SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GAT - 22
16 a 21Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR DE SISTEMAS ELÉTRICOS USANDO MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Robson Luis Valim Marini* **UFSC - LABSPOT**
Aguinaldo Silveira e Silva **UFSC – LABSPOT**
Ildemar Cassana Decker **UFSC – LABPLAN**

RESUMO

Neste artigo aborda-se o uso de medição fasorial sincronizada para a melhoria do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência. Estudam-se métodos de alocação de PMUs e como esta localização pode melhorar o desempenho dinâmico do sistema. Comentam-se também estratégias de controle de emergência associadas à estabilidade transitória, usando medições fasoriais.
Este trabalho faz parte de um projeto (MEDFASEE[1]) mais amplo de desenvolvimento e uso de medições fasoriais em sistemas elétricos, realizado a partir da colaboração de uma parceria estabelecida entre a UFSC e a Reason Tecnologia S.A., e que contempla a construção e instalação de um protótipo, desenvolvimento de aplicações e testes em sistemas reais.

PALAVRAS-CHAVE

Unidade de Medição Fasorial (PMU), Estabilidade a Pequenas Perturbações, Controle de Emergência, Prony.

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação de sistemas de energia elétrica tem se tornando mais complexa nos últimos anos devido a diversos fatores, tais como limitação de recursos aplicados ao setor elétrico e restrições de ordem ambiental, limitando a expansão do sistema de transmissão, crescente demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia elétrica e, em alguns países, à introdução de um ambiente competitivo entre os diversos agentes. Com isto há uma tendência de se utilizar ao máximo os recursos do atual sistema, protelando ampliações e reforços. No entanto, as margens de segurança do sistema podem ser comprometidas, o que requer adequadas ações de monitoração e controle para a manutenção da segurança do sistema. Este cenário tem exigido a procura e incorporação de novas tecnologias aos centros de controle e nos esquemas de controle e proteção. Entre estas novas tecnologias, a medição fasorial sincronizada tem encontrado uma ampla gama de aplicações em sistemas elétricos. Essencialmente, a medição fasorial consiste na obtenção de dados fasoriais sincronizados por uma base de tempo comum, via GPS (Global Position System) (1). As medidas são adquiridas pelas unidades de medição fasorial (PMUs – Phasor Measurement Units) e enviadas para um concentrador de dados (PDC – Phasor Data Concentrator). O uso de medições fasoriais incorpora modernas tecnologias de redes de computadores e de comunicação, para a sua implementação.
Medições fasoriais têm sido propostas para as mais diversas aplicações em sistemas elétricos. A mais comum é a monitoração das grandezas do sistema elétrico. Grandezas como fasores e ângulos podem ser diretamente obtidas e usadas como indicação das condições de operação e margens de segurança do sistema. A sincronização no tempo permite a organização dos eventos no caso de perturbações, o que facilita a análise e o diagnóstico de tais eventos. Como exemplos de aplicações, pode-se citar a estimação de estados, identificação de modelos, inclusive modelos de cargas, proteção e melhoria da estabilidade angular e de tensão.

[1] Projeto de pesquisa financiado por meio do contrato FNDCT/CT-Energ 01.02.0039.00 e pela Reason Tecnologia S.A.

Departamento de Engenharia Elétrica - LABSPOT - CTC - UFSC
CEP 88040-900 - Florianópolis - SC Fone: (048) 331-9593 / Fax: (048) 331-9280
e-mail: robson@labspot.ufsc.br e aguinald@labspot.ufsc.br
www.labspot.ufsc.br/~robson e www.labspot.ufsc.br/~aguinald

Neste artigo a medição fasorial sincronizada é aplicada à melhoria da estabilidade angular do sistema de energia elétrica. Tanto a estabilidade para pequenas perturbações quanto a estabilidade transitória são consideradas. Critérios para a alocação das PMUs são apresentados. A síntese de controladores usando sinais remotos, para a melhoria do amortecimento do sistema, é abordada. Esquemas de controle de emergência, visando à melhoria da estabilidade transitória são discutidos.
Este trabalho é parte de um amplo projeto envolvendo universidades, fabricante e empresas, visando desenvolver um protótipo de medição fasorial (1), incluindo PMUs e concentrador de dados, instalação e testes de protótipos e o desenvolvimento de aplicações, como monitoração, melhoria da estabilidade angular e de tensão e localização de faltas.

