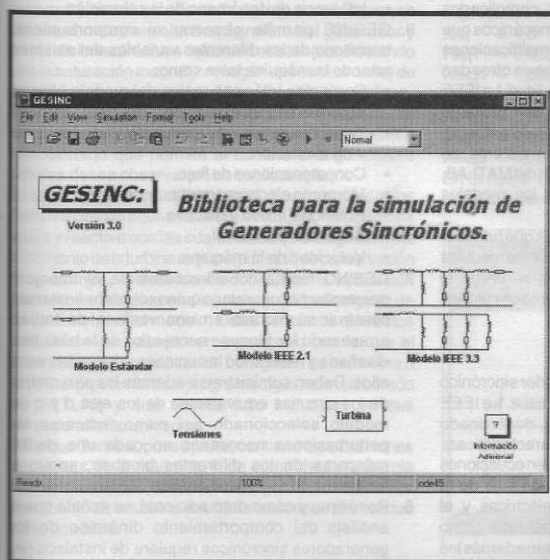


«Sistema modular de simulación dinámica de generadores sincrónicos»



RESUMEN

Se describe un sistema modular de simulación dinámica de los generadores sincrónicos basado en el SIMULINK del MATLAB que utiliza modelos propuestos por la IEEE para la simulación de estas máquinas. Se explican los diferentes módulos de trabajo y se valida el sistema a partir de experiencias realizadas por otros autores.

El sistema elaborado tiene múltiples aplicaciones en estudios de estabilidad mediante simulación de variaciones bruscas de carga y del comando de potencia reactiva, síntesis de reguladores de tensión, ajuste de protecciones, estudios de modelos para el diagnóstico, etc.

PALABRAS CLAVES

Generadores Sincrónicos, Máquinas Eléctricas, Simulación de Máquinas Eléctricas.

ABSTRACT

In this paper, a Modular Dynamic Simulation System for Synchronous Generators is described. It utilizes the IEEE Standard proposed models. The different working modules with their corresponding windows are explained. The system is validated by comparing its results with the experimental ones described by another authors.

- Miriam Vilaragut Llanes, Ph.D. □ Angel Costa Montiel, Ph.D.
Profesora asistente, Profesora auxiliar,
Centro de Investigaciones y Centro de Investigaciones y
Pruebas Electroenergéticas Pruebas Electroenergéticas
(CIPEL) Cuba. (CIPEL) Cuba.

Grupo del Investigaciones y
Pruebas Electroenergéticas
(CIPEL) Cuba.

Recibido : Mayo 2.002
Aceptado: Junio 2.002

KEYWORDS

Synchronous generators, electrical machines, electrical machines simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento dinámico de los generadores síncronos reviste gran importancia en el análisis de los sistemas eléctricos de potencia y en el cálculo de sus protecciones eléctricas y de los reguladores de tensión.

En los últimos años se han propuesto métodos de diagnóstico de fallos de máquinas y equipos eléctricos basados en modelos dinámicos. En el caso del generador síncrono estos modelos resultan de una complejidad elevada si se desean considerar los complicados fenómenos electromagnéticos y electromecánicos que en él se producen. Se han propuesto simplificaciones que son válidas en muchos casos pero que en otros dan resultados muy pobres o alejados de la realidad. La IEEE ha propuesto modelos que consideran con bastante exactitud los fenómenos de que se habla más arriba [1]. En el presente artículo se describe un sistema de simulación modular basado en el SIMULINK del MATLAB, que permite considerar cualquiera de los modelos propuestos por la IEEE.

Se describen inicialmente las posibilidades que brinda el sistema, se explican a continuación los distintos módulos y sus ventanas de trabajo y finalmente se valida el sistema a partir de resultados obtenidos por otros autores.

