



VIII SEPOE

19 a 23 de Maio de 2002
May - 19st to 23th - 2000
BRASÍLIA (DF) - BRASIL

VIII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA

VIII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING

MODELAGEM DE CHAVEAMENTO AUTOMÁTICO DE BANCOS DE CAPACITORES/RETORES PARA ESTUDOS COM FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

João A. Passos F^o
FCTJF – COPPE/UFRJ

Nelson Martins¹
CEPEL

Júlio C. R. Ferraz
COPPE/UFRJ – CEPEL

Djalma M. Falcão
COPPE/UFRJ

Hermínio J. C. P. Pinto
CEPEL

Sumário

Este artigo apresenta uma metodologia para representação do chaveamento automático de bancos de capacitores/retores na formulação de fluxo de potência continuado. Para solução deste problema, é necessário aumentar o sistema de equações para incluir a representação a ação de controle de um determinado dispositivo e a correspondente variável de controle. O fluxo de potência continuado ilustra a influência da representação do acionamento automático dos bancos de capacitores/retores na margem de carregamento. São apresentados resultados para um sistema teste de duas barras e para uma configuração do Sistema Interligado Brasileiro, mostrando a efetividade e a robustez da formulação proposta.

Palavras-Chave: Chaveamento Automático de Bancos de Capacitores/Reatores, Fluxo de Potência Continuado, Estabilidade de Tensão.

1. Introdução

A necessidade de desenvolvimento de ferramentas que facilitem as condições de análise de sistemas elétricos de potência acompanha o crescente aumento da sua complexidade. As dificuldades de operação têm aumentado nos últimos anos em função tanto da complexidade quanto de restrições econômicas. Problemas relacionados com a incapacidade do sistema em manter as tensões nas barras em níveis seguros de operação após um distúrbio, tornaram-se mais

freqüentes [1, 3]. Além da estabilidade angular, deve ser verificada a estabilidade de tensão do sistema [7].

A compensação de potência reativa é uma das maneiras mais efetivas de se melhorar a capacidade de transmissão e a estabilidade de tensão de um sistema. Desta forma, pode-se constatar a necessidade do desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de representar adequadamente os principais equipamentos presentes no sistema, simulando sua operação o mais próximo possível da realidade.

Capacitores e reatores *shunt* (ou em derivação) são permanentemente conectados à rede ou ligados e desligados de acordo com as condições de operação do sistema. O principal objetivo deste trabalho é a representação desta metodologia de controle no problema de fluxo de potência, bem como seu impacto na determinação da margem de carregamento do sistema.

A potência reativa fornecida por bancos de capacitores/reatores é função do quadrado da tensão terminal do equipamento, variando durante a operação do sistema. Assim, a potência nominal do elemento é usada para obter-se a sua susceptância, sendo este um valor constante.

Uma característica importante deste tipo de equipamento é a elevada influência existente entre dois ou mais bancos de capacitores/reatores quando eles operam em barras eletricamente próximas. Isto faz com que a entrada (ou saída) de operação de um desses

¹ CEPEL - Caixa Postal 68007 - Rio de Janeiro - RJ - 21944-970 - BRASIL (nelson@cepel.br)

dispositivos influa significativamente na condição dos demais. Por este motivo, o método de controle feito por ajustes alternados [2] não funciona adequadamente, uma vez que existe uma grande sensibilidade das variáveis de controle em relação ao estado do sistema. Como consequência, o número de iterações torna-se elevado e em condições extremas o processo iterativo não converge.

A proposta deste trabalho é representar o chaveamento automático de compensação *shunt* variável através da inclusão de uma equação de controle adicional à matriz Jacobiana. A susceptância *shunt* é considerada uma nova variável de estado. Esta metodologia já se mostrou eficaz em problemas com características semelhantes [4, 5].

