

Sintonização Robusta de Estabilizadores de Sistemas de Potência com Sinais Remotos Baseado em Otimização e Técnica da Matriz de Soma Bialternada

Raimundo N. D. Costa Filho*. Vicente L. Paucar Casas.**
Roman Kuiava***

*Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica, UFMA, Campus Balsas, Maranhão,
(e-mail: raimundo.diniz@ieee.org).

**Departamento de Engenharia Elétrica, UFMA, São Luís, Maranhão,
(e-mail: lpaucar@ieee.org)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR, Centro Politécnico, Curitiba, Paraná,
(e-mail: kuiava@eletrica.ufpr.br)

Abstract: This work deals with the robust tuning of Power System Stabilizers (PSS) in the presence of remote signals in a multi-machine power system. Remote signals are used to dampen inter-area oscillation modes and latency time is modeled by Padé approximation. The objective function considered for tuning the ESP parameters aims to maximize the damping of the electric power system for all electromechanical oscillation modes and to minimize the impact of uncertainties on latency time, intrinsic to remote signals, using the bialternate sum matrix technique. The proposed methodology was applied to a test system composed of 7 bus and 5 generators considering several points of operation. The presented methodology guaranteed a minimum damping for all the operation points and ensured the absolute stability of the test system for situations where the latency time is considered an uncertain parameter.

Resumo: Este trabalho trata sobre a sintonização robusta de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) na presença de sinais remotos em um sistema de potência multimáquinas. Os sinais remotos são utilizados para amortecer modos de oscilação do tipo interárea e o tempo de latência é modelado através da aproximação de Padé. A função objetivo considerada para sintonia dos parâmetros dos ESPs almeja maximizar o amortecimento do sistema elétrico de potência para todos os modos de oscilação eletromecânicos e minimizar o impacto das incertezas no tempo de latência, intrínseco aos sinais remotos, empregando a técnica da matriz de soma bialternada. A metodologia proposta foi aplicada a um sistema teste composto por 7 barras e 5 geradores considerando vários pontos de operação. A metodologia apresentada garantiu um amortecimento mínimo para todos os pontos de operação e assegurou a estabilidade absoluta do sistema teste para situações onde o tempo de latência é considerado um parâmetro incerto.

Keywords: Robustness; latency time; bialternate sum matrix; power system stabilizer; stability.

Palavras-chaves: Robustez; tempo de latência; matriz de soma bialternada; estabilizadores de sistemas de potência; estabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um amadurecimento das tecnologias que utilizam medições fasoriais sincronizadas, como consequências, surgiram vários fabricantes em âmbito internacional oferecendo no mercado as PMUs (*Phasor Measurement Units*). A ocorrência de muitos *blackouts* em vários Sistemas Elétricos de Potência (SEP) ao redor do mundo deu um novo impulso na implementação em larga escala dos Sistemas de Medição de Área Ampla (WAMS) usando PMUs e, atualmente, a instalação das PMUs nas redes elétricas de muitos dos SEPs práticos tornaram-se uma importante atividade (Ree et al., 2010). Uma das vantagens da utilização das PMUs, juntamente com os avanços em computação e em tecnologia da informação, é a oportunidade de monitorar o desempenho em tempo real das dinâmicas oscilatórias (em especial, as de natureza eletromecânica) dos SEPs (Yan et al., 2011). Esta característica possibilita a

utilização dos sinais remotos para projetar controladores com estruturas mais eficientes. Estes novos esquemas de controle apresentam vários desafios, como por exemplo, a inclusão dos tempos de latência ou de atraso envolvidos nos canais de transmissão (Dotta et al., 2009).

