

ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION DE MAQUINAS SINCRONICAS Y SU INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

José A. Oscullo L, Ing.
Petroproducción

Jesús A. Játiva I, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN

En el presente trabajo se incluye la modelación de los sistemas de excitación, como parte de la simulación de los elementos dinámicos de sistemas eléctricos de potencia (SEP), en un programa de estabilidad transitoria.

Debido a que la excitación se caracteriza por una respuesta rápida a las desviaciones de voltaje, su incorporación permite analizar la respuesta de un SEP en periodos transitorios y determinar el comportamiento del sistema ante perturbaciones de rápida variación y peligrosas consecuencias.

El programa de estabilidad transitoria con los sistemas de excitación incluidos se prueba con respecto a estudios de sistemas eléctricos referenciales de otras tesis de grado y textos de estudios transitorios. Se analizan los sistemas de excitación de corriente continua (DC), y corriente alterna con generador (AC), o transformador (ST) de excitación.

ABSTRACT

In this work excitation systems modelling is included as part of the dynamic elements represented in a transient stability program for Electric Power System (SEP).

Due to the excitation is characterized by a rapid response to voltage deviations, their incorporation allows to analyze the SEP response in transient periods and to determine the system behavior in front of perturbations of rapid variations and dangerous effects.

The transient stability program with excitation systems included is tested with respect to reference systems of other thesis and transient study texts.

Direct current (DC) and alternate current with generator (AC) or with transformer (ST) for the excitation plus rectifiers are analyzed.

INTRODUCCION

El trabajo desarrollado parte de un programa computacional que modela la máquina sincrónica con sus parámetros dinámicos, básicos, la potencia mecánica constante y las perturbaciones más comunes a las que está sujeto un sistema de potencia.

Se realiza un interfaz entre los programas de flujos de potencia y estabilidad transitoria mediante un archivo

que almacena los resultados provenientes de una corrida de flujos de potencia, el cual es parte de los datos del programa de estabilidad.

En otro archivo de datos se ingresan los parámetros requeridos en la simulación de los sistemas de excitación como se indica en la figura 1.

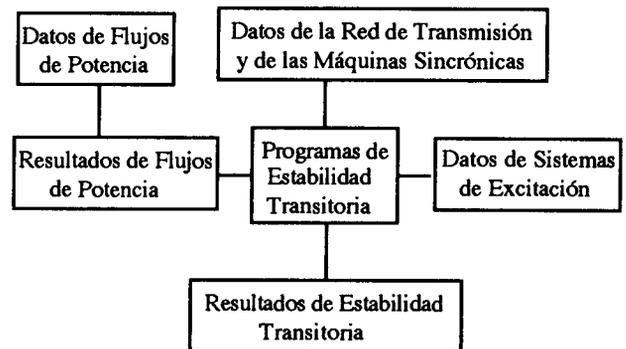


Figura1 Interconexión de Programas de Flujos y Estabilidad Transitoria

En el programa se incluye la modelación de los siguientes sistemas de excitación: DC y corriente alterna AC o ST, mediante ecuaciones diferenciales y algebraicas.

La simulación de los sistemas de excitación se realiza mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden, que garantiza la característica de respuesta rápida a perturbaciones de corta duración.

CONFIGURACION Y MODELACION DE LOS SISTEMAS DE EXCITACION

En el programa desarrollado se ha utilizado los modelos de los sistemas de excitación presentados en la referencia 5. En la figura 2 se presenta un diagrama funcional de los varios subsistemas de la excitación de un generador.

En el mismo se encuentra incluido: transductor de voltaje terminal, regulador de voltaje, excitatriz, elementos estabilizadores del sistema de excitación y estabilizador del sistema de potencia.

Transductor de Voltaje Terminal y Compensador de Carga

El modelo del transductor de voltaje terminal y compensador de carga de la máquina sincrónica de la

El siguiente algoritmo se ha desarrollado para incluir los sistemas de excitación:

- a) Leer y almacenar los parámetros de los sistemas de excitación.
- b) Determinar las condiciones iniciales de acuerdo al tipo de sistema de excitación.

Las condiciones iniciales para la máquina sincrónica se obtienen del archivo de resultados de flujos de potencia que da la información del estado de la red antes de la falla.

Las condiciones iniciales de los sistemas de excitación se calculan para satisfacer las condiciones de funcionamiento del sistema antes de la falla.

b.1) Sistemas de Excitación de Corriente Continua

Considerando la figura 4, los dos modelos de sistemas de excitación de corriente continua básicamente tienen las mismas características, diferenciándose únicamente en los límites del regulador de voltaje.

