



Control Adaptativo Fraccionario Optimizado por Algoritmos Genéticos, Aplicado a Reguladores Automáticos de Voltaje

Marco E. Ortiz-Quisbert^{a,b}, Manuel A. Duarte-Mermoud^{a,b,*}, Freddy Milla^{a,b}, Rafael Castro-Linares^c

^aDepartamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile.

^bCentro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), Universidad de Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile.

^cDepartamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, D.F., México.

Resumen

En este trabajo se presenta la técnica del control adaptable de orden fraccionario por modelo de referencia (CAOFMR), aplicada a los reguladores automáticos de voltaje (RAV). El artículo se enfoca en el ajuste de las ganancias adaptables y los órdenes de derivación de las leyes de ajuste del controlador CAOFMR, determinados por la minimización de una función criterio definida para el modelo simplificado del RAV, mediante la utilización de la técnica de optimización de algoritmos genéticos (AG). En base a un criterio de evaluación propuesto por otros autores, se realizan comparaciones, por medio de simulaciones, de la técnica de control propuesta con los resultados obtenidos por la técnica de control PID de orden entero (OEPID) (Zamani et al., 2009). Se muestra que el controlador CAOFMR con parámetros optimizados por AG, entrega mejores resultados en términos de robustez frente a variaciones en los parámetros del sistema controlado y mejoras en relación a la velocidad de convergencia hacia las señales de referencia del sistema RAV.

Palabras Clave:

Control Adaptativo de Orden Fraccionario por Modelo de Referencia, Control Adaptativo por Modelo de Referencia, Control Fraccionario, Regulador Automático de Voltaje, Algoritmos Genéticos, Optimización por Algoritmos Genéticos.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) requieren, por un lado, dispositivos que mantengan y garanticen su estabilidad incluso en condiciones extremas de trabajo y por otro, éstos requieren tiempos de respuesta cada vez más rápidos. Estos dos aspectos constituyen los principales motivos que han inspirado a varios investigadores en busca de mejores resultados. También, la combinación de técnicas de control y estrategias de optimización se han utilizado en la literatura técnica para abordar este problema en los SEP.

Al realizar el análisis de la literatura técnica, muchos de los autores que trabajan en esta línea de investigación, mencionan a Gaing (2004) como su referencia principal. En 2004, Gaing demostró mejoras en la sintonización de los parámetros del controlador PID, mediante la minimización de una función objetivo por el método de optimización de Algoritmos Genéticos (AG) (Gaing, 2004). Posteriormente, Conceicao (2008), uti-

lizó el mismo sistema de Gaing (Gaing, 2004) (Modelo Lineal Simplificado del RAV) y presentó mejoras en el proceso de optimización, modificando el algoritmo de AG. Luego, Kim y Park (2005) sintonizaron los parámetros del controlador utilizando una mezcla entre las técnicas de AG y optimización por enjambre de partículas (OEP). En el 2007, Mitra et al. (2007) introdujeron una técnica de control difuso, donde utilizan un modelo tipo Sugeno, en el cual los parámetros son ajustados a través del algoritmo de aprendizaje híbrido, demostrando estabilidad de los sistemas de generación eléctrica modelados para pequeña señal.

Todos los autores anteriores consideran variaciones del voltaje de referencia $\Delta V_r(t) = 1[\text{pu}]$, con la finalidad de comparar estrategias de optimización en términos de la minimización de una función criterio determinada, asociada al modelo lineal simplificado del RAV.

Desde el punto de vista de los expertos en SEP, Mukherjee y Ghoshal (2007) utilizan el mismo modelo anterior (Modelo Lineal Simplificado del AVR), sin embargo, emplean $\Delta V_r(t) = 0,01[\text{pu}]$, minimizando una función criterio en base al algoritmo AG. Más adelante en el 2009, Chatterjee et al. (2009) utilizan las mismas características de (Mukherjee y Ghoshal, 2007), proponiendo una modificación al método OEP, llamada

* Autor en correspondencia

Correos electrónicos: marco.ortiz@ing.uchile.cl (Marco E. Ortiz-Quisbert), mduarte@ing.uchile.cl (Manuel A. Duarte-Mermoud), fmill@ing.uchile.cl (Freddy Milla), rcastro@cinvestav.mx (Rafael Castro-Linares)

VUR-PSO, demostrando mejoras en términos del mínimo de la misma función criterio.

En este artículo se presenta la técnica de Control Adaptable de Orden Fraccionario por Modelo de Referencia (CAOFMR) como un problema de optimización, donde se sintonizan las ganancias adaptables y órdenes de derivación de las leyes de ajuste, considerando una función objetivo (FO), para el modelo lineal simplificado del generador reportado por Kundur (Kundur, 1994). Mediante simulaciones se demuestran mejoras en términos de la función criterio ya mencionada, reduciéndola hasta un 30,48 % y mejoras en términos del sobrepaso hasta en un 16,62 %, en relación a los encontrados en la literatura (Mukherjee y Ghoshal, 2007).

