

Ajuste coordinado de controladores de sistemas eléctricos de potencia utilizando algoritmos evolutivos paralelos

Rubén Dario Kang¹, Eustaquio Alcides Martínez² y Enrique Chaparro Viveros³

^{1,2}Facultad Politécnica, Universidad Nacional del Este, Ciudad del Este, Paraguay

³Planeamiento e Instrucciones de la Operación, Itaipu Binacional, Hernandarias, Paraguay

¹ruben.kang@fpune.edu.py, ²amartinez@fpune.edu.py, ³cver@itaipu.gov.py, enriquerchv@fpune.edu.py

Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos por sistemas de transmisión altamente interconectados, operan confiablemente y proveen energía eléctrica de alta calidad a los centros de consumo. Sin embargo, las distancias eléctricas entre subestaciones se reducen debido al sistema mallado de interconexión, y cuando en una región ocurre una gran contingencia, ésta afecta rápidamente y con la misma intensidad a regiones vecinas, produciendo oscilaciones electromecánicas con bajo o negativo amortiguamiento, acompañado de degradación significativa y continua del perfil de tensión. Por esta razón, en el presente trabajo se propone un método de ajuste coordinado de los parámetros dinámicos de los controladores de la excitatriz de cada generador, y de un determinado grupo de compensadores estáticos de reactivos localizados en subestaciones sensibles a la tensión, para el control de la potencia reactiva. El referido problema de ajuste coordinado fue considerado como un problema de optimización, maximizando el mínimo coeficiente de amortiguamiento del sistema, considerando diversas condiciones de operación críticas. En el proceso de optimización fue utilizado un algoritmo genético, que debido a la gran dimensión y complejidad del problema, fue adaptado para su computación paralela.

Descriptores: oscilaciones electromecánicas, coeficiente de amortiguamiento, controladores de la excitatriz, compensadores estáticos de reactivos, algoritmos genéticos, computación paralela.

Abstract

Electric power systems are composed of highly interconnected transmission systems that operate reliably and provide high quality electric power to consumption centers. However, the electrical distances between substations are reduced due to the meshed interconnection system, and when a large contingency occurs in a region, it affects rapidly and with the same intensity to neighboring regions, producing electromechanical oscillations with low or negative damping, accompanied by significant and continuous degradation of the voltage profile. For this reason, in the present work, a method is proposed for a coordinated adjustment of the dynamic parameters of the exciter controllers from each generator, and of the static reactive compensators of a certain group located in voltage sensitive substations, for reactive power control. The referred coordinated adjustment problem was considered as an optimization problem, maximizing the minimum damping coefficient of the system, considering several critical operating conditions. A genetic algorithm was used in the optimization process, which, due to the large size and complexity of the problem, was adapted for its parallel computing.

Keywords: electromechanical oscillations, damping coefficient, exciter controllers, static reactant compensators, genetic algorithms, parallel computation.

1. Introducción

Todo sistema eléctrico de potencia (SEP) está caracterizado por un sistema de transmisión altamente interconectado, entre subestaciones y centrales de generación, opera confiablemente y provee energía eléctrica de alta calidad a los centros

de consumo. Sin embargo, debido a su interconexión mallada, la distancia eléctrica entre las subestaciones se reduce, de manera que cualquier contingencia grande que ocurra en una región (desconexión de importantes líneas de transmisión, salida de operación de grupos de generadores, entre

otros), afecta rápidamente a las subestaciones vecinas, con intensidad similar, produciendo oscilaciones electromecánicas y variaciones en el perfil de voltaje del sistema eléctrico [1]. Si los parámetros de los controladores de la excitatriz de cada generador y los parámetros dinámicos de cada compensador estático de reactivos (CER), no están debidamente ajustados teniendo en cuenta diversas condiciones de operación debido a grandes contingencias, las oscilaciones electromecánicas son poco amortiguadas, o incluso no amortiguadas, perdiéndose la estabilidad del sistema [2].

Además, con el progresivo incremento de la demanda, la mayoría de los SEP operan cerca de sus límites de sobrecarga, requiriendo un desempeño robusto de los controladores del generador y de los CER para mantener la estabilidad angular y de voltaje en diferentes escenarios de operación críticos.

Las oscilaciones electromecánicas están asociadas a las variaciones de potencia activa y del ángulo del rotor de cada generador, que son amortiguadas a través de estabilizadores de sistemas de potencia (ESP), los cuales dan una señal adicional a la tensión de referencia del regulador automático de tensión (RAT), localizados en la excitatriz de los generadores. De esa manera, el ESP actúa en conjunto con el RAT, para amortiguar oscilaciones electromecánicas, y a la vez, regular la tensión terminal del generador [1].

