

AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ESP E CONJUNTO TCSC-POD UTILIZANDO O ALGORITMO PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

BRUNO RAFAEL GAMINO*, ELENILSON DE VARGAS FORTES†, PERCIVAL BUENO DE ARAUJO*,
EDNEI LUIZ MIOTTO‡, LUÍS FABIANO BARONE MARTINS§

* *Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil*

† *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Jataí
Rua Maria Vieira Cunha, 775, 75804-714, Jataí, Goiás, Brasil*

‡ *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo
Rua Cristo Rei, 19, 85902-490, Toledo, Paraná, Brasil*

§ *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná, Campus Jacarezinho
Av. Doutor Tito, s/n, 86400-000, Jacarezinho, Paraná, Brasil*

Emails: gaminobr@gmail.com, elenilson.fortes@ifg.edu.br, percival@dee.feis.unesp.br,
edneimiotto@utfpr.edu.br, luis.martins@ifpr.edu.br

Abstract— In this article, the algorithm Particle Swarm Optimization and the Classic Method of Residues are used to adjust the parameters of additional damping controllers (Power System Stabilizers and the set Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping). The controllers are placed in a test system for the purpose of introducing additional damping to oscillatory modes of low frequency. A modeling by current injection for device TCSC is proposed, it is incorporated into the Current Sensitivity Model, which is used to represent the Electric Power System. The algorithm Particle Swarm Optimization is compared to the Method of Residues from simulations in a symmetrical system. The results show that the algorithm has a superior performance for the proposed problem, reinforcing its importance as a tool in the analysis of small signal stability.

Keywords— Current Sensitivity Model, Particle Swarm Optimization, Power Oscillation Damping, Power System Stabilizers, Thyristor Controlled Series Capacitor.

Resumo— Neste artigo, o algoritmo *Particle Swarm Optimization* e o Método Clássico dos Resíduos são utilizados no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência e o conjunto *Thyristor Controlled Series Capacitor-Power Oscillation Damping*). Os controladores são inseridos em um sistema teste com o objetivo de introduzir amortecimento adicional aos modos oscilatórios de baixa frequência. Uma modelagem por injeção de corrente do dispositivo TCSC é proposta, que é incorporada ao Modelo de Sensibilidade de Corrente, utilizado para representar o Sistema Elétrico de Potência. A partir de simulações em um sistema simétrico, o algoritmo *Particle Swarm Optimization* é comparado com o Método dos Resíduos. Os resultados obtidos indicam que o algoritmo possui desempenho superior para a solução do problema proposto, reforçando sua importância como uma ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Palavras-chave— Estabilizadores de Sistemas de Potência, Modelo de Sensibilidade de Corrente, Particle Swarm Optimization, Power Oscillation Damping, Thyristor Controlled Series Capacitor.

1 Introdução

O planejamento e a operação dos sistemas elétricos de potência (SEPs) devem garantir a qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia. Em diversos sistemas reais encontram-se longas linhas de transmissão (interligações fracas), alto carregamento e Reguladores Automáticos de Tensão (RATs) com ganhos elevados e baixas constantes de tempo. Estes fatores contribuem para o surgimento de modos oscilatórios de baixa frequência, capazes de levar o SEP à instabilidade, comprometendo o bom funcionamento do sistema (Anderson and Fouad, 2003).

Essas oscilações, também conhecidas como oscilações eletromecânicas, são identificadas e classificadas de acordo com sua frequência de ocorrência, podendo ser de modo local (0,8 – 2,0 Hz), modo interárea (0,2 – 0,7 Hz) ou modo intraplanta (1,5 – 2,5 Hz) (Kundur, 1994). A estabilidade a

pequenas perturbações, realizada neste trabalho, considera em sua análise, pequenas variações no carregamento do sistema e engloba o estudo das oscilações eletromecânicas.

No intuito de introduzir torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor, o controlador ESP (Estabilizadores de Sistemas de Potência) é adicionado à malha de controle dos RATs para atuar no controle da tensão de saída das máquinas síncronas. Com seus parâmetros ajustados adequadamente, o ESP é capaz de introduzir, principalmente, amortecimento às oscilações de modo local (Valle and Araujo, 2015).