La Sección 2 de este artículo presenta los conceptos generales del CAOFMR, los algoritmos de optimización y el modelo del generador con el RAV a utilizar. Luego, en la Sección 3 se establecen las condiciones, características del controlador y la función objetivo que dan origen a las simulaciones presentadas en este trabajo. La Sección 4 presenta los resultados simulados originales, comparando las distintas técnicas de control y estrategias de optimización con los encontrados en la literatura, donde se evalúan los comportamientos de los esquemas de control propuestos frente a variaciones paramétricas, en base a índices de rendimiento. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen líneas futuras de investigación.

2. Fundamentos Teóricos

En esta Sección se presentan las bases teóricas necesarias para abordar los temas desarrollados en el presente artículo.

2.1. Definiciones básicas del cálculo fraccionario

El cálculo de orden fraccionario es una generalización del cálculo clásico o de orden entero y se relaciona con operadores diferenciales del tipo D_a^t , donde α es un número real o complejo. Según Kilbas et al. (2006) existen varias definiciones de las derivadas de orden fraccionario, sin embargo la más utilizada en el campo de la ingeniería es la derivada según Caputo, debido a que incorpora las condiciones iniciales de la variable y sus derivadas de orden entero. Su definición corresponde a (Kilbas et al., 2006)

$${}^R D_0^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (1)$$

con $n = [\Re(\alpha)] + 1; t > \alpha$, donde $[\Re(\alpha)]$ es la parte entera de $\Re(\alpha)$.

El método de Oustaloup (Oustaloup, 1991) es utilizado para realizar aproximaciones de la derivada fraccionaria según Caputo, el cual caracteriza el comportamiento haciendo uso de la distribución recursiva de polos y ceros, que está dada por

$$s^\alpha \approx k \prod_{n=1}^N \frac{1 + (s/\omega_{z,n})}{1 + (s/\omega_{p,n})} \quad (2)$$

con $\alpha > 0$ y las frecuencias de los polos y ceros ($\omega_{z,n}$ y $\omega_{p,n}$) están dados por Zamani et al. (2009). k es un coeficiente que

se ajusta tal que la ganancia en ambos lados de (2) sea $1 \frac{rad}{s}$. La eficiencia de la aproximación depende de N , donde para valores bajos de N se generan aproximaciones simples, mientras que para valores altos de N se generan mejores aproximaciones para la derivada fraccionaria, cuyo costo asociado se manifiesta en el esfuerzo computacional requerido. Esta aproximación está disponible mediante el bloque Ninteger de Simulink del Toolbox de Matlab (Valério y da Costa, 2004).

2.2. Control Adaptable de Orden Fraccionario por Modelo de Referencia

Para comprender los conceptos del control adaptable de orden fraccionario por modelo de referencia (CAOFRM), se comenzará realizando una breve introducción al Control Adaptativo por Modelo de Referencia (CARM) clásico, el cual resume las bases teóricas contenidas en Narendra y Annaswamy (2005).

Los detalles del esquema mostrados en la Figura 1 se pueden consultar en (Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud, 2013). Sin embargo, cabe destacar algunos conceptos para el caso de plantas con grado relativo $n* \geq 2$ (que corresponde al caso de este estudio) tales como el concepto del error aumentado $e(t)$ y del error auxiliar $e_2(t)$, que son necesarios definir para resolver este caso, dado que el sistema que aquí se analiza genera el denominado Modelo de Error 4 (Narendra y Annaswamy, 2005). Para el CARM clásico los parámetros del controlador son ajustados usando ecuaciones diferenciales de orden entero (Leyes de Ajuste). En este caso de estudio, nos referimos al CARM de orden fraccionario (CAOFRM), donde los parámetros son ajustados adaptativamente siguiendo ecuaciones diferenciales de orden fraccionario (Leyes de Ajuste de Orden Fraccionario).

Las características más importantes de este controlador se muestran en la Tabla 1, donde las dimensiones de las matrices (Λ, l) y el número de variables a optimizar serán definidos en la Sección 3.

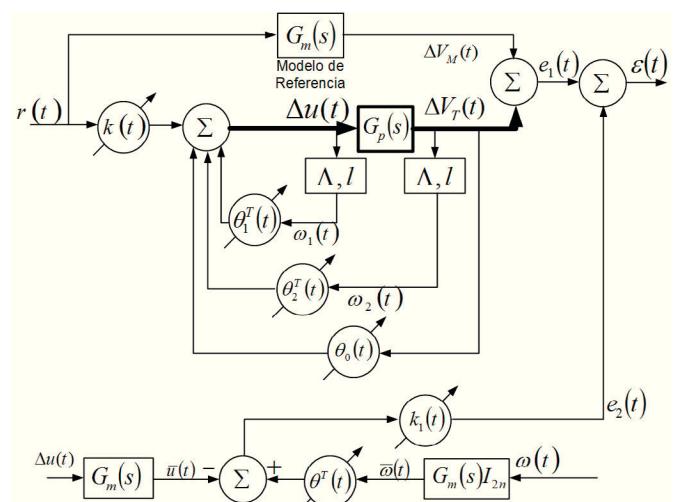


Figura 1: Esquema general del CAMR para $n* \geq 2$

Tabla 1: Definición general de variables y parámetros del CAOFRM.

