

APLICATIVO DE COMPUTADOR PARA ESTUDIOS DE AGC EN APLICACIONES ELÉCTRICAS

S. Maya *, J. W. González **†, H. A. Restrepo, * I. A. Isaac, * y G. J. López *

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia,

Recibido 01 Agosto 2009; aceptado 04 Diciembre 2009
Disponible en línea: 27 Diciembre 2009

Resumen: Se presenta un modelo matemático para el estudio de los sistemas de control de frecuencia, así como un aplicativo de computador el cual permitirá el estudio del comportamiento de diferentes generadores, ya sea en un sistema de potencia aislado o en un sistema de potencia interconectado de dos áreas, gobernado por un Controlador Automático de Generación (AGC del inglés *Automatic Generation Control*). Copyright © 2009 UPB.

Abstract: A mathematical model for the study of frequency control systems is presented, also a computer software that will allow the study of the behavior of different generators, either in an isolated or interconnected electrical power system composed of two areas, governed by an Automatic Generation Control.

Keywords: Automatic Generation Control, Control loops, Automatic regulator control (AVR), Generator, Governor, Electrical power systems.

1. INTRODUCCIÓN

La operación de un sistema eléctrico interconectado nacional, debe obedecer a criterios de seguridad, calidad, confiabilidad y economía del suministro de energía eléctrica. Entre estos elementos se destaca uno de los índices de calidad que se deben mantener dentro de los parámetros establecidos por la regulación vigente en los países, el cual es la estabilidad de la frecuencia. En Colombia la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, establece los criterios que a bien ejecuta el operador de la red y de acuerdo con los acuerdos operativos del Centro Nacional de Operación, CNO ([CREG, 2009](#)).

Es necesario ocuparse del control de potencia activa y reactiva para conservar el sistema en sus condiciones de balance de la carga y generación, y con la tensión en sus valores adecuados. El objetivo de este control es generar y despachar la

potencia eléctrica de manera económica y confiable, manteniendo la tensión y la frecuencia dentro de los límites permisibles. Los cambios en la potencia real afectan principalmente el sistema de frecuencia. La potencia reactiva es menos sensible a los cambios en frecuencia e influencia principalmente los cambios en tensión, así las potencias reales y reactivas pueden ser controladas de maneja separada.

El control de frecuencia ha ganado importancia con el desarrollo de los sistemas interconectados y ha hecho posible la operación de dichos sistemas, hoy es la base de muchos conceptos avanzados para los sistemas de control. Los métodos desarrollados para control de generadores juegan un papel importante en los modernos centros de control de energía, los cuales están equipados con computadores en línea

† Autor al que se dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 354 45 22 ext. 9586.
E-mail: jorgew.gonzalez@upb.edu.co (Jorge González).

que realizan y procesan todas las señales a través de sistemas de adquisición remota.

La formación de los ingenieros electricistas en Colombia es de fortalezas en sistemas de generación, transmisión y distribución. Los fundamentos de sistemas de control son impartidos pero no se logra avanzar de manera suficiente en aplicaciones de control del sistema de potencia. Esto es una debilidad que al inicio perciben las empresas de energía al ubicar sus nuevos profesionales en áreas encargadas del control. En particular se hace necesario un entrenamiento con simuladores que reproducen potenciales situaciones de problemáticas alrededor de la frecuencia del sistema, por problemas en el balance entre la carga y la generación. El entrenamiento de estudiantes en el tema del Controlador Automático de Generación (AGC del inglés *Automatic Generation Control*) y sus relaciones con el mercado de energía ha sido abordado en ([Kumar et al., 1997a](#); [Kumar et al., 1997b](#)). En España se ha logrado el entrenamiento sobre el AGC a través de modelos y herramientas de simulación que incluso permite analizar la influencia de parámetros funcionales ([Egidio et al., 2009](#)). En ([Ross, 1994](#)) se implementó un sistema de entrenamiento en AGC para despacho en tiempo real y para entrenamiento de operadores, en tal referencia se remarca la importancia de la simulación debido a que se logran situaciones realísticas que son una mímica del comportamiento del sistema de potencia real, ofreciendo excelentes oportunidades para los operadores de manera que se preparen para situaciones anormales. El EPRI (*Electric Power Research Institute*) desarrolló en ([Kafka, 1989](#)) un entrenador en AGC con el objetivo de que fuera posible probar diferentes algoritmos de despacho económico; el simulador es útil para quien desee experimentar con el AGC bajo diferentes circunstancias, pudiendo realizar sintonizaciones particulares que permitan desempeños adecuados; se concluye que el simulador posee potentes capacidades de aplicación en el ámbito académico y de investigación. La conceptualización básica del AGC ha sido bien tratada en ([Jaleeli et al., 1992](#)), la cual ha sido la base para importantes implementaciones.