2.0 - ESTABILIDADE ANGULAR

Neste trabalho a estabilidade angular é o objeto de maior interesse, embora vários resultados possam ser estendidos para a estabilidade de tensão e de freqüência. A estabilidade angular está associada à dinâmica do eixo dos geradores e pode ser dividida em estabilidade para pequenas perturbações e estabilidade transitória. A estabilidade para pequenas perturbações está associada à estabilidade de um ponto de equilíbrio existente no sistema. Se o ponto de equilíbrio é estável, então a trajetória do sistema diante de uma perturbação suficientemente pequena não se afasta do ponto de equilíbrio. A estabilidade transitória está associada ao domínio de atração deste ponto de equilíbrio. Se a perturbação for tal que o estado do sistema é deslocado para fora do domínio de atração, a trajetória se afasta do ponto de equilíbrio, mesmo se este for estável. Portanto, a estabilidade transitória depende do tipo de perturbação, que no caso de um sistema elétrico pode ser um curto-circuito, uma saída de linha, perda de um bloco de geração, etc.
A estabilidade angular pode ser uma restrição que impede o aproveitamento da capacidade de um sistema elétrico, devido à instabilidade para determinadas configurações, especialmente após uma falta no sistema. Atualmente, controladores como estabilizadores de sistemas de potência nos geradores, e controles suplementares em equipamentos FACTS, são usados para a melhoria da estabilidade para pequenas perturbações de sistemas de potência. Esquemas de emergência são usados para a melhoria da estabilidade transitória, além de serem usados para a estabilidade de freqüência e tensão.
Do ponto de vista da estabilidade para pequenas perturbações o uso de medição fasorial sincronizada apresenta várias facilidades. Modos de oscilação do sistema podem ser determinados em tempo real, o que além de facilitar a monitoração, permite a validação de modelos. Como o sistema de medição fasorial disponibiliza sinais remotos que podem ser usados como sinais de entrada para os controladores do sistema, pode-se melhorar o desempenho dinâmico do sistema, aumentando-se o amortecimento dos modos críticos. Uma situação onde pode-se ter considerável ganho com relação a sinais locais, é o caso de modos inter-área, onde a observabilidade maior destes modos pode se dar em locais diferentes de onde está à maior controlabilidade dos mesmos, e portanto a localização do controlador, associado à maior controlabilidade, é diferente do ponto onde o sinal deve ser medido, associado a maior observabilidade (2).
No caso da estabilidade transitória, esquemas de controle de emergência têm sido usados para ações de controle visando manter a estabilidade do sistema quando da ocorrência de determinados eventos. Estes esquemas se caracterizam por atuarem quando da ocorrência dos eventos para os quais eles foram programados. O estado real do sistema não é levado em conta e a quantificação da ação de controle, como desligamento de carga e chaveamentos, é feita em estudos off-line. Devido a isto, e embora tais esquemas sejam eficientes, o desempenho ainda pode ser melhorado. Com o uso de medições fasoriais, pode-se usar o estado atual do sistema para determinar a ação de controle. Em algumas situações, a quantificação da ação pode ser feita on-line e, como os dados reais do sistema são usados, a precisão da ação é maior e, portanto, o controle é mais eficiente.
O uso da medição fasorial para a estabilidade angular requer que as PMUs estejam alocadas de tal modo a fornecer a informação necessária. Ou seja, as localizações das PMUs devem ser tais que adquiram o máximo de informação possível evitando redundância de dados. Na próxima seção a alocação destas unidades é discutida.

3.0 - ALOCAÇÃO DE PMUS

Esta seção apresenta um método para a alocação de PMUs. Este método foi apresentado inicialmente em (2), mas uma extensão é apresentada aqui, onde incorporou-se o problema da estabilidade para pequenas perturbações na metodologia original.
Seja um sistema com N barras, onde são efetuadas medidas de uma variável conveniente, como ângulo ou freqüência, em n_b barras ($n_b \leq N$). Seja Z_B uma matriz de dimensão $m \times n_b$ (sendo m o número de amostras dos sinais), onde cada coluna contém a resposta no tempo das variáveis das n_b barras. A matriz Z_B será chamada de matriz de informação. Ao invés de definir o conteúdo de informação em termos da resposta no tempo, outras definições de uma matriz de informação são possíveis, como será discutido mais adiante.
O conteúdo de informação desta matriz deve ser medido de alguma maneira. Esta medição pode ser feita em termos de várias normas, mas aqui será usada a norma graminiana (2), definida por

$$\det\left(Z_B^T Z_B\right)^{\frac{1}{n_b}} = \left(\prod_{i=1}^{np} \sigma_i\right)^{\frac{1}{n_b}} \qquad [1]$$

onde $\{\sigma\}_{i=1,\ldots,n_x}$, são os n_x valores singulares de Z_B e também os autovalores de $Z_B^T Z_B$. Existem outros métodos que foram propostos para a medição do conteúdo de informação de Z_B (2).

