

Análise e Avaliação do Desempenho dos Controladores em Sistemas Elétricos com Ressonância

Manuel Moisés Bessa* Aginaldo Silveira e Silva*

* Grupo de Estudo em Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.

E-mail: mamobessa@gmail.com; aginaldo.silva@ufsc.br

Abstract: In this paper, the conditions for the occurrence of near strong resonance in power systems and the performance of PSSs (Power System Stabilizers), as compared to the conventional mechanism of loss of stability, are assessed. The controller design methods used in this work are based on Nyquist's stability criterion and on the optimization of performance and robustness indices. The main objective of the projected PSSs is to guarantee, in addition to the overall stability of the system, the robustness and good dynamic performance throughout the considered operation interval. The performance of PSSs is analyzed by inter-area mode damping, taking the damping curve of the open-loop system as a performance index.

Resumo: Neste artigo, as condições para a ocorrência de ressonância quase forte em sistemas elétricos e o desempenho dos PSSs, em comparação com o mecanismo convencional de perda de estabilidade, são avaliados. Os métodos de projeto dos controladores usados neste trabalho são baseados no critério de estabilidade de Nyquist e na otimização dos índices de desempenho e robustez. O objetivo principal dos PSSs projetados é garantir, além da estabilidade global do sistema, a robustez e o bom desempenho dinâmico em todo intervalo de operação considerado. O desempenho dos PSSs é analisado através do amortecimento do modo inter-área, tomando a curva de amortecimento do sistema em malha aberta como índice de desempenho.

Keywords: Strong resonance; Oscillation modes; Modal interaction; Small-signal stability; Power system stabilizers.

Palavras-chaves: Ressonância forte; Modos de oscilação; Interação modal; Estabilidade para pequenas perturbações; Estabilizadores de sistemas de potência.

1 Introdução

Sistemas elétricos são continuamente sujeitos a variações de carga e geração. Essas variações são suficientemente pequenas para que a trajetória do sistema perturbado permaneça na vizinhança de um ponto de equilíbrio e a dinâmica do sistema possa ser descrita por um modelo linearizado (Kundur et al., 1994). O modelo linear e seus modos de oscilação associados variam conforme os parâmetros do sistema variam. Os modos de oscilação bem amortecidos podem eventualmente se aproximar e interagir de forma que um dos modos se torna instável. Isto ocorre quando dois pares complexos conjugados de autovalores coincidem na frequência e no amortecimento. A este fenômeno dá-se o nome de ressonância. A ressonância é dita fraca se o sistema linearizado for diagonalizável no ponto de ressonância. Se o sistema linearizado não for diagonalizável, a ressonância é chamada de ressonância forte (Dobson et al., 2001) e (Seyranian and Mailybaev, 2003).

A análise convencional de oscilações considera os modos de oscilação sem levar em conta a possibilidade de interação

entre eles. Neste caso um modo de oscilação isolado cruza para o lado direito do plano complexo. No entanto, o fenômeno de ressonância forte deve ser considerado como um possível mecanismo alternativo para a perda de estabilidade do sistema Dobson et al. (2001). Neste caso a instabilidade ocorre após dois modos interagirem através do fenômeno da ressonância. A análise isolada do movimento e diminuição do amortecimento do autovalor que cruza o eixo imaginário não é suficiente para uma avaliação do desempenho do sistema.

Vários trabalhos abordam o efeito de ressonância forte no desempenho dos controladores em sistemas elétricos. Klein et al. (1992) apontam que a interação entre modos pode ocasionar conclusões não adequadas quanto a controlabilidade das oscilações observadas e como consequência, a adição de PSSs não introduz o amortecimento esperado no modo de interesse. Liu et al. (2005), usam métodos convencionais para alocação de PSSs e concluem que as informações incorretas fornecidas por esses métodos são devidas à não consideração de não linearidades do sistema. Uma metodologia para identificar os aspectos não lineares de interesse na análise e projeto de PSSs e na avaliação de margens de estabilidade é então proposta. Os autores estendem a formulação apresentada no trabalho anterior

* Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo suporte financeiro concedido.

e concentram-se no uso da teoria da forma normal para determinar a melhor seleção de unidades geradoras a serem equipadas com PSSs (Liu et al., 2006). Gharebaghi and Ghazi (2013) verificam que, a conclusão apresentada em (Liu et al., 2005) e (Liu et al., 2006), é devido à não consideração da interação dos modos ao passarem próximo a uma ressonância forte e sugerem o uso da parte real de fatores de participação como um índice para identificação de máquinas adequadas para alocação de PSSs em condições de ressonância quase forte. Jyothsna and Vaisakh (2011) e Jyothsna and Vaisakh (2013), utilizam o PSS e o SSSC (Static Synchronous Series Compensator - SSSC), respectivamente, no problema de controle de instabilidade oscilatória provocada pela ocorrência de ressonância forte. Os autores concluem que a escolha apropriada dos parâmetros para o ajuste ideal do controlador, deve levar em consideração o efeito da interação entre os modos envolvidos.

Neste artigo, o estudo apresentado em (Gharebaghi and Ghazi, 2013), (Liu et al., 2005) e (Liu et al., 2006) é estendido. O desempenho dinâmico dos PSSs é avaliado para a ocorrência de ressonância forte em comparação com o mecanismo convencional de perda de estabilidade. O artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção 2, os conceitos básico de ressonância são introduzidos. A síntese dos controladores é apresentado na Seção 3. Na Seção 4, os controladores projetados são aplicados ao sistema teste, e finalmente as conclusões mais relevantes são apresentadas na Seção 5.

