end{cases}$$

2.3.2

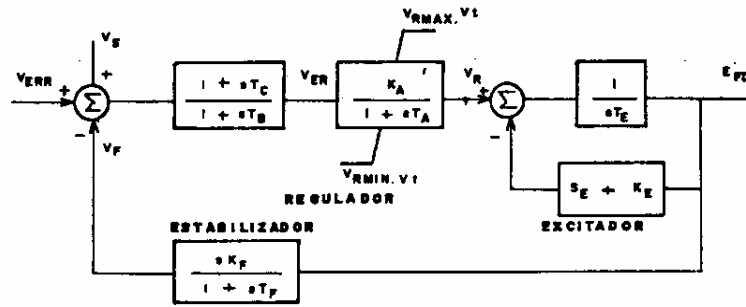


FIG. N. 2. 4-1 SISTEMAS DE EXCITACION TIPO DCB

3. SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

3.1 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA

Con el advenimiento de la tecnología de estado sólido y la disponibilidad de rectificadores de alta corriente ha sido factible que se desarrollen los sistemas de excitación de corriente alterna.

En estos sistemas el excitador es un generador de corriente alterna cuyo voltaje de salida es rectificado para proveer la excitación requerida por el campo del generador sincrónico. El circuito de control para estas unidades es en la mayoría de los casos de estado sólido, y sobre todo la respuesta es bastante rápida. Los rectificadores que proveen el voltaje continuo necesario para el campo del generador sincrónico pueden ser rotativos o estáticos.

Los sistemas a estudiarse son sistemas en los que el rectificador es rotativo, es el único sistema que no tiene escobillas "brushless"; es decir, no necesita de anillos rozantes ya que el alternador del excitador y los diodos rectificadores están rotando con el eje. El sistema incorpora un generador piloto de imán permanente llamado PMG, $|s|$, con un imán permanente que abastece el campo (estático) del alternador del excitador (rotativo). Así, todos los acoplamientos entre los componentes estáticos y rotativos son electromagnéticos.

3.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA TIPO AC1

El modelo de la figura 3.2-1 representa los sistemas de excitación alternador-rectificador.

Estos sistemas de excitación consisten de un alternador principal del excitador con rectificadores no controlados. El excitador no es autoexcitado y la potencia del regulador de voltaje es tomada de una fuente, la misma que no es afectada por transitorios externos.

El diodo característico impone en la salida de voltaje del excitador un límite inferior de valor cero como se indica en la figura 3.2-1.

Este modelo es aplicable para simular los sistemas de excitación "BRUSHLESS" (sin escobillas).

Este tipo de sistemas no tiene realimentación de corriente de campo del excitador, pero incluyen el efecto desmagnetizante de la corriente de carga (I_{FD}).

Este efecto desmagnetizante en la dinámica del voltaje de salida del alternador del excitador (V_E) es tomado en cuenta por el camino de realimentación, el cual incluye la constante K_D . Esta constante es función del alternador del excitador y de la reactancia transitoria.

En el modelo se ha tomado en cuenta la caída de voltaje en la salida del excitador debido a la regulación del rectificador, la misma que es simulada por la inclusión de la constante K_C (la cual es función de la reactancia de conmutación) [2, 9]. La curva aproximada que representa la regulación del rectificador (F_{EX}) se representa en la figura 3.2-2 [9].

En el modelo, la señal V_{FE} proporcional a la corriente de campo es derivada de la sumatoria de las señales de voltaje de salida del excitador V_E (multiplicada por los términos $K_E + S_E$, donde S_E representan

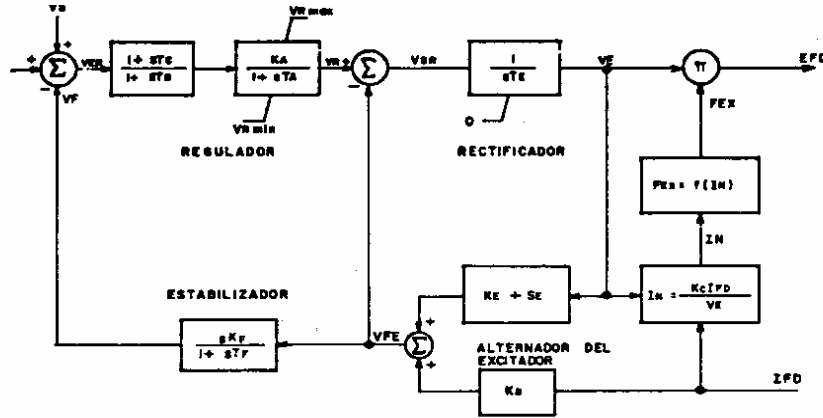


FIGURA Nº 3.2-1 SISTEMA DE EXCITACION TIPO AC1
SISTEMA DE EXCITACION ALTERNADOR-RECTIFICADOR
CON RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

ta la saturación) e I_{FD} (multiplicada por el término de desmagnetización K_D).

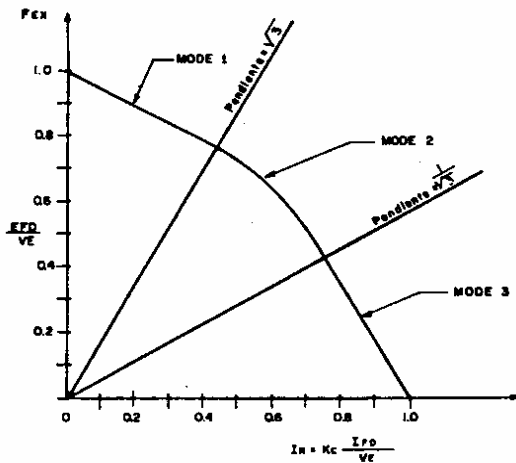


FIGURA Nº 3.2-2 CARACTERISTICAS DE REGULACION DEL RECTIFICADOR

La señal V_{FE} es usada como entrada al estabilizador del sistema de excitación.

3.3 REPRESENTACION MATEMATICA

Del diagrama de bloques de la figura 3.2-1 y considerando que las constantes de tiempo T_B y T_C son cero y además que la señal $V_S = 0$, ya que en estos sistemas tampoco se considera el estabilizador del sistema de potencia, se tiene:

$$\dot{V}_F = 0 \cdot V_t - \frac{V_F}{T_F} + \frac{K_F}{T_E \cdot T_F} (K_E + S_E) \cdot V_R -$$

$$- \frac{K_F}{T_E \cdot T_F} (K_E + S_E)^2 \cdot V_E - \frac{K_F \cdot K_D}{T_E \cdot T_F} (K_E + S_E) \cdot I_{FD}$$

$$+ \frac{K_F \cdot K_D}{T_F} \cdot \frac{r_{fd}}{x_{ad}} (\eta_7 + Q_8 + Q_9)$$

$$\dot{V}_R = - \frac{K_A}{T_A} \cdot V_t - \frac{K_A}{T_A} \cdot V_F - \frac{V_R}{T_A} + 0 \cdot V_E + \frac{K_A}{T_A} \cdot V_{REF}$$

$$\dot{V}_E = 0 \cdot V_t + 0 \cdot V_F + \frac{V_R}{T_E} - (K_E + S_E) \cdot V_E - \frac{K_D}{T_E} \cdot I_{FD}$$

$$\dot{V}_R = f$$

$$f = \begin{cases} 0, & \text{si } V_R \geq V_{RMAX} \text{ y } \dot{V}_R > 0 \\ \dot{V}_R, & \text{si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \\ 0, & \text{si } V_R \leq V_{RMIN} \text{ y } \dot{V}_R < 0 \end{cases}$$

$$E_{FD} = V_E \cdot F_{EX}$$

Para el cálculo de la función de regulación del rectificador F_{EX} se deben cumplir las siguientes condiciones: [3]

$$I_N = \frac{K_C \cdot I_{FD}}{V_E}$$

$$F_{EX} = \begin{cases} 1 - 0.58 I_N & \text{si } I_N \leq 0.433 \\ \sqrt{0.75 - I_N^2} & \text{si } 0.433 < I_N < 0.75 \\ 1.732 (1 - I_N) & \text{si } I_N \geq 0.75 \end{cases}$$

Q_7, Q_8, Q_9 son variables en función de los parámetros y concatenaciones de flujo de la máquina sin crónica. [2]

3.4 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA TIPO AC2

El modelo está indicado en la figura 3.4-1. Representa a los sistemas de excitación sin escobillas controlados por campo de alta respuesta inicial formados por un grupo alternador rectificador. [3].

