

UM ESTUDO SOBRE ROBUSTEZ DE CONTROLADORES DESCENTRALIZADOS 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*

Abstract— Techniques for analysis and design of controllers of multivariable systems in the frequency domain are used for verifying the possibility of obtaining robust control with reduced order decentralized controllers aiming the robust stability of the power system. To reach the robustness, the selection of signals and inputs for application of controllers is crucial. The proposed techniques are applied to a load-frequency system with three areas. The application in larger system is straightforward.

Keywords— Power systems; Mode analysis; Singular values; Robust control; Decentralized control.

Resumo— Técnicas de análise e projeto de controladores de sistemas multivariáveis no domínio de frequência são usadas para verificar a possibilidade de se obter controle robusto com controladores de ordem reduzida descentralizados, visando a estabilidade robusta do sistema de potência. Para que a robustez possa ser atingida, é imprescindível a seleção dos sinais e das entradas mais eficazes para aplicação dos controladores. As técnicas propostas são aplicadas em um sistema de carga frequência de três áreas. A aplicação em sistemas maiores é imediata.

Palavras-chave— Sistema de potência; Análise modal; Valores singulares; Controle robusto; Controle descentralizado.

1 Introdução

Nas últimas décadas, muitas técnicas para projetar controladores para sistemas de potência foram desenvolvidas. A principal preocupação tem sido o amortecimento das oscilações eletromecânicas (Martins, 1986; Araújo e Castro, 1996). As técnicas tradicionais, todavia, são desenvolvidas para o modelo linearizado em torno de um ponto de operação, sem levar em consideração as incertezas do modelo devidas às não linearidades, variações do ponto de operação, etc. Recentemente, alguns pesquisadores têm-se preocupado não só com o amortecimento das oscilações, mas também com a aplicação de controle robusto para proporcionar suficiente amortecimento em todos pontos comuns de operação (Boukarim et al., 2000; Djukanovic et al., 1998).

Nas técnicas desenvolvidas que se baseiam na representação por variáveis de estado, o controlador resulta no mínimo de mesma ordem do modelo (Cruz, 1996), ficando difícil a aplicação em sistemas grandes. Para contornar esse problema, o modelo é previamente reduzido e posteriormente a ordem do controlador é também reduzida (Boukarim et al., 2000; Klein et al., 1994). Se o sistema é MIMO, torna-se complicado o projeto de controladores descentralizados robustos. Na realidade, a forma mais natural de controlar um grande sistema é com a aplicação de controle descentralizado. Também, para que

o controlador seja bem aceito por engenheiros e operadores de sistemas de potência, é recomendável que ele seja de ordem reduzida e de fácil ajustagem. Entretanto, com controladores descentralizados de ordem reduzida, pode não ser possível satisfazer as exigências para resultar um controle robusto do sistema.

Tradicionalmente, as técnicas de controle robusto são desenvolvidas para anulação de erro entre entrada e saída. Em sistemas de potência, entretanto, essa função já é executada pelos reguladores. Assim os controladores suplementares são utilizados para amortecimento das oscilações, principalmente das associadas aos modos locais e interáreas (Araújo e Castro, 1996).

Para que se possa atingir a robustez com controle descentralizado torna-se imprescindível a seleção das entradas e saídas mais eficazes para aplicação dos controladores (Castro e Araújo, 2002). Mesmo com essa seleção, pode não ser possível atingir a robustez exigida.

Neste artigo, propõe-se uma técnica direta para determinação dos parâmetros ótimos de controladores de estrutura fixa, descentralizados, para controle robusto de sistemas de potência de múltiplas unidades. A seleção prévia dos pares entrada-saída mais eficazes para aplicação dos controladores é realizada usando RGA e valores singulares. Além de amortecer as oscilações pretende-se atingir a estabilidade robu-

ta do sistema.

Com relação à literatura publicada sobre controle robusto, onde o controle centralizado é desenvolvido para uma só unidade ou, no caso de múltiplas unidades, com prévia redução do modelo de grande dimensão e posterior redução da ordem do controlador, o presente trabalho contribui no sentido de obter o controlador descentralizado de ordem reduzida diretamente do modelo completo.

Embora o controle de excitação com PSS seja mais adequado para amortecer os modos eletromecânicos, optou-se pelo modelo de carga-freqüência por parecer mais didático e por apresentar maior dificuldade de controle e seleção dos sinais, requerendo sinais compostos para atingir a robustez.