2 Conceito de ressonância forte

O conceito matemático e geométrico de ressonância forte é descrito em (Seyranian and Mailybaev, 2003) e (Dobson et al., 2001). Considere o movimento dos autovalores de um sistema dinâmico parametrizado por um número real u , que varia de -2 à 2 , como mostrado na Figura 1(a). Quando $u = 0$, dois autovalores coincidem em $-1.5 + j4$, caracterizando uma ressonância forte. Quando u aumenta a partir de 0 , o movimento dos autovalores muda de direção em torno de um ângulo de 90° . Um autovalor se torna instável após a ressonância. Em sistemas dinâmicos reais, como sistemas de potência, é incomum ocorrer uma ressonância forte. Entretanto, é possível verificar-se um fenômeno semelhante, chamada de ressonância quase forte. A Figura 1(b) mostra o movimento dos autovalores de um sistema dinâmico com a ressonância quase forte. A medida que o parâmetro u varia de -2 à 2 , os dois autovalores se aproximam e rapidamente repelem-se um do outro e, mudam de direção em torno de um ângulo de aproximadamente 90° , e um dos autovalores se torna instável após a ressonância. Nessa condição, a trajetória dos autovalores é descrita em forma de parábola.

3 Síntese dos controladores

No estudo de estabilidade para pequenas perturbações, busca-se projetar controladores, capazes de prover amortecimento aos modos de oscilação de baixa frequência. Técnicas de projeto baseadas nos métodos de controle clássico, usualmente pela resposta em frequência ou lugar das raízes são usadas. Nos métodos clássicos, o projeto de controladores é feito apenas para um ponto de operação,

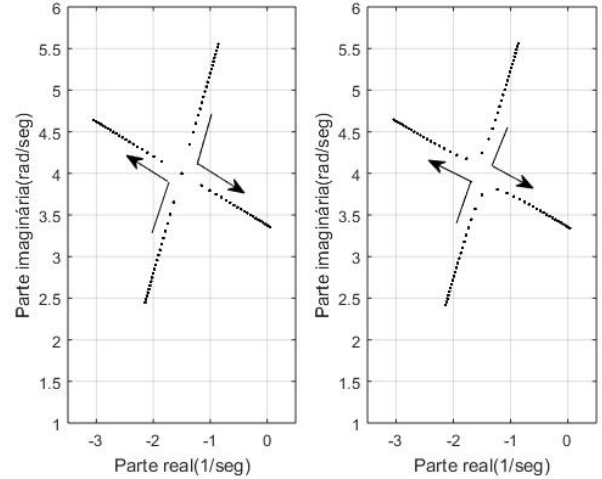


Figura 1. (a) Ressonância forte; (b) Ressonância quase forte.

tratado como um problema de controle SISO, considerando um gerador por vez (Kundur et al., 1998), (Larsen and Swann, 1981), (Kundur et al., 1989), (Bollinger et al., 1979) e (Guimarães et al., 2000).

O desempenho do sistema é sensível às constantes alterações paramétricas que alteram as condições de operação. Técnicas de controle clássico mostram-se limitadas para responder a estas alterações, requerendo o uso de técnicas de controle robusto. Alguns trabalhos abordando aplicação dessas técnicas em sistemas de potência, são apresentados em (Dill and e Silva, 2012), (Scavoni et al., 2001) e (Dotta et al., 2009).

3.1 Métodos de projetos de controladores

a) **Posicionamento de pólos:** o método utilizado é apresentado em (Guimarães et al., 2000) que é uma extensão do (Gomes Jr et al., 1998). Essa metodologia considera os critérios de estabilidade de Nyquist com a especificação de amortecimento do modo desejado para determinação dos parâmetros do PSS, cuja estrutura é formada por blocos de avanço-atraso.

b) **Norma H_∞ :** é o valor do pico da magnitude da função de transferência de malha fechada em toda faixa de frequência. Em caso de sistemas MIMO, é o valor do pico da resposta do máximo valor singular da função da frequência. Em caso de sistemas SISO, refere-se ao valor do pico no gráfico de magnitude do diagrama de Bode (Zhou et al., 1996).

Considerando um sistema realimentado cuja função de transferência representada por $\hat{T}(s)$ (Zhou et al., 1996), a sua norma H_∞ é dada por

$$\|\hat{T}\|_\infty = \sup \left\{ \sigma_{max} \left(\hat{T}(j\omega) \right) \right\} \quad (1)$$

onde σ_{max} representa o maior valor singular da função de transferência e sup é o valor supremo.

O problema de otimização a ser resolvido nesta metodologia é enunciando como

$$\min_K \left\| \widehat{T}(s) \right\|_{\infty} \quad (2)$$

cuja solução consiste em encontrar um controlador K dentro do conjunto viável que minimize a norma H_{∞} da função de transferência $\widehat{T}(s)$.

4 Resultados

4.1 Sistema teste

O sistema teste é mostrado na Figura 2, comumente empregado para estudos de estabilidade e cuja versão original é apresentada em (Klein et al., 1991). Duas configurações são consideradas. A primeira é obtida usando-se o valor do ganho K_A igual para cada excitatriz das máquinas e o coeficiente de amortecimento $D = 0$ (Kundur et al., 1994), e é chamada de configuração base. A segunda configuração é obtida usando-se diferentes valores para o coeficiente de amortecimento D e o ganho K_A da excitatriz das máquinas (Liu et al., 2005), e é denominada de configuração modificada.

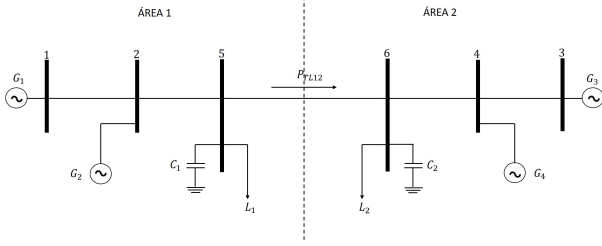


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema teste de 2 áreas e 4 máquinas.