2. Notação

n :	Número de barras do sistema
$P_k^{calc} + jQ_k^{calc}$:	Potência aparente calculada na barra k
$P_k^{sch} + jQ_k^{sch}$:	Potência aparente especificada na barra k
$G_{km} + jB_{km}$:	(k,m) ésimo elemento da matriz de admitância nodal
$\Delta P_k + j\Delta Q_k$:	Varição de potência aparente na barra k
Φ_k :	Conjunto de barras diretamente conectadas a barra k
$V_k \angle \theta_k$:	Tensão na barra k em coordenadas polares
x :	Variável de controle
y_i^{sch} :	Valor especificado da variável controlada y_i
y_i^{calc} :	Valor calculado da variável controlada y_i
V_m^{sch} :	Valor especificado da tensão controlada na barra m
ΔV_m :	Erro da tensão controlada na barra m
Δb_k^{sh} :	Susceptância <i>shunt</i> na barra k
h :	Número da iteração

3. Representação Flexível dos Controles no Fluxo de Potência

Uma representação flexível dos controles no fluxo de potência é obtida acrescentando-se ao sistema original equações que descrevem a ação de cada controle e a variável controlada associada [4, 5, 8]. Este sistema de equações aumentado fornece a matriz Jacobiana descrita em (1).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para uma barra genérica k ,

$$\Delta P_k = P_k^{sch} - P_k^{calc} \quad (2)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{sch} - Q_k^{calc} \quad (3)$$

$$P_k^{calc} = V_k \sum_{m \in \phi_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

$$Q_k^{calc} = V_k \sum_{m \in \phi_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5)$$

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (6)$$

$$y = f(\theta, V, x) \quad (7)$$

$$\Delta y = y^{sch} - y^{calc} \quad (8)$$

4. Modelo Matemático

Para a representação do elemento *shunt* chaveável no problema de fluxo de potência, considera-se sua susceptância como uma variável de estado adicional ao problema. Para tornar o sistema de equações possível e determinado, insere-se uma nova equação relativa ao controle de tensão.

Para uma barra m cuja tensão deve ser controlada através do chaveamento de dispositivos *shunt* localizados na barra k , tem-se a seguinte equação de controle:

$$V_m - V_m^{sch} = 0 \quad (9)$$

É importante destacar que neste tipo de dispositivo o controle de tensão é feito através de uma faixa de tensão e não de um valor fixo. Desta forma, a estrutura de controle somente fará parte do processo de solução quando o valor atual da tensão controlada estiver fora de sua região de controle. Neste caso, o valor especificado é considerado como sendo o valor médio da faixa de controle de tensão. Caso contrário, a estrutura do controle é retirada da solução. Esta avaliação é feita a cada iteração do método de Newton-Raphson.

A variável de controle é a susceptância *shunt* na barra k :

$$x = b_k^{sh} \quad (10)$$

O erro da equação (9) é dado por:

$$\Delta y = \Delta V'_m = V_m^{sch} - V_m \quad (11)$$

A convergência do algoritmo é obtida quando o erro, dado pela equação (11), torna-se menor que uma determinada tolerância. A forma genérica do sistema a ser resolvido a cada iteração do algoritmo de Newton-Raphson é mostrado em (12).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta V'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{kk} & N_{kk} & \cdots & H_{km} & N_{km} & \cdots & 0 \\ \cdots & J_{kk} & L_{kk} & \cdots & J_{km} & L_{km} & \cdots & -V_k^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{mk} & N_{mk} & \cdots & H_{mm} & N_{mm} & \cdots & 0 \\ \cdots & J_{mk} & L_{mk} & \cdots & J_{mm} & L_{mm} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta \theta_k^{sh} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A variável de estado acrescida ao sistema original é atualizada, numa iteração genérica ($h+1$), da forma descrita em (14).

$$b_k^{sh(h+1)} = b_k^{sh(h)} + \Delta b_k^{sh(h)} \quad (14)$$

É importante ressaltar que a variação do valor do *shunt* se faz de forma discreta em equipamentos reais, através da utilização de bancos de capacitores ou reatores de valores fixos. Como no modelo matemático a variação é contínua, após a convergência do processo iterativo, há necessidade de se ajustar o tamanho do banco para o valor discreto mais próximo. Em seguida, retoma-se o processo de solução do fluxo de potência. Este procedimento pode resultar em valores finais de tensão na barra controlada ligeiramente fora da faixa especificada, mas com resultados satisfatórios. A tolerância de tensão adotada no critério de convergência para as equações de controle pode absorver estes desvios de valores.

