

PROJETO GENÉTICO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA DO SISTEMA CHESF OESTE

JOSÉ, NASCIMENTO, A.

*Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, Caixa Postal 6001 – CEP 60455760 – Fortaleza-CE
E-mails: almeida@dee.ufc.br*

ARTHUR, BRAGA, P.S.

FRANCIS, SOUZA, M. F.

EDWARD, DANIEL, L. F.

JOSÉ, SILVA JUNIOR, N. R.

*Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, Caixa Postal 6001 – CEP 60455760 – Fortaleza-CE
E-mails: arthurp@dee.ufc.br, francismarry@yahoo.com.br, edwardlennon@gmail.com,
nilorjunior@yahoo.com.br*

Abstract— This work presents a methodology for power system stabilizer design for multi-machine systems, taken into account the present dynamic interactions in the system. The use of classic control techniques results in a simple formulation and easy interaction with computational programs used in power systems. The parameters of the power systems stabilizer are obtained through the maximization of the damping torque of each machine, being taken into account the mutual coupling among generators. The optimization process is performed by genetic algorithms, what introduces to the proposed method substantial robustness, natural parallelism and implementation simplicity. The mathematical formulation, the computational implementation and the application to the Chesf system are here described, and the initial promising results are shown.

Keywords— Power System Stabilizers, PSS, Genetic Algorithms, AG, Robust Control, Classic Control, Small-Signal Stability.

Resumo— Este trabalho apresenta uma metodologia para o projeto de estabilizadores de sistemas de potência para sistemas com várias máquinas, levando-se em consideração as interações dinâmicas presentes no sistema. A utilização de técnicas de controle clássico resulta em uma formulação simples e de fácil interação com programas computacionais utilizados na indústria. Os parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência são determinados através da maximização do torque de amortecimento de cada máquina, levando-se em conta o mútuo acoplamento entre geradores. Na otimização utiliza-se algoritmos genéticos, o que acrescenta ao método apresentado robustez, paralelismo natural e simplicidade de implementação. A formulação matemática, a implementação computacional e a aplicação ao sistema CHESF descritas no trabalho, e resultados iniciais promissores são apresentados.

Palavras-chave— Estabilizadores de Sistemas de Potência, PSS, Algoritmos Genéticos, AG, Controle Robusto, Controle Clássico, Estabilidade a Pequenos Sinais.

1 Introdução

Os geradores síncronos são equipados com reguladores automáticos de tensão que têm por função manter a tensão terminal dos geradores próxima ao nível desejado. O crescimento dos sistemas elétricos de potência tem obrigado a utilização de reguladores de tensão rápidos que atuam diminuindo o tempo de desequilíbrio entre a carga e a geração, melhorando as estabilidades permanente e transitória. Entretanto, DeMello e Concordia (1969) mostraram que estes reguladores prejudicam o amortecimento inerente das máquinas síncronas podendo ocorrer instabilidades em oscilações subsequentes à primeira dessas máquinas no sistema. Nesta situação é muito importante o uso de estabilizadores de sistemas de potência para aumentar o amortecimento das oscilações do sistema através da excitação do gerador.

O método usado na indústria para o projeto de estabilizadores consiste em ajustes seqüenciais, com aplicação recorrente do modelo máquina/barra infinita, desprezando as interações dinâmicas entre as máquinas do sistema (DeMello e Concordia, 1969). Embora os resultados obtidos por este método sejam satisfatórios, tem sido objeto de várias pesquisas.

Silva e Mota (1984) e Mota e Carvalho (1986) apresentam uma proposta de generalização do método de DeMello e Concordia através do uso de métodos de otimização. Martins e Lima (1990) apresentam uma abordagem por variáveis de estado em que, a partir de um índice de desempenho e das restrições impostas, o projeto do Power System Stabilizers - PSS é realizado por meio de um enfoque inteiramente analítico.