1.1. Planteo del problema

En la literatura científica, se encuentran trabajos que implementaron métodos para ajustar coordinadamente cada RAT, ESP y CER, utilizando métodos determinísticos [3], y métodos metaheurísticos [4]. Sin embargo, cuando son considerados sistemas eléctricos de gran porte, los referidos métodos requieren grandes recursos computacionales para estudios de planificación de la operación y la expansión del sistema eléctrico.

1.2. Objetivo

Para afrontar la complejidad de la planificación de operación y expansión de sistemas eléctricos de gran porte, en el presente trabajo se propone como objetivo, *implementar un método computacional para ajuste simultáneo, coordinado y óptimo de parámetros del RAT y del ESP, localizados en la excitatriz de cada generador; así como también los parámetros de cada CER instalado en un SEP, considerando diversas condiciones de operación crítica; mediante algoritmo genético (AG),*

¹Sp: del inglés *speed up* que significa aumento de rapidez.

adaptando la versión secuencial (AGS) típica de este algoritmo para computación paralela (AGP).

El propósito enunciado se apoya en la comprobada eficacia de los AG para optimizar problemas de optimización complejos, representando sistemas dinámicos e industriales [15]. Además, con la paralelización del algoritmo genético se pretende reducir el tiempo de cómputo mediante el aumento de la velocidad de procesamiento Sp^1 para su aplicación a sistemas eléctricos de gran porte [6]. Para validar el método de ajuste coordinado propuesto, fue considerado el sistema eléctrico de medio porte New England.

1.3. Modelos matemáticos de los controladores

1.3.1 Regulador automático de tensión

Fue considerado un modelo de RAT de primer orden, tal como se ilustra en la figura 1. El referido modelo corresponde a una variante del IEEE ST1A [7]. La ganancia K_A y la constante de tiempo T_A son variables que deben ser ajustadas con el procedimiento propuesto.

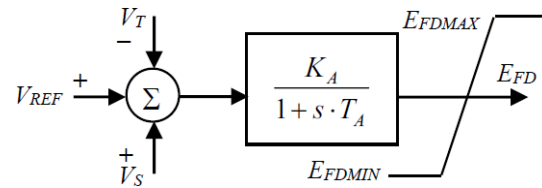


Figura 1. Modelo de primer orden del RAT.

1.3.2. Estabilizador de sistemas de potencia

El modelo de ESP utilizado en el presente trabajo se ilustra en la figura 2, el cual, posee una ganancia, K_S , y dos bloques idénticos de avance-atraso [7]. La señal de entrada del ESP es la velocidad angular del rotor (ω). Las constantes de tiempo T_1 y T_2 de los bloques de avance-atraso son calculadas por el método de ajuste propuesto. La constante de tiempo, T_w del bloque *Washout*, se considera conocida y está fijada en 3 s ($T_w = 3$ s). Los parámetros del ESP ajustados son: K_S , T_1 , y T_2 . La señal de salida del ESP, V_S , corresponde al valor de tensión añadida a la tensión de referencia del RAT, V_{REF} .

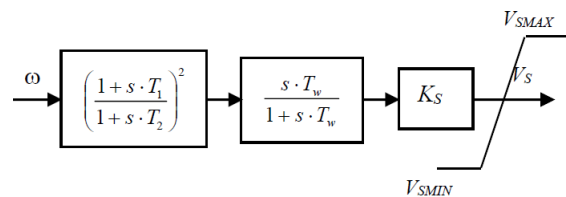


Figura 2. Modelo del ESP.

1.3.3. Compensador estático de reactivos

El modelo de primer orden del CER está ilustrado en la figura 3, en el cual, la ganancia K_C y la constante de tiempo T_C son los parámetros dinámicos que deben ser ajustados. La señal de entrada V_C representa la tensión de la barra monitoreada, correspondiente a la subestación donde el CER está instalado. Esa tensión monitoreada es comparada con la tensión de referencia del regulador del CER, V_{RCER} , y produce una señal de control B_C , correspondiente a la susceptancia variable del compensador. Dicha susceptancia determina la necesaria potencia reactiva que debe ser inyectada al SEP, a través del CER, para controlar la tensión [8].

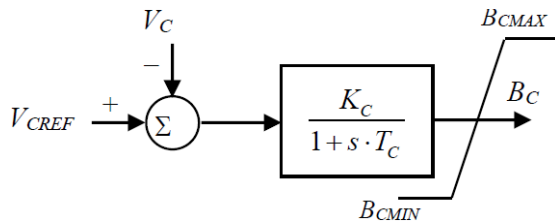


Figura 3. Modelo del CER.

Los valores de B_C pueden variar dentro del siguiente rango de valores: $B_{CMIN} \leq B_C \leq B_{CMAX}$, correspondientes a la susceptancia mínima y máxima, respectivamente. Las magnitudes V_{RCER} , B_{CMIN} , y B_{CMAX} determinan el rango de valores óptimos entre los cuales se puede inyectar la necesaria y correcta potencia reactiva al sistema, con la finalidad de mantener un buen perfil de tensiones ante un variado escenario de operación. Esas magnitudes también pueden ser optimizadas y ajustadas previamente siguiendo el procedimiento descrito en [9].