A norma graminiana tem uma interpretação interessante em termos da matriz de informação formada pela resposta no tempo dos sinais. A diagonal da matriz $Z_B^T Z_B$ consiste da soma dos quadrados das respostas no tempo de cada variável de barra. A norma aumenta com o aumento dos termos da diagonal. Por outro lado, a norma decresce com o aumento dos elementos fora da diagonal (quando da perda da dominância diagonal), que correspondem a uma medida da correlação entre os sinais de diferentes barras. Quanto maior esta correlação, menor o conteúdo de informação da matriz. A norma graminiana é, portanto, uma indicação do conteúdo de informação da matriz. A norma graminiana também pode ser aplicada para outras definições de matriz de informação, obtendo-se resultados semelhantes aos que são obtidos ao se aplicar esta norma na matriz formada pelas respostas no tempo.

3.1 – <u>Matriz de informação para a estabilidade para pequenas perturbações</u>

No caso da estabilidade para pequenas perturbações deve-se amortecer um ou mais modos de oscilação do sistema. Muitas vezes os modos inter-área, de baixa freqüência e freqüentemente pouco amortecidos e que envolvem máquinas em extensa área do sistema, são os de maior interesse. Sejam os modos $\lambda_{l1},\ldots,\lambda_{lk}$ os modos de interesse do sistema. A escolha das barras onde as PMUs serão posicionadas, está associada ao conteúdo modal relativo aos modos de interesse no sinal da barra. Define-se aqui sinal da barra como sendo o sinal escolhido para ser medido pela PMU para efeito de controle ou monitoração. Vários métodos são possíveis para determinar este conteúdo modal, e aqui dois métodos são considerados, a análise de Prony (3) e os índices de observabilidade (4).

A análise de Prony é uma metodologia que permite estimar a freqüência, amortecimento, magnitude e fase de um dado sinal. Ou seja, o método permite decompor um sinal no tempo $y(t)$ em termos do seu conteúdo modal. O sinal $y(t)$ pode ser reconstruído através da expressão

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{p} B_i z_i^k \qquad [2]$$

onde B_i, $i = 1,\ldots,n$ representam os coeficientes relativos a cada modo, $\lambda_i = \ln(z_i)/\Delta t$ são os modos correspondes e Δt é o passo de amostragem do sinal (contendo m amostras igualmente espaçadas).

Os passos para a obtenção da decomposição de Prony podem ser brevemente descritos como:

- Passo 1: Construir um modelo de predição linear discreta (MPLD) que se ajuste ao sinal adquirido.
- Passo 2: Encontrar as raízes do polinômio característico associado ao MPLD criado.
- Passo 3: Usar as raízes calculadas como freqüências modais complexas para o sinal sob estudo e assim determinar a amplitude e a fase inicial para cada modo.

A partir da análise de Prony podem ser definidos vetores $z_i = \begin{bmatrix} B_{l1} & \ldots & B_{lk} \end{bmatrix}$, onde $B_{l1},\ldots,B_{lk}$, contém informações sobre módulo e fase dos modos $\lambda_{l1},\ldots,\lambda_{lk}$, de interesse, que correspondem à participação destes modos no sinal da *i-ésima* barra, e que serão usados para formar a matriz de informação.

Os vetores z_i também podem ser obtidos a partir dos índices de observabilidade do sistema.

Seja o sistema

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \qquad [3]$$

que representa as equações linearizadas do sistema elétrico em torno de um ponto de operação, onde x, y e u são os vetores de estado, de saída e de entrada respectivamente e A, B e C são as matrizes de estado, de controle e de saída do sistema sob estudo (4).

