

Diseño de control robusto $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ para la mejora del amortiguamiento de oscilaciones de baja frecuencia en sistemas de potencia

Diego Alejandro Sánchez Mancilla *
Hernando Díaz Morales ** Freddy Andrés Olarte Dussán ***

* *Estudiante de Maestría en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia, (e-mail: diasanchezma@unal.edu.co)*

** *Profesor de tiempo completo, Universidad Nacional de Colombia, (e-mail: hdiazmo@unal.edu.co)*

*** *Profesor de tiempo completo, Universidad Nacional de Colombia, (e-mail: faolarted@unal.edu.co)*

Resumen. Se presenta una metodología de diseño de controladores robustos de sensibilidad mixta usando mediciones fasoriales sincronizadas para la mejora del amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia que se presentan en los sistemas de potencia. Se utilizan desigualdades matriciales lineales, LMI, para establecer restricciones adicionales para el control, como los índices de desempeño \mathcal{H}_2 y \mathcal{H}_∞ y restricciones de ubicación de polos del sistema en lazo cerrado. Se utiliza el análisis de pequeña señal para el modelamiento del sistema y el diseño del controlador. El sistema se modela con múltiples entradas y múltiples salidas, la selección de las señales de entrada/salida del sistema se realiza por medio de los factores de participación y análisis de residuos basados en la controlabilidad y observabilidad del sistema. Se utiliza un sistema de 2 áreas y 4 generadores como ejemplo de diseño y simulación. Los resultados de este estudio ofrecen una metodología de selección de las señales de control más apropiadas para ser usadas en la retroalimentación y una metodología de diseño de controladores robustos aplicados en los sistemas de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que los sistemas de potencia crecen, la tendencia es la interconexión de los mismos, para disminuir los costos de generación, mejorar la regulación de frecuencia y la reserva de generación, etc. Aunque de esta forma se crean sistemas más grandes y de mayor complejidad, que pueden presentar problemas como cortes de energía, sobretensiones, oscilaciones y otros aspectos de la calidad de la potencia que afectan los equipos del consumidor final. Se debe mantener el balance entre generación y carga con un alto nivel de confiabilidad frente a las posibles fallas e incertidumbres, utilizando para esto nuevas tecnologías de control y protección.

Uno de los problemas que se presentan en los sistemas de potencia, son las oscilaciones de baja frecuencia, ver Kundur et al. (1994), las cuales obligan a limitar la cantidad de potencia a transmitir debido a que el sistema puede entrar en un estado inestable, aumentando la probabilidad de fallas y cortes en el suministro eléctrico. Existen varios tipos de oscilaciones de baja frecuencia por ejemplo modos de oscilación locales a nivel de planta (0,7-2,0 Hz) y los modos entre-áreas (0,1-3,0 Hz), los cuales se caracterizan por grupos de generadores separados geográficamente que oscilan entre ellos, ver Snyder (1997) y Kundur et al. (1994). Estos modos de oscilación se clasifican en los problemas de estabilidad de pequeña señal. La estabilidad de pequeña señal se refiere al estudio del comportamiento dinámico del sistema a partir de un modelo lineal del mismo, analizado

frente a perturbaciones de pequeña magnitud ver Kundur et al. (1994).

Tradicionalmente, se utilizan estabilizadores del sistema de potencia (PSS) para reducir las oscilaciones de baja frecuencia. Pero los PSS utilizan mediciones locales como señales de entrada, ver Hu and Milanovic (2007). Gracias a la disponibilidad de unidades de medición fasorial sincronizadas (PMU), desarrollada y aplicada en los últimos años, es posible incluir mediciones remotas como señales de retroalimentación para el control de las oscilaciones, lo cual permite un mayor nivel de observabilidad y controlabilidad y ayuda a mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia, ver Chen et al. (2006).

Chen et al. (2006) y Pal and Chaudhuri (2006) utilizan control robusto \mathcal{H}_∞ para mejorar el amortiguamiento de oscilaciones de baja frecuencia basado en mediciones de Potencia tomadas con unidades de medición fasorial y señales locales de velocidad de giro de los generadores. Sin embargo no se analiza el efecto de incluir mediciones fasoriales de voltaje o corriente como el presentado por Chompoobutrgool and Vanfretti (2012), en el cual se toman señales de retroalimentación de fasor de voltaje a partir de la participación en los *caminos dominantes del sistema*.