2 Análise de Sinais para Controle Descentralizado

O sistema de potência com n unidades, m entradas de controle e r sinais de saída é descrito por:

$$\mathbf{y}(j\omega) = \mathbf{G}(j\omega)\mathbf{u}(j\omega) \quad (1)$$

onde $\mathbf{G}(j\omega)$ é a matriz de funções de transferência de respostas freqüenciais (MFTfr).

A partir da definição de controlabilidade apresentada por Van de Wal e De Jager (2001) pode-se definir a “controlabilidade” de um modo de oscilação (MO) como a habilidade do sistema para amortecer o MO para atingir um desempenho aceitável com entradas e saídas limitadas. Do mesmo modo, pode-se definir a “observabilidade” de um MO como a contribuição do MO na resposta do sistema.

Os zeros de um sistema podem provocar significativos efeitos na controlabilidade e observabilidade dos modos e no projeto dos controladores (Skogestad e Postlethwaite, 1996). A única maneira de se evitar zeros indesejáveis é com a prévia seleção de entradas e saídas adequadas para aplicação de controladores.

Para análise de controlabilidade e observabilidade modais de sistemas multivariáveis no domínio de freqüência são utilizados os “valores singulares” da MFTfr, que para o caso da matriz $\mathbf{G}(j\omega)$ são definidos por

$$\sigma_i(\mathbf{G}) = \sqrt{\lambda_i(\mathbf{G}^H\mathbf{G})} = \sqrt{\lambda_i(\mathbf{G}\mathbf{G}^H)}, i = 1, \dots, k \quad (2)$$

onde λ_i é o i -ésimo autovalor da matriz, \mathbf{G}^H é a matriz conjugada e transposta de \mathbf{G} e $k = \min(m, r)$. Definindo $\bar{\sigma}$ como o maior valor singular, $\underline{\sigma}$ como o menor e a relação $\gamma = \bar{\sigma}/\underline{\sigma}$ como o número de condição, as seguintes propriedades de interesse são descritas (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 1996):

- $\bar{\sigma}$ na freqüência de um MO representa o grau de observabilidade do modo na resposta do sistema e $\underline{\sigma}$ representa o grau de controlabilidade do modo. MO pouco amortecidos e fortemente

observáveis apresentam grandes picos no gráfico de $\bar{\sigma}$. Os picos de $\bar{\sigma}$ são associados à robustez do sistema. Sistemas robustos apresentam pequenos picos de $\bar{\sigma}$.

- Uma depressão no gráfico de $\underline{\sigma}$ indica a existência de um zero influente na referida freqüência.
- Número de condição elevado ($\gamma > 10$) indica dificuldade de controle, principalmente se $\underline{\sigma} \ll 1$.
- A norma l_2 de \mathbf{G} é $\bar{\sigma}(\mathbf{G})$. Também, $\|\mathbf{G}^{-1}\| = 1/\underline{\sigma}(\mathbf{G})$.

Define-se a “freqüência de corte”, ω_c , como a freqüência onde $\bar{\sigma}=1$, quando $\bar{\sigma}$ está decrescendo.

Considere o sistema de potência $\mathbf{G}(j\omega)$ com controladores $\mathbf{H}(j\omega)$, entradas de referência \mathbf{R} e distúrbios, \mathbf{d} , como apresentado na Fig. 1.

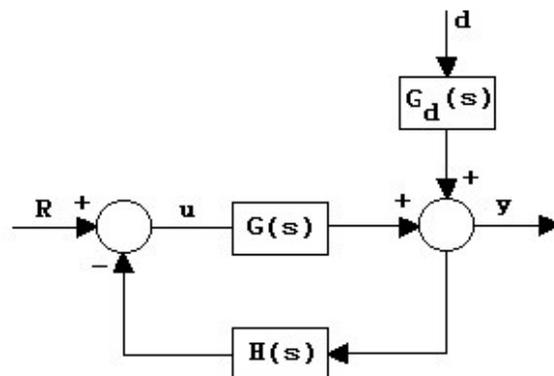


Figura 1. O sistema de potência com controlador

A seguinte relação é obtida da Fig. 1:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{G}\mathbf{R} + (\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{G}_d\mathbf{d} \quad (3)$$

onde $\mathbf{S} = (\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H})^{-1}$ é a matriz de sensibilidade e $\mathbf{T} = \mathbf{S}\mathbf{G}$ é a matriz de funções de transferência de malha fechada do sistema. Essas matrizes são usadas para análise do desempenho do sistema controlado.