Así, para determinar las condiciones iniciales de estos sistemas se supone que las señales de salida del estabilizador V_F y la del regulador V_R son cero. El voltaje de excitación E_{FD} es igual al voltaje interno de la máquina sincrónica E_I . De acuerdo con los límites se tiene que el voltaje de referencia V_{REF} es igual al voltaje terminal V_T .

b2) Sistemas de Excitación de Corriente Alterna Alternador - Rectificador

Considerando la señal $V_F = 0$ el valor de las componentes rectificadores F_{EX} (analizada más adelante) se establecen los valores iniciales de $I_{FD}(0)$ y $E_{FD}(0)$.

b3) Sistemas de Excitación de Corriente Alterna Tipo Estáticos

En la figura 6 se indica el modelo ST2, para el cual las señales V_F y V_R son cero, mientras que para el modelo ST1 esos valores son diferentes de cero debido a la consideración de los transitorios externos por medio de la señal V_F .

Mientras en el modelo ST2 la influencia exterior se observa por medio de la señal V_E obtenida de los valores terminales del generador por medio de la relación:

$$V_E = |K_P V_T + j K_I I_T| \quad (1)$$

donde K_P la ganancia del circuito de potencial, K_I es la ganancia del circuito de corriente. Los valores de estas constantes según la referencia 2 están dados por:

$$K_P = 1.19 \quad (2)$$

$$K_I = 1.19[-\text{sen}(\cos^{-1} fp) + (E_{FDL}^2 - fp)^{1/2}] \quad (3)$$

donde:

fp = factor de potencia

E_{FDL} = voltaje de excitación a plena carga

- c) Resolver las ecuaciones diferenciales de los sistemas de excitación por el método de Runge-Kutta, considerando los límites en la modelación.

- d) Cálculo de la función de regulación F_{EX} para los sistemas de excitación alternos (AC o ST2).

La curva aproximada que modela el efecto de la regulación de los rectificadores se presenta en la figura 7. Todas las fuentes de corriente alterna con circuitos rectificadores sean controladas o no controladas, tienen una impedancia interna predominantemente inductiva.

La reactancia de conmutación tiene el efecto de prevenir la transferencia instantánea de corriente desde un rectificador a otro. Así, la conmutación requiere de un tiempo finito el cual es definido por el ángulo de conmutación (μ) y también dependiendo de la magnitud de la corriente de carga un retardo inherente definido por el ángulo α .

Las ecuaciones que caracterizan a estos tres modos de operación definen la regulación del rectificador como una función de la caída de voltaje de conmutación a medida que la corriente de carga varía desde vacío hasta cortocircuito.

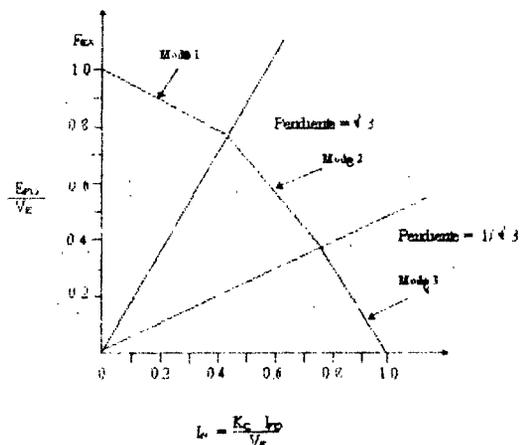


Figura 7 Características de Regulación del Rectificador

$$F_{EX} = \begin{cases} 1 - 0.58 I_N & \text{Si } I_N \leq 0.433 \\ (0.75 - I_N^2) & \text{Si } 0.433 \leq I_N \leq 0.75 \\ 1.732 (1 - I_N) & \text{Si } I_N \geq 0.75 \end{cases} \quad (4)$$

- e) Calcular el nuevo valor de voltaje interno del generador.

- f) Calcular la saturación de la excitatriz.

La función de saturación de la excitatriz S_E está dada como un múltiplo en pu del voltaje de salida. Representa el incremento de la señal de entrada a la excitatriz requerido a causa de la saturación. En la

figura 8 se ilustra el cálculo de un valor en particular de S_E .