2. CARACTERÍSTICAS

Sobre la base de los modelos del generador síncrono planteados por la IEEE [1] (estándar, IEEE 2.1 e IEEE 3.3) se elaboró un Sistema Modular [2], denominado GESINC [3], que posee las siguientes características:

1. Utiliza modelos matemáticos basados en ecuaciones de estado con las concatenaciones de flujo de la máquina como variables de estado eléctricas, y, el ángulo de potencia y la velocidad del rotor como variables de estado mecánicas. Se usan además las ecuaciones de corriente obtenidas al realizar una transformación de coordenadas.
2. GESINC está soportado en el SIMULINK del MATLAB debido a las grandes ventajas y al reconocido prestigio internacional de este software profesional.
3. SIMULINK dispone entre sus bibliotecas, de una denominada "powersys" que permite analizar sistemas de potencia y en la cual existen bloques que simulan diferentes modelos del generador síncrono en los que se trabaja en todo momento con el modelo matemático más simplificado que no permite obtener de manera confiable el comportamiento dinámico de las variables del rotor. GESINC supera esta dificultad.

4. Debido a la gran complejidad de los modelos diseñados en GESINC que responden a sistemas de ecuaciones de estado de séptimo y décimo orden se decidió utilizar la opción de enmascaramiento que ofrece el SIMULINK.
5. GESINC permite simular el comportamiento dinámico de los generadores síncronos ante diferentes perturbaciones o acciones comando tales como:
 - Rechazo de carga.
 - Cortocircuito simétrico súbito.
 - Variación en forma de escalón o de rampa de los comandos de potencia activa y reactiva.
 - Pérdida de excitación.
 - Variación en forma de escalón o de rampa de la tensión de la red.
 - Sincronización.
 - Influencia del fenómeno de la saturación.
6. GESINC permite observar el comportamiento transitorio de las diferentes variables del estator y del rotor de la máquina tales como:
 - Corrientes trifásicas reales del modelo bifásico equivalente y de excitación.
 - Tensiones de línea, del modelo bifásico equivalente y de excitación.
 - Concatenaciones de flujo.
 - Momento electromagnético y en el eje.
 - Potencias activa y reactiva.
 - Ángulo de potencia.
 - Velocidad de la máquina.
7. GESINC facilita considerablemente el trabajo al desarrollar por un usuario quien sólo debe limitarse a construir su modelo en una ventana de trabajo arrastrando los bloques necesarios de la biblioteca diseñada y realizando las uniones adecuadas entre ellos. Deben suministrarse además los parámetros de los circuitos equivalentes de los ejes d y q del modelo seleccionado así como indicarse las perturbaciones necesarias en cada una de las máscaras de los diferentes bloques, según el fenómeno que se desee analizar.
8. Por último y como dato adicional, se señala que el análisis del comportamiento dinámico de los generadores síncronos requiere de instalaciones experimentales excesivamente costosas.
9. Este software permite su aplicación a las asignaturas de pregrado y postgrado.

3. DESCRIPCIÓN

Al inicio de este artículo se muestra la ventana de presentación del GESINC. Como se observa, existen tres módulos correspondientes a los tres modelos matemáticos diferentes del generador síncrono, un módulo de tensiones y un bloque donde se simulan las ecuaciones mecánicas, denominado Turbina. Aparece además un signo de interrogación que muestra una

información adicional, explicando las posibilidades del software y su forma de utilización.

Cada uno de los módulos incluye los bloques correspondientes a la simulación del modelo seleccionado.

El Módulo Tensiones contiene dos bloques: U_f que permite alimentar el devanado de excitación del generador y U_{dq} que contiene las tensiones de alimentación de los circuitos equivalentes de eje directo y en cuadratura, respectivamente.

En las ventanas correspondientes a cada uno de ellos es posible seleccionar una de varias opciones de trabajo según el fenómeno que se desee analizar.

En los módulos Modelo Estándar, Modelo IEEE 2.1 y Modelo IEEE 3.3 se encuentran los bloques correspondientes al modelo matemático específico del generador sincrónico. En cada uno de esos bloques se calcula el momento electromagnético del generador y las condiciones, iniciales de estado estable (considerando como la saturación magnética, según desee el usuario) de las cuales se parte en el análisis transitorio a realizar. Aparece también en cada módulo un bloque de mediciones, adecuado al modelo matemático seleccionado que permite al usuario escoger cuáles señales desea observar en un osciloscopio.

En la máscara de estos bloques el usuario debe dar los datos del circuito equivalente de la máquina, las potencias activa y reactiva con las cuales se calcula internamente el momento de la turbina según el principio de conservación de la energía, si desea o no considerar la saturación magnética o si desea analizar la variación de alguno de los parámetros del modelo. Debe señalarse que estos parámetros se trabajan en por unidad por lo que el usuario tiene la posibilidad de trabajarlos de esa forma o de utilizar previamente el programa *cgisinc.m* elaborado en MATLAB y que solicita sólo los datos en sus correspondiente unidades.