Taranto e Falcão (1996) e Bomfim, Taranto e Falcão (2000), Viveros (2005) apresentam o projeto de estabilizadores de sistemas de potência usando

$$K_{2,ii} = 2E'_{qi}G_{ii} - \sum_{i=1}^{NG} E'_{qj}y_{ij} \cdot c_{ij}, i \neq j \quad (3)$$

$$K_{2,ij} = -E'_{qi} \cdot y_{ij} \cdot c_{ij}$$

$$K_{3,ii} = 1 / \left[1 - (x_{di} - x'_{di})B_{ii} \right] \quad (4)$$

$$K_{3,ij} = 1 / \left[(x_{di} - x'_{di})E'_{qi}y_{ij}C_{ij} \right]$$

$$K_{4,ii} = \sum_{i=1}^{NG} K_{4,ij}, i \neq j \quad (5)$$

$$K_{4,ij} = (x_{di} - x'_{di})E'_{qi}y_{ij}C_{ij}$$

$$K_{5,ii} = \sum_{i=1}^{NG} K_{5,ij}, \quad (6)$$

$$K_{5,ij} = E'_{qi}x'_{di}y_{ij} \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i)$$

$$K_{6,ij} = x'_{di}y_{ij} \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i) \quad (7)$$

$$s_{ij} = \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (8)$$

$$c_{ij} = \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (9)$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (10)$$

$$\gamma_i = \tan^{-1} \frac{v_{di}}{v_{qi}} \quad (11)$$

$$F_{1i}(s) = \frac{K_{ei}}{1 + sT_{ei}} \quad (12)$$

$$F_{1j}(s) = \frac{K_{ej}}{1 + sT_{ej}}$$

$$F_{2i}(s) = \frac{K_{3,ii}}{1 + sT'_{d0i}K_{3,ii}} \quad (13)$$

$$F_{2j}(s) = \frac{K_{3,jj}}{1 + sT'_{d0j}K_{3,jj}}$$

Sendo:

T'_{do} =Constante de tempo de circuito aberto, em segundos.

K_e =Ganho do sistema de excitação, em pu.

T_e =Constante de tempo do sistema de excitação, em segundos.

ΔT_e =Variação do torque elétrico, em pu.

ΔT_m =Variação do torque mecânico, em pu.

$\Delta \delta$ =Variação do ângulo de torque, em graus.

ΔV_{ref} =Variação da tensão de referência, em pu.

ΔV_t =Variação da tensão terminal da máquina, em pu.

v_d =Parte real da tensão terminal, em pu.

v_q =Parte imaginária da tensão terminal, em pu.

Δe_{fd} =Variação da tensão de campo, em pu.

$\Delta e'_q$ =Variação da tensão interna no eixo q, em pu.

H =Constante de inércia, em segundos.

x'_d =Reatância transitória no eixo direto, em pu.

$H(s)$ = Função de transferência obtida do diagrama de blocos da Fig. 2.

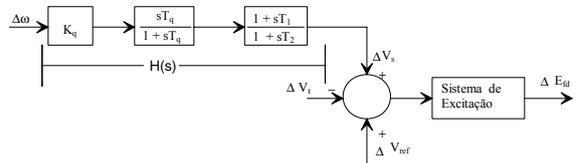


Figura 1 Diagrama de blocos de um estabilizador de sistemas de potência genérico.

2.2 Função Objetivo e Restrições

A função objetivo escolhida é a expressão do torque de amortecimento $\Delta T_d(x)$, onde x é um vetor cujos elementos são os parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência T_1 e T_2 de cada máquina (Fig. 2).

Como a técnica aqui proposta é uma extensão do trabalho de DeMello e Concordia (1969), as restrições utilizadas são as mesmas, sendo agora generalizadas para todas as máquinas simultaneamente.

Restrições:

$$a) \frac{-1}{\sqrt{3}} \leq \frac{T_{si}}{T_{di}} \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad i = 1, NG.$$

$$b) \alpha_i - 30^\circ \leq \theta_i \leq \alpha_i + 30^\circ.$$

$$c) T_{si}(x) > 0.$$

$$d) T_{di}(x) > 0.$$

Onde α é o ângulo de atraso da função de transferência máquina/regulador de tensão, θ é o ângulo de avanço do estabilizadores de sistemas de potência, T_{si} é o torque de sincronismo e T_{di} é o torque de amortecimento.

2.3 Técnica de Otimização

Os parâmetros dos estabilizadores do sistema de potência são determinados através da maximização do torque de amortecimento de cada máquina, levando em conta o mútuo acoplamento entre geradores, sendo utilizada a otimização através de algoritmos genéticos.