5. Exemplo Tutorial

A formulação descrita anteriormente é ilustrada nesta seção através de um sistema tutorial apresentado na Figura 1. A tensão na barra 2 é controlada pelo capacitor instalado na barra 4.

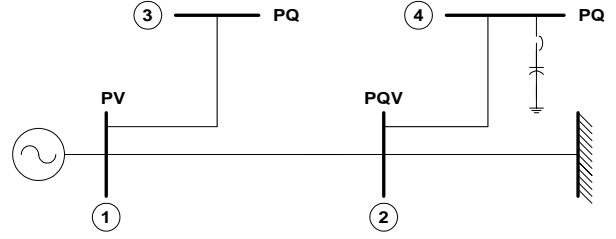


Figura 1 – Sistema exemplo.

O sistema de equações a ser resolvido a cada iteração do algoritmo de Newton-Raphson é dado por (15).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \\ 0 \\ \Delta V'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & 0 & 0 & H_{24} & N_{24} & 0 & 0 \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & 0 & 0 & J_{24} & L_{24} & 0 & 0 \\ H_{31} & N_{31} & 0 & 0 & H_{33} & N_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & L_{31} & 0 & 0 & J_{33} & L_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{42} & N_{42} & 0 & 0 & H_{44} & N_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{42} & L_{42} & 0 & 0 & J_{44} & L_{44} & 0 & L_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ 0 \\ \Delta \theta_4^{sh} \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde,

$$L_{52} = \frac{\partial(V_2 - V_2^{esp})}{\partial V_2} = \frac{\partial V_2}{\partial V_2} = 1,0 \quad (16)$$

$$L_{44} = \frac{\partial Q_4}{\partial b_4^{sh}} = -V_4^2 \quad (17)$$

$$\Delta V'_2 = V_2^{esp} - V_2 \quad (18)$$

A susceptância na barra 4, numa iteração genérica ($h+1$), é dada por:

$$b_4^{sh(h+1)} = b_4^{sh(h)} + \Delta b_4^{sh(h)} \quad (19)$$

6. Resultados

A seguir são apresentados os resultados da metodologia descrita nas seções anteriores para dois sistemas: um de 2 barras e outro de grande porte.

6.1. Sistema de 2 Barras

O sistema mostrado na Figura 2 é constituído por uma barra infinita e uma barra de carga. Nesta barra são instalados seis bancos de capacitores (20 Mvar cada), usados para controlar a sua tensão terminal [3].

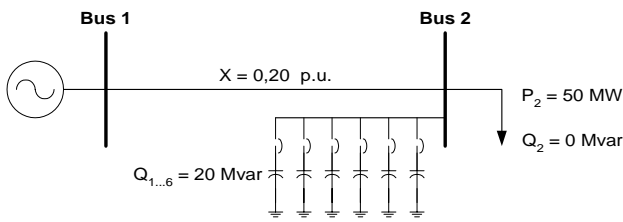


Figura 2 – Sistema teste.

Foi analisada, utilizando fluxo de potência continuado [6], a influência dos bancos de capacitores com chaveamento automático na margem de carregamento do sistema.

Para melhor apresentação dos resultados, as simulações foram divididas em: (i) Sistema sem bancos de capacitores; (ii) Sistema com todos os bancos de capacitores ativados (totalizando 120 Mvar); (iii) Sistema com o chaveamento dos bancos em valores não fixados até o valor total máximo de 120 Mvar levando-se em consideração a faixa de controle da tensão na barra 2 (0,95 a 1,05 pu); (iv) Sistema com o chaveamento dos bancos de 20 Mvar até o valor máximo de 120 Mvar (um por vez), também observando a faixa de controle.