Planta	$G_p = \frac{b_ps^p + b_{p-1}s^{p-1} + \dots + b_1s + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}$
Modelo de Referencia	$G_m = \frac{k_m}{m_qs^q + m_{q-1}s^{q-1} + \dots + m_1s + m_0}$
Leyes de Control	$u(t) = \theta(t)^T \omega(t)$ $\theta(t)^T = [k(t) \theta_1^T(t) \theta_0(t) \theta_2^T(t)]$ $\omega(t) = [r(t) \omega_1^T(t) y_p(t) \omega_2^T(t)]$
Señales Auxiliares	$\dot{\omega}_1(t) = \Lambda\omega_1(t) + \bar{u}(t)$ $\dot{\omega}_2(t) = \Lambda\omega_2(t) + \bar{y}_p(t)$ $\lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{n-1} \end{bmatrix}$ $l = [\ell_1 \ \dots \ \dots \ \ell_{n-1}]^T$
Error de Salida	$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t)$
Error Auxiliar	$e_2(t) = \theta^T(t)\bar{\omega}(t) - \bar{u}(t)$
Error Aumentado	$\epsilon(t) = e_1(t) + k_1(t)e_2(t)$
Otras Señales	$\bar{u}(t) = G_m(s)I_{2n}u(t)$ $\bar{\omega}(t) = G_m(s)I_{2n}\omega(t)$
Leyes Adaptativas	$\dot{\theta}^\alpha(t) = -\gamma \frac{\epsilon(t)\bar{\omega}(t)}{1 + \bar{\omega}(t)\bar{\omega}^T(t)}$ $\dot{k}_1^\alpha(t) = -\gamma \frac{\epsilon(t)e_2(t)}{1 + \bar{\omega}(t)\bar{\omega}^T(t)}$

2.3. Algoritmos Genéticos

AG es un método utilizado para resolver problemas de optimización, tanto con restricciones o sin restricciones y se sustenta en el concepto de la selección natural, cuyo proceso se basa en la evolución biológica (Goldberg, 1989).

En el método de optimización AG se modifica repetidamente una población de posibles soluciones individuales. En cada paso, el algoritmo genético selecciona individuos al azar de la población actual y los denomina “padres”, los cuales son utilizados para producir los “hijos” de la próxima generación. Después de varias generaciones, la población “evoluciona” mediante una serie de mecanismos (cruzamiento, mutación etc.) hacia una solución óptima (Holland, 1992). Estos algoritmos pueden ser aplicados para resolver una variedad de problemas de optimización que no son muy adecuados para los algoritmos de optimización estándar, incluyendo problemas en los que la función objetivo es discontinua, no diferenciable, estocástica o altamente no lineal.

El algoritmo genético utiliza tres tipos principales de normas en cada paso para crear la próxima generación de la población actual:

- Las reglas de selección, que eligen a los individuos llamados padres, que contribuyen a la población en la próxima generación.
- Las reglas de cruzamiento, que combinan dos padres para formar hijos para la próxima generación.
- Las reglas de mutación, que aplican cambios al azar a los padres individuales para producir los descendientes.

El proceso general se lleva adelante restringiendo el espacio de búsqueda mediante la definición de intervalos para los parámetros que se desea optimizar, tal como se menciona en la Sección 3.1.

Para conceptos más detallados acerca de los pasos específicos que sigue el algoritmo genético usado en este estudio, se puede revisar (MathWork, 2014) que proporciona la Toolbox de simulación MATLAB de MathWorks. Para la aplicación específica al RAV, el lector es referido a (Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud, 2013).

2.4. Regulador Automático de Voltaje

El RAV es un sistema cuya tarea es mantener constante la tensión en bornes del generador a través del sistema de excitación de la máquina. Esta acción de control hace que el voltaje sea igual al valor establecido por la referencia (Chapman, 2006). El modelo lineal simplificado del RAV es representado en la Figura 2.

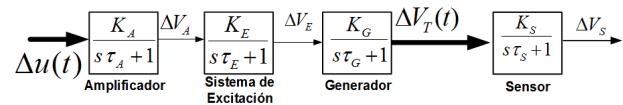


Figura 2: Esquema general del RAV usando un modelo lineal simplificado del generador.

Como se muestra en la Figura 2, el diagrama de bloques asociado al modelo del generador hace algunas suposiciones para obtener el modelo simplificado del generador, el cual considera la relación que existe entre el voltaje en bornes y su voltaje de campo (Kundur, 1994). El RAV simplificado, considera además, 3 componentes; el amplificador, el excitador y el sensor (Mukherjee y Ghoshal, 2007), cuyos parámetros serán definidos más adelante en la Sección 3.