Considere uma variação na referência \mathbf{R} , assumindo $\mathbf{d} = \mathbf{0}$. Então, resulta $\|\mathbf{y}\|/\|\mathbf{R}\| = \bar{\sigma}(\mathbf{T}) = \bar{\sigma}(\mathbf{G})/\underline{\sigma}(\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H})$. Ainda, sabendo que $\underline{\sigma}(\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H}) \geq \underline{\sigma}(\mathbf{G}\mathbf{H}) - 1$ e que $\underline{\sigma}(\mathbf{G}\mathbf{H}) \geq \underline{\sigma}(\mathbf{G})\underline{\sigma}(\mathbf{H})$, resulta:

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}) \leq \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{G})}{\underline{\sigma}(\mathbf{G})\underline{\sigma}(\mathbf{H}) - 1} \quad (4)$$

Do mesmo modo, considerando somente o efeito do distúrbio na saída, verifica-se que $\|\mathbf{y}\|/\|\mathbf{d}\| \leq \bar{\sigma}(\mathbf{G}_d)/(\underline{\sigma}(\mathbf{G})\underline{\sigma}(\mathbf{H}) - 1)$. Esses resultados mostram que $\underline{\sigma}(\mathbf{G})$, que depende da seleção de entradas e saídas, deve ser grande para reduzir $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$ e o efeito dos distúrbios, facilitando a ação do controlador. Se $\underline{\sigma}(\mathbf{G}) \ll 1$ na faixa de freqüência dos modos de oscilação, será quase impossível o controle robusto do sistema com controladores descentralizados. Isso explica porque $\underline{\sigma}(\mathbf{G})$ é considerado como o grau de controlabilidade do sistema.

“Interações Freqüenciais”

A matriz de ganhos relativos (MGR) é importante para análise de sistemas multivariáveis e será usada para uma prévia seleção de entradas e saídas para controle descentralizado. A MGR é definida por:

$$\Lambda(\mathbf{G}(j\omega)) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \lambda_{r1} & \cdots & \lambda_{rm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde $\lambda_{ij} = g_{ij}b_{ji}$ e b_{ji} é o elemento ji de \mathbf{G}^\dagger (matriz inversa generalizada de \mathbf{G}), definida por $\mathbf{G}^\dagger = (\mathbf{G}^H\mathbf{G})^{-1}\mathbf{G}^H$ para $m \leq r$, $\text{Posto}(\mathbf{G}) = m$ ou $\mathbf{G}^\dagger = \mathbf{G}^H(\mathbf{G}\mathbf{G}^H)^{-1}$ para $r \leq m$, $\text{Posto}(\mathbf{G}) = r$.

Sabe-se que λ_{ij} é uma medida de interação entre a entrada j e a saída i (Skogestad e Postlethwaite, 1996). Verifica-se, também, que λ_{ij} é uma medida do efeito que o controle do restante das variáveis tem no ganho entre u_j e y_i (Milanovic e Duque, 2001).

Utilizando as suas propriedades, a MGR pode ser usada para seleção dos pares entrada-saída mais efetivos. Entretanto, a utilização da MGR isoladamente para essa seleção tem algumas limitações. A maior limitação é a impossibilidade de se selecionar a saída mais efetiva entre sinais de uma mesma unidade, por exemplo velocidade e potência elétrica num gerador (Milanovic e Duque, 2001) ou, de uma maneira geral, sinais com alguma relação entre si.

Em Castro e Araújo (2002) foi proposta uma técnica que combina MGR e valores singulares na seleção dos pares entrada-saída mais efetivos para aplicação de controladores descentralizados. Essa técnica se mostra muito eficiente e confiável para seleção de sinais.

“Descentralização”

Um conjunto de entradas e saídas é completamente descentralizado se $\Lambda(\mathbf{G}) = \mathbf{I}$. Entretanto, essa igualdade só ocorre se a matriz \mathbf{G} for triangular, que não é o caso de sistemas de potência. Todavia, pode-se aceitar como descentralizado o conjunto que resultar $\Lambda(\mathbf{G}(j\omega)) \cong \mathbf{I}$ para $\omega = \omega_c$ (Skogestad e Postlethwaite, 1996). Quanto mais próximo da matriz identidade resultar $\Lambda(\mathbf{G}(j\omega_c))$ mais independentes são os pares entrada-saída e conseqüentemente menores interações ocorrerão entre os controladores.

