



GAT-004

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MAXIMIZAÇÃO DE TRANSFERÊNCIAS DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INTERLIGADOS CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Arlan Luiz Bettiol – UNIVALI

RESUMO

O método MAT (“transient stability-constrained Maximum Allowable Transfer”) determina um redespacho de geração que maximiza a transferência de potência em sistemas elétricos sob restrições de estabilidade transitória. A partir de uma grande lista de contingências, MAT identifica as contingências severas do ponto de vista de estabilidade transitória e indica um redespacho de geração para estabilizá-las simultaneamente. O bom desempenho do método é verificado em simulações numéricas efetuadas no sistema Sul-Sudeste do Brasil operando com elevada transferência de potência entre regiões.

PALAVRAS-CHAVE: Método MAT, transferência de potência, melhoria de segurança dinâmica.

1.0 INTRODUÇÃO

O uso compartilhado de sistemas elétricos interligados por diversas empresas implica na adoção de complexos procedimentos operacionais devido ao uso mais intensivo das instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Devido a esse novo ambiente competitivo, os sistemas elétricos estão cada vez mais dependentes das transferências de potência entre as várias empresas do “pool”, o que dificulta ainda mais a sua operação. Isso leva a um estressamento do sistema de transmissão, o que se reflete num aumento da dificuldade em manter-se um nível adequado de segurança global (1,2).

A determinação dos limites de transferência de potência entre as empresas é efetuada pela simulação numérica do comportamento dinâmico do sistema elétrico interligado para um conjunto aceitável de condições operativas, tais como: demanda prevista, níveis de geração, topologia do sistema elétrico, transferências programadas, lista de contingências sob análise, etc. (2,3). Desde que essas condições operativas variam continuamente em tempo real, os limites de transferência de potência também variam de um instante ao outro. Adicionalmente, quanto mais longínquo é o horizonte das simulações efetuadas, maiores são as incertezas nas condições operativas consideradas. Assim, esses limites de transferência de potência determinados em estudos “off-line” necessitam ser periodicamente atualizados de modo a atender os requisitos de operação em tempo real (1).

A transferência de potência em sistemas elétricos pode ser limitada pela capacidade térmica das linhas de transmissão, estabilidade de tensão ou estabilidade transitória. A estabilidade transitória refere-se à capacidade de um sistema elétrico interligado “sobreviver” a grandes perturbações através do período transitório (1,3). A determinação de limites considerando as restrições de estabilidade transitória representa hoje uma tarefa bastante complexa em estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos devido principalmente à necessidade do uso de ferramentas rápidas e confiáveis para uma análise detalhada dos complexos mecanismos de instabilidade.

2.0 MÉTODO SIME

2.1 Princípio

O método SIME (“Single Machine Equivalent”) analisa o comportamento dinâmico do sistema elétrico após uma perturbação que presumivelmente aciona a instabilidade transitória no período pós-falta. SIME é acoplado a um programa de simulação numérica de maneira que possa: identificar o modo de separação das máquinas em dois grupos; reduzir esses grupos a um sistema equivalente de duas máquinas e, em seguida, a um sistema máquina - barra infinita (OMIB); analisar a estabilidade transitória deste OMIB através das margens de estabilidade que resultam da aplicação do Critério de Áreas Iguais (1,4,5).

2.2 Máquinas críticas e correspondentes OMIB’s

SIME identifica o modo de separação das máquinas do sistema através das curvas “swing” pós-falta calculadas pelo programa de simulação numérica. A cada passo de integração, SIME ordena decrescentemente os ângulos das máquinas, identifica os maiores desvios angulares (“gaps”) entre quaisquer dois grupos ordenados de máquinas adjacentes, considera como grupos críticos candidatos (“critical clusters”) aqueles que estão acima destes maiores “gaps”, e calcula os parâmetros referentes aos OMIB’s candidatos: ângulo (δ) e velocidade (ω) do rotor, coeficiente de inércia (M) e potência acelerante ($P_a = P_m - P_e$) (1,5). Esses parâmetros são determinados inicialmente considerando-se o centro parcial de ângulos de cada um dos dois clusters e posteriormente considerando seu movimento relativo.

