

AJUSTE COORDENADO DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES ESP E IPFC-POD USANDO UM ALGORITMO MULTI-START

ELENILSON DE VARGAS FORTES* PERCIVAL BUENO DE ARAUJO[†] LEONARDO H. MACEDO[†] BRUNO R. GAMINO[†]
LUÍS FABIANO BARONE MARTINS[†]

**Instituto Federal de Goiás, Rua Maria Vieira Cunha 775, Residencial Flamboyant, CEP. 75804 – 714
Jataí, GO, Brasil*

[†]*Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil 56, Centro, PO Box 31, CEP. 15385 – 000
Ilha Solteira, SP, Brasil*

Email: elenilson.fortes@ifg.edu.br, percival@dee.feis.unesp.br, leohfmp@gmail.com,
gaminobr@gmail.com, luis.martins@ifpr.edu.br

Abstract— In this paper, it is presented a Multi-Start algorithm to perform a coordinated tuning of the parameters of supplementary damping controllers (Power System Stabilizers, and the pair Interline Power Flow Controller - Power Oscillation Damping). The goal is to introduce supplementary damping to the electromechanical oscillations present in the electric power system. For the representation of the power system it is used the Current Sensitivity Model. To validate the proposed methodology, simulations were conducted using the New England System. The results indicated a good efficiency of the Multi-Start algorithm in adjusting the parameters of the controllers.

Keywords— Current Sensitivity Model, Interline Power Flow Controller, Multi-Start Algorithm, Power Oscillation Damping, Power System Stabilizers.

Resumo— Neste artigo é apresentado um algoritmo *Multi-Start* para realizar um ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento (Estabilizadores de Sistemas de Potência, e o conjunto *Interline Power Flow Controller-Power Oscillation Damping*). O objetivo é introduzir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas presentes no sistema elétrico de potência. Para a representação do sistema de potência é utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente. Para validar a metodologia proposta, simulações foram realizadas no sistema *New England*. Dos resultados alcançados concluiu-se pela eficiência do algoritmo *Multi-Start* no ajuste dos parâmetros dos controladores.

Palavras-chave— Algoritmo *Multi-Start*, Estabilizadores do Sistema de Potência, *Interline Power Flow Controller*, Modelo de Sensibilidade de Corrente, *Power Oscillation Damping*.

1 Introdução

Devido às leis ambientais e altos custos que dificultam a construção de novos centros de geração de energia e de linhas de transmissão, os sistemas elétricos de potência (SEPs) operam perto de seus limites, favorecendo o surgimento, em regime permanente, de oscilações de baixa frequência (oscilações eletromecânicas). Estas oscilações podem se tornar um fator limitante na transmissão de energia entre grandes sistemas interconectados pois, de maneira geral, são fracamente amortecidas e, em alguns casos, instáveis (Furini et al., 2011). Em vista disto, inserir amortecimento a estas oscilações é essencial para o funcionamento adequado dos SEPs (Cai and Erlich, 2005).

As oscilações são classificadas a partir de sua frequência de ocorrência, sendo dos tipos local (0.8 – 2.0 Hz), interárea (0.2 – 0.7 Hz) ou intraplanta (1.5 – 2.5 Hz) (Anderson and Fouad, 1993). Neste trabalho, as oscilações de interesse são as dos tipos local e interárea.

Na década de 1960, um controlador denominado *Estabilizador de Sistema de Potência* (ESP) foi adicionado à malha de controle dos Reguladores Automáticos de Tensão (RATs) com a função de produzir torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor (torque de amortecimento). Quando seus parâmetros são ajustados

adequadamente, torna-se possível fornecer amortecimento suplementar às oscilações do tipo local (De Mello and Concordia, 1969). Entretanto, em sistemas multimáquinas, a atuação do ESP pode não fornecer amortecimento suficiente para oscilações do tipo interárea (Cai and Erlich, 2005).

Uma alternativa frente às altas cifras envolvidas na expansão dos SEPs são os dispositivos FACTS. Baseados em eletrônica de potência, eles são capazes de elevar a capacidade de transferência de potência de sistemas já existentes a partir do controle e direcionamento do fluxo de potência e otimização dos níveis de tensão nos barramentos (Hingorani, 1988). Quando um controlador suplementar denominado *Power Oscillation Damping* (POD) é adicionado à malha de controle do dispositivo FACTS, o conjunto FACTS-POD pode fornecer amortecimento às oscilações de modo interárea de forma eficiente (Noroozian et al., 2001).

O FACTS de interesse neste trabalho é o *Interline Power Flow Controller* (IPFC). Ele realiza o controle dos fluxos de potências ativa e reativa nas linhas em que encontra-se instalado. Assim, é possível analisar sua influência na operação do sistema (análise estática) e no amortecimento das oscilações eletromecânicas (análise dinâmica) (Gyugyi et al., 1999).