2. Método

Para estudios de estabilidad de pequeña señal, el SEP es representado a través de las ecuaciones de espacio de estado [1]:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las sub-matrices J_1 , J_2 , J_3 y J_4 , en la ecuación 1, conforman el Jacobiano expandido del SEP. La expresión matemática 1 puede simplificarse, para obtener la matriz de estado del SEP, para una condición específica de operación.

$$A_{CL} = J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3 \quad (2)$$

Entonces, la matriz A_{CL} contiene los coeficientes que multiplican a las variables de estado del SEP. Si la matriz A_{CL} contiene a los parámetros

de los ESP y de los CER, entonces dicha matriz se denomina matriz de estado de lazo cerrado.

En el presente trabajo, la matriz A_{CL} contiene los coeficientes de las ecuaciones diferenciales del RAT, del ESP y de los compensadores estáticos:

$$\dot{E}_{FD} = (V_S + V_{REF} - V_{TR} - V_{TI}) \cdot \frac{K_A}{T_A} \cdot \frac{E_{FD}}{T_A} \quad (3)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_2} \cdot x_1 + \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) \cdot \omega \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T_2} \cdot x_2 + \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) \cdot x_1 \quad (5)$$

$$x_3 = K_S \cdot x_2 \quad (6)$$

$$\dot{B} = -\frac{1}{T_C} \cdot B + \frac{K_C}{T_C} \cdot V_{CREF} \quad (7)$$

En el procedimiento de ajuste coordinado propuesto, los coeficientes de las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7 son modificados directamente dentro de la matriz A_{CL} , por el AG a través de sus operadores genéticos.

Entonces, el procedimiento de ajuste coordinado fue considerado como problema de optimización, cuya función objetivo está relacionada con el mínimo coeficiente de amortiguamiento, ζ_{MIN} , obtenido de la matriz de estado de malla cerrada, A_{CL} , definida para cada condición de operación crítica considerada.

De esa manera, para cada condición de operación i , se tiene la matriz de estado $A_{CL,i}$, tal que $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ donde m es la cantidad de escenarios de operación críticos considerados, y por consiguiente, se tiene el correspondiente coeficiente mínimo de amortiguamiento, $\zeta_{MIN,i}$, para el escenario de operación. Por consiguiente, el coeficiente de amortiguamiento mínimo, considerando todos esos escenarios de operación, se calcula de la siguiente manera:

$$\zeta_{MIN} = \min\{\zeta_{MIN,1}, \zeta_{MIN,2}, \dots, \zeta_{MIN,m}\} \quad (8)$$

La ecuación 8 asegura la robustez en el ajuste coordinado, debido a que cuanto mayor sea el valor de ζ_{MIN} , el SEP posee amortiguamiento más rápido para las oscilaciones electromecánicas y presenta un buen perfil de tensiones frente a variados escenarios de operación. Además, para obtener el i -ésimo coeficiente de amortiguamiento mínimo, $\zeta_{MIN,i}$, se utiliza el método QR de cálculo de autovalores [10], tal que:

$$\zeta_{MIN,i} = \min\{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n\}_i \quad (9)$$

donde n es la dimensión de la matriz de estado de malla cerrada $A_{CL,i}$. Entonces, la expresión matemática de la ecuación 9 está indicando la obtención de los n coeficientes de amortiguamientos, calculados de los n autovalores de la matriz de estado de lazo cerrado, asociada a la i -ésima condición de operación.

2.1. Método de ajuste coordinado implementado

Para diversas condiciones de operación, fue formulado el ajuste coordinado de controladores del SEP como problema de optimización mono-objetivo, basado en el AG. El AG fue implementado de acuerdo con el procedimiento señalado en [15].

2.1.1. Vector solución

Cada solución factible está representada por un vector que contiene los valores numéricos de los parámetros del RAT, del ESP y del CER; tal cual como se describe a continuación:

$$x_{RAT} = [K_{A,1} \ T_{A,1} \ \dots \ K_{A,p} \ T_{A,p}] \quad (10)$$

$$x_{ESP} = [K_{S,1} \ T_{1,1} \ T_{2,1} \ \dots \ K_{S,p} \ T_{1,p} \ T_{2,p}] \quad (11)$$

$$x_{CER} = [K_{C,1} \ T_{C,1} \ \dots \ K_{C,b} \ T_{C,b}] \quad (12)$$

Donde p indica el número de generadores que contiene el SEP y b representa el número de compensadores estáticos localizados en las b subestaciones seleccionadas. Las ecuaciones 10, 11 y 12, se complementan para formar el g -ésimo vector solución, tal que $g \in \{1, 2, \dots, N\} \mid N$ es el tamaño de la población del AG.

$$x_g = [x_{RAT} \ x_{ESP} \ x_{CER}]_g \quad (13)$$

La ecuación 13 muestra al g -ésimo vector solución (individuo) sobre el cual se aplican los operadores genéticos del AG para obtener nuevos individuos en cada iteración en el espacio de búsqueda, produciendo soluciones cada vez mejores. En el presente trabajo, el AG actuó sobre una población de 120 individuos ($N = 120$).