O procedimento termina tão logo um OMIB candidato encontra suas condições instáveis ($P_a = 0$, $dP_a / dt > 0$); ele é então declarado ser um OMIB crítico. Considera-se este OMIB crítico ser também válido na condição limítrofe de um caso estável ($P_a < 0$) (5).

2.3 Margens de estabilidade

O Critério de Áreas Iguais, aplicado ao sistema OMIB candidato para definir a margem de estabilidade η (excesso de área desacelerante sobre a área acelerante), estabelece que o sistema OMIB é instável se $\eta < 0$ e estável se $\eta > 0$. O caso limítrofe ($\eta = 0$) fornece a condição limite em termos do tempo crítico de abertura (CCT) ou potência limite (PL) (1,5).

Usando a formulação multi-máquina correspondente, SIME determina as margens de estabilidade usando as expressões abaixo:

$$\eta_U = -\frac{1}{2} M \omega_u^2 \quad \eta_{ST} = \int_{\delta_0}^{\delta_u} P_a | d\delta$$

Nas expressões acima, o subscrito u refere-se ao momento em que o OMIB encontra as condições instáveis e o subscrito r refere-se ao momento em que o OMIB “retorna” à condição estável (1,5).

2.4 Determinação de limites de estabilidade

O processo de determinação do CCT ou PL consiste em estabelecer a condição limite na qual a margem de estabilidade é nula. Este processo iterativo é efetuado considerando-se sucessivos cenários de estabilidade (principalmente instáveis) em ordem decrescente de severidade e extrapolando ou interpolando as margens de estabilidade correspondentes (1,2,3).

2.5 Filtragem e classificação de contingências

A identificação precisa das contingências severas ou potencialmente severas e a consequente eliminação das não severas é um aspecto primordial em estudos de estabilidade transitória, já que implica na redução drástica do número de contingências que realmente apresentam restrições à operação segura do sistema elétrico. Este procedimento deve ser confiável e tão rápido quanto possível (1,4).

Para compatibilizar esses dois requisitos, SIME classifica e seleciona as contingências: (i) evitando, sempre que possível, simulações numéricas estáveis (as quais requerem mais tempo de CPU que as instáveis); (ii) admitindo uma menor precisão no processo iterativo para aqueles limites de estabilidade que estejam acima dos valores de interesse; (iii) usando um patamar de limite de estabilidade maior do que o admitido na prática. Este “SIME simplificado” (“Filtering SIME”) manipula também qualquer modelagem de sistema elétrico e pode ser convenientemente ajustado às características específicas do sistema elétrico sob análise (1,3,5).

2.6 Ações de controle adotadas por SIME

O procedimento de estabilização do SIME baseia-se num esquema de compensação de potência mecânica proposto em (1,4). Dada uma contingência instável, um esquema de compensação foi desenvolvido de modo a responder as seguintes questões: (i) qual é o valor de potência mecânica que deve ser reduzido nas máquinas críticas? (ii) como compensar esse decréscimo de potência nas máquinas não-críticas? A primeira questão é respondida calculando-se a margem negativa

correspondente e determinando-se o montante de potência mecânica do OMIB necessário para cancelá-la. Para o sistema multi-máquina, decrescer a potência do OMIB significa reduzir a potência mecânica das máquinas críticas e/ou aumentar a potência das máquinas não-críticas (4,5). A segunda questão pode ser respondida de várias maneiras, dependendo do objetivo desejado (1,4).