Para que o ESP e o conjunto IPFC-POD insiram o

amortecimento desejado aos modos oscilatórios, o ajuste coordenado de seus parâmetros deve ser realizado. Neste trabalho é utilizada uma técnica de otimização, o algoritmo *Multi-Start* (MS) (Glover and Kochenberger, 2003). Para validar a técnica proposta, foram realizados cem testes no sistema *New England* (Araujo and Zaneta, 2001), limitados a dois cálculos da função objetivo considerando diferentes faixas de amortecimentos: $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ e $\xi_i^{des1} \geq 15\%$.

Para representar o SEP e os dispositivos nele instalados é utilizado o Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) (Fortes et al., 2016). Nesse contexto, as contribuições desse artigo são: 1) implementar computacionalmente o algoritmo MS e utilizá-lo para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e IPFC-POD; 2) validar o algoritmo MS como ferramenta na análise da estabilidade a pequenas perturbações.

2 Modelo de Sensibilidade de Corrente

O MSC baseia-se na Lei de Kirchhoff das correntes nos nós, cuja aplicação fornece as equações algébricas do modelo (Fortes et al., 2016). Com ng geradores e nb barras, o SEP modelado pelo MSC, é expresso pelas eqs. (1)–(4).

$$[\Delta x] = [[\Delta\omega_1 \cdots \Delta\omega_{ng}] [\Delta\delta_1 \cdots \Delta\delta_{ng}] [\Delta E_q^{n1} \cdots \Delta E_q^{ng}] [\Delta E_{fd}^{n1} \cdots \Delta E_{fd}^{ng}]]^t \quad (1)$$

$$[\Delta u] = [[\Delta P_m^1 \cdots \Delta P_m^{ng}] [\Delta V_{ref}^1 \cdots \Delta V_{ref}^{ng}] [\Delta P_l^1 \cdots \Delta P_l^{nb}] [\Delta Q_l^1 \cdots \Delta Q_l^{nb}]]^t \quad (2)$$

$$[\Delta z] = [[\Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_{nb}] [\Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb}]]^t \quad (3)$$

$$[\Delta \dot{x}] = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} [\Delta x] + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (4)$$

A partir das eqs. (1)–(4) são obtidas a matriz de estados $A = J1 - J4^{-1}J3$ e a matriz de entradas $B = B1 - J2J4^{-1}B2$. As variáveis de estado são Δx ($\Delta\omega$ é a velocidade angular do gerador síncrono, $\Delta\delta$ é o ângulo interno do rotor do gerador, $\Delta E_q'$ é a tensão interna do eixo em quadratura e ΔE_{fd} é a tensão de campo do gerador), Δu são as de entrada (ΔP_m é a potência mecânica e ΔV_{ref} é a tensão de referência do RAT de cada gerador) e Δz são as algébricas (ΔV e $\Delta\theta$ são a magnitude e fase da tensão das barras do SEP).

3 Interline Power Flow Controller

O IPFC faz uso da tecnologia VSC (*Voltage Source Converter*) e pode realizar o controle dos parâmetros que são responsáveis por determinar o fluxo de potência em determinada linha de transmissão (ângulo, tensão e impedância). Neste trabalho, considera-se um IPFC equipado com dois conversores VSC que serão responsáveis por controlar dois fluxos de potência ativa e um fluxo de potência reativa nas linhas em que está instalado. Mais detalhes sobre o IPFC podem ser obtidos em Zhang (2006) e Zhang et al. (2009).

3.1 Modelo de injeção de corrente para o IPFC

O modelo de injeção de corrente (eqs. (5)–(8)) do IPFC utilizado neste trabalho é deduzido a partir do circuito equivalente e do diagrama fasorial disponíveis em Zhang (2006) e Zhang et al. (2009).

$$I_{ir} = -V_i \sin \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) + b_{ij} V_j \cos \theta_j + b_{ik} V_k \sin \theta_k - I_{inj_{ir}} \quad (5)$$

$$I_{im} = V_i \cos \theta_i (b_{ij} + b_{ik}) - \sum_{n=j,k} b_{in} V_n \cos \theta_n + I_{inj_{im}} \quad (6)$$

$$I_{nr} = b_{in} (V_i \sin \theta_i - V_n \sin \theta_n) + I_{inj_{nr}} \quad (7)$$

$$I_{nm} = b_{in} (V_n \cos \theta_n - V_i \cos \theta_i) + I_{inj_{nm}} \quad (8)$$