El alternador principal del excitador es utilizado con rectificadores no controlados. Este modelo es similar al tipo AC1, excepto por la inclusión adicional de dos lazos de realimentación de corriente de campo que simulan la compensación de la constante de tiempo del excitador y los elementos limitadores de la corriente de campo.

La compensación de la constante de tiempo del excitador consiste esencialmente de una realimentación negativa (V_H) alrededor de la constante de tiempo del campo del excitador, reduciendo este valor efectivo y en relación de eso incrementar el ancho de banda de la pequeña señal del sistema de excitación.

Para obtener la alta respuesta inicial con este sistema, un voltaje forzador (V_{RMAX}) es aplicado al campo del excitador.

Un sensor de límites de corriente de campo del excita permite un alto forzado pero limita la corriente. Por limitación de la corriente de campo del excitador, el voltaje de salida del excitador (V_E) es limitado por un valor definido (V_{LR}), el cual es usualmente determinado por la relación de respuesta del del sistema de excitación especificado. Las señales de salida desde el regulador de voltaje (V_A) y la constante de tiempo de compensación (V_H) son comparadas con la señal de salida (V_L) del limitador en un circuito de control lógico, el cual funciona proveyendo una clara transición desde el control del regulador al control de límites de excitación en los puntos límites de excitación.

La característica de la compuerta de bajo valor (LV) es que la excitación es controlada por la señal más negativa entre V_H y V_L .

3.5 REPRESENTACION MATEMATICA

Haciendo las mismas consideraciones que en el sistema tipo AC1 y observando el diagrama de bloques de la figura 3.4-1 se tiene:

$$\dot{V}_F = 0.Vt - \frac{1}{T_F} V_F + 0.V_A - \frac{K_F}{T_E \cdot T_F} (K_E + S_E)^2 \cdot V_E - \frac{K_F \cdot K_D}{T_E \cdot T_F} (K_E + S_E) I_{FD} + \frac{K_F \cdot K_D}{T_F} \cdot \frac{r_{fd}}{x_{ad}} (Q_7 + Q_8 + Q_9) +$$

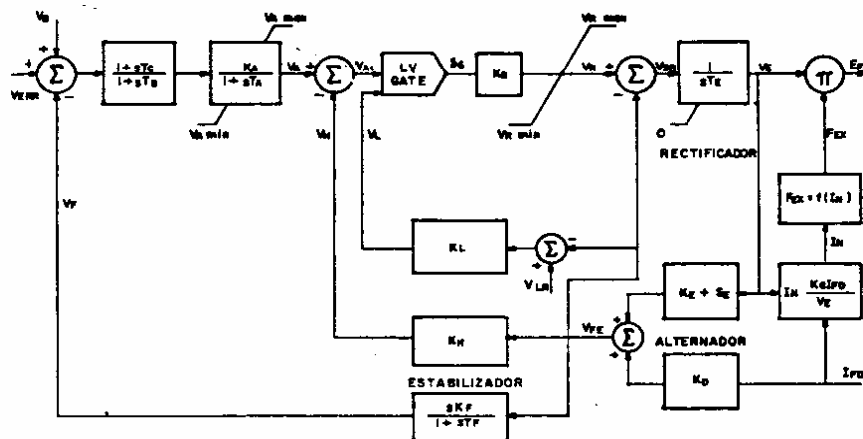


FIGURA N° 3.4-1 SISTEMA DE EXCITACION TIPO "AC2"
SISTEMA DE EXCITACION ALTERNADOR-RECTIFICADOR
CON RECTIFICADOR NO CONTROLADO Y REALIMENTACION DE CORRIENTE DE CAMPO DEL EXCITADOR

$$+ \frac{K_F}{T_F \cdot T_E} (K_E + S_E) \cdot V_R$$

$$\dot{V}_A = - \frac{K_A}{T_A} \cdot V_t - \frac{K_A}{T_A} \cdot V_F - \frac{V_A}{T_A} + 0 \cdot V_E + \frac{K_A}{T_A} \cdot V_{REF}$$

$$\dot{V}_E = 0 \cdot V_t + 0 \cdot V_F + 0 \cdot V_A - \frac{(K_E + S_E)}{T_E} \cdot V_E - \frac{K_D}{T_E} \cdot I_{FD} + \frac{V_R}{T_E}$$

La compuerta de bajo valor (LV) está definida por:
|3|

$$\text{Si } V_{A1} \leq V_L ; S_G = V_{A1}$$

$$\text{Si } V_{A1} > V_L ; S_G = V_L$$

$$V_R = \begin{cases} S_G \cdot K_B & \text{Si } V_{RMIN} \leq S_G \cdot K_B \leq V_{RMAX} \\ V_{RMAX} & \text{Si } S_G \cdot K_B > V_{RMAX} \\ V_{RMIN} & \text{Si } S_G \cdot K_B < V_{RMIN} \end{cases}$$

$$\dot{V}_A = f$$

$$f = \begin{cases} 0, & \text{si } V_A \geq V_{AMAX} \text{ y } \dot{V}_A > 0 \\ \dot{V}_R, & \text{si } V_{AMIN} < V_A < V_{AMAX} \\ 0, & \text{si } V_A \leq V_{AMIN} \text{ y } \dot{V}_A < 0 \end{cases}$$

Q_7 , Q_8 y Q_9 tienen la misma definición que en los sistemas de excitación tipo AC1.

$$E_{FD} = F_{EX} \cdot V_E$$

Donde: F_{EX} es la función que determina la regulación del rectificador.

4. SISTEMAS DE EXCITACION ESTATICOS

4.1 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION ESTATICOS

En este tipo de sistemas la excitación del generador es abastecida a través de transformadores y rec

tificadores desde la misma salida del generador.

Los transformadores se utilizan para transformar el voltaje a un nivel apropiado (y también la corriente en sistemas compuestos). Los rectificadores pueden ser controlados o no controlados y proveen el voltaje necesario para el campo del generador sincrónico.

En muchos sistemas estáticos, el voltaje máximo del excitador es muy alto, para tales sistemas existen circuitos adicionales que limitan la corriente de campo, no modelados en el presente trabajo.

Los elementos esenciales de estos sistemas son: |10, 11|.

- Componentes estáticos de potencia que consisten de 3 transformadores de potencia monofásicos T's/P o (PPT's) y 3 transformadores de corriente saturable T's/CS o (SCT's).
- El rectificador de potencia consiste de 2 rectificadores trifásicos de onda completa tipo puente.
- Un regulador de voltaje de corriente alterna que provee control automático para regulación del voltaje terminal generado.
- Un regulador de corriente continua que provee el control manual para para la regulación de la corriente de campo del generador.

4.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION ESTATICO TIPO ST1

El modelo dado en la figura 4.2-1 representa todos los sistemas en los cuales el voltaje para la excitación es abastecido por medio de un transformador desde los terminales del generador (o una línea de unidades auxiliares) y es regulado por un rectificador controlado. El máximo voltaje del excitador desarrollado por tales sistemas es directamente relacionado con el voltaje terminal del generador.

En este tipo de sistemas, las constantes de tiempo propias son muy pequeñas y la estabilización del excitador como tal no es requerida; en cambio, debe de reducirse la reducción de la ganancia de transitorios para tales sistemas.

El modelo dado es suficientemente versátil para presentar la reducción de ganancia de transitorios, implementados en el lazo directo por las constantes

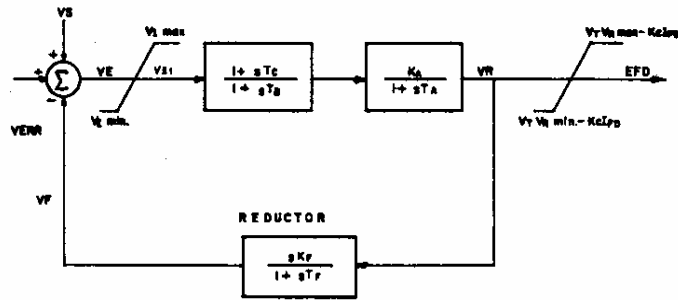


FIGURA Nº 4.2-1 SISTEMA DE EXCITACION TIPO "ST1" EXCITADOR CON FUENTE DE POTENCIA Y RECTIFICADOR CONTROLADO

de tiempo T_B y T_C (en tal caso K_F debería ser cero), o en el lazo de realimentación por una selección adecuada de los parámetros K_F y T_F .

