



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT

MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR USANDO SINAIS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Daniel Dotta(*)
IFSC

Aguinaldo S. e Silva
UFSC

Ildemar C. Decker
UFSC

Marcelo N. Agostini
UFSC

RESUMO

Os processos de desregulamentação ocorridos na indústria de energia elétrica nos últimos anos, somados à contínua incorporação de novas tecnologias de equipamentos, têm aumentado a complexidade operacional dos sistemas de energia elétrica. Este cenário demanda a necessidade de um constante aprimoramento dos instrumentos de monitoração e controle da operação do sistema em tempo real. Dentre os novos instrumentos que têm sido propostos para enfrentar este desafio, destacam-se aqueles relacionados à tecnologia de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SPMS – *Synchronized Phasor Measurement Systems*) genericamente citados na literatura técnica como *Wide Area Measurement System (WAMS)*.

Especificamente, na área de controle estudos vêm sendo realizados com o objetivo de mostrar a potencialidade desta nova tecnologia na operação de sistemas de potência. Esses trabalhos apresentam resultados que indicam a forte aplicabilidade desta ferramenta para a melhoria do desempenho dinâmico do sistema elétrico. Entretanto, ainda há muitos estudos a serem feitos com relação ao tema até a sua efetiva aplicação na indústria. Um dos principais desafios esta relacionado ao projeto de controladores centrais com restrições de realimentação de saídas e que levem em conta os atrasos nos canais de transmissão, processamento da ação de controle e a efetiva ação do controle.

O artigo proposto apresenta novos resultados dos estudos relacionados ao projeto de controladores que utilizem dados de medição fasorial para a melhoria da estabilidade do sistema de energia elétrica. Especificamente a síntese de controladores para a melhoria da estabilidade angular entre grandes áreas. Atrasos de tempo envolvidos no sistema de controle e perda de elos de comunicação são considerados. Este trabalho faz parte de um projeto mais amplo de desenvolvimento (Medfasee) e uso de medições fasoriais em sistemas de energia realizado a partir da colaboração entre universidade, fabricante e transmissora de energia, e que contempla a construção e instalação de protótipos, desenvolvimento e aplicações e testes em sistema reais.

Finalmente, simulações considerando sistemas de grande porte são apresentados para exemplificação e validação do controle proposto.

PALAVRAS-CHAVE

Dinâmica e Controle de Sistemas Elétricos, Medição Fasorial, Estabilizador de Sistema de Potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos, observou-se, em muitos países, um maior interesse por parte dos governos, grandes industriais e investidores na reestruturação da indústria de energia elétrica no sentido do estabelecimento de ambientes de competição. Especificamente, nos países em desenvolvimento, as empresas públicas do setor elétrico foram privatizadas como pré-condição para que empréstimos fossem liberados por fundos internacionais, ou para atrair investimentos para o setor (1). Nestes novos ambientes a ênfase das discussões estava, até pouco tempo atrás, concentrada nas questões econômicas, com os aspectos da estrutura do mercado, de contratos e de

(*) Av. Mauro Ramos, n° 950, Centro – CEP 88.020-300 Florianópolis, SC, – Brasil
Tel: (+55 48) 8431-3309 – Fax: (+55 48) 3224-1500 – Email: dotta@ifsc.edu.br

preços da energia ocupando a vanguarda. Por outro lado, os aspectos relacionados à complexidade da operação de sistemas desregulamentados também eram reconhecidos como um grande desafio (1)(2). Como principais motivos citam-se a existência de um grande número de geradores independentes injetando potência na rede e competindo entre si, o aumento da geração distribuída, e a demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia. Além disso, a dificuldade em se planejar e expandir os sistemas de transmissão faz com que cada vez mais a rede opere perto dos seus limites de carregamento (3).

Este cenário apresenta um grande contraste quando comparado com sistemas regulados e verticalizados, que tendiam a ser mais seguros por inúmeras razões (3). A primeira é de que o sistema elétrico era projetado, construído e operado por monopólios (usualmente propriedades dos governos). O planejamento integrado assegurava que a geração e a transmissão cresceriam de acordo com a demanda. Com isso, limitavam-se a sobrecarga e as falhas dos equipamentos que poderiam levar a distúrbios no sistema. Os programas de manutenção eram em geral rigorosos. Na perspectiva da operação, a capacidade de prever as condições de operação do sistema eram simples devido à pouca quantidade de proprietários de geradores e transmissoras que operavam cooperativamente, de acordo com um cuidadoso plano de operação (3). Como resultado, devido a robustez dos sistemas, os mesmos estavam expostos a poucos e eventuais distúrbios.