2.1.2. Función objetivo

La función objetivo, o *fitness*, asociada a cada individuo, que el AG debe maximizar consiste en el mínimo coeficiente de amortiguamiento, tal como se define a continuación:

$$fitness_g = F(x_g) = \zeta_{MIN.g} \quad (14)$$

2.1.3. Obtención de la población inicial del AG

El AG inicia el proceso de búsqueda, generando aleatoriamente un conjunto de $N-1$ individuos. Los valores numéricos de los parámetros, contenidos en cada individuo, se generan entre los siguientes límites: $100 \leq K_A \leq 400$ pu; $0,02 \leq T_A \leq 0,5$ s; $1 \leq K_S \leq 20$ pu; $0,05 \leq T_1 \leq 0,5$ s; $0,005 \leq T_2 \leq 0,05$ s; $100 \leq K_C \leq 400$ pu; $0,02 \leq T_C \leq 0,5$ s.

El individuo restante se obtiene aplicando el criterio de Nyquist para ajuste de ESP [11], manteniendo fijo los valores de los parámetros de cada RAT y CER. De esta forma, los parámetros del RAT son: $K_A = 100$ pu y $T_A = 0,05$ s, para cada generador del sistema, y $K_C = 100$ pu y $T_C = 0,5$ s, para cada CER del conjunto de compensadores considerados.

2.1.4. Operadores genéticos

Los operadores del AG implementados son [15], los seleccionados en el torneo estocástico (cinco individuos en el torneo), cruzamiento de un punto de corte, y mutación simple. Las probabilidades de cruzamiento y mutación son 0,7 y 0,01, respectivamente.

2.1.5. Tamaño de la población y criterio de parada

El tamaño de la población del AG fue $N = 120$ individuos, y el criterio de parada del mismo corresponde al máximo número de generaciones (iteraciones), que fue fijado en 100 generaciones.

2.2. AG adaptado para computación paralela

El método de ajuste coordinado implementado basado en AG y aplicado a un SEP de medio o gran porte, requiere grandes esfuerzos computacionales representados por largos tiempos de ejecución y grandes espacios de memoria RAM. Una forma para reducir el tiempo computacional y minimizar los requerimientos de memoria consiste en la adaptación del AG para su procesamiento paralelo, obteniéndose así un AG paralelo (AGP); por esta razón, en el presente trabajo se han propuesto e implementado dos estrategias para la computación paralela del AG utilizado en el procedimiento de ajuste coordinado de controladores de SEP: AGP maestro/esclavo y AGP multi-población [6].

2.2.1. AGP maestro/esclavo

En el AGP tipo maestro/esclavo, llamado AGPMS, la evaluación de *fitness* de cada uno de los individuos se realizó en los procesos esclavos [6]. La población inicial, en el AGPMS, se generó de la misma manera como fue descrita en la subsección 1.3.3.

Después de obtener la población inicial y en cada generación del AG, a cada proceso esclavo fueron enviados N_P individuos, con $N_P = N/(P-1)$. P corresponde al número de computadores activos, seleccionados para la ejecución del AGPMS en el *cluster*: computadores interconectados por una red Ethernet.

Luego de finalizar la evaluación del *fitness* en cada proceso esclavo, los resultados son enviados

al proceso maestro. La figura 4 ilustra la topología de comunicación del algoritmo AGPMS. Así también, en el AGPMS los operadores genéticos son aplicados en el proceso maestro, para obtener nuevos individuos.

La comunicación entre el proceso maestro y los procesos esclavos se realiza de forma síncrona, es decir, durante la comunicación de datos entre los procesos maestro y esclavos, el proceso iterativo del AG es comandado por el maestro, el cual lo detiene, luego lo reanuda al finalizar la transmisión de datos entre procesos.

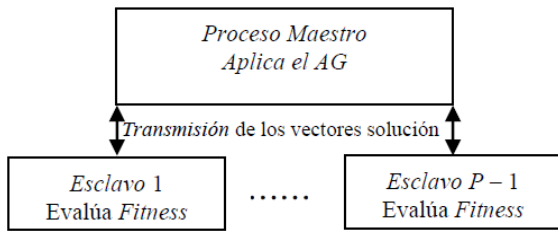


Figura 4. Esquema del AGPMS.