3 Otimização com Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos são procedimentos de busca, baseados nas teorias de seleção natural de Charles Darwin e da genética de Gregor Mendel, que têm sido utilizados com sucesso como método de otimização. Os algoritmos genéticos foram propostos por John Holland nos anos 60, e desenvolvidos por Holland e seus alunos na Universidade de Michigan em meados de 1970. Goldberg (1989) apresentou um modelo chamado algoritmo genético simples que é usado como referência para o método proposto neste trabalho e possui as seguintes etapas: (i) escolha da codificação dos indivíduos; (ii) criação de uma população inicial; (iii) avaliação dos indivíduos pela função de aptidão; (iv) seleção dos indivíduos para reprodução e (v) geração da nova população através de operadores genéticos. As subseções seguintes comentam essas etapas.

3.1 Escolha da Codificação dos Indivíduos

AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros (o cromossomo) do problema de otimização, e não com os próprios parâmetros. As variáveis do PSS, K_q , T_q , T_1 e T_2 , foram codificadas em cromossomos de 4 bits para representar os 16 estágios de cada ajuste, formando um indivíduo de 16 bits para cada estabilizador do sistema.

3.2 Criação da População Inicial

AGs trabalham com uma população de possíveis soluções, e não com um único ponto. A utilização de população caracteriza a exploração paralela dos espaços de busca. A população inicial foi gerada de maneira aleatória.

3.3 Avaliação dos Indivíduos

Cada indivíduo da população é uma possível solução para o problema de otimização. Assim, para discriminar as melhores soluções, é necessária a definição de uma medida da aptidão dos indivíduos. No método proposto a função de aptidão é formada pela função objetivo mais as restrições apresentadas na subseção 2.2, na forma de função de penalidade cujo parâmetro aumenta a cada nova geração.

3.4 Seleção de Indivíduos para Reprodução

Os métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população. Um método de seleção muito utilizado é o método da roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos através de um sorteio em que a probabilidade de um indivíduo ser selecionado é proporcional ao seu índice de aptidão. Os indivíduos selecionados são submetidos aos operadores genéticos.

3.5 Operador Genético Cruzamento

O cruzamento é o operador responsável pela recombinação de material genético entre os indivíduos, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Este é o principal mecanismo para a produção de novos indivíduos. A execução do cruzamento é decidida aleatoriamente e implementada em um único ponto de corte determinado de maneira aleatória.

3.6 Operador Genético Mutação

Os operadores de mutação são necessários para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais genes do cromossomo dos indivíduos, fornecendo assim meios para a introdução de novos elementos na população. O operador de mutação é aplicado com uma probabilidade de mutação P_m ; geralmente pequena, pois é um operador genético secundário. A mutação é aplicada no valor de um bit.

3.7 Algoritmo Genético Simples

Goldberg (1989) descreveu um modelo chamado Algoritmo Genético Simples que foi usado como referência no método proposto, mostrado na Fig. 3.



Figura 3 Algoritmo Genético Simples

3.8 Parâmetros Genéticos

Os parâmetros genéticos são as constantes que ajustam o desempenho dos GA conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis. Para as simulações realizadas são utilizados os seguintes parâmetros:

Tamanho da população: 30 indivíduos.

Probabilidade de cruzamento: 0.8.

Probabilidade de mutação: 0.005.

Critério de convergência: convergência absoluta da notas de aptidão de cada indivíduo obtida a cada geração ou o número máximo de gerações igual a 50.

4 Simulações e Resultados

O programa foi implantado inicialmente em MATLAB, comprovada a validade do método, codificado em linguagem C.

O sistema utilizado é o Sistema CHESF Oeste antes da interligação com Tucuruí. A Fig. 4 mostra a configuração deste sistema que conta com 24 geradores e 4 compensadores síncronos, representados por seus circuitos equivalentes.