A expansão dos SEPs, a fim de atender a crescente demanda energética, enfrenta dificuldades como os altos custos envolvidos e leis ambientais rígidas. Neste cenário, os FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) surgem como uma alternativa interessante, já que possibilitam o aumento da capacidade de transferência de potência, adiando

a necessidade de construção de novas linhas. Estes dispositivos são baseados na eletrônica de potência e foram concebidos para controlar e direcionar o fluxo de potência (Song and Johns, 1999).

Ao inserir um controlador POD (*Power Oscillation Damping*) à malha de controle de um dispositivo FACTS, o conjunto FACTS-POD torna-se capaz de inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do tipo interárea. A atuação dos controladores suplementares de amortecimento, quando convenientemente ajustados, deve garantir a estabilidade a pequenas perturbações (Sunkara et al., 2013; Hasanvand et al., 2016).

Neste trabalho, o FACTS utilizado é um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores, denominado TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) (Rosso et al., 2003).

A representação do SEP é feita pelo Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (Fortes et al., 2016). Os testes são realizados em um sistema simétrico de duas áreas (Sauer and Pai, 1998). O ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e TCSC-POD é feito pelo algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kennedy and Eberhart, 1995). Por fim, os resultados obtidos são comparados com o método clássico dos resíduos (Yang et al., 1998).

As contribuições deste artigo são: 1) modelagem do TCSC por injeção de corrente e inclusão no MSC; 2) Implementação computacional do PSO para realização do ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares.

2 Modelo de Sensibilidade de Corrente

O MSC é baseado na lei das correntes nos nós de Kirchhoff e as equações do balanço nodal de corrente são as equações algébricas do modelo. Este balanço deve ser satisfeito em todas as barras do sistema e a todo instante de qualquer processo dinâmico (Fortes et al., 2016).

A representação no domínio do tempo, para um sistema multimáquinas modelado pelo MSC, constituído de nb barras e ng geradores, é dado de acordo com (1)–(4). A representação no espaço de estados é expressa em (5), onde A é a matriz de estados e B é a matriz de entrada do sistema.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \cdots \Delta \delta_{ng}] \\ [\Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{qn_g}] [\Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fd_{n_g}}] \end{bmatrix}^t \quad (2)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} [\Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{n_g}}] [\Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{n_g}}] \\ [\Delta P_{l1} \cdots \Delta P_{l_{n_b}}] [\Delta Q_{l1} \cdots \Delta Q_{l_{n_b}}] \end{bmatrix}^t \quad (3)$$

$$\Delta z = \begin{bmatrix} [\Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_{n_b}] [\Delta V_1 \cdots \Delta V_{n_b}] \end{bmatrix}^t \quad (4)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (5)$$

Δx é o vetor das variáveis de estado, formado por $\Delta \omega$ (variações da velocidade angular do rotor do gerador), $\Delta \delta$ (variações do deslocamento angular do rotor), $\Delta E'_q$ (variações da tensão interna do

eixo em quadratura) e ΔE_{fd} (variações da tensão de campo). As variáveis $\Delta \theta$ e ΔV (variações dos ângulos e variações da magnitude das tensões em todas as barras do SEP) formam o vetor de variáveis algébricas Δz . Por fim, o vetor das variáveis de entrada é Δu formado por ΔP_m (variações na potência mecânica de entrada do gerador), ΔV_{ref} (variações na tensão de referência dos RATs), ΔP_l (variações na potência ativa das cargas) e ΔQ_l (variações na potência reativa das cargas).

3 Thyristor Controlled Series Capacitor

3.1 Modelo de Injeção de Corrente para o TCSC

Dentre os modelos existentes para o estudo da estabilidade, aqueles baseados em injeção de corrente apresentam maior velocidade de convergência no fluxo de potência (Freitas and Morelato, 2001). A modelagem do TCSC por injeção de corrente facilita sua inclusão no MSC, justificando sua realização neste trabalho.

O TCSC realiza a compensação da reatância da linha na qual encontra-se instalado e para a dedução da sua representação por injeção de corrente considere o diagrama mostrado na Fig. 1. Onde, o TCSC é representado por uma reatância capacitiva x_{tcsc} instalada entre duas barras k e m , de impedância $\bar{Z}_{km}$ (6).

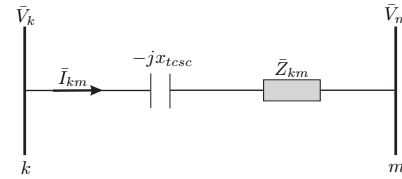


Figura 1: Barras do SEP com TCSC instalado.

