

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou três novos procedimentos para posicionamento de pólos de sistemas de potência em regiões pré-especificadas do plano complexo através de LMI's, considerando modelos de pequenas perturbações. Dois métodos propostos para projeto de controladores descentralizados possibilitam a obtenção de ganhos mínimos para os controladores, para um fator de amortecimento especificado. Ao mesmo tempo, pode-se posicionar adequadamente os autovalores do sistema em regiões do plano complexo que estão relacionadas às características de desempenho dinâmico do sistema de potência. Os dois métodos de controle robusto descentralizado são os seguintes: o primeiro método, que utiliza transformações de variáveis matriciais para converter BMI's em LMI's no problema de posicionamento de pólos, e o método homotópico, que considera pequenos incrementos de desempenho para o sistema em iterações consecutivas do algoritmo de controle, o que permite excluir os termos matriciais bilineares (ou seja, que envolvem a multiplicação de duas variáveis matriciais) das desigualdades de posicionamento de pólos. O método para controle robusto centralizado também utiliza transformações de variáveis matriciais para converter BMI's em LMI's, mas ele gera controladores com a mesma ordem do sistema nominal e que têm os pólos livres. Este método permite aumentar o amortecimento do sistema conseguido através do controle descentralizado; ele considera que os sinais vindos dos geradores do sistema chegam ao controlador central com atrasos.

Uma das principais vantagens da formulação proposta neste trabalho é que ela gera controladores com uma estrutura pré-especificada, comumente utilizada nos sistemas de potência (ou seja, a estrutura dos Estabilizadores de Sistemas de Potência). Isso torna fácil a implementação prática para testar os controladores obtidos quanto à estabilização e ao aumento do desempenho.

Utilizando os métodos desenvolvidos, definem-se as especificações de desempenho desejadas para o sistema de potência, relacionando-as à localização dos autovalores do sistema em malha fechada no plano complexo e, então, resolve-se um sistema de LMI's (pode-se utilizar o primeiro método, descrito na seção 4.4, o método homotópico, descrito na seção 4.5, ou o método para controle robusto centralizado, descrito na seção 4.6). Obter-se-á uma solução

robusta para o problema de posicionamento de pólos (em outras palavras, o controlador irá alocar adequadamente os pólos do sistema para todos os pontos de operação considerados).

Os algoritmos de controle foram aplicados a um sistema de 9 máquinas, descrito através de três modelos diferentes, e um sistema de 16 máquinas, descrito através de dois modelos diferentes (a diferença entre os modelos refere-se à sofisticação dos mesmos). Em todos os casos eles forneceram bons resultados no que se refere ao desempenho (aumento do amortecimento mínimo do sistema). O ajuste robusto dos parâmetros dos ESP's e sua aplicação ao sistema garantiram, na maioria dos casos, amortecimento satisfatório às oscilações eletromecânicas no sistema de potência, o que pôde ser verificado através de simulações não-lineares realizadas para vários casos.

O controlador robusto hierarquizado é composto por duas camadas de controle: a primeira consiste nos controladores descentralizados aplicados de modo isolado a cada máquina do sistema, o que garante a sua estabilidade e um índice de amortecimento mínimo; a segunda é formada pelo controlador centralizado, que recebe informações atrasadas vindas de todas as máquinas do sistema (com um mesmo atraso), e ele envia sinais de controle para todas as unidades geradoras. Caso haja a perda de informações do sistema de controle central, o sistema permanece com um amortecimento satisfatório dado pelo sistema de controle descentralizado. O sistema de controle centralizado aumenta ainda mais o amortecimento mínimo do sistema de potência, melhorando assim o seu desempenho. Os testes feitos para o sistema de controle hierarquizado sugerem que o sistema de controle centralizado pode aumentar muito o amortecimento do sistema de potência em malha fechada. Entretanto, ainda é necessário investigar o máximo amortecimento desejado para cada sistema de potência, para que o seu aumento excessivo não cause efeitos desestabilizadores no sistema (por exemplo, a restrição dos sinais de tensão dos controladores pelos limitadores de tensão presentes no sistema pode prejudicar a atuação dos controladores). Utilizaram-se aproximações de Padé de ordens 1 e 2 para representar os atrasos no sistema, mas podem ser usadas aproximações de ordens superiores, o que aumentará a ordem do sistema em malha fechada e, portanto, o tempo de execução do algoritmo de controle. O algoritmo de controle centralizado é robusto, pois contempla várias condições operativas para o sistema de potência, e também permite que os atrasos de comunicação do sistema sejam ajustados (mas eles devem ser iguais). Uma próxima etapa consiste em desenvolver um sistema de controle robusto centralizado no qual

os atrasos de comunicação envolvidos são diferentes para cada transferência de dados dentro do sistema de potência.