Usando-se uma transformação de similaridade, representada pela matriz Φ, tal que $x = \Phi\bar{x}$, onde Φ é formado pelos autovetores à direita correspondentes aos autovalores de A, pode-se obter o sistema

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \\ y &= \bar{C}\bar{x} \end{aligned} \qquad [4]$$

onde $\overline{A}$ é uma matriz diagonal que contém os autovalores de A, e $\overline{B}$ e $\overline{C}$ são as matrizes de controlabilidade e observabilidade dos modos, respectivamente. Assim cada estado do sistema é associado a um modo e a matriz $\overline{C}$ corresponde aos índices de observabilidade que medem a contribuição de cada modo na saída do sistema. Cada vetor z_i, correspondente ao sinal medido na barra i é então definido como $z_i = \left[\overline{c}_{l1} \quad \ldots \quad \overline{c}_{lk}\right]$, onde $\overline{c}_{l1}, \ldots, \overline{c}_{lk}$ são extraídos de $\overline{C}$ e relacionadas aos modos $l_1, \ldots, l_k$.

Os vetores z_i, obtidos a partir da análise de Prony ou dos índices de observabilidade, são usados para formar Z_B. A matriz de informação referente à estabilidade para pequenas perturbações é então formada por Z_B, onde cada coluna desta matriz é formada por z_i^T. Para o cálculo da norma graminiana se faz necessário o cálculo de

$$Z_B^T Z_B = \begin{bmatrix} z_1 z_1^T & z_1 z_2^T & \cdots & z_1 z_n^T \\ z_2 z_1^T & z_2 z_2^T & \cdots & z_2 z_n^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_n z_1^T & z_n z_2^T & \cdots & z_n z_n^T \end{bmatrix} \qquad [5]$$

Os elementos da diagonal desta matriz crescem com o conteúdo modal dos modos de interesse em cada sinal de barra. Os elementos $z_i^T z_j$ fora da diagonal diminuem à medida que os vetores z_i e z_j, referentes às barras i e j, tenderem à ortogonalidade, aumentando a norma graminiana. Portanto, a utilização da norma graminiana neste caso, implica na adição de vetores que contenham mais informações sobre os modos especificados.

3.2 - <u>Matriz de informação para o caso da estabilidade transitória</u>

Uma possível matriz de informação neste caso é sugerida em (2) e baseia-se na idéia de coerência entre sinais. A matriz de coerência é definida por

$$\zeta(Z_B) = \left\| \begin{matrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1nb} \\ \alpha_{11} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2nb} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{nb1} & \alpha_{nb2} & \cdots & \alpha_{nbnb} \end{matrix} \right\| \qquad [6]$$

onde

$$\alpha_{ij}^d = \sqrt{\frac{1}{T}\left(\int_0^T \left[y_{id}(t) - y_{jd}(t)\right]^2 dt\right)} \qquad [7]$$

A variável $y_{id}(t)$ contém o sinal medido na *i-ésima* barra para a perturbação d. O sinal medido pode ser o sinal de freqüência, de ângulo, velocidade ou uma combinação destes.

3.3 – <u>Algoritmo para alocação de PMUs</u>

Em (2) é apresentado um algoritmo para alocação de PMUs. Tanto a maximização da informação à medida que novas PMUs são acrescentadas, como a minimização da perda de informação à medida que PMUs forem retiradas, podem ser usadas. Aqui, usou-se a primeira abordagem.
As etapas do método estão apresentadas abaixo:

- Definir o conjunto de barras candidatas $B_C = \{B_{C1} \quad B_{C2} \quad \cdots \quad B_{CN}\}$
- Escolher o número máximo de PMUs a serem alocadas $n_{u\max} < n_c$
- Assumir a existência de um grupo inicial de n_o barras (o conjunto inicial pode ser vazio) que já possuem PMUs instaladas formando o grupo $B_U = \{B_{U1} \quad B_{U2} \quad \cdots \quad B_{UN}\} \subseteq B_C$
- Define-se o novo conjunto B_C excluindo as barras que já possuem PMUs instaladas (caso existam)
- Enquanto $n_a \leq n_{u\max}$