A circulação da corrente $\bar{I}_{km}$ (7) pela reatância capacitiva provoca uma queda de tensão que pode ser representada por uma fonte de tensão $\bar{V}_{tcsc}$ (8). Ao transformar a fonte de tensão em uma fonte de corrente $\bar{I}_{tcsc}$ (9) obtém-se o circuito equivalente mostrado na Fig. 2.

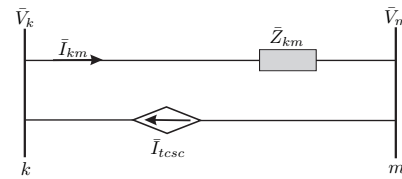


Figura 2: Atuação do TCSC por fonte de corrente.

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (6)$$

$$\bar{I}_{km} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \quad (7)$$

$$\bar{V}_{tcsc} = -jx_{tcsc} \bar{I}_{km} \quad (8)$$

$$\bar{I}_{tcsc} = -j \frac{x_{tcsc}}{r_{km} + jx_{km}} \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \quad (9)$$

A partir da Fig. 2 pode-se concluir que são injetadas nas barras k e m as correntes $\bar{I}_{tcsc_k}$ (10) e $\bar{I}_{tcsc_m}$ (11), conforme apresentado na Fig. 3.

$$\bar{I}_{tcsc_k} = \bar{I}_{tcsc} \quad (10)$$

$$\bar{I}_{tcsc_m} = -\bar{I}_{tcsc} \quad (11)$$

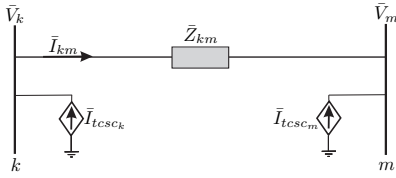


Figura 3: Injeção de Correntes pelo TCSC.

4 Controladores ESP e POD

As estruturas dos controladores suplementares ESP e POD adotadas neste trabalho são iguais e ambas possuem um filtro *washout* de entrada e dois blocos compensadores *lead-lag*. A diferença entre os controladores se dá no modo de operação e nos sinais de entrada e saída.

Para os controladores ESPs será utilizado como sinal de entrada as variações da velocidade angular do rotor ($\Delta\omega_k$). O sinal de saída (ΔV_{esp_k}) é inserido na malha de controle dos RATs (ver a representação por diagrama de blocos mostrada na Fig. 4, onde K_{r_k} é o ganho e T_{r_k} a constante de tempo do RAT). ΔE_{fd_k} , ΔV_{ref_k} e ΔV_k representam as tensões de campo, de referência e terminal do gerador, respectivamente.

As variáveis de estado do controlador ESP estão expressas em (12)–(14). A equação (15) diz respeito à saída modulada pelo controlador.

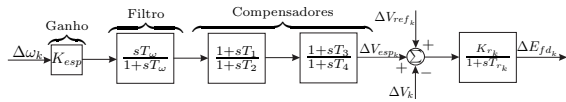


Figura 4: Diagrama de blocos - controlador ESP.

$$\Delta \dot{V}_1 = \Delta \omega_k K_{esp} - \frac{1}{T_\omega} \Delta V_1 \quad (12)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{1}{T_2} \Delta V_1 + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_1 - \frac{1}{T_2} \Delta V_2 \quad (13)$$

$$\Delta \dot{V}_{esp_k} = \frac{1}{T_4} \Delta V_2 + \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_2 - \frac{1}{T_4} \Delta V_{esp_k} \quad (14)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = \frac{K_r}{T_r} (\Delta V_{esp_k} + \Delta V_{ref_k} - \Delta V_k) - \frac{1}{T_r} \Delta E_{fd_k} \quad (15)$$

O controlador suplementar de amortecimento POD é acoplado à malha de controle do FACTS, inserindo um sinal estabilizante (ΔX_{pod}). Neste trabalho o controlador utiliza como sinal de entrada a variação da potência ativa da linha de transmissão (ΔP_{km}) na qual o TCSC está instalado. O diagrama de blocos do POD é apresentado na Fig. 5. A constante de tempo do FACTS é T_{tcsc} . ΔX_{ref} e ΔX_{tcsc} representam as reatâncias de referência e do TCSC, respectivamente.