Neste contexto, os Estabilizadores de Sistemas de Potências (ESP) com a inclusão de sinais remotos (WESP- *Wide-area ESP*) são uma solução efetiva para amortecer modos locais (0,7 a 2,0 Hz) e interárea (0,1 a 0,7 Hz). Do ponto de vista econômico, a implementação destes controladores pode ter um melhor custo-benefício do que instalar novos dispositivos de controle (Chow et al., 2000). Na literatura existem diversas técnicas empregadas para projeto de WESP. As técnicas mais comuns são baseadas em teoria de controle (Dotta et al., 2009), (Aboul-Ela et al., 1996) ou aplicando método de otimização (Kamwa et al., 2001), destacando o emprego das técnicas de Inteligência Artificial (IA), como

exemplo os algoritmos genéticos (Escalante et al., 2009), (Bento et al., 2018) e mais recentemente com GWO (*Grey Wolf Optimization*) (Shakarami & Davoudkhani, 2016). Porém, estas metodologias utilizam o tempo de latência constante, o que na prática é incerto e variável. Desta maneira, é importante considerar o tempo de latência como um parâmetro incerto, porém o problema de projetar WESP se torna bem mais complexo.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar a sintonização robusta de estabilizadores de sistemas de potência com sinais remotos. Este problema de sintonização foi realizado empregando a técnica de inteligência artificial GWO e a incerteza no tempo de latência foi modelada na função objetivo por meio da técnica da matriz de soma bialternada. O trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta o modelo do SEP, do ESP com sinais remotos e do tempo de latência utilizado nas simulações, a Seção 3 descreve a técnica de matriz de soma bialternada, a Seção 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações e na Seção 5 são expostas as conclusões desta pesquisa.

2. MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta seção, apresentaremos o modelo matemático do Sistema Elétrico de Potência, englobando o modelo do estabilizador com sinais remotos e tempo de latência.

2.1 Modelo do SEP

Estudos de estabilidade a pequenas perturbações e síntese de controladores são realizados geralmente a partir de modelos de sistemas de potência escritos por um conjunto de equações diferenciais- algébricas na forma de espaço como apresentado em (1) (Kundur, 1994).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, r) \\ g(x, r) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde o vetor x representa o conjunto das variáveis de estado do sistema e r é o vetor das variáveis algébricas.

A análise da estabilidade a pequenas perturbações envolve a linearização de (1) em torno de um ponto de operação (x_0, r_0) obtido por um programa de fluxo de potência.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta r \end{bmatrix} \quad (2)$$

Assumindo que a matriz Jacobiana J_4 é não singular, a matriz de estado do sistema pode ser obtida eliminando o vetor das variáveis algébricas Δr :

$$\Delta \dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x = \mathbf{A} \Delta x \quad (3)$$

Onde \mathbf{A} é a matriz de estado do sistema.

A avaliação da estabilidade angular a pequenas perturbações está baseada na análise dos autovalores da matriz de estado

do sistema. Os autovalores λ podem ser reais ou complexos conjugados. A parte real σ está relacionada ao crescimento exponencial da resposta. Já a parte imaginária ω determina a frequência de oscilação do respectivo modo de oscilação. A razão de amortecimento do autovalor λ é dada por (4).

$$\zeta = \left(\frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \right) \times (100\%) \quad (4)$$

2.2 Modelo do Estabilizador com sinal remoto

A estrutura do estabilizador quase-descentralizado (MISO-*Multiple Input Single Output*) com o emprego de sinais remotos é ilustrada na Fig. 1. Em geral, os modos eletromecânicos do tipo local são amortecidos pelo ESP e os modos interárea pelo WESP. As estruturas do ESP e WESP são semelhantes sendo compostos por um ganho, um bloco do tipo *washout* e blocos de compensação de fase (Yao et al., 2011). A única diferença encontra-se no sinal de entrada, pois o ESP utiliza sinal local (no caso a velocidade angular $\Delta\omega_{local}$) e o WESP um sinal remoto (velocidade angular $\Delta\omega_{remoto}$ de um gerador situado em outra usina diferente do gerador onde o estabilizador encontra-se instalado).

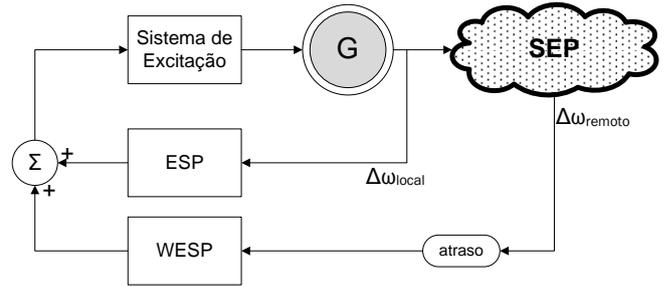


Fig. 1 Estrutura de controle do estabilizador quase-descentralizado com sinal remoto.