La ganancia del regulador de voltaje y cualquier constante de tiempo inherente en el sistema de excitación son representados por K_A y T_A .

Se modela los límites de voltaje de campo los cuales son función del voltaje terminal del generador (excepto cuando el excitador es abastecido desde una línea auxiliar) y corriente de campo del generador, pero para la mayoría de sistemas de alimentación el factor de carga del rectificador K_C , debido a la reactancia de conmutación es bastante pequeña, por lo que el término $K_C \cdot I_{FD}$ no se tomará en cuenta en la modelación de los sistemas de excitación tipo ST1.

Para la mayoría de los sistemas de excitación se utiliza un rectificador controlado tipo puente, pero el modelo que se presenta es también aplicable para sistemas con rectificadores semicontrolados, en tal caso el máximo negativo del voltaje de campo espuesto en cero como se puede apreciar en la figura 4.2.1.

Algunos ejemplos de los sistemas de excitación tipo ST1 son:

- GENERAL ELECTRIC.- Excitadores Silcomatic
- WESTINGHOUSE CANADA.- Excitador con tiristor de estado sólido.
- WESTINGHOUSE.- Sistemas de excitación estáticos tipo PS con reguladores tipo WTA o WHS.

4.3 REPRESENTACION MATEMATICA

Suponiendo que la reducción de ganancia de transitorios se representa por medio de la constante K_F y T_F , en este caso se toma T_B y T_C como cero. Se tiene:

$$V_{E1} = \begin{cases} V_E & \text{si } V_{IMIN} \leq V_E \leq V_{IMAX} \\ V_{IMAX} & \text{si } V_E \geq V_{IMAX} \\ V_{IMIN} & \text{si } V_E < V_{IMIN} \end{cases}$$

Si $V_{IMIN} \leq V_E \leq V_{IMAX}$ entonces $V_{E1} = V_E$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} V_t - \frac{V_R}{T_A} - \frac{K_A}{T_A} V_F + \frac{K_A}{T_A} V_{REF} + \frac{K_A}{T_A} V_S$$

$$\dot{V}_F = -\frac{K_A \cdot K_F}{T_A \cdot T_F} V_t - \frac{K_F}{T_A \cdot T_F} \cdot V_R - \left(\frac{K_A \cdot K_F}{T_A \cdot T_F} + \frac{1}{T_F} \right) \cdot V_F + \frac{K_A \cdot K_F}{T_A \cdot T_F} (V_{REF} + V_S)$$

Si $V_E > V_{IMAX}$ entonces $V_{E1} = V_{IMAX}$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_{IMAX} - \frac{V_R}{T_A}$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_A \cdot K_F}{T_A \cdot T_F} \cdot V_{IMAX} - \frac{K_F}{T_A \cdot T_F} \cdot V_R - \frac{V_F}{T_F}$$

Si $V_E < V_{IMIN}$ entonces $V_{E1} = V_{IMIN}$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} V_{IMIN} - \frac{V_R}{T_A}$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_A \cdot K_F}{T_A \cdot T_F} V_{IMIN} - \frac{K_F}{T_A \cdot T_F} \cdot V_R - \frac{V_F}{T_F}$$

Tomando la constante $K_C = 0$

$$E_{FD} = \begin{cases} V_R & \text{si } V_t \cdot V_{RMIN} \leq V_R \leq V_t \cdot V_{RMAX} \\ V_t \cdot V_{RMAX} & \text{si } V_R > V_t \cdot V_{RMAX} \\ V_t \cdot V_{RMIN} & \text{si } V_R < V_t \cdot V_{RMIN} \end{cases}$$

4.4 MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACION ESTATICO TIPO ST2

Algunos sistemas de excitación estáticos utilizan fuentes de corriente y voltaje (valores terminales del generador) como fuente de poder. Estos sistemas de excitación con fuente compuesta y rectificadores son modelados como se indica en la figura 4.4-1.

Es necesario que la fuente de poder del excitador sea una combinación de fasores del voltaje terminal V_t y de la corriente terminal I_t .

La carga del rectificador y los efectos de la comu-

tación son idénticos a lo explicado en el literal 3.2.

E_{FDMAX} representa el límite de voltaje del excitador debido a la saturación de los componentes magnéticos.

El regulador controla la salida del excitador por medio del control de saturación de los componentes de un transformador de potencia. T_E representa el porcentaje de integración asociado con la inductancia de los bobinados de control.

Un ejemplo de tales sistemas es el sistema de excitación estático de la GENERAL ELECTRIC, frecuentemente conocidos como: Sistemas SCT - PPT o SCPT.

Este tipo de sistema combina el voltaje de salida del regulador con la señal que representa la autoexcitación desde los terminales del generador.

K_p es el coeficiente de la fuente de excitación por proporcional al voltaje terminal. Similarmente, K_I es el coeficiente de la fuente de excitación obtenida desde los terminales de los transformadores de corriente. [5]

4.5 REPRESENTACION MATEMATICA

Observando el diagrama de bloques de la figura 4.4-1 y realizando el análisis matemático correspondiente, se tiene:

$$\dot{V}_F = 0 \cdot V_t - \frac{1}{T_F} \cdot V_F + \frac{K_F}{T_E \cdot T_F} \cdot V_R - \frac{K_E \cdot K_F}{T_E \cdot T_F} \cdot E_{FD} +$$

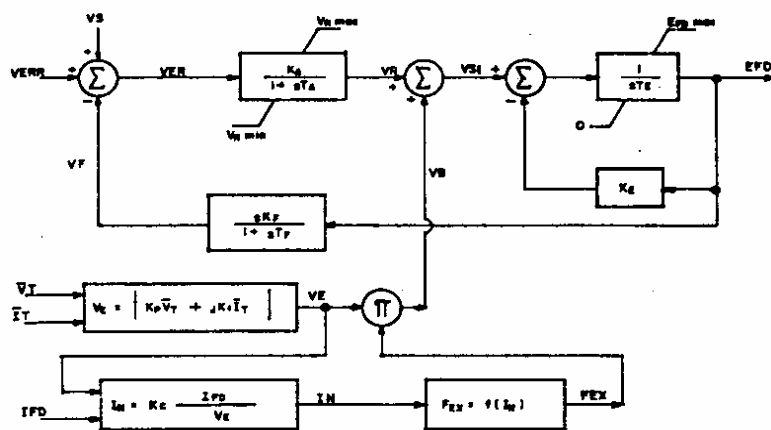


FIGURA Nº 4.4-1 SISTEMA DE EXCITACION TIPO "ST 2" EXCITADOR CON FUENTE COMPUESTA RECTIFICADA

$$+ \frac{K_F}{T_E \cdot T_F} V_E \cdot F_{EX}$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} V_t - \frac{K_A}{T_A} V_F - \frac{V_R}{T_A} + \frac{K_A}{T_A} V_{REF}$$

$$\dot{E}_{FD} = 0 \cdot V_t + 0 \cdot V_F + \frac{V_R}{T_E} - \frac{K_E}{T_E} \cdot E_{FD} + \frac{V_E}{T_E} \cdot F_{EX}$$

Con las siguientes condiciones:

Sea $f = \dot{V}_R$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{si } V_R \geq V_{RMAX} \text{ y } f > 0 \\ 0 & \text{si } V_R \leq V_{RMIN} \text{ y } f < 0 \\ \dot{V}_R & \text{si } V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases}$$

Sea $g = \dot{E}_{FD}$

$$g = \begin{cases} 0 & \text{si } E_{FD} \geq E_{FDMAX} \text{ y } g > 0 \\ 0 & \text{si } E_{FD} \leq 0 \text{ y } g < 0 \\ \dot{E}_{FD} & \text{si } 0 < E_{FD} < E_{FDMAX} \end{cases}$$

$$V_E = \left| K_p \cdot V_t \right| \underline{0^\circ} + j K_I \cdot I_t \underline{\beta}$$

donde los fasores de voltaje y corriente son determinados según referencia [4].

5. SIMULACION DEL SISTEMA EN EL COMPUTADOR DIGITAL

En el análisis de los sistemas de excitación en el dominio del tiempo se utiliza el concepto de estado de un sistema. El estado de un sistema es un conjunto de variables tales que su conocimiento y el de las funciones de entrada, junto con las ecuaciones que describen la dinámica, proporcionan la salida y el estado del sistema. [12]

Para un sistema dinámico, su estado se describe en términos de un conjunto de variables denominadas de estado ($V(1)$, $V(2)$, $V(3)$... $V(n)$) en función del tiempo. Estas variables son las que determinan el

comportamiento futuro de un sistema cuando se conocen el estado presente del mismo y las señales de entrada.

