



Simulación del generador sincrónico considerando las características del rotor

Miriam Vilaragut
Ángel Alberto Costa

Mayo del 2001

Resumen / Abstract

Los modelos matemáticos de los generadores sincrónicos constituyen sistemas de 7mo. y 10mo. orden. Debido a su complejidad resulta de gran utilidad práctica y educativa el poder disponer de un simulador que permita el análisis de su comportamiento dinámico cuando son sometidos a perturbaciones tales como: cortocircuito, rechazo de carga, pérdida de excitación, etc., para poder, entre otras cosas, evaluar su estabilidad en el sistema eléctrico de potencia, sintetizar los algoritmos de control de los reguladores automáticos de tensión, protegerlo adecuadamente o detectar fallas incipientes. En este trabajo se explica el sistema modular para la simulación de generadores sincrónicos, denominado GESINC, elaborado por los autores, el cual permite, además, la consideración de las características del rotor de los diferentes tipos de modelos del generador así como la diferencia entre las inductancias mutuas de estator y rotor.

Palabras clave: simulación, generador sincrónico

The mathematical models of the synchronous generators constitute systems of 7mo. and 10mo. order. Due to their complexity, it is of great practical and educational importance having a simulator of synchronous generators that allows the analysis of their dynamic behavior, when they are submitted to any disturbance such as: sudden short circuit, load rejection, loss of excitation, etc. in order to evaluate, among other things, their stability in the power electric system, to synthesise the control algorithms for automatic voltage regulators, to protect they adequately or to detect incipient faults. In this work the modular system for the simulation of synchronous generators, denominated GESINC, is explaine. It was elaborated by the authors and also allows the consideration of the characteristics of the rotor of the different types of models of the generator as well as the difference between the mutual inductance of stator and rotor.

Key words: simulation, synchronous generator

INTRODUCCIÓN

Debido a la gran importancia del generador sincrónico en una central termoeléctrica y en la generación de electricidad, es fácil comprender la necesidad de poseer una herramienta computacional adecuada que permita la simulación de los diferentes modelos matemáticos de los generadores considerando tanto las características del rotor como las inductancias mutuas diferentes entre estator y rotor. En este artículo se presenta y explica el sistema de simulación modular, denominado GESINC, elaborado por los

autores, que permite analizar los fenómenos transitorios más frecuentes que ocurren en un generador sincrónico operando contra un bus infinito de tensión constante ante diferentes acciones de comando o perturbaciones, tales como:

- Rechazo de carga.
- Variación súbita del comando de potencia reactiva.
- Variación súbita del comando de potencia activa.
- Variación de la tensión de la red.
- Pérdida de excitación.
- Cortocircuito simétrico súbito.

- Variación en cualquiera de los parámetros del circuito equivalente seleccionado, etcétera.

El sistema modular diseñado tiene las siguientes características:

- Posibilidad de utilizar tres modelos diferentes para el generador: el modelo estándar, el modelo de rotor sólido o IEEE 3.3 y el modelo de rotor saliente o IEEE 2.1. Estos modelos matemáticos, explicados en un trabajo precedente,¹ están basados en las ecuaciones de estado del generador planteadas tomando como variables de estado eléctricas las concatenaciones de flujo de la máquina, como variables de estado mecánicas el ángulo de potencia y la velocidad del rotor y utilizando, además, las ecuaciones de corriente, obtenidas al realizar una transformación de coordenadas.¹

- Debido a sus grandes ventajas y al reconocido prestigio internacional, el GESINC está soportado en el SIMULINK® del MATLAB®, versión 5.2. Debe señalarse que este software profesional dispone entre sus librerías® de una para el análisis de sistemas de potencia (*powersys*), en la cual existen bloques que simulan el generador sincrónico pero que trabajan en todo momento con el modelo matemático más simplificado del generador sincrónico. Como resultados del GESINC se demuestra la necesidad de utilizar el modelo matemático adecuado.

- GESINC facilita considerablemente el trabajo a desarrollar por un usuario, quién solo debe limitarse a construir su modelo a partir de los bloques de la librería diseñada, a dar los datos de los circuitos equivalentes de los ejes *d* y *q* del modelo seleccionado y a indicar en cada una de las ventanas de los diferentes bloques las perturbaciones que desee analizar.