São simulados 49 pontos de operação, obtidos incrementando-se a carga na Área 2 em passos discretos de $5MW$. A carga na Área 1 foi então modificada para obter uma determinada transferência de potência da área 1 para área 2. O primeiro ponto de operação corresponde à potência de transferência de $180.9MW$ e o último ponto à de $419.5MW$.

4.2 Análise da ocorrência de ressonância

4.2.1 Sistema com a configuração base

Os modos de oscilação do sistema para o 1° e 49° pontos de operação são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. A Figura 3 representa graficamente a taxa de amortecimento dos modos de oscilação em função da variação da potência de transferência entre as áreas. O sistema apresenta um modo inter-área instável no 1° ponto de operação e a instabilidade agrava-se à medida que o carregamento aumenta, enquanto que os demais modos são bem amortecidos. Portanto a instabilidade do sistema com a configuração base é provocada pela perda de amortecimento de um único modo inter-área de forma isolada, caracterizando o mecanismo convencional de perda de estabilidade.

Tabela 1. Modos de oscilação do sistema com a configuração base - 1° ponto de operação.

Modo n°	Autovalor	Freq.(Hz)	Amort.(%)	Fator de Part.
1,2	$0.00942 \pm j3.0656$	0.49	-0.31	δ_3
3,4	$-0.9957 \pm j7.7368$	1.23	12.76	δ_2
5,6	$-1.3037 \pm j7.4378$	1.18	17.27	$\omega\omega_4$
7,8	$-0.3426 \pm j0.5318$	0.09	54.16	AVRMAQ ₁
9,10	$-0.3562 \pm j0.5119$	0.08	57.12	AVRMAQ ₃
11,12	$-1.1966 \pm j1.0266$	0.16	77.14	E'_{q4}
13,14	$-2.2107 \pm j1.8235$	0.29	77.14	E'_{q2}

Tabela 2. Modos de oscilação do sistema com a configuração base - 49° ponto de operação.

Modo n°	Autovalor	Freq.(Hz)	Amort.(%)	Fator de Part.
1,2	$0.1556 \pm j1.8738$	0.30	-8.27	$\omega\omega_3$
3,4	$-1.0265 \pm j7.7544$	1.23	13.12	δ_2
5,6	$-1.2799 \pm j7.5755$	1.21	16.66	$\omega\omega_4$
7,8	$-0.3661 \pm j0.5561$	0.09	54.98	AVRMAQ ₁
9,10	$-0.3934 \pm j0.5216$	0.08	60.22	AVRMAQ ₃
11,12	$-1.4010 \pm j0.9616$	0.15	82.44	E'_{q4}
13,14	$-2.6854 \pm j1.6518$	0.26	85.18	E'_{q2}

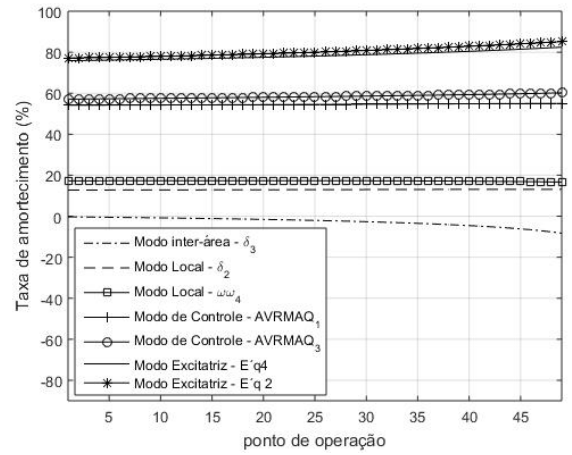


Figura 3. Taxa de amortecimento dos modos de oscilação do sistema com a configuração base.

4.2.2 Sistema com a configuração modificada

As Tabelas 3 e 4 apresentam os modos de oscilação do sistema com a configuração modificada para o 1° e 49° pontos de operação, respectivamente.

Tabela 3. Modos de oscilação do sistema com a configuração modificada - 1° ponto de operação.

Modo n°	Autovalor	Freq.(Hz)	Amort.(%)	Fator de Part.
1,2	$-1.1276 \pm j7.7111$	1.23	14.47	$\omega\omega_2$
3,4	$-0.4668 \pm j2.9855$	0.48	15.45	$\omega\omega_3$
5,6	$-1.8678 \pm j7.4253$	1.18	24.39	$\omega\omega_4$
7,8	$-0.2844 \pm j0.4367$	0.07	54.57	AVRMAQ ₂
9,10	$-0.3052 \pm j0.4555$	0.07	55.67	AVRMAQ ₃
11,12	$-1.1966 \pm j1.0266$	0.16	77.14	E'_{q4}
13,14	$-1.2720 \pm j1.1340$	0.18	74.65	E'_{q1}

Nas Figuras 4 e 5 são mostrados o movimento dos modos dominantes e a taxa de amortecimento dos modos de oscilação do sistema, respectivamente. Foi observado dois casos de ressonância quase forte. O primeiro ocorre como consequência de interação entre dois modos da excitatriz, e o seu centro de interação é em torno do 7° ponto de operação. Na Figura 5 observa-se que um dos modos da

Tabela 4. Modos de oscilação do sistema com a configuração modificada - 49° ponto de operação.