Las cantidades A, B y C están definidas como la excitación de la excitatriz para producir un voltaje de salida en las curvas de saturación con carga resistiva constante, en la curva de vacío y en la línea de entrehierro, respectivamente. En excitatrices formadas por un conmutador de corriente continua, S_E está definida por la relación siguiente:

$$S_E = \frac{A - B}{B} \tag{5}$$

Para excitatrices formadas por un grupo alternador-rectificador la curva de saturación sin carga se usa para definir S_E . De la figura 8 se puede notar que:

$$S_E = \frac{C - B}{B} \tag{6}$$

La razón de utilizar la curva de saturación sin carga en los sistemas de excitación tipo alternador-rectificador son los efectos de la regulación de la excitatriz calculados por la inclusión en el modelo de las caídas de voltaje en la reactancia sincrónica y la reactancia de conmutación.

Puesto que los efectos de saturación son más significativos en voltajes altos, se especifica S_E mediante dos puntos dados por:

- A voltaje máximo de la excitatriz
- A 75% del voltaje máximo

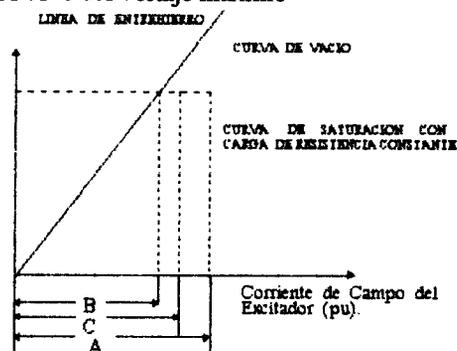


Figura 8 Características de Saturación de la Excitatriz

En el presente trabajo se utiliza la siguiente ecuación para modelar la función de saturación:

$$S_E = A_{EX} e^{(B_{EX} \cdot EXP_U)} \tag{7}$$

Donde A_{EX} y B_{EX} son constantes especificadas por los dos puntos que determinan la curva de saturación.

g) El proceso continua desde el literal c) luego de calcular los valores de voltajes y corrientes del sistema y generadores.

PROGRAMA DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

El programa computacional para el estudio de la estabilidad transitoria utiliza el modelo de la máquina sincrónica basado en la variación de las concatenaciones de flujo, el cual permite incluir los efectos de los sistemas de excitación.

Se utiliza un programa básico de estabilidad transitoria escrito en lenguaje FORTRAN 77, y se desarrollan los módulos específicos para simular el efecto del sistema de excitación, mediante las ecuaciones diferenciales respectivas.

El programa implementado consta de: programa principal STAX, Subrutinas: BUSDAT, LINDAT, YBUS, GENDAT, DATEX, HBASE, VAIN, DATEXIN, STABCK, KUTTAG, KUTTAC, KUTTADC, KUTTST, RUNGE, LOADCOMP, LIMITT, RECTIF, FACTOR, INJCT y SOLVE.

Tiene una capacidad de 200 barras, 300 líneas de transmisión y 60 generadores. Las cargas se encuentran representadas por medio del modelo de admitancia constante.

El programa permite simular las siguientes perturbaciones: falla trifásica en las barras, salida de líneas de transmisión, salida de unidades de generación y variaciones de carga.

Además, permite simular las siguientes maniobras: despeje de fallas en barras, desconexión de líneas de transmisión, reconexión de líneas de transmisión.

A continuación se presenta una breve descripción de las subrutinas del programa implementado:

La función del programa principal es supervisar el proceso de cálculo de la estabilidad transitoria, para lo cual consta de los siguientes bloques:

Bloque 1: Lectura y almacenamiento de los parámetros y características de la red en estado estable por medio de las subrutinas:

BUSDAT: Datos de magnitud de voltaje, ángulo, demanda en MW y MVAR, generación en MW y MVAR, límites de potencia reactiva en MVAR.

LINDAT: Datos de líneas y transformadores: barras "FROM" y "TO", resistencia, reactancia, susceptancia, y tap, en caso de transformadores.

Adicionalmente se debe dar el título del caso de estabilidad a estudiarse.

Bloque 2: Lectura y almacenamiento de los resultados del flujo de potencia antes de la falla por medio de un archivo obtenido al correr el programa de flujos de potencia PFRED.

Bloque 3: Lectura y almacenamiento de los datos de los generadores en la subrutina GENDAT la cual utiliza la subrutinas: HBASE transforma la inercia de los generadores a la base de 100MVA, VAIN lectura de los parámetros de la máquina sincrónica de las

condiciones iniciales de los generadores de acuerdo al tipo de generador (con excitatriz o sin excitatriz) o no la saturación, DATEX lectura y almacenamiento de los datos de acuerdo al tipo de sistema de excitación.

Bloque 4: Lectura de los indicadores para determinar el tipo de perturbación por medio de STABCK: Datos de tiempo de estudio, tiempos de fallas y maniobras.

Se realiza el estudio de estabilidad, para lo cual se modifican los parámetros de la red con las subrutinas YBUS y FACTOR así como las condiciones iniciales del sistema por medio de INJCT y SOLVE.