2.3 Tempo de latência

Retardos no tempo muitas vezes surgem em sistemas de controle devido ao próprio processo e a atrasos no processamento dos sinais detectados. Um retardo no tempo sempre reduz a estabilidade de um sistema e, desta maneira, é importante ser capaz de analisar seu efeito (Franklin et al., 2013).

Porém, a análise da estabilidade de um sistema com retardos no tempo é complexa em razão da característica transcendental de um sistema com retardo ter infinitas raízes. A transcendentalidade é devido ao termo exponencial $e^{-s\tau}$, sendo s uma variável complexa e τ o retardo no tempo (ou tempo de latência) (Souza, 2008). Portanto, a maneira mais usual para contornar esta complexidade é utilizando a famosa aproximação de Padé. A aproximação de Padé utilizada neste trabalho é a de 1ª ordem ao qual é apresentada em (5).

$$G(s) = \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{1 + \frac{\tau}{2}s} \quad (5)$$

3. ESTABILIDADE ROBUSTA DE SISTEMAS COM PARÂMETROS REAIS INCERTOS USANDO TÉCNICA DA SOMA DE MATRIZ BIALTERNADA

Nesta seção é apresentada a definição de soma bialternada de uma matriz quadrada e sua aplicação em problemas de estabilidade robusta de sistemas dinâmicos com parâmetros reais incertos. As referências utilizadas nesta seção são (Fuller 1968), (Yedavalli 1993) e (Pulcherio et al., 2019).

3.1 Matriz de soma bialternada

Seja uma matriz quadrada A de ordem n $[a_{ij}]$, então os elementos da matriz de soma bialternada \mathcal{G} de dimensão $m = (1/2)[n(n-1)]$ em termos dos elementos da matriz A é dada por (6).

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} -a_{ps}, se\ r = q\ e\ s < q \\ a_{pr}, se\ r \neq q\ e\ s = q \\ a_{pp} + a_{qq}, se\ r = p\ e\ s = q \\ a_{qs}, se\ r = p\ e\ s \neq q \\ -a_{qr}, se\ s = p \\ 0\ outrocaso \end{bmatrix} \quad (6)$$

Observe que \mathcal{G} pode ser escrito como $\mathcal{G} = A \cdot I_n + I_n \cdot A$, onde o “ \cdot ” Denota o produto bialternado. Os autovalores de \mathcal{G} são $\lambda_i + \lambda_j$, para $i = 2, 3, \dots, n$ e $j = 1, 2, \dots, i - 1$. No decorrer do texto, iremos escrever então que $\mathcal{G} = G[A]$.

Considerando uma matriz A de ordem 3, então a matriz \mathcal{G} é dada por (7). Se os autovalores de A são λ_1, λ_2 e λ_3 , então os autovalores de \mathcal{G} são $\lambda_1 + \lambda_2, \lambda_2 + \lambda_3$ e $\lambda_3 + \lambda_1$.

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} a_{22} + a_{11} & a_{23} & -a_{13} \\ a_{12} & a_{33} + a_{11} & a_{12} \\ -a_{31} & a_{21} & a_{33} + a_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2 Sistema dinâmico com parâmetro real incerto e invariável no tempo.

O modelo matemático de um sistema dinâmico pode ser descrito por (8).

$$\dot{x} = f(p, x) \quad (8)$$

Onde x é um vetor dos estados do sistema e p é o vetor de parâmetros que se assume terem um valor nominal. Entretanto, estes parâmetros podem assumir valores diferentes dos nominais por várias razões, então o sistema passa a possuir incertezas.

Se o sistema é linear ou pode ser linearizado para pequenas perturbações, o modelo matemático pode ser representado por (9).

$$\dot{x} = [A_0]x + [E]x \quad (9)$$

Onde $[A_0]$ é a matriz nominal estável do sistema e $[E]$ é a matriz da perturbação, que responde pelas variações dos parâmetros dos seus valores nominais.