Modo n°	Autovalor	Freq.(Hz)	Amort.(%)	Fator de Part.
1,2	$-0.00531 \pm j1.1568$	0.18	-0.46	δ_3
3,4	$-1.1704 \pm j7.7410$	1.23	14.95	$\omega\omega_2$
5,6	$-1.8466 \pm j7.5608$	1.20	27.32	$\omega\omega_4$
7,8	$-0.2917 \pm j0.5029$	0.08	50.18	AVRMAQ ₁
9,10	$-0.3202 \pm j0.4774$	0.08	55.70	AVRMAQ ₃
11,12	$-1.5857 \pm j2.1107$	0.34	60.07	E'_{q4}
13,14	$-1.0401 \pm j0.6406$	0.10	85.15	AVRMAQ ₄
15,16	$-3.8144 \pm j0.4172$	0.07	99.41	E'_d

excitatriz aumenta o amortecimento antes da ressonância, enquanto outro modo perde o amortecimento. Após a ressonância, o comportamento da trajetória de amortecimento dos dois modos é oposto do observado antes da ressonância. Constata-se que, após a ressonância, nenhum dos modos se torna instável. O segundo caso de ressonância ocorre entre um modo da excitatriz e um modo inter-área, e o seu centro de interação é em torno 33° ponto de operação. Como pode ser visto, à medida que a potência transmitida aumenta, o amortecimento do modo inter-área cresce e atinge um valor máximo em torno do centro de interação e após a ressonância, o modo inter-área perde o amortecimento até se tornar instável no último ponto de operação, enquanto que o modo da excitatriz perde o amortecimento antes da ressonância e aumenta novamente após esta.

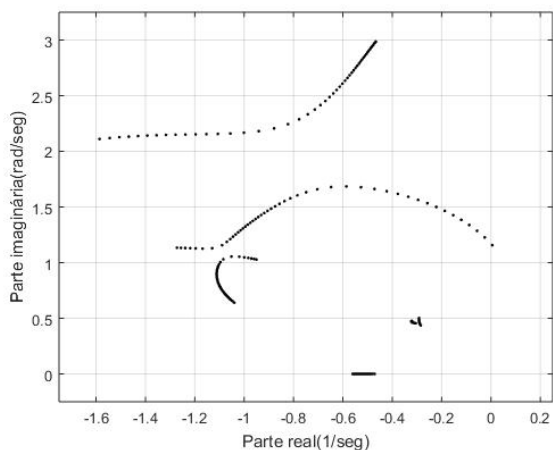


Figura 4. Movimento dos autovalores dos modos dominantes do sistema com a configuração modificada.

Os resultados acima mostram que a instabilidade do sistema com a configuração modificada é provocada pela ocorrência de ressonância quase forte, caracterizando o mecanismo de perda de estabilidade através de interação entre dois modos de oscilação.

4.3 Aplicação de controle

Nesta seção a atenção é direcionada ao modo inter-área de baixo amortecimento. Os métodos de projetos de controladores são aplicados no sistema teste para fornecer o amortecimento ao modo de interesse. Todos os controladores foram projetados empregando-se as variáveis locais. Para o método de posicionamento de pólos, os controladores foram projetados a partir do 1° ponto de operação, e para

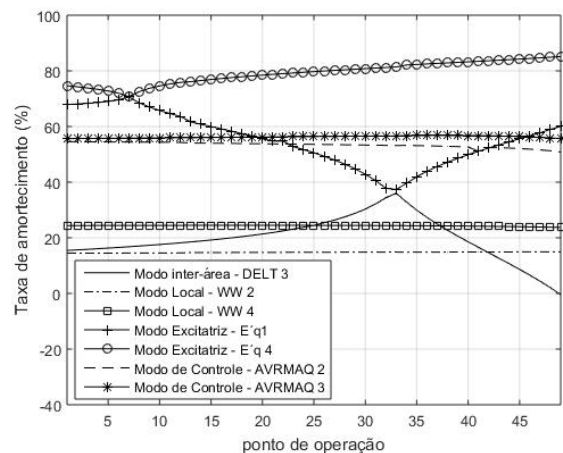


Figura 5. Taxa de amortecimento dos modos de oscilação do sistema com a configuração modificada.

o método baseado na minimização da norma H_∞ , foram projetados para um conjunto simultâneo de 5 plantas correspondentes ao 1°, 25°, 33°, 40° e 49° pontos de operação.

4.3.1 Projeto de um único controlador

O método dos índices de controlabilidade (Martins and Lima, 1990), indicam as máquinas G2 da área1 e G4 da área 2, como as melhores localizações para instalação dos controladores em todos pontos de operação, para o sistema com a configuração base e modificada, respectivamente.

4.3.1.1 Sistema com a configuração base

a) Método de posicionamento de pólos:

O controlador foi projetado com o requisito de posicionar um par de pólos com o amortecimento de 20%, e frequência de cruzamento $\omega_c = 3.00 \text{ rad/s}$. O controlador obtido é:

$$K_1(s) = K_{PSS} \frac{10s}{1 + 10s} \left(\frac{1 + 0.439s}{1 + 0.232s} \right)^2 \quad (3)$$

A Figura 6 mostra o amortecimento do modo inter-área para todos os pontos de operação, variando-se o ganho K_{PSS} do controlador. Constata-se que, à medida que a potência transmitida de área 1 para área 2 aumenta, o amortecimento do modo inter-área decresce até se tornar instável no último ponto de operação. O aumento do ganho K_{PSS} desloca a curva de amortecimento para cima, porém, não evita a degradação do amortecimento com a variação da potência transmitida. A estabilidade é assegurada quando o ganho K_{PSS} é aumentado. Entretanto, o controlador K_1 não possui bom desempenho.

b) Norma H_∞

O projeto do controlador pela otimização desse índice foi realizado com o auxílio do pacote computacional HIFOO (Burke et al., 2006). Somente controladores de segunda ordem foram considerados. A solução da minimização da norma H_∞ entre as entradas de perturbação nas cargas das barras 5 e 6, e a saída de desempenho representada pela velocidade do eixo da máquina G3, para o sistema com a configuração base resultou no controlador