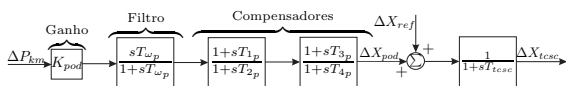


Figura 5: Diagrama de blocos - controlador POD.

O comportamento dinâmico do controlador POD é expresso em (16)–(18), o sinal estabilizante em (19) e a variável de estado referente ao sinal de saída em (20).

$$\Delta \dot{Y}_1 = \frac{1}{T_{\omega_p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \quad (16)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[\left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) - \Delta Y_2 \right] \quad (17)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = \frac{1}{T_{p4}} \left\{ \left[\Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \right) \right] - \Delta Y_3 \right\} \quad (18)$$

$$\Delta X_{pod} = \Delta Y_3 + \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \left[\Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \right] \quad (19)$$

$$\Delta \dot{X}_{tcsc} = \frac{1}{T_{tcsc}} (\Delta X_{pod} + \Delta X_{ref} - \Delta X_{tcsc}) \quad (20)$$

Os parâmetros a serem ajustados são as constantes de tempo $T_1 - T_4$, $T_{p1} - T_{p4}$ e os ganhos K_{esp} e K_{pod} .

5 Métodos de Ajuste dos Controladores

5.1 Método Clássico dos Resíduos

Este método é baseado na obtenção dos resíduos da função de transferência em malha aberta entre a entrada e saída dos controladores (Yang et al., 1998). O resíduo associado ao i -ésimo modo oscilatório, da k -ésima saída e j -ésima entrada é dado em (21).

$$R_{ijk} = C_j \phi_i \psi_i B_k \quad (21)$$

Na equação (21), B_k e C_j são as matrizes relacionadas à controlabilidade e observabilidade do sistema dinâmico, respectivamente. Além disso, os autovetores direito (ϕ_i) e esquerdo (ψ_i) são obtidos a partir da matriz de estados A .

No ajuste dos controladores, deve-se realizar a compensação de fase do modo de interesse a fim de deslocá-lo para uma posição do plano complexo. A compensação de fase é realizada calculando-se as constantes de tempo T_1 e T_2 de acordo com (22)–(25). Nestas equações ω_i é a frequência (em rad/s) do modo de interesse e b é o número de blocos compensadores *lead-lag*.

$$\theta = 180^\circ - \arg(R_{ijk}) \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\frac{\theta}{b})}{1 + \sin(\frac{\theta}{b})} \quad (23)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad (24)$$

$$T_2 = \alpha T_1 \quad (25)$$

O ganho K do controlador é calculado a partir das constantes de tempo determinadas e da posição do autovalor desejado (λ_i^{des}), conforme (26).

$$K = \left| \frac{\lambda_i^{des} - \lambda_i}{R_{ijk} H(\lambda_i)} \right| \quad (26)$$

Na eq. (26), λ_i indica o modo oscilatório de interesse e $H(\lambda_i)$ é a função de transferência do controlador em malha aberta para este modo.

O método dos resíduos é aplicável tanto para os controladores ESPs quanto para os PODs. Entretanto, o ajuste dos controladores não é realizado de maneira coordenada, e sim de maneira isolada, controlador a controlador.

5.2 Algoritmo Particle Swarm Optimization

O algoritmo de otimização por enxame de partículas é baseado no comportamento de um grupo de pássaros em busca de alimentos. Foi observado que eles realizavam alterações específicas na posição de cada indivíduo (partícula) obedecendo três conceitos básicos: harmonia, separação e alinhamento. A estratégia consistia em evitar colisões entre partículas, não ocupar ou se aproximar de posições já ocupadas por outras partículas e seguir o fluxo do enxame (Kennedy and Eberhart, 1995).