3.0 MÉTODO MAT

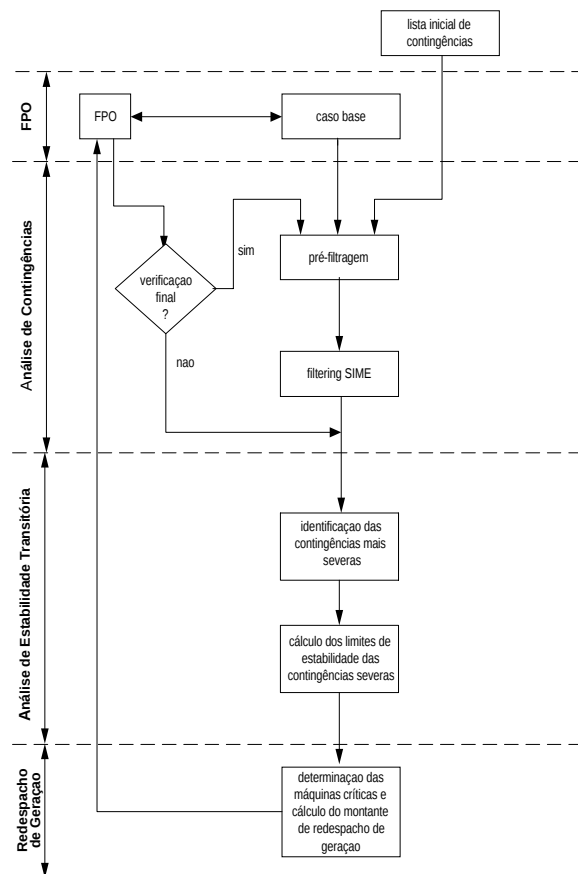
3.1 Definição do problema

O principal objetivo do MAT consiste em obter-se uma solução aceitável para o seguinte problema: “Dentro dos requisitos de tempo exigidos para a operação de sistemas elétricos em tempo real, alocar geração entre suas máquinas de modo a maximizar a transferência de potência ativa entre áreas considerando-se as restrições de estabilidade transitória” (1,2,3).

Este problema de grande porte pode ser dividido nos seguintes sub-problemas (1,2,3):

- determinar a máxima potência que pode ser transferida entre as áreas de exportação e importação sob condições pré-falta normais (condição N);
- analisar uma lista inicial de contingências que eventualmente possam causar problemas de estabilidade transitória;
- para um determinado tempo de eliminação de defeito (CT), selecionar as contingências severas ou potencialmente severas;
- monitorar as contingências cujo CCT é menor do que o CT adotado (contingências instáveis), calcular suas margens de estabilidade respectivas e identificar as correspondentes máquinas críticas;
- adotar ações de controle (no caso, redespacho de geração) de modo a estabilizar simultaneamente todas as contingências instáveis.

Para resolver os subproblemas acima de uma maneira integrada e robusta, MAT utiliza o método SIME como ferramenta de análise da estabilidade transitória junto com um programa de fluxo de potência ótimo (FPO). A Figura 1 ilustra a organização estrutural do método.



3.2 Etapas do método MAT

3.2.1 Especificação do caso base

Um FPO determina o caso base maximizando a transferência de potência ativa entre as áreas de exportação e importação, assim como satisfazendo todas as restrições operativas na configuração pré-falta (limites de geração ativa e reativa, tensões de barras, capacidades térmicas de linhas e transformadores, taps de transformadores, etc.) (1,3).

3.2.2 Classificação e filtragem de contingências

As contingências que são instáveis para um dado CT são identificadas nesta etapa do processo iterativo. Seu grau de severidade, em termos da sua margem de estabilidade, é determinado por SIME (1,2,5).

3.2.3 Ações de controle adotadas por MAT

A estratégia adotada por MAT é a estabilização simultânea de todas as contingências instáveis mediante o uso de ações de controle do tipo redespacho de geração. Isso é efetuado pela redução de geração das máquinas críticas e pelo correspondente aumento de geração das máquinas não-críticas, de modo a compensar aquele decréscimo (1,2,3).

FIGURA 1 – Organização estrutural do método MAT

3.2.3.1 Ação de controle nas máquinas críticas

Passo 1: Para uma dada contingência instável, calcule a redução de geração do grupo de máquinas críticas como indicado na referência (4). Se este grupo contém uma única máquina crítica, imponha este decréscimo naquela máquina crítica. Se este grupo contém várias máquinas críticas, distribua o montante de decréscimo de geração proporcionalmente ao produto $M_k * g_k$, onde M_k é o coeficiente de inércia e g_k é o “gap” da k -ésima máquina crítica (o “gap” é o desvio angular da máquina k em relação ao mais avançado dos demais grupos críticos).

Passo 2: Proceda da maneira acima relatada para todas as contingências instáveis.

Passo 3: Para cada máquina crítica, escolha o decréscimo de geração como sendo o máximo entre os valores calculados nos passos acima.