3. Diseño de la Metodología

En este trabajo de investigación se propone utilizar una técnica de control asociada a una estrategia de optimización de los RAV, para de esa forma mejorar los resultados obtenidos en la literatura, en términos de índices de rendimiento propuestos por otros autores. Para cumplir con este objetivo, a continuación se detalla la técnica propuesta.

3.1. Definición de la función objetivo y parámetros del modelo RAV

Con el fin de encontrar el mejor rendimiento del controlador y basado en (Zamani et al., 2009) y (Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud, 2013), la función objetivo (FO) o función de costo utilizada para nuestro estudio es mostrada a continuación.

$$FO = (w_1 O_s)^2 + w_2 t_s^2 + \frac{w_3}{(\max(\frac{dv}{dt}))^2} \quad (3)$$

Implícitamente la ecuación (3) contiene los parámetros de diseño del controlador CAOFMR $[\alpha^T \gamma^T] \in \mathbb{R}^{10}$ restringidos a $0 < \alpha \leq 2$ y $0 < \gamma \leq 9 \times 10^8$, tal como se explica más adelante.

El intervalo de tiempo que se considera para evaluar la FO es $t_i = 0$ y $t_f = 10[s]$. Por otro lado, O_s es el sobrepaso del sistema controlado asociado a la respuesta a un escalón del voltaje de referencia y t_s es el tiempo de establecimiento de la respuesta del sistema controlado. $\max(dv/dt)$ denota el valor máximo de la derivada de la señal de voltaje medida en los bornes del generador, el cual minimiza de manera implícita el tiempo de crecimiento de la señal del sistema bajo control. En cuanto a los factores de ponderación w_i con $i = 1, 2, 3$ son fijados por el diseñador. En este estudio los valores fueron extraídos de (Chatterjee et al., 2009) y adoptan los valores de $w_1 = 10000$, $w_2 = 1$ y $w_3 = 0,001$.

Cabe destacar además, que algunos índices de rendimiento adicionales son propuestos para determinar la eficiencia de cada controlador. Estos índices son reportados en (Panda et al., 2012), donde la integral del valor absoluto del error multiplicada por el tiempo (ITAE), la integral del valor absoluto del error (IAE), la integral del cuadrado del error multiplicada por el tiempo (ITSE) y la integral del cuadrado del error (ISE) son tomados en cuenta para validar los resultados obtenidos por cada caso de estudio.

Tal como se mencionó en la Sección 2.4, el modelo utilizado en este estudio, corresponde al de la Figura 2, donde los parámetros escogidos son: $K_A = 10$, $\tau_A = 0,1[s]$, $K_E = 1$, $\tau_E = 0,4[s]$, $K_G = 0,7$, $\tau_G = 1[s]$, $K_S = 1$, y $\tau_S = 0,01[s]$. Estos parámetros fueron tomados de la referencia (Chatterjee et al., 2009).

La función de transferencia en lazo abierto del RAV en este caso de estudio, corresponde a un modelo de 4^{to} orden. Esta característica hace que el controlador CAOFMR tenga 9 parámetros para ajustar y 18 parámetros para optimizar (órdenes y ganancias adaptativas). Sin embargo, de acuerdo a Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud (2013), el modelo del RAV puede ser simplificado a un sistema de orden 2, si se desprecia la dinámica del sensor, debido a su rápida dinámica. Con ello el CAOFMR quedará configurado con 5 parámetros adaptables y 10 parámetros a optimizar.

En cuanto a los parámetros de las señales auxiliares y el modelo de referencia, por motivos de comparación se utilizan los siguientes valores extraídos de (Chatterjee et al., 2009): $b_0 = 7$, $a_4 = 0,0004$, $a_3 = 0,0454$, $a_2 = 0,555$, $a_1 = 1,51$, $a_0 = 1$, $\Lambda = -20$, $\xi = 1$, satisfaciendo las condiciones indicadas en Narendra y Annaswamy (2005). En cuanto a los parámetros del modelo de referencia para esta etapa, se utilizan la siguiente función de transferencia

$$G_{m2} = \frac{630}{21s^3 + 159,8s^2 + 524,8s + 630} \quad (4)$$

Para el proceso de optimización, los parámetros y condiciones para el algoritmo de optimización AG utilizado en este artículo son definidos a continuación.

Para el método AG, consideramos los parámetros por defecto de la función *ga* de MATLAB adicionando para el orden de aproximación de (2), $N = 10$. Las ganancias del controlador empleado y los órdenes de derivación de las leyes de ajuste están sujetos a las restricciones $0 < \gamma \leq 9 \times 10^8$ y $0 < \alpha \leq 2$. Se considera además un número máximo de iteraciones $iter_{max} = 1000$ y un tiempo de simulación $t_f = 10[s]$.