A movimentação de cada indivíduo é determinada pela sua velocidade (27) que se altera a cada iteração levando em consideração o fator de busca W , as variáveis de ponderação c_1 e c_2 , os fatores cognitivos co_i (29) e sociais so_i (30), além de números aleatórios r_1 e r_2 . Dada a posição em uma transição (t), a posição do indivíduo na próxima transição é dada em (28). $Pbest_i$ é a melhor posição ocupada pela partícula i , $Gbest$ é a melhor posição ocupada entre as partículas do enxame.

$$v_i(t+1) = Wv_i(t) + c_1r_1co_i(t) + c_2r_2so_i(t) \quad (27)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (28)$$

$$co_i(t) = Pbest_i - x_i(t) \quad (29)$$

$$so_i(t) = Gbest - x_i(t) \quad (30)$$

A função objetivo para o PSO é expressa em (31), a intenção é minimizar a distância entre os autovalores de interesse calculados (λ_i^{calc}) e os autovalores de interesse desejados (λ_i^{des}). Os valores de λ_i^{des} são obtidos a partir do amortecimento desejado (ξ_i^{des}) para n autovalores de interesse.

$$fo(x_i) = \sum_{i=1}^n \left| \lambda_i^{calc} - \lambda_i^{des} \right| \quad (31)$$

Durante as transições é possível que as partículas busquem ocupar posições fora da região de busca. Por essa razão, são definidos limites inferiores (x_{min}) e superiores (x_{max}) que os indivíduos devem obedecer. A velocidade máxima de transição (v_{max}) também é definida. Na Fig. 6 é apresentado o pseudocódigo do algoritmo PSO e os limites a serem verificados a cada transição estão expressos em (32) e (33).

Algoritmo: Particle Swarm Optimization

- 1 **Inicializar:** tamanho da população, W , c_1 , c_2 , v_{max} , x_{max} , x_{min} ;
- 2 Determinar posições e velocidades iniciais aleatoriamente: $x_i(0)$, $v_i(0)$;
- 3 Calcular e avaliar a função objetivo para todas as partículas: $fo(x_i)$;
- 4 **Se** (função objetivo é melhor): Atualize $Gbest$ e $Pbest_i$;
- 5 **Se não:** Atualize $Pbest_i$;
- 6 **Enquanto** (condição de parada não for satisfeita):
- 7 **Para** (cada partícula) **faça**:
- 8 Calcular fatores cognitivos e sociais: co_i e so_i ;
- 9 **Faça**: $t \leftarrow t + 1$;
- 10 Atualizar velocidade: v_i ;
- 11 Atualizar posição: x_i ;
- 12 Calcular e avaliar a função objetivo: $fo(x_i)$;
- 13 **Se** (função obj. é a melhor encontrada pela partícula): Atualize $Pbest_i$;
- 14 **Se** (função obj. é a melhor encontrada pelo algoritmo): Atualize $Gbest$;
- 15 **Fim**

Figura 6: Pseudocódigo do algoritmo PSO.

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1) & \text{se } -v_{max} \leq v_i(t+1) \leq v_{max} \\ -v_{max} & \text{se } v_i(t+1) < -v_{max} \\ v_{max} & \text{se } v_i(t+1) > v_{max} \end{cases} \quad (32)$$

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + v_i(t+1) & \text{se } \geq x_{min} \text{ e } \leq x_{max} \\ x_{max} & \text{se } > x_{max} \\ x_{min} & \text{se } < x_{min} \end{cases} \quad (33)$$

5.3 Codificação e Restrições do Problema

Neste trabalho os métodos aplicados devem ajustar os parâmetros dos controladores a fim de obter níveis desejados de amortecimento das oscilações eletromecânicas. O amortecimento mínimo para cada cenário considerado foi: 10%, 15% e 20%.

Considera-se que $T_1 = T_3$, $T_2 = T_4$, $T_{p1} = T_{p3}$ e $T_{p2} = T_{p4}$. As constantes de tempo T_{wp} e T_w são fixadas em 1 e 10 segundos, respectivamente.

Na Fig. 7 é apresentada uma proposta de solução para o algoritmo PSO. O vetor solução passa a ter três colunas para cada controlador (duas constantes de tempo e o ganho). As $3n$ primeiras posições são ocupadas por n controladores ESP.

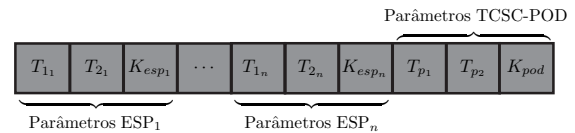


Figura 7: Proposta de solução de uma partícula.

