

ESTUDO DE SELEÇÃO DE SINAIS PARA CONTROLE DESCENTRALIZADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

ALEXANDRE C. DE CASTRO*, CLIVALDO S. DE ARAÚJO[†]

**Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia.
Rua Emídio dos Santos s/n, Barbalho, CEP 40300-010, Salvador, BA, Brasil, +55-71-2102 9456
E-mail: castro@cefetba.br*

*[†]Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.
Cidade Universitária, Campus I, CEP 58059-900, João Pessoa, PB, BRASIL, +55-83-216 7272
E-mail: clivaldo@ct.ufpb.br*

Resumo— Técnicas de controle de sistemas multivariáveis são usadas para análise e seleção de sinais para realimentação e de locais para aplicação de controladores em sistemas de potência de múltiplas unidades, visando ao amortecimento de modos de oscilação. É dada ênfase às técnicas de análise de resposta em frequência multivariável. O procedimento proposto é aplicado em um sistema de carga-frequência de três áreas como exemplo. A sua aplicação em sistemas contendo múltiplas máquinas e FACTS com sinais locais ou remotos é imediata.

Abstract— Control techniques for multivariable systems are used for analysis and selection of signals to be fed back and of sites for application of controllers in multi-unit power systems with the aim of damping the oscillation modes. Emphasis is given to the multivariable frequency response techniques for system analysis. The proposed procedure is applied to a load-frequency system with three areas as an example. Its application in multimachine power systems with FACTS, using local or remote signals, is straightforward.

Palavras chaves— Sistemas de potência; Análise modal; Valor singular; Matriz de ganhos relativos .

1 Introdução

Atualmente, muitas pesquisas na área de dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão focadas no problema de oscilações de baixa frequência [15]. Essas oscilações são comumente associadas aos modos eletromecânicos (ME) locais e interáreas [1]. A seleção de locais para aplicação de controladores e a identificação dos sinais mais eficientes para amortecer esses modos é de grande importância, já que, em geral, os sistemas de potência são grandes e complexos. Geralmente, tem sido usada uma estrutura de controle descentralizado. Na realidade, a forma mais natural de controlar um grande sistema é com o uso de controle descentralizado. Sabe-se, todavia, que controladores descentralizados podem não ser suficientes para amortecer ME interárea em certas situações [20]. Em sistemas de potência modernos é crescente a necessidade de usar-se alguma ação centralizada de controle [17]. Entretanto, um controlador centralizado é impraticável nesses sistemas. Uma solução intermediária pode ser implementada com o uso de controladores parcialmente descentralizados, onde uma quantidade muito pequena de sinais é transmitida de uma unidade (ou área) para outra [5].

O estudo de oscilações em sistemas de potência tem sido usualmente realizado por análise de autovalores do modelo linearizado. Todavia, autovalores e autovetores podem não dar as informações suficientes para uma boa estabilização do sistema, pois a dinâmica do sistema depende de

outras características, como os zeros do sistema, por exemplo, [13]. Além disso, quando alguns modos são próximos de outros, os algoritmos iterativos para determinar os autovetores podem convergir para vetores falsos. Também, o projeto de um controlador baseado em posicionamento de autovalores pode não proporcionar um desempenho satisfatório do sistema para uma faixa ampla de condições de funcionamento [10]. Portanto, apesar da determinação de respostas em frequência em grandes sistemas ser computacionalmente demorada, as técnicas baseadas no domínio de frequência são mais apropriadas para tratar modos oscilatórios e são mais relacionadas com a prática dos engenheiros das empresas de geração de energia.

As técnicas clássicas de resposta em frequência, quando usadas em sistemas MIMO, tratam cada par entrada-saída separadamente, o que dificulta a análise de interações [2]. As técnicas multivariáveis de resposta em frequência podem utilizar todas ou grupo de entradas e saídas para análise em conjunto, tornando-se mais fácil a análise de interações e para seleção simultânea dos pares entrada-saída mais adequadas para controle do sistema [19].