2.2.2. AGP multipoblación

En esta técnica de computación paralela denominada AGPMP, se implementa un AG en cada computador del *cluster*. El AG aplica los operadores genéticos sobre una población de N_P individuos, tal que $N_P = N/P$. Aquí también, cada procesador inicia la ejecución del AG generando la población inicial de la misma manera como fue descrita en la subsección 3.3. Sin embargo, para asegurar que cada población de individuos sea comparativamente diferente de la población de los otros procesos, se utiliza un valor inicial diferente para la generación de números pseudo-aleatorios [10]. La siguiente expresión matemática indica el valor inicial (semilla) diferente para alterar la secuencia de números aleatorios:

$$semilla_k = \frac{semilla_0}{P} \quad (15)$$

donde $semilla_0$ corresponde al número que inicia la secuencia de números pseudo-aleatorios del proceso 1, y $k \in \{1, 2, \dots, P\}$ | P número de procesadores del *cluster*.

La figura 5 muestra la topología de comunicación del AGPMP. La comunicación es también síncrona y se realiza durante el ciclo iterativo del AG, a cada 10 (diez) generaciones. Cada procesador envía al otro el individuo con el *fitness* más alto obtenido [6]. Cada procesador recibe $P-1$ individuos, de los cuales se escoge aquel que posea el *fitness* más alto y substituye al individuo con menor *fitness*, en dicha población. La ejecución del algoritmo AGPMP culmina cuando se hayan completado 100 generaciones.

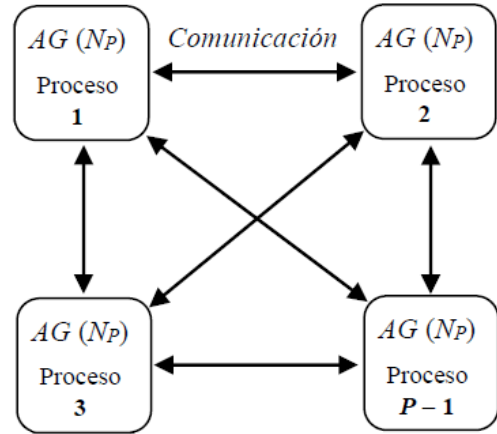


Figura 5. Esquema del AGPMP.

3. Resultados

3.1. Ambiente computacional

Para la implementación computacional fue utilizada una red de área local correspondiente a un *cluster* de 7 (siete) computadores interconectados a través de un conmutador Fast-Ethernet (ruteador) de 100 Megabits por segundo. Cada computador posee un microprocesador Intel Core i7 de 2 núcleos y memoria RAM de 2 Gigabytes. Fue utilizado el sistema operativo Linux para la plataforma computacional paralela Pelican HPC (Creel, 2012), con el cual se desarrollaron algoritmos usando funciones Message Passing Interface (MPI), para usar el protocolo y la topología de comunicación entre procesadores de la red. A su vez, todos los algoritmos secuenciales y paralelos fueron desarrollados en el lenguaje GNU Octave para Linux [12].

3.2. SEP New England

El SEP utilizado para validar el método de ajuste coordinado propuesto fue el sistema eléctrico New England, descrito en [13], el cual contiene 39 barras y 10 generadores, y cuya topología se ilustra en la figura 6. Uno de los generadores constituye un generador equivalente que representa la dinámica del sistema eléctrico New York, al cual el sistema New England está interconectado, por lo tanto deben ser ajustados los parámetros del RAT y del ESP de los nueve generadores restantes.

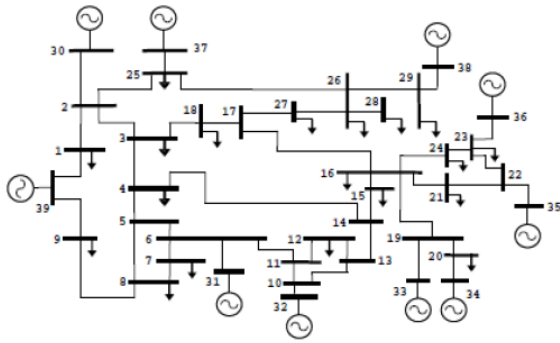


Figura 6. Sistema eléctrico New England.

A su vez, considerando el método de localización y dimensionamiento de compensadores estáticos descrito en [9], se deben ajustar los parámetros dinámicos de tres compensadores estáticos localizados en las barras 6, 7, y 20. La tabla 1 describe las condiciones de operación consideradas durante el procedimiento de ajuste de todos los controladores. Con dichas condiciones de operación se asegura la robustez del método.

Tabla 1. Condiciones de operación.