O blackout de 14 de Agosto de 2003 (4), que afetou aproximadamente 50 milhões de pessoas nos Estados Unidos e Canadá e blackouts ocorridos no mesmo período em diversos países (Brasil, Suécia, Alemanha, Itália, Suíça, Grécia, Rússia) motivaram discussões relacionadas à operação confiável e segura do sistema elétrico (5). Questões como o envelhecimento da infra-estrutura do setor e a necessidade de melhores ferramentas para a monitoração e controle que aumentem a confiabilidade e segurança da operação do sistema tornaram-se prioridade.

Ferramentas como os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement Systems - SPMS*), que utilizam os avanços nas comunicações, computadores e na tecnologia de GPS (*Global Positioning System*), apresentam-se como uma tecnologia promissora para as novas necessidades de monitoração e gerenciamento da segurança de grandes sistemas (6). Esse sistema de medição destaca-se pelo uso das unidades de medição fasorial, mais conhecidas como PMUs (*Phasor Measurement Units*). Os SPMS apresentam potencial de aplicação na indústria e podem contribuir para a melhoria da monitoração e da estabilidade do sistema elétrico (6). No entanto, devido ao caráter incipiente dessa tecnologia, esse potencial não é ainda bem conhecido e investigações são necessárias até a efetiva aplicação da tecnologia em escala industrial (6).

No presente artigo apresentam-se estudos realizados explorando o potencial de aplicações de controle usando dados de medição fasorial no sistema elétrico brasileiro. Na seção 2 apresenta-se uma breve descrição de um sistema de medição fasorial sincronizada. Na seção 3 são descritos os principais esquemas de controle usando medição fasorial encontrados na literatura. Na seção 4 apresentam-se a modelagem do sistema e o método de projeto utilizado. Na seção 5 apresentam-se os resultados obtidos da aplicação de um esquema de controle hierárquico em um equivalente do sistema Sul-Sudeste brasileiro. Finalmente, na Seção 6 apresentam-se os comentários finais e as conclusões deste trabalho.

2.0 - SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA (SPMS)

Um sistema de medição fasorial sincronizada é constituído por:

- Unidade de medição fasorial (UMF ou PMU)
- Concentrador de Dados (PDC)
- Base de Dados
- Rede de comunicação

O elemento de medição dos fasores é a Unidade de Medição Fasorial (UMF) ou Phasor Measurement Unit (PMU). Entretanto, a estrutura desse sistema também depende de outros equipamentos, como as estações de recepção do sinal de GPS, o concentrador de dados e os canais de comunicação entre o PMU e o concentrador. A estrutura geral desse sistema pode ser representada pela ilustração da Figura 1.