“Seleção de Entradas e Saídas”

A seleção de pares para aplicação de controladores descentralizados é realizada conforme o procedimento proposto por Castro e Araújo (2002):

Inicialmente todas as entradas e sinais de saída são usados para determinação da MGR na freqüência $\omega = 0$. Com essa matriz eliminam-se os sinais e entradas pouco efetivos ou que provoquem interações

indesejáveis.

A seguir, considerando que p controladores são suficientes para amortecer os modos de oscilação com controle robusto do sistema, formam-se todos os conjuntos com p entradas e p saídas. Então esses conjuntos são testados para verificação da descentralização na freqüência $\omega = \omega_c$. Conjuntos com fortes interações entre unidades (fraca descentralização) são descartados.

Finalmente, os conjuntos restantes são comparados, usando valores singulares, para selecionar o conjunto com boa descentralização e com a maior controlabilidade ($\underline{\sigma}$ maior) na faixa dos MO. Esse conjunto é usado para aplicação de controladores descentralizados.

3 Projeto de Controladores Robustos Descentralizados

Os controladores são projetados levando em consideração os erros de modelagem. Esses erros, denominados incertezas, ocorrem por não se incluir no modelo as não linearidades, as mudanças dos parâmetros com as variações de carga e devido à exclusão da dinâmica dos geradores, sistemas de excitação, etc. Adotam-se as incertezas multiplicativas refletidas na saída, como representado na Fig. 2 (Cruz, 1966; Skogestad e Postlethwaite, 1996), onde $\Delta_o \mathbf{W}_o(s) = (\mathbf{G}' - \mathbf{G})\mathbf{G}^{-1}$ é a matriz de incertezas relativas e \mathbf{G}' é a matriz de transferência do sistema real. A matriz diagonal $\mathbf{W}_o(s)$ representa os limites superiores das incertezas nos canais de controle.

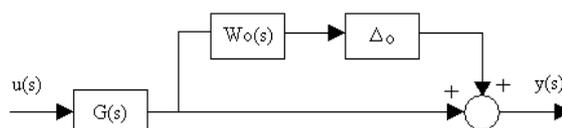


Figura 2. Diagrama de blocos do sistema de potência real

Tem-se $\mathbf{G}'(s) = (\mathbf{I} + \Delta_o \mathbf{W}_o)\mathbf{G}(s)$. $\mathbf{S}' = (\mathbf{I} + \mathbf{G}'\mathbf{H})^{-1}$ é a matriz de sensibilidade do sistema real. Então, $\mathbf{S}' = [\mathbf{I} + (\mathbf{I} + \Delta_o \mathbf{W}_o)\mathbf{G}\mathbf{H}]^{-1}[\mathbf{I} + \mathbf{G}\mathbf{H}]\mathbf{S}$. Assumindo que no intervalo de freqüência de maior interesse ocorre $\underline{\sigma}(\mathbf{G}\mathbf{H}) \gg 1$, resulta:

$$\overline{\sigma}(\mathbf{S}') \leq \frac{\gamma(\mathbf{G})\gamma(\mathbf{H})}{\underline{\sigma}(\mathbf{I} + \Delta_o \mathbf{W}_o)} \overline{\sigma}(\mathbf{S}) \quad (6)$$

Da Eq. (6) conclui-se que o controle descentralizado não contribuirá para deteriorar a sensibilidade do sistema se $\gamma(\mathbf{H})=1$, ou seja, quando controladores idênticos são empregados nos diversos canais. O mesmo resultado se obtém para incertezas na entrada, o que significa que o sistema se torna mais robusto para falhas nos controladores quando estes são idênticos.

Introduzindo as incertezas no diagrama de blocos da Fig. 1 e arrumando-os para separar o bloco de incertezas Δ_o , resulta o diagrama da Fig. 3, onde $\mathbf{M}(s) = -\mathbf{W}_o(s)\mathbf{T}(s)\mathbf{H}(s)$.