En este artículo se presentan modelos de componentes esenciales usados en los sistemas de control de potencia realizando comprobaciones en sistemas de dos áreas. La potencial aplicación es

hacia la capacitación básica de estudiantes, investigadores y entrenamiento de operadores de sistemas de potencia. La generalización del impacto de sistemas de control de frecuencia involucrando un AGC, a partir de sistemas de dos áreas, ha demostrado ser muy eficiente en ([Sheikh et al., 2008](#)); en aquella referencia se realizaron los estudios mediante MATLAB.

2. CONTROLES DE FRECUENCIA

Al estudiar el control frecuencia-potencia, se asume que las desviaciones del punto de equilibrio son pequeñas y que la frecuencia puede considerarse la misma en todos los nodos del sistema. Por ello, el control de frecuencia es un problema que se aborda de manera global. En ocasiones se diferencia al control de tensión, identificado frecuentemente como local al verse afectado en casos muy especiales como el colapso de tensión a un conjunto limitado de nodos ([Kundur, 1994](#)). Así, los sistemas de control de frecuencia y de tensión se conciben de forma independiente.

El control de frecuencia debe conseguir que ([Corredor, 2009](#); [Jaleeli et al., 1992](#)):

- Se mantenga el equilibrio entre generación y demanda.
- Se mantenga la frecuencia de referencia en el sistema.
- Se cumplan los compromisos de intercambio de energía con las áreas vecinas.
- Se mantenga la suficiente energía de reserva.

La frecuencia en último término es un parámetro operativo que refleja el balance que ocurre entre la carga y la generación, si la carga es mayor que la generación, el efecto es una reducción de frecuencia, en cambio cuando la generación es mayor que la carga, la frecuencia tiende a ser mayor.

El control de frecuencia se da en cuatro etapas ([Corredor, 2009](#); [López y Vásquez, 2006](#); [Ledezma, 2009](#)):

2.1. Autorregulación.

Es una reacción de tipo natural producida por la inercia mecánica y eléctrica de tipo RL del

sistema, ante desbalances entre la carga y la generación. Esta reacción es siempre auto correctiva del error de frecuencia, pero casi nunca es suficiente.

2.2. Regulación primaria.

Es la reacción del sistema de control del gobernador de velocidad del generador, tiende a producir cambios en la potencia mecánica ante disturbios del sistema.

Actúa de forma local en cada generador, atendiendo a la velocidad de giro del eje. La rapidez de este control está limitada por la propia inercia de los generadores.

Si sólo existe la regulación primaria el sistema seguirá operando a una nueva frecuencia de estabilización, la cual es diferente de la nominal.

2.3. Regulación Secundaria.

El objetivo de la regulación secundaria, ejecutada a través del AGC, consiste en llevar la frecuencia del sistema a su valor nominal o los intercambios entre áreas a los valores programados, y a la vez se encarga de recuperar la reserva suministrada por la regulación primaria.

Para poder reducir la desviación de frecuencia a cero, se debe proporcionar una acción de reposición. Esta acción puede alcanzarse introduciendo un controlador integral para que actúe sobre el ajuste de referencia y permita cambiar el punto de ajuste de la velocidad.

2.4. Regulación terciaria.

Bajo algunas condiciones operativas, a pesar de la actuación de la autorregulación, la regulación primaria y secundaria, continúan presentándose requerimientos de margen de regulación para mantener el balance carga-generación, por lo cual se hace necesario recurrir a plantas que estén en capacidad de generar de manera diferente a su despacho original, estas unidades generadoras del sistema deben disponer de una reserva suficiente de energía lista para compensar las variaciones de demanda. La reserva de energía varía con el tiempo, según el mecanismo de regulación secundaria a medida que va disponiendo de ella.

3. MODELOS DE SIMULACION

Los modelos empleados para la simulación de los controles primarios y secundarios de frecuencia del simulador implementado en MATLAB/SIMULINK ([Mathworks, 2009](#)) se presentan en las [Fig. 1](#), [2](#), [3](#) y [4](#).