Os parâmetros do PSO utilizado são definidos em: $W = 1$; $c_1 = c_2 = 2,05$; v_{max} vale 15% de x_{max} e o tamanho da população é de 20 partículas. As constantes de tempo (em segundos) e os ganhos (em pu) dos controladores estão sujeitos às restrições apresentadas em (34) - (36). Estes limites são os valores que x_{min} e x_{max} assumem.

$$0,1 \leq T_{1i} \leq 1,0; 0,05 \leq T_{p1} \leq 0,1 \quad (34)$$

$$0,01 \leq T_{2i} \leq 0,5; 0,1 \leq T_{p2} \leq 1,0 \quad (35)$$

$$1,0 \leq K_{esp} \leq 3,0; 0,05 \leq K_{pod} \leq 0,5 \quad (36)$$

6 Simulações e Resultados

Os métodos propostos para o ajuste dos parâmetros dos controladores foram implementados com o auxílio do software Matlab® em um computador que dispõe de 8 GB de memória RAM. As simulações foram realizadas em um sistema teste simétrico de duas áreas (Sauer and Pai, 1998). As condições iniciais são obtidas com o cálculo do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson utilizando-se o aplicativo MatPower®.

6.1 Sistema Simétrico de Duas Áreas

O sistema teste possui 4 geradores e 10 barras, seu diagrama unifilar é apresentado na Fig. 8. Este sistema possui uma longa linha de transmissão entre as barras 7 e 8, favorecendo assim, o aparecimento de oscilações de modo interárea.

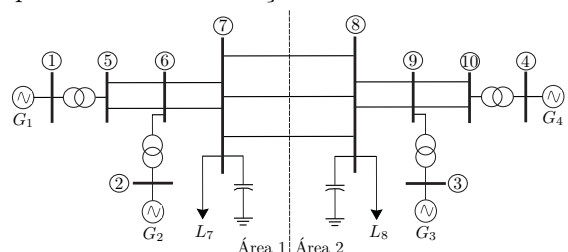


Figura 8: Diagrama unifilar - SEP simétrico.

Com as condições iniciais calculadas torna-se possível obter a matriz de estados A. Seus autovalores dominantes, bem como a frequência natural

não amortecida (ω_n) e a taxa de amortecimento (ξ) associadas estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1: Autovalores dominantes do sistema.

Modo	Autovalores	ξ	$\omega_n(Hz)$
λ_{L_1}	$-0,2327 \pm j6,3098$	0,0369	1,0049
λ_{L_2}	$-0,1584 \pm j5,8799$	0,0269	0,9361
λ_I	$0,0462 \pm j4,1659$	-0,0111	0,6631

Analisando a frequência de ocorrência dos modos dominantes conclui-se pela existência de três modos oscilatórios de baixa frequência, sendo dois deles do tipo local (λ_{L_1} e λ_{L_2}) (estáveis) e um interárea (λ_I) (instável, possui parte real positiva).

A fim de fornecer amortecimento adicional ao SEP e torná-lo estável para este ponto de operação é proposto a instalação de dois controladores ESPs e um TCSC-POD. O TCSC-POD é instalado entre as barras 7 e 8 para efetuar a compensação da reatância da linha de transmissão que conecta as duas áreas do sistema. Os controladores ESPs são instalados nos geradores G_2 e G_3 , escolha esta baseada nos fatores de participação (Kundur, 1994).

6.2 Desempenho dos Métodos

O algoritmo PSO ajusta os parâmetros de forma coordenada e a cada teste fornece um ajuste diferente. Nos testes implementados, o PSO era limitado a 1000 iterações. A taxa de compensação realizada pelo TCSC foi fixada em 10% e a constante de tempo T_{tcsc} em 0.005 segundos. Na Tabela 2 é mostrado o desempenho do PSO a partir de 100 testes realizados para cada cenário.

Tabela 2: Desempenho do algoritmo PSO.

Cenário	Taxa de Convergência	Número de Iterações		
		Mín.	Méd.	Máx.
$\xi \geq 10\%$	100%	73	145	412
$\xi \geq 15\%$	100%	162	281	627
$\xi \geq 20\%$	98%	306	498	909

Observa-se que ao elevar o amortecimento (ξ) mínimo exigido para cada modo, o PSO necessita de um número maior de iterações para convergir. Este fator fez com que no último cenário, o algoritmo convergisse em apenas 98% dos testes realizados devido ao limite de iterações estabelecido.