Nas eqs. (5)–(12) $b_{in} = -1/x_{in}$ para $n = j, k$. As injeções de corrente na barra i (decompostas em parte real e parte imaginária, respectivamente) são $I_{inj_{ir}}$ e $I_{inj_{im}}$ (eqs. (9) e (10)). Analogamente, as correntes injetadas na barra n ($n = j, k$) são $I_{inj_{nr}}$ e $I_{inj_{nm}}$ (eqs. (11) e (12)).

$$I_{inj_{ir}} = \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i) \quad (9)$$

$$I_{inj_{im}} = \sum_{n=j,k} b_{in} (V_{qn} \cos \theta_i - V_{pn} \sin \theta_i) \quad (10)$$

$$I_{inj_{nr}} = b_{in} (V_{pn} \cos \theta_i + V_{qn} \sin \theta_i) \quad (11)$$

$$I_{inj_{nm}} = b_{in} (V_{pn} \sin \theta_i - V_{qn} \cos \theta_i) \quad (12)$$

3.2 Estrutura do sistema de controle do IPFC

O controle dos fluxos pelo IPFC é realizado por controladores do tipo Proporcional-Integral (Valle and Araujo, 2015) (Fig. 1). Os controladores modulam as variáveis das fontes controláveis, exceto a variável V_{qk} que está relacionada com a equação de invariância de potência ativa (Zhang, 2006).

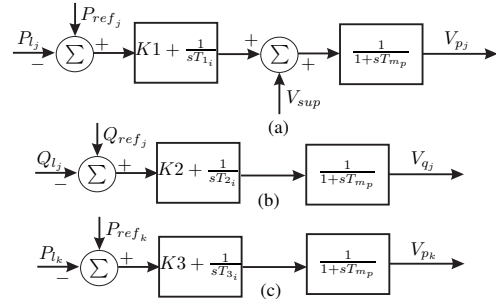


Figura 1: Sistema de controle do IPFC.

Na Fig. 1, P_{lj} , P_{lk} e Q_{lj} são as potências controladas. As potências de referência são P_{refj} , Q_{refj} e Q_{refk} . A constante de tempo T_{mp} indica o atraso inerente do dispositivo de controle. Os parâmetros dos controladores PI são os ganhos $K1$, $K2$, e $K3$ (em p.u.) e as constantes de tempo T_{1i} , T_{2i} e T_{3i} (em segundos). O sinal V_{sup} é proveniente de um POD e neste trabalho será utilizado para modular a variável V_{pj} , com o objetivo de fornecer amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do SEP. O comportamento dinâmico da estrutura de controle mostrada na Fig. 1 é dado pelas eqs. (13)–(18), obtidas por inspeção.

$$\dot{V}_{pj} = \frac{K1}{T_{mp}} (P_{refj} - P_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} (X1 + V_{sup} - V_{pj}) \quad (13)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_{1i}} (P_{refj} - P_{lj}) \quad (14)$$

$$\dot{V}_{qj} = \frac{K2}{T_{mp}} (Q_{refj} - Q_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} (X2 - V_{qj}) \quad (15)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2i}} (Q_{refj} - Q_{lj}) \quad (16)$$

$$\dot{V}_{pk} = \frac{K3}{T_{mp}} (P_{refk} - P_{lk}) + \frac{1}{T_{mp}} (X3 - V_{pk}) \quad (17)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{3i}} (P_{refk} - P_{lk}) \quad (18)$$

4 Controladores Suplementares de Amortecimento ESP e POD

Neste trabalho será considerado que as estruturas dos controladores ESP e POD são semelhantes (Fig. 2), diferindo nos sinais de entrada e saída. No ESP o sinal de entrada (ΔV_{in}) é $\Delta \omega_k$ (variação da velocidade angular do rotor do gerador k) enquanto que (ΔV_{sup1}) é aplicada à malha de controle de tensão do gerador. No POD a entrada é ΔP_{km} (desvio do fluxo de potência ativa na linha de transmissão adjacente à instalação do conjunto IPFC-POD) e a saída (ΔV_{sup2}) é adicionada à malha de controle do FACTS.

Na Fig. 2 (b) o RAT é representado pelo ganho K_{rk} e constante de tempo T_{rk} . A tensão de campo do gerador, a tensão terminal e a tensão de referência são ΔE_{fdk} , ΔV_k e ΔV_{refk} , respectivamente. Na Fig. 2 (c) o POD é acoplado à malha de controle do IPFC para modular ΔV_{pj} . ΔX_{ref} é sinal de entrada e T_{mp} é a constante de tempo.

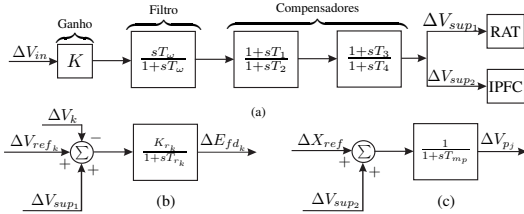


Figura 2: Dinâmica dos Controladores ESP e POD.