GESINC: SISTEMA MODULAR PARA LA SIMULACIÓN DE GENERADORES SINCRÓNICOS

En la figura 1 se muestra la ventana de presentación del GESINC.

Como se observa, existe un módulo de tensión, tres módulos correspondiente cada uno a un modelo matemático diferente del generador sincrónico: el estándar, el IEEE 2.1 y el IEEE 3.3, como se explicó anteriormente, y un bloque donde se simulan las ecuaciones mecánicas y que se nombra Turbina.

Aparece además, un módulo con un signo de interrogación y que muestra, al hacer click sobre él, una ayuda simple. A continuación se explica la función de cada uno de los módulos y cómo trabajar con ellos.

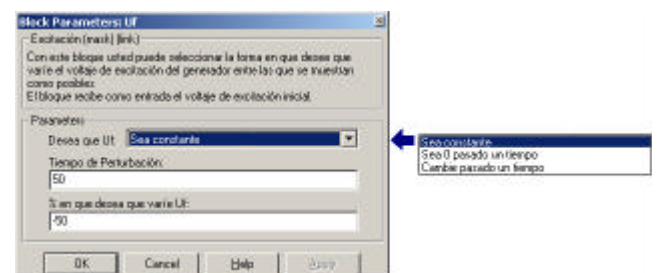


Ventana de presentación del GESINC.

1

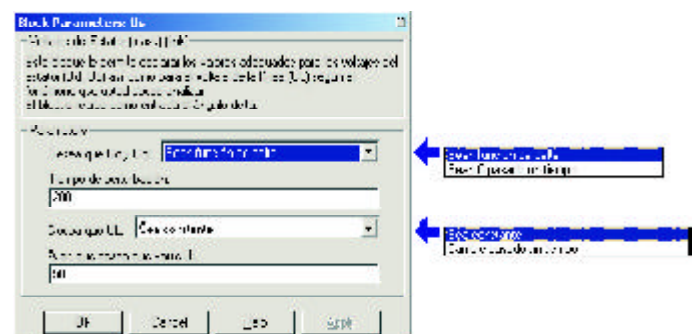
Módulo Voltajes

Contiene dos bloques de tensiones, uno denominado U_f , que permite alimentar el enrollado de excitación del generador y otro denominado U_{dq} que contiene las tensiones de alimentación de los circuitos equivalentes de eje directo y en cuadratura respectivamente. Cada uno de ellos tiene una ventana que se abre al hacer doble click sobre el bloque. Las ventanas correspondientes a ambos bloques se muestran en las figuras 2 y 3 y, como se observa, es posible seleccionar varias opciones de trabajo en cada una de ellas, de forma que el usuario pueda seleccionar la variante correspondiente al fenómeno que desea analizar de entre los planteados anteriormente.



Ventana correspondiente al bloque de Voltajes de excitación U_f .

2



Ventana del bloque de Voltajes del estator U_{dq} .

3

Módulos modelo estándar, IEEE 2.1, IEEE 3.3

En cada uno de estos módulos se encuentra el bloque correspondiente al modelo matemático considerado del generador sincrónico. En dichos bloques aparecen simuladas las ecuaciones de estado de concatenaciones de flujo y las correspondientes ecuaciones de transformación de corrientes. Además, en cada bloque se calculan las condiciones iniciales de estado estable, considerando o no la saturación magnética (según desee el usuario), de las cuales se parte en el análisis transitorio a realizar, así como el momento electromagnético del generador.