Bloque 5: Realiza el estudio de estabilidad transitoria con la información de la red y su estado inicial, se procede a estudiar la falla a partir de las condiciones obtenidas de los generadores y la red, luego se sigue con el cálculo de las condiciones iniciales de los sistemas de excitación en DATEXIN para aquellos generadores que poseen excitatriz.

En el estudio propio de estabilidad se ejecutan las subrutinas: PELEC en la cual se calculan las potencias entregadas por los generadores y el voltaje con los efectos de la saturación.

A continuación se llama a las siguientes subrutinas:

KUTTAG que resuelve las ecuaciones dinámicas de los generadores; en conjunto con las subrutinas que representan a los diferentes sistemas de excitación a saber: KUTTADC para los sistemas de excitación de corriente continua, KUTTAC para los sistemas de excitación de corriente alterna, KUTTST para los sistemas de excitación estáticos.

Se utiliza la subrutina LIMITT, que dependiendo del tipo de sistema de excitación verifica si las variables se encuentran en los límites y genera el valor de acuerdo a las condiciones de los diferentes modelos y/o la subrutina RECTIF, que determina la variable FEX de las componentes rectificadores.

Estas subrutinas se escogen en la subrutina GENEX y las ecuaciones diferenciales se resuelven en la subrutina RUNGE.

Por último la subrutina EQGEN reinicializa las variables de estado de los generadores y calcula la saturación de los sistemas de excitación para la siguiente iteración.

En este bloque, además, se controla el avance de tiempo para determinar si el tiempo de la maniobra o el tiempo final del estudio ha concluido. En cada subrutina se encuentra un conjunto de instrucciones que permiten detectar errores que serán impresos en el archivo de resultados y de esa manera el usuario se entere en que error ha incurrido, como se indica en la figura 9.

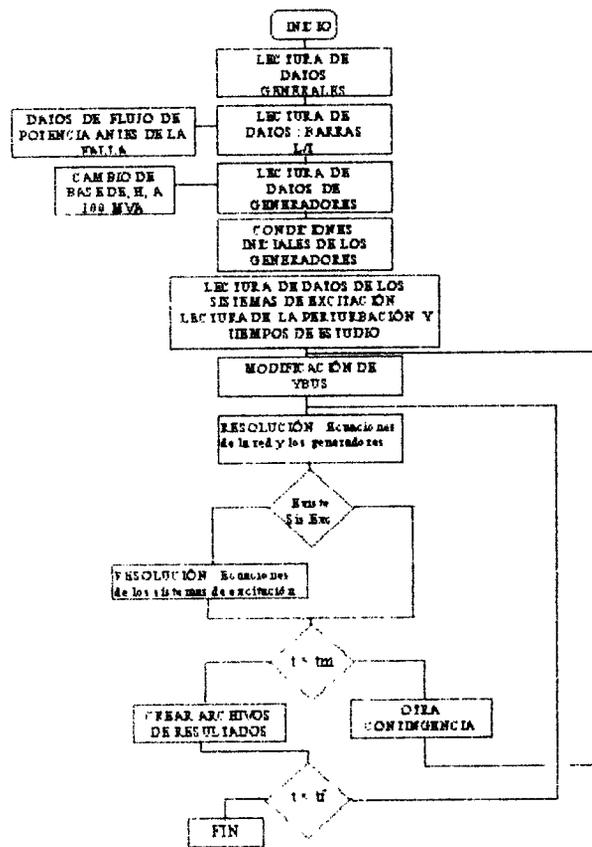


Figura 9 Diagrama Funcional del Programa de Estabilidad Transitoria

APLICACION

Las metas principales de los ejemplos de aplicación del programa computacional desarrollado son:

- Determinar la correcta modelación matemática de los sistemas excitación,
- Comprobar el adecuado funcionamiento de los algoritmos implementados y,
- Presentar al usuario el modo de uso del programa.

Debido a las características de los parámetros necesitados y con la finalidad de obtener resultados comparables, se analiza el sistema de potencia de la referencia 6.

Para realizar el estudio de estabilidad se deben preparar los siguientes datos:

- Resultados del flujo de potencia antes de la perturbación,
- Datos de generadores,
- Datos de sistemas de excitación, y
- Tipo y localización de la falla, tiempo de maniobra y tiempo máximo de estudio.

Para realizar el estudio de estabilidad sin considerar el efecto de los sistemas de excitación sólo son necesarios los datos de los literales: a), b) y d).

