

NUEVO ÍNDICE DE DESEMPEÑO PARA EL CONTROL SECUNDARIO DE FRECUENCIA

Eddie Araya Padilla

Resumen

Esta publicación aborda el problema de la regulación secundaria de frecuencia, de un sistema eléctrico de potencia, débilmente interconectado. Con esta finalidad, se propone un nuevo índice de desempeño, a partir de la teoría del control óptimo. Para tal fin, se consideran tres diferentes tipos de sistemas de potencia (térmicos, hidrotérmicos e hidráulicos), cuyas áreas eléctricas se encuentra débilmente vinculadas. Como criterio de análisis, el parámetro de frecuencia de cada área, es valorado después de una pequeña perturbación, para tres casos de estudio. El primer caso, considera al sistema de potencia sin regulación. En el segundo caso, se considera un índice de desempeño cuadrático tradicional, que depende de las variables de estado y de las señales de control. Finalmente, en el tercer caso, se propone un nuevo índice de desempeño cuadrático, que depende solamente de las señales de control. Los resultados obtenidos en el dominio del tiempo, son satisfactorios y efectivos, al compararse con el desempeño de un regulador cuadrático lineal tradicional. La metodología propuesta, puede aplicarse al sistema de potencia centroamericano, porque se encuentra débilmente interconectado y es análogo a los modelos analizados.

Palabras clave: control automático de generación, regulación de frecuencia, control óptimo lineal, sistemas eléctricos de potencia.

Abstract

This paper deals with the problem of Secondary Frequency Control of weakly interconnected power systems. For this end, a new performance index based on Optimal Control Theory is proposed. Three different power systems are considered (thermal, hydro-thermal and hydro plants based systems). Here, the electrical areas are weakly linked. For analysis purposes, the frequency on each area is evaluated after being subjected to a small disturbance, considering three study cases. The first case considers a power system without regulation. In the second case, a traditional quadratic performance index is considered. The latter depends on state variables and control signals. Finally, a new quadratic performance index depending only on control signals is proposed. The results obtained from time domain simulations are satisfactory and effective, when comparing the results against the performance from a traditional linear-quadratic regulator. The proposed methodology can be applied to the Central American power system, as it is weakly meshed and it is similar to the analyzed cases.

Keywords: Automatic Generation Control, frequency regulation, optimal linear control, electrical power systems.

Recibido: 26 de Enero de 2015 **Aprobado:** 15 de Octubre de 2015



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia, satisfacen la demanda eléctrica con reducidos márgenes de operación, debido a las restricciones ambientales y económicas, impuestas sobre los nuevos sistemas de transmisión. Dichas condiciones operativas conducen a situaciones críticas de estabilidad y control, que en los últimos años, han dado origen a colapsos en los sistemas de potencia robustos de Brasil en 1999 y en el 2002 (Gomez, Sequeira & Guarini, 2004), Irán en el 2001 y en el 2002 (Sanaye-Pasand, 2007), Estados Unidos y Canadá en el 2003 (Andersson et al., 2005), Suecia y Dinamarca en el 2003 (Andersson et al., 2005), Italia en el 2003 (Andersson et al., 2005), Rusia en el 2005 (Makarov, Reshetov & Stroeve, 2005), e India en el 2012 (Romero, 2012), entre otros.

De forma similar, los problemas de tensión y frecuencia se han manifestado en sistemas de potencia débilmente interconectados, así como en sistemas de potencia caracterizados por un limitado número de líneas de transmisión, baja capacidad de cortocircuito y una densidad no uniforme de carga, cuya topología es similar a la indicada en la Figura 1 y que corresponden a los llamados sistemas de potencia longitudinales (SPL) (Aboytes & Arroyo, 1986).

El problema de la frecuencia depende del balance de la potencia activa en la red eléctrica, y está motivado por las variaciones de la demanda y por las reacciones de los reguladores de velocidad de las unidades generadoras. Dicha problemática se ha manifestado en el sistema de potencia de Hungría (Vajk et al., 1985), y actualmente es un tema de mucho interés en Chile (Moya & Ramos,

2008), Corea del Sur (Kook, Liu & Bang, 2008), Nigeria (Vanfretti, Aliyu, Chow & Momoh, 2009) y Turquía (Lobato, Egido & Rouco, 2012).

En el ámbito centroamericano, desde la década de los noventa (Mota, 1994) se había puntualizado esta problemática producto de la topología longitudinal y de la futura entrada en operación del Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central (SIEPAC), en donde las líneas de interconexión entre los países del istmo tienen una capacidad de transporte de potencia reducida, al compararse con la potencia instalada en cada uno de los países del área.

En el caso nacional, Costa Rica no es inmune a este fenómeno; ya que estas variaciones de carga provocan desviaciones de la frecuencia nominal, que dan como resultado un impacto directo sobre la calidad del servicio eléctrico (Autoridad Reguladora De Los Servicios Públicos, 2001). Ante esta situación, el artículo 2.2 de Autoridad Reguladora De Los Servicios Públicos (ARESEP, 2001) establece que la frecuencia nominal del Sistema Nacional Interconectado será 60 Hertz \pm 0.5 %; lo cual corresponde a una desviación de 0.3 Hertz de su valor nominal.

Para eliminar estas desviaciones de frecuencia, los sistemas eléctricos disponen de un control carga - frecuencia (primaria y secundaria) que forma parte del control automático de generación. En este sistema de control, la regulación primaria de frecuencia es la encargada de estabilizar la caída de la frecuencia en el sistema, dando como resultado un error en régimen permanente con respecto a su valor nominal. Luego, a partir de este error de frecuencia, entra en operación la regulación secundaria de frecuencia, que logra estabilizar

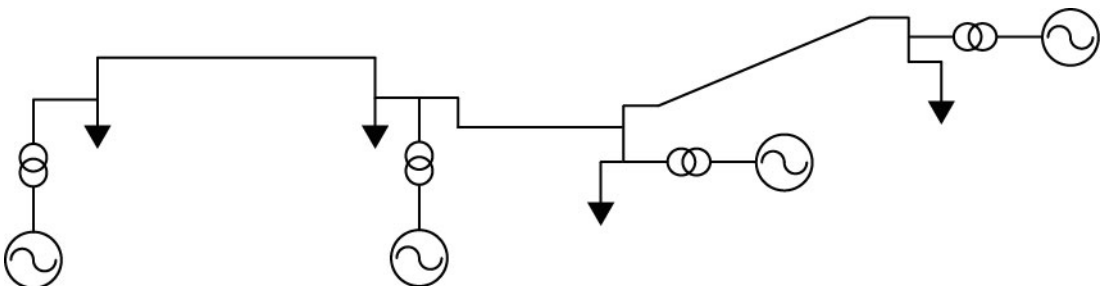


Figura 1. Topología longitudinal de un sistema eléctrico de potencia, similar al centroamericano

la frecuencia del sistema (Ibraheem, Kumar & Kothari, 2005); dando como resultado una disminución sustantiva del error de frecuencia. En este caso, la regulación secundaria de frecuencia inicia 30 segundos después de la falla y actúa hasta los 12 ó 15 minutos de la misma (Sáiz-Marín, García-González, Barquín & Lobato, 2012).

Para lograr anular la desviación de frecuencia, el diseño y desempeño del control secundario de frecuencia depende de la respuesta de las unidades generadoras y puede variar ampliamente, según los siguientes factores (Jaleeli, VanSlyck, Ewart, Fink & Hoffmann, 1992):

- El tipo de unidad: hidráulica, térmica, nuclear
- El tipo de combustible: carbón, agua, uranio
- El tipo de control

Ante tal esquema de factores, el artículo de Shayeghi, Shayanfar & Jalili (2009) establece el estado del arte en las estrategias del control carga – frecuencia, denotando que dentro los métodos de control clásicos, la teoría del control óptimo es una alternativa a considerar. Sin embargo, el enfoque de esta propuesta tiene la limitación técnica de que para resolver la ecuación matricial de Riccati es necesario el conocimiento por parte del operador del centro de control de energía, para definir una matriz de peso del modelo matemático que representa físicamente la dinámica del sistema de potencia.

A partir del año 2009 nuevas publicaciones hacen uso del control óptimo lineal aplicado al control secundario de frecuencia. No obstante, las contribuciones de Parmar, Majhi & Kothari(2010, 2012) y Alrifai, Hassan, Zribi (2011), o incluso la actualización de la temática en Pandey, Mohanty & Kishor(2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), Dehghanpour & Afsharnia (2015), no resuelven el problema original, ya que se utiliza la correspondiente matriz de peso. De esta forma, el problema latente, inicialmente establecido en las publicaciones de Elgerd & Fosha (1970) y Fosha & Elgerd (1970) aún sigue sin resolverse.