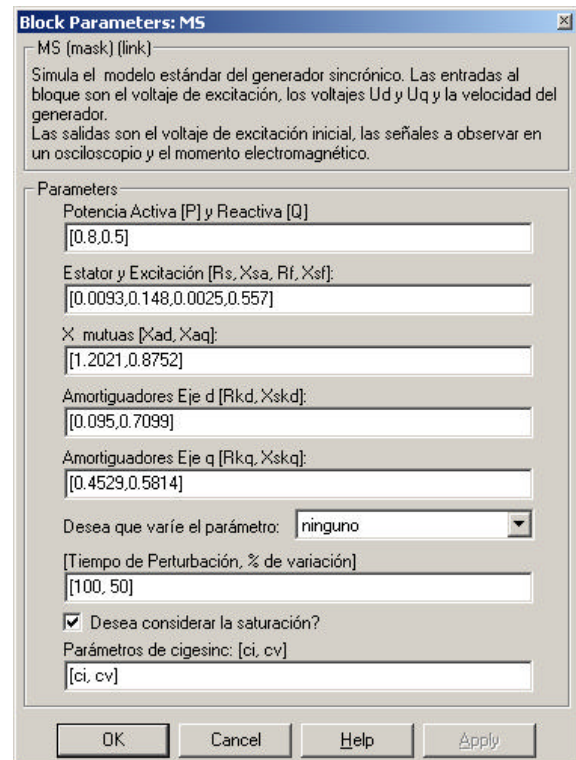
Aparece también en cada módulo un bloque de mediciones, correspondiente al modelo matemático, que permite al usuario seleccionar qué señales desea observar en un osciloscopio, pudiendo ser estas: las corrientes que circulan por los diferentes enrollados, las concatenaciones de flujo, los momentos electromagnético y de la turbina, las potencias activa y reactiva, el ángulo delta y la velocidad de la máquina.

Al hacer click sobre los bloques correspondientes al modelo matemático del generador aparece su ventana de trabajo, donde el usuario da los datos del circuito equivalente de la máquina, la potencia activa y reactiva con las cuales se calcula el momento de la turbina según el principio de conservación de la energía, si se desea considerar la saturación magnética o no o si desea analizar la variación de alguno de los parámetros del circuito. A manera de ejemplo en la figura 4 se muestra la ventana correspondiente al modelo estándar.

Bloque Turbina

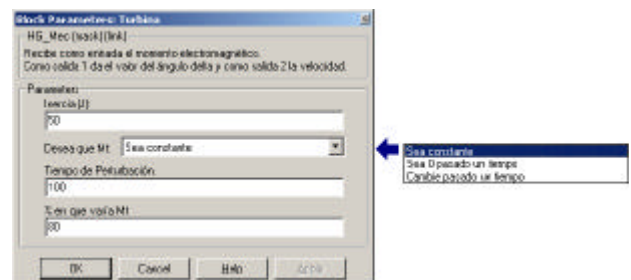
Este bloque contiene, como se ha dicho anteriormente, las ecuaciones mecánicas de la máquina. Pide como datos la inercia total del generador y la turbina y pregunta si desea variar el momento de la turbina en una de las formas planteadas como posibles. La ventana que aparece al hacer click en el módulo se muestra en la figura 5.

Ejemplos de simulación utilizando el GESINC
Hasta aquí se han detallado las funciones de los diferentes módulos del sistema elaborado. Para poder realizar una simulación es necesario, primeramente, abrir una ventana de trabajo y construir en ella, utilizando las facilidades que brinda el SIMULINK®, el esquema de simulación correspondiente al modelo del generador seleccionado, arrastrando los bloques necesarios y realizando las uniones adecuadas entre ellos. En la figura 6 se muestra el esquema necesario para la simulación del modelo IEEE 3.3.



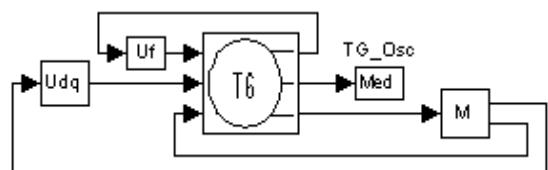
Ventana de trabajo del bloque correspondiente al modelo estándar del generador sincrónico.

4



Ventana correspondiente al bloque Turbina.

5



Esquema para la simulación del modelo IEEE 3.3.

6

A continuación es necesario en cada ventana de trabajo de los bloques, seleccionar la opción adecuada de variación de las diferentes señales según el fenómeno a analizar, así como dar los datos de los parámetros correspondientes al modelo matemático a analizar. Si por ejemplo, se desea analizar un rechazo de carga es necesario considerar constante la tensión de excitación, función del ángulo delta, las tensiones de alimentación U_d y U_q , considerar constante la tensión de la línea y hacer cero pasado un tiempo el momento de la turbina. Habría que dar como dato también en la ventana de la turbina el momento en que se desea que ocurra la perturbación.