En este artículo se presenta una metodología de diseño de control para mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia en los sistemas de potencia mediante el uso de mediciones fasoriales de voltaje

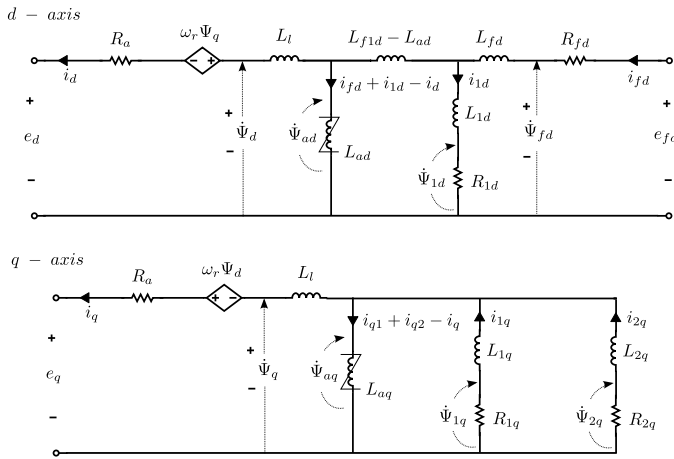


Figura 1. Modelo de sexto orden del generador sincrónico

y velocidad de rotor de los generadores como señales de entrada al controlador. Dichas señales se obtienen a partir de la participación en los caminos o tramos dominantes respecto a los modos de oscilación entre áreas. Se propone el diseño de control robusto de sensibilidad mixta $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ basado en el uso de desigualdades lineales matriciales (LMI) y ubicación de polos del sistema en lazo cerrado para establecer límites de respuesta temporal y de mínimo amortiguamiento permisible para el sistema.

El artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta el modelamiento matemático del sistema de potencia y la conceptualización del análisis de pequeña señal, mediante el cual se realiza la linealización del modelo para la obtención del perfil de oscilación en el punto de operación analizado. En la sección 3, se presenta la metodología de diseño propuesta para el controlador usando la teoría de control robusto mediante la aplicación de restricciones del tipo LMI. En la sección 4, se presenta un ejemplo de aplicación para un sistema de potencia que consta de 2 áreas, 4 generadores y 2 cargas.

2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Según IEEE1110-2002 (2002) y Kundur et al. (1994), el estudio de estabilidad de pequeña señal debe tener en cuenta la dinámica del circuito de campo en los generadores, los efectos de los circuitos de amortiguamiento y el control de excitación.

2.1 Modelo del generador

Se utiliza un modelo de sexto orden para cada generador sincrónico presente en el sistema, tomado de Kundur et al. (1994), ver Figura 1. Este modelo tiene en cuenta los efectos de la dinámica del circuito de campo, corrientes del estator, saturación y los circuitos de amortiguamiento.

Ecuaciones del modelo De la Figura 1, las ecuaciones que describen la dinámica del modelo son:

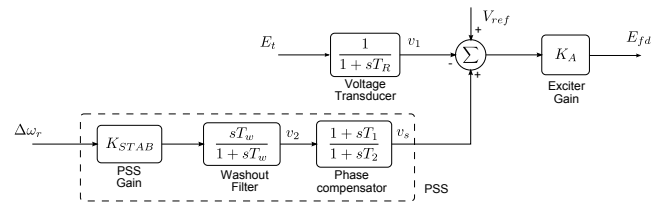


Figura 2. Sistema de excitación (tipo ST1A), con regulador de voltaje (AVR) y estabilizador del sistema de potencia (PSS)

$$\frac{d}{dt} \psi_{fd} = \omega_0 \left[e_{fd} + \frac{R_{fd}(\psi_{ad} - \psi_{fd})}{L_{fd}} \right] \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{1d} = \omega_0 \left(\frac{\psi_{ad} - \psi_{1d}}{L_{1d}} \right) R_{1d} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{1q} = \omega_0 \left(\frac{\psi_{aq} - \psi_{1q}}{L_{1q}} \right) R_{1q} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{2q} = \omega_0 \left(\frac{\psi_{aq} - \psi_{2q}}{L_{2q}} \right) R_{2q} \quad (4)$$