En vista de lo anterior, en esta publicación se propone un nuevo control secundario de frecuencia, a partir de un nuevo índice de desempeño, el cual no utiliza la matriz de peso (establecida por el operador del sistema) y que responde a criterios de optimización.

2. DISEÑO DEL NUEVO CONTROL SECUNDARIO DE FRECUENCIA

Para resolver el problema de la regulación de frecuencia, de un sistema eléctrico de potencia, en esta sección se expone el formalismo matemático, que sustenta dicho objetivo.

Considérese un sistema controlable invariante en el tiempo, modelado en variables de estado como:

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (1)$$

Donde X y U son el vector de estado y el de control, respectivamente. A y B son matrices constantes de dimensiones apropiadas

A partir de la teoría del control óptimo lineal (Ogata, 2009), se establece que el vector de control se obtiene de la expresión:

$$\Delta U = -F\Delta X \quad (2)$$

Donde F es la matriz del lazo de realimentación de Ecuación (1), la cual se calcula con el criterio de minimizar el índice cuadrático tradicional, definido por:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) \cdot dt \quad (3)$$

Este índice representa el gasto de energía de las funciones del tiempo $x_i(t)$ y $u_j(t)$ para $i=1, 2, \dots, m$. Las matrices Q y R, que en principio son desconocidas, se denominan matrices de peso.

Reemplazando Ecuación (2) en Ecuación (1), surge la expresión para el sistema operando a lazo cerrado:

$$\Delta \dot{X} = (A - BF)\Delta X \quad (4)$$

Ahora bien, con la finalidad de estabilizar el sistema ante una perturbación, los autovalores de la matriz A-BF, denotados por L(A-BF), se deberán localizar en el semiplano izquierdo del plano complejo s.

Por otro lado, la teoría del control óptimo lineal (Ogata, 2009) muestra también que si la ganancia F del lazo de realimentación Ecuación (2) surge de la expresión:

$$F = R^{-1}B^T P \quad (5)$$

En donde P es una matriz simétrica definida positiva, que se obtiene resolviendo la ecuación matricial algebraica de Riccati (Ogata, 2009) presentada a continuación:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

Entonces, efectivamente todos los autovalores de la matriz $(A-BF)$, se ubican en el semiplano izquierdo del plano complejo. Este procedimiento en la mayoría de los casos, mantiene prácticamente inalteradas las frecuencias propias de oscilación del sistema.

Para calcular la matriz incógnita P se conocen en Ecuación (6) las matrices, A , A^T , B y B^T de Ecuación (1) y deben suponerse valores para los elementos de las matrices Q y R .

La acción de coordinación de las señales de control u_j surge de la expresión Ecuación (2). En efecto, observando esta expresión, se ve que cada señal de control u_j es obtenida combinando información del estado de todo el sistema (vector ΔX), mediante la correspondiente fila de la matriz F .

En la práctica del diseño de los sistemas óptimos lineales, la matriz F se calcula aproximadamente asignando valores a las matrices de peso, acorde al razonamiento físico, es decir, por prueba y error, hasta lograr los efectos deseados. Ahora bien, para el caso de sistemas de varias variables, resulta muy complicado asignar valores a todos los elementos de las matrices Q y R (Elgerd & Fosha, 1970; Fosha & Elgerd, 1970).

En vista de lo anterior, en esta publicación se propone como criterio de desempeño, minimizar el nuevo índice cuadrático de funcionamiento propuesto y definido por:

$$\tilde{J} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (U^T R U) \cdot dt \quad (7)$$

Para tal efecto, la matriz R se define como la matriz identidad, con lo cual se asigna igual peso a las señales de control y se logra que cada una

de ellas actúe en forma independiente. Además, se aplica el enfoque propuesto en (Koshkouei & Zinober, 1999), con la finalidad de coordinar los dispositivos del control secundario de frecuencia.

Con este enfoque se reubican los autovalores λ_1 a λ_m del sistema de lazo abierto, en el semiplano izquierdo, del plano complejo s , a una distancia $h_1 \geq 0$ del origen de coordenadas, manteniendo inalterados los autovalores λ_{m+1} a λ_n ubicados inicialmente en el semiplano izquierdo, del plano complejo s . El valor h_1 representa el grado deseado de estabilidad del sistema eléctrico. Para lograr la reubicación de autovalores, la matriz F del lazo de realimentación en Ecuación (5) se modifica como:

$$\tilde{F} = R^{-1}B^T \tilde{P} \quad (8)$$

Con lo cual la matriz del sistema a lazo cerrado en la Ecuación (4), denominada ahora A_C , resulta:

$$A_C = A - BR^{-1}B^T \tilde{P} \quad (9)$$

La matriz \tilde{P} se obtiene resolviendo la ecuación matricial de Riccati modificada en Ecuación (10):

$$(A + h_1 I_n)^T \tilde{P} + \tilde{P} (A + h_1 I_n) - \tilde{P} B R^{-1} B^T \tilde{P} = 0 \quad (10)$$

En la cual puede verse que no interviene la matriz de peso Q .

La acción de control instrumentada con las Ecuaciones (8) - (10), logra modificar las componentes reales de los autovalores λ_1 a λ_m del sistema eléctrico a lazo abierto (matriz A en Ecuación (1)) llevándolas a posiciones ubicadas a la izquierda de la línea vertical (h_1). Sin embargo, como existen restricciones físicas sobre los parámetros reales (constantes de tiempo y ganancias de los dispositivos de control), debe limitarse la ubicación de los autovalores λ_1 a λ_m a una región definida en el semiplano izquierdo, del plano complejo s .

Suponiendo que h_1 y h_2 son dos valores reales positivos ($h_2 > h_1$) que definen una franja vertical $(-h_2, -h_1)$ de espesor $(h_2 - h_1)$, y siendo la matriz $\tilde{A} = A + h_1 I_n$, entonces para lograr este propósito, la ley de control debe modificarse a (Koshkouei & Zinober, 1999):

$$\Delta U = -\rho \cdot \tilde{F} \Delta X \tag{11}$$

Donde la ganancia del lazo cerrado de retroalimentación \tilde{F} , surge de la Ecuación (8) y la matriz \tilde{P} es la solución de la ecuación de Riccati modificada, que coincide con la Ecuación (10), en la forma:

$$\tilde{A}^T \tilde{P} + \tilde{P} \tilde{A} - \tilde{P} B R^{-1} B^T \tilde{P} = 0 \tag{12}$$

Y que de acuerdo a (Koshkouei & Zinober, 1999), la ganancia ρ esta dada por la expresión:

$$\rho = \frac{1}{2} + (h_2 - h_1) / 2tr \quad (\tilde{A}) = \frac{1}{2} + (h_2 - h_1) / 2tr \quad (B\tilde{F}) \tag{13}$$

Siendo

$$tr(\tilde{A}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i = \frac{1}{2} tr(B\tilde{F}) \quad \text{y} \quad \lambda_i (i=1, \dots, m)$$

los autovalores (complejos conjugados) de \tilde{A} , ubicados en el semiplano derecho del plano complejo s . De este modo, el sistema óptimo de lazo cerrado es en consecuencia:

$$\Delta \dot{X} = (A - \rho B \tilde{F}) \Delta X \tag{14}$$

Donde \tilde{F} es la matriz del lazo de realimentación de la Ecuación (1).

3. MODELO DEL SISTEMA DE POTENCIA

En general, de acuerdo a Elgerd (1983) y Kundur (2008), el modelo adecuado para el análisis del control secundario de frecuencia, de un sistema de potencia de dos áreas, corresponde al diagrama de bloques de la Figura 2. En este modelo, se consideran unidades de generación térmica e hidráulica en donde los modelos linealizados de los reguladores de velocidad de las turbinas son tomados de IEEE (1973; 1992; 1994).