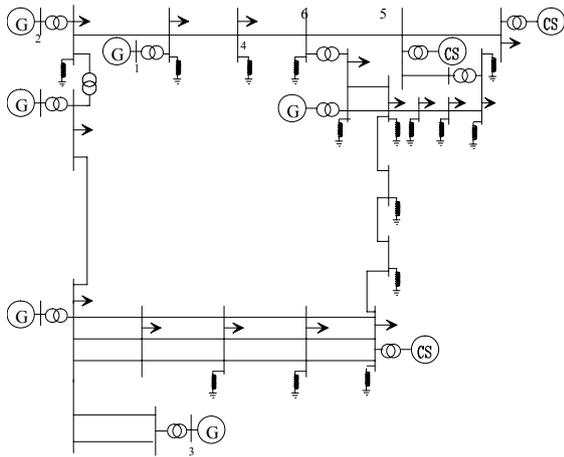


Figura 1 Diagrama unifilar do Sistema CHESF - Oeste.

Simula-se um curto-circuito trifásico equilibrado na barra 4, durante 0,1s, nos seguintes casos:

1. Ausência de estabilizadores no sistema de potência simulado.
2. Presença de estabilizadores no sistema de potência simulado, ajustando separadamente pelo método convencional de DeMello e Concordia (1969).
3. Presença de estabilizadores no sistema de potência simulado, ajustados pelo método proposto (otimização dos parâmetros K_q , T_q , T_1 e T_2 dos estabilizadores através de AG).

A tabela 1 apresenta os parâmetros, ajustados pelo método de DeMello e Concordia (1969), utilizados pelos estabilizadores do sistema de potência simulado.

Tabela 1 Parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência utilizados pela CHESF

Máquina	K_q	T_1	T_2	T_q
1	0.300	0.589	0.050	4.500
2	7.000	0.290	10.000	3.000
3	3.736	0.428	9.000	3.000

A tabela 2 apresenta os parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência computados pela técnica proposta.

Tabela 2 Parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência computados pela técnica proposta.

Máquina	K_q	T_1	T_2	T_q
1	0.300	0.125	0.083	3.000
2	0.300	0.288	0.062	3.000
3	0.300	4.196	0.293	3.000

Na ausência de estabilizadores no sistema de potência simulado, tem-se uma resposta pouco amortecida do ângulo de torque da máquina 1. Esta é uma característica das máquinas com reguladores de tensão rápidos que é ressaltada na Fig. 5.

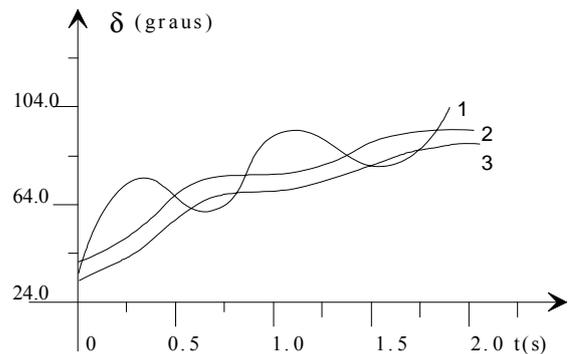


Figura 2 Ângulo de torque das máquinas sem implementação de Estabilizadores de sistemas de potência.

Quando os estabilizadores (de acordo com a CHESF) são implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3, as respostas angulares são mais amortecidas, como mostrado na Fig. 6.

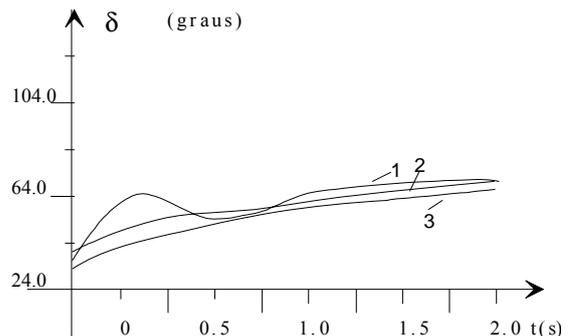


Figura 3 Ângulo de Torque nas máquinas com instalação de estabilizadores projetados segundo a CHESF.

Quando os estabilizadores de sistemas de potência são projetados de acordo com a técnica aqui proposta, as respostas angulares são também amortecidas. Os resultados estão apresentados na Fig. 7.