SISTEMA DE CINCO BARRAS

Este sistema indicado en la figura 10, consta de: cinco barras, siete líneas de transmisión, dos generadores con sistemas de excitación, y, cuatro cargas modeladas como impedancia constante tomado de las referencia 6.

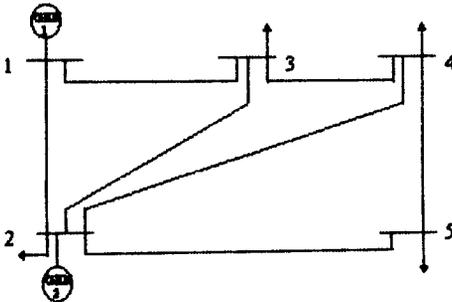


Figura 10 Diagrama Unifilar del Sistema de Cinco Barras

Se provoca una falla trifásica en la barra 2, la misma se inicia en $t=0s$ y permanece hasta $0.1s$, y se estudia sin sistemas de excitación así como con los seis sistemas de excitación implementados.

Se analizan las curvas de ángulos de rotores de generadores, diferencias angulares de los rotores, frecuencia, voltajes internos, voltajes terminales de los generadores, y potencias eléctricas de salida.

a) Sin Sistema de Excitación

Para comprobar el funcionamiento adecuado de los modelos matemáticos de los elementos del SEP, sin considerar a los sistemas de excitación, se compara con los resultados de ángulos de rotores y de frecuencia obtenidos en la referencia 6. En las figuras 11a y 11b, 11d y 11e se puede comprobar la concordancia del comportamiento de estas dos variables. De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el sistema tiene un comportamiento oscilatorio para esta perturbación, como se aprecia de la diferencia angular entre los dos rotores presentada en la figura 11c.

De la figura 11f se concluye que los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ permanecen constantes, debido a que se considera a la excitación como una fuente de voltaje constante, y no influye en el voltaje terminal.

En la figura 11g se puede observar el comportamiento de la potencia eléctrica de salida de las máquinas, con

la consideración de que la potencia mecánica constante, las oscilaciones en los dos generadores son bastante grandes e inclusive la curva del generador 2 indica potencias negativas en esta unidad.

b) Con Sistemas de Excitación de Corriente Continua

En las figuras 12a y 12b se comparan los resultados de ángulos rotóricos de los generadores obtenidos en este trabajo y los de la referencia 6 considerando sistemas de excitación de corriente continua.

Se puede observar que los resultados presentan un comportamiento similar. La figura 12c se observa un aumento del margen de estabilidad, debido a que las diferencias máximas de los ángulos de los rotores son menores con respecto a la modelación sin sistemas de excitación.

De la figura 12d se observa una reducción de los picos de las frecuencias de los generadores respecto al caso que no se considera sistemas de excitación.

En la figura 12e se indican los voltajes terminales, como era de esperarse, por la influencia la variación de los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ realizada por los sistemas de excitación, se produce una mayor variación de estos.

De acuerdo a la figura 12f la potencia eléctrica de salida presenta un mejor comportamiento del proporcionado en el caso de no considerar los sistemas de excitación, las oscilaciones son menores y el generador 2 ya no se motoriza.

c) Con Sistemas de Excitación de Corriente Alterna

En la figuras 13a se puede observar que el ángulo del rotor de los generadores presenta una variación más severa que con los sistemas DC, pero manteniendo una forma de oscilación similar.

La diferencia de los ángulos de los rotores se reduce más que en los otros casos, como se muestra en la figura 13b indicando un mejor margen de estabilidad del SEP.

En cuanto a la frecuencia mostrada en la figura 13c, no se observa una diferencia apreciable con respecto a la obtenida en los sistemas tipo DC.

En la figura 13d se indica la variación en los voltajes internos $E_{q'1}$ y $E_{q'2}$ influyendo de igual manera sobre el voltaje terminal, pero con variaciones más rápidas que las provocadas por los sistemas de excitación de corriente continua.

La potencia eléctrica de salida posee una variación mayor, de acuerdo a la figura 13e pero conserva una similar forma de oscilación que con los sistemas DC.

d) Con Sistemas de Excitación Estáticos

En la figura 14a se presenta el ángulo del rotor, en el que se muestra que el sistema de potencia varía con

menores oscilaciones, mejorando su margen de estabilidad como se indica con la diferencia angular de los rotores en la figura 14b.

La frecuencia presenta una oscilación similar a la de los otros sistemas de excitación según se observa en la figura 14c.

Como se muestra en la figura 14d, la variación de los voltajes internos $E'q_1$ y $E'q_2$ es más grande, lo que afecta directamente sobre el voltaje terminal.