En la Figura 2, las funciones de transferencia de la turbina de cada área corresponden al regulador de velocidad y a la turbina propiamente dicha de los sistemas de potencia que se quieren analizar. Dichas funciones de transferencia, corresponden a:

- $\frac{1}{1+sT_g}$: función de transferencia del regulador de velocidad
- $\frac{1}{1+sT_t}$: función de transferencia de la turbina térmica no recalentada
- $\frac{1-sT_w}{1+0.5sT_w}$: función de transferencia de la turbina hidráulica

A partir de la Figura 2, se pueden construir diferentes sistemas de potencia según el modelo

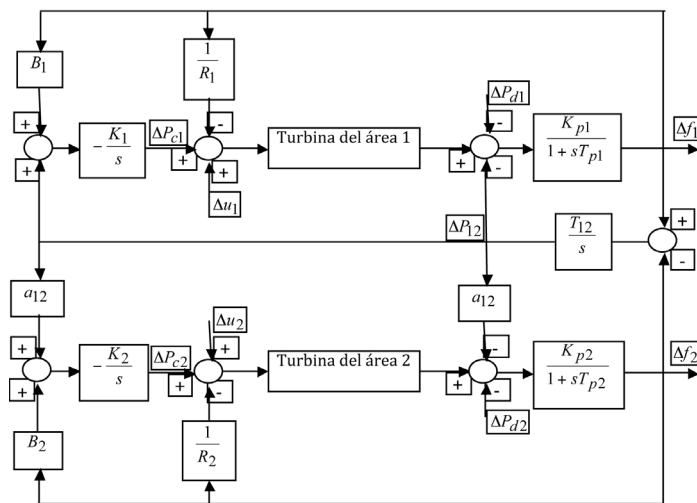


Figura 2. Diagrama del control carga – frecuencia, de un sistema de potencia de dos áreas.
 Nota: Adaptado de O. I. Elgerd en *Electric energy system theory: an introduction*, New York: McGraw-Hill; 1983; y P. Kundur en *Power system stability and control*. New York: McGraw Hill; 2008.

de la turbina y los parámetros del sistema. Para tal efecto, se consideran diversos modelos en la turbina, que dan origen a los tres sistemas diferentes a saber: térmico, hidrotérmico e hidráulico.

3.1 Sistema térmico

En este sistema, se consideran dos sistemas de potencia, constituidos por turbinas térmicas no recalentadas. Este sistema corresponde al análisis clásico, inicialmente propuesto por Elgerd & Fosha (1970); Fosha & Elgerd (1970), y que

servirá como criterio de comparación, cuando se contraste con el desempeño del nuevo control secundario de frecuencia.

Para dicho sistema, la dinámica de interés puede representarse mediante el modelo en variables de estado, indicado por la Ecuación (15) y cuyo significado de dichas variables, se encuentra en la sección de simbología.

$$\begin{aligned}\Delta \dot{X} &= A\Delta X + B\Delta U + T\Delta P_d \\ \Delta Y &= C\Delta X\end{aligned}\quad (15)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\Delta X &= \begin{bmatrix} \Delta f_1 & \Delta P_{r1} & \Delta P_{g1} & \Delta P_{c1} & \Delta P_{12} & \Delta f_2 & \Delta P_{r2} & \Delta P_{g2} & \Delta P_{c2} \end{bmatrix} \\ \Delta U &= \begin{bmatrix} \Delta u_1 & \Delta u_2 \end{bmatrix}^T \\ \Delta P_d &= \begin{bmatrix} \Delta P_{d1} & \Delta P_{d2} \end{bmatrix}^T \\ \Delta Y &= \begin{bmatrix} \Delta f_1 & \Delta f_2 \end{bmatrix}^T \\ A &= \begin{bmatrix} -1/T_{p1} & K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 & -K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{r1} & 1/T_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/(T_{g1}R_1) & 0 & -1/T_{g1} & 1/T_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1B_1 & 0 & 0 & 0 & -K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_{p2}/T_{p2} & -1/T_{p2} & K_{p2}/T_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{r2} & 1/T_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(T_{g2}R_2) & 0 & -1/T_{g2} & 1/T_{g2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_2 & -K_2B_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/T_{g1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/T_{g2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ T &= \begin{bmatrix} -K_{p1}/T_{p1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_{p2}/T_{p2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

3.2 Sistema hidrotérmico.

Para este sistema, se considera que los sistemas de potencia son diferentes y representan un sistema con turbinas térmicas no recalentadas, y otro con turbinas hidráulicas. En este caso, la dinámica de interés puede representarse, mediante el modelo en variables de estado indicado por la

Ecuación (16), y el significado de las variables, se encuentra en la sección de simbología.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A\Delta X + B\Delta U + T\Delta P_d \\ \Delta Y &= C\Delta X \end{aligned} \tag{16}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \left[\Delta f_1 \quad \Delta P_{r1} \quad \Delta P_{g1} \quad \Delta P_{c1} \quad \Delta P_{12} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{h2} \quad \Delta P_{gv2} \quad \Delta P_{gh2} \quad \Delta P_{c2} \right]^T \\ \Delta U &= \left[\Delta u_1 \quad \Delta u_2 \right]^T \\ \Delta P_d &= \left[\Delta P_{d1} \quad \Delta P_{d2} \right]^T \\ \Delta Y &= \left[\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \right]^T \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} & & -K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & -K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_{p2}/T_{p2} & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & A_2 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_2 & & & & & \end{bmatrix} \quad A_1 = \begin{bmatrix} -1/T_{p1} & K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{r1} & 1/T_{r1} & 0 \\ -1/(T_{g1}R_1) & 0 & -1/T_{g1} & 1/T_{g1} \\ -K_1B_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1/T_{p2} & K_{p2}/T_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ T_{gv2}/(2T_{r2}T_{gh2}R_2) & -1/T_{w2} & (1/T_{w2} + 1/2T_{r2}) & 1/2T_{r2}(T_{gv2}/T_{gh2} - 1) & -T_{gv2}/2T_{r2}T_{gh2} \\ -T_{gv2}/(T_{r2}T_{gh2}R_2) & 0 & -1/T_{r2} & 1/T_{r2}(1 - T_{gv2}/T_{gh2}) & T_{gv2}/(T_{r2}T_{gh2}) \\ -1/(T_{gh2}R_2) & 0 & 0 & -1/T_{gh2} & 1/T_{gh2} \\ -K_2B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/T_{g1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -T_{gv2}/(2T_{gh2}R_2) \\ 0 & T_{gv2}/(T_{gh2}R_2) \\ 0 & 1/T_{gh2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad T = \begin{bmatrix} -K_{p1}/T_{p1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_{p2}/T_{p2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3 Sistema hidráulico.

Finalmente, se consideran dos sistemas de potencia, constituidos por turbinas hidráulicas. En este caso, la dinámica de interés puede representarse, mediante el modelo en variables de estado de la Ecuación (17), y el significado

de las variables, se encuentra en la sección de simbología.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A\Delta X + B\Delta U + T\Delta P_d \\ \Delta Y &= C\Delta X \end{aligned} \tag{17}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \left[\Delta f_1 \quad \Delta P_{h1} \quad \Delta P_{gv1} \quad \Delta P_{gh1} \quad \Delta P_{c1} \quad \Delta P_{12} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{h2} \quad \Delta P_{gv2} \quad \Delta P_{gh2} \quad \Delta P_{c2} \right]^T \\ \Delta U &= \left[\Delta u_1 \quad \Delta u_2 \right]^T \\ \Delta P_d &= \left[\Delta P_{d1} \quad \Delta P_{d2} \right]^T \\ \Delta Y &= \left[\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \right]^T \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} & & -K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & -K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_{p2}/T_{p2} & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & A_4 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12}K_2 & & & & & \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -1/T_{p1} & K_{p1}/T_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ T_{gv1}/(2T_{r1}T_{gh1}R_1) & -1/T_{w1} \left(1/T_{w1} + 1/2T_{r1} \right) & 1/2T_{r1} \left(T_{gv1}/T_{gh1} - 1 \right) & -T_{gv1}/2T_{r1}T_{gh1} \\ -T_{gv1}/(T_{r1}T_{gh1}R_1) & 0 & -1/T_{r1} & 1/T_{r1} \left(1 - T_{gv1}/T_{gh1} \right) & T_{gv1}/(T_{r1}T_{gh1}) \\ -1/(T_{gh1}R_1) & 0 & 0 & -1/T_{gh1} & 1/T_{gh1} \\ -K_1B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -1/T_{p2} & K_{p2}/T_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ T_{gv2}/(2T_{r2}T_{gh2}R_2) & -1/T_{w2} \left(1/T_{w2} + 1/2T_{r2} \right) & 1/2T_{r2} \left(T_{gv2}/T_{gh2} - 1 \right) & -T_{gv2}/2T_{r2}T_{gh2} \\ -T_{gv2}/(T_{r2}T_{gh2}R_2) & 0 & -1/T_{r2} & 1/T_{r2} \left(1 - T_{gv2}/T_{gh2} \right) & T_{gv2}/(T_{r2}T_{gh2}) \\ -1/(T_{gh2}R_2) & 0 & 0 & -1/T_{gh2} & 1/T_{gh2} \\ -K_2B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -T_{gv1}/(2T_{gh1}R_1) & 0 \\ T_{gv1}/(T_{gh1}R_1) & 0 \\ 1/T_{gh1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -T_{gv2}/(2T_{gh2}R_2) \\ 0 & T_{gv2}/(T_{gh2}R_2) \\ 0 & 1/T_{gh2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad T = \begin{bmatrix} -K_{p1}/T_{p1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_{p2}/T_{p2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de comprobar la efectividad del nuevo control secundario de frecuencia a continuación se analiza la respuesta dinámica de cada sistema de potencia, efectuando las simulaciones desde que se presenta la perturbación hasta los 120 segundos. De esta forma, se logra la participación de la regulación secundaria de frecuencia, que de acuerdo a Sáiz-Marín, García-González, Barquín & Lobato (2012), inicia 30 segundos después de la falla, y actúa hasta los 12 ó 15 minutos de la misma.