Levando essas idéias em consideração, apresenta-se um procedimento para análise de sinais de saída e de entradas de controle, visando a seleção de pares mais eficazes para serem utilizados em controladores de sistemas de potência descentralizados ou parcialmente descentralizados.

2 Análise de Sinais para Controle Descentralizado

Seja um sistema de potência geral com n unidades, m entradas de controle e r sinais de saída. A descrição entrada-saída do sistema é dada por:

$$Y(j\omega) = G(j\omega)U(j\omega) \quad (1)$$

onde $G(j\omega)$ é a matriz de funções de transferência de respostas em frequência (MFTfr). Assume-se que $G(j\omega)$ é arrumada na forma:

$$G(j\omega) = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde a sub-matriz G_{ii} é a descrição interna da unidade i e G_{ij} , $j \neq i$, representa a interligação da unidade i com a unidade j .

As MFTfr, $G(j\omega)$, em sistemas de potência, são usualmente obtidas diretamente do sistema representado no espaço de estado [12]. Essas matrizes são determinadas para valores discretos de ω , na faixa de interesse, e armazenadas em disco magnético para o estudo a ser realizado, onde todas as entradas e saídas que possam ser usadas no estudo devem ser incluídas.

Em sistemas de potência, dois tipos de modos de oscilação (MO) são de maior interesse, entre os ME. Eles são os modos locais e os modos interárea [11]. Outros MO que podem causar preocupação, dependendo do sistema e da condição de operação, são os modos de excitação, modos intra-sistema, modos de vibração de eixos, etc.

Os valores singulares da matriz $G(j\omega)$ são usados para análise do sistema. Esses valores são definidos por

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i (G^H G)} = \sqrt{\lambda_i (G G^H)} \quad (3)$$

onde λ_i é o i -ésimo autovalor da matriz e G^H é a matriz conjugada e transposta de G . Os valores singulares de uma matriz são reais e não negativos. Definindo-se σ_M como o maior e σ_m como o menor deles e a sua relação $\gamma = \sigma_M / \sigma_m$ como o número de condição, as seguintes propriedades de interesse são descritas [15,7]:

- i - σ_M obtido na frequência de um MO representa o grau de observabilidade do modo na resposta do sistema e σ_m representa o grau de controlabilidade do modo (grande valor de σ_m indica forte controlabilidade pela entrada).
- ii - MO pouco amortecidos e fortemente observáveis na saída apresentam grandes picos

no gráfico de σ_M . Os picos de σ_M são também associados à robustez do sistema. Sistemas robustos apresentam pequenos picos de σ_M [18, 9].

- iii - Uma depressão no gráfico de σ_m representa um zero influente na referida frequência.
- iv - Para que um MO seja bem controlável necessita-se que $\sigma_m \gg 0$ na frequência do modo.
- v - Número de condição elevado indica dificuldade de controle.
- vi - Valores singulares e número de condição são dependentes das escalas (valores de base) das entradas e saídas do sistema.

“Interações no Domínio de Frequência”

A matriz de ganhos relativos (MGR) é uma importante ferramenta de análise de interações em sistemas multivariáveis. Ela é definida, para $G(m \times m)$, ou seja, $r = m$, por

$$\Lambda(G) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \lambda_{m1} & \cdots & \lambda_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde $\lambda_{ij} = g_{ij} b_{ji}$ e b_{ji} é o elemento ji de G^{-1} .

Para $r \neq m$, $B = G^\dagger$, onde G^\dagger é a matriz inversa generalizada de G . Neste caso:

$$B = (G^H G)^{-1} G^H \text{ para } m \leq r \text{ e } \text{Posto}(G) = m$$

$$B = G^H (G G^H)^{-1} \text{ para } r \leq m \text{ e } \text{Posto}(G) = r$$

No caso de $\text{Posto}(G) < \min(r, m)$, a matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose de G deve substituir B .

Verifica-se que $\lambda_{ij} = g_{ij} b_{ji}$ onde $g_{ij} = \left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_k=0, k \neq j}$ e $b_{ji} = \left(\frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right)_{y_k=0, k \neq i}$ [3,16].