3.2.3.2 Ação de controle nas máquinas não-críticas

O decréscimo total de geração efetuado nas máquinas críticas é compensado por um igual acréscimo de geração nas máquinas não-críticas, de acordo com os valores fornecidos pelo FPO. Os limites de geração das máquinas críticas são agora bloqueados por imposição das restrições de estabilidade transitória (1,3). Este é o ponto de acoplamento entre o programa SIME (que identifica as restrições de estabilidade transitória) e o programa FPO (que impõe as restrições estáticas em regime permanente).

4.0 RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 Descrição geral das simulações

Sistema teste. O sistema Sul-Sudeste do Brasil (ano de 1998, regime de carga pesada com 33.300 MW) é aqui modelado com 16 áreas operacionais, 1185 barras (tensão entre 138 e 765 kV), 1391 linhas, 599 transformadores e 56 geradores.

Caso base. O objetivo principal é a maximização da transferência de potência ativa entre as regiões Sudeste e Sul. O programa FLUPOT determina que a máxima transferência de potência em regime permanente é de 3545 MW.

Modelagem do sistema elétrico. Na fase de pré-filtragem das contingências, o modelo clássico (denotado SM) é adotado. Nas fases restantes, é empregado o modelo detalhado (denotado DM), onde todos os geradores são representados com modelo

completo (modelo IV-IEEE), assim como seus respectivos controles adicionais (reguladores de tensão em 46 unidades, estabilizadores (PSS) em 8 unidades e reguladores de potência mecânica em 8 unidades térmicas). Ambas modelagens adotam a representação de carga como impedância constante. O tempo máximo de integração é de 1 s (para SM) e 4 s (para DM). O CT é especificado em 167 ms (10 ciclos).

Lista de contingências. As contingências consideradas são do tipo curto-circuito trifásico sólido (3ΦSC) aplicados numa determinada barra, seguido pela abertura de uma linha de transmissão ou transformador adjacente à barra sob defeito. A lista inicial de contingências sob análise é composta por 850 contingências aplicadas sobre barras com tensão igual ou superior a 230 kV.

Programas computacionais usados. As simulações numéricas foram efetuadas com o programa ST600 da Hydro-Québec. O programa FLUPOT do Cepel foi utilizado nas etapas que necessitam de um FPO.

4.2 Filtragem e classificação das contingências

De modo a reduzir-se o conjunto completo de contingências para uma análise mais detalhada (contingências severas ou potencialmente severas), é utilizado um esquema de filtragem de contingências baseado no “Filtering SIME” e “SIME completo”. No esquema proposto na Figura 2, as contingências são classificadas em função do valor de CCT calculado por SIME: não severa (se CCT > 250 ms para SM), potencialmente severa (se CCT < 180 ms para DM) e severa (se CCT ≤ 167 ms para DM). Como pode ser observado na Figura 2, das 850 contingências da lista inicial, a primeira e segunda etapas do esquema de filtragem eliminam respectivamente 800 (94,1%) e 32 (3,8%) contingências. Assim, apenas 18 contingências potencialmente severas (2,1%) são analisadas em detalhes por SIME, o qual acaba identificando apenas 6 contingências instáveis (0,7%) para o CT e caso base adotados. Em outras palavras, a transferência de potência ativa entre as regiões Sudeste e Sul é aqui limitada pelas restrições de estabilidade transitória relativas à apenas 6 contingências instáveis.

4.3 Descrição do processo iterativo do MAT

4.3.1 Estabilização simultânea das contingências

Os resultados do processo iterativo de estabilização simultânea das 6 contingências instáveis detectadas por MAT são ilustrados na Tabela 1, a qual contém as seguintes informações: número da contingência (coluna 1); margem de estabilidade normalizada

(coluna 2); tipo de instabilidade* (coluna 3); montante necessário de redespacho de geração no grupo de máquinas críticas para anular a margem de estabilidade negativa (coluna 4); e identificação do conjunto de máquinas críticas (CM) ordenadas em ordem decrescente de severidade e a respectiva distribuição proporcional da potência mecânica entre todas as máquinas do grupo crítico (coluna 6).