- Realizar a decomposição em valores singulares e medir o conteúdo da informação de Z_{BU} através da norma Graminiana
- Para $L = 1, \ldots, n_c$
  - Construir $Z_{BC} = \lfloor z_1(t) \quad z_2(t) \quad \ldots \quad z_{n_a}(t) \quad | \quad z_L(t) \rfloor | \, B_{LC} \subset B_C$, onde as n_a primeiras colunas estão associadas com as barras que já contém PMUs instaladas. A última coluna de Z_{BC} consiste da *i-ésima* barra candidata a se instalar uma PMU
  - Aplicar a decomposição de valores singulares e medir o conteúdo da informação de Z_{BC} de acordo com a norma Graminiana
  - Calcular o valor da função objetivo $\zeta(Z_{BU}) = J_L$ para a tentativa atual
- Agrupar os valores de J_L de todas as tentativas e escolher a tentativa que resulte no maior valor de J_L. A *i-ésima* barra que satisfaz este critério é escolhida para instalação da próxima PMU
- O número de candidatos n_c é reduzido de uma unidade e o número de barras destinadas a instalação de PMUs n_a é acrescido de uma unidade. Definir um novo conjunto de barras candidatas excluindo a barra escolhida anteriormente

- As $n_{u\max}$ barras contidas no conjunto B_U compõem a solução para o problema de alocação de PMUs

Ao final da execução do algoritmo apresentado acima, obtém-se a maximização da quantidade de informação proveniente das PMUs. A distribuição das PMUs está relacionada com a distância elétrica entre as barras do sistema elétrico em questão.
No algoritmo acima, a matriz de informação foi definida a partir da resposta no tempo. No entanto a matriz de informação pode ser definida de outras maneiras. O programa computacional desenvolvido permite usar a matriz de informação definida pelos sinais temporais ou pelos índices definidos anteriormente.

4.0 - MELHORIA DA ESTABILIDADE ANGULAR

Nesta seção aborda-se o uso de medição fasorial para a melhoria da estabilidade angular. Tanto a estabilidade para pequenas perturbações quanto a estabilidade transitória são consideradas.

4.1 – Melhoria da estabilidade para pequenas perturbações

A alocação de PMUs visando adquirir sinais com informação sobre modos de interesse do sistema permite que tais sinais sejam usados em controladores que utilizem os sinais mais adequados, locais ou remotos, para amortecer modos de oscilação. Estes sinais são escolhidos a partir do conteúdo de informação que eles possuem sobre os modos de oscilação a serem amortecidos. Esta estrutura de controle está ilustrada na Figura 1.
Os sinais obtidos por medições fasoriais possuem retardos, associados aos tempos de transmissão e processamento dos sinais pelas PMUs e pelo concentrador de dados. Estes retar-

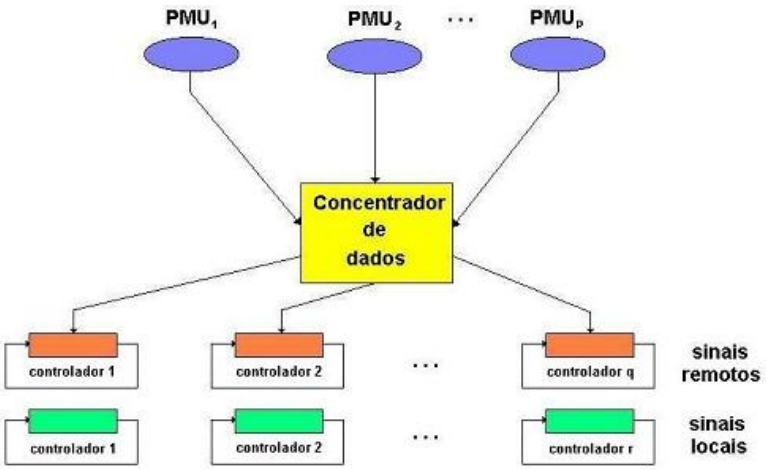

FIGURA 1 – Estrutura de controle usando sinais locais e remotos

dos devem ser levados em conta no projeto de controladores (5). Vários métodos podem ser usados para o ajuste dos parâmetros dos controladores, como posicionamento de pólos, controle ótimo descentralizado, etc (6).