Las ecuaciones que describen los efectos del desbalance entre el torque electromagnético T_e y el torque mecánico T_m en el generador sincrónico son (ver Kundur et al. (1994)):

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta\omega_r) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (6)$$

El torque eléctrico se define como:

$$T_e = (e_d i_d + e_q i_q) + R_a (i_d^2 + i_q^2) \quad (7)$$

$$= \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \quad (8)$$

El voltaje en terminales de la máquina re representa como:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & L_l \\ -L_l & -R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ad} \\ \psi_{aq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 Sistema de excitación y PSS

Se utiliza un sistema de excitación estándar, del tipo ST1A, ver Figura 2. También se presenta la estructura típica del PSS, el cual está compuesto por un filtro washout, un compensador de fase y una ganancia de estabilización.

2.3 Estabilidad de pequeña señal

Es la habilidad que tiene el sistema de mantener sincronismo cuando está sujeto a pequeñas perturbaciones según Kundur et al. (1994). Se utilizan técnicas lineales para obtener las características dinámicas y perfil de oscilación del sistema de potencia.

Linealización de las ecuaciones del sistema A partir de la definición de un sistema dinámico como función de sus estados y entradas:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (10)$$

$$y = g(x, u) \quad (11)$$

donde \mathbf{x} es el vector de n estados, \mathbf{u} es el vector de r entradas y \mathbf{y} , el vector de m salidas del sistema. El total de n estados depende de la cantidad de generadores y el tamaño del modelo. $\dot{\mathbf{x}}$ se obtiene utilizando el modelo de sexto orden definido en las Ecuaciones 1 a 6.

Asumiendo un vector de entrada \mathbf{u}_0 que mantiene el sistema en un punto de operación en equilibrio \mathbf{x}_0 , el cual satisface $\dot{\mathbf{x}}_0 = f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = 0$. Una pequeña perturbación Δ alrededor del estado de equilibrio se puede aplicar al sistema: $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}$ y $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}$. Utilizando la expansión en serie de Taylor y despreciando las potencias de segundo orden y superiores de $\Delta\mathbf{x}$ y $\Delta\mathbf{u}$:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

con $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = 1, 2, \dots, m$. La forma linealizada de las Ecuaciones(10) y (11) es:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \quad (12)$$

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u} \quad (13)$$

en donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial f_1/\partial x_1 & \dots & \partial f_1/\partial x_n \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial f_n/\partial x_1 & \dots & \partial f_n/\partial x_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \partial f_1/\partial u_1 & \dots & \partial f_1/\partial u_r \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial f_n/\partial u_1 & \dots & \partial f_n/\partial u_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \partial g_1/\partial x_1 & \dots & \partial g_1/\partial x_n \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial g_m/\partial x_1 & \dots & \partial g_m/\partial x_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \partial g_1/\partial u_1 & \dots & \partial g_1/\partial u_r \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial g_m/\partial u_1 & \dots & \partial g_m/\partial u_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.4 Análisis modal

Se refiere al cálculo de vectores y valores propios a partir de la matriz de estado del sistema, \mathbf{A} , ver Ecuación (14). Los valores propios λ_i y vectores propios ϕ_i satisfacen $\mathbf{A}\phi = \lambda\phi$ para cada modo de oscilación i .

Valores propios, estabilidad y amortiguamiento Para un par complejo de valores propios $\lambda = \sigma \pm j\omega$, para asegurar la estabilidad se debe cumplir que las componentes reales de los valores propios sean negativas: $Re\{\lambda_i\} = \sigma < 0 \forall i$. El factor de amortiguamiento, ζ determina la razón de caída de la amplitud de la oscilación en una constante de tiempo de $1/|\sigma|$:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (15)$$

La medida de robustez y de margen de estabilidad requiere que el amortiguamiento de los modos de oscilación no descienda cierto nivel aceptable o mínimo de amortiguamiento ante varias condiciones de operación y configuraciones de la red, ver Pal and Chaudhuri (2006).