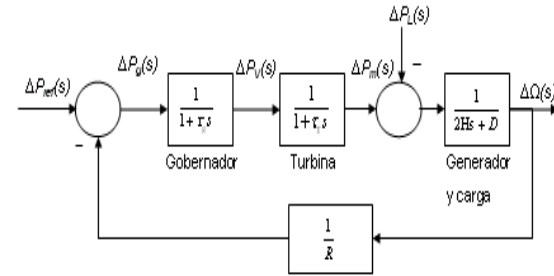


Fig. 1. Modelo control primario.

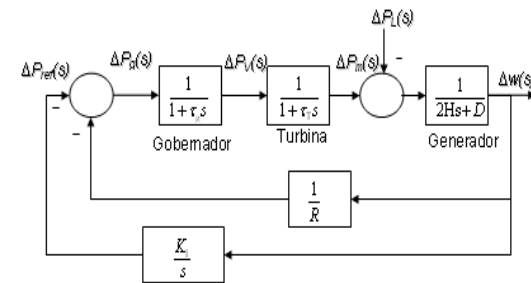


Fig. 2. Modelo AGC en sistema de potencia aislado.

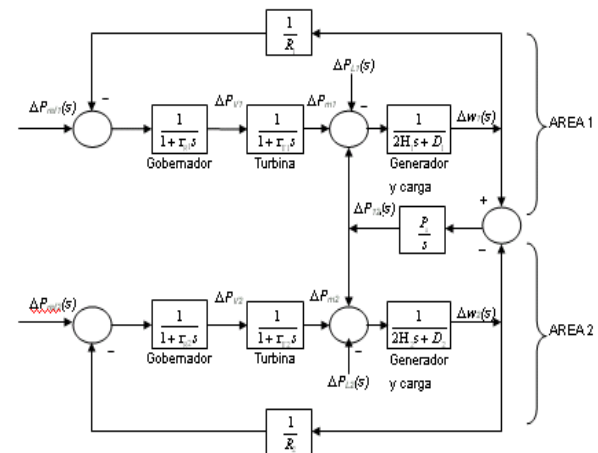


Fig. 3. Modelos sistema de dos áreas interconectadas sin AGC.

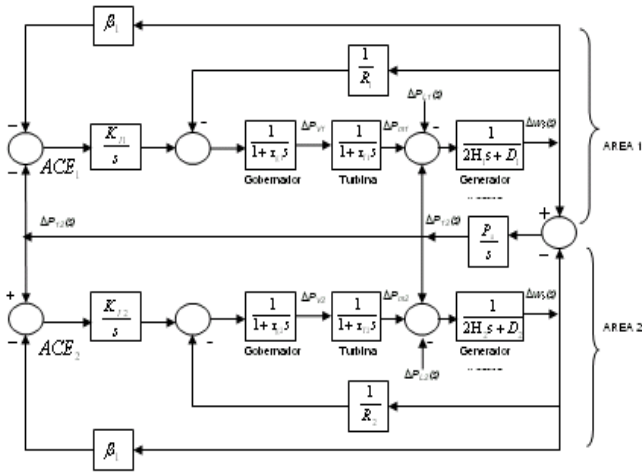


Fig. 4. Modelos sistema de dos áreas interconectadas con AGC.

4. SIMULACIONES

A continuación se presentan las simulaciones y resultados obtenidos con el simulador implementado en MATLAB/SIMULINK. La fundamentación y programación fue realizada en (Maya y González, 2009).

Las Fig. 5 y 6 simulan la respuesta de la frecuencia de un mismo sistema de potencia aislado, ante el mismo cambio en la carga, con la diferencia de que una proporciona las respuestas sin aplicación de AGC.

Las Fig. 7 y 8 simulan la respuesta de la frecuencia de un sistema de dos áreas, interconectados por un enlace de líneas, ante el mismo cambio en la carga. Una de las respuestas es sin aplicación de AGC.

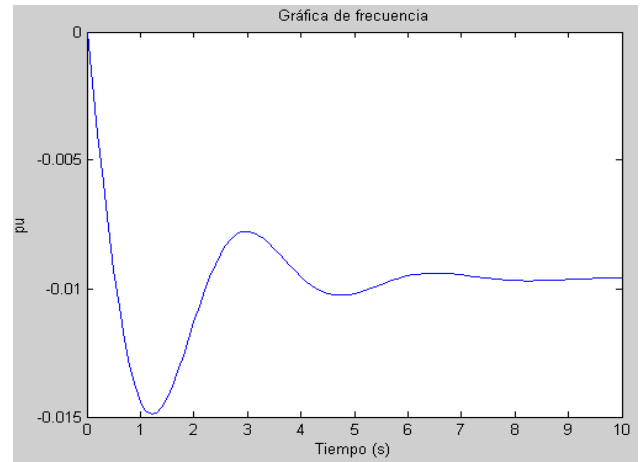


Fig. 5. Cambio de la frecuencia aplicando únicamente control primario.