Isso mostra que λ_{ij} é a relação entre (a saída i com a entrada j , considerando todas as outras entradas constantes)/(a entrada j com a saída i , considerando todas as outras saídas constantes).

Define-se λ_{ij} como uma medida de interação entre a entrada j e a saída i [3]. A MGR inicialmente foi usada apenas em estado estacionário, $\omega = 0$ [3]. Todavia, sabe-se que em muitos casos a MGR em frequências próximas do cruzamento de ganho, ($\sigma_M = 1$), é também muito importante. A MGR pode ser também importante na análise de MO.

O número da MGR, que também é usado na análise de sistemas multivariáveis, é definido por

$$\text{MGR}_N = \|\Lambda(G) - I\|_{\text{soma}} \quad (5)$$

onde $\|\bullet\|_{\text{soma}}$ denota a norma da matriz quadrada, definida como a soma dos valores absolutos dos seus elementos. A MGR_N é boa uma medida da proximidade de $\Lambda(G)$ com a identidade, indicando boa descentralização. Então, se $MGR_N \cong 0$ a descentralização é boa. Entretanto, esta condição é só suficiente. Para compensar esta deficiência, é proposto um limite, tornando uma medida independente da ordem da matriz, que é definida para uma matriz $n \times n$, por

$$MGR_N = \varepsilon n^2 \quad (6)$$

no qual o parâmetro ε representa o limite da média das magnitudes dos elementos de $\|I - \Lambda(G)\|$. Para uma descentralização boa, é requerido que ε seja pequeno, $\varepsilon \leq 0,1$.

A MGR tem muitas propriedades, entre elas, citam-se:

- i - A soma dos elementos de uma linha ou de uma coluna de Λ é igual à unidade, no caso de $r = m$. Se $r \neq m$, resulta $\sum_{i=1}^r \lambda_{ij} = 1$, se $\text{Posto}(G) = m$ e $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} = 1$, se $\text{Posto}(G) = r$.
- ii - A MGR é independente da escala (valores de base) das entradas e saídas, se $r = m$. Se $r \neq m$, então, Λ é independente das escalas das saídas se $\text{Posto}(G) = r$ e é independente das escalas das entradas se $\text{Posto}(G) = m$.
- iii - Qualquer permutação de linhas e colunas de G resulta na mesma permutação em Λ .
- iv - A norma $\|\Lambda\|_{\text{soma}}$ tem um valor aproximado do número de condição mínimo γ^* . Isso significa que sistemas onde Λ resulta com elementos de grandes valores absolutos são sempre mal condicionados e de difícil controle.
- v - Se qualquer elemento de Λ muda de sinal entre $\omega = 0$ e $\omega = \infty$, então existe algum zero no semiplano complexo à direita do eixo imaginário.

Como uma eficiente ferramenta de verificação de interações entre entradas e saídas, a matriz Λ pode ser utilizada na seleção de entradas para aplicação de controladores e de sinais de saída para serem realimentados através desses controladores.

Pela definição do elemento λ_{ij} e pelas propriedades da MGR, algumas regras utilizadas na seleção de entradas e saídas para o controle descentralizado do sistema podem ser enumeradas:

- i - Para evitar instabilidade por interações em baixa frequência, não se deve utilizar o par saída-

entrada correspondente a λ_{ij} negativo no estado estacionário ($\omega = 0$).

- ii - Zeros multivariáveis no semiplano complexo à direita do eixo imaginário podem ser um fator limitante para aplicação de controladores. Eles têm um grande efeito nos picos de resposta, ultrapassagens, largura de faixa, sensibilidade e robustez do sistema [14,2]. Na realidade uma má distribuição de zeros na proximidade do eixo imaginário pode causar uma grande dificuldade em controlar os MO. Sendo assim, deve-se evitar pares de entradas e saídas que resultem em zeros no semiplano complexo à direita e sobretudo próximos do eixo imaginário.