Identificación de modos de oscilación Los modos de oscilación se pueden clasificar, según la razón de correlación electromecánica, ver Chen et al. (2006), la cual está determinada como la razón entre la suma de los vectores propios relacionados con el ángulo del rotor δ y la velocidad del rotor ω_r , sobre la suma de los demás vectores propios. Si el valor absoluto de la entrada (la razón de correlación) es mucho mayor que 1, el modo correspondiente se clasifica como un modo de oscilación electromecánico.

Factores de participación El factor de participación indica la contribución de las variables de estado en cada modo de oscilación. La matriz de participación se define como $\mathbf{P} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]$, donde:

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i}\psi_{i1} \\ \phi_{2i}\psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni}\psi_{in} \end{bmatrix} \quad (16)$$

El elemento $p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik}$ se denomina el *factor de participación*, el cual es una medida de la participación relativa de la variable de estado k en el modo i .

Identificación de modos entre áreas La identificación de modos de oscilación entre áreas del sistema se realiza por medio del vector de participación, ver Chen et al. (2006). El vector de participación se define como: la amplitud del factor de participación y la fase es el ángulo del vector propio asociado al modo de oscilación analizado. Según la magnitud y fase de este vector, se puede evaluar si la oscilación se da entre generadores ubicados en distintas áreas del sistema.

2.5 Selección de señales de entrada/salida

Señales de control Analizando las componentes de los vectores propios asociadas a la velocidad del rotor en cada generador (lo cual indica la sensibilidad del vector ante la variación en cada variable de estado) para cada modo de oscilación entre áreas, un valor grande positivo en la componente del vector propio indica que el generador asociado es un buen candidato para ser utilizado como entrada de control.

Señales de salida del sistema Debido a que las PMU proveen mediciones en forma de fasores, se utilizará como salida del sistema: magnitud de voltaje (V), ángulo de voltaje (θ) y velocidad del rotor (ω_r). Para la selección de señales de salida de voltaje y su ángulo, se utiliza el factor de forma de la red, ver Chompoobutrgool (2012); el cual corresponde a una proyección de la sensibilidad de la red (C) sobre la forma de modo o vector propio derecho (W):

$$S_V = C_V W \quad (17)$$

$$S_\theta = C_\theta W \quad (18)$$

Las matrices C_V y C_θ componen la matriz de sensibilidad de la red (C), la cual se obtiene a partir de la linealización del modelo:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix}}_{\Delta y} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial \omega_r} & \frac{\partial V}{\partial \delta} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{fd}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{1d}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{1q}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{2q}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \omega_r} & \frac{\partial \theta}{\partial \delta} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{fd}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{1d}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{1q}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{2q}} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \delta \\ \psi_{fd} \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \\ \psi_{2q} \end{bmatrix}}_{\Delta x} \quad (19)$$

En donde,

$$C_V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial \omega_r} & \frac{\partial V}{\partial \delta} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{fd}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{1d}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{1q}} & \frac{\partial V}{\partial \psi_{2q}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \omega_r} & \frac{\partial \theta}{\partial \delta} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{fd}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{1d}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{1q}} & \frac{\partial \theta}{\partial \psi_{2q}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

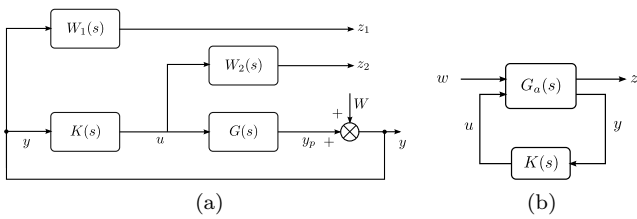


Figura 3. (a) Estructura de control de sensibilidad mixta. $W_1(s)$ y $W_2(s)$ definen los índices de desempeño H_2 y H_∞ . (b) Equivalente de la estructura de control, planta ampliada.

El factor de forma de la red indica la distribución de las oscilaciones sobre las variables o nodos de la red, en otras palabras, qué tan observable es el modo de oscilación a partir de las señales de voltaje o fase de los nodos del sistema. En general, entre mayor la magnitud y menor la variación del factor de forma de red, las señales serán más observables y robustas.