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 3. É possível verificar que todas as simulações feitas com compensação obtiveram a mesma margem de carregamento. Nestes casos, os resultados mostram-se consideravelmente superiores àquele obtido com a simulação do sistema sem nenhuma compensação.

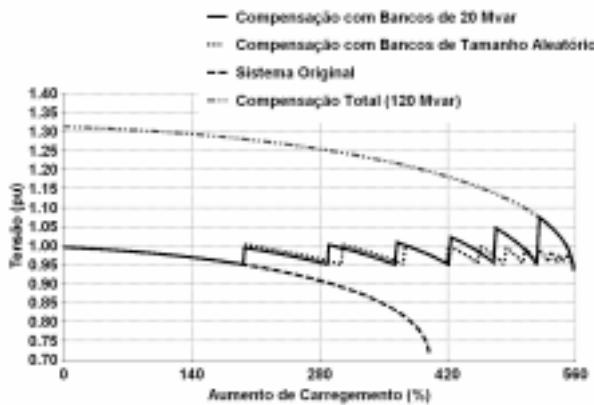


Figura 3 – Perfil de tensão da barra 2.

Também é possível observar Figura 3, que no decorrer da simulação com chaveamento feito através de bancos de capacitores de tamanho variável, a tensão da barra 2 fica rigorosamente dentro da faixa de controle.

No caso do chaveamento feito através dos bancos fixos de 20 Mvar, a tensão da barra 2 apresenta valores ligeiramente fora da faixa quando o sistema se aproxima do máximo ponto de carregamento. Isto acontece pelo fato dos valores serem fixos (20 Mvar) e torna-se mais evidente com a proximidade do ponto de carregamento máximo (onde a sensibilidade da tensão em relação à injeção de potência reativa é maior).

O chaveamento feito através de bancos com tamanhos pré-definidos apresenta seis picos de tensão: correspondente à ativação de cada um dos seis bancos de capacitores. Isto é feito de acordo com o comportamento da tensão durante a execução do fluxo de potência continuado.

É importante destacar a robustez numérica apresentada pelo método, constatado pela obtenção do mesmo ponto de máximo carregamento em todos os casos, não apresentando problemas de convergência durante o processo de incremento de carga.

Tabela 1 – Margem de carregamento.

<i>Estratégia</i>	<i>Margem de Carregamento</i>
Sistema Original	400 % (200 MW)
Compensação com Bancos de Tamanho Aleatório	558 % (279 MW)
Compensação com Bancos de Tamanho Pré-Definidos (6 x 20 Mvar)	558 % (279 MW)
Compensação Total (120 Mvar)	558 % (279 MW)

6.2. Sistema de Grande Porte

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para uma configuração do Sistema Interligado Brasileiro (carga leve, ano 2001) descrita na Tabela 2. Utilizando o fluxo de potência continuado, foi aumentada a carga das barras da área Rio (LIGHT, CERJ e ESCELSA). A topologia simplificada desta parte do sistema é mostrada na Figura 4.

Tabela 2 – Dados do sistema.

Barras	2849
Circuitos	4096
Barras com Tensão Controlada	252
Transformadores	1463
Carregamento Total	34 730 MW
Área Rio	4 565 MW (1 292 Mvar)

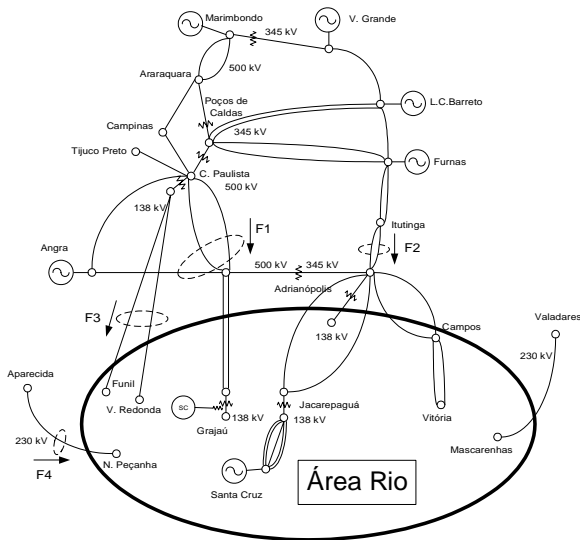


Figura 4 – Diagrama simplificado da Área Rio.