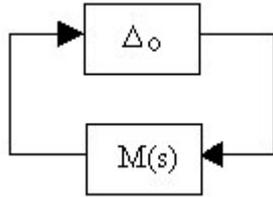


Figura 3. Estrutura $\mathbf{M}\Delta$ do sistema

Usualmente, a matriz $\mathbf{W}_o(s)$ é representada por $\omega_o(s)\mathbf{I}$, onde $\omega_o(s)$ é um peso, considerando um único limite superior, representando o pior caso, associado a todos os canais de controle (Cruz, 1996; Skogestad e Postlethwaite, 1996). Esse peso é descrito por $\omega_o(s) = (\zeta_s + \zeta_o) / [(\zeta/\zeta_o)s + 1]$, onde ζ_o é a incerteza relativa no estado estacionário, $1/\zeta$ é aproximadamente a frequência onde a incerteza relativa atinge 100% e ζ_o é a magnitude do peso em altas frequências.

Assumindo que a matriz \mathbf{M} e as perturbações Δ sejam estáveis, então o sistema $\mathbf{M}\Delta$ da Fig. 3 é estável para todas perturbações com $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, se e só se (Skogestad e Postlethwaite, 1996):

$$\mu(\mathbf{M}(j\omega)) < 1, \forall \omega$$

onde $\mu(\mathbf{M})$ é o valor singular estruturado de \mathbf{M} .

Sabe-se que $\mu(\mathbf{M}) \leq \bar{\sigma}(\mathbf{M})$ e que a igualdade ocorre quando a matriz de incertezas, Δ , é cheia, que deve ocorrer com erros de modelagem e exclusão de dinâmica dos geradores, rede de transmissão, etc. Sendo assim, considera-se como condição necessária e suficiente para estabilidade robusta do sistema, com $\bar{\sigma}(\Delta) \leq 1, \forall \omega$, a condição:

$$\bar{\sigma}(\mathbf{M}(j\omega)) < 1 \quad \forall \omega \quad (7)$$

Assume-se que o controlador é de estrutura conhecida (descentralizado e de ordem reduzida). Para atingir a robustez, os parâmetros do controlador $\mathbf{H}(s)$ são ajustados para solução do seguinte problema de otimização:

$$\min[\text{Sup}(\bar{\sigma}(\mathbf{M}(j\omega)))] \quad (8)$$

sujeito a $\gamma(\mathbf{H})=1$
 $\eta_{s\min} \leq \eta_s \leq \eta_{s\max}, s = 1, 2, \dots, l$

onde η é o vetor de l parâmetros ajustáveis de \mathbf{H} , que são ajustados entre limites práticos. Então, se controladores idênticos são usados em todos canais selecionados, o projeto se reduz a um problema de otimização sem restrições.

Considere $\mathbf{M} = \omega_o \mathbf{T}\mathbf{H}$ (o sinal negativo não afeta o resultado). Então, a Eq. (7) reduz-se a $\bar{\sigma}(\mathbf{M}) = \omega_o \bar{\sigma}(\mathbf{T}\mathbf{H}) \leq \omega_o \bar{\sigma}(\mathbf{T})\bar{\sigma}(\mathbf{H}) < 1$, ou

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}) < \frac{1}{\omega_o} \cdot \frac{1}{\bar{\sigma}(\mathbf{H})} \quad \forall \omega \quad (9)$$

Para controladores idênticos, $\bar{\sigma}(\mathbf{H}) = \underline{\sigma}(\mathbf{H}) = 1/\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1})$, que substituído na Eq. (9), resulta:

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}) < \frac{\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1})}{\omega_o} \quad \forall \omega \quad (10)$$

Então, o procedimento, computacionalmente mais prático, para projetar o controlador robusto consiste em ajustar \mathbf{H} para minimizar $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$, satisfazendo a Eq. (10). Se essa desigualdade não é satisfeita, então não se pode atingir a robustez, para as incertezas estabelecidas, com a estrutura proposta para o controlador.

A função a ser minimizada não é uma expressão explícita. Então, é recomendável utilizar uma técnica para otimização que não necessite calcular derivadas. O método direto de otimização denominado "Pattern Search" de Hooke e Jeeves (Gottfried e Weisman, 1973) é escolhido devido a sua adaptação ao problema.

4 Aplicação a um Sistema de Carga-Frequência

O sistema de potência de controle de carga-frequência de três áreas equivalentes interligadas é usado para ilustração. O modelo linearizado é apresentado por (Calvet e Titli, 1989) e os valores dos parâmetros do sistema são apresentados em (Castro e Araújo, 2002). O sistema é representado na Fig. 4.