El Bloque Turbina, por su parte, contiene las ecuaciones mecánicas de la máquina. Pide como datos la inercia total del generador y la turbina y pregunta si desea variar el momento de la turbina en una de las formas planteadas como posibles.

4. VALIDACIÓN DEL GESINC

Hasta aquí se han detallado las funciones de los diferentes módulos del sistema elaborado. Seguidamente se demuestra su validación mediante el análisis de la respuesta transitoria de un generador sincrónico al ocurrir un cortocircuito simétrico súbito entre sus terminales, a partir de resultados experimentales reales que aparecen en el trabajo de Alves [4] y que muestran el comportamiento de las corrientes del estator y el rotor. El generador analizado es de 192.3 MVA, 18 kV, 3600 r/min. Los parámetros del circuito equivalente correspondiente al Modelo IEEE 3.3, obtenidos

experimentalmente por ese mismo autor son:

Datos del circuito equivalente de eje directo, expresados en por unidad:

$R_s = 0,00095675$
 $X_{sa} = 0,18473047$
 $X_{ad} = 1,6$
 $R_f = 0,00155327$
 $X_{sf} = 0,16094204$
 $X_{kf12d} = 0,05238185$
 $X_{kf2d} = 0,0000011$
 $R_{kd1} = 0,01646977$
 $X_{skd1} = 0,00001$
 $R_{kd2} = 0,25642292$
 $X_{skd2} = 0,00029431$

Datos del circuito equivalente de eje en cuadratura, expresados en por unidad:

$X_{aq} = 1,6$
 $R_{kq1} = 0,0084282$
 $X_{skq1} = 1,38602844$
 $R_{kq2} = 0,01714182$
 $X_{skq2} = 0,28185188$
 $R_{kq3} = 0,01710396$
 $X_{skq3} = 0,2843218$

En la figura 1 se muestra el esquema necesario para realizar la simulación utilizando el GESINC.

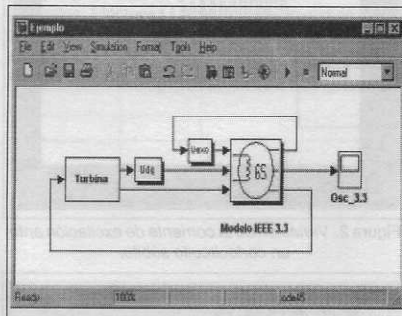


Figura 1. Esquema para la simulación del Modelo IEEE 3.3

En las figuras 2 a la 4 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación para la corriente de excitación y las corrientes de eje directo y eje en cuadratura.

En la Tabla I aparecen los valores pico de la corriente de eje directo y los tiempos en los cuales se obtienen los mismos para el caso real y para la simulación a partir del GESINC. Como puede apreciarse, los errores son casi insignificantes.

En las figuras 5 y 6 se muestran otras señales interesantes

al ocurrir un cortocircuito simétrico súbito entre los terminales del generador sincrónico, ellas son las formas de onda del momento electromagnético y el ángulo de potencia.

Tabla 1: Comparación entre los resultados experimentales y los de la simulación utilizando GESINC

	GESINC	Resultados Experimentales	Error (%)
Id pico (A)	9.438	9,436	0,02
Tiempo en que se alcanza Id pico (s)	0.1081	0,1078	0,28

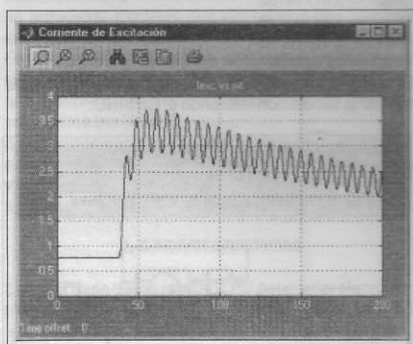


Figura 2. Variación de la corriente de excitación ante un cortocircuito súbito.