Para tal efecto, los modelos térmico, hidrotérmico e hidráulico serán simulados bajo los siguientes escenarios:

- Sistema de potencia sin regulación. Esto tiene como propósito, establecer el comportamiento natural del sistema de potencia, y a partir del cual, se valora la efectividad de los esquemas de control aplicados.
- Sistema de potencia con un regulador cuadrático lineal tradicional. En este caso, el índice de desempeño del sistema de control, estaría dado por la Ecuación (3).
- Sistema de potencia con el regulador cuadrático lineal propuesto. Para esta situación, el índice de desempeño del sistema de control, estaría dado por la Ecuación (7).

4.1 Sistema térmico.

En este caso, para evaluar la desviación de la frecuencia de cada sistema de potencia, se aplica un incremento de un 0.01 p.u., en la demanda del área 1. Ante esta perturbación las Figuras 3, 4 y 5 muestran las desviaciones de frecuencia obtenidas, según los escenarios simulados.

Para llevar a cabo las simulaciones, los datos del sistema térmico son tomados de Yang, Ding & Yu (2002), y se indican a continuación:

$$T_{r1} = T_{r2} = 0.3 \cdot s$$

$$K_{p1} = K_{p2} = 120 \cdot Hz / puMW$$

$$R_1 = R_2 = 2.4 \cdot Hz / puMW$$

$$T_{g1} = T_{g2} = 0.08 \cdot s \quad T_{p1} = T_{p2} = 20 \cdot s$$

$$T_{12} = 0.545 \cdot puMW \quad a_{12} = -1$$

$$B_1 = B_2 = 0.425 \cdot puMW / Hz \quad K_1 = K_2 = 1$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación (15), se obtiene que:

$$A = \begin{bmatrix} -0.05 & 6.0 & 0 & 0 & -6.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.33 & 3.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2083 & 0 & -12.5 & 12.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.425 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.545 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.545 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.0 & -0.05 & 6.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.33 & 3.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.2083 & 0 & -12.5 & 12.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.425 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 12.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 12.5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad T = \begin{bmatrix} -6.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -6.0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

I. Primer escenario: sistema de potencia sin regulación.

Tal como lo muestra la Figura 3, el modelo no cuenta con un sistema de regulación de frecuencia. En este caso, la perturbación se aplica en el área 1 y la frecuencia de dicha área alcanza su máxima desviación en menos de 1 segundo. Poco tiempo después, el área 2 también alcanza su máxima desviación de frecuencia. Por otro lado, debido a que los parámetros de cada área son iguales, a partir de los 7 segundos las desviaciones de frecuencia de cada área tienen la misma amplitud pero se encuentran desfasadas 180 grados. Dicho comportamiento se mantiene igual, durante el tiempo de simulación restante, con la salvedad de que la desviación de frecuencia decae lentamente. Este comportamiento ya ha sido documentado en Ibraheem, Kumar & Kothari (2005), y es precisamente lo que se quiere corregir, con el control secundario de frecuencia propuesto.

II. Segundo escenario: sistema de potencia con regulación tradicional.

Como se observa en la Figura 4, el sistema de potencia tiene un regulador cuadrático lineal tradicional donde participan las variables de estado y las señales de control. Nuevamente la perturbación se aplica en el área 1 y la frecuencia de dicha área alcanza su máxima desviación aproximadamente a los 0.5 segundos. En ambas áreas, las máximas desviaciones de frecuencia son inferiores a las reportadas en la Figura 3. Por otro lado, aún cuando los parámetros de cada

área son iguales, inicialmente, las desviaciones de frecuencia no son simétricas debido a que las respuestas de los reguladores de velocidad de cada área están desfasadas en el tiempo. Sin embargo, nótese que dichas desviaciones de frecuencia se amortiguan en forma exponencial y decaen completamente a partir de los 10 segundos.

La respuesta obtenida en la Figura 4 contempla que las matrices R y Q están definidas como matrices identidad en la Ecuación (6), y a partir de la Ecuación (2) se obtienen las expresiones (18 y 19), para la señal de control de cada área eléctrica.

De las Ecuaciones (18) ó (19), se observa que el controlador de cada área es una función de las variables de estado de ambas áreas. Además, el controlador del área 1 depende débilmente de la información recibida del área 2, y viceversa para el controlador 2 y el área 1. De esta forma, los controles de cada área esencialmente no interactúan.

III. Tercer escenario: sistema de potencia con el regulador propuesto.

En el caso de utilizar el regulador propuesto, las desviaciones de frecuencia alcanzan sus valores máximos antes de los dos segundos, para la misma perturbación de 0.01 p.u. en la demanda del área 1. A partir de ese punto de operación se obtiene una sobrelongación en la desviación de frecuencia del área 1, la cual es amortiguada antes de los 5 segundos. De esta forma, el regulador propuesto (Figura 5), permite obtener un mejor desempeño que el regulador tradicional (Figura 4).

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -0.3794\Delta f_1 - 0.7638\Delta P_{t1} - 0.1971\Delta P_{g1} + 0.2859\Delta P_{c1} + 0.7518\Delta P_{t2} \\ & + 0.1788\Delta f_2 + 0.3105\Delta P_{t2} + 0.0740\Delta P_{g2} - 0.0149\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & 0.1788\Delta f_1 + 0.3105\Delta P_{t1} + 0.0740\Delta P_{g1} - 0.0149\Delta P_{c1} - 0.7518\Delta P_{t2} \\ & - 0.3794\Delta f_2 - 0.7638\Delta P_{t2} - 0.1971\Delta P_{g2} + 0.2859\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (19)$$

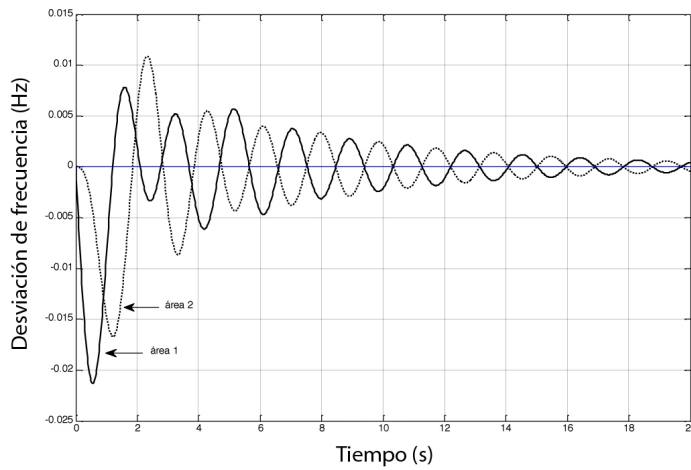


Figura 3. Desviaciones de frecuencia en el sistema térmico, sin regulación.

Nota: Línea continua, desviación de frecuencia del área 1. Línea discontinua, desviación de frecuencia del área 2.

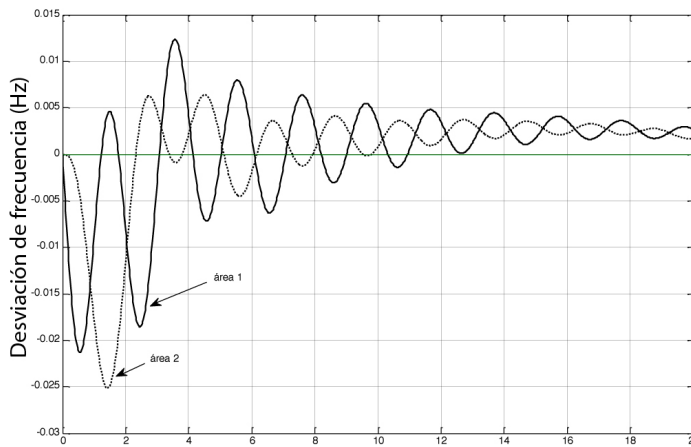


Figura 4. Desviaciones de frecuencia en el sistema térmico, con el regulador tradicional.