#	Descriptores
1	Caso base
2	LT* 4-14 y LT 16-17 fuera de servicio
3	LT 3-18 y LT 25-26 fuera de servicio
4	LT 6-11 fuera de servicio
5	Carga total incrementada en 10 %
6	Carga total reducida en 10 %

*LT: línea de transmisión

3.3. Resultados Numéricos

La tabla 2 muestra los resultados experimentales para el AGS y los algoritmos paralelos: AGPMS y AGPMP. En la misma tabla, F_{MAX} es el máximo *fitness* obtenido al finalizar la ejecución del AG, y *time(s)* indica el tiempo de computación, Sp es la aceleración lograda con cada algoritmo paralelo, considerando diferentes números de procesadores, con respecto a la computación del AGS, y $E(\%)$ representa la eficiencia porcentual del algoritmo paralelo.

Tabla 2. Resultados para el AGS, AGPMS y AGPMP.

AGS				
Proc	F_{MAX}	<i>time(s)</i>		
1	15,4129	2751,7		
AGPMS				
Proc	F_{MAX}	<i>time(s)</i>	Sp	$E(\%)$
2	15,5680	1384,2	1,99	99,50
4	16,0263	702,3	3,92	98,00
6	15,5732	474,8	5,80	96,97
AGPMP				
Proc	F_{MAX}	<i>time(s)</i>	Sp	$E(\%)$
2	15,7227	1400,1	1,97	98,50
4	16,5474	703,0	3,91	97,75
6	15,6748	477,3	5,77	96,17

Los números de la columna *Proc* de la tabla 2 corresponden al número de procesadores utilizados para la ejecución del algoritmo AGPMP, y el número de procesos esclavos par el algoritmo AGPMS. En el algoritmo AGPMS, como se indica en el esquema de la figura 4, un proceso maestro se encarga de aplicar el AG para la optimización, $P - 1$ procesos esclavos realizan la evaluación del *fitness* de cada individuo y luego envían sus resultados al proceso maestro.

Los valores numéricos para Sp y $E(\%)$ se calculan de la siguiente manera [14]:

$$Sp = \frac{T_{AGS}}{T_{AGP}} \quad (16)$$

$$E(\%) = \frac{Sp}{P} \times 100\% \quad (17)$$

donde T_{AGS} y T_{AGP} corresponden al mejor tiempo de la computación secuencial y el tiempo de computación del tipo AG paralelo, respectivamente.

De acuerdo con los resultados de la tabla 2, el algoritmo AGPMS reduce substancialmente el tiempo de computación, y la mínima eficiencia utilizando 6 procesos esclavos y un proceso maestro es cercano a los 97%. El mínimo coeficiente de amortiguamiento obtenido fue de 16,02 % ($F_{MAX} = 16,0263$).

A su vez, con el AGPMP se obtuvo un *fitness* de 16,5 % ($F_{MAX} = 16,5474$), superior al obtenido por el AGPMS. Por otro lado, el tiempo de computación del AGPMP es levemente mayor, comparado con el tiempo de computación del AGPMS, debido a que en el AGPMP la comunicación entre procesadores es mallada (densa). Los valores de Sp y $E(\%)$ se mantienen próximos, comparando con los correspondientes valores del AGPMS.

La figura 7 muestra la curva de aceleración de los algoritmos paralelos desarrollados, por sus for-

mas se puede acotar que ambos algoritmos presentan un comportamiento casi lineal.

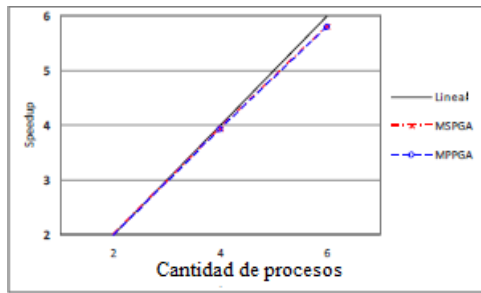


Figura 7. Curvas de rapidez (Sp) del AGPMS y del AGPMP.

En la tabla 2 se comparan los *fitness* obtenidos entre los algoritmos paralelos, y se escoge aquella solución de ajuste de parámetros que represente al *fitness* con el mayor valor, el cual está dado por el algoritmo AGPMP ($F_{MAX} = 16,5474$).

En la tabla 3 se muestran los valores de los parámetros del RAT y del ESP.

Tabla 3. Valores paramétricos del RAT y del ESP.

#G	K_A	T_A	K_S	T_1	T_2
30	100	0,08	19	0,10	0,001
31	100	0,10	16	0,09	0,001
32	100	0,05	17	0,07	0,010
33	100	0,05	17	0,09	0,001
34	100	0,02	19	0,05	0,019
35	100	0,05	20	0,10	0,008
36	100	0,07	15	0,10	0,011
37	100	0,05	18	0,10	0,007
38	100	0,05	20	0,06	0,001

En la tabla 4 se ilustran los parámetros de cada CER del grupo de compensadores estáticos, que representan el *fitness* máximo obtenido con el AGPMP.

Tabla 4. Parámetros del CER.