As equações do comportamento dinâmico dos controladores ESP (eqs. (19)–(22)) e POD (eqs. (23)–(26)) são obtidas por inspeção da Fig. 2.

$$\Delta \dot{V}_{1k} = \Delta \dot{\omega}_k K_{esp} - \frac{1}{T_w} \Delta V_{1k} \quad (19)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{1}{T_2} \Delta V_{1k} + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} \quad (20)$$

$$\Delta \dot{V}_{sup1} = \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} + \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{sup1} \quad (21)$$

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = \frac{K_r}{T_r} (\Delta V_{sup1} + \Delta V_{refk} - \Delta V_k) - \frac{1}{T_r} \Delta E_{fdk} \quad (22)$$

$$\Delta \dot{Y}_1 = \frac{1}{T_{\omega p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \quad (23)$$

$$\Delta \dot{Y}_2 = \frac{1}{T_{p2}} \left[\left(1 - \frac{T_{p1}}{T_{p2}} \right) (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) - \Delta Y_2 \right] \quad (24)$$

$$\Delta \dot{Y}_3 = \frac{1}{T_{p4}} \left\{ \left[\Delta Y_2 + \frac{T_{p1}}{T_{p2}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta Y_1) \left(1 - \frac{T_{p3}}{T_{p4}} \right) \right] - \Delta Y_3 \right\} \quad (25)$$

$$\Delta \dot{V}_{pj} = \frac{K_1}{T_{mp}} (\Delta P_{refj} - \Delta P_{lj}) + \frac{1}{T_{mp}} (\Delta X_{1j} + \Delta V_{sup2} - \Delta V_{pj}) \quad (26)$$

Em (19)–(26), as constantes de tempo T_1 a T_4 , T_{p1} a T_{p4} e os ganhos K_{esp} e K_{pod} , são os parâmetros dos ESP e POD, respectivamente.

5 Parametrização dos Controladores

5.1 Algoritmo Multi-Start

O algoritmo MS (Glover and Kochenberger, 2003), como uma estratégia de sair de ótimos locais é apresentado no Algoritmo 1. Basicamente esta técnica é composta de duas etapas que devem se repetir até que o critério de parada seja

Algoritmo 1 Multi-Start

```

1: Inicialize:  $i \leftarrow 1$ ;
2: while condição de parada não for satisfeita do
3:   Passo 1 (Geração): construir solução  $x^r$ ;
4:   Passo 2 (Busca Local): Aplicar a busca local para melhorar  $x^r$ ;
5:   Seja  $x^{r*}$  a solução obtida;
6:   if  $x^{r*}$  melhorar melhor solução then
7:     Atualize a melhor;  $i \leftarrow i + 1$ ;
8:   end if
9: end while

```

satisfeito: 1) construção da solução; 2) uma etapa de busca local.

Na proposta deste trabalho, no Passo 1, para a primeira iteração ($i = 1$), a solução é gerada aleatoriamente. Na sequência ocorre uma etapa de melhoria local (Passo 2). Nas etapas subsequentes ($i > 1$), no Passo 1, a solução x^r é obtida a partir de x^{r*} modificando-se aleatoriamente os parâmetros dos controladores (ESP ou IPFC-POD), sendo visto como uma etapa de perturbação.

5.2 Busca local baseada em sensibilidades

Seja x^r a solução encontrada no passo 1 do Algoritmo 1 e considere a função objetivo penalizada ($F(x^r)$) como definida em (27).

$$F(x^r) = f(x^r) + \rho h(x^r) \quad (27)$$

$$f(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \lambda_i^{calc} - \lambda_i^{des} \right| \quad (28)$$

$$h(x^r) = \sum_{i=1}^n \left| \xi_i^{calc} - \xi_i^{des} \right| \quad (29)$$

Em (27) $F(x^r)$ é constituída por uma função objetivo $f(x^r)$, adicionada à infactibilidade $h(x^r)$, sendo $\rho \gg 1$ um fator de penalização. Em (28) e (29) n indica o número de autovalores de interesse (λ_i). A função objetivo para o algoritmo MS é definida em (28) e consiste em minimizar a distância entre os autovalores de interesse calculados (λ_i^{calc}) e os autovalores de interesse desejados (λ_i^{des}). Cada λ_i^{des} é determinado a partir do amortecimento desejado (ξ_i^{des}) para cada λ_i . O amortecimento calculado ξ_i^{calc} é determinado a cada iteração no algoritmo MS (eq. (29)).