En estas condiciones ya puede realizarse la simulación, las variables que desean ser observadas en un osciloscopio se seleccionan haciendo doble click en el bloque TG-Osc y en los osciloscopios correspondientes.

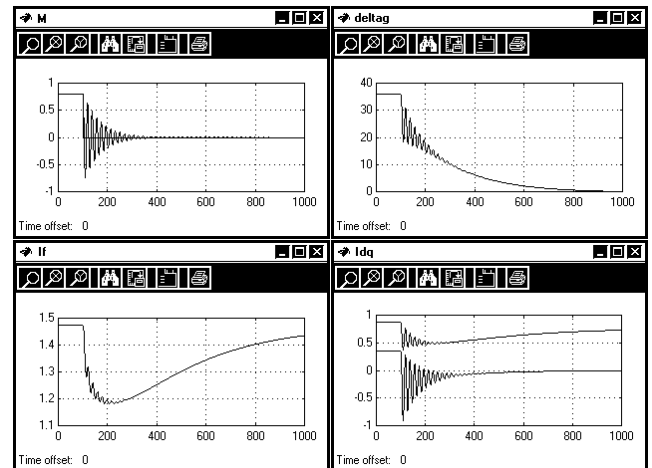
En la figura 7 se muestran los resultados de una corrida para este caso. Aparecen como muestra las formas de onda de la corriente de excitación (I_f), el momento de la turbina y el electromagnético (M), el ángulo de potencia (deltag) y las corrientes por los ejes d y q (I_{dq}).

NECESIDAD DE CONSIDERAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL ROTOR ASÍ COMO LAS INDUCTANCIAS MUTUAS DIFERENTES ENTRE ESTATOR Y ROTOR

Anteriormente se ha hablado de la necesidad de considerar tanto las características de los diferentes tipos de rotores de los generadores sincrónicos así como las conocidas inductancias de Canay.²⁻⁴

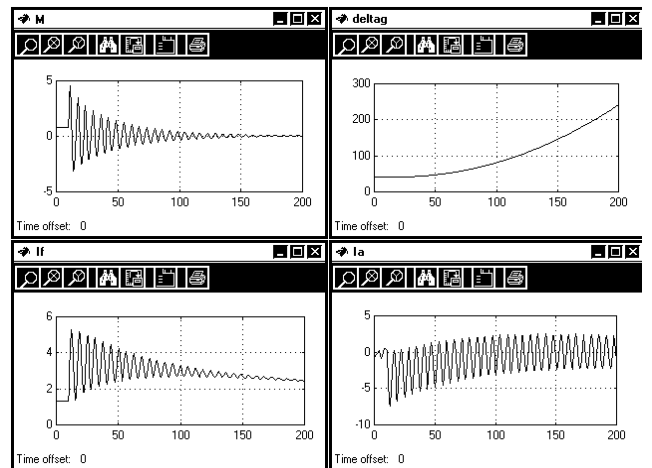
Para ello, utilizando el GESINC, se comparan los resultados de la simulación del modelo estándar (figura 8), con la del modelo IEEE 3.3 (figura 9), para una máquina de rotor cilíndrico, considerando como perturbación un cortocircuito simétrico súbito. La máquina estaba entregando una potencia activa de 0,8 por unidad y una potencia reactiva de 0,3 antes de la ocurrencia de la falla. Se analizaron las variaciones en el torque electromagnético (M), el ángulo de potencia (deltag), la corriente de campo (I_f), y la corriente del estator (I_a).

En estas figuras se observa gran diferencia en las corrientes de campo, mientras que el ángulo de potencia, el momento electromagnético, y la corriente del estator son muy similares. Se ha demostrado por diferentes autores que los resultados de la figura 9 se corresponden perfectamente con los medidos experimentalmente.²⁻⁶ Esto demuestra la necesidad de una correcta selección del modelo matemático según el tipo de generador analizado.