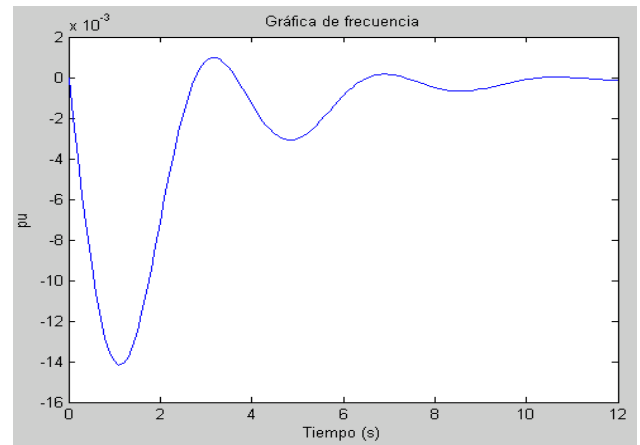


Fig. 6. Cambio de la frecuencia aplicando control primario y AGC.

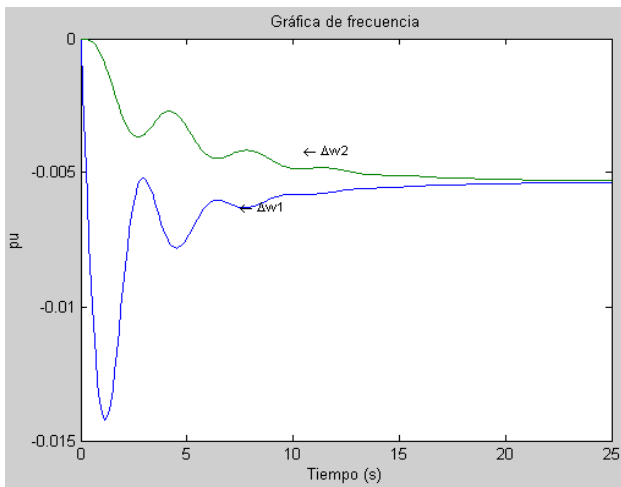


Fig. 7. Cambio de la frecuencia en dos áreas interconectadas aplicando únicamente control primario.

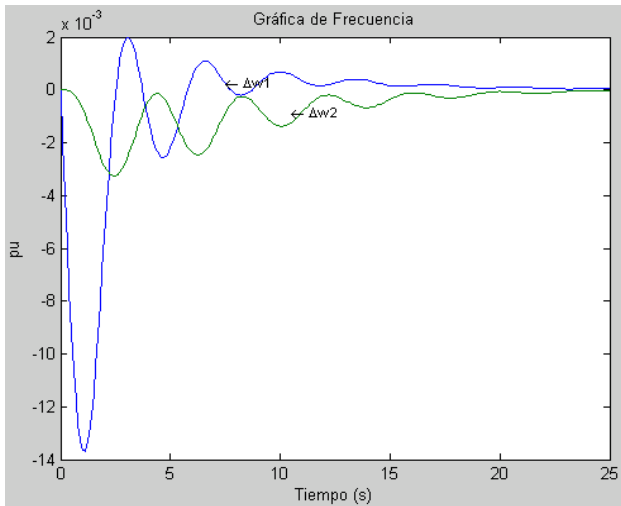


Fig. 8. Cambio de la frecuencia en dos áreas interconectadas aplicando control primario y AGC.

5. CONCLUSIONES

El control primario, control secundario (AGC) y control terciario, actualmente son necesarios para cualquier sistema de interconectado. Éstos brindan acciones en tiempos relativamente cortos que permiten la correcta prestación del servicio, controlando de manera eficaz la frecuencia y la potencia generada en diferentes áreas.

El despacho económico está obligado a generar un porcentaje para la actuación del AGC, como generación de seguridad ofreciendo mayor

calidad, confiabilidad y seguridad en la operación del SIN.

El uso MATLAB como medio para efectuar estas simulaciones es un excelente acierto, ya que gracias a sus herramientas Gráficas y SIMULINK, ha sido posible crear interfaces gráficas y simulaciones propias de los modelos estudiados, logrando así de una manera sencilla la interacción con el usuario final.