No passo seguinte define-se um vetor de sensibilidades, s , de dimensão n_v (número de variáveis). A princípio, $\forall s_i \in s \Rightarrow s_i = 0$, $i = 1 \dots n_v$. Em seguida são determinados os valores de cada passo de discretização das variáveis (Δ_i) como em (30), sendo u_i e l_i os limites superior e inferior da variável x_i^r , respectivamente, e Γ é o número inteiro de discretizações.

$$\Delta_i = \frac{u_i - l_i}{\Gamma} \quad i = 1, \dots, n \quad (30)$$

Considerando que x_k^r é a variável escolhida aleatoriamente para ter o valor modificado, calcula-se o valor da variação δ_k como em (31) onde φ é um número aleatório entre zero e um, γ é o fator de escala e $\lceil \cdot \rceil$ representa a função que arredonda o valor de $(\gamma\varphi)$ para o número inteiro imediatamente superior.

$$\delta_k = \lceil \gamma\varphi \rceil \Delta_k \quad (31)$$

$$\tilde{x}_k^r = x_k^r \pm \delta_k \quad (32)$$

Em (32), calcula-se o novo valor de x_k^r ($\tilde{x}_k^r$) (têm-se inicialmente $s_k = 0$, escolhe-se, com igual probabilidade,

aumentar ou diminuir o valor da variável x_k^r). Note que $\tilde{x}_k^r$ pode violar o limite inferior l_k ou o limite superior u_k . Neste caso considera-se a correção (33).

$$\hat{x}_k^r = \begin{cases} \tilde{x}_k^r, & \text{se } l_k \leq \tilde{x}_k^r \leq u_k \\ l_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r < l_k \\ u_k, & \text{se } \tilde{x}_k^r > u_k \end{cases} \quad (33)$$

A função objetivo penalizada $F(\hat{x}^r)$ é então calculada na nova solução obtida $\hat{x}^r$ para verificar sua qualidade. Se $F(\hat{x}^r) \leq F(x^r)$, define-se $s_k = 1$ se em (32) x_k^r foi incrementada. Faz-se $s_k = -1$, se em (32) x_k^r foi decrementada. Também deve ser atualizada a solução corrente: $x^r \leftarrow \hat{x}^r$. Caso $F(\hat{x}^r) > F(x^r)$ define-se $s_k = -1$ se em (32) x_k^r foi incrementada. Se x_k^r foi decrementada define-se $s_k = 1$ e a solução corrente não é atualizada.

Este processo é realizado até que nenhuma melhoria seja obtida ou até um número máximo de iterações sem melhoria, Υ . O fator γ deve ser ajustado dinamicamente durante o processo, ou seja, a partir de τ iterações, $\tau < \Upsilon$, sem melhoria da função objetivo penalizada, faz-se $\gamma \leftarrow \frac{\gamma}{2}$ em (31). Neste trabalho foram adotados $\rho = 10^3$, $\Gamma = 100$ e $\gamma = 20$.

5.3 Limites das variáveis

Considere um SEP de n máquinas síncronas equipadas com n controladores ESPs e um conjunto IPFC-POD. Fixados os valores de T_ω e T_{ω_p} (constante de tempo do bloco *washout*), deve-se determinar os ganhos e constantes de tempo dos controladores. Na Fig. 3 é apresentada uma proposta de solução no algoritmo MS. As primeiras n posições são destinadas a n constantes de tempo T_1 de n controladores ESPs. A posição $n + 1$ é ocupada pela constante de tempo T_{p_1} do IPFC-POD. Nesta ordem, tem-se n constantes de tempo T_2 e logo depois, T_{p_2} .

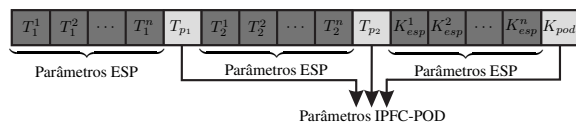


Figura 3: Representação de um indivíduo.

Por fim, são representados os n ganhos K_{esp} (dos ESPs) e o ganho K_{pod} (conjunto IPFC-POD). Cada grandeza da proposta de solução está sujeita à sua respectiva restrição, indicadas nas eqs. (34)–(36) (ganhos em p.u. e as constantes de tempo em segundos).

$$1, 0 \leq K_{esp} \leq 10, 0; 0, 1 \leq K_{pod} \leq 0, 5 \quad (34)$$

$$0,1 \leq T_1^n \leq 1,5; 0,01 \leq T_2^n \leq 0,1 \quad (35)$$

$$0,1 \leq T_{p_1} \leq 0,4; 0,1 \leq T_{p_2} \leq 0,5 \quad (36)$$

O objetivo é resolver um *constraint satisfaction problem* (Glover and Kochenberger, 2003). Nesse trabalho serão consideradas duas restrições: inserir, pelo menos, 10% e 15% de amortecimento desejado a todos os autovalores de interesse.