En el presente trabajo el conjunto de ecuaciones diferenciales ($\dot{V}(1)$, $\dot{V}(2)$, $\dot{V}(3)$... $\dot{V}(n)$), que describen el comportamiento de los distintos tipos de sistemas de excitación, se asocian al conjunto de ecuaciones diferenciales ($\dot{V}(1)$, $\dot{V}(2)$, $\dot{V}(3)$... $\dot{V}(7)$) que representan el modelo de la máquina sincrónica (grupo de ecuaciones 1.4).

La mayoría de los problemas en los cuales el comportamiento transitorio de los sistemas de excitación es el objetivo del estudio requiere el uso del computador. Es por lo tanto reconocido que la solución de los sistemas puede ser simplificada si los modelos matemáticos pueden ser estandarizados. En el presente trabajo se ha simulado dos modelos para cada tipo de sistema de excitación.

Para integrar los sistemas de excitación con la máquina sincrónica es necesario realizar un cambio de base del voltaje de campo, pues, el voltaje base del excitador es diferente al voltaje base de la máquina sincrónica. Es por tanto necesario mantener siempre la "constante de ganancia" $\frac{r_{fd}}{x_{ad}}$ entre la salida E_{FD} del excitador y la entrada V_f a la máquina sincrónica [4, 5].

El computador digital resuelve las ecuaciones diferenciales en forma discreta, es decir, el dominio del tiempo está dividido en segmentos discretos de longitud Δt y las ecuaciones resueltas para cada segmento.

Para resolver las ecuaciones diferenciales se utiliza el clásico proceso de Runge-Kutta de cuarto orden. [15].

6. APLICACIONES DE LA MODELACION

Con el objeto de probar la bondad del programa digital se realiza una prueba de funcionamiento en estado estable.

En el estado estable las condiciones iniciales calculadas de los datos impuestos tanto para la máquina sincrónica como para los sistemas de excitación dados en la referencia [2] deben mantenerse constantes o variar sinusoidalmente con el tiempo durante el proceso de integración de las ecuaciones diferenciales.

El generador sincrónico puede ser controlado por intermedio de dos variables que son: la corriente de campo (I_{FD}) y el torque mecánico en el eje (T_M).

Cuando una de ellas o ambas son alteradas, las siguientes magnitudes se ven afectadas: potencia activa generada, potencia reactiva generada, voltaje terminal y la frecuencia.

Existe una relación directa entre el torque de entrada de una máquina individual y la velocidad del sistema, o, lo que es lo mismo, su frecuencia. De igual manera, se puede decir que la magnitud de una barra individual de voltaje puede ser controlada y fijada por la manipulación de la corriente de campo.

Con el objeto de mirar el comportamiento de los sistemas de excitación y por tanto de la máquina síncrona, se realiza un cambio brusco del torque mecánico en cualquier instante de tiempo.

Ante la variación del torque mecánico, en el generador comienzan a actuar los sistemas de excitación mejorando el comportamiento del voltaje generado, tratando de mantener el voltaje en el valor de voltaje de referencia, el mismo que es tomado como un valor igual al valor del voltaje en estado estable.

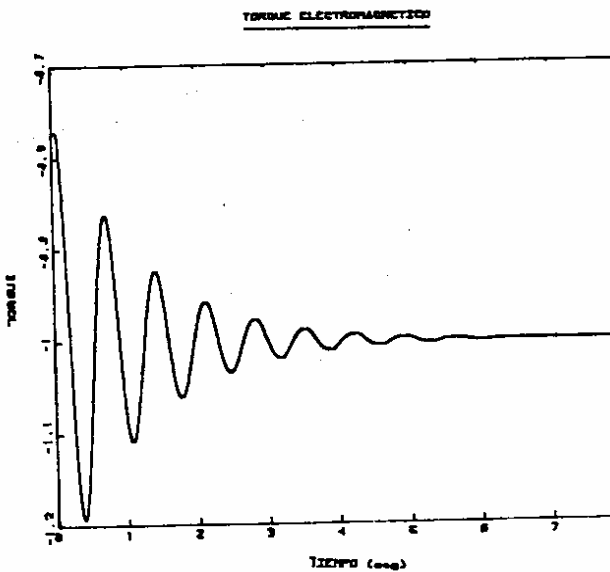


GRAFICO 7.1

7. ANALISIS DE RESULTADOS

En el gráfico 7.1 se observa que el torque electromagnético se ajusta a la perturbación, oscilando hasta tomar el valor impuesto por la suma de 0.3 p.u. del torque inicial de la máquina motriz.

Esta perturbación se realiza tanto en el sistema generador síncrono, conectado a una barra infinita a través de una línea de transmisión corta R-L, sin sistemas de excitación (gráfico 7.1) como en los diferentes tipos de sistemas de excitación.

Puesto que no se simula la máquina impulsora, el comportamiento del torque electromagnético para cuando se utiliza los sistemas de excitación, es el mismo que el gráfico 7.1.

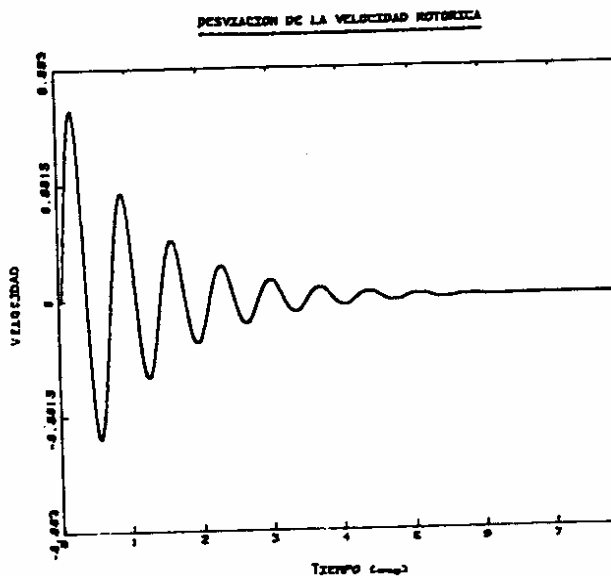
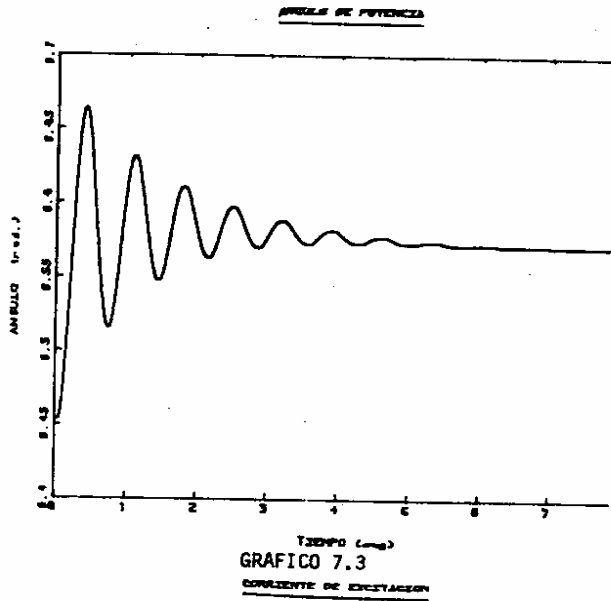


GRAFICO 7.2

En el gráfico 7.2 se tiene la respuesta de la desviación de la velocidad rotórica.

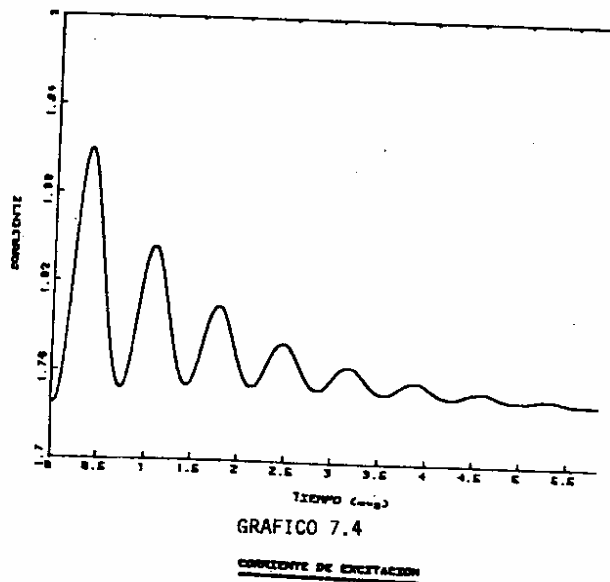
Como se puede observar, frente a la variación brusca del torque mecánico, el rotor inicialmente aumenta su velocidad para luego oscilar sobre la velocidad de sincronismo hasta alcanzar nuevamente esta velocidad.