4. Análisis Comparativo de Resultados

Con el diseño explicado en la Sección 3, se presentan aquí los resultados de las simulaciones para CAOFMR_{AG} e OEPID_{AG}. Los mejores parámetros encontrados por el algoritmo de optimización AG son presentados en la Tabla 2 y serán comparados con los resultados obtenidos por el controlador OEPID_{AG} en (Mukherjee y Ghoshal, 2007).

La Figura 3 muestra la respuesta del sistema bajo control cuando se aplica un escalón unitario del voltaje medido en bornes del generador.

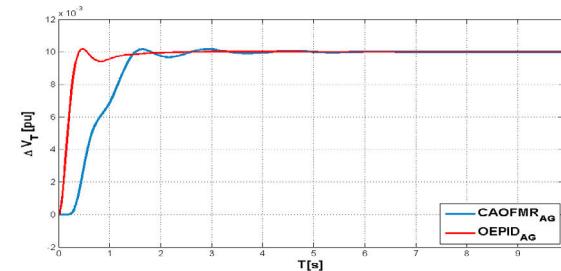


Figura 3: Respuesta al escalón del sistema controlado medida en bornes del generador usando CAOFMR_{AG} y OEPID_{AG}.

En la Figura 3 se comparan las técnicas de control correspondientes a (CAOFMR_{AG} y OEPID_{AG}). La primera de ellas corresponde a la propuesta realizada en este estudio y la segunda fue extraída de la literatura (Chatterjee et al., 2009). De la Figura 3 se destaca el sobreceso cero para el controlador OEPID_{AG}. Las ganancias y órdenes de las leyes de ajuste fueron sintonizadas por el algoritmo AG, el cual hace que el sistema tenga un menor tiempo de establecimiento t_s . Los parámetros del controlador OEPID_{AG} utilizados son; $K_p = 0,9453$, $K_i = 0,62484$ y $K_d = 0,3750$.

De la Figura 3 se puede observar que el tiempo de establecimiento t_s , del mejor resultado obtenido en este estudio con el CAOFMR_{AG}, no mejora el tiempo de establecimiento del sistema controlado por OEPID_{AG} de (Chatterjee et al., 2009). Sin embargo, las bondades del control adaptable se ven reflejadas cuando existen incertidumbres en el modelo. Estas variaciones serán estudiadas más adelante. En ese sentido el t_s del controlador OEPID_{AG} es menor en un 6,44 % que el que presenta el CAOFMR_{AG}.

Tabla 2: Órdenes y ganancias de las leyes adaptativas del CAOFMR.

	órdenes (α)					Ganancias (γ)					$FO(x)$
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
FOMRAC	0,8680	1,2151	0,0365	0,0193	1,1052	3,53E+08	5,82E+08	4,92E+08	8,25E+08	7,01E+08	2,37E+08

El voltaje en los bornes del generador, es controlado mediante el voltaje inducido en el rotor. Este voltaje es $\Delta V_E(t)$, el cual es medido para cada técnica de control y mostrado en la Figura 4. El OEPID_{AG}, que es la mejor respuesta encontrada en la literatura para este caso de estudio, es alrededor del 100 % mayor en relación al CAOFMR_{AG}, siendo éste el costo asociado a la mejora. Sin embargo, la magnitud de esta acción de control está aún dentro del rango de operación de los sistemas de excitación.

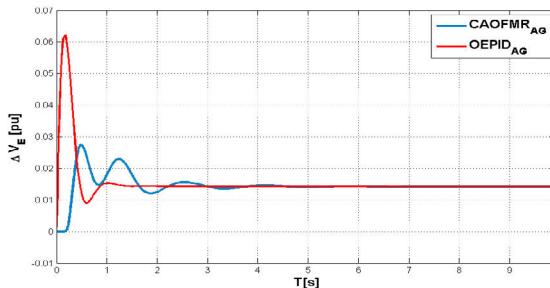
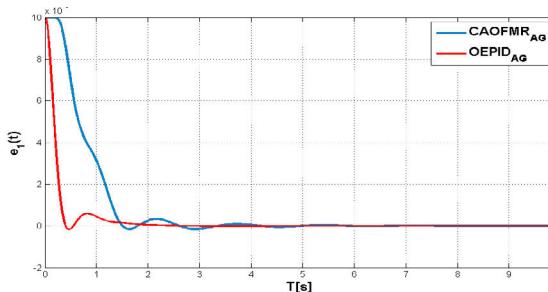


Figura 4: Señal de control generada por el sistema de excitación.

Figura 5: Convergencia del error de seguimiento de referencia de los controladores CAOFMR_{AG} y OEPID_{AG}.

Como se mencionó en la Sección 3, el modelo del generador es estructurado para pequeña señal, por lo cual, $\Delta V_r(t)=0.01\text{pu}$, significa variaciones en el voltaje de referencia del 1 % con respecto al valor nominal. En la Tabla 3 se muestra el detalle de los índices de rendimiento asociados a cada técnica de control con el respectivo método de optimización AG. Estos son los índices conocidos como IAE, ITAE, ISE y ITSE, que ya fueron definidos anteriormente en la Sección 3.1 y resumen el comportamiento del error en toda la ventana de tiempo, es decir $[0, 10]$ [s], tanto para el control CAOFMR_{AG} como para el controlador OEPID_{AG}.