2.6 Evaluación de observabilidad y controlabilidad

Una de las condiciones necesarias para el diseño del controlador robusto están relacionadas con la controlabilidad y observabilidad del sistema. En este caso se evalúa si los modos de oscilación inestables o con bajo amortiguamiento son detectables y estabilizables de acuerdo a la selección de entradas y salidas mencionada anteriormente. Para esto se utilizan las pruebas de Popov-Belevitch-Hautus (PBH), ver Zhou and Doyle (1998).

2.7 Control robusto de sensibilidad mixta $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$

El controlador se diseña como un problema de rechazo a perturbaciones, basado en la formulación de sensibilidad mixta con ubicación de polos en lazo cerrado, ver Pal and Chaudhuri (2006) y Zhou and Doyle (1998). En la Figura 3a, los objetivos de control se basan en la minimización de $S < 1/W_1(s)$ y $KS < 1/W_2(s)$, en donde $W_1(s)$ es un filtro pasabajos (usado para el rechazo a perturbaciones de salida) y $W_2(s)$ es un filtro pasa altos (usado para la reducción del esfuerzo del controlador a altas frecuencias). Por lo tanto, el problema de optimización puede resumirse como:

$$\min_{K \in \mathbb{S}} \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 S \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1$$

En donde \mathbb{S} es el conjunto de controladores los cuales estabilizan el sistema.

2.8 Restricciones LMI

La respuesta temporal y el amortiguamiento de las oscilaciones del sistema en lazo cerrado pueden ser establecidas mediante la ubicación de los polos en una sub-región del semi-plano complejo izquierdo (ver Figura 4). Mediante desigualdades matriciales lineales, LMI, se pueden combinar múltiples objetivos de diseño en un problema de solución numérica. Esta síntesis multi-objetivo combina requerimientos en el dominio de la frecuencia y del tiempo.

En la Figura 3b, $G_a(s)$ es la planta ampliada, la cual contiene las funciones de transferencia $W_1(s)$ y $W_2(s)$.

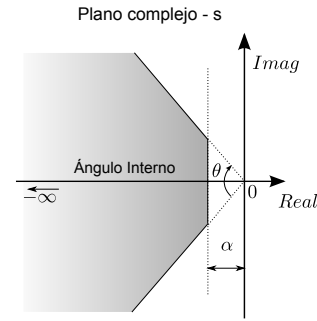


Figura 4. Ubicación de polos para el sistema en lazo cerrado (zona sombreada)

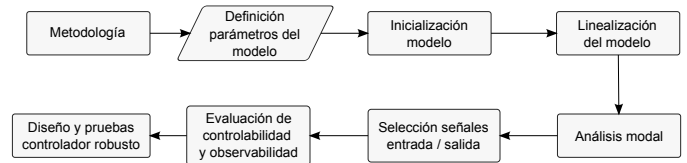


Figura 5. Metodología de diseño del controlador

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología propuesta se resume en la Figura (5). Primero es necesario la definición de los parámetros relacionados con los generadores y elementos de los que se compone el sistema de potencia, para obtener las ecuaciones del modelo diferencial algebraico, DAE (Ecuaciones 10 y 11).

Se escoge un punto de operación para realizar el análisis y diseño del controlador. Utilizando un software de simulación como NEPLAN® o MATLAB/SIMULINK® se obtienen los datos de inicialización del modelo (ej. potencias y voltajes de operación). Para obtener la representación en espacio de estado del sistema de potencia se calcula el jacobiano sobre las ecuaciones del modelo (Ecuación 14).

Mediante el análisis modal de la matriz de estado (A) se obtienen las características dinámicas y el perfil de oscilación del sistema de potencia. Se seleccionan las señales de salida del controlador a partir del factor de participación y de los vectores propios correspondientes a los modos de oscilación inestables o de bajo amortiguamiento. Las señales de entrada al controlador se escogen con el factor de forma de la red, el cual tiene en cuenta la sensibilidad de las variables de la red y la distribución de las oscilaciones sobre las variables de estado. Se procede a la evaluación de detectabilidad y estabilización de los modos de oscilación inestables o poco amortiguados según las señales seleccionadas.