Nota: Línea continua: desviación de frecuencia del área 1. Línea discontinua: desviación de frecuencia del área 2.

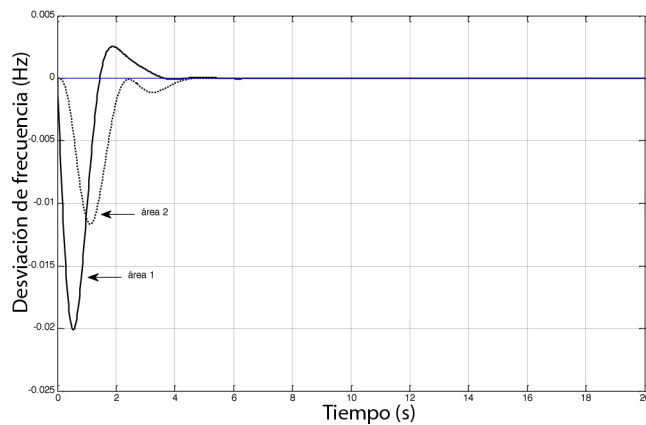


Figura 5. Desviaciones de frecuencia en el sistema térmico, con el regulador propuesto.

Nota: Línea continua: desviación de frecuencia del área 1. Línea discontinua: desviación de frecuencia del área 2.

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -0.3794\Delta f_1 - 0.7638\Delta P_{t1} - 0.1971\Delta P_{g1} + 0.2859\Delta P_{c1} + 0.7518\Delta P_{12} \\ & + 0.1788\Delta f_2 + 0.3105\Delta P_{t2} + 0.0740\Delta P_{g2} - 0.0149\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & 0.1788\Delta f_1 + 0.3105\Delta P_{t1} + 0.0740\Delta P_{g1} - 0.0149\Delta P_{c1} - 0.7518\Delta P_{12} \\ & - 0.3794\Delta f_2 - 0.7638\Delta P_{t2} - 0.1971\Delta P_{g2} + 0.2859\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (21)$$

Al utilizar el regulador propuesto, y al estar definida la matriz R, como la matriz identidad en la Ecuación (12), se obtienen las siguientes expresiones para la señal de control de cada área, por medio de la Ecuación (11).

Nuevamente a partir de las Ecuaciones (20) ó (21) se observa que el controlador de cada área es una función de las variables de estado de ambas áreas. Una vez más, el controlador del área 1 depende débilmente de la información recibida del área 2, y viceversa para el controlador 2 y el área 1. Por otro lado, los coeficientes que acompañan a cada variable de estado en las Ecuaciones (20) ó (21), tienen una magnitud diferente a los correspondientes en las Ecuaciones (18) ó (19), respectivamente. Sin embargo, con el regulador propuesto se da un mayor peso al intercambio de potencia entre las áreas.

De esta forma, la hipótesis planteada para el nuevo índice de desempeño propuesto, del control secundario de frecuencia para el sistema térmico, es demostrada plenamente a través de la simulación obtenida en la Figura 5; y además se comprueba que no se necesita la matriz de peso Q, tal como sí sucede en Parmar, Majhi & Kothari(2010, 2012), Alrifai, Hassan & Zribi (2011), Pandey, Mohanty & Kishor(2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), y Dehghanpour & Afsharnia (2015).

4.2 Sistema hidrotérmico.

En este sistema simulado el área 1 representa un sistema térmico y el área 2 un sistema hidráulico. Se aplica un escalón de demanda de 0.01 p.u. en el área 1, con el propósito de valorar las desviaciones de frecuencia en cada sistema. Ante esta perturbación, las Figuras 6, 7 y 8 muestran las desviaciones de frecuencia obtenidas, según los escenarios simulados.

Con el objetivo de lograr lo anterior, para este sistema hidrotérmico los siguientes datos son tomados de Parmar, Majhi & Kothari(2010):

$$T_{t1} = 0.3 \cdot s \quad T_{g1} = 0.08 \cdot s \quad T_{gh2} = 48.7 \cdot s$$

$$T_{gv2} = 0.513 \cdot s \quad T_{r2} = 5 \cdot s \quad T_{w2} = 1 \cdot s$$

$$T_{p1} = T_{p2} = 20 \cdot s \quad K_{p1} = K_{p2} = 120 \cdot Hz / puMW$$

$$T_{12} = 0.545 \cdot puMW \quad a_{12} = -1$$

$$R_1 = R_2 = 2.4 \cdot Hz / puMW$$

$$B_1 = B_2 = 0.425 \cdot puMW / Hz \quad K_1 = K_2 = 1$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación (16), se obtiene que:

$$A = \begin{bmatrix} -0.05 & 6.0 & 0 & 0 & -6.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.33 & 3.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2083 & 0 & -12.5 & 12.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.425 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.545 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.545 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.0 & -0.05 & 6.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00044 & -1 & 1.1 & -0.09895 & -0.00105 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.00088 & 0 & -0.2 & 0.19789 & 0.00211 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.00856 & 0 & 0 & -0.02053 & 0.02053 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.425 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 12.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.00219 \\ 0 & 0.00439 \\ 0 & 0.02053 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad T = \begin{bmatrix} -6.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -6.0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

I. Primer escenario: sistema de potencia sin regulación.

Al igual que en los casos anteriores, en la Figura 6 se muestran las desviaciones de frecuencia en cada sistema eléctrico, al aplicarse un incremento de 0.01 p.u., en la demanda del área térmica. Nuevamente, los valores máximos se alcanzan antes de los 2 segundos y a partir de los 3 segundos, estas desviaciones están desfasadas aproximadamente 180 grados. Por otro lado, dichas desviaciones se amortiguan lentamente en forma exponencial, alrededor de los 20 segundos; pero al final del tiempo de simulación (120 segundos) se observa que el sistema es inestable.

II. Segundo escenario: sistema de potencia con regulación tradicional.

En la Figura 7, al aplicar la misma perturbación de 0.01 p.u. en la demanda del área térmica, las desviaciones de frecuencia que se producen son menores para ambas áreas y se eliminan completamente a partir de los 7 segundos, debido a la participación del regulador tradicional. En este caso, las máximas desviaciones se manifiestan antes de los 2 segundos y tienen menores amplitudes, al compararse con el caso no regulado (Figura 6).

Una vez más, para el regulador tradicional las matrices R y Q están definidas como matrices identidad en la Ecuación (6), y a partir de la Ecuación (2) se obtienen las siguientes expresiones para la señal de control de cada área eléctrica:

De las Ecuaciones (22) ó (23), se observa que el controlador de cada área es una función de las variables de estado de ambas áreas. Además, el controlador del área 1 depende de la información recibida del área 2, y viceversa para el controlador 2 y el área 1. De esta forma, los controles en cada área, prácticamente interactúan.

III. Tercer escenario: sistema de potencia con el regulador propuesto.

En la Figura 8 se muestra el desempeño obtenido con el control propuesto al aplicarse la misma perturbación de 0.01 p.u., en la potencia de demanda del sistema térmico. En este caso, se observa como las máximas desviaciones de frecuencia tienen una menor magnitud a las registradas en el caso anterior (Figura 7). Por otro lado, dichas desviaciones se desvanecen aproximadamente a los 6 segundos de simulación.

El desempeño obtenido con el regulador propuesto, se debe a que la matriz R esta defina como una matriz identidad en la Ecuación (12), dando origen a las siguientes expresiones para la señal de control de cada área a través de la Ecuación (11).

Una vez más, en las ecuaciones (24) ó (25) se observa que el controlador de cada área es una función de las variables de estado de ambas áreas, donde los controles de cada sistema interactúan de forma diferente. Por otro lado, de los coeficientes que acompañan a cada variable de estado se observa que tiene mayor peso el intercambio de potencia para el control del área hidráulica que para el control del área térmica.

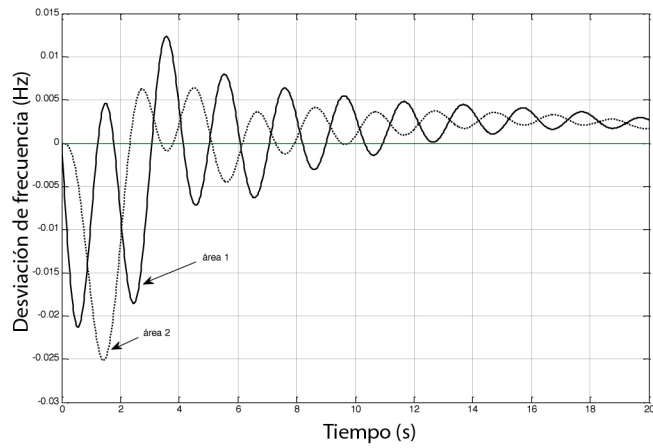


Figura 6. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidrotérmico, sin regulación.