El aplicativo de computador para estudios del AGC en sistemas eléctricos es útil en el estudio de sistemas de potencia, ya sean aislados o de dos áreas, ya que el usuario de manera sencilla puede variar parámetros importantes en el generador, gobernador de velocidad, carga, integrador; observando así de manera rápida el comportamiento de la frecuencia y potencia, así mismo la función del AGC en estos sistemas.

El aplicativo de computador aumenta en gran medida las posibilidades de simulación para estudiantes de ingeniería, investigadores y operadores de sistemas eléctricos de potencia.

REFERENCIAS

- Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG (2009). www.creg.gov.co, consultado en 2009-11-12.
- Corredor, P. (2009). Casos de oscilación presentados en el sistema colombiano. *En: II Seminario Internacional de Operacion, Control y Estabilidad en sistemas de potencia (8: 2009: Medellin). Experiencias docentes.* Medellin: UPB. 52 p.
- Egido, I.; Fernandez-Bernal, F.; Rouco, L. (2009). The Spanish AGC System: Description and Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems.* Volume 24, Issue 1, pp.271 – 278.
- Jaleeli, N., L. VanSlyck, D.Ewart, L.Fink and A. Hoffman (1992). Understanding Automatic Generation Control. *IEEE trans. On Power Systems.* Vol. 7, pp. 1106-1122.
- Kafka, R.J.; Fink, L.H.; Balu, N.J.; Crim, H.G., Jr. (1989). An advanced dispatch simulator with advanced dispatch algorithm. *IEEE Computer Applications in Power.* Volume 2, Issue 4. pp. 30 - 35
- Kumar, J.; Kah-Hoe Ng; Sheble, G. (1997a). AGC simulator for price-based operation. I. A model. *IEEE Transactions on Power Systems.* Volume 12, Issue 2, pp.527 – 532.

- Kumar, J.; Kah-Hoe Ng; Sheble, G. (1997b). AGC simulator for price-based operation. II. Case study results. *IEEE Transactions on Power Systems*. Volume 12, Issue 2, pp. 533 – 538.
- Kundur, Prahba, (1994). *Power System Stability and Control*. Palo Alto, CA: Mc-Graw-Hill.
- Ledesma, P. (2008). Operación y control de sistemas eléctricos [en línea]. Madrid. <Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RFP/node1.html> [consulta:15 Enero 2009].
- López, A. y M. Vásquez. (2006). Modelo y estrategia técnico-económica para optimización del mercado eléctrico de AGC en Colombia. Medellín, p. 20-30. Trabajo de especialización (transmisión y distribución). Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica
- Maya, S., González, J. (2009). Aplicativo de computador para estudios del AGC en aplicaciones eléctricas. Producto de investigación Grupo TyD UPB. Medellín.
- Ross, H.B., N. Zhu, J. Giri, B. Kindel. (1994). An AGC implementation for system islanding and restoration conditions. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9. No. 3. pp. 1399-1410.
- Sheikh, M.R.I.; Muyeen, S.M.; Takahashi, R.; Murata, T.; Tamura, J. (2008). Improvement of load frequency control with fuzzy gain scheduled superconducting magnetic energy storage unit. *International Conference on Electrical Machines*. IECM 2008. pp.1 - 6
- The Mathworks Inc. Copyright 1984-2009. Online Product Documentation. [Online].
- Ingenieros. Ha trabajado para Siemens, Erlangen en la sección PTD (FACTS y HVDC). Es investigador invitado del Werner von Siemens laboratory en Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania.

Hugo A. Cardona

Ingeniero Electricista y MSc en 1999 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1999. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

Idi A. Isaac

Ingeniero Electricista y MSc en 2000 y 2005 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2000. Actualmente adelanta sus estudios de PhD en UPB con la asesoría de Univ. of Kempten, Alemania. Ha trabajado en multiples proyectos industriales.

Gabriel J. Lopez

Ingeniero Electricista y MSc en 2002 y 2007 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Asistente de medio tiempo e Investigador en la Facultad de IEE desde 2004. Trabajó para HMV Ingenieros y actualmente es Consultor en Unión Eléctrica Ltda..

SOBRE LOS AUTORES

Santiago Maya S.

Estudiante egresado no graduado de ingeniería Eléctrica Universidad Pontificia Bolivariana, asistente del grupo de investigación en transmisión y distribución de energía eléctrica.

Jorge W. Gonzalez

Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional en 1992 y MSc - PhD. en 2003 y 2006 respectivamente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE desde 1997. Trabajó ocho años para HMV