“Procedimento Para Seleção de Entradas e Saídas Para aplicação de Controladores”

Valores singulares e matrizes de ganhos relativos são usados no procedimento de seleção. Utiliza-se, inicialmente, a MFTfr completa. Considerando $G(r \times m)$, $r \geq m$, $\text{Posto}(G) = m$, os passos para seleção de entradas e saídas para aplicação de controladores descentralizados, visando ao amortecimento dos MO, são os seguintes:

- i - Pré-eliminação de entradas e saídas. Determine a matriz $\Lambda(0)$ (estado estacionário), considerando todas as entradas e saídas de todas as unidades. Então, desconsidere para seleção todos os pares para os quais $\lambda_{ij} < 0$ e para cada unidade desconsidere a(s) saída(s) com $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \ll 1$. Considere para posterior

análise as saídas com valores maiores de $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij}$

e os pares com valores grandes de $\lambda_{ij} > 0$. Com a análise dessa MGR total no estado estacionário é possível eliminar um certo grupo de saídas e algumas entradas, restando, para análise detalhada, l saídas e s entradas e $G(l,s)$, $l \geq s$. Evidentemente, com a eliminação de entradas e saídas, algumas unidades podem ser desconsideradas para a análise seguinte.

- ii - Identificação das unidades mais relacionadas com os MO. Assumindo que p controladores descentralizados são suficientes para amortecer todos os modos críticos ($p \cong$ o número de modos críticos é usualmente suficiente), formam-se os conjuntos de unidades e então determina-se para cada conjunto, os zeros de transmissão, $\Lambda(G(0))$ e $\Lambda(G(\omega_c))$. A seguir analisa-se por (6), a possibilidade de aplicação do controle descentralizado para cada conjunto. Conjuntos fracamente descentralizados e conjuntos com zeros no lado direito do semi-plano complexo ou com zeros próximos da origem, devem ser descartáveis.

Conjuntos no qual $\Lambda(G(0))$ ou $\Lambda(G(\omega_c))$ possuem elevados elementos, devem ser evitados. Após a análise, poucos conjuntos são selecionados para a análise final.

iii - Seleção final. Para cada conjunto selecionado para análise final, determinam-se os gráficos de $\sigma_m(G)$ até a região da frequência de corte. É selecionado o conjunto com o maior $\sigma_m(G)$ ao longo das frequências dos MO.

Observe que todas as matrizes utilizadas no procedimento são obtidas diretamente das MFTfr gerais armazenadas para o estudo. Os zeros devem ser determinados a partir da representação por variáveis de estado.

Comparado com os métodos baseados na seleção e aplicação de controladores, de um em um, até o amortecimento de todos os MO, o método proposto seleciona simultaneamente o conjunto mais eficiente de saídas e entradas e somente depois os controladores são aplicados. Com a seleção simultânea, pode resultar um número menor de controladores.

Usualmente, autovalores e autovetores são usados para seleção de locais para aplicação de estabilizadores em sistemas de potência [6].

3 Um Exemplo de Aplicação

Um sistema de potência de controle de carga-frequência de três áreas equivalentes interligadas é usado para ilustração. Aqui as unidades são as áreas. O sistema é representado na Fig. 1. O modelo dinâmico, representado no espaço de estado, linearizado em torno de um ponto de operação, é descrito em [4]. Os valores dos parâmetros foram omitidos por questão de espaço e podem ser obtidos com os autores.

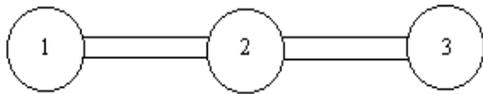


Figura 1. Sistema de três áreas interligadas.

O modelo do sistema é representado por

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{X}\end{aligned}$$

onde

$$\mathbf{X}^T = [f_1 \ x_{E1} \ P_{G1} \ P_{tie1} \ f_3 \ x_{E3} \ P_{G3} \ P_{tie2} \ f_2 \ x_{E2} \ P_{G2}]$$

$$\mathbf{u}^T = [P_{C1} \ P_{C3} \ P_{C2}]$$

$$\mathbf{y}^T = [f_1 \ P_{tie1} \ f_3 \ P_{tie2} \ f_2]$$

onde f_i , x_{Ei} , P_{Gi} e P_{tiei} são respectivamente, frequência, sinal de saída do regulador de velocidade, potência mecânica da turbina e potência de intercâmbio do turbogerador da área i , em valores incrementais. P_{Ci} é a entrada de controle do regulador de velocidade da área i . A nomenclatura seguida foi a de [8].