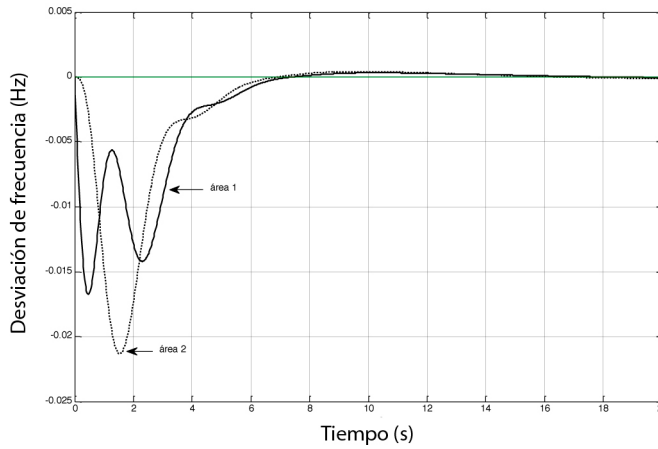


Figura 7. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidrotérmico, con el regulador tradicional.

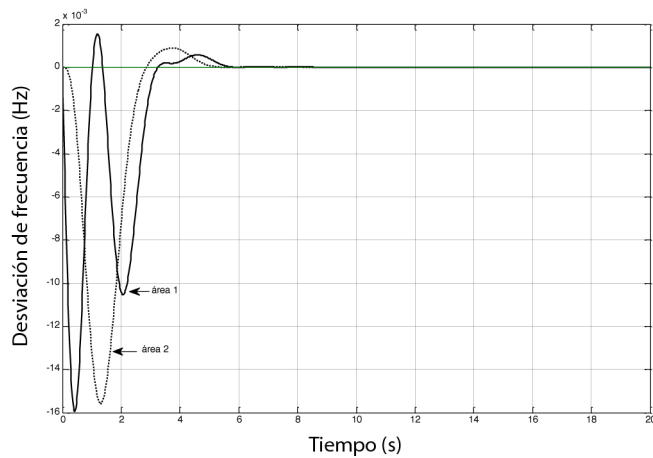


Figura 8. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidrotérmico, con el regulador propuesto.

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -1.3011\Delta f_1 - 1.9174\Delta P_{t1} - 0.7383\Delta P_{g1} + 0.2539\Delta P_{c1} - 0.8325\Delta P_{12} \\ & - 0.1964\Delta f_2 - 2.1840\Delta P_{h2} + 0.0167\Delta P_{gv2} + 3.4964\Delta P_{gh2} + 0.6110\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & 0.0492\Delta f_1 + 0.0406\Delta P_{t1} + 0.0061\Delta P_{g1} - 0.6541\Delta P_{c1} - 0.2366\Delta P_{12} \\ & - 0.0843\Delta f_2 - 0.9458\Delta P_{h2} - 7.2196\Delta P_{gv2} - 8.3848\Delta P_{gh2} + 0.3526\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -1.6\Delta f_1 - 2.0\Delta P_{t1} - 0.5\Delta P_{g1} - 69.9\Delta P_{c1} - 58.5\Delta P_{12} \\ & - 24.9\Delta f_2 - 148.1\Delta P_{h2} - 387.3\Delta P_{gv2} + 50.2\Delta P_{gh2} + 75.8\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & -0.1\Delta f_1 - 0.1\Delta P_{t1} - 0.0\Delta P_{g1} - 449.5\Delta P_{c1} - 350.9\Delta P_{12} \\ & - 152.6\Delta f_2 - 916.9\Delta P_{h2} - 1326.1\Delta P_{gv2} - 47.9\Delta P_{gh2} + 467.0\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (25)$$

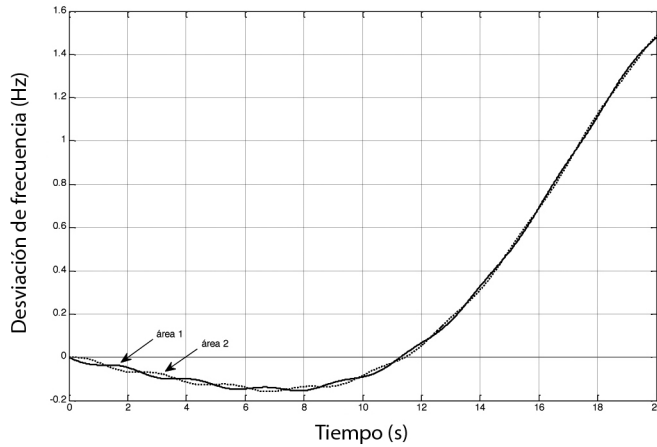


Figura 9. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidráulico, sin regulación.

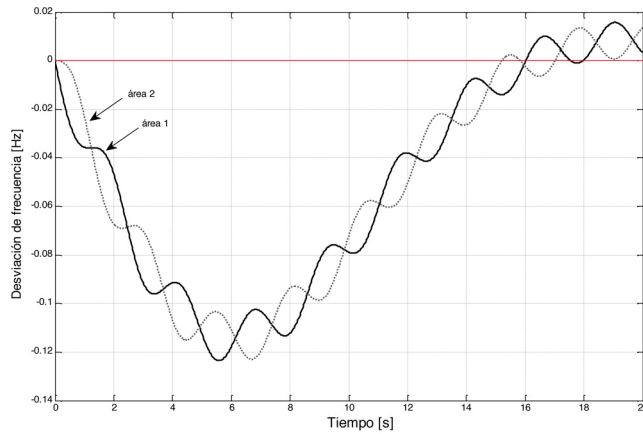


Figura 10. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidráulico, con el regulador tradicional.

De esta forma, la hipótesis planteada para el nuevo índice de desempeño propuesto, del control secundario de frecuencia para el sistema hidrotérmico, es demostrada plenamente a través de la simulación obtenida en la Figura 8; y además se comprueba que no se necesita la matriz de peso Q, tal como sí sucede en Parmar, Majhi & Kothari(2010, 2012), Alrifai, Hassan & Zribi (2011), Pandey, Mohanty & Kishor(2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), y Dehghanpour & Afsharnia (2015).

4.3 Sistema hidráulico.

En este último sistema a simular ambas áreas representan un sistema hidráulico. De nuevo se aplica un escalón de demanda de 0.01 p.u. en el área 1, con el propósito de valorar las desviaciones de frecuencia en cada subsistema. Ante esta perturbación en las Figuras 9, 10 y 11 se muestran las desviaciones de frecuencia obtenidas, según los escenarios simulados.

En el caso de este sistema hidráulico los siguientes datos son tomados de Divya & Nagendra Rao (2005).

$$T_{gh1} = T_{gh2} = 48.7 \cdot s$$

$$T_{w1} = T_{w2} = 1 \cdot s$$

$$T_{12} = 0.545 \cdot puMW$$

$$B_1 = B_2 = 0.425 \cdot puMW / Hz$$

$$T_{gv1} = T_{gv2} = 0.513 \cdot s$$

$$T_{p1} = T_{p2} = 20 \cdot s$$

$$a_{12} = -1$$

$$K_1 = K_2 = 1$$

$$T_{r1} = T_{r2} = 5 \cdot s$$

$$K_{p1} = K_{p2} = 120 \cdot Hz / puMW$$

$$R_1 = R_2 = 2.4 \cdot Hz / puMW$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación (17), se obtiene que:

$$A = \begin{bmatrix} -0.05 & 6.0 & 0 & 0 & 0 & -6.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00044 & -1 & 1.1 & -0.09895 & -0.00105 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.00088 & 0 & -0.2 & 0.19789 & 0.00211 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.00856 & 0 & 0 & -0.02053 & 0.02053 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.425 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.545 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.545 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.0 & -0.05 & 6.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00044 & -1 & 1.1 & -0.09895 & -0.00105 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.00088 & 0 & -0.2 & 0.19789 & 0.00211 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.00856 & 0 & 0 & -0.02053 & 0.02053 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.425 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.00219 & 0 \\ 0.00439 & 0 \\ 0.02053 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.00219 \\ 0 & 0.00439 \\ 0 & 0.02053 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$T = \begin{bmatrix} -6.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -6.0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

I. Primer escenario: sistema de potencia sin regulación.

En el caso del sistema hidráulico sin regulación, la figura 9 muestra como el sistema en conjunto es inestable, ante la misma perturbación de 0.01 p.u., en la potencia demandada, en el área 1. A partir de dicha perturbación, el valor promedio de las desviaciones de frecuencia, da origen a un error que se incrementa con el tiempo.