La desviación de la velocidad rotórica tiene el mismo comportamiento para los demás tipos de sistemas de excitación.



El ángulo de potencia crece bruscamente y oscila hasta su nuevo punto de funcionamiento; al incrementarse la potencia generada por el incremento del torque mecánico, el ángulo de potencia se ajusta para cumplir ese requerimiento (gráfico 7.3).

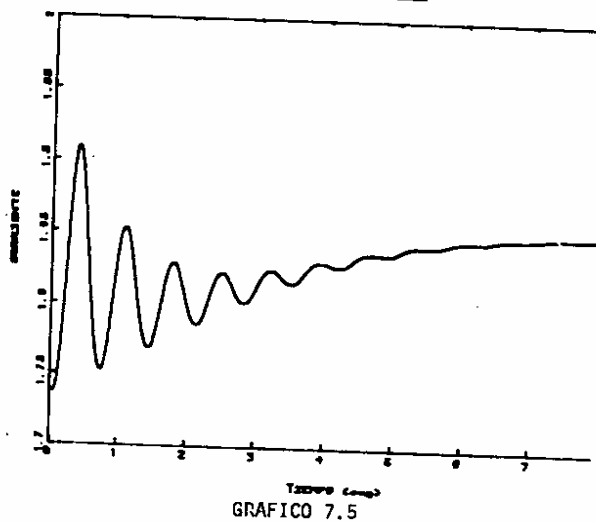
De igual manera, la respuesta del ángulo de potencia, tiene un comportamiento similar en los otros tipos de sistemas de excitación.



En el gráfico 7.4 se observa la respuesta de la corriente de excitación cuando no se utilizan los sistemas de excitación. Al producirse esta perturbación, la corriente de excitación oscila sobre su valor inicial, para exponencialmente amortiguarse hasta volver al mismo valor inicial, esto se debe a que no tiene acoplado el sistema de excitación, es decir, el circuito de campo no es alterado.

En los Sistemas de Excitación de Corriente Continua la velocidad de respuesta depende de la constante de tiempo T_E de la excitatriz, la misma que es directamente proporcional a la inductancia del bobinado de campo; por lo tanto, debido a la gran inductancia del bobinado de campo, hace que estos sistemas no respondan rápidamente ante las variaciones del voltaje terminal.

En estos sistemas, al producirse el incremento brusco del torque, la corriente de excitación oscila y va creciendo exponencialmente hasta obtener un nuevo punto de equilibrio en aproximadamente 8 seg. (gráfico 7.5).



Tomando en cuenta que la respuesta de los Sistemas de Excitación de Corriente Alterna es más rápida que aquella de los Sistemas de Excitación de Corriente Continua, ya que la excitación se obtiene a través de un grupo alternador-rectificador, se observa para los sistemas de excitación tipo AC1 que la corriente de excitación, una vez que se produce la perturbación, oscila de manera exponencial hasta obtener el nuevo punto de equilibrio en aproximadamente 5.5 seg. (gráfico 7.6)

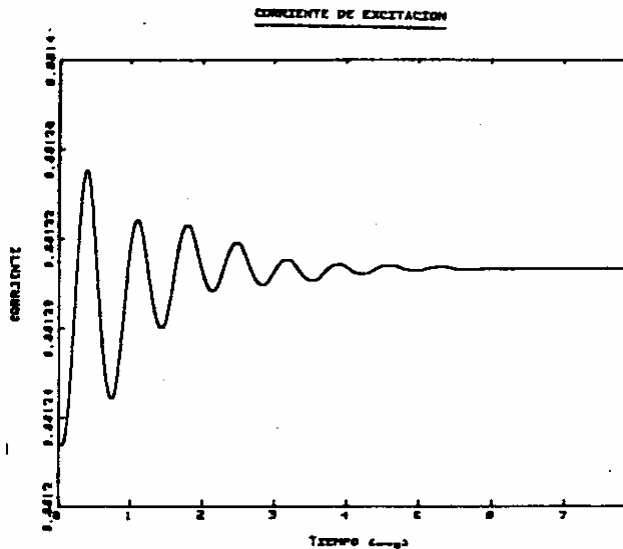


GRAFICO 7.6

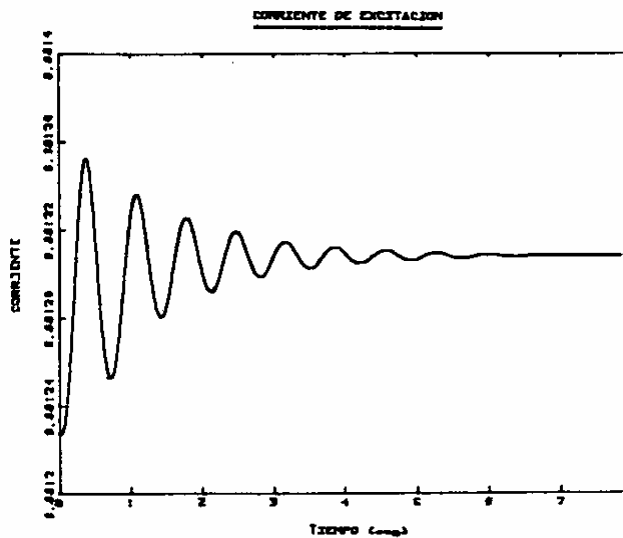


GRAFICO 7.7

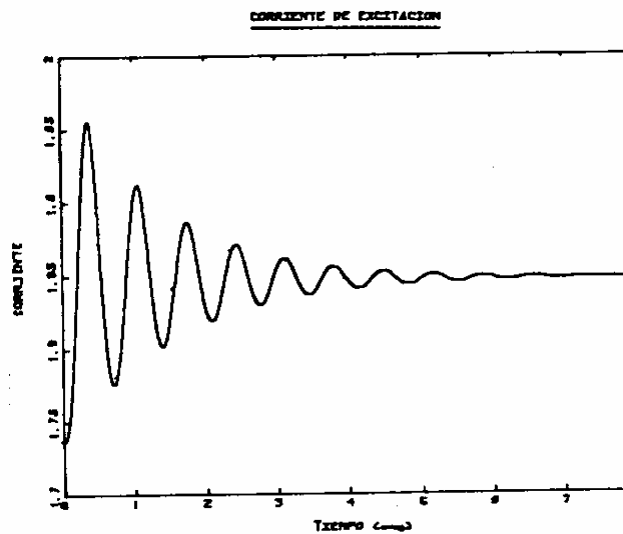


GRAFICO 7.8

Otra variación de los Sistemas de Excitación de Corriente Alterna son los sistemas de excitación tipo AC2.

Como se puede observar en el gráfico 7.7, la respuesta de la corriente de campo es idéntica a los sistemas de excitación tipo AC2.

Los Sistemas de Excitación Estáticos se diferencian de los otros sistemas de excitación puesto que no utilizan una excitatriz rotativa; sino que, a través de un transformador, la potencia eléctrica necesaria es tomada directamente desde los terminales del generador. Es por esto que en estos sistemas la velocidad de respuesta debe ser mayor comparada con los sistemas antes indicados.

Analizando los sistemas de excitación estáticos tipo ST1 y ST2, se observa que la corriente de excitación, luego de la perturbación oscila hasta obtener su nuevo punto de equilibrio en aproximadamente 5 seg. (gráficos 7.8 y 7.9).

Otro elemento importante de los sistemas de excitación es el regulador de voltaje, el mismo que está determinado por la constante de tiempo T_A y la ganancia K_A .

Para el caso de los Sistemas de Excitación de Corriente Continua la salida del regulador antes del cambio brusco del torque mecánico, se supone igual a cero en este tipo de sistemas, una vez que se produce el cambio brusco del torque, la señal de error de voltaje es distinta a cero, lo que hace que esta señal se amplifique corrigiendo de esta manera el voltaje de excitación hasta que la señal de error de voltaje sea cero; es decir, el voltaje terminal sea igual al voltaje de referencia.

Si se observa el gráfico 7.10 se ve que efectivamente la salida del regulador, una vez que se realiza la perturbación, alcanza el máximo pico en 0.6 seg. para luego ir decreciendo hasta obtener nuevamente el punto de equilibrio.