5.0 - MELHORIA DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Esquemas de controle de emergência têm sido largamente empregados para a melhoria da estabilidade transitória. Estes esquemas se caracterizam por serem guiados a eventos, ou seja, são projetados para responder a determinados eventos. As ações a serem tomadas dependem de estudos off-line e não dependem do estado do sistema e, portanto, da resposta do sistema a estas ações. No caso de medições fasoriais, o estado real do sistema é determinado e as ações de controle dependem deste estado e, portanto, da resposta do sistema. Este é um controle guiado pela resposta do sistema. Desta forma, a quantificação das ações de controle pode ser mais precisa e o controle mais eficiente.
Usando informações provenientes de medições fasoriais, pode-se realizar a identificação em tempo real de modelos simplificados do tipo máquina-barra-infinita (MBI), que facilitem a quantificação de ações de controle nos sistema multimáquinas. Após a determinação dos parâmetros do modelo MBI, pode-se definir a ação de controle a ser tomada, usando-se por exemplo, o critério das áreas iguais (8). Esta abordagem permite determinar o estado real do sistema com mais precisão e assim ações de controle mais adequadas, a fim de se garantir a segurança da operação do sistema elétrico.

6.0 - EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Os resultados para dois sistemas são apresentados nesta seção. Inicialmente apresentam-se os resultados obtidos ao se usar o sistema teste New England. A seguir, apresentam-se resultados preliminares referentes ao sistema interligado nacional (SIN).

6.1 – Caso 1: Sistema Teste New England

O sistema escolhido para teste (Figura 2) é o sistema de 39 barras e 10 máquinas conhecido como sistema teste New England. Os dados (estáticos e dinâmicos) deste sistema podem ser conseguidos em (7).

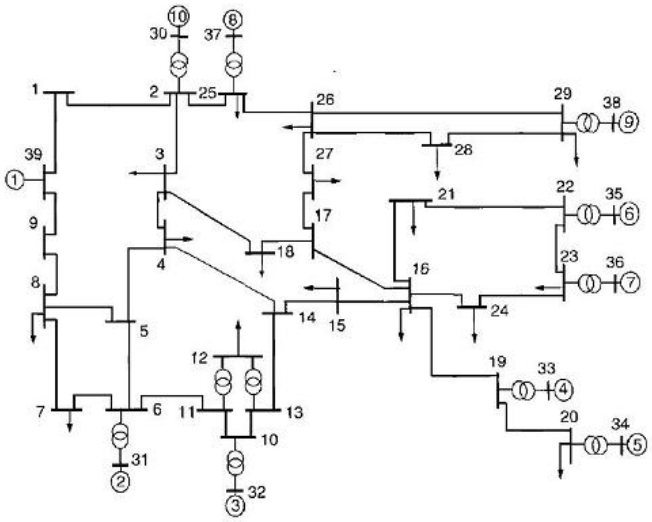

FIGURA 2 – Sistema teste New England, 39 Barras e 10 máquinas

6.1.1 – Resultados da alocação de PMUs

A alocação de PMUs foi realizada visando independentemente a estabilidade para pequenas perturbações e a estabilidade transitória. Os sinais de barra escolhidos são os ângulos nodais referidos a barra 39.
No caso da estabilidade para pequenas perturbações, os resultados estão apresentados na Tabela 1. Estes resultados foram obtidos utilizando-se os índices de observabilidade para definição de Z_B. O objetivo é encontrar as localizações mais associadas ao conjunto de modos apresentados na Tabela 1, onde também são indicados suas freqüências e coeficientes de amortecimento. As barras selecionadas, apresentadas na Tabela 1, são as mais associadas aos modos especificados. Os resultados desta abordagem foram comparados com os obtidos através do PACDYN (9), onde neste último caso, os mode shapes (4) foram utilizados para se determinar à associação dos sinais de barra com os modos especificados. Embora os métodos sejam diferentes, os resultados se mostraram coerentes.
No caso da estabilidade transitória, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2. Na primeira coluna desta tabela, estão apresentados os resultados do posicionamento ao se utilizar os sinais temporais na definição da matriz de informação. A segunda coluna contém os resultados obtidos usando a matriz de informação definida com o uso dos índices de coerência. No primeiro caso, a primeira PMU foi alocada na barra 36. Esta máquina

possui a segunda menor constante de inércia do sistema, portanto tende a ser mais afetada pelas perturbações no sistema, dependendo do tipo e da localização da perturbação. As demais PMUs são alocadas em barras de geração do sistema, com exceção da barra 15, que possui o terceiro maior carregamento do sistema, dado que o primeiro e o segundo maior carregamento (barras 20 e 39) se encontram em barras que já foram selecionadas pelo programa ou que estão muito próximas a estas. A barra 39 já possui uma PMU instalada, dado que o sinal desta barra é a referência angular dos sinais. Comparando-se os dois resultados, verifica-se que os mesmos são coerentes, ou seja, as PMUs estão localizadas em posições eletricamente próximas.