Uma questão particularmente importante é estabelecer limites de $[E]$ que preserve a estabilidade de (9). Os limites ajudam a entender quanto que cada um dos parâmetros deve variar sem comprometer a estabilidade do sistema. Eles também ajudam a determinar se o sistema é estável para parâmetros incertos dentro de um intervalo limitado pelos limites superior e inferior.

Nos anos 90, o pesquisador Yedavalli, desenvolveu um método que avalia a estabilidade robusta de sistemas com parâmetros reais e invariantes no tempo ao qual será descrito nas próximas subseções.

3.3 Politopo de matrizes

A igualdade (10) é válida para representar o modelo matemático de um sistema dinâmico quando a perturbação ao qual é submetido é linear e estruturada.

$$[A(q)] = [A_0] + \sum_{i=1}^r q_i [A_i] \quad (10)$$

Onde r é o número de parâmetros incertos, q_i é o parâmetro incerto, $[A_i]$ é a matriz com entradas correspondentes a localização do parâmetro incerto na matriz $[A]$. Esta representação produz um politopo de matrizes em um espaço matricial, também conhecido como família de matriz intervalar quando os elementos variam de maneira independente.

Um simples exemplo é apresentado a seguir para entender melhor a igualdade (10).

Considere o seguinte sistema dinâmico onde o parâmetro incerto q_1 encontra-se localizado na posição a_{22} da matriz A e tem limite superior e inferior bem definido.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 2 & q_1 & 0 \\ 1 & 0,5 & -1 \end{bmatrix} x(t) \quad (11)$$

$$-1,25 \leq q_1 \leq -0,15$$

Se $q_1^0 = -0,7$ é adotado como sendo o valor nominal para q_1 , conforme a equação (10), o sistema em (11) pode ser decomposto em como (12).

$$[A_0] + q_1 [A_1] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 2 & -0,7 & 0 \\ 1 & 0,5 & -1 \end{bmatrix} + q_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.4 Condição suficiente para a estabilidade robusta do politopo de matriz utilizando a matriz de soma bialternada.

O Teorema 1, garante a estabilidade para sistemas dinâmicos perturbados quando as incertezas são lineares e invariantes no tempo. A demonstração pode ser encontrada em (Yedavalli, 1993).

Teorema 1: o sistema perturbado, descrito por (8), é estável se:

$$|\Delta q_i| = |q_i - q_i^0| < \mu_G \quad (13)$$

Onde

$$\mu_G = \min(\mu_{A_0}, \mu_{A_G}) \quad (14)$$

$$\mu_{A_0} = \frac{1}{\rho\{\sum_{i=1}^l [A_i][A_0]^{-1}\}_m} \quad (15)$$

$$\mu_{A_G} = \frac{1}{\rho\{\sum_{i=1}^l [G[A_i](G[A_0])^{-1}]\}_m} \quad (16)$$

Onde q_i e q_i^0 são os valores nominais e perturbados do i^{th} parâmetro incertos q_i , respectivamente; $\rho[\blacksquare]$ é o raio espectral da matriz $[\blacksquare]$, $[\blacksquare]_m$ denota a matriz formada com os valores absolutos dos elementos de $[\blacksquare]$, $G[\blacksquare]$ é a matriz de soma bialternada e μ_G é o limite que a variável q_i garante a estabilidade do sistema.

Aplicando o Teorema 1 para o exemplo descrito em (11) o valor de μ_G obtido é 0,7. Portanto, $|\Delta q_1| < 0,7 \rightarrow 0 < q_1 < -1,4$ e o sistema é garantido ser estável para todos esses valores de q_1 .

4. METODOLOGIA EMPREGADA

A seguir será apresentada uma descrição da metodologia empregada neste trabalho para sintonização robusta de estabilizadores de sistemas de potência com sinais remotos. A metodologia empregada envolve otimizar a função objetivo F_{obj} composta pelas funções F_1 e F_2 .

4.1 Função F_1

O primeiro objetivo da sintonização dos parâmetros do estabilizador com sinais remotos é aumentar o amortecimento do SEP de modo a não perder a estabilidade considerando todos os pontos de operação. A função objetivo F_1 é apresentada em (17).

$$F_1 = \min[\min(\zeta_1), \min(\zeta_2), \dots, \min(\zeta_n)] \quad (17)$$

Onde $\min(\zeta_n)$ representa a menor razão de amortecimento no ponto de operação n , dado em porcentagem.