El controlador CAOFMR_{AG} presenta mejoras significativas, basadas en relación a la minimización de la función objetivo (3), tal como se mencionó en los párrafos anteriores. Explícitamente, en la función objetivo se considera el sobreceso O_s ,

Tabla 3: Índices de rendimiento asociadas a cada técnica de control.

	CAOFMR	OEPID
	AG	AG
t_r [s]	0.93	0.2454
t_s [s]	1.38	12.952
O_s [%]	1.54	18.472
$\max(dv/dt)$	0.02	0.0040
$\sum(\text{Indices})$	0.01	0.003
FO	2.37E + 08	3.41 E + 08

el cual es muy importante para los sistemas de potencia. En ese sentido, el CAOFMR_{AG} mejora considerablemente este parámetro, ya que el O_s es 16,63 % menor que el O_s del mejor valor encontrado en la literatura técnica, y que corresponde al caso del controlador tipo OEPID de parámetros fijos, reportado en (Mukherjee y Ghoshal, 2007).

Considerando que son 2 técnicas de control distintas, se analizan también los otros 4 índices de rendimiento adicionales (IAE, ITAE, ISE y ITSE) donde el error es $e_c(t) = r(t) - y_p(t)$, siendo $r(t)$ la referencia. Estos índices analizan el error de 4 formas distintas, cuya sumatoria es $\sum(\text{Indices})$ en la Tabla 3, y nos indica el comportamiento del error para el intervalo de tiempo $[0, 10]$ [s]. El máximo de ellos es para el OEPID_{AG}, que también fue reportado en (Mukherjee y Ghoshal, 2007), y es mostrado en la Tabla 3.

De manera general, la técnica de control CAOFMR cuyas ganancias y órdenes de derivación de las leyes de ajuste fueron optimizadas por el algoritmo AG, propuesto en este artículo, presenta mejoras en términos de la función objetivo (3), como se aprecia en la Tabla 3. No obstante, los beneficios reales de este tipo de control serán presentados a continuación.

4.1. Variaciones en los parámetros del sistema

Cuando las condiciones de la carga varían, estos cambios modifican los parámetros del sistema con respecto a los valores nominales. Por ello se realizan pruebas de robustez para analizar el rendimiento de los controladores basados en la evaluación de la FO y la sumatoria de los criterios adicionales (IAE, ITAE, ISE y ITSE) establecidos en este artículo.

El sistema controlado está trabajando en condiciones normales, sin embargo en $T = 10$ [s] ocurren variaciones en los parámetros de la carga, cambiando los valores desde $K_G = 0, 7$ y $\tau_G = 1$ [s] a 2 y 4 respectivamente. Por otro lado, de acuerdo a (Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud, 2013), los parámetros del sistema de excitación también se ven afectados por diferentes motivos. Entonces la función de transferencia que lo representa, cambia de $\frac{1}{4s+1}$ a $\frac{1}{5.8s+1}$. Estos cambios significan que el sistema es llevado a situaciones de estrés máximo, lo cual nos permitirá analizar la eficiencia de los controladores frente a esta situación.

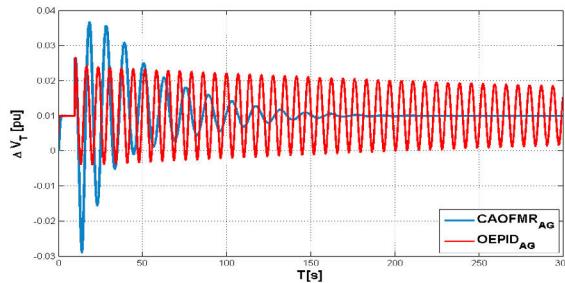


Figura 6: Sistema Controlado por CAOFMR_{AG} y OEPID, frente a variaciones en los parámetros del sistema.

La Figura 6 muestra el comportamiento del controlador propuesto CAOFMR_{AG} en relación al mejor controlador encontrado en la literatura técnica para esta estrategia de optimización (OEPID_{AG}).

El controlador CAOFMR_{AG}, cuyas ganancias y órdenes de derivación fueron optimizadas por el algoritmo AG, son utilizadas para realizar estas pruebas. De acuerdo a la literatura reportada en (Narendra y Annaswamy, 2005), se sabe que los parámetros del controlador CARM de orden entero se ajustan dependiendo del error de la Tabla 1. Sin embargo, los parámetros del controlador PID se mantienen constantes sin importar las variaciones o perturbaciones que existan en el sistema. Por lo tanto, se propuso utilizar la misma estructura del CARM de orden entero, adicionando derivadas de orden fraccionario a las leyes de ajuste. En términos de la FO (3), el sistema controlado por CAOFMR_{AG} es de $7,16E + 12$. En el caso del sistema controlado por OEPID_{AG}, dicho valor no puede ser determinado ya que en el intervalo de tiempo asignado de $[0, 300]$ [s] el sistema no logra estabilizarse todavía.