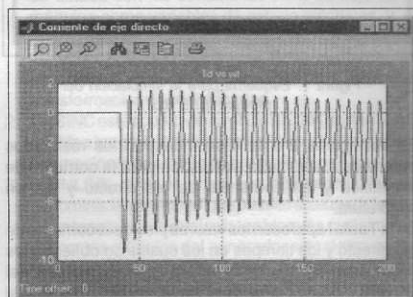


Figura 3. Variación de la corriente de eje directo ante un cortocircuito súbito.

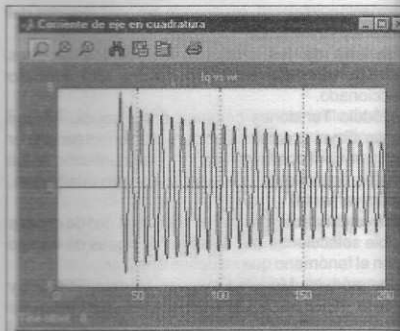


Figura 4. Variación de la corriente de eje en cuadratura ante un cortocircuito súbito.

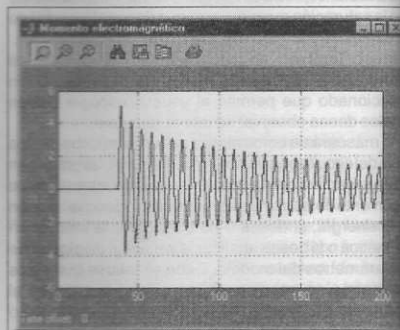


Figura 5. Variación del momento electromagnético ante un cortocircuito súbito.

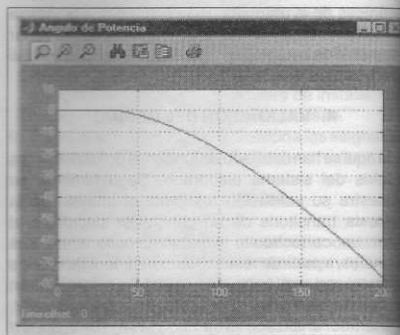


Figura 6. Variación del ángulo de potencia ante un cortocircuito súbito.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema modular de simulación dinámica del generador sincrónico que permite simular el comportamiento dinámico de la máquina ante diferentes perturbaciones teniendo en cuenta fenómenos tales como la saturación del circuito magnético principal, las inductancias mutuas diferentes entre los devanados del rotor y el efecto del rotor sólido en el caso de los turbogeneradores.

Los resultados obtenidos con la validación avalan la aplicabilidad del sistema.

Puede trabajar con un modelo más simple si no se necesita mayor complejidad o no se dispone de todos los parámetros que requieren los modelos de mayor complejidad.

Su facilidad de aplicación y rapidez le permite ser aplicado en la docencia de pregrado y postgrado.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std. 421.2-1990. Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems.
- [2] Vilaragut M, Costa A. Simulación de generadores sincrónicos considerando las características del rotor. Revista Energética. Vol XXI, No.4, 2001.
- [3] Vilaragut M, Costa A. GESINC. Versión 1.0. Registro 05715-5715 CENDA.
- [4] Alves R. Modelización de la máquina síncrona en estudios de régimen transitorio. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, España. 1997. ■

AUTORES



Miriam Vilaragut Llanes Ingeniero Electricista (1982), Master en Ingeniería Eléctrica (1997), Doctora en Ciencias Técnicas (2002). Trabaja como profesora asistente (1988) en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) del ISPJAE, Cuba, en la disciplina de

Máquinas y Accionamiento Eléctrico y en el grupo de Diagnóstico de Centrales Eléctricas. Actualmente investiga en el modelado, simulación y diagnóstico de máquinas eléctricas.

miriamv@cipel.ispjae.edu.cu



Angel Alberto Costa Montiel.

Ingeniero Electricista (1968), Doctor en Ciencias Técnicas (1987). Trabaja como profesor auxiliar (1977) en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) del ISPJAE, Cuba, en la disciplina de Máquinas y Accionamiento Eléctrico y en el grupo de Diagnóstico de Centrales Eléctricas. Actualmente investiga en el modelado, simulación y diagnóstico de máquinas eléctricas.

aacm@cipel.ispjae.edu.cu

«Pobre no es el hombre cuyos sueños no se han realizado, sino aquel que no sueña.»

Marie Von Ebner - Eschenbach.