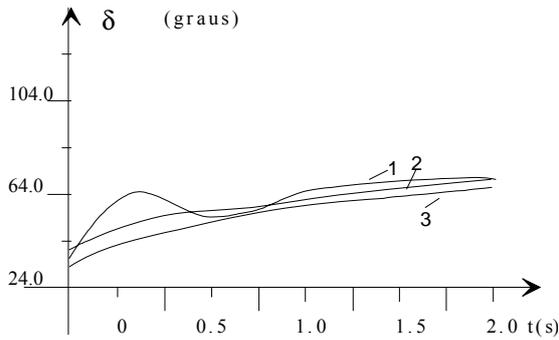


Figura 7 Ângulo de Torque nas máquinas com instalação de estabilizadores projetados pela técnica proposta.

5 Conclusões

O método proposto consiste na utilização de torque de amortecimento como função a ser otimizada pelo algoritmo genético, levando em consideração o mútuo acoplamento entre as diversas máquinas do sistema.

A otimização com algoritmos genéticos traz robustez ao método por não se obter somente um único ponto de operação, mas sim um conjunto de soluções possíveis (população) devidamente avaliados (nota de aptidão).

Observa-se que os resultados obtidos nas simulações e apresentadas nas Fig. 6 e 7 não apresentam diferenças relevantes. Isto se deve ao pequeno número de estabilizadores presentes no sistema CHESF Oeste. Em sistemas de grande porte os resultados do método proposto serão bem mais significativos.

Os parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência são calculados simultaneamente, evitando-se um número excessivo de simulações através de tentativa e erro, prática atual da indústria.

O método apresentado resulta em uma formulação simples, substituindo a técnica empírica hoje utilizada, garantindo matematicamente a robustez e a fácil interação com programas computacionais de projeto de sistemas elétricos de potência.

Referências Bibliográficas

- Bomfim, A. L. B., G.N. Taranto e D. M. Falcão (2000). Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 163-169.
- De Mello, F. P. e Concordia, C. (1969). Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. *IEEE Trans. Power App. Systems.*, Vol. PAS-88, pp. 316-329.
- Falcão, D. M (1996) Genetic Algorithms in Power System Optimization. *Anais do V Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Recife (PE), pp. 755-761.
- Folly, K.A. (2005). Multimachine power system stabilizer design based on a simplified version of

genetic algorithms combined with learning. *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*, dia 6-10 Nov., pp.7.

- Freitas, F.D., Simões Costa, A. , Silva, A S. e Rorim, J.G (1998) Robust Design of Controllers for Multimachines Systems Based on Genetic Algorithms. *Anais do VI SEPOPE*, Salvador (BA)
- Freitas, F.D., Simões Costa, A. e Silva, A S. (1997) Projeto Robusto de Estabilizadores de Sistemas de Potência Baseados em Algoritmos Genéticos. *Anais do III Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, Florianópolis (SC), pp. 143-148.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, MA.
- Holland, J. H. (1974) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, Cambridge
- Martins, N. e Lima, L. T. G. (1990). Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems. *IEEE PES Symposium on Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*.
- Mota, W. S. e Carvalho, P. B. (1986). Ajuste de Parâmetros em Reguladores de Velocidade Usando Técnicas de Otimização. *Anais do VII Congresso de La Asociación Chilena de Controle Automatico*. Antofagasta - Chile.
- Moussa, H.A.M. e Yu,Y.M. (1974). Dynamic Interaction of Multi-Machine Power System and Excitation Control. *IEEE Power App. Syst.*, Vol. Pas-93, July/Aug. , 1974, pp. 1150-1158
- Nascimento, J. A. e Mota, W. S. (2002). Algoritmos Genéticos Aplicados ao Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência. *Anais do I Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos*, Campina Grande (PB).
- Rashidi, M.; Rashidi, F.; Monavar, H (2003). Tuning of power system stabilizers via genetic algorithm for stabilization of power system. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5, pp. 4649 - 4654
- Silva, M. G. e Mota, W. S. (1984). Projeto de Sinais Estabilizadores em Sistemas de Potência Usando Técnicas de Controle Clássico e Otimização. *Anais do 5º Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande PB, pp. 685-690.
- Taranto, G.N. e Falcão, D. M. (1996) A Robust Decentralized Power System Damping Control Design Using Genetic Algorithms .*Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo(SP),
- Viveros, E.R.C.; Taranto, G.N.; Falcao, D.M. (2005). Coordinated tuning of AVR and PSSs by multiobjective genetic algorithms. *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*, 6-10 Nov., pp. 6.