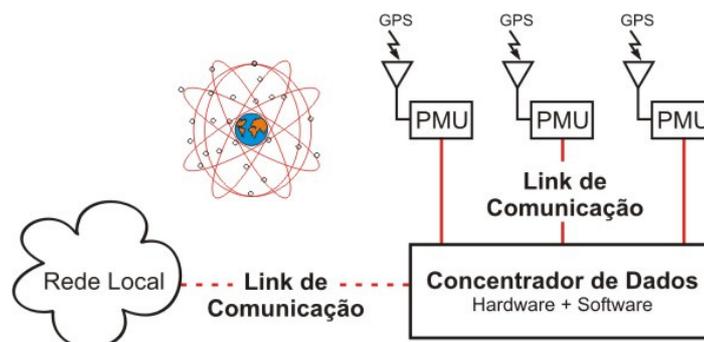


FIGURA 1 – SPMS

Destaca-se aqui a capacidade deste sistema em realizar medidas sincronizadas por GPS de pontos distantes geograficamente com taxas de amostragem muito maiores que a dos tradicionais sistemas SCADA. Taxas de amostragem na faixa de 60 fasores por segundo permitem a monitoração da dinâmica do sistema elétrico. Os dados coletados por esse sistema podem ser utilizados para a melhoria da monitoração, controle e proteção do sistema elétrico. Aplicações na área de monitoração encontram-se em estado avançado de desenvolvimento e já estão presentes em centros de operação na América do Norte e China. Aplicações na área de controle são uma tendência natural de desenvolvimento, no entanto, ainda encontram-se em fase de estudos devido ao impacto que podem trazer na operação do sistema. Existem também desafios a serem contornados como por exemplo a questão dos atrasos de transmissão dos pacotes e tempos de atuação do sinal de controle bem como o uso de métodos de projeto multivariáveis. Estes aspectos e as estruturas de controle propostas para a melhoria da estabilidade de sistemas elétricos para pequenas perturbações são discutidas na próxima seção.

3.0 - MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR A PEQUENAS PERTURBAÇÕES USANDO SPMS

Grandes SEEs tipicamente apresentam múltiplos modos de oscilação inter-área, os quais estão associados com a dinâmica dos fluxos inter-área e envolvem grupos de máquinas oscilando entre si. Com a desregulamentação dos sistemas de energia elétrica, a transferência de energia por linhas de longa distância está aumentando, sem a adição de novas linhas, causando o aparecimento de modos inter-área com baixo amortecimento. Incidentes com aparecimento de modos de oscilação pouco amortecidos e com origem desconhecida estão agora ocorrendo em sistemas tradicionalmente bem amortecidos. Como resultado, muitos operadores de rede estão procurando adicionar dispositivos suplementares de amortecimento para incrementar a segurança do sistema (8).

O dispositivo tradicional para amortecimento dessas oscilações é o Estabilizador de Sistema de Potência (ESP ou PSS), que fornece um controle suplementar atuando no controle de tensão dos geradores (9). A utilização de sinal suplementar derivado da velocidade, frequência, potência elétrica ou potência de aceleração, na excitação das máquinas síncronas, tem sido até agora a melhor maneira de aumentar o amortecimento positivo do sistema (10). Um cenário comum aos projetistas é que o número de modos inter-área dominantes no sistema é muito maior que o de dispositivos de controle disponíveis. Esses dispositivos podem controlar múltiplos modos desde que o sinal medido contenha informações com relação aos mesmos. Dessa forma, a aplicação clássica do PSS medindo sinais e amortecendo oscilações localmente, e talvez adicionando amortecimento a um modo de oscilação inter-área, não é suficiente. Novas estruturas de controle, capacitadas a processar informações de modos remotos, são necessárias para o amortecimento de múltiplos modos (8).

As principais estruturas de controle consideradas na literatura são quase-decentralizada, centralizada e hierárquica. Na seqüência, essas estruturas são descritas em detalhes.

3.1 Controle Descentralizado com Realimentação de Sinais Remotos

Nesse tipo de estrutura o controlador, localizado na planta, é alimentado por um sinal local e por um sinal remoto. Os dois sinais são processados localmente no dispositivo e um sinal de controle é gerado. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 2.

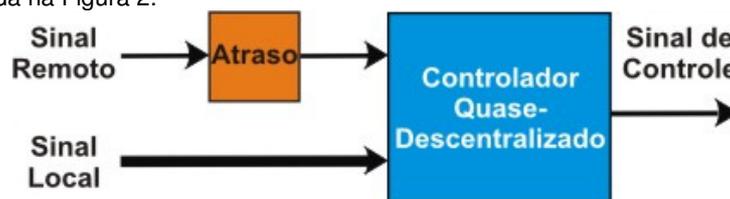


FIGURA 2 – Controle Quase-Descentralizado

Nesse tipo de estrutura, o atraso a ser modelado está relacionado a uma medida remota. Em relação ao projeto, podem ser considerados métodos de projeto SISO (*Single Input Single Output*) (8), em que os sinais são combinados de modo que um único sinal de entrada chegue até o controlador, ou MISO (*Multi Input Single Output*), em que os sinais de entrada são processados no próprio controlador (síntese do sinal de controle), resultando em um único sinal de saída (11)(12). Na literatura, encontram-se trabalhos que procuram explorar a aplicabilidade desse tipo de controlador no sistema, usando dados remotos de PMU. Diversos dispositivos são explorados como PSS (14)(8)(12)(13), FACTS (11) e HVDC (15).