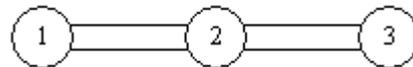


Figura 4. Sistema de três áreas interligadas

O modelo do sistema é representado por

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{X}$$

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 .

O sistema tem três MO, cujos autovalores associados são: modo 1: $-0,1759 \pm j3,0010$; modo2: $-0,1199 \pm j4,0102$ e modo 3: $-0,1893 \pm j4,6410$. Em (Castro e Araújo, 1998), foi verificado que os três modos são do tipo interárea, recomendando aplicar controladores nas três áreas para amortecer os três MO. Neste trabalho, estuda-se a possibilidade de implantação de controladores descentralizados robustos, após a prévia seleção dos sinais de saída.

Conforme foi verificado em (Castro e Araújo, 2002), usando $\Lambda(\mathbf{G}(0))$, os sinais mais efetivos são P_{tie1} e P_{tie2} , mas os sinais de frequência têm significativos efeitos, sobretudo nas suas próprias áreas. Foi também verificado que com dois ou três desses sinais simples só se poderia obter descentralizações razoáveis, tornando impossível o controle robusto.

Neste trabalho, consideram-se 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 $\omega_c = 6$ rad/s, resultou

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

Verifica-se, então, que os sinais de y_2 com as entradas, u , resultam em pares com uma descentralização muito boa. Os gráficos de $\bar{\sigma}$ e $\underline{\sigma}$ da descrição $y_2 = \mathbf{G}_2(j\omega)\mathbf{u}$ são apresentados na Fig. 5.

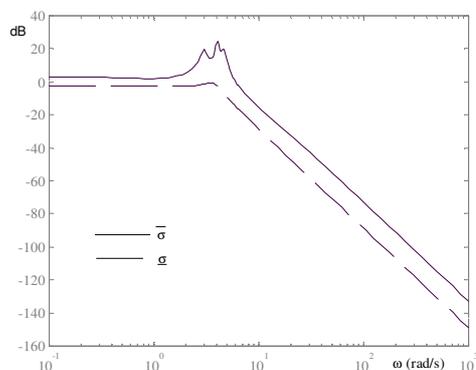


Figura 5. Valores de $\bar{\sigma}$ e $\underline{\sigma}$ de $\mathbf{G}_2(j\omega)$

Comparando o gráfico de $\underline{\sigma}$ com os das descrições estudadas em (Castro e Araújo, 2002), verifica-se que $\underline{\sigma}$ para \mathbf{G}_2 é superior, em toda faixa de frequência dos MO, aos obtidos nos casos daquele artigo e de todos outros analisados. Assim, os sinais de y_2 são selecionados para realimentação. Observe-se que, apesar dos sinais de y_2 serem os mais efetivos, ainda poderá haver dificuldade para atingir a robustez do controle, “porque” $\underline{\sigma}(\mathbf{G}_2) < 1$ em toda faixa de frequência.

As três áreas são um tanto parecidas, justificando a utilização de controladores idênticos. Assim, suge-

re-se a aplicação de controladores idênticos do tipo $h_i = K(1+sT_1)/(1+sT_2)$ em cada área. Os parâmetros dos controladores são ajustados para minimizar $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$, resultando $K=0,5$, $T_1=0,001$ s e $T_2=0,005$ s. Os gráficos de $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$ com o controlador obtido e de $\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1})/\omega_0$ para $\omega_{01}=(0,25s+0,15)/(0,5s+1)$ são apresentados na Fig. 6.

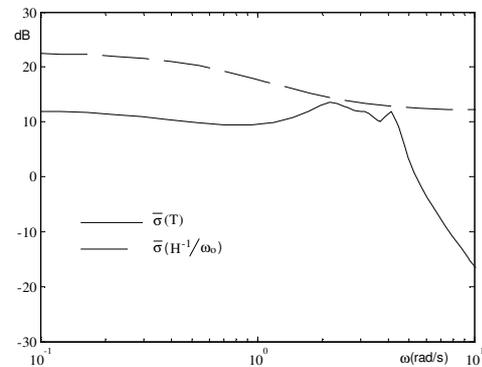


Figura 6. Gráficos de $\bar{\sigma}(\mathbf{T})$ para o controle proposto e de $\bar{\sigma}(\mathbf{H}^{-1})/\omega_0$

A Fig. 6 mostra que o controle robusto pode ser obtido para incertezas não elevadas, usando controladores descentralizados de 1ª ordem. Melhores resultados deverão ser obtidos com controladores de ordem superior.