En cuanto a la potencia eléctrica de salida, la figura 14e muestra una variación mayor que con los sistemas

AC, especialmente en la máquina que puede proporcionar más potencia, y el generador 2 tampoco se motoriza.

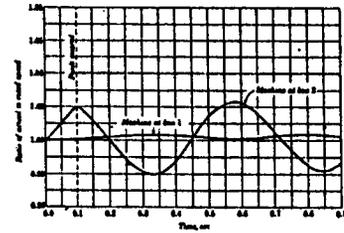


Figura 11e Frecuencia de la Referencia [6]

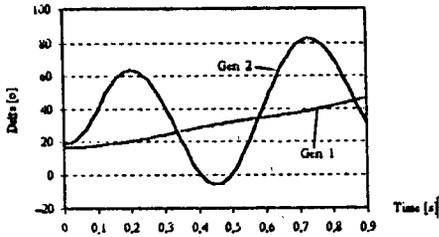


Figura 11a Angulo del Rotor

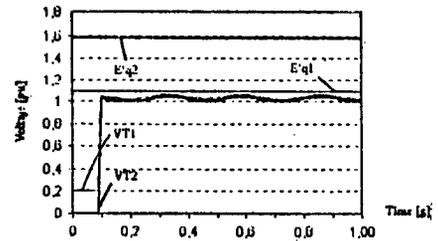


Figura 11f Voltaje Terminal V_T y Voltaje Interno $E'q$

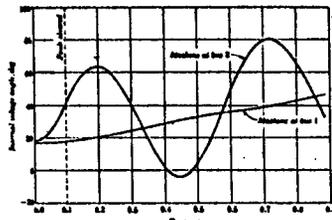


Figura 11b Angulo del Rotor de la Referencia [6]

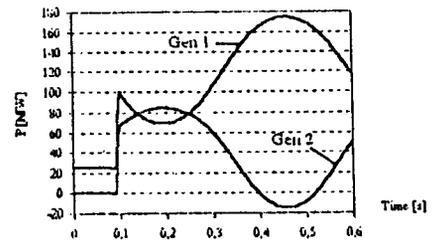


Figura 11g Potencia Eléctrica de Salida

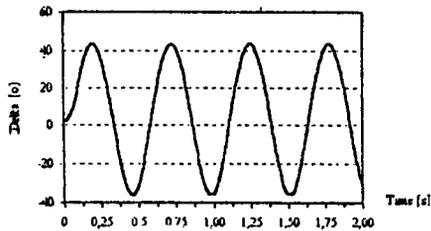


Figura 11c Diferencia Angular Rotórica 2-1

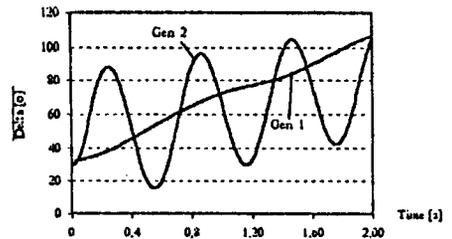


Figura 12a Angulo del Rotor

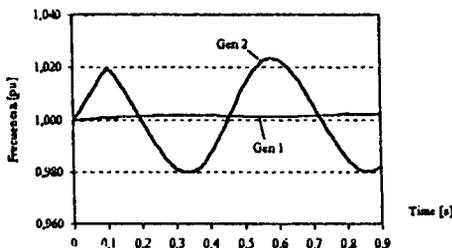


Figura 11d Frecuencia

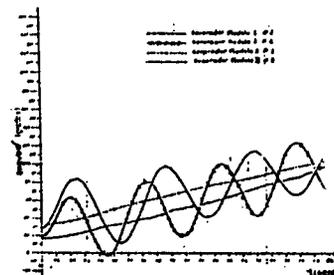


Figura 12b Angulo del Rotor de la Referencia [6]