3.2 Controle Centralizado

Nesse tipo de estrutura, o controlador, situado em um local central (subestação, centro de operação), é alimentado por sinais remotos. Os sinais são processados no controlador central e enviados diretamente à planta localizada remotamente. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 3. Nesse caso, cada sinal de controle é o resultado do processamento dos diversos sinais medidos, caracterizando uma estrutura de controle multivariável (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Nas seguintes referências, encontram-se detalhes do projeto de controladores centrais utilizando medição fasorial sincronizada (16)(17).

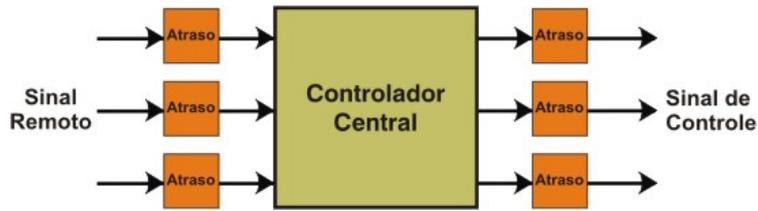


FIGURA 3 – Controle Quase-Descentralizado

3.3 Controle Hierárquico

Esse tipo de estrutura de controle é uma combinação da convencional estrutura descentralizada de controles locais com um controle central alimentado por sinais remotos. Uma ilustração desse esquema é apresentada na Figura 4. Os sinais são processados no controlador central e enviados à planta. Na planta, os sinais do controle central são combinados com os sinais do controlador local, aumentando a capacidade de controle do sistema. No controle central, cada sinal de controle é o resultado do processamento dos diversos sinais medidos caracterizando uma estrutura de controle multivariável (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Trabalhos ilustrando o projeto do controle hierárquico, utilizando PSSs podem ser encontrados em (18)(19)(20)(21).

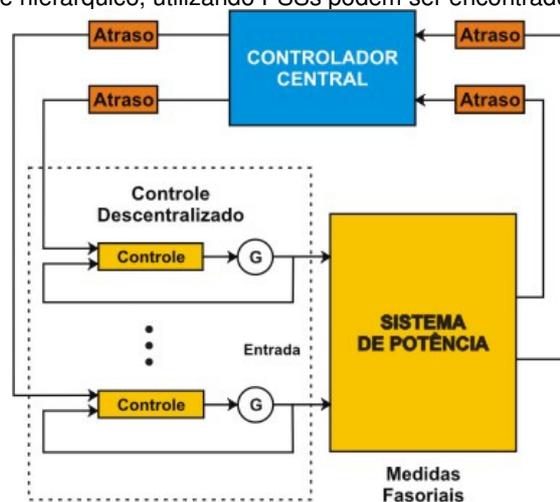


FIGURA 4 – Controle Hierárquico

3.3.1. Principais Desafios no Projeto de Controladores utilizando Sinais Remotos

O projeto das estruturas de controle descritas apresentam diversos desafios em comum, a saber:

- atrasos na transmissão dos sinais remotos;
- utilização de conceitos e métodos de projeto de sistemas multivariáveis;
- assegurar a robustez à perda de canais de comunicação, variação no tempo de comunicação e mudanças na configuração do sistema.

A questão comum e relevante relacionada a todas as arquiteturas é a consideração dos atrasos nos canais de comunicação. A introdução de atrasos na malha de controle tem efeito desestabilizante, reduzindo a efetividade do controle (17). Os atrasos podem, em alguns casos, levar o sistema à instabilidade (17). No caso dos sistemas elétricos, a robustez do projeto deve ser levada em conta dadas às freqüentes variações de configuração que ocorrem durante a operação. Os controladores devem ser robustos o suficiente para garantir a estabilidade dos sistemas em diferentes condições de operação.

A primeira arquitetura (controle descentralizado com sinais remotos), ilustrado na Figura 2, tem como vantagem a possibilidade de conexão direta dos sinais medidos remotamente ao PSS local. Isso poderia reduzir o custo do sistema já que o PDC seria eliminado nessa configuração. No entanto, tem como principal desvantagem a grande vulnerabilidade quando há perda do sinal remoto, podendo até mesmo levar o sistema à instabilidade, como relatado em (8).