II. Segundo escenario: sistema de potencia con regulación tradicional.

La Figura 10 muestra el desempeño, en el caso del sistema hidráulico, cuando se utiliza el regulador carga – frecuencia tradicional. Reiteradamente, ante la misma perturbación las desviaciones de frecuencia obtenidas están aproximadamente desfasadas 180 grados, y sus amplitudes en conjunto dan origen a un error diferente de cero. A partir de la Figura 10 y durante el tiempo de la simulación analizada, el regulador cuadrático lineal no logra estabilizar antes de los 30 segundos las desviaciones de frecuencias manifestadas sino a partir de los 100 segundos.

En este caso se pone de manifiesto que aún cuando las matrices R y Q están definidas

como matrices identidad en la Ecuación (6), las expresiones (26) y (27) para la señal de control de cada área eléctrica obtenidas de la Ecuación (2) no logran estabilizar el sistema.

De las Ecuaciones (26) ó (27) se observa que el coeficiente correspondiente al intercambio de potencia entre las áreas es el que tiene la menor magnitud para ambas consignas de control.

III. Tercer escenario: sistema de potencia con el regulador propuesto.

Con la aplicación del regulador propuesto y ante la misma perturbación en la potencia demandada en el área 1, el resultado es muy satisfactorio, tal como se muestra en la Figura 11. En este caso se logra estabilizar las desviaciones de frecuencia, aproximadamente a los 6 segundos. Por otro lado, las máximas desviaciones de frecuencia para ambas áreas, que se obtienen antes de los 2 segundos, alcanzan amplitudes inferiores a las reportadas en la Figura 10. En cuyo caso, el regulador propuesto es superior al regulador cuadrático lineal tradicional.

Con el regulador propuesto, y al estar definida la matriz R como la matriz identidad en la Ecuación (12), se obtienen las siguientes expresiones para la señal de control de cada área, mediante la Ecuación (11).

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -2.0109\Delta f_1 - 11.9213\Delta P_{h1} - 37.1936\Delta P_{gv1} - 15.5269\Delta P_{gh1} + 0.5926\Delta P_{c1} + 0.0428\Delta P_{12} \\ & - 1.9929\Delta f_2 - 11.4799\Delta P_{h2} - 32.4463\Delta P_{gv2} - 8.2725\Delta P_{gh2} + 0.0932\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & -1.9929\Delta f_1 - 11.4799\Delta P_{h1} - 32.4463\Delta P_{gv1} - 8.2725\Delta P_{gh1} + 0.0932\Delta P_{c1} - 0.0428\Delta P_{12} \\ & - 2.0109\Delta f_2 - 11.9213\Delta P_{h2} - 37.1936\Delta P_{gv2} - 15.5269\Delta P_{gh2} + 0.5926\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_1 = & -791.9\Delta f_1 - 4987.2\Delta P_{h1} - 4198.5\Delta P_{gv1} - 46.3\Delta P_{gh1} + 2025.5\Delta P_{c1} + 3923.4\Delta P_{12} \\ & - 535.3\Delta f_2 + 124.3\Delta P_{h2} - 52.0\Delta P_{gv2} + 73.1\Delta P_{gh2} - 714.1\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_2 = & -535.3\Delta f_1 + 124.3\Delta P_{h1} - 52.0\Delta P_{gv1} + 73.1\Delta P_{gh1} - 714.1\Delta P_{c1} - 3923.4\Delta P_{12} \\ & - 791.9\Delta f_2 - 4987.2\Delta P_{h2} - 4198.5\Delta P_{gv2} - 46.3\Delta P_{gh2} + 2025.5\Delta P_{c2} \end{aligned} \quad (29)$$

En este caso particular, con la ayuda de las Ecuaciones (28) ó (29), se observa que en el controlador de cada área el coeficiente que acompaña a la variable del intercambio de potencia entre las áreas tiene una magnitud considerable y es igual para ambas consignas de control.

De este modo, la hipótesis planteada para el nuevo índice de desempeño propuesto del control secundario de frecuencia para el sistema hidráulico es demostrada plenamente a través de la simulación obtenida en la Figura 11; y además se comprueba que no se necesita la matriz de peso Q, tal como sí sucede en en Parmar, Majhi & Kothari (2010, 2012), Alrifai, Hassan & Zribi (2011), Pandey, Mohanty & Kishor(2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), y Dehghanpour & Afsharnia (2015).

5. Conclusiones

En vista de los resultados obtenidos, se rescatan las siguientes conclusiones:

- El método de diseño propuesto es sistemático, simple y no requiere de la matriz de peso Q; lográndose la traslación de los autovalores que tienen partes reales positivas. De esta forma, las nuevas partes reales de dichos

autovalores quedan ubicadas en el semiplano izquierdo del plano complejo y dentro de una franja vertical de ancho especificado a priori.

- A partir de los resultados obtenidos en las Figuras 5, 8 y 11, para los sistemas térmico, hidrotérmico e hidráulico, respectivamente, se demuestra que las correspondientes respuestas dinámicas de los resultados obtenidos del estudio expresan satisfactoriamente la hipótesis planteada para el nuevo índice de desempeño propuesto y se comprueba que no se utiliza la matriz de peso Q, tal como sí sucede en en Parmar, Majhi & Kothari (2010, 2012), Alrifai, Hassan & Zribi (2011), Pandey, Mohanty & Kishor (2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), y Dehghanpour & Afsharnia (2015).
- La contribución medular de la publicación radica en que el nuevo índice de desempeño propuesto, para el control secundario de frecuencia en sistemas térmico, hidrotérmico e hidráulico, presenta un modelo matemático más sencillo, que los indicados en en Parmar, Majhi & Kothari (2010, 2012), Alrifai, Hassan, Zribi (2011), Pandey, Mohanty & Kishor (2013), Aziz, Shafiullah, Stojcevski & Mto (2014), y Dehghanpour & Afsharnia (2015); y sobre todo, que no necesita de la matriz de peso Q.

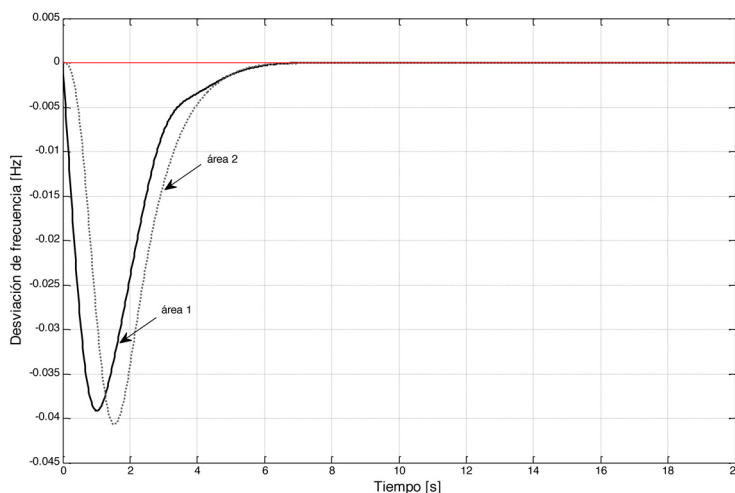


Figura 11. Desviaciones de frecuencia en el sistema hidráulico, con el regulador propuesto

- d. Cuando el sistema de potencia está constituido por un sistema hidrotérmico, las desviaciones de frecuencia de cada área presentan una menor desviación y se desvanecen más rápidamente cuando participa el control secundario de frecuencia propuesto (Figura 8) que cuando se utiliza un regulador cuadrático lineal clásico (Figura 7). Lo anterior está en concordancia con lo indicado en Sáiz-Marín, García-González, Barquín & Lobato (2012).
- e. En todos los casos analizados, con el nuevo control secundario de frecuencia (Figuras 5,8 y 11), el error de frecuencia de cada área prácticamente se desvanece antes de los 7 segundos. Dicha situación está en correspondencia con lo expuesto en Sáiz-Marín, García-González, Barquín & Lobato (2012).
- f. La efectividad del control propuesto muestra un desempeño notablemente superior (Figura 11) al compararse con el regulador cuadrático lineal tradicional (Figura 10), cuando el sistema de potencia está constituido por dos sistemas hidráulicos débilmente interconectados. Tal como es el caso del sistema de potencia Nicaragua – Costa Rica, o de Costa Rica – Panamá, lo cual es congruente con Sáiz-Marín, García-González, Barquín & Lobato (2012).
- g. Al implementar esta propuesta los diferentes componentes del sistema eléctrico han sido incluidos en forma modular. Esto constituye una ventaja analítica, pues permite actualizar cómodamente los modelos del regulador automático de velocidad y de la turbina. Además, la inclusión de nuevos componentes dinámicos tales como los dispositivos FACTS (Flexible ac Transmission Systems, por sus siglas en inglés), o la incorporación de más áreas eléctricas, resultaría muy sencillo.