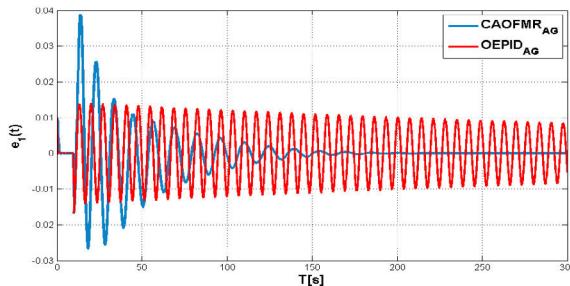


Figura 7: Voltaje de campo medido cuando existen cambios en los parámetros del sistema.

La Figura 7 muestra el comportamiento del voltaje del sistema de excitación, donde se aprecia que con el sistema controlado por CAOFMR_{AG} la magnitud de voltaje se encuentra dentro de un rango razonable y finalmente vuelve a su valor nominal. En el caso de usar el OEPID_{AG} el rango de variación también es razonable pero el voltaje transcurridos 300 [s] aún no se estabiliza en un valor determinado.

Para verificar el rendimiento de cada técnica de control, se evalúan ambos esquemas en términos del error de referencia. Como puede observarse de la Figura 8, no todos los controla-

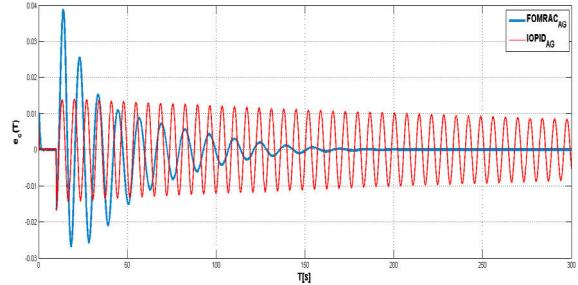


Figura 8: Voltaje de campo medido cuando existen cambios en los parámetros del sistema.

dores analizados logran cumplir con su objetivo en el sentido de satisfacer que el $e_c(t)$ tienda al origen en un tiempo razonable.

Por lo tanto, en términos de la sumatoria de los índices de rendimiento (IAE, ITAE, ISE y ITSE) y considerando el mismo intervalo de tiempo $[0, 300]$ [s], el sistema controlado por CAOFMR_{AG} mejora en un 85,11 % al sistema controlado usando el OEPID_{AG} propuesto en (Mukherjee y Ghoshal, 2007), el cual no logra ser estabilizado.

Si bien, el controlador OEPID_{AG} presenta un mejor desempeño cuando los parámetros de la planta permanecen constantes (Ver la Tabla 2) en términos de tiempo de establecimiento t_s y de subida t_r , con respecto al sistema controlado por CAOFMR_{AG}, las ventajas más notables de este último se muestran en las pruebas de robustez frente a variaciones del sistema de potencia RAV.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En base a todos los resultados obtenidos de este estudio se pueden obtener algunas conclusiones de manera general, las cuales son presentadas en esta sección. Así mismo, es posible definir algunas líneas futuras de investigación que se derivan de este trabajo.

Se ha presentado un esquema de control adaptable de orden fraccionario por modelo de referencia (CAOFMR_{AG}), el cual considera la optimización de sus parámetros de diseño mediante el empleo de algoritmos genéticos. Se ha aplicado al caso de reguladores automáticos de voltaje (RAV) en sistemas eléctricos de partencia. Los algoritmos genéticos fueron considerados como técnicas de optimización, con respecto a la minimización de una función objetivo FO asociada al modelo lineal simplificado del sistema RAV.

El análisis de los resultados establece que la respuesta del sistema controlado frente a una variación del 1 % del voltaje de referencia y considerando el intervalo de tiempo $[0, 10]$ [s], el controlador CAOFMR_{AG} propuesto en este trabajo, mejora en 16,62 % el O_s del mejor resultado encontrado en la literatura técnica que corresponde al caso de un controlador OEPID_{AG} reportado en (Mukherjee y Ghoshal, 2007). Al ser la FO una función de costo no lineal y de alta dimensionalidad, el CAOFMR_{AG} demuestra sus ventajas en esta situación, ya que mejora en un 30,48 % la minimización de la FO en relación al

controlador OEPID_{AG} encontrado en la literatura (Mukherjee y Ghoshal, 2007).

Por otro lado, para el análisis de las respuestas del sistema frente a variaciones en los parámetros del sistema, se consideran además de la FO, algunos índices de rendimiento adicionales que toman en cuenta el comportamiento del error de control (IAE, ITAE, ISE y ITSE) y que determinan el desempeño de los controladores. En ese sentido, nuevamente el CAOFMR_{AG} mejora en un 85,12 % en relación al controlador OEPID_{AG}. Es en este tipo de situaciones donde el controlador de tipo adaptativo es mucho mejor en relación a aquellos controladores con parámetros fijos. Esta cualidad representa las principales ventajas del controlador CAOFMR_{AG} y hacen evidentes los beneficios de su aplicación.