TABELA 1 – Alocação visando estabilidade para pequenas perturbações

Modos	Freq Hz	D(%)	PMUs adicionadas
-0.2853+j3.743	0.5957	7.60	38
-0.3122+j5.8238	0.9269	5.35	30
-0.2999+j6.3311	1.0076	4.73	34
-0.1207+j7.0978	1.1297	1.70	31

TABELA 2 – Alocação para estabilidade transitória

Informação temporal	Índice de coerência
36	36
37	8
30	19
15	2
38	34
31	35
34	18
33	30
32	29

A Figura 3 apresenta os gráficos contendo o acréscimo normalizado de informação com relação ao número de PMUs instaladas no sistema. Os gráficos apresentam os resultados da análise da matriz de informação para o caso da estabilidade para pequenas perturbações e para estabilidade transitória respectivamente.

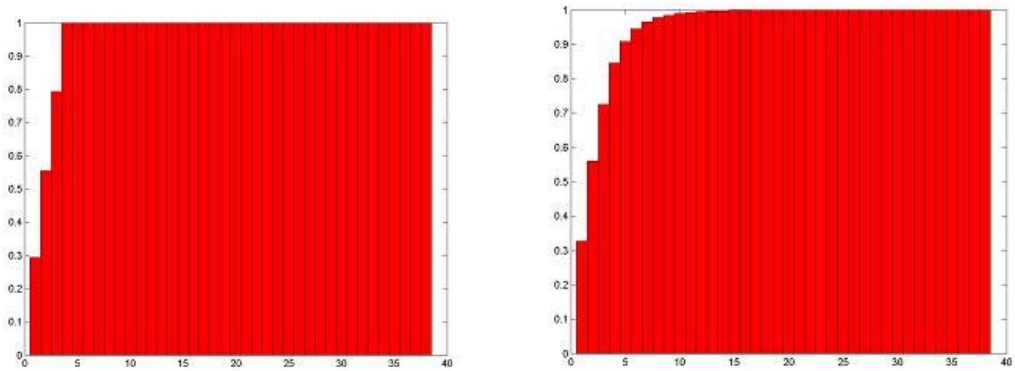

FIGURA 3 - Acúmulo de informação para estabilidade à pequenas perturbações e para estabilidade transitória.

No caso da estabilidade para pequenas perturbações, os resultados indicam que para o número de modos especificados, apenas quatro PMUs já fornecem praticamente toda a informação sobre os mesmos. Para a estabilidade transitória, pode-se verificar que não mais do que cinco ou seis PMUs são necessárias no sistema para que aproximadamente 90% da informação que seria obtida ao se instalar PMUs em todo sistema, seja adquirida. Convém se mencionar que existem alguns fatores que limitam o número de PMUs a serem instaladas em um dado sistema elétrico, como por exemplo, restrições de custo e também a complexidade do sistema de transmissão de dados.

6.1.2 **–** Resultados do controle para melhoria da estabilidade para pequenas perturbações

O exemplo a seguir ilustra uma aplicação da medição fasorial com o uso de sinais remotos e locais, para a melhoria do desempenho dinâmico do sistema para pequenas perturbações. Os modos escolhidos, cujo amortecimento deve ser aumentado são -0.2853+j3.743, modo inter-área, e -0.1207+j7.0978, modo local de baixo amortecimento. Os coeficientes de amortecimento destes modos estão apresentados na Tabela 3. Para os modos selecionados, as barras 34 e 30 foram escolhidas como as melhores localizações, como indicado pelos resultados apresentados na Tabela 1. No entanto, o sinal de barra escolhido como entrada para os controladores é a freqüência em cada barra, obtida a partir de um bloco derivador cuja entrada são os ângulos nodais. Esta escolha

deve-se ao fato de que o uso de ângulos nodais como entrada dos controladores exigem consideráveis avanços de fase. Quatro PSSs usando sinais suplementares locais e remotos (freqüência das barras 34 e 30) foram projetados usando o módulo de projeto de PSSs do Pacdyn. O método implementado neste programa é não coordenado. Para a escolha da localização dos PSSs, fez-se uso dos índices de controlabilidade associados aos modos sob estudo. As barras 36, 34 (usando o sinal de freqüência da barra 34), 33 e 38 (usando o sinal de freqüência da barra 30) foram escolhidas para posicionamento de PSSs. Na Tabela 3 são apresentados os valores finais de amortecimento obtidos com os PSSs projetados, indicando a melhoria obtida.