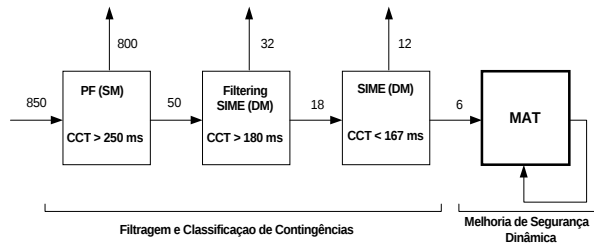


FIGURA 2 - Esquema de filtragem de contingências

Caso base. Como pode ser visto na Tabela 1, 13 máquinas compõem o conjunto de máquinas críticas. Para cada contingência instável do tipo “first-swing”, o esquema de compensação baseado no SIME fornece uma primeira estimativa do montante de geração a ser reduzido nas máquinas críticas das contingências 112, 140, 239 e 263. Para as contingências 159 e 167 (onde esse esquema de compensação não pode ser usado), um montante de 10% da geração atual de cada máquina é considerado numa primeira aproximação. Por se tratar de uma instabilidade do tipo “back-swing” (perda de sincronismo por desaceleração da máquina), a máquina correspondente à contingência 159 (máquina térmica 2706) tem sua geração aumentada por MAT em 16 MW. Note também que a contingência 167 refere-se a um caso de instabilidade “multi-swing” (segunda “swing”), onde MAT faz uma redução de 139 MW na geração da máquina 21.

Para efetuar-se a estabilização simultânea de todas as contingências instáveis, a mudança de geração em cada máquina crítica é escolhida como sendo o maior valor dentre todos aqueles calculados nas contingências onde essa máquina compõe o grupo crítico. Este valor é indicado em negrito na Tabela 1, totalizando um redespacho de 911 MW no caso base. A partir da próxima iteração, MAT monitorará unicamente as contingências que contêm as máquinas críticas mais severamente perturbadas.

* Os diferentes tipos de oscilações causadas por contingências instáveis e tratados por MAT são aqui representados da seguinte maneira: “forward” (sinal +), “backward” (sinal -), “first-swing” (número 1) e “multi-swing” (número de “swings”).

1ª Iteração. Para compensar a redução de 911 MW de geração nas máquinas críticas, o programa FPO realoca o mesmo incremento de geração nas máquinas não-críticas de maneira a maximizar a transferência de potência entre as áreas de exportação e importação.

O novo ponto de operação fornecido pelo FPO, SIME indica a estabilização de todas as contingências após o primeiro redespacho de geração. Após o cálculo das margens de estabilidade (agora todas estáveis), uma interpolação linear é efetuada com as margens relativas ao caso base e a 1ª iteração. Somente a mudança de geração calculada para a contingência 167 não satisfaz os requisitos de precisão para a convergência do processo iterativo (estabilização de todas as contingências instáveis e mudança de geração menor do que 5% da capacidade máxima de geração de cada máquina crítica). Assim um aumento de geração de 134 MW é efetuado na máquina 21 e o FPO realoca esse mesmo montante nas máquinas não-críticas.

TABELA 1 – Estabilização iterativa das contingências

1	2	3	4	5
Caso Base				
Caso	Margem (rad/s ²)	Tipo	ΔP_{total} (MW)	CM(s) [ΔP_c (MW)]
112	-2.99	+1	-252	16 (-252)
140	-2.46	+1	-185	16 (-185)
159	-82.31	-3	+16	2706 (+16)
167	-0.33	+2	-139	21 (-139)
239	-3.49	+1	-297	181 (-115) 184 (-22) 182 (-46) 292 (-7) 187 (-55) 186 (-15) 179 (-24) 291 (-2) 290 (-6) 293 (-5)
263	-9.30	+1	-333	187 (-215) 186 (-55) 179 (-63)
1ª Iteração				
112	1.49	–	+84	16 (+84)
159	37.79	–	-5	2706 (-5)
167	9.76	–	+134	21 (+134)
239	3.01	–	+248	181(+97) 184(+18) 182 (+38) 292 (+6) 187 (+46) 186 (+13) 179 (+20) 291 (+1) 290 (+5) 293 (+4)
263	1.53	+1	+47	187 (+30) 186 (+8) 179 (+9)
2ª Iteração				
167	5.84	–	+4	21 (+4)
3ª Iteração				
140	-3.14	-3	+9	2101 (+9)
4ª Iteração				
140	5.46	–	-5	2101 (-5)

2ª Iteração. Com o novo ponto de operação definido, MAT determina uma nova margem estável para a contingência 167, indicando um incremento de 4 MW na geração na máquina 21. Desde que todos os critérios de convergência estão agora satisfeitos, MAT finaliza o processo iterativo de estabilização das contingências.