Finalmente se diseña el control robusto a partir de la representación matemática resultado de la selección de señales de entrada y salida; teniendo en cuenta los requerimientos de desempeño impuestos con la ubicación de polos sobre la región LMI y los índices de desempeño $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$. Para el diseño del controlador es posible utilizar la función `hinfmix()` provista en el Toolbox de Control Robusto de MATLAB®.

4. EJEMPLO DE DISEÑO: SISTEMA DE DOS ÁREAS

En este caso se utiliza el sistema de dos áreas y cuatro generadores, el cual fue propuesto por Kundur et al. (1994)

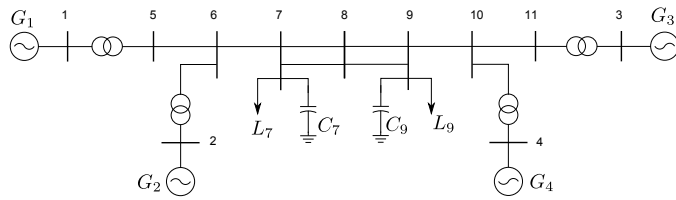


Figura 6. Sistema de 2-áreas y cuatro generadores

Tabla 1. Modos electromecánicos del sistema de 2 áreas

No.	Modo	f / Hz	ζ	Razón correlación electromecánica
1	$0.420 \pm 7.590i$	1.208	0.055	9.5343
2	$0.287 \pm 4.836i$	0.770	0.059	6.7506
3	$-1.045 \pm 6.776i$	1.079	-0.152	4.7283

para el estudio de oscilaciones de baja frecuencia, ver Figura 6. Cada generador está compuesto por un excitador del tipo ST1A como el presentado en la Figura 2. No se utilizan PSS, las posibles entradas de control serán a la entrada de excitación en donde se conectan los PSS. Se utilizan las condiciones de operación indicadas por Kundur et al. (1994) para el punto de operación y linealización del modelo.

4.1 Identificación de modos de oscilación

Según la evaluación de la razón de correlación electromecánica, el sistema de dos áreas (Figura 6) presenta tres modos de oscilación electromecánica, los cuales se presentan en la Tabla 1.

En la Figura 7 se presenta la gráfica de vectores de participación para los tres modos de oscilación electromecánicos. Se observa que el modo de oscilación de No. 2, de 1.0785 Hz es un modo de oscilación entre áreas, en el cual los generadores G1 y G2 del área 1 oscilan contra los generadores G3 y G4 del área 2. Por otra parte los modos de oscilación No. 1 y 3 son modos de área local, en los cuales los generadores propios de cada área oscilan entre ellos y no hay mayor influencia de los demás.

4.2 Selección de señales de entrada/salida

De la Figura 7, el generador que mayor participación tiene en el modo de oscilación entre áreas es el generador G2. Del área No. 2, el generador con mayor participación es G4. Las entradas de excitación de estos dos generadores se seleccionan como entradas de control del sistema.

Respecto a las salidas del sistema, en la Figura 8 se presenta la distribución del factor de forma de la red en cada uno de los nodos del sistema. Se observa que los nodos No. 1 y 5 tienen una mayor participación en el modo de oscilación. Por lo tanto se escogen estos nodos como salidas del sistema a través de mediciones de voltaje ΔV y de fase $\Delta \theta$. Se toman también las medidas de la velocidad del rotor ($\Delta \omega$) de los generadores G1 y G2, los cuales son los que presentan mayor participación en el modo de oscilación (ver Figura 7).

Una vez seleccionadas las entradas/salidas del sistema se realiza el análisis de detectabilidad/estabilización del sistema, mediante las pruebas de Popov-Belevitch-Hautus (PBH), ver Zhou and Doyle (1998).