O sistema tem três MO, cujos autovalores associados são: modo 1: $-0,1759 \pm j3,0010$; modo 2: $-0,1199 \pm j4,0102$ e modo 3: $-0,1893 \pm j4,6410$. Em [5], foi verificado que os três modos são do tipo interárea, recomendando aplicar controladores nas três áreas para amortecer os três MO. Neste trabalho, aqueles resultados são verificados, usando agora o procedimento proposto para sistemas MIMO. Seguem-se os passos do procedimento, usando MATLAB.

A MGR no estado estacionário, considerando apenas entradas e saídas que podem ser usadas para controle, acompanhada da soma de cada uma das linhas, resultou:

$$\Lambda(0) = \begin{array}{ccc|c} \Delta P_{C1} & \Delta P_{C3} & \Delta P_{C2} & \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \\ \hline 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 & 0,3335 \\ 0,7500 & -0 & 0,2500 & 1 \rightarrow \Delta P_{tie1} \\ 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 & 0,3335 \\ -0 & 0,7500 & 0,2500 & 1 \rightarrow \Delta P_{tie2} \\ \hline 0,0834 & 0,0834 & 0,1667 & 0,3335 \end{array}$$

Da análise de $\Lambda(0)$ conclui-se que os seus elementos são todos menores que um, então, provavelmente, o controle do sistema não será difícil. Conclui-se também que ΔP_{tie1} e ΔP_{tie2} são os sinais de saída mais efetivos e as entradas ΔP_{C1} e ΔP_{C3} são as mais efetivas para aplicação de controladores. Todavia, os sinais de frequência têm significativo efeito, sobretudo na sua própria área. Só dois pares de entrada-saída são completamente ineficazes, de acordo com o esperado. Esses pares são $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C3})$ e $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C1})$. Isso também ocorre para $\omega \neq 0$.

Os valores singulares de $G(0)$, são $\sigma_M = 2,539$ e $\sigma_m = 0,811$, resultando $\gamma = 3,13$, confirmando a previsão de controle fácil do sistema.

Analisando os valores singulares da descrição de cada unidade verifica-se que o modo 1 não é observável na unidade 1, mas é bem observável nas unidades 2 e 3. O modo 2 é bem observável em todas as unidades e o modo 3 é bem observável nas unidades 1 e 2 e não observável na unidade 3.

Da análise selecionam-se os pares seguintes para controle descentralizado: $(\Delta P_{tie1}, \Delta P_{C1})$; $(\Delta P_{tie2}, \Delta P_{C3})$ e $(\Delta f_2, \Delta P_{C2})$ resultando, no final, dois casos de maior interesse:

Caso 1: $y^T = (\Delta P_{tie1} \ \Delta P_{tie2} \ \Delta f_2)$ e $u^T = (\Delta P_{C1} \ \Delta P_{C3} \ \Delta P_{C2})$

Caso 2: $y^T = (\Delta P_{tie1} \ \Delta P_{tie2})$ e $u^T = (\Delta P_{C1} \ \Delta P_{C3})$

Os gráficos dos valores singulares do sistema para os dois casos são apresentados nas Fig. 2 e Fig. 3, respectivamente.

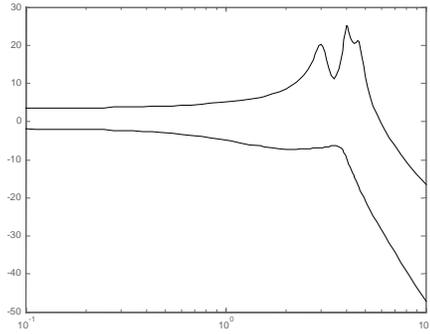


Figura 2. Valor singular máximo e mínimo do sistema em dB versus frequência em rad/s (caso 1).