Verificação final 1. Uma verificação final sobre toda a lista inicial de contingências, como aquela descrita no item 4.2, é feita para garantir que o redespacho de geração indicado por MAT não ocasiona o aparecimento de novas contingências instáveis. O esquema de filtragem indica que o mecanismo de instabilidade da contingência 140 é agora do tipo “back-swing” (terceira “swing”) e ocorre sobre uma nova máquina crítica (máquina 2101). Assim, MAT reinicia o processo iterativo de redespacho de geração.

3ª Iteração. Como o esquema de compensação proposto em (4) não é aqui novamente aplicável na estimativa de um montante de geração, um acréscimo (por se tratar de instabilidade “back-swing”) de 10% da geração atual da máquina 2101 (9 MW) é adotado na estabilização da contingência 140.

4ª Iteração. Para o novo ponto de operação fornecido pelo FPO, SIME determina agora uma margem estável e MAT detecta a convergência do processo iterativo.

Verificação final 2. Uma nova verificação é feita sobre a lista inicial de contingências, de modo a comprovar a inexistência de contingências instáveis.

4.3.2 Limites máximos de transferência de potência

A Tabela 2 resume as mudanças ocorridas na transferência de potência entre as regiões Sudeste e Sul. Note que houve uma redução de fluxo pelas linhas de 765 e 138 kV e um respectivo aumento pelas linhas de 230 kV. Isso é decorrente do redespacho de geração adotado que possibilitou remover todas as restrições de estabilidade transitória com uma pequena redução de 77 MW (2,17%) na transferência de potência.

TABELA 2 – Limites de transferência de potência

1	2	3	4	5
Caso	Limites de Transferência de Potência (MW)			
	765 kV	230 kV	138 kV	Total
Base	2368	466	711	3545
Final	2184	610	674	3468

4.3.3 Tempo computacional

Desde que os cálculos efetuados por SIME são desprezíveis se comparados àqueles efetuados pelo programa ST600, o tempo de processamento requerido

por MAT é basicamente aquele referente às simulações numéricas. Nas simulações numéricas acima, o tempo de CPU foi de 74 minutos numa estação de trabalho SUN ULTRAPARC-II de 300 MHz.

5.0 CONCLUSÕES

O artigo ilustra o uso do método MAT na maximização de transferências de potência com restrições de estabilidade transitória. Através do acoplamento dos programas SIME com um FPO, MAT identifica as máquinas críticas e não-críticas para um conjunto de contingências instáveis e realoca a geração entre elas. Isto é efetuado reduzindo-se a geração nas máquinas críticas (de modo a satisfazer as restrições de estabilidade transitória) e aumentando-se a geração nas máquinas não-críticas (de modo a maximizar a transferência de potência entre áreas). O bom desempenho do método MAT é verificado nas simulações sobre o sistema Sul-Sudeste do Brasil.

Para finalizar, destaca-se que o tempo computacional do método MAT pode ser reduzido com o uso de processamento distribuído (principalmente nas fases de filtragem e classificação de contingências). Esse trabalho, assim como o acoplamento do MAT a outros programas de simulação numérica (como o ANATEM e MICRODIN), encontra-se atualmente em andamento.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) BETTIOL, A. L. Maximum power transfers in transient stability-constrained power systems: application to a Brazilian power network; Tese de Doctorat en Sciences Appliquées; Université de Liège (Bélgica). Julho, 1999.
- (2) BETTIOL, A.L., WEHENKEL, L., PAVELLA, M. Transient stability-constrained maximum allowable transfer; IEEE Transactions on Power Systems; New York (EUA). Maio, 1999, pg. 654-659.
- (3) BETTIOL, A.L et alli. Transient stability-constrained optimal power flow; IEEE Budapest PowerTech; Budapeste (Hungria). Agosto, 1999.
- (4) ERNST, D. et alli. Compensation schemes for transient stability assessment and control; Proceedings of the LESCOPE '98; Halifax (Canadá). Junho, 1998, pg. 225-230.
- (5) ZHANG, Y. et alli. SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection; Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19; Londres (UK), 1997, pg. 195-208.