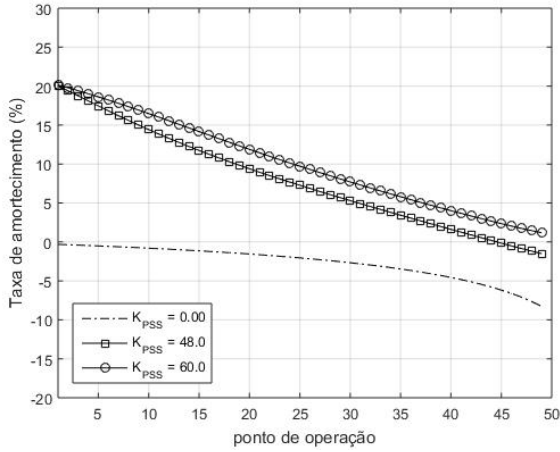


Figura 6. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com a configuração base com controlador K_1 .

K_2 . O controlador é estável e cuja função de transferência é dada por:

$$K_2(s) = 776.9 \frac{(s^2 - 0.271s + 0.539)}{(s^2 + 24.7s + 47.68)} \quad (4)$$

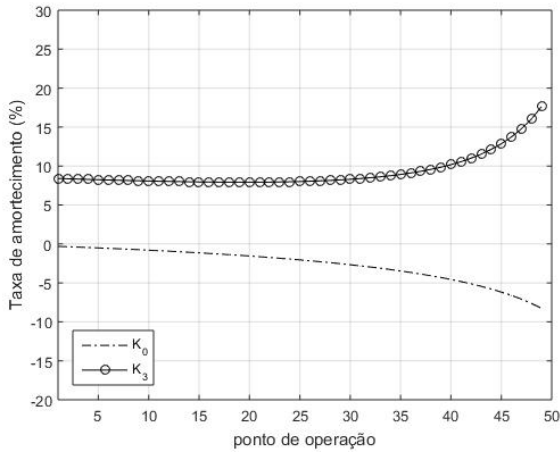


Figura 7. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com a configuração base com controlador K_2 .

A Figura 7 mostra que o amortecimento do modo inter-área melhora em todo intervalo de operação comparando com o sistema em malha aberta, garantindo a estabilidade. O amortecimento do modo inter-área cresce quando a potência de transferência aumenta. Portanto, o controlador K_2 possui um desempenho satisfatório.

A avaliação do desempenho não linear foi feita através de simulações no tempo. Um curto circuito trifásico de $30ms$, foi aplicado na barra 2. Na Figura 8 o fluxo de potência ativa na linha de interligação entre as duas áreas do sistema é mostrado. Apesar de baixo amortecimento do sistema em malha fechada pós-falta, as oscilações são bem amortecidas, portanto, o desempenho é satisfatório.

4.3.1.2 Sistema com a configuração modificada

a) Método de posicionamento de pólos:

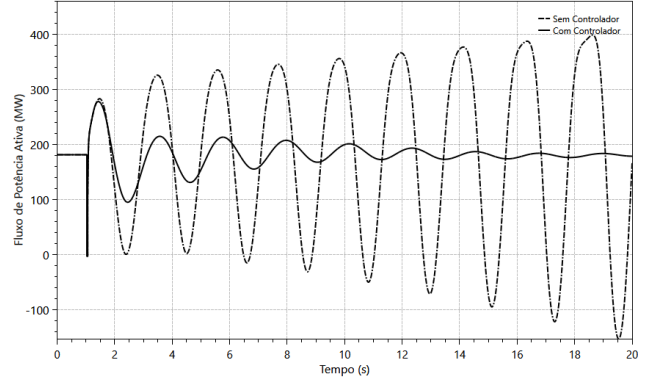


Figura 8. Fluxo de potência ativa entre as barras 5-6 - 1º ponto de operação.

O controlador foi projetado para elevar o amortecimento do modo para 20% resultando em

$$K_3(s) = K_{PSS} \frac{10s}{1 + 10s} \left(\frac{1 + 0.484s}{1 + 0.131s} \right)^2 \quad (5)$$

Na Figura 9 mostra-se como a taxa de amortecimento do modo inter-área varia em diferentes pontos de operação quando o ganho K_{PSS} do controlador é variado de 0 a 15. A curva $K_{PSS} = 0$, corresponde à curva do modo inter-área do sistema em malha aberta. O aumento do ganho K_{PSS} provoca um deslocamento do ponto de máximo amortecimento do modo inter-área para pontos de operação de menores potência transmitida. Isso implica que o desempenho do controlador na máquina G4 é satisfatório apenas nos pontos de operação de baixa potência transmitida e há uma degradação de estabilidade do modo inter-área nos pontos de operação de maior potência transmitida.

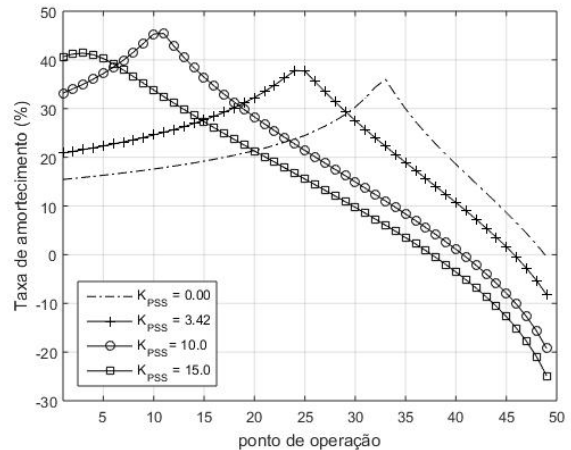


Figura 9. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com controlador K_3 .