6 Simulações e Resultados

6.1 Análise estática do sistema New England

Na Fig. 4 é mostrado o diagrama unifilar do sistema New England (Araujo and Zaneta, 2001). Este SEP possui 10

geradores, 48 ramos e 41 barras, já inclusas duas novas barras (BF₁ e BF₂) e duas linhas exclusivas para simulações. O IPFC é instalado entre as barras 37 – 34 e 37 – 36, com a intenção de solucionar problemas de tensão existentes (abaixo de 0,95 p.u.) nas barras 12, 15, 33, 36 e 37 (ver Fig. 5).

Nas simulações adotou-se 0,01 p.u. para as reatâncias de acoplamento dos transformadores (x_{in} , $n = j, k$). Os parâmetros adotados para os PIs foram $T_{1i}^m = 0,0074$ s, $T_{2i}^m = 0,0052$ s, $T_{3i}^m = 0,0056$ s, $K_1^m = 0,8357$ p.u., $K_2^m = 0,7555$ p.u. e $K_3^m = 0,988$ p.u. Os valores, em p.u., das variáveis que representam os conversores são $V_{p_j}^m = -8,63 \times 10^{-7}$, $V_{p_k}^m = -2,47 \times 10^{-6}$, $V_{q_j}^m = 4,69 \times 10^{-7}$ e $V_{q_k}^m = -7,52 \times 10^{-7}$.

Após o controle dos fluxos de potências ativa e reativa pelo IPFC, verifica-se que os problemas de tensão nas barras 12, 15, 33, 36 e 37 foram corrigidos (ver Fig. 5). Para isto foram fixados $P_{ref_j} = -410,51$ MW (sem IPFC: $-310,98$ MW), $Q_{ref_j} = -55,81$ MVar (sem IPFC: $-42,28$ MVar) e $P_{ref_k} = -316,71$ MW (sem IPFC: $-241,76$ MW) nas linhas BF₁ – 34 e BF₂ – 36. Assim, os valores das variáveis utilizadas para representar os conversores são (em p.u.) $V_{p_j} = -0,2938$, $V_{p_k} = -0,3049$, $V_{q_j} = -0,0485$ e $V_{q_k} = 0,0048$.

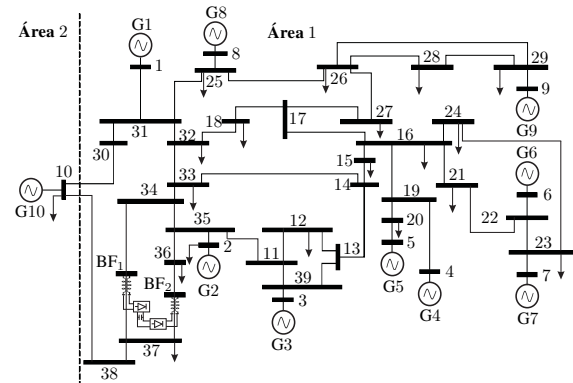


Figura 4: Digrama unifilar: sistema *New England*.

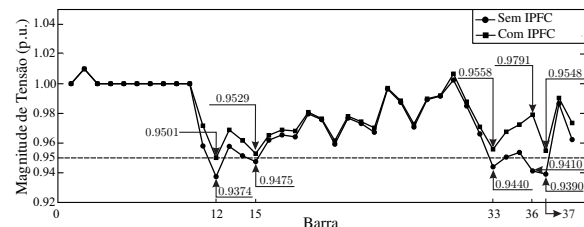


Figura 5: Perfil das tensões: sistema *New England*.

6.2 Análise dinâmica do sistema New England

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações foram calculados os autovalores do sistema *New England* considerando o ponto de operação obtido após a atuação do IPFC no controle dos fluxos. Na Tabela 1 são mostrados os modos de interesse ($\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$), as frequências naturais não amortecidas ($\omega_{ni} = |\lambda_i|/2\pi$) e os coeficientes de amortecimentos ($\xi_i = -\sigma/|\lambda_i|$) de cada modo.

Ao analisar a Tabela 1 observa-se a existência de oito modos locais (λ_1 a λ_8), sendo três deles com parte real positiva e um modo interárea (λ_9) também com parte real posi-

Tabela 1: Autovalores dominantes, coeficientes de amortecimento e frequência natural não amortecida.

Modo	Autovalores	ξ_i p.u.	ω_{ni} (Hz)
λ_1	$0,0484 \pm j6,8621$	$-0,0070$	$1,0922$
λ_2	$-0,2198 \pm j7,3085$	$0,0301$	$1,1637$
λ_3	$-0,2013 \pm j8,2718$	$0,0243$	$1,3169$
λ_4	$0,1508 \pm j5,9600$	$-0,0253$	$0,9489$
λ_5	$-0,1351 \pm j6,5134$	$0,0184$	$1,0369$
λ_6	$-0,2706 \pm j8,1099$	$0,0207$	$1,2914$
λ_7	$-0,2408 \pm j8,3226$	$0,0289$	$1,3251$
λ_8	$0,1814 \pm j6,3874$	$-0,0284$	$1,0170$
λ_9	$0,0290 \pm j3,8641$	$-0,0075$	$0,6150$

tiva. Esses quatro modos oscilatórios caracterizam o sistema como instável.