Para efeito de comparação, repetiu-se o estudo, usando integradores puros ($u_i = (K/s)y_i$) como controladores, a exemplo do controle tradicional de intercâmbio. Verificou-se, todavia, que o controle robusto não pode ser atingido, no modelo em estudo, com controle tradicional.

O sistema foi simulado com aumento de carga na área 2: a) sem controlador na área 1 e com variações dos parâmetros das turbinas, b) com aumento de 20% nas potências de intercâmbio. Resultado comparativo da área 2, dessa última simulação é apresentado na Fig. 7. Os resultados dessas simulações comprovam a robustez do controlador proposto.

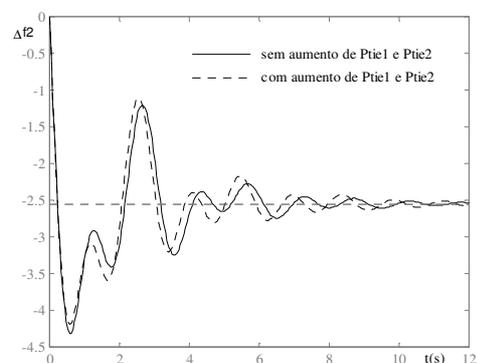


Figura 7. Frequência da área 2 sem e com aumento de 20% em P_{tie1} e P_{tie2}

5 Conclusões

A possibilidade de se obter o controle robusto de um sistema de carga-frequência de três áreas, usando controladores descentralizados e de ordem reduzida foi estudada. Verificou-se que o controle robusto, com essas limitações no controle, pode ser atingido, desde que sejam previamente selecionados os sinais de saída mais efetivos para realimentação.

Técnicas frequenciais multivariáveis, usando MATLAB, e de otimização direta de funções foram utilizadas com sucesso.

No entender dos autores, contribuiu-se, principalmente, por utilizar controle descentralizado com controladores de ordem reduzida, usando técnicas multivariáveis no domínio da frequência na análise e projeto do controlador robusto, com uma prévia análise de descentralização e seleção simultânea de sinais para realimentação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. José Calazans de Castro por suas valiosas sugestões e à FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- 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.
- Boukarim, G. E., Wang, S., Chow, J. H., Taranto, G. N., Martins, N. (2000). A Comparison of Classical, Robust, and Decentralized Control Designs for Multiple Power System Stabilizers. IEEE Trans. On Power Systems, 15, 1287-1292.
- Calvert, J. L., Titli, A. (1989). Overlapping vs Partitioning in Bloc-Iteration Methods: Application in Large-Scale Theory. AUTOMATICA, 25, 137-145.
- Castro, A. C., Araújo, C. S. (2002). Análise de Sinais para Controle Descentralizado em Sistemas de Potência. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática.
- Castro, J. C., Araújo, C. S. (1998). Frequency Domain Analysis of Oscillatory Modes in Decentralized Control Systems. AUTOMATICA, 34, 1647-1649.
- Cruz, J. J. (1996). Controle Robusto Multivariável. Editora Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Djukanovic, M., Khammash, M., Vittal, V. (1998). Application of the Structured Singular value Theory for Robust Stability and Control Analysis in Multimachine Power Systems. Parts I and II, IEEE Trans. on Power Systems, 13, 1311-1322.
- Gottfried, B. S., Weisman, J. (1973). Introduction to Optimization Theory. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Klein, M., Le, L. X., Rogers, G. J., Farrokhpay, S., Balu, N. J. (1994). H_∞ Damping Controller Design in Large Power Systems. IEEE Winter Meeting, Paper 94 WM 127-7 PWRS.
- Martins, N. (1986). Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Stability Studies. IEEE Trans. On Power Systems, 1, 217-226.
- Milanovic, J. V., Duque, A. C. S. (2001). The Use of Relative Gain Array for Optimal Placement of PSS. IEEE Trans. On Power Systems, 16, 992-996.
- Skogestad, S., Postlethwaite, I. (1996). Multivariable Feedback Control Analysis and Design. John Wiley & Sons.
- Van de Wal, M., De Jager, B. (2001). A Review of Methods for Input/Output Selection. AUTOMATICA, 37, 487-510.