4.2 Função F_2

O segundo objetivo da sintonização dos parâmetros do estabilizador com sinais remotos é aumentar a margem do tempo de latência, utilizando a teoria da matriz de soma bialternada, do SEP com a finalidade de não perder a estabilidade absoluta considerando todos os pontos de operação. O $|\Delta q_i|$, como apresentado em (13), pode ser expresso, quando considera o tempo de atraso como variável através de (18). Desta maneira, a função objetivo F_2 é apresentada em (19).

$$\left| \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \right| = \left| \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right| < \mu_G \quad (18)$$

$$F_2 = \min(\mu_{G_1}, \mu_{G_2}, \dots, \mu_{G_n}) \quad (19)$$

Onde μ_{G_n} foi apresentado na equação (14) obtido para cada ponto de operação.

4.3 Otimização multiobjetivo

As funções F_1 e F_2 podem ser agrupadas em uma única função objetivo, F_{obj} , utilizando o método da soma ponderada. Este método consiste na transformação do problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo através da atribuição de pesos em cada objetivo.

$$F_{obj} = \min(w_1 |\zeta_{ref} - F_1| + w_2 |\mu_{ref} - F_2|) \quad (20)$$

Onde ζ_{ref} (referência do amortecimento mínimo requerido) e μ_{ref} (referência para garantir estabilidade robusta com o tempo de atraso um parâmetro incerto e variável) são valores de referência de F_1 e F_2 . Ademais, w_1 e w_2 são pesos dos objetivos F_1 e F_2 , respectivamente, escolhidos de maneira empírica (Shakarami & Davoudkhani, 2016).

5. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Nesta seção é apresentada a aplicação da metodologia proposta emprega a técnica Soma de Matriz Bialternada (SMA) em um sistema teste composto por 7 barras e 5 geradores. A técnica de otimização utilizada para resolver o problema multiobjetivo é uma IA baseada no comportamento inteligente de ataques dos lobos cinzentos denominada de GWO e bem detalhada na referência (Mirjalili et al., 2014). As matrizes de estados foram obtidas com o software PacDyn, desenvolvido pelo CEPEL, e todas as simulações foram realizadas com o software MatLab. Os pesos w_1 e w_2 foram 1 e 2, respectivamente (após vários

testes). Ademais, ζ_{ref} foi igual a 5% (em geral, 5% é um valor comum na literatura para sintonização de ESP), μ_{ref} igual a 4,2 (escolhido baseado em (18) e após várias testes) e τ_0 igual a 200 ms.

5.1 Sistema Teste de 5 geradores e 7 barras

Este sistema teste possui 7 barras e 5 geradores. O diagrama unifilar é ilustrado na Figura 2 e seus dados podem ser encontrados em (Canizares et al., 2017). Todos os geradores são equipados com reguladores de tensão do tipo STA1 com constantes de tempo $K_a = 30$ pu e $T_a = 0,05$ s.

Para o ajuste dos controladores têm-se cinco Pontos de Operação (PO) alterando as reatâncias das linhas 5-6 e 6-7 retirados de (Boukarim et al., 2000) (ver Tabela 1). Observa-se que o menor valor de amortecimento é dado no caso n° 5 com -16,58% de amortecimento. Com base na Tabela 1, ficou evidente que o sistema em questão apresenta amortecimento negativo em todos os PO o que configura autovalores com parte real positiva, condição que não assegura estabilidade a pequenas perturbações ao sistema simulado.

Depois de entender o estado do SEP para os cinco pontos de operação, foi realizada a análise modal. Através da análise modal, envolvendo o cálculo dos resíduos, controlabilidade, observabilidade e *modes-shapes* (Kundur, 1994), verificou-se que 1 WESP seria instalado no gerador 4 com o sinal remoto $\Delta\omega_3$ vindo do gerador 3, como esquematizado em Fig. 2.