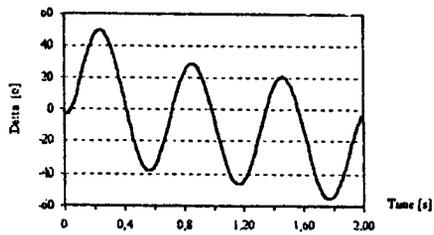


Figura 12c Diferencia Angular Rotórica 2-1

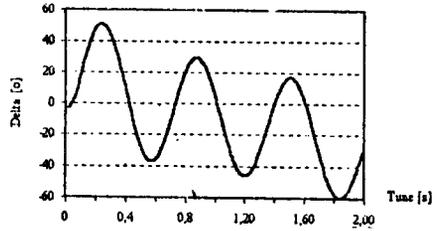


Figura 13b Diferencia Angular Rotórica 2-1

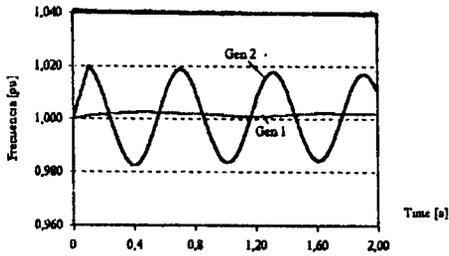


Figura 12d Frecuencia

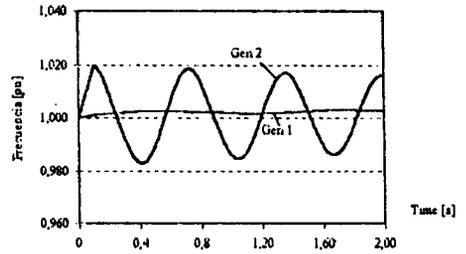


Figura 13c Frecuencia

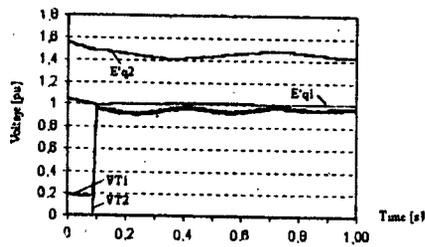


Figura 12e Voltaje Terminal V_T y Voltaje Interno $E'q$

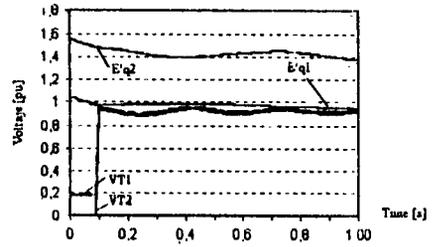


Figura 13d Voltaje Terminal V_T y Voltaje Interno $E'q$

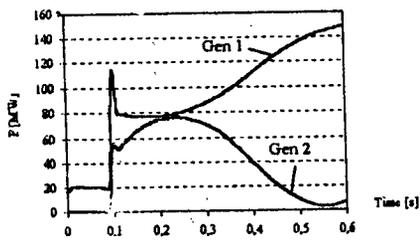


Figura 12f Potencia Eléctrica de Salida

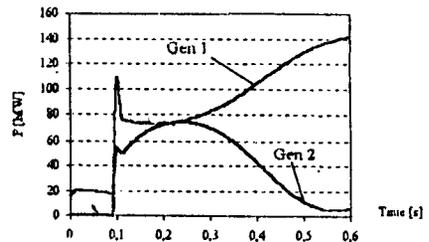


Figura 13e Potencia Eléctrica de Salida

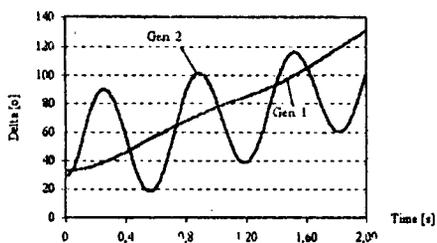


Figura 13a Angulo del Rotor

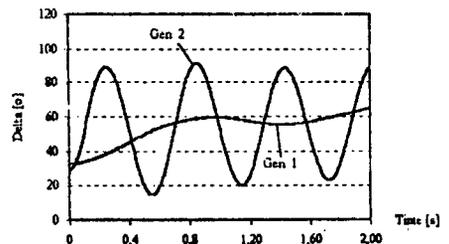


Figura 14a Angulo del Rotor

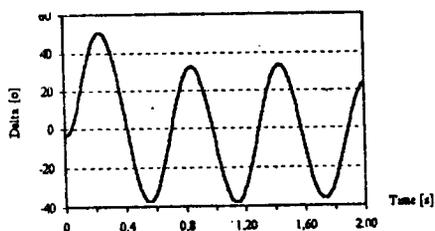


Figura 14b Diferencia Angular Rotórica 2-1

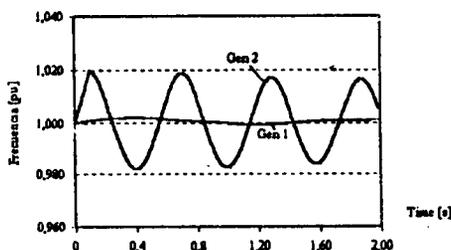


Figura 14c Frecuencia

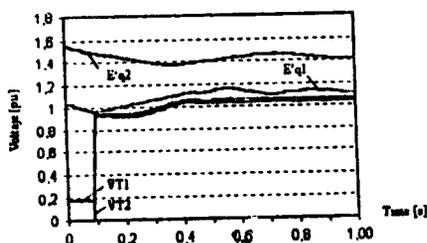


Figura 14d Voltaje Terminal V_T y Voltaje Interno E'_q

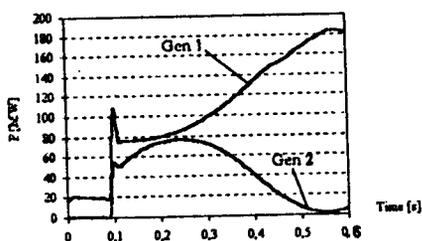


Figura 14e Potencia Eléctrica de Salida

CONCLUSIONES

Se han implementado modelos de sistemas de excitación en un programa básico de estabilidad transitoria por medio del cual se pueden realizar estudios de fenómenos de corta duración.

El programa ha sido desarrollado de manera modular, posibilitando la adición de otros componentes dinámicos o estáticos del sistema de potencia.

Los sistemas de ecuaciones diferenciales que se obtienen al considerar los sistemas de excitación obliga a utilizar un método de resolución de mayor precisión, como es el de Runge Kutta de cuarto orden.

La inclusión de modelos de sistemas de excitación en estudios de estabilidad transitoria demanda un conjunto de parámetros dependientes del tipo de excitación del generador.

La consideración de los sistemas de excitación como parte importante de los componentes dinámicos permite obtener resultados más cercanos al comportamiento real del sistema de potencia.

La ganancia K_A , las constantes de tiempo T_A y T_E influyen en la velocidad de respuesta de los diferentes sistemas de excitación, así se tiene que en los sistemas de excitación de alterna y estáticos la ganancia es alta y las constantes de tiempo son de menor valor comparadas con los sistemas de excitación de corriente continua, por lo que su respuesta es más rápida.

Frente a una perturbación, los sistemas de excitación de respuesta lenta influyen en menor grado en la variación del voltaje terminal, que aquellos de respuesta rápida.