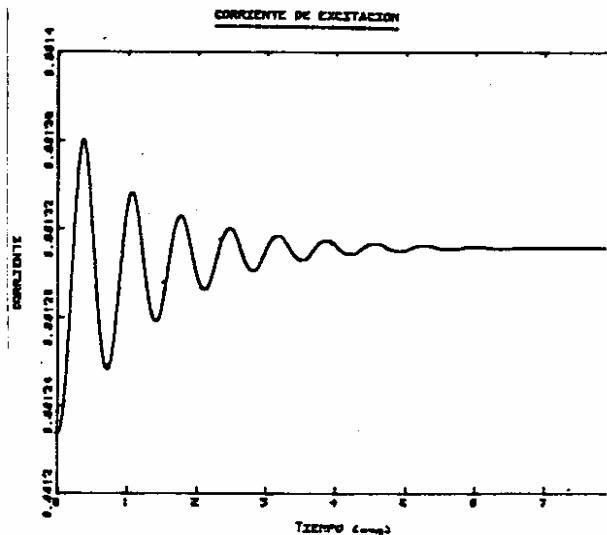


GRAFICO 7.9

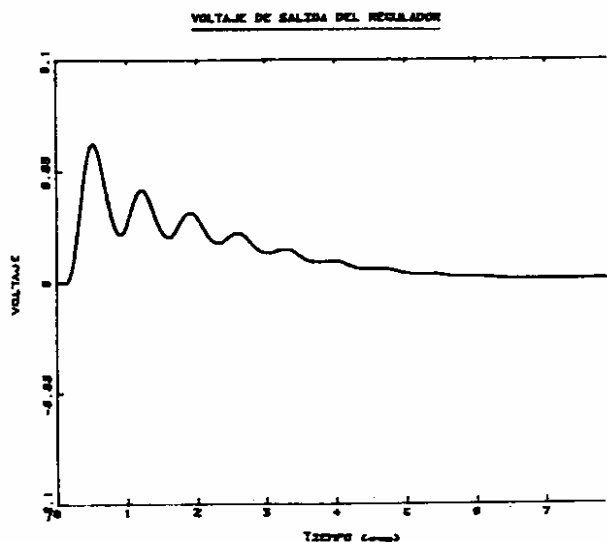


GRAFICO 7.10

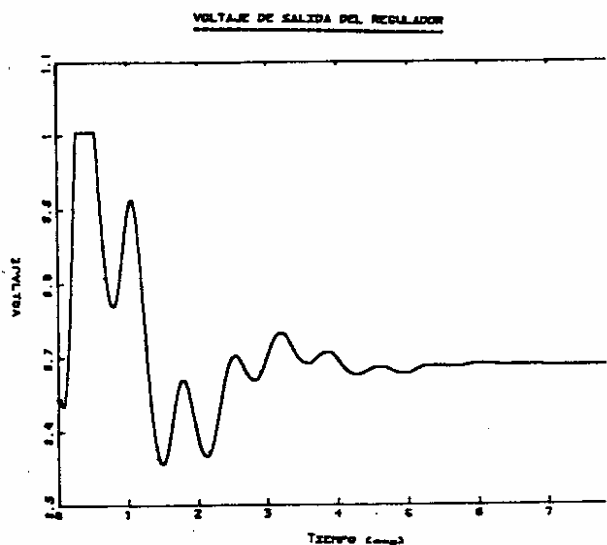


GRAFICO 7.11

Para el caso de los Sistemas de Excitación de Corriente Alterna, se observa en el gráfico 7.11 la salida del regulador en los sistemas tipo AC1, la misma que alcanza su límite máximo en aproximadamente 0.3 seg. para mantenerse en el valor de 1 p.u. hasta cuando la salida baje de este valor.

En el gráfico 7.12 se tiene la salida del regulador de los sistemas tipo AC2 notándose que alcanza su valor máximo en 0.3 seg., pero sin llegar a su valor límite, debiéndose principalmente a la diferencia de condiciones iniciales que tiene este regulador (gráfico 7.12).

Al tratarse de los Sistemas de Excitación Estáticos, se tiene las salidas del regulador tipo ST1 y tipo ST2 en los gráficos 7.13 y 7.14, respectivamente.

En lo que respecta al voltaje terminal, cuando no se utilizan los sistemas de excitación en el gráfico 7.15 se observa que una vez realizada la perturbación, el voltaje terminal no se controla; esto es evidente, pues si se mantiene la corriente de campo constante, a medida que la carga ha variado el voltaje terminal variará.

Ante variaciones del voltaje terminal actúan los diferentes sistemas de excitación, es así que en el gráfico 7.16 se observa el comportamiento del voltaje terminal ante la actuación de los Sistemas de Excitación de Corriente Continua. Como era de esperarse, una vez realizada la perturbación, se observa que el voltaje varía para luego volver al valor original dado por el voltaje de referencia en aproximadamente 8 seg.

Cuando actúan los Sistemas de Excitación de Corriente Alterna, se observa en los gráficos 7.17 y 7.18 que el voltaje regresa al valor del voltaje de referencia dado por la condición inicial en aproximadamente 5.5 y 5 seg. respectivamente después de produ-

VOLTAJE DE SALIDA DEL REGULADOR

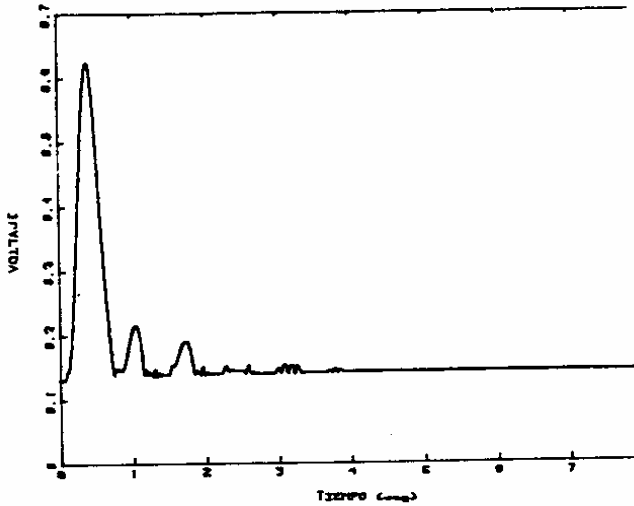


GRAFICO 7.12

VOLTAJE DE SALIDA DEL REGULADOR

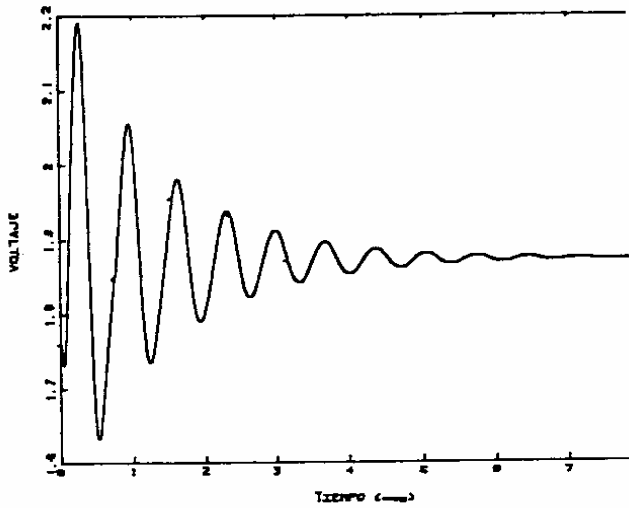


GRAFICO 7.13

VOLTAJE DE SALIDA DEL REGULADOR

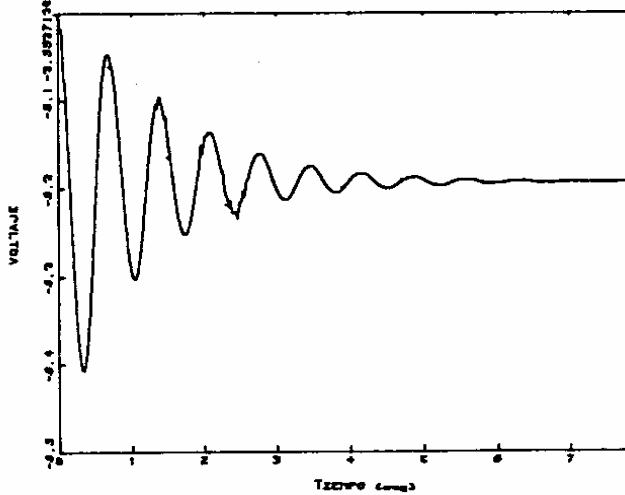


GRAFICO 7.14

cida la perturbación.