A segunda arquitetura (controle centralizado), ilustrado na Figura 3, apresenta maior observabilidade já que utiliza sinais de diversos pontos do sistema. No entanto, em caso de problemas no controlador central o sistema elétrico ficaria exposto, já que não haveria nenhuma outra camada de controle para assegurar o amortecimento do sistema.

Já, a abordagem hierárquica, ilustrado na Figura 4, é a que apresenta o maior potencial de aplicação em SEE, pois agrega os benefícios do controle central juntamente com a consideração de uma camada de controle de retaguarda. Essa camada de retaguarda é formada pelo controle descentralizado, que atuaria garantindo um mínimo desempenho do sistema em caso de falha no controle centralizado.

Detaca-se aqui a vantagem deste esquema quando comparado com o ajuste coordenado do esquema descentralizado. Esta abordagem é bastante efetiva porém apresenta restrições práticas, pois considerada

dispositivos distribuídos ao longo do sistema e de propriedade de diferentes agentes que nem sempre tem o interesse na operação do sistema ao menor custo. O ajuste do esquema hierárquico pode ser feito rapidamente a partir do centro de controle onde estará localizado o controlador central sem a necessidade da intervenção dos agentes. Há poucos estudos abordando esse tema (20)(19) que considerem os atrasos de comunicação no momento da realização do projeto. Dada a potencialidade desse esquema de controle, o foco principal deste trabalho está na investigação da capacidade do mesmo na melhoria da estabilidade dos sistemas elétricos.

4.0 - MODELO DO SISTEMA E MÉTODOS DE PROJETO

4.1 Modelo do Sistema Elétrico

O sistema de potência é descrito por um conjunto de equações algébrico-diferenciais, as quais descrevem geradores, as cargas e os FACTS conectados em uma rede. Linearizando estas equações, eliminando-se as variáveis e definindo \mathbf{x} , \mathbf{u} e \mathbf{y} como estado, entrada e vetor de saída, respectivamente, o modelo do sistema de potência é dado por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2)$$

4.2 Modelagem da Estrutura do Controle

A estrutura do controle é modelada por uma matriz de função de transferência:

$$PSS(s) = \begin{bmatrix} pss_{11}(s) & \dots & pss_{1l}(s) \\ pss_{21}(s) & \dots & pss_{2l}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ pss_{m1}(s) & \dots & pss_{ml}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde, l e m são o número de entradas e saídas, respectivamente. Para o controle descentralizado, esta matriz é diagonal com $m=l$. A função de transferência $pss_{ij}(s)$ é escolhida como:

$$pss_{ij}(s) = K_c \frac{1 + bs + as^2}{1 + cs + ds^2} \quad (4)$$

A realização do controlador dado por (3) no espaço de estados é dado por:

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{u}_c \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c \mathbf{u}_c \quad (6)$$

4.3 Modelagem dos Atrasos

Os atrasos são modelados por uma aproximação de Padé de segunda ordem. A função de transferência é dada por:

$$G_{P2} = \frac{6 - 2Ts}{6 + 4Ts + (sT)^2} \quad (7)$$

O controlador dado por (7) no espaço de estados é representado por:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_d \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{D}_d \mathbf{u}_d \quad (9)$$

5.2 Projeto do Controlador e Análise de Desempenho

O controle proposto considera dois níveis. O nível do controle descentralizado é formado por quatro PSSs colocados nos quatro geradores do sistema utilizando velocidade como sinais de entrada. Como projeto inicial, os mesmos quatro geradores e os respectivos sinais de velocidade participarão do esquema de controle central. O objetivo principal desta seção é o de apresentar os principais aspectos relacionados ao projeto e a efetividade do controle central. Dessa forma, o sinal de velocidade foi escolhido por ser o mais utilizado na literatura. As entradas dos controladores descentralizados e centralizados são filtrados por um *wash-out* e suas saídas são limitadas em 0,2 pu.