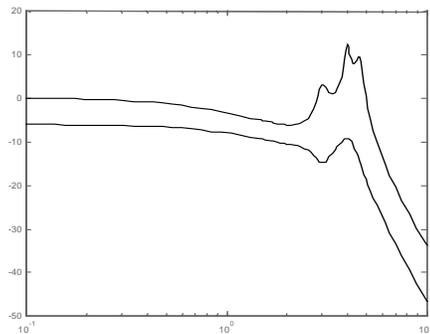


Figura 3. Valor singular máximo e mínimo do sistema em dB versus frequência em rad/s (caso 2).

Da análise das Figuras 2 e 3 conclui-se que os três MO são muito influentes. O valor singular σ_m é maior, em toda faixa de frequência de maior interesse para o caso 1, indicando maior controlabilidade dos MO, neste caso. O modo 1 é praticamente não controlável com a descrição do caso 2, devido a um zero $z = -0,2755 \pm j2,9905$ que, embora não esteja no semiplano direito está muito próximo e com a mesma frequência do modo 1, exercendo sobre ele uma grande influência. Logo, o modo 1 não é bem controlado com a descrição do caso 2.

Os números das MGR dos dois casos na frequência de corte de σ_m ($\omega_c = 5,9 \text{ rad/s}$ para o caso 1 e $\omega_c = 5,0 \text{ rad/s}$ para o caso 2), resultaram $MGR_N = 1,85$ para o caso 1 e $MGR_N = 1,02$ para o caso 2. Com isso obtêm-se $\epsilon = 0,205$ para o caso 1 e $\epsilon = 0,255$ para o caso 2.

A descrição do caso 1 apresenta melhores características para o controle descentralizado do sistema. Observa-se porém, com a análise dos valores de ϵ , que as descentralizações não são boas. Considerando agora sinais compostos de saída, representados por:

$$y_2^T = [P_{tie1} + Bf_1 \quad P_{tie2} + Bf_3 \quad -P_{tie2} + Bf_2], \quad B = 0,45$$

A MGR, em $\omega_c = 6 \text{ rad/s}$, resultou

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1,063 - j0,036 & 0 & -0,063 + j0,036 \\ -0,004 - j0,003 & 1,004 - j0,103 & 0 + j0,106 \\ -0,059 + j0,039 & -0,004 + j0,103 & 1,063 - j0,142 \end{bmatrix}$$

com $\epsilon \approx 0,07$.

Verifica-se, então, que os sinais de y_2 com as entradas, u , resultam em pares com uma descentralização muito boa. Os gráficos de σ_M e σ_m da descrição $y_2 = G_2(j\omega)u$ são apresentados na Fig. 4.

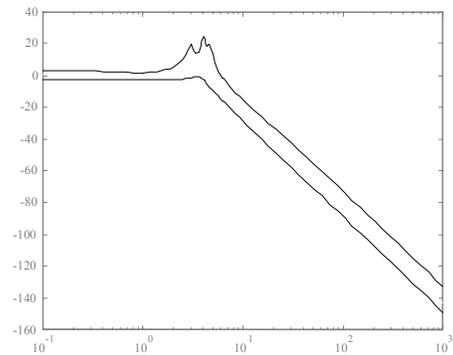


Figura 4. Valor singular máximo e mínimo de $G_2(j\omega)$ em dB versus frequência em rad/s.

Comparando o gráfico de σ_m com os das descrições estudadas anteriormente, verifica-se que σ_m para G_2 é superior, em toda faixa de frequência dos MO, aos obtidos nos casos 1 e 2 e de todos outros analisados. Assim, os sinais de y_2 são selecionados para realimentação.

3 Conclusões

Um procedimento para seleção simultânea dos sinais de saída e das entradas mais eficientes para aplicação de controladores, visando ao amortecimento de oscilações em sistemas de potência é proposto no artigo. Foram usadas técnicas de análise de sistemas MIMO no domínio de frequência com ênfase em ganhos relativos e valores singulares.