A fim de verificar a influência da ressonância quase forte usando apenas uma máquina da área 1, foi retirado o controlador na máquina G4 da área 2, e foi projetado um novo controlador para a máquina G1 da área 1 que possui o segundo maior índice de controlabilidade de tensão de referência do regulador de tensão. Considerando

o mesmo requisito do projeto anterior, obteve-se o seguinte controlador:

$$K_4(s) = K_{PSS} \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.722s}{1+0.150s} \right)^2 \quad (6)$$

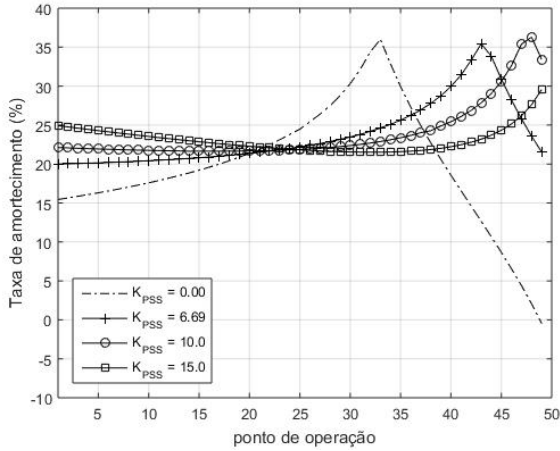


Figura 10. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com controlador K_4 .

Na Figura 10 mostra-se que, quando o ganho K_{PSS} é aumentado, há aumento do amortecimento do modo inter-área antes do 21° ponto de operação. No entanto, neste ponto específico (21° ponto de operação), o amortecimento do modo inter-área praticamente é independente do valor do ganho K_{PSS} . Este ponto é chamado de ponto neutro (Gharebaghi and Ghazi, 2013). Logo após o ponto neutro, o aumento do ganho K_{PSS} provoca a redução do amortecimento do modo inter-área ocasionando um desempenho indesejável do controlador. Todavia, em relação ao sistema em malha aberta, há melhoria de amortecimento nos pontos de operação de maior potência transmitida.

b) Norma H_∞

A minimização da norma H_∞ resultou nos controladores estáveis, K_5 e K_6 , para as máquinas G1 e G4, respectivamente.

$$K_5(s) = 831.1 \frac{(s^2 + 0.904s + 2.445)}{(s^2 + 5.896s + 26.55)} \quad (7)$$

$$K_6(s) = -144.2 \frac{(s^2 + 0.371s - 0.438)}{(s^2 + 34.47s + 9.714)} \quad (8)$$

Na Figura 11 mostra-se que o modo inter-área do sistema com controlador K_5 apresenta o amortecimento superior ao sistema em malha aberta nos intervalos de 1° a 15° e de 42° a 49° pontos de operação. Nestas faixas de operação, o controlador possui o desempenho desejado. No entanto, entre 15° a 41° pontos de operação, o desempenho do controlador é indesejável. Já a Figura 12 mostra que o controlador K_6 degrada o amortecimento do modo inter-área em pontos de operação de baixa potência transmitida e melhora-o nos pontos de maior potência. Nos dois casos, embora seja assegurada a estabilidade, os controladores projetados não possuem um bom desempenho em todo intervalo de operação considerado.

Na configuração modificada, a dificuldade de se obter um bom desempenho em todos os pontos de operação,

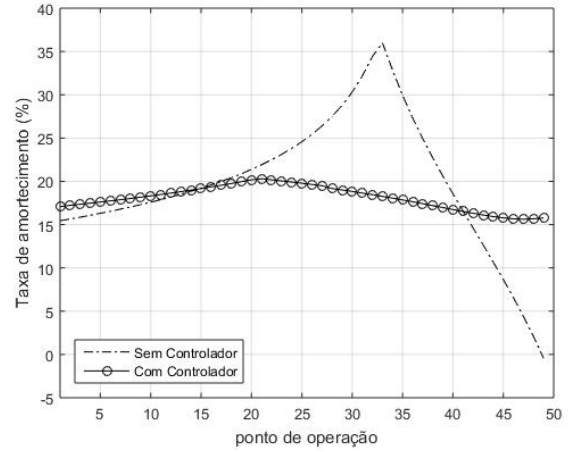


Figura 11. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema a configuração modificada com controlador K_5 .

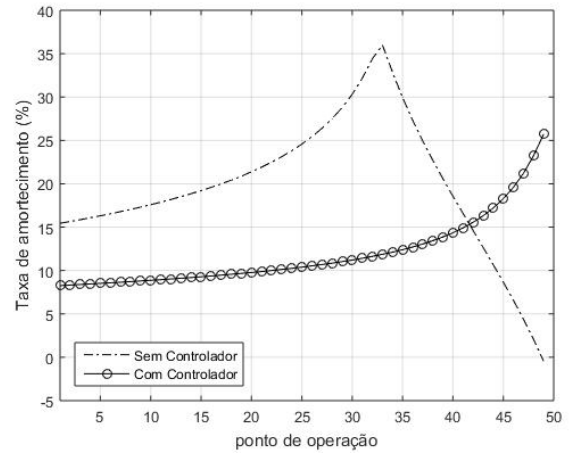


Figura 12. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com a configuração modificada com controlador K_6 .

incluindo o método de controle que leva em conta a robustez, mostra que, o fornecimento de amortecimento adicional ao modo inter-área, utilizando especialmente um único controlador, é uma tarefa difícil.

4.4 Projeto de múltiplos controladores

Nesta seção, o projeto de controladores foi realizado considerando apenas o método de minimização da norma H_∞ .