Com relação aos testes e simulações realizados, as principais conclusões a que chegamos foram as seguintes:

- Nos casos estudados, o primeiro método superou o método homotópico em termos de desempenho (amortecimento mínimo alcançado).
- Os controladores gerados pelos dois métodos têm características diferentes. O primeiro método gera controladores com característica de avançadores de fase, enquanto que o segundo método gera controladores do tipo atraso-avanço. Deste modo, o primeiro método é mais adequado a aplicações práticas em sistemas elétricos, pois compensadores que geram atraso de fase não são comumente utilizados em sistemas de potência. A aplicação do método homotópico, então, exigiria alguns testes adicionais a fim de verificar o efeito do atraso de fase em altas frequências nos sistemas de potência. As simulações não-lineares realizadas sugerem que os controladores gerados pelo método homotópico não apresentam problemas quando aplicados aos sistemas de potência.
- A execução do algoritmo homotópico foi, nos casos estudados, oito vezes mais lenta que a execução do algoritmo do primeiro método, uma vez que a aplicação do método homotópico exige que os passos dados a cada iteração sejam pequenos.
- Para o sistema New England de 16 máquinas, foram utilizados dois modelos diferentes para a máquina síncrona, um deles mais sofisticado e o outro, mais simples. Os resultados obtidos mostram que, quando se aplica o primeiro método de controle robusto, os controladores tiveram melhor desempenho para o modelo mais complexo. Já no caso do método homotópico, os controladores obtidos tiveram melhor desempenho para o modelo mais simples. Em outras palavras, os dois métodos apresentaram desempenhos diferentes (mas próximos) para modelos diferentes de máquina síncrona, sendo que cada método foi mais adequado a um certo modelo. Dessa forma, conclui-se que os métodos de controle robusto apresentam sensibilidade ao modelo de sistema de potência utilizado.
- As aproximações feitas nos algoritmos de controle robusto não prejudicaram o desempenho final do sistema, ou seja, mesmo com as aproximações realizadas nos algoritmos foi possível posicionar os autovalores do sistema em malha fechada nas regiões adequadas do plano complexo. A aproximação feita no algoritmo homotópico é

mais precisa do que a aproximação feita no algoritmo do primeiro método. Essa aproximação do método homotópico considera pequenos incrementos de desempenho a cada iteração (desprezando termos matriciais quadráticos), enquanto que a aproximação do primeiro método permite atribuir valores a parâmetros da matriz de Lyapunov que deveriam valer zero. Assim, a aproximação do método homotópico deveria, teoricamente, ser mais próxima do problema original (descrito na forma de BMI's). Contudo, os testes mostraram que, em termos de desempenho, o primeiro método gera resultados melhores ou iguais ao método homotópico. Dessa forma, o fato de atribuirmos valores a parâmetros que deveriam valer zero, no primeiro método, não constitui uma aproximação grosseira nos casos estudados; os valores destes parâmetros, na verdade, são pequenos, e provavelmente sua interferência no resultado final foi mínima.

- Os dois métodos propostos são flexíveis com relação à estrutura do controlador utilizado. Eles permitem que possamos escolher os pólos dos controladores, além de podermos escolher também quantos pólos e zeros terão os controladores. Esta é uma das principais características que definem a contribuição do método proposto.
- Em alguns casos, um ou dois controladores obtidos pelo primeiro método de controle robusto apresentaram parâmetros não convencionais para ESP's. Provavelmente, isso ocorreu devido ao fato de não termos estabelecido limites para os valores dos parâmetros dos controladores. Para fins de aplicações práticas, este(s) controlador(es) foi (ou foram) substituído(s) por outro(s) de comportamento similar numa dada faixa de frequências (e que apresentasse parâmetros positivos). Em geral, isto reduziu um pouco o desempenho obtido inicialmente, mas ainda assim manteve-se uma boa taxa de amortecimento.

Considerando os resultados obtidos com a utilização do controlador hierarquizado, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O uso dos controladores centralizados permitiu aumentar muito o amortecimento dos autovalores do sistema de potência. Para sistemas que já possuem amortecimentos satisfatórios com os controladores descentralizados isto pode não ser adequado, uma vez que esforços de controle excessivamente elevados podem fazer com que os sinais de tensão estabilizante dos controladores sejam restringidos pelos limitadores de tensão, o que não é desejável. Mas, para sistemas que possuem amortecimentos baixos com os ESP's, o controle centralizado pode oferecer um bom amortecimento adicional.

- Os controladores centralizados obtidos apresentaram zeros de fase não mínima. A influência deste tipo de controle em sistemas de potência deve ser investigada mais detalhadamente antes de se utilizarem os controladores centralizados em aplicações práticas.
- A estrutura de controle hierarquizado permite que o controle descentralizado continue funcionando normalmente (garantindo o desempenho mínimo desejado para o sistema) caso os sinais remotos utilizados na realimentação do controlador centralizado sejam perdidos. Assim, o algoritmo de controle também é robusto com relação à perda dos sinais remotos.
- Nos casos estudados, quanto melhor foi a aproximação de Padé utilizada para os atrasos, maior foi o esforço de controle para aumentar o amortecimento dos autovalores do sistema.
- Nos casos avaliados, constatou-se que vale a regra geral: quanto maior o amortecimento especificado, maior deverá ser o esforço de controle aplicado ao sistema.

Para que os sistemas de controle robusto propostos neste trabalho possam ser implementados de modo eficiente nos sistemas elétricos de potência, seria interessante converter os programas gerados em linguagem MATLAB para linguagem C, na qual a execução dos algoritmos seria bem mais rápida. Esta é uma possibilidade de continuação do trabalho, completamente voltada para a aplicação. A integração de programas de modelagem dinâmica, fluxo de potência e controle robusto também é interessante do ponto de vista prático.

Uma outra continuação possível deste trabalho consiste em aplicar os algoritmos de controle desenvolvidos a sistemas de potência de grande porte. Além disso, poder-se-ia estudar a possibilidade de incorporar restrições aos valores dos parâmetros dos controladores no problema de posicionamento de pólos através de LMI's.