6. Futuras investigaciones

- a. Desarrollar el análisis de la regulación secundaria de frecuencia, mediante técnicas de control no lineal, tales como: lógica difusa, algoritmos genéticos o redes neuronales, entre otros.

- b. Analizar el efecto del control discreto, sobre el índice de desempeño propuesto.
- c. Implementar el atraso temporal en las señales de control, y valorar su consecuencia sobre el desempeño del sistema.

7. Simbología

- $s = j\omega$: operador de Laplace
 Δ : subíndice que indica un pequeño cambio, en alguna variable

Sistema térmico:

- T_t : constante de tiempo de la turbina térmica
 T_g : constante de tiempo del regulador de velocidad, de la turbina térmica
 T_p : constante de tiempo del sistema de potencia
 K_p : ganancia del sistema de potencia
 T_{12} : coeficiente de sincronización
 a_{12} : relación entre los valores base de las dos áreas
 R : parámetro de regulación
 B : parámetro de sesgo de frecuencia
 K : ganancia de integración

Sistema hidrotérmico:

- T_t : constante de tiempo de la turbina térmica
 T_g : constante de tiempo del regulador de velocidad, de la turbina térmica
 T_{gh} : constante de tiempo del servo principal, de la turbina hidráulica
 T_{gv} : constante de tiempo de resintonización, de la turbina hidráulica
 T_r : constante de tiempo de caída transitoria, de la turbina hidráulica
 T_w : constante de tiempo del agua
 T_p : constante de tiempo del sistema de potencia
 K_p : ganancia del sistema de potencia
 T_{12} : coeficiente de sincronización
 a_{12} : relación entre los valores base de las dos áreas
 R : parámetro de regulación
 B : parámetro de sesgo de frecuencia
 K : ganancia de integración

Sistema hidráulico:

| | |
|------------|--|
| T_{gh} : | constante de tiempo del servo principal, de la turbina hidráulica |
| T_{gv} : | constante de tiempo de resintonización, de la turbina hidráulica |
| T_r : | constante de tiempo de caída transitoria, de la turbina hidráulica |
| T_w : | constante de tiempo del agua |
| T_p : | constante de tiempo del sistema de potencia |
| K_p : | ganancia del sistema de potencia |
| T_{12} : | coeficiente de sincronización |
| a_{12} : | relación entre los valores base de las dos áreas |
| R : | parámetro de regulación |
| B : | parámetro de sesgo de frecuencia |
| K : | ganancia de integración |

Referencias bibliográficas

- Aboytes, F., Arroyo, G. (1986). Security assessment in the operation of longitudinal power systems. *IEEE TPWRS*, 1(5): 225-231.
- Alrifai, T., Hassan, F., Zribi, M. (2011). Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the reseacher. *IJEPES*, 33(2): 198-209.
- Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatziargyriou, N., Kamwa, I., Kundur, P., Martins, N., Paserba, J., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J., Schulz, R., Stankovic, A., Taylor, C., Vittal, V. (2005). Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE TPWRS*, 20(4): 1922-1928.
- Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. (2001). Calidad en el Servicio de Generación y Transmisión de la Energía Eléctrica. Norma Técnica, RRG-2439. San José, Costa Rica.
- Aziz, A., Shafiullah, G. M., Stojcevski, A., Mto, A. (2014). Participation of DFIG Based Wind Energy System in Load Frequency Control of Interconnected Multigeneration Power System. *AUPEC '14 IEEE*, 1(10): 1-6.
- Dehghanpour, K., Afsharnia, S. (2015). Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects. *RSER*, 41 (1): 1267-1276.
- Divya, K. C., Nagendra Rao, P. S. (2005). A simulation model for AGC studies of hydro-hydro systems. *IJEPES*, 27(5): 335-342.
- Elgerd, O. I. (1983). *Electric energy system theory: an introduction*. New York: McGraw-Hill.
- Elgerd, O. I. & Fosha, C. (1970) Optimum megawatt frequency control of multi-area electric energy systems. *IEEE TPAS*, 89(4): 556-563.
- Fosha, C., Elgerd, O. I. (1970). The megawatt frequency control problem: a new approach via optimal control theory. *IEEE TPAS*, 89(4): 563-577.
- Gomez, P., Sequeira de Lima, A. C., Guarini, A. P. (2004). Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System. *IEEE TPWRS*, 19(2): 1159-1164.
- Ibraheem, I., Kumar, P., Kothari D. P. (2005). Recent Philosophies of Automatic Generation Control Strategies in Power Systems. *IEEE TPWRS*, 20(1): 346-357.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1973). Power engineering systems committee report: Dynamic models for steam and hydro turbines for power systems studies. *IEEE TPAS*, 92(6): 1904-1915.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1992). Power engineering systems committee report: Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamics. *IEEE TPWRS*, 7(1): 167-179.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1994). Power engineering systems committee report: Dynamic models for combined cycle plants in power system studies. *IEEE TPWRS*, 9(3): 1698-1708.
- Jaleeli, N., VanSlyck, L.S., Ewart, D. N., Fink & L.H., Hoffmann, A.G. (1992). Understanding automatic generation control. *IEEE TPWRS*, 7(3): 1106-1122.
- Kook, K. S., Liu, Y. & Bang, M.J. (2008). Global behaviour of power system frequency in Korean power system for the application of frequency monitoring network, *IET-GTD*, 2 (5): 764-774.

- Koshkouei, A. J., Zinober, A.G. (1999). Coments on “Linear quadratic regulators with eigenvalue placement in a vertical strip”. *IEEE TAC*, 44(7): 1417-1419.
- Kundur, P. (2008). *Power system stability and control*. New York: McGraw Hill.
- Lobato, E., Egido, I. & Rouco, L. (2012). Monitoring frequency control in the Turkish power system. *EPSR*, 84(1), 144-151
- Makarov, Y. V., Reshetov, V.I., Stroeve, V.A. (2005). Blackout prevention in the United States, Europe and Russia. *Proc. IEEE*, 93(11): 1942–1955.
- Mota, R. (1994). Central American Isthmus: Evolution and perspectives of regional electric integration. *IEEE Power Engineering Rev*, 78(3): 7-11.
- Moya, O., Ramos, A. (2008). Primary and secondary frequency regulation in a longitudinal hydrothermal system by Liapunov method. *EPSR*, 78(3): 137-146.
- Ogata, K. (2009). *Ingeniería de control moderna*. New York: Prentice-Hall.
- Pandey, S. K., Mohanty, S. R. & Kishor, N. (2013). A literature survey on load frequency control for conventional and distribution generation power systems. *RSER*, 25 (9): 318-334.
- Parmar, K. P., Majhi, S. & Kothari, D. P. (2010) Automatic generation control of an interconnected hydrothermal power system. *INDICON '10 IEEE*, 1(1): 1-5.
- Parmar, K. P., Majhi, S. & Kothari, D. P. (2012). Load frequency control of a realistic power system with multi-source power generation. *IJEPES*, 42(11): 426-433.
- Romero, J.J. (2012). Blackouts illuminate India's power problems. *IEEE Spectrum Mag.*, 49(10): 11-12.
- Sáiz-Marín, E., García-González, J., Barquín, J. & Lobato, E. (2012). Economic Assessment of the Participation of Wind Generation in the Secondary Regulation Market. *IEEE TPWRS*, 27(2): 866-874.
- Sanaye-Pasand, M. (2007). Security of the Iranian national grid. *IEEE Power Energy Mag.*, 5(1): 31-39.
- Shayeghi, H., Shayanfar, H. A. & Jalili, A. (2009). Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the reseacher. *ENCONMAN*, 50(2): 344-353.
- Vanfretti, L., Aliyu, U., Chow, J. H. & Momoh, J. A. (2009). System frequency monitoring in the Nigerian power system. *PES '09 IEEE*, 1(1): 1-6.
- Vajk, I., Vajta, M., Keviczky, L., Haber, R., Hetthésy, J. & Hovács, K. (1985). Adaptive load frequency control of the Hungarian power system. *AUTOMATICA*, 21(2): 129-137.
- Yang, T. C., Ding, Z. T. & Yu, H. (2002). Decentralised power system load frequency control beyond the limit of diagonal dominance. *IJEPES*, 24(3): 173-184.

Sobre el autor

Eddie A. Araya Padilla: Profesor Catedrático. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica. Sus áreas de interés son la dinámica no lineal, los dispositivos FACTS y la generación eólica. earaya@eie.ucr.ac.cr