4.4.1 Sistema com a configuração base

A expressão K_7 , no Apêndice A, representa o controlador obtido pela minimização da norma H_∞ , para o sistema com a configuração base. O controlador é estável e possui zeros no semiplano direito do plano complexo. Observa-se na Figura 13 que, o amortecimento do modo inter-área do sistema aumenta a medida que a potência transmitida da área 1 para área 2 aumenta. Em comparação com o caso de único controlador, são introduzidos níveis de amortecimento maior em todo intervalo de operação quando o controlador MIMO é usado.

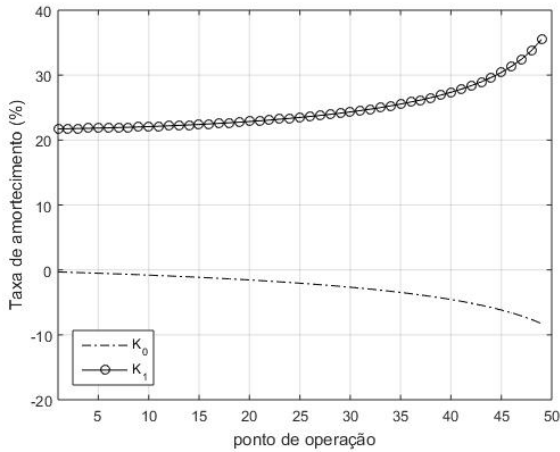


Figura 13. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com a configuração base com controlador K_7 .

A resposta dinâmica do sistema em malha fechada com aplicação de um curto circuito trifásico de $30ms$ na barra 2, é ilustrada na Figura 14. O sistema apresenta um bom amortecimento quando o controlador K_7 é usado.

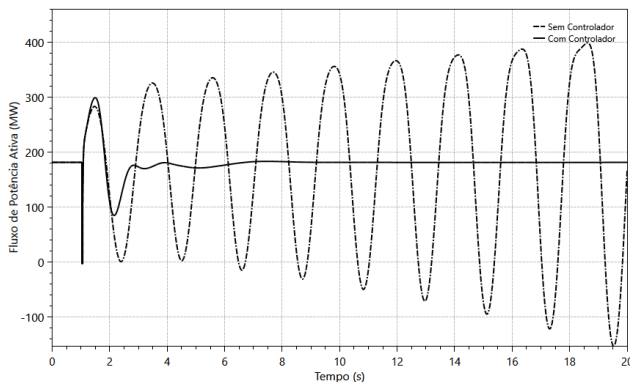


Figura 14. Fluxo de potência ativa entre as barras 5-6 - 1º ponto de operação.

4.4.2 Sistema com a configuração modificada

A expressão K_8 , no Apêndice A, representa o controlador obtido pela minimização da norma H_∞ , para o sistema com a configuração modificada. O controlador é estável e possui zeros no semiplano direito do plano complexo. A Figura 15 mostra que, o projeto de múltiplos controladores simultâneos tem efeito significativo no fornecimento de amortecimento ao modo inter-área em todos os pontos de operação. Para os pontos de operação correspondentes à maior potência transmitida, há uma tendência de redução do amortecimento do modo de interesse. Porém, no geral, o desempenho do controlador é bastante satisfatório.

A Figura 16 mostra graficamente a resposta dinâmica do sistema com aplicação do curto circuito trifásico de $30ms$ na barra 2. O sistema não linear apresenta um bom desempenho dinâmico.

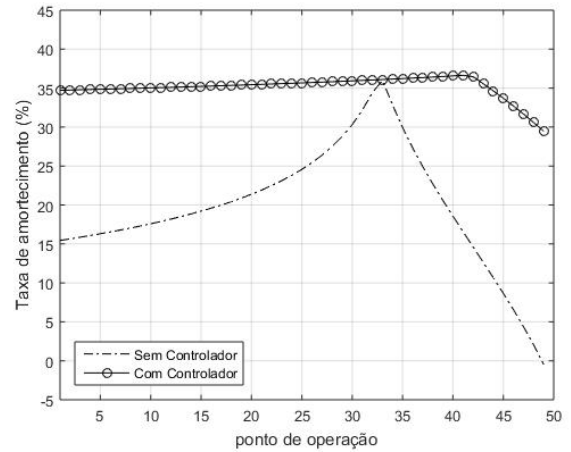


Figura 15. Taxa de amortecimento do modo inter-área do sistema com a configuração modificada com controlador K_8 .

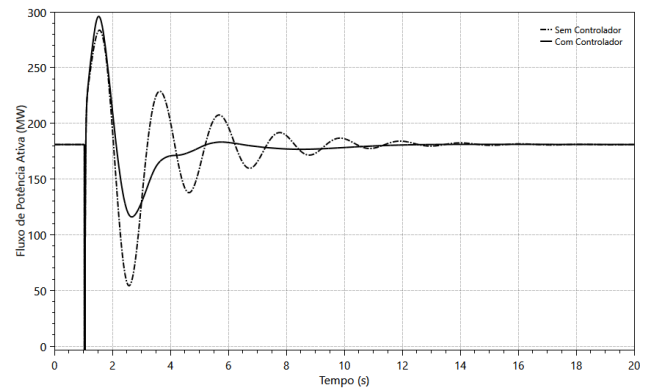


Figura 16. Fluxo de potência ativa entre as barras 5-6 - 1º ponto de operação.

5 Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado a análise da ocorrência de ressonância em sistemas elétricos e foram projetados controladores visando fornecer o amortecimento adicional ao modo inter-área crítico. Os resultados da análise mostram que o fenômeno de ressonância quase forte pode ocorrer em sistemas elétricos, como resultado de interação de dois modos de oscilação, causando instabilidade através da redução de amortecimento de um dos modos. Entretanto, para se entender a causa da instabilidade oscilatória provocada pela ocorrência de ressonância quase forte, a análise do movimento dos modos envolvidos na ressonância deve ser considerada.