Entretanto, é importante destacar o baixo tempo computacional que o algoritmo exige, visto que os tempos médios (em segundos) de processamento para cada cenário foram 6,6 para 10%, 12,9 para 15% e 23,1 para 20%. Pode-se concluir que o aumento do limite de iterações deve garantir a convergência de 100% para todos os cenários.

Por outro lado, o Método dos Resíduos realiza o ajuste de forma isolada fornecendo um único ajuste para cada cenário. Na Tabela 3 encontram-se ajustes obtidos pelos dois métodos aplicados neste trabalho considerando os cenários propostos. Os ajustes do PSO amostrados foram escolhidos de forma aleatória dentre os testes realizados.

Analisando os dados listados na Tabela 3, observa-se que ao utilizar o método dos resíduos, as constantes de tempo dos controladores, uma vez determinadas não se alteram, as variações para

cada cenário ocorrem nos ganhos. Nota-se ainda que os ajustes encontrados pelo PSO exigem esforços menores dos controladores em relação aos ajustes pelo método dos resíduos. Em alguns cenários, os ganhos dos ESPs ajustados pelo PSO são quatro vezes menores em comparação aos resíduos. Ainda que em menor escala, a mesma tendência é observada para os ganhos do POD.

6.3 Estabilidade a Pequenas Perturbações

Considerando os ajustes dados na Tabela 3, os autovalores do sistema teste com a atuação dos controladores são mostrados na Tabela 4. Observa-se que o sistema anteriormente instável, se tornou um sistema estável com a atuação dos controladores, visto que todos os modos oscilatórios de interesse possuem parte real negativa.

Entretanto, o método dos resíduos não atendeu as restrições de dois cenários ($\xi \geq 15\%$ e $\xi \geq 20\%$), isto acontece pelo fato do método não realizar os ajustes de forma coordenada. Assim, a atuação simultânea dos controladores pode causar a diminuição do amortecimento de um modo oscilatório. Em sistemas complexos, com maior número de controladores e níveis de amortecimento mais baixos, isso pode se tornar relevante.

Para a análise da estabilidade no domínio do tempo foi considerada uma perturbação de 5% na potência mecânica do gerador 4 (G_4), referência do sistema. Na Fig. 9 encontram-se quatro curvas mostrando as variações da velocidade angular do gerador 2 (G_2) para cada um dos cenários.

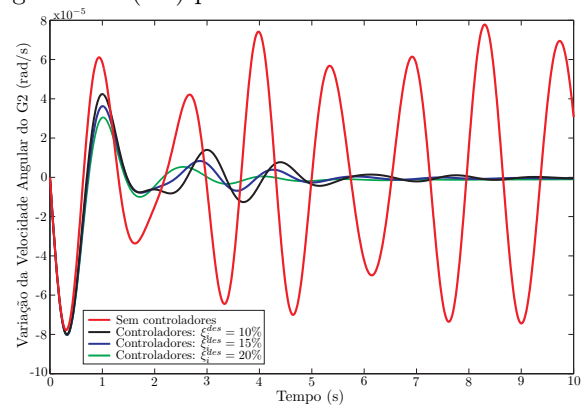


Figura 9: Variação da velocidade angular do G2.

7 Conclusões

Neste trabalho foi proposta a modelagem por injeção de corrente do FACTS TCSC, que por sua vez, foi incorporado ao MSC. Na sequência, foi utilizado o algoritmo PSO para a realização do ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares TCSC-POD e ESP, para atuarem em um SEP simétrico de duas áreas. O objetivo foi inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

Os ajustes encontrados pelo algoritmo PSO foram comparados com os determinados pelo método dos resíduos. Observou-se que o PSO apresenta resultados superiores para este problema, principalmente por ser capaz de realizar os ajustes

Tabela 3: Ajustes dos parâmetros dos controladores suplementares ESP e POD.

Cenário	Controlador	Algoritmo PSO			Método dos Resíduos		
		$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$k_{esp}(k_{pod})(pu)$	$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$k_{esp}(k_{pod})(pu)$
$\xi_i^{des} \geq 10\%$	ESP G2	0,5456	0,1300	1,0665	0,2194	0,1146	2,9527
	ESP G3	0,8197	0,1800	1,0498	0,2336	0,1237	4,2623
	TCSC-POD	0,0712	0,3059	0,0550	0,0998	0,5279	0,0898
$\xi_i^{des} \geq 15\%$	ESP G2	0,7940	0,1900	1,5142	0,2194	0,1146	5,3290
	ESP G3	0,8242	0,2557	1,6978	0,2336	0,1237	7,2049
	TCSC-POD	0,0800	0,4586	0,0850	0,0998	0,5279	0,1289
$\xi_i^{des} \geq 20\%$	ESP G2	0,5385	0,1825	3,1170	0,2194	0,1146	7,7165
	ESP G3	0,8075	0,2947	3,0026	0,2336	0,1237	10,1606
	TCSC-POD	0,0723	0,5170	0,1125	0,0998	0,5279	0,1672

Tabela 4: Autovalores do sistema teste com inclusão dos controladores ESP e POD.