#B	K_C	T_C
6	100,0	0,15
7	138,3	0,40
20	128,3	0,02

Los símbolos #G y #B en las columnas de las tablas 3 y 4 representan en cada caso la barra en que está conectado el generador, y la barra en que se encuentra instalado el CER, respectivamente.

La figura 8 muestra algunos autovalores de lazo-cerrado y de lazo-abierto según que el SEP contenga o no los correspondientes ESP y CER instalados en la excitatriz de los generadores y en las subestaciones sensibles a la tensión, respectivamente.

Para el mapa de autovalores de la figura 8 fueron consideradas las condiciones de operación 2 y 3 de la tabla 1 y el algoritmo AGPMP correspondiente a la mejor solución obtenida ($F_{MAX} = 16,5474$).

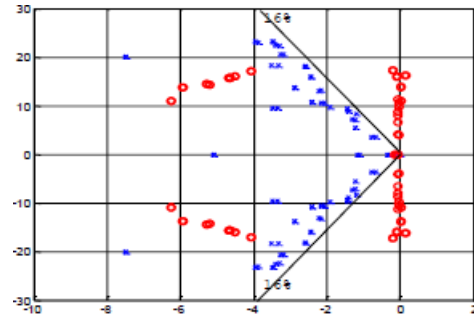


Figura 8. Mapa de autovalores, antes y después del ajuste.

En la figura 8, los polos representados por el símbolo “o” corresponden a los autovalores de lazo-abierto. En cambio, los autovalores de lazo-cerrado fueron representados por el símbolo “x”. De esa manera, el ajuste obtenido con el AGPMP, con los parámetros de los controladores, representan un alto amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en caso de contingencias.

En las simulaciones dinámicas de las contingencias descritas en la tabla 1 fue utilizado el paquete de programas de la CEPEL, [15] y [16]; en ellas fueron simuladas las condiciones de operación 2 y 3.

En las figuras 9 y 10 se muestran las curvas de respuesta en el dominio del tiempo del ángulo del rotor de los generadores 33 y 38, y las tensiones de las barras 4 y 16, respectivamente, asociados a la condición de operación 2.

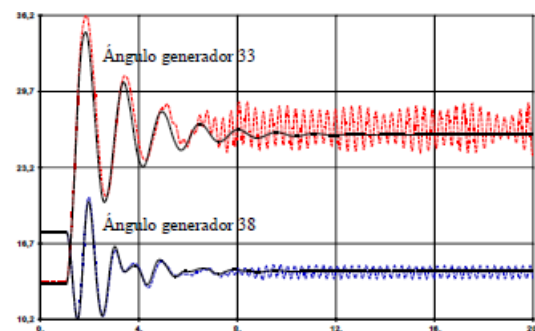


Figura 9. Respuesta transitoria del ángulo del rotor, condición 2.

En las figuras 9 y 10 las líneas punteadas corresponden a casos no amortiguados, es decir, las simulaciones realizadas con el SEP, cuyos generadores poseen solamente RAT en la excitatriz, y no hay CER instalado; en cambio, las líneas continuas representan casos amortiguados, es decir,

los generadores poseen RAT y ESP, y hay CER instalados.

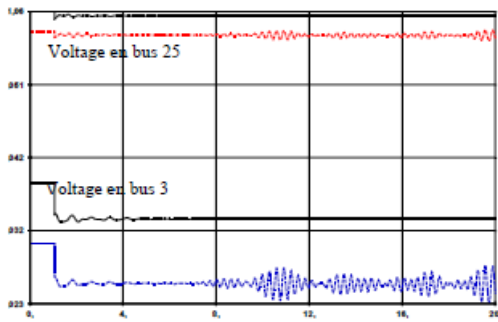


Figura 10. Respuesta transitoria de la tensión, condición 2.

Las figuras 11 y 12 muestran las curvas en el dominio del tiempo de los ángulos de los rotores de los generadores asociados a las barras 33 y 38, y los valores de tensión instantáneas en las barras 3 y 25, respectivamente, asociados a la simulación de la condición de operación 3, como se describe en la tabla 1.

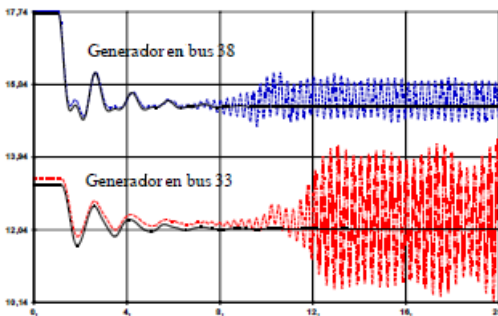


Figura 11. Respuesta transitoria del ángulo del rotor, condición 3.

También en las figuras 11 y 12, las líneas punteadas representan el caso no amortiguado y las líneas continuas se refieren al caso amortiguado.