Tabela1. Pontos de operação considerados

Caso #	X_{5-6}	X_{6-7}	Modo 1		Modo 2	
	pu	pu	f(Hz)	$\zeta(\%)$	f(Hz)	$\zeta(\%)$
1	0,39	0,57	0,858	-11,90	0,935	3,83
2	0,50	0,57	0,855	-12,10	0,918	3,50
3	0,80	0,57	0,851	-12,66	0,877	2,77
4	0,39	0,63	0,830	-14,04	0,931	4,04
5	0,39	0,70	0,796	-16,58	0,926	4,18

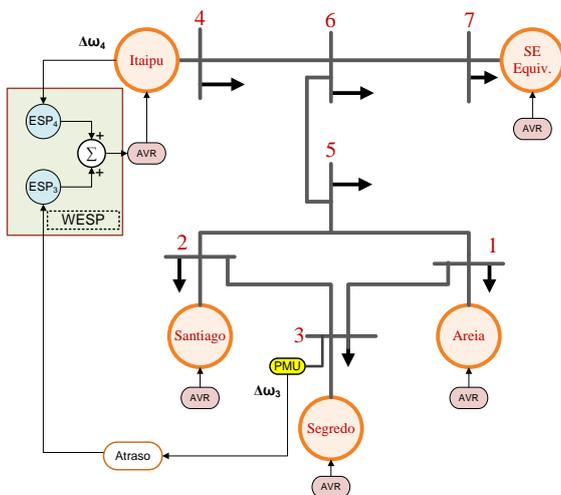


Fig. 2 Sistema de 5 geradores e 7 barras com WESP instalado.

5.2 Sintonização robusta dos estabilizadores

Na etapa de sintonização, o tempo de latência considerado foi de 200 ms. Após a sintonização do ESP e WESP com ($w_2 = 2$) e sem ($w_2 = 0$) a abordagem da SMA, juntamente com a técnica GWO, foi obtido os seguintes resultados apresentados na Tabela 2. Os valores de F_1 e F_2 sem a abordagem SMA foram 5,01% e 2,43, respectivamente. Em contrapartida, Os valores de F_1 e F_2 com a abordagem SMA foram 5,08% e 4,11, respectivamente

Tabela2. Resultados obtidos sem e com SMA

Sem SMA					
Gerador	K_{ESP}	T_1	T_2	T_3	T_4
3	3,5488	0,9797	0,0108	0,9568	0,0168
4	44,0344	0,6797	0,0657	0,1696	0,0277
Com SMA					
Gerador	K_{ESP}	T_1	T_2	T_3	T_4
3	4,1894	0,9016	0,0100	1,0000	0,0132
4	49,1822	0,1314	0,0183	0,9164	0,0983

As Figs. 3 e 4 apresentam os resultados do amortecimento mínimo considerando os 5 pontos de operação com a instalação do WESP com e sem a abordagem SMA, respectivamente.

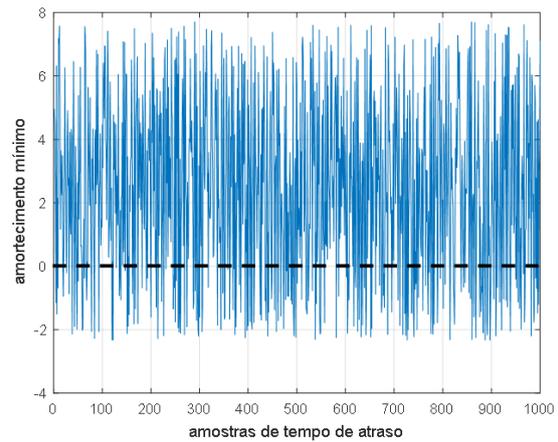


Fig. 3 Amortecimento mínimo com o WESP sem SMA.

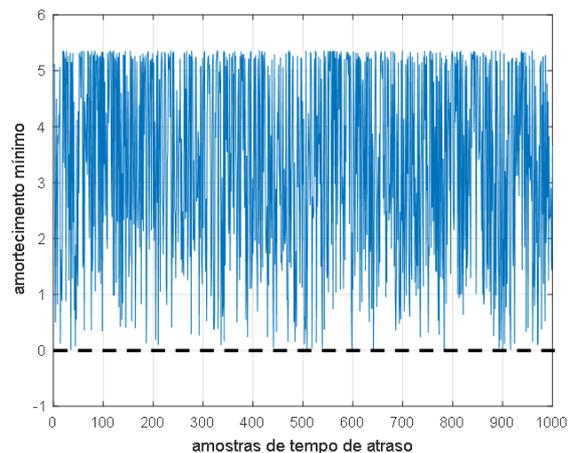


Fig. 4 Amortecimento mínimo com o WESP com SMA.