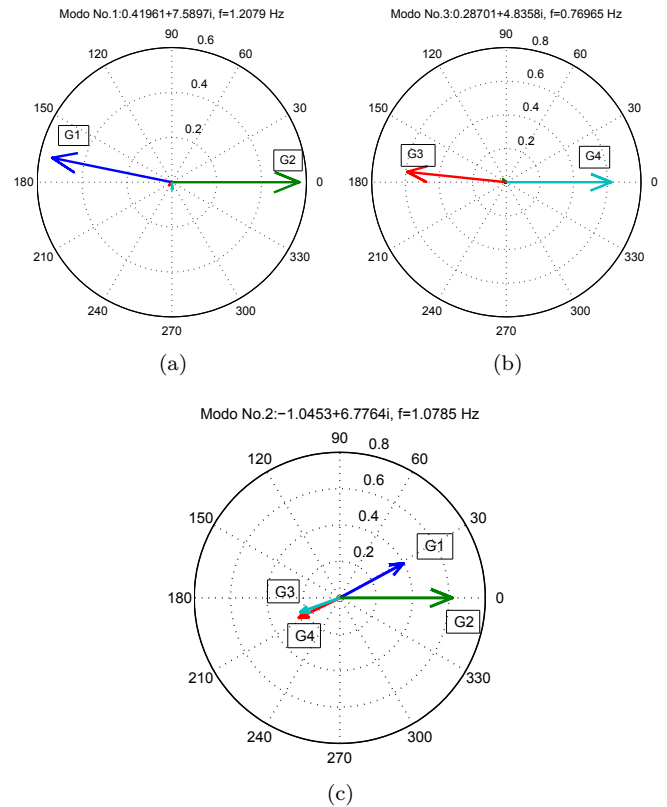


Figura 7. Vectores de participación de los modos de oscilación electromecánicos: (a) Modo local área 1, G1 oscila respecto a G2 (b) Modo local área 2, G3 oscila respecto a G4 (c) Modo de oscilación entre áreas, G1 y G2 oscilan respecto a G3 y G4.

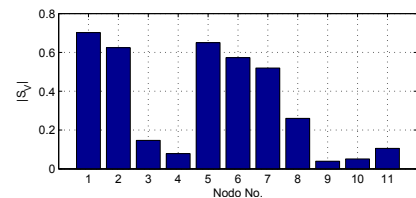


Figura 8. Factor de forma de la red para el modo de oscilación entre áreas (modo No. 2)

4.3 Diseño controlador

A partir de la definición de señales de entrada/salida, el controlador se realiza la aproximación de la planta a un modelo de octavo orden utilizando la función `schurmr()` de MATLAB®.

Las funciones de peso se escogen según el requerimiento del diseño por sensibilidad mixta: $W_1(s)$ es un filtro pasa-bajos (rechazo a perturbaciones, \mathcal{H}_∞) y W_2 es un filtro pasa-altos (incertidumbre del modelo y reducción de esfuerzo del controlador, \mathcal{H}_2):

$$W_1(s) = \frac{30}{s + 30}, \quad W_2(s) = \frac{10s}{s + 100}$$

Se utiliza el Toolbox de Control Robusto de MATLAB®, utilizando la función `hinfmix()` con objetivo $obj = [90 \ 60 \ 1 \ 1]$ y región LMI con $\alpha = -0,5$ y $\theta = 2 \text{acos}(0,15)$

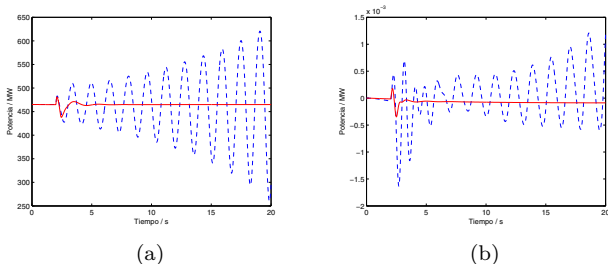


Figura 9. (a). Potencia activa transferida entre las dos áreas del sistema, comparación de respuesta en lazo abierto y con control, (b) Velocidad del rotor $\Delta\omega$ en el generador G2

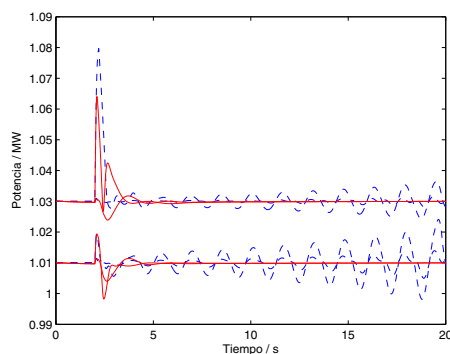


Figura 10. Voltaje en terminales de todos los generadores para asegurar una razón de decaimiento de 0.5 y un amortiguamiento mínimo: $\zeta \geq 0,15$, ver Figura 4.