O primeiro passo é o projeto do controle descentralizado. Esse primeiro nível deve assegurar a estabilização do sistema quando da perda do controle centralizado. Haverá uma queda no nível de amortecimento do sistema, no entanto, a estabilidade estará preservada. Para este nível poderia ser aplicado o método de controle ótimo com restrições estruturais de descentralização. No entanto, a aplicação do método exigiria um esforço coordenado de ajuste de PSSs por parte de todas as empresas que compõem o sistema. Dependendo do tamanho do sistema isso pode se tornar inviável. Considerando essa hipótese, parte-se do princípio que as empresas configuraram os seus respectivos PSSs de acordo com métodos de projeto normalizados pela concessionária. Para efeitos de simulação, o mesmo ajuste de PSSs apresentado em (24) será utilizado.

Os quatro PSSs colocados em Itaipu, Salto Segredo, Foz de Areia e Salto Santiago resultam em um sistema estável, com um modo inter-área associado a oscilações entre Itaipu e o Sistema Sudeste que é apresentado na Tabela 1, Modo 3. Os demais modos apresentam um amortecimento maior que 10%. O controle central é projetado, utilizando-se controle ótimo com restrições estruturais para aumentar o amortecimento do modo menos amortecido. Os atrasos são considerados no projeto do controle central. Atrasos na ordem de 200ms são introduzidos na entrada e na saída da planta, resultando em um atraso total de 400ms.

Tabela 2– Modos de Oscilação Inter-área com Controle Centralizado

Modo	Autovalor	Frequência (Hz)	Amort. (%)
Local	$-1.15 \pm 11.14i$	1.77	10.7
InterÁrea	$-0.57 \pm 5.08i$	0.8	11.12

Com o controle centralizado, o amortecimento do modo inter-área aumentou, como apresentado na Tabela 2, mostrando a efetividade do esquema de controle. Os outros modos permanecem com um amortecimento maior que 10%. O desempenho do controlador foi também avaliada por meio de simulações no domínio do tempo usando o software ANATEM para verificar o comportamento do controlador no sistema não-linear. Um curto circuito trifásico foi aplicado a barra 4 e retirado sem alteração no sistema. O ângulo do gerador 4 (Itaipu) é apresentado na Figura 6 . As respostas do sistema com somente o controlador local (linha sólida) e com o controle, em dois níveis (linha pontilhada) mostram que o sistema apresenta melhor comportamento dinâmico com a presença do controle central.

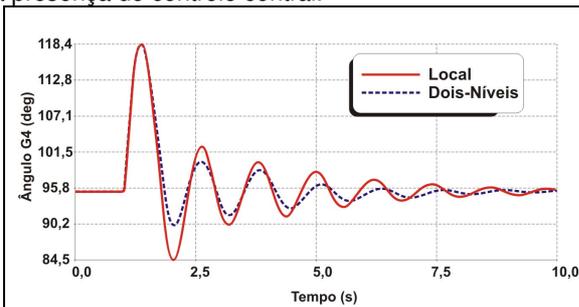


FIGURA 6 – Ângulo Gerador 4 (Itaipu)

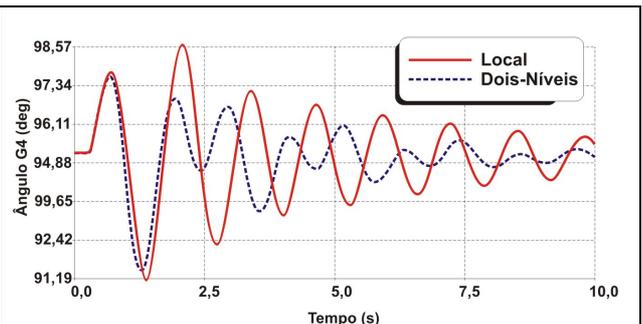


FIGURA 7 – Robustez: Ângulo do Gerador 4 (Itaipu)

Na Figura 7 apresenta-se o desempenho do controle hierárquico frente ao desligamento da linha de transmissão entre as barras 2 e 5. Verifica-se então que o controle é robusto a alterações topológicas do sistema.