TABELA 3 – Autovalores do Sistema

Modos	D(%) Inicial	D (%) especif	D (%) final
-0.2853+j3.743	7.60	10.00	9.59
-0.1207+j7.0978	1.70	2.75	2.75

6.2 – Resultados das aplicações no Sistema Interligado Nacional (SIN)

Visando o estudo de uma aplicação no sistema brasileiro, realizou-se um estudo para a determinação da localização adequada de PMUs no sistema Norte-Nordeste. Realizou-se então um estudo visando a determinação da localização adequada de PMUs naquele sistema, com o objetivo de observar os modos de oscilação de interesse. Dentre estes, o de maior relevância é o modo Norte-Sul (máquinas do sistema Norte-Nordeste oscilando contra as máquinas do sistema Sul-Sudeste).
Diversas configurações do sistema, como resultados de contingências como desligamento de circuitos em diferentes regiões do SIN, foram analisadas para verificar o seu efeito no método de alocação de PMUs proposto. Este estudo continua em andamento, mas resultados preliminares retirados dos casos já estudados foram obtidos. Para o modo de oscilação Norte-Sul, concluiu-se que tanto a usina de Tucuruí (Região Tucuruí-Belém no Sistema Norte) quanto a de Xingó (Complexo Paulo Afonso no Sistema Nordeste) são fortes candidatas para se instalar unidades de medição fasorial.
Atualmente, estudos estão sendo realizados para o ajuste de controladores do SIN, usando medições fasoriais. Esquemas de emergência também estão sendo estudados.

7.0 - CONCLUSÕES

O uso de sistemas de medição fasorial em sistemas elétricos encontra como uma de suas aplicações importantes, a melhoria do desempenho dinâmico destes sistemas. Esta melhoria depende da correta localização das PMUs para que sinais relevantes possam ser obtidos e usados em esquemas de controle do sistema. Este artigo apresentou um método para a escolha das barras nas quais PMUs devem ser alocadas. Tanto a estabilidade para pequenas perturbações quanto a estabilidade transitória foram consideradas, sendo que apenas a definição da matriz de informação é alterada de acordo com o tipo de estabilidade considerado.
Uma das vantagens do uso da medição fasorial é a disponibilização de sinais remotos para o uso de controladores, especialmente no caso da estabilidade para pequenas perturbações. Um exemplo de projeto de PSS usando sinais locais e remotos foi apresentado neste artigo.
Resultados preliminares de um estudo sobre a aplicação de PMUs no SIN foram apresentados. Este estudo ainda está em andamento e visa a identificação dos locais mais apropriados para a instalação de PMUs no sistema Norte-Nordeste.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Decker, I.C.; Agostini, M.N.; Ehrensperger, J.G.; Silva, A.S.; Bettiol, A.L.; Zimath, S.L. *Synchronized Phasor Measurement System: Development and Applications*. IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 23 – 27, 2004
(2) KAMWA, I; GRONDIN, R.; *PMU Configuration for System Dynamic Performance Measurement in Large Multiarea Power Systems.* IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 17, no 2, May 2002
(3) HAUER, J.F.; DEMEURE, C.J.; SCHARF, L.L. *Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals*. IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 5, no 1, Feb 1990
(4) MARTINS, N.; LIMA, L.T.G. *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, Vol. PWRS-5, pp. 1455 – 1469, Nov 1990
(5) CHAUDHURI, B.; MAJUMDER, R.; BIKASH, C. *Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19 no 4, Nov 2004
(6) SIMÕES COSTA, A. J. A.; FREITAS, F. D.; SILVA, A. S.; *Design of Decentralized Controllers for Large Power Systems Considering Sparsity*. IEEE Transactions on Power Systems, 1997(12):144-152
(7) www.labspot.ufsc.br/~robson/PSATFILES.zip
(8) WANG, Y.J.; LIU, C.W.; SUE, L.D.; LIU, W.K. *A Remedial Control Scheme Protects Against Transient Instabilities Based on Phasor Measurements Units (PMUs) – A Case Study*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000
(9) Manual do Usuário – Pacdyn – V6.1 Dec 2002