A análise modal proposta para MO é uma contribuição do artigo. Conclui-se que o uso isolado de ganhos relativos para seleção de saídas e entradas pode falhar, no caso de MO. Por outro lado o uso apenas de valores singulares para seleção pode ser impraticável, quando um grande número de saídas e entradas deve ser analisado, devido ao grande número de combinações possíveis. Com a combinação de sinais os resultados obtidos foram mais eficazes. O procedimento proposto, onde os

ganhos relativos são usados para pré-seleção de saídas e entradas, deixando a seleção final para ser realizada com o uso de valores singulares parece muito adequado e eficiente para aplicação em sistemas de potência de grande porte, sendo, portanto, outra contribuição do artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. José Calazans de Castro por suas valiosas sugestões.

Referências Bibliográficas

- [1] Araújo, C. S., Castro, J. C. (1996). *Techniques for Stabilizing Interarea Oscillations in Power Systems*. Anais do 13th IFAC World Congress, San Francisco, CA, July, 229-234.
- [2] Araújo, C. S., Castro, J. C. (1998). *Resíduos e Interações Modais no Controle de Modos de Oscilação em Sistemas de Potência*. Anais do 12^o Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, v.3, 993-997.
- [3] Bristol, E. H. (1966). *On a New Measure of Interactions for Multivariable Process Control*. IEEE Trans. on Automatic Control, AC-11, 133-134.
- [4] Calvert, J. L., Titli, A. (1989). *Overlapping vs Partitioning in Bloc-Iteration Methods: Application in Large-Scale Theory*. AUTOMATICA, 25, 137-145.
- [5] Castro, J. C., Araújo, C. S. (1998). *Frequency Domain Analysis of Oscillatory Modes in Decentralized Control Systems*. AUTOMATICA, 34, 1647-1649.
- [6] Castro, J. C., Catão, M. Ó., Doraiswami, R. (1988). *Identification of the Generating Units to Be Equipped With Stabilizers in a Multimachine Power Systems*. AUTOMATICA, 24, 405-409.
- [7] Cruz, J. J. (1996). *Controle Robusto Multivariável*. Editora Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [8] Elgerd, O. I. (1970). *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. Mc. Graw Hill do Brasil, São Paulo.
- [9] Komla A. F., Yorino, N., Sasaki, H. (1996). *Design of H_{∞} -PSS Using Numerator-Denominator Uncertainty Representation*. 1996 IEEE Summer Meeting, Paper 553-8 EC.
- [10] Kundur, P., Klein, M., Rogers, G. J., Zywno, M. S. (1989). *Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Performance*. IEEE Trans. on Power Systems, PWRS-4, 614-626.
- [11] Larsen, E. V., Swann, D. A. (1981). *Applying Power System Stabilizers*. IEEE Trans. PAS, PAS-100, 3017-3046.
- [12] Martins, N. (1986). *Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Stability Studies*. IEEE Trans. On Power Systems, PWRS-1, 217-226.
- [13] Martins, N., Pinto, H. J. C. P., Lima, L. T. G. (1992). *Efficient Methods for Finding Transfer Function Zeros of Power Systems*. PWRS-7, 1350-1361.
- [14] Middleton, R. H. (1991). *Trade-offs in Linear Control System Design*. AUTOMATICA, 27, 281-292.
- [15] Rogers, G. (2000). *Power Systems Oscillations*. Kluwer Academic Publishers.
- [16] Skogestad, S., Postlethwaite, I. (1996). *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- [17] Tada, Y., Ohkubo, H., Kurita, A. (1996). *Multivariable Control Design for Damping Interarea Oscillations of Bulk Power Systems Using a Modal Reduction Technique*. IEEE Trans. on Power Systems, PWRS-11, 295-302.
- [18] Taranto, G. N., Chow, J. H. (1994). *A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers*. 1994 IEEE Summer Meeting, Paper 531-4 PWRS.
- [19] Van de Wal, M., De Jager, B. (2001). *A Review of Methods for Input/Output Selection*. AUTOMATICA, 37, 487-510.
- [20] Yang, X., Feliachi, A. (1993). *Stabilization of Inter-Area Oscillation Modes Through Excitation Systems*. IEEE Winter Meeting, 1993, Paper 93 WM 206-3 PWRS.