5. RESULTADOS

Se considera una perturbación en el dominio del tiempo para estimular las oscilaciones en el sistema. Para esto se aplica un pulso de 5% de magnitud aplicado durante 12 ciclos en la referencia de voltaje del generador G_1 . En la Figura 9a se presenta la comparación entre la potencia activa que es transferida por las líneas de transmisión que interconectan los nodos 7 y 9. En la Figura 9b se presenta la variación en la velocidad del rotor en el Generador G2, el cual es el que tiene mayor participación en el modo de oscilación entre áreas. También se presenta como varía el voltaje en terminales de todos los generadores, ver Figura 10. El sistema en lazo cerrado en todos los casos se mantiene en estado estable y su respuesta temporal llega al estado estacionario alrededor de 4 segundos después de aplicada la perturbación.

Por otra parte, la robustez del sistema se comprueba mediante pruebas en las condiciones de operación. Para esto se toman cinco cambios en la carga conectada al nodo 7. Las variaciones se realizan entre $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ del valor nominal. Los resultados son presentados en la Tabla 2.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una metodología de diseño de control robusto para sistemas de potencia, utilizando la selección de señales de control y de salida a partir de la participación que presentan en los modos de oscilación

Tabla 2. Prueba de robustez en lazo cerrado: variación del valor nominal de la carga L7 entre $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$

	Frecuencia de oscilación / Hz				
	90 %	95 %	100 %	105 %	110 %
Modo 1	1,132	1,129	1,127	1,125	1,085
Modo 2	0,786	0,789	0,793	0,797	0,801
Modo 3	0,997	1,001	1,084	1,085	1,085
	Factor de amortiguamiento, ζ				
	90 %	95 %	100 %	105 %	110 %
Modo 1	0,229	0,234	0,240	0,246	0,162
Modo 2	0,190	0,194	0,197	0,200	0,202
Modo 3	0,203	0,202	0,164	0,163	0,162

electromecánicos. Para la selección de señales de control se utiliza el vector de participación, en donde se tiene en cuenta los generadores los cuales tienen mayor influencia en los modos de oscilación. Las señales de salida se escogen en los nodos que presentan mayor factor de forma de la red.

Se utiliza un sistema de 2 áreas y cuatro generadores para ilustrar el proceso de diseño. Se obtiene una mejora significativa en el amortiguamiento de los modos de oscilación (locales y entre áreas). Se realizan pruebas de robustez para el sistema en lazo cerrado, ante variaciones de $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ del valor nominal de una de las cargas conectadas al sistema. Se comprueba el desempeño del controlador y la mejora en el factor de amortiguamiento de los modos de oscilación, el cual se mantiene sobre el valor mínimo aceptable.

REFERENCIAS

- Chen, H., Bai, H., Liu, M., and Guo, Z. (2006). Wide-area robust H ∞ control with pole placement for damping inter-area oscillations. In *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, 2101–2108. doi:10.1109/PSCE.2006.296269.
- Chompoobutrgool, Y. (2012). *Concepts for Power System Small Signal Stability Analysis and Feedback Control Design Considering Synchronphasor Measurements*. Master's thesis, KTH School of Electrical Engineering.
- Chompoobutrgool, Y. and Vanfretti, L. (2012). A fundamental study on damping control design using PMU signals from dominant inter-area oscillation paths. In *North American Power Symposium (NAPS), 2012*, 1–6. doi:10.1109/NAPS.2012.6336336.
- Hu, Z. and Milanovic, J. (2007). Damping of inter-area oscillations by WAM based supplementary controller. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 1–7. doi:10.1109/PES.2007.386095.
- IEEE1110-2002 (2002). IEEE guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses. *IEEE Std 1110-2002*.
- Kundur, P., Balu, N., and Lauby, M. (1994). *Power system stability and control*, volume 4. McGraw-hill New York.
- Pal, B. and Chaudhuri, B. (2006). *Robust control in power systems*. Springer.
- Snyder, A.F. (1997). *Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements*. Master's thesis, Virginia Tech.
- Zhou, K. and Doyle, J.C. (1998). *Essentials of robust control*, volume 104. Prentice hall Upper Saddle River, NJ.