Los beneficios del control adaptable son apreciados cuando existen variaciones en los parámetros del sistema u otras variaciones no consideradas en el diseño del controlador. Por ello se propone como línea de investigación de continuidad, introducir variables que midan estos aspectos dentro de la función de costo. Así, además de conseguir las características de robustez intrínsecas que posee el CAOFMR frente a perturbaciones sobre el sistema. A la vez, se estará optimizando su rendimiento si se introducen p.ej. mediciones del margen de fase y de ganancia del sistema controlado dentro de las FO a minimizar. Por otro lado, existen en la actualidad métodos bastante confiables para implementar operadores fraccionarios, lo que permitirá la implementación de sistemas fraccionarios a los estabilizadores de flujo de potencia (PSS) de los sistemas de generación eléctrica. Esto significa, inclusión de PSS de tipo fraccionario, cuyos parámetros puedan ser ajustados utilizando estrategias de optimización en adición a un sistema RAV como el presentado en este artículo.

English Summary

Fractional Adaptive Control Optimized by Genetic Algorithms, Applied to Automatic Voltage Regulators.

Abstract

The technique Fractional Order Model Reference Adaptive Control (FOMRAC) applied to an Automatic Voltage Regulator (AVR) is presented in this paper. The work is focused on tuning the adaptive gains and the derivation order of the adaptive laws of the FOMRAC, determined through the minimization of a criterion function defined for the simplified model of the AVR, by means of the genetic algorithm (GA) optimization technique. Based on the criterion function proposed by other authors a simulated comparative study is performed, comparing the proposed methodology with the integer order PID control reported in (Zamani et al., 2009). It is shown that the FOMRAC with parameters optimized by GA provides better results in terms of robustness under parameters variations of the system under control and improvements in the convergence speed of the control error.

Keywords:

Fractional Order Model Reference Adaptive, Model Reference Adaptive Control, Fractional Control, Automatic Voltage Regulator, Genetic Algorithms, Genetic Algorithm Optimization.

Agradecimientos

Los resultados informados en este trabajo fueron financiados por CONICYT-Chile, a través de los proyectos Fondecyt 1120453 y del Programa de Financiamiento Basal "Centro Avanzado de Tecnología para la Minería" FB0809.

Referencias

- Aguila-Camacho, N., Duarte-Mermoud, M. A., 2013. Fractional adaptive control for an automatic voltage regulator. *ISA transactions* 52 (6), 807–15.
- Chapman, S. J., 2006. *Maquinas Electricas*. McGraw Hill.
- Chatterjee, A., Mukherjee, V., Ghoshal, S., 2009. Velocity relaxed and craziness-based swarm optimized intelligent PID and PSS controlled AVR system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 31 (7-8), 323–333.
- Conceicao, I., 2008. Quantum Gaussian Particle Swarm Optimization Approach for PID Controller Design in AVR System. En: *Proceedings International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. No. 2. pp. 3708–3713.
- Gaing, Z.-L., 2004. A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19 (2), 384–391.
- Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, MA 3.
- Holland, J. H., 1992. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press.
- Kilbas, A. A., Srivastava, H. M., Trujillo, J. J., 2006. *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Elsevier B.V, San Diego, USA.
- Kim, D., Park, J., 2005. Intelligent PID Controller Tuning of AVR System Using GA and PSO. En: Huang, D.-S., Zhang, X.-P., Huang, G.-B. (Eds.), *Advances in Intelligent Computing. Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 366–375.
- Kundur, P., 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Palo Alto, California.
- MathWork, 2014. Genetic Algorithm. URL: <http://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html>
- Mitra, P., Maulik, S., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., 2007. ANFIS based automatic voltage regulator with hybrid learning algorithm. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference 1 (1), 397–401.
- Mukherjee, V., Ghoshal, S., 2007. Comparison of intelligent fuzzy based AGC coordinated PID controlled and PSS controlled AVR system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 29 (9), 679–689.
- Narendra, K. S., Annaswamy, A. M., 2005. *Stable Adaptive Systems*. Dover Publications Inc.
- Oustaloup, A., 1991. *La commande CRONE: commande robuste d'ordre non entier*. Hermès.
- Panda, S., Sahu, B., Mohanty, P., 2012. Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute* 349 (8), 2609–2625.
- Valério, D., da Costa, J. S., 2004. Ninteger: a non-integer control toolbox for MatLab. En: *Proceedings of the First IFAC Workshop on Fractional Differentiation and Applications*, Bordeaux, France. pp. 208–213.
- Zamani, M., Karimi-Ghartemani, M., Sadati, N., Parniani, M., 2009. Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. *Control Engineering Practice* 17 (12), 1380–1387.