6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho o projeto e o desempenho de um esquema de controle em dois-níveis utilizando medição fasorial sincronizada foram apresentados. O método de projeto utilizado é baseado em controle ótimo com restrições estruturais. O controle descentralizado assegura um desempenho mínimo para o sistema. O controle centralizado

otimiza o desempenho do sistema como um todo e especialmente em situações que requeiram ajuste coordenado de PSSs. Teste realizados com o equivalente Sul-Sudeste mostram a efetividade do esquema de controle. O amortecimento do modo de oscilação inter-área é aumentado significativamente.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) T. Dy-Liacco; 2002. Control Centers Are Here To Stay. IEEE Computer Applications in Power, New York, v. 15, n. 4 (Oct.), p. 18-23.
- (2) J. W. Ballance, B. Bhargava, et al., "Monitoring Power System Dynamics using Phasor Measurement Technology for Power System Dynamic Security Assessment" In: Proceedings IEEE Bologna Power Tech. Bologna, Itália. 2003.
- (3) K. Morrison, L. Wang, P. Kundur, "Power System Security Assessment" IEEE Power and Energy Magazine, v. 2, n. 5, p. 30-39, Sep. 2004.
- (4) U.S.-Canada Power System Outage Task Force. (2004) Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canadá: Causes and Recommendations. [Online]. Disponível: <http://www.nerc.com>.
- (5) R. Klump, R. E. Wilson, and K. E. Martin, "Visualizing Real-Time Security Threats Using hybrid SCADA/PMU Measurement Displays" *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, U.S.A. 2005.
- (6) G. Andersson, et al., "Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance," In.: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 4, Novembro. 2005.
- (7) F. P. de Mello; C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control." In.: IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 88, no. 4, p. 316-327, Abril 1969.
- (8) J. H. Chow, et al., "Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals", IEEE Control System Magazine, pp. 82-90, Agosto, 2000.
- (9) P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.
- (10) H. Peña, "Controle Ótimo Descentralizado para o Projeto e Coordenação de Sinais Estabilizadores em Sistemas Elétricos de Potência" In.: Tese de Doutorado. Florianópolis, 1992.
- (11) B. Chaudhuri, R. Majumder, B. C. Pal, "Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay," In.: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 4, Novembro. 2004.
- (12) R. L. V. Marini, "Uso de Medição Fasorial Sincronizada Visando a Melhoria da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado. UFSC. 2005.
- (13) H. Chen, Z. Guo and H. Bai, "Wide-area Robust H_2/H_∞ Control with pole placement for Damping Inter-Area Oscillations" In.: IEEE General Meeting, Montreal, 2006.
- (14) O. Samuelsson, "Load Modulation for Damping of Electro-Mechanical Oscillations", IEEE. 2001.
- (15) Y. Huang, Z. Xu, "HDVC Supplementaty Controller Based on Synchronized Phasor Measurement Units", IEEE. 2004.
- (16) H. Wu e G. T. Heydt. "Design of Delayed-Input Wide Area Power System Stabilizer Using Gain Scheduling Method", In.: IEEE Power System Society General Meeting, July 2003.
- (17) H. Wu; S. Konstantinos e G. T. Heydt. "Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer", In.: IEEE Trans. on Power System, Nov. 2004.
- (18) I. Kamwa, et al., "Wide-area measurements based stabilizing control of large power systems – a decentralized/hierarchical approach,". In.: IEEE Transactions on Power Systems. Fevereiro. 2001.
- (19) H. Ni, G. T. Heydt, L. Mili, "Power System Stability Agents Using Robust Wide Area Control" In.: IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, no. 4, Nov. 2002.
- (20) F. A. Okou, et al., "Smith Prediction Approach for the Design of a Robust Wide-Area Measurements Based Hierarchical Controller," Proc. IEEE General Meeting , São Francisco, 2005.
- (21) D. Dotta, A. S. e Silva, I. C. Decker, "Power System Small-Signal Angular Stability Enhancement using Synchronized Phasor Measurements" Proc. IEEE General Meeting , Tampa, 2007.
- (22) J. C. Geromel. Methods and Techniques for Decentralized Control Systems: Analysis and Design. Ed. Clup, Milano, Italy, 1987.
- (23) A. J. A. Simões Costa, et al., "Design of decentralized controllers for large power system considering sparsity," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, pp. 144-152, Feb. 1997.
- (24) N. Martins and L. T. G. Lima. "Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems," In.: IEEE/PES Symposium on Applications of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods. 1989.