El voltaje terminal cuando actúan los sistemas de excitación estáticos tipo ST1 y ST2 vuelve a su valor original en aproximadamente 3 seg., como se puede observar en los gráficos 7.19 y 7.20.

Comparando los resultados obtenidos se observa la efectividad de los sistemas de excitación, pues si se compara los gráficos 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 y 7.9 de los distintos tipos de sistemas de excitación y el gráfico 7.4 sin el sistema de excitación, se observa que la corriente de excitación sube para compensar la caída de voltaje debido al incremento brusco del torque mecánico. No sucede lo mismo en máquinas sin crónicas que no tienen sistemas de excitación, pues en este caso la excitación se mantiene constante y el voltaje generado baja para luego estabilizarse en un nuevo punto de equilibrio, como se observa en el gráfico 7.15.

Comparando los distintos tipos de sistemas de excitación se nota que la respuesta de los sistemas de excitación estáticos es más rápida ante cambios bruscos del torque mecánico, seguida de los sistemas de excitación de alterna y de los sistemas de excitación de corriente continua. La característica de los distintos sistemas se debe, como se anotó anteriormente, a la ganancia K_A del regulador de voltaje y a las constantes de tiempo de las excitatrices, pues la ganancia de los reguladores de voltaje de los sistemas de excitación de alterna y estáticos es alta y las constantes de tiempo son relativamente pequeñas comparadas con los sistemas de excitación de corriente continua.

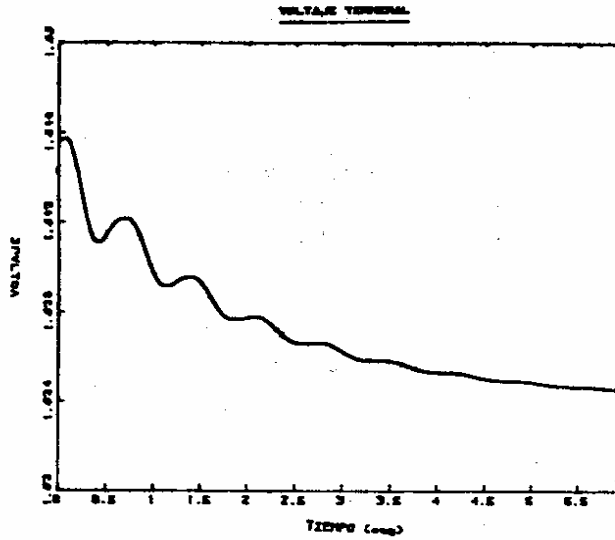


GRAFICO 7.15

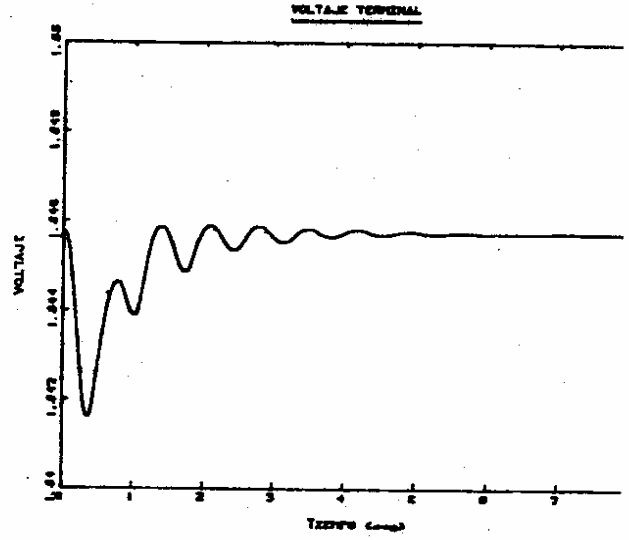


GRAFICO 7.18

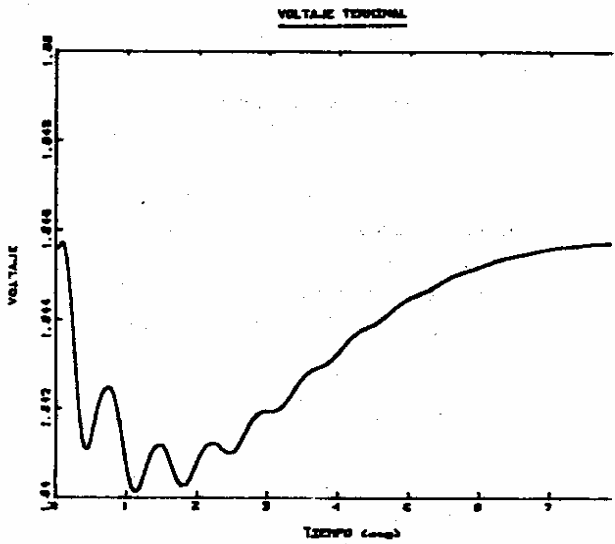


GRAFICO 7.16

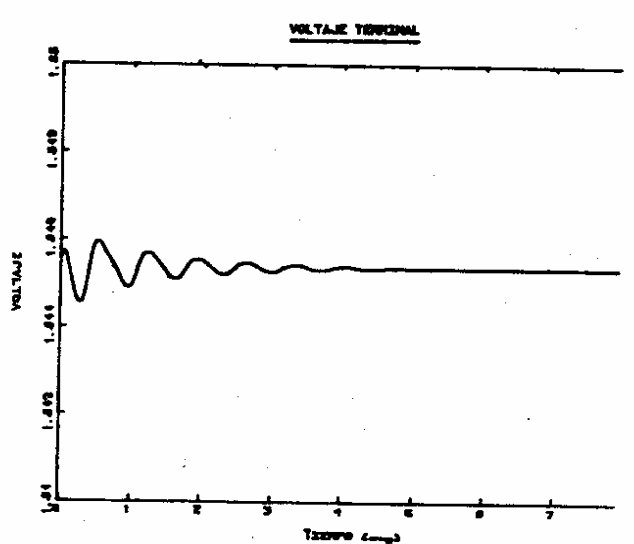


GRAFICO 7.19

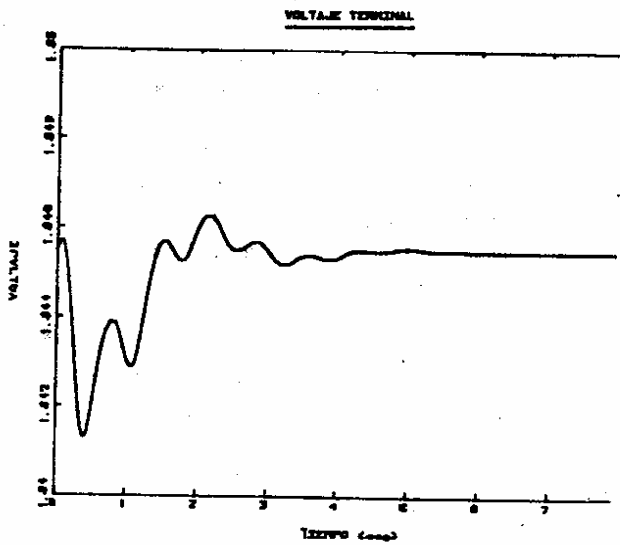


GRAFICO 7.17

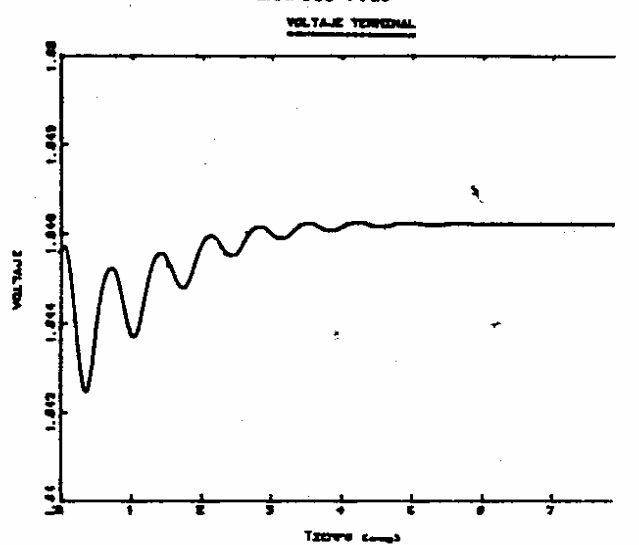


GRAFICO 7.20

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar el presente estudio, cuyo objetivo fue analizar el comportamiento de los sistemas de excitación y reguladores de voltaje ante una perturbación, se llega a las siguientes conclusiones:

- El torque electromagnético se mantiene constante cuando el rotor se mueve a la velocidad de sin cronismo. Al variar la carga el campo del rotor se retrasa respecto al campo giratorio del esta tor, por lo que el ángulo de potencia también va ría hasta adquirir el valor necesario para crear el nuevo torque.
- Con la aplicación apropiada de los sistemas de excitación y reguladores de voltaje se logra man tener controlado el voltaje generado en un valor establecido ante variaciones bruscas del torque mecánico.
- La corriente de excitación varía ante perturbaciones bruscas del torque mecánico ya que se al tera el voltaje terminal, en ciertos estudios se suponía constante, lo cual no es real en cuanto al funcionamiento del sistema de potencia.
- La ganancia K_A y la constante de tiempo T_A del regulador de voltaje tienen su influencia en la velocidad de respuesta de los distintos tipos de sistemas de excitación, pues depende del valor que tomen estos parámetros para simular el regu lador correspondiente a cada tipo de sistema.
- Los sistemas de excitación estáticos son los que poseen una alta velocidad de respuesta seguidos por los sistemas de excitación de corriente al terna y continua.
- Para obtener una respuesta real de los distintos tipos de sistemas de excitación es necesario que los parámetros que modelan los excitadores y re guladores de voltaje sean apropiados dependiendo del equipo del sistema de excitación que se esté simulando.

De las conclusiones expuestas anteriormente se esta blecen las siguientes recomendaciones:

Tomando en cuenta que para el estudio del presente trabajo fue necesario recurrir a varios medios de información para obtener los parámetros que repre sentan los distintos sistemas de excitación, se re

comienda estudiar ciertos métodos analíticos para es pecificar los parámetros y analizar la respuesta del sistema de excitación.

Es necesario anotar que el presente trabajo servirá como documento de referencia para el usuario, pues se tiene a mano programas que modelan el generador y los distintos tipos de sistemas de excitación con sus respectivos archivos de parámetros y de datos, lo que facilita la utilización en el ingreso de con diciones de funcionamiento y obtención de resultados gráficos, los que se obtienen en forma continua.

APENDICE A

A.1 PARAMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

E_{FD}	Voltaje de salida del excitador (Voltaje de campo del generador).
F_{EX}	Factor de carga del rectificador.
I_{FD}	Corriente de campo del generador.
I_N	Corriente de carga del excitador normalizada.
K_A	Ganancia del regulador de voltaje.
K_B	Ganancia de la segunda etapa del regulador.
K_C	Factor de carga del rectificador debido a la reactancia de conmutación.
K_D	Factor de desmagnetización, función de las reactancias del alternador del excitador.
K_E	Constante del excitador relacionado con el campo autoexcitado.
K_F	Ganancia del estabilizador del sistema de control de excitación.
K_H	Ganancia de la realimentación de corriente de campo del excitador.
K_L	Ganancia del límite de corriente de campo del excitador.
K_I	Coefficiente de ganancia de corriente de fase.
K_P	Coefficiente de ganancia del voltaje terminal.
S_E	Función de saturación del excitador.
T_A, T_B	Constantes de tiempo del regulador de voltaje
T_C	Constante del excitador (rango de integración asociado con el control del excitador).
T_E	Constante de tiempo del estabilizador del sistema de control de excitación.
T_F	Constante de tiempo del filtro de entrada al regulador.
T_R	Constante de tiempo del filtro de entrada al regulador.
V_A	Voltaje interno del regulador.
V_B	Voltaje disponible del regulador.
V_C	Voltaje de salida del compensador.
V_E	Voltaje del excitador detrás de la reactancia de conmutación.

V_{ERR}	Señal de error de voltaje.
V_F	Salida del estabilizador del sistemas de excitación.
V_{FE}	Señal proporcional a la corriente de campo del excitador.
V_H, V_K	Señales de realimentación de corriente de campo del excitador.
V_{LR}	Referencia límite de corriente de campo del excitador.
V_R	Voltaje de salida del regulador.
V_{REF}	Voltaje de referencia (determinado para satisfacer las condiciones iniciales).
V_T, I_T	Voltaje y corriente terminal del generador.

A.2 PARAMETROS DE LA MAQUINA SINCRONICA

<u>SIMBOLO</u>	<u>DESCRIPCION</u>
r_s	Resistencia de armadura.
r_{kq}	Resistencia del devanado amortiguador en el eje q.
r_{kd}	Resistencia del devanado amortiguador en el eje d.
r_{fd}	Resistencia del devanado de campo.
x_{1s}	Reactancia de dispersión del devanado de armadura.
x_{1kq}	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje q.
x_{1kd}	Reactancia de dispersión del devanado amortiguador en el eje d.
x_{1fd}	Reactancia de dispersión del devanado de campo.
x_{aq}	Reactancia de magnetización del eje en cuadratura.
x_{ad}	Reactancia de magnetización del eje directo.
ω_b	Velocidad angular eléctrica base.

REFERENCIAS

[1] POVEDA MENTOR, "Methods of Interfacing Synchronous Machine with Transmission Systems in a Digital Simulation", Technical Report TR-EE 76-11, Purdue University, 1976.

[2] RIVERA A. PABLO, "Estudio de los Sistemas de Excitación y Reguladores de Voltaje de las Máquinas Síncronicas", Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Julio de 1986.

[3] IEEE Committee Report, "Excitation Systems Models for Power Systems Stability Studies", IEEE Trans. PAS-100, Nº 2, pp. 494-509, February, 1981.

[4] CALDERON DIEGO, "Modelo y Simulación Digital de la Máquina Síncronica con una fase abierta y con reconexión incluida la Saturación", Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Septiembre de 1983.

[5] ANDERSON AND FOUAD, "Power System Control and Stability", Vol. I, Science Press, 1977.

[6] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems" IEEE Trans, Vol. PAS-87, pp 1460-1470, June 1968.

[7] IEEE Committee Report, "Excitation System Dynamic Characteristics", IEEE Tras. PAS-92, pp 64-75, January/February, 1973.

[8] L. FRERIS, "Analysis of a Hybrid Bridge Rectifier", Direct Current, pp 22-33, February 1966.

[9] WITZKE, KRESSER, DILLARD, "Influence of AC Reactance on Voltage Regulation of 6 - Phase Rectifiers", AIEE Trans, Communication, Vol. 72 pp 244-253, July 1953.

[10] LANE, ROGERS, VANCE, "Design and Test of a Static Excitation Sysfor Industrial and Utility steam Turbine - Generators", AIEE Trans, PAS, vol 80, pp 1072-1077, February 1961.

[11] DOMERATZKY, RUBENSTEIN, TEMOSHOK, "A Static Excitation Systems for Industrial and Utility Steam Turbine-Generators" AIEE Trans PAS - 80, pp 1072-1077, February 1961.

[12] DORF, T., "Sistemas Automáticos de Control" Fondo Educativo Interamericano, S.A. 1978.

[13] KUO, B.C. "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.

[14] JAMES M.L., SMITH G.H., "Applied Numerical Methods for Digital Computation, 2da. Ed., University of Nebraska.

[15] CARNAHAN B., LUTHER H.A., WILKES J., "Applied Numerical Methods". John Wiley & Sons, Inc. New York, 1969.

- [16] MARTUNG, HARRY, MELOY, "A Rotating Thyristor Excitation System for Hidroelectric Generators", IEEE Trans, PAS, pp 74-81, September 1972.
- [17] MULUKITLA S. SARMA, "Synchronous Machines. (Their Theory, Stability, and Excitation Systems)". Northeastern University.

BIOGRAFIAS

RIVERA ARGOTI, PABLO R.

Nació en Cayambe el 31 de Octubre de 1959. Culminó sus estudios secundarios en el Colegio Nelson Torres en el año 1978. Egresó de la Escuela Politécnica Nacional en el año 1984 y en 1985 ingresa a trabajar como Ayudante de Laboratorio de Máquinas Eléctricas;

en 1986 obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Control. En la actualidad trabaja en el Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional como Profesor Asistente. Desempeña además el cargo de Coordinador del Laboratorio de Máquinas Eléctricas y colabora con el Departamento de Electrónica y Control.