Cenário	Modo	Algoritmo PSO			Método dos Resíduos		
		Autovalores	ξ	$\omega_n(Hz)$	Autovalores	ξ	$\omega_n(Hz)$
$\xi_i^{des} \geq 10\%$	λ_{L1}	$-0,6036 \pm j5,9059$	0,1017	0,9449	$-0,6295 \pm j6,2233$	0,1006	0,9955
	λ_{L2}	$-0,6277 \pm j5,4379$	0,1147	0,8712	$-0,6076 \pm j5,8200$	0,1038	0,9313
	λ_I	$-0,4918 \pm j3,8730$	0,1260	0,6214	$-0,4994 \pm j4,2005$	0,1181	0,6732
$\xi_i^{des} \geq 15\%$	λ_{L1}	$-0,9009 \pm j5,6496$	0,1575	0,9105	$-0,9067 \pm j6,1216$	0,1465	0,9849
	λ_{L2}	$-0,9208 \pm j5,4349$	0,1670	0,8773	$-0,9224 \pm j5,6926$	0,1600	0,9178
	λ_I	$-0,6454 \pm j4,0143$	0,1587	0,6471	$-0,8037 \pm j4,1161$	0,1916	0,6675
$\xi_i^{des} \geq 20\%$	λ_{L1}	$-1,2024 \pm j5,7338$	0,2052	0,9324	$-1,1747 \pm j6,0070$	0,1919	0,9742
	λ_{L2}	$-1,1282 \pm j5,2978$	0,2083	0,8621	$-1,1677 \pm j5,4751$	0,2086	0,8910
	λ_I	$-0,8677 \pm j4,1527$	0,2045	0,6752	$-1,1624 \pm j4,0101$	0,2784	0,6645

de forma coordenada, além de exigir ganhos menores dos controladores e maior refinamento nas faixas de amortecimento.

Diante do exposto, a modelagem proposta foi testada e pelos resultados apresentados fica credenciada como uma ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações. Além disso, este trabalho evidencia e reforça a qualidade do PSO como um método de ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio financeiro da CAPES e do CNPq.

Referências

- Anderson, P. and Fouad, A. A. (2003). *Power system control and stability, 2nd ed.*, Wiley-IEEE Press, New York.
- Fortes, E. V., Araujo, P. B. and Macedo, L. H. (2016). Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a specialized chu-beasley’s genetic algorithm, *Electric Power Systems Research*. in press.
- Freitas, W. and Morelato, A. (2001). A generalised current injection approach for modelling of facts in power system dynamic simulation, *AC-DC Power Transmission, 2001. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 485)*, pp. 175–180.
- Hasanvand, H., Arvan, M. R., Mozafari, B. and Amraee, T. (2016). Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **78**: 194 – 206.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, Vol. 4, pp. 1942–1948.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*, MacGraw-Hill, New York.
- Rosso, A. D. D., Canizares, C. A. and Dona, V. M. (2003). A study of TCSC controller design for power system stability improvement, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(4): 1487–1496.
- Sauer, P. W. and Pai, M. A. (1998). *Power system dynamics and stability*, Prentice Hall, New Jersey.
- Song, Y. H. and Johns, A. T. (1999). *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, IET, Londres.
- Sunkara, S. K., Narne, R. and Panda, P. C. (2013). Co-ordinated tuning of PSS with TCSC damping controller through advanced adaptive PSO for a multi-machine power system, *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*, pp. 1097–1102.
- Valle, D. and Araujo, P. (2015). The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **65**: 299–306.
- Yang, N., Liu, Q. and McClellay, J. D. (1998). TCSC controller design for damping interarea oscillations, *IEEE Transactions on Power System* **13**(14): 1304–1310.