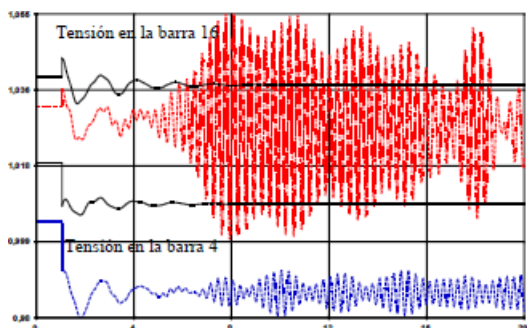


Figura 12. Respuesta transitoria de la tensión, condición 3.

4. Conclusión

De acuerdo con el objetivo propuesto, se ha elaborado e implementado un método para ajuste

coordinado de los parámetros de los controladores localizados en la excitatriz de los generadores: RAT y ESP, y de los parámetros de un grupo de compensadores estáticos instalados en determinadas subestaciones del correspondiente SEP bajo estudio.

En el referido procedimiento de ajuste fueron considerados simultáneamente diversas condiciones de operación crítica del SEP, con lo que se probó la robustez del método.

El método fue validado con el sistema New England, al que el AGS y los dos tipos de AG paralelos fueron aplicados para obtener los parámetros de los controladores seleccionados, obteniendo valores de ajuste que representan altos coeficientes de amortiguamiento.

Para reducir el tiempo computacional necesario para que el AGS encuentre soluciones óptimas de ajuste, se han implementados los algoritmos paralelos AGPMS y AGPMP, para tornar viable la aplicación del método a sistemas eléctricos de gran porte. Con estas versiones se han obtenido soluciones que posibilitaron reducir los tiempos de computación, buscando también reducir los requerimientos de memoria (lugar) de almacenamiento de datos.

Con ambos algoritmos paralelos se consiguió reducir substancialmente el tiempo de computación; en efecto, con el AGPMP se ha conseguido, en promedio, valores de *fitness* más altos que los obtenidos con el AGPMS.

Como continuidad del presente trabajo se están adaptando los algoritmos para implementar el método propuesto de ajuste coordinado en sistemas eléctricos de mayor porte, y el empleo de comunicación asíncrona entre procesadores.

Referencias bibliográficas

- [1] P. Kundur. Power System Stability and Control. Electric Power Research Institute, EPRI series. McGraw Hill, Inc., 1994.
- [2] G. Rogers. Power System Oscillations. Springer Science + Business Media, LLC., 2000.
- [3] V. A. Maslennikov y S. M. Ustinov. The Optimization Method for Coordinated Tuning of Power System Regulators. 12th Power Systems Computation Conference, 12th PSCC, Dresden, Germany, August 19-23, 1996.
- [4] M. L. Sosa-Ríos y R. A. González-Fernández. Coordinated Tuning of Power Systems Controllers using Metaheuristics Techniques. 18th Power Systems Computation Conference, 18th PSCC, Wroclaw, Poland, August 18-22, 2014.

- [5] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, MA. 1989.
- [6] L. C. Borges, E. C. Viveros y G. N. Taranto. Parallel Genetic Algorithms Applied to Damping Controllers Tuning on a Linux Cluster of PCs. WSEAS Transactions on Systems, Vol. 3, Issue 3, pp. 1280-1285. 2004.
- [7] IEEE PES Tutorial Course. Power System Stabilization via Excitation Control, 09TP250. 2009.
- [8] IEEE Working Group. Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994
- [9] E. R. Chaparro y M. L. Sosa. Coordinated Tuning of a Set of Static Var Compensators using Evolutionary Algorithms. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, 19-23 June, 2011.
- [10] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling y B. P. Flannery. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 2nd ed., ISBN 0 521 43108 5, 1992.
- [11] S. Gomes Jr., N. Martins y H. J. Pinto. Utilização do Método de Nyquist para a Estabilização de Sistemas de Potência Envolvendo Alocação de Par de Pólos Complexos. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference, XII CBA, Vol. I, pp. 137-142, Septiembre 14-18, Uberlândia, MG, Brasil. 1998.
- [12] J. W. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg y R. Wehbring. GNU Octave: A High-level interactive language for numerical computations. Boston, MA, USA. 2017.
- [13] R. T. Byerly, D. E. Sherman, y R. J. Bernon. Frequency Domain Analysis of Low Frequency oscillations in Large Electric Systems. Report EPRI EL. 1978.
- [14] D. L. Eager, J. Zahorjan, y E. D. Lazowska. Speedup Versus Efficiency in Parallel Systems. IEEE Transactions on Computers, Vol. 38, No. 3, March 1989.
- [15] Eletrobras Cepel. Programa de Análise de Redes V10.01.03, ANAREDE. DRE, Departamento de Redes Eléctricas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
- [16] Eletrobras Cepel. Análise de Transitórios Electromecânicos 11.02.00, ANATEM. DRE, Departamento de Redes Eléctricas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2017.