De la observación de los ángulos del rotor de los generadores, la recuperación del equilibrio de un sistema después de una perturbación es más rápida con los sistemas de excitación que sin ellos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anderson and Fouad, "Power Systems Control and Stability", Iowa Press, 1984.
- [2] Stevenson W, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", Mc Graw- Hill, New York 1968.
- [3] Kimbark, E.W, "Power System Stability", Vol I, 1st Ed, John Wiley and Sons Inc, Londres, 1970.
- [4] IEEE Committee Report, "Proposed Excitation Systems Definitions for Synchronous Machines", IEEE Trans on PAS-88 N.8, pp. 1248-1258, August 1969.
- [5] IEEE Committee Report, "Excitation Systems Models for Power Systems Stability Studies", IEEE Trans on PAS 100 N.2, pp. 494-509, February, 1981.
- [6] Gómez, Fernando, "Programa para el Cálculo de Estabilidad Transitoria de Sistemas Eléctricos de Potencia", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Julio 1978.
- [7] Rivera, Pablo, "Estudio de los Sistemas de Excitación y Reguladores de Voltaje de las Máquinas Sincrónicas", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Julio 1986.

BIOGRAFIA

José Oscullo Lala

Nació en Sangolquí, el 20 de Mayo de 1971. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Nacional Juan de Salinas. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en Julio de 1996. Actualmente se encuentra trabajando en Petroproducción, Departamento de Mantenimiento Eléctrico en el campo Lago Agrio, como Ingeniero Proyectista de la Planificación de la Interconexión Eléctrica del Campo Auca al Sistema Eléctrico de Petroproducción.

Jesús Játiva Ibarra

Recibió los títulos de Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional, Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor de Philosophy (1991) de la University of Texas at Arlington (UTA).

Sus estudios de postgrado los realizó con el auspicio de Becas Fulbright y OEA. Trabajó como Asistente de Investigación y de Cátedra, y Miembro Postdoctoral en el Energy Systems Research Center de UTA.

El Dr. Játiva es coautor del libro "Analysis and Control System Techniques for Electric Power System" editado por Academic Press Inc. en 1991 y ha escrito para la PES del IEEE. Fue asesor del SSC del INECEL. Ha realizado cursos de postgrado en Conservación de Energía en la Industria, en Suecia en 1995, y de Inteligencia Artificial Aplicada a Sistemas Eléctricos de Potencia, en Colombia en 1996. Actualmente es Profesor Principal de la FIE y Jefe de Departamento de Potencia.