Para inserir amortecimento desejado aos modos oscilatórios no SEP, propõem-se instalar oito ESPs e um IPFC-POD. A localização dos ESPs (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9) foi determinada pelos fatores de participação (Kundur, 1994).

6.3 Parametrização dos controladores ESP e POD

6.3.1 Desempenho do algoritmo MS

A performance do algoritmo MS é avaliada. O objetivo é realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores ESPs e IPFC-POD inseridos no sistema *New England*. Nas simulações, considerou-se dois cenários: 1) todos os autovalores mostrados na Tabela 1 devem ser alocados em uma região com no mínimo 10% de amortecimento ($\xi_i^{des1} \geq 10\%$); e 2) todos os autovalores mostrados na Tabela 1 devem ser alocados em uma região com no mínimo 15% de amortecimento ($\xi_i^{des2} \geq 15\%$). Foram realizados com testes limitados a dois cálculos da função objetivo.

Nas simulações, utilizou-se as funções de avaliação (27)–(29) e as equações (34)–(36) como restrições para os parâmetros dos controladores. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2, onde são apresentados, para efeito de comparação, os testes que alcançaram a convergência.

Ao analisar os dados mostrados na Tabela 2 nota-se que o algoritmo MS convergiu em 100% dos testes realizados na primeira faixa de amortecimento ($\xi_i^{des1} \geq 10\%$), com baixo número de iterações o que implica em baixo tempo computacional. Na faixa de amortecimento especificada em $\xi_i^{des2} \geq 15\%$ o algoritmo MS também obteve excelente resultado, com uma taxa de convergência que chegou a 99% dos testes realizados. A partir destas considerações pode-se concluir que o algoritmo MS é extremamente eficiente, credenciando-o a realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimentos (ESPs e IPFC-POD), acionados ao sistema *New England*.

6.3.2 Estabilidade a pequenas perturbações

Comprovada a eficiência do algoritmo MS, na Tabela 3 são mostrados os parâmetros dos controladores ESPs e IPFC-POD obtidos pela sua aplicação. A partir desses ajustes, é calculado um novo estado para o sistema teste, mostrado na Tabela 4.

Dos resultados obtidos (Tabelas 3 e 4) é possível inferir que o sistema *New England* antes instável (Tabela 1), passa a operar de forma estável (Tabela 4) dentro de duas faixas seguras de operação: $\xi_i^{des1} \geq 10\%$ e $\xi_i^{des2} \geq 15\%$.

Para uma melhor compreensão do efeito dos ajustes realizados, na Figura 6 (obtida a partir dos dados das Tabelas 1, 3 e 4), é mostrado o posicionamento de todos os autovalores de interesse do sistema teste, antes instável (Tabela 1) para uma região do plano complexo com mínimo 10% ($\xi_i^{des1} = 10\%$) e 15% ($\xi_i^{des2} = 15\%$) de amortecimento (Tabelas 3 e 4).

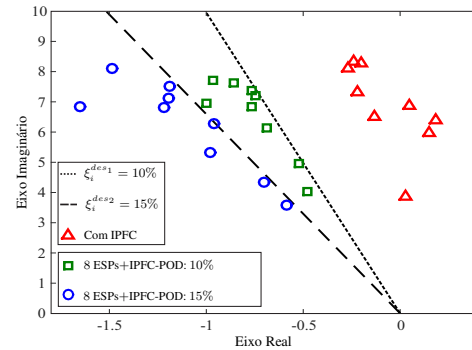


Figura 6: Posicionamento dos autovalores após inclusão dos controladores ESP e POD.

7 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo *Multi-Start* para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento ESP e IPFC-POD. Foram simulados com testes limitados a dois mil cálculos da função objetivo com o algoritmo *Multi-Start*. O objetivo era inserir amortecimento adicional às oscilações de modos local e interárea existentes no sistema *New England*.

Nas simulações realizadas foram consideradas duas regiões de amortecimento ($\xi_i^{des1} \geq 10\%$ e $\xi_i^{des2} \geq 15\%$). Com a análise dos resultados, observa-se o excelente desempenho do algoritmo *Multi-Start*, credenciando-o como poderosa ferramenta para a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, processo nº 141084/2016-2, à CAPES e à FAPESP, processo nº 2014/23741-9, pelo apoio financeiro.