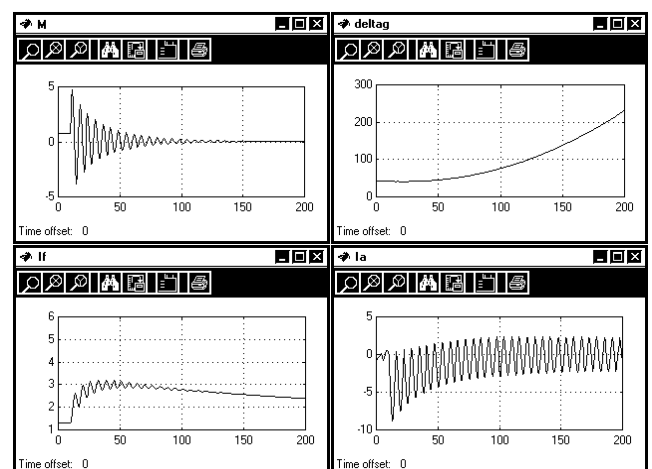
Rechazo de carga en el modelo IEEE 3.3.

7



Respuesta temporal de las variables seleccionadas para el modelo estándar.

8



Respuesta temporal de las variables seleccionadas para el modelo estándar.

9

CONCLUSIONES

El sistema modular de simulación para el análisis del comportamiento transitorio de generadores sincrónicos que se ha obtenido tiene varias ventajas importantes:

- Permite considerar diferentes tipos de rotores obteniendo, de esta manera, una mejor simulación de las variables del rotor.
- Está soportado en SIMULINK® del MATLAB®, versión 5.2, que como se sabe es un lenguaje de simulación profesional reconocido.
- Los datos de entrada necesarios, así como las consideraciones del fenómeno a analizar son proporcionados por el usuario en una forma muy simple.
- Es una herramienta educativa adecuada para el estudiante de los programas de pregrado y posgrado así como para ser utilizada en cursos de entrenamiento para profesionales de la Industria Eléctrica y de otros centros que trabajan con este tipo de máquinas.

Este sistema modular se extenderá en un futuro cercano, incluyendo los pasos siguientes:

- La posibilidad de introducir un ruido aleatorio.
- La simulación del sistema de la excitación.
- La simulación de un generador aislado contra una carga eléctrica.
- La simulación de un número limitado de generadores paralelos.

REFERENCIAS

1. Vilaragut, M. y Á. Costa: "Modelo matemático del generador sincrónico considerando las características del rotor", *Ingeniería Energética*, Vol. XX, No. 2, Ciudad de La Habana, 1999.

2. Canay, I. M.: "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of the Synchronous Machines", in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 7, July, 1969.
3. ———: "Alternating Current Machines Having Multiple Rotor Circuits" in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, June, 1993.
4. Kamwa, I. and P. Viraouge: "On Equivalent Circuit Structures for Empirical Modeling of Turbine-Generators", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 3, September, 1994.
5. Takeda, Y. and B. Adkins: "Determination of Synchronous Machine Parameters Allowing for Unequal Mutual Inductances", in *Proceedings of the IEE*, Vol. 121, No. 12, December, 1974.
6. Umans, S. D.; J. A. Mallick and G. L. Wilson: "Modeling of Solid Rotor Turbogenerators", Part I and II, in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 1, 1978.

AUTORES

Miriam Vilaragut Llanes

Ingeniera Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE)
e-mail: miriam@cipel.ispjae.edu.cu

Ángel Alberto Costa Montiel

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana
e-mail: aacm@cipel.ispjae.edu.cu

CENTRO DE OPERACIONES LUIS FELIPE ALMEIDA OBE CIUDAD DE LA HABANA



Nuestro Centro Territorial de Producción, siempre dispuesto a satisfacer las necesidades del cliente, le oferta un grupo de producciones y servicios, para lo que cuenta con una reconocida experiencia

Contáctenos:

Empresa Eléctrica Ciudad de La Habana
Ave. Independencia km 6 ½, Boyeros
Ciudad de La Habana, Cuba
Teléfono: 45 1357

Fax: 45 1679 e-mail: colfa@abech.cu