As Figs. 3 e 4 foram obtidas variando o tempo de atraso em no intervalo 80- 320ms de maneira aleatória. Nota-se que com o emprego do SMA na etapa de sintonização o sistema em estudo nunca perde a estabilidade absoluta com a variação do tempo de atraso.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho objetivou a utilização da técnica da soma de matriz bialternada juntamente com o algoritmo de IA GWO para sintonizar ESPs na presença de sinais remotos em um sistema multimáquinas. A estrutura dos ESPs possui múltiplas entradas, sendo uma combinação do sinal local do gerador e de sinais remotos adquiridos por meio das PMUs. Os atrasos de tempo foram modelados através da aproximação de Padé de primeira ordem. A metodologia proposta para sintonizar ESPs com sinais remotos foi modelado através de um problema de otimização multiobjetivo objetivando aumentar o amortecimento do sistema e ampliar a margem do tempo de latência. A partir da análise dos resultados obtidos, utilizando um sistema de 5 máquinas síncronas e 7 barras, observou-se que empregando a técnica da soma de matriz bialternada o SEP de 5 máquinas nunca perde a estabilidade absoluta quando o tempo de latência varia de maneira aleatória.

REFERÊNCIAS

- Aboul-Ela, M. E., Sallam, A. A. and McCalley, J. D. (1996). Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11, 767-773.
- Bento, M. E. C., Dotta, D., Kuiava, R. and Ramos, R. A. (2018). A Procedure to Design Fault-Tolerant Wide-Area Damping Controllers. *IEEE Access*, 6, 23383-23405.
- Boukarim, G. E., Wang, S., Chow, J. H., Taranto, G. N. and Martins, N. (2000). A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizer. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 1287-1292.
- Canizares, C., Fernandes, T., Geraldin E., Gerin-Lajoie, L., Gibbard, M., Hiskens I. et al. (2017). Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32, 715-722.
- Chow, J. H., Sanchez-Gasca, J. J., Ren, H. and Wang, S. (2000). Power system damping controller design using multiple input signals. *IEEE Control Systems Magazine*, 20, 82-90.
- Dotta, D., Silva, A. S. and Decker, I. C. (2009). Wide-area measurements- based two- level control design considering signal transmission delay. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24, 208-216.
- Escalante, S. L., do Bomfim, A. L. B., Taranto, G. N. e Falcão, D. M. (2009). Utilização de sinais remotos de PMUs sincronizados na estabilização do Sistema Interligado Nacional. XX SNPTE- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1-8.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. e Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de Controle para Engenharia*. Bookman, 6ª Edição.
- Fuller, A. T. (1968). Conditions for a matrix to have only characteristic roots with negative real parts. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 23, 71-98.
- Kamwa, I., Grondin, R. and Hébert, Y. (2001). Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems- a decentralized/hierarchical approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16,136-153.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw- Hill.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., and Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- Pulcherio, M. C., Illindala, M. S., and Yedavalli, R. K. (2019). Robust stability region of a microgrid under parametric uncertainty using bialternate sum matrix approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 5553-5562.
- Ree, J. D. L., Centeno, V. and Thorp, J. S. (2010). Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 1, 20-27.
- Shakarami, M. R. and Davoudkhani, I. F. (2016). Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay. *Electric Power Systems Research*, 133, 149- 159.
- Souza, F. O. (2008). Estabilidade e síntese de controladores e filtros robustos para sistemas com retardo no tempo: novas fronteiras. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Yan, J., Liu, C. and Vaidya, U. (2011). PMU- based monitoring of rotor angle dynamics. *IEEE Transaction on Power Systems*, 26, 2125- 2133.
- Yao, W., Jiang, L., Wu, Q. H., Wen, J. Y. and Cheng, S. J. (2011). Delay-dependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded. *IEEE Transaction on Power Systems*, 26, 233- 240.
- Yedavalli, R. K. (1993). Flight control application of new stability robustness bounds for linear uncertain systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 16, 1032-1037.