Referências

- Anderson, P. and Fouad, A. A. (1993). *Power system control and stability*, Wiley-IEEE Press, New York.
- Araujo, P. B. and Zaneta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **23**(3): 173–178.
- Cai, L.-J. and Erlich, I. (2005). Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(1): 294–300.

Tabela 2: Desempenho do algoritmo MS.

Algoritmo	Faixa de amortecimento (%)	Número de soluções encontradas a cada 10 testes										Número de iterações	
												Médio	Máx.
Multi-Start	$\xi_i^{des1} \geq 10$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	33	165
	$\xi_i^{des2} \geq 15$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	286	1178

Tabela 3: Ganhos e constantes de tempo dos controladores ESP e POD ajustados pelo algoritmo MS.

Dispositivo	$\xi_i^{des1} \geq 10\%$			$\xi_i^{des2} \geq 15\%$		
	$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$k_{esp}(k_{pod})(p.u.)$	$T_1(T_{p1})(s)$	$T_2(T_{p2})(s)$	$k_{esp}(k_{pod})(p.u.)$
ESP G1	1, 2000	0, 0580	8, 0000	1, 4000	0, 0610	8, 6000
ESP G2	0, 5400	0, 0650	4, 3680	0, 7400	0, 0700	6, 5380
ESP G3	0, 6600	0, 0900	4, 9070	0, 7400	0, 0840	4, 9070
ESP G4	0, 5200	0, 0270	5, 5000	0, 6000	0, 0760	6, 5000
ESP G5	0, 5000	0, 0500	6, 2340	0, 6600	0, 0750	5, 8850
ESP G7	0, 5400	0, 0700	1, 8100	0, 5000	0, 0900	1, 8100
ESP G8	0, 6000	0, 0360	4, 8300	0, 9000	0, 0360	5, 6310
ESP G9	0, 3000	0, 1000	4, 0000	0, 3900	0, 0940	7, 8790
IPFC-POD	0, 3640	0, 3800	0, 3520	0, 3440	0, 3700	0, 3700

Tabela 4: Autovalores Dominantes, coeficientes de amortecimento e frequências naturais não amortecidas.

Modo	$\xi_i^{des1} \geq 10\%$			$\xi_i^{des2} \geq 15\%$		
	Autovalores	ξ_i	ω_{ni} (Hz)	Autovalores	ξ_i	ω_{ni} (Hz)
λ_1	$-0,7670 \pm j6,8472$	0,1113	1,0966	$-1,2185 \pm j6,8237$	0,1758	1,1032
λ_2	$-0,7670 \pm j7,3783$	0,1034	1,1806	$-1,6514 \pm j6,8414$	0,2346	1,1201
λ_3	$-0,7478 \pm j7,1970$	0,1033	1,1516	$-1,1955 \pm j7,1272$	0,1654	1,1502
λ_4	$-0,8560 \pm j7,6283$	0,1115	1,2217	$-1,4850 \pm j8,0997$	0,1803	1,3106
λ_5	$-1,0013 \pm j6,9528$	0,1425	1,1180	$-1,1874 \pm j7,5094$	0,1562	1,2100
λ_6	$-0,6860 \pm j6,1238$	0,1113	0,9807	$-0,9605 \pm j6,2885$	0,1510	1,0125
λ_7	$-0,9636 \pm j7,7079$	0,1241	1,2363	$-0,9813 \pm j5,3144$	0,1816	0,8601
λ_8	$-0,5207 \pm j4,9610$	0,1044	0,7939	$-0,7019 \pm j4,3528$	0,1592	0,7017
λ_9	$-0,4790 \pm j4,0319$	0,1180	0,6462	$-0,5847 \pm j3,5734$	0,1615	0,5763

De Mello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **88**(4): 316–329.

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.

Furini, M., Pereira, A. and Araujo, P. (2011). Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **33**(3): 615–622.

Glover, F. and Kochenberger, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*, Vol. 57 of *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer US.

Gyugyi, L., Sen, K. and Schauder, C. D. (1999). The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**(3): 1115–1123.

Hingorani, N. (1988). Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems, *Proceedings of the IEEE* **76**(4): 481–482.

Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*, MacGraw-Hill, New York.

Noroozian, M., Ghandhari, M., Andersson, G., Gronquist, J. and Hiskens, I. (2001). A robust control strategy for shunt and series reactive compensators to damp electromechanical oscillations, *IEEE Transactions on Power Delivery* **16**(4): 812–817.

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.

Zhang, J. (2006). Optimal power flow control for congestion management by interline power flow controller (IPFC), *Power System Technology*, 2006. *PowerCon 2006. International Conference on*, pp. 1–6.

Zhang, J., Yokoyama, A. and Ide, T. (2009). Use of IPFC detailed dynamic model for analysis of power flow control and small-signal stability enhancement, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* **4**(5): 654–662.