Sobre o projeto de controladores, para o caso de um único controlador, o desempenho do controlador projetado pela minimização da norma H_∞ é melhor comparando ao método de posicionamento de pólos para o sistema com a configuração base. No sistema com a configuração modificada, o desempenho dos controladores pelo método de posicionamento de pólos é afetado pela variação do ganho do controlador. Dependendo da localização do controlador, essa variação tende a deslocar a curva do amortecimento no sentido de estabilizar ou desestabilizar o modo inter-área. No caso da minimização da norma H_∞ , os controla-

dores garantem a estabilidade geral do sistema, porém, o desempenho dos controladores não é satisfatório em todos os pontos de operação considerados. Portanto, especialmente com o uso de um único controlador, a ressonância quase forte tende a tornar mais difícil se obter um bom desempenho dos controladores considerando vários pontos de operação, mesmo com o método que leva robustez em conta. Em contrapartida, o projeto de controladores torna-se fácil com o uso de controle multivariáveis. Portanto, usando-se vários controladores, foi possível se obter um bom desempenho em todos os pontos de operação considerados. Por outro lado, a ressonância quase forte tende a desaparecer no sistema em malha fechada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo suporte financeiro concedido.

Referências

- Bollinger, K., Winsor, R., and Campbell, A. (1979). Frequency response methods for tuning stabilizers to damp out tie-line power oscillations: Theory and field-test results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5), 1509–1515.
- Burke, J.V., Henrion, D., Lewis, A.S., and Overton, M.L. (2006). Hifoo-a matlab package for fixed-order controller design and h optimization. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(9), 339–344.
- Dill, G.K. and e Silva, A.S. (2012). Robust design of power system controllers based on optimization of pseudospectral functions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1756–1765.
- Dobson, I., Zhang, J., Greene, S., Engdahl, H., and Sauer, P.W. (2001). Is strong modal resonance a precursor to power system oscillations? *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 48(3), 340–349.
- Dotta, D., e Silva, A.S., and Decker, I.C. (2009). Design of power system controllers by nonsmooth, nonconvex optimization. In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1–7. IEEE.
- Gharebaghi, M. and Ghazi, R. (2013). Proposed mechanism for performance of power system stabilizers in the condition of strong resonance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1), 259–266.
- Gomes Jr, S., Martins, N., and Pinto, H. (1998). Utilização do método de nyquist para estabilização de sistemas de potência envolvendo alocação de par de pólos complexos. In *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Guimarães, C.H.C., Taranto, G.N., Gomes Jr, S., and Martins, N. (2000). Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por posicionamento parcial de par de pólos complexos conjugados. In *XIII Congresso Brasileiro de Automática—CBA2000, Florianópolis, SC, Setembro de*.
- Jyothsna, T. and Vaisakh, K. (2011). Effects of strong resonance in tuning of multiple power system stabilizers. *IET generation, transmission & distribution*, 5(11), 1155–1164.
- Jyothsna, T.R. and Vaisakh, K. (2013). Effects of strong resonance in multimachine power systems with sssc supplementary modulation controller. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23(1), 24–47.
- Klein, M., Rogers, G., Moorty, S., and Kundur, P. (1992). Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(3), 382–390.
- Klein, M., Rogers, G.J., and Kundur, P. (1991). A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *IEEE Transactions on power systems*, 6(3), 914–921.
- Kundur, P., Morison, G., Wang, L., and Hamadanizadeh, H. (1998). Power system control: Requirements and trends in the new utility environment. *Bulk Power System Dynamics and Control-IV Restructuring*, 257–263.
- Kundur, P., Balu, N.J., and Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York.
- Kundur, P., Klein, M., Rogers, G., and Zywno, M.S. (1989). Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2), 614–626.
- Larsen, E. and Swann, D. (1981). Applying power system stabilizers part iii: Practical considerations. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, (6), 3034–3046.
- Liu, S., Messina, A., and Vittal, V. (2005). Assessing placement of controllers and nonlinear behavior using normal form analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1486–1495.
- Liu, S., Messina, A., and Vittal, V. (2006). A normal form analysis approach to siting power system stabilizers (psss) and assessing power system nonlinear behavior. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4), 1755–1762.
- Martins, N. and Lima, L.T. (1990). Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4), 1455–1469.
- Scavoni, F.E., e Silva, A., Neto, A.T., and Campagnolo, J. (2001). Design of robust power system controllers using linear matrix inequalities. In *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502)*, volume 2, 6–pp. IEEE.
- Seyranian, A.P. and Mailybaev, A.A. (2003). Interaction of eigenvalues in multi-parameter problems. *Journal of Sound and Vibration*, 267(5), 1047–1064.
- Zhou, K., Doyle, J.C., Glover, K., et al. (1996). *Robust and optimal control*, volume 40. Prentice hall New Jersey.

A Controladores MIMO

$$K_T(s) = \begin{bmatrix} \frac{127.6s^2 + 2340s + 745.6}{s^2 + 17.43s + 2.249} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{117.7s^2 + 1386s + 2771}{s^2 + 15.32s + 158.1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{226s^2 + 23200s + 492300}{s^2 + 158.5s + 3691} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{166s^2 - 178.6s + 256.2}{s^2 + 10.47s + 15.46} \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

$$K_S(s) = \begin{bmatrix} \frac{106.6s^2 + 376.4s - 2455}{s^2 + 13.47s + 274.1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{148.6s^2 + 4286s + 5127}{s^2 + 24.85s + 92.55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{40.34s^2 + 474.6s - 4797}{s^2 + 23.88s + 124.9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{62.34s^2 + 15940s + 270900}{s^2 + 88.35s + 1141} \end{bmatrix} \quad (A.2)$$