Parte detalhada de uma das regiões críticas da Área Rio é mostrada na Figura 5. As barras escolhidas para o controle de tensão são “CAMPOS-345” e “VITORIA-345” (ambas de 345 kV). Os bancos de capacitores instalados nas barras “CAMP-CAP 345” e “VITORIA-138” são chaveados automaticamente de forma a manter dentro a faixa especificada, as tensões nas barras de 345 kV. A descrição dos bancos de capacitores utilizados é mostrada na Tabela 3. Foram adotados os valores de 0,95 e 1,05 pu, respectivamente, para limite inferior e superior da tensão nas barras controladas.

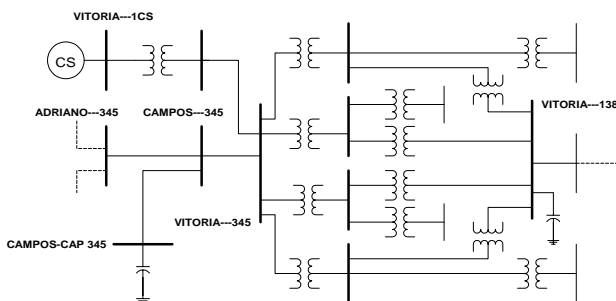


Figura 5 – Topologia da região de controle.

Tabela 3 – Dados do controle de tensão.

<i>Barra com Tensão Controlada</i>	CAMPOS-345	VITORIA-345
<i>Barra com Bancos de Capacitores</i>	CAMP-CAP 345	VITORIA-138
<i>Número de Bancos</i>	2	9
<i>Tamanho de Cada Banco</i>	60 Mvar	10 Mvar

De forma semelhante a seção anterior, as simulações foram feitas de três formas distintas: (i) Todos os bancos fora de operação; (ii) Todos os bancos em

operação; (iii) Chaveamento automático dos bancos de capacitores (determinada pela formulação proposta).

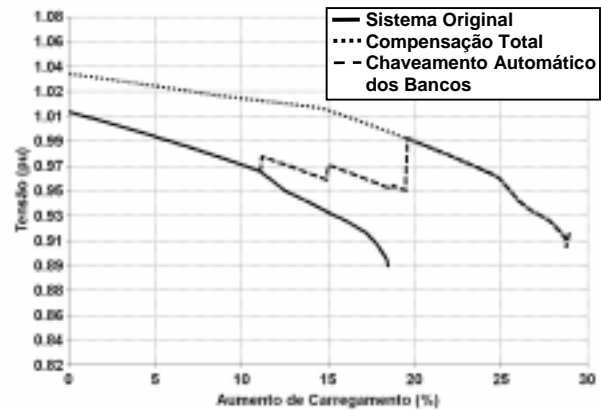


Figura 6 – Perfil de tensão da “CAMPOS-345”.

A Figura 6 mostra o perfil de tensão da barra “CAMPOS-345” para as três situações descritas. O ganho na margem de carregamento das simulações com o chaveamento automático (ou com toda a compensação ativa) em relação ao sistema sem compensação é de aproximadamente 57 %. Isto é, a margem de carregamento aumenta de 840 MW para 1320 MW (Tabela 4). No caso da simulação feita através do chaveamento automático todos os bancos de capacitores foram utilizados durante a simulação, levando o sistema ao mesmo ponto de máximo carregamento final.

Tabela 4 – Margem de carregamento da Área Rio.

<i>Estratégia</i>	<i>Margem de Carregamento</i>
Sistema Original	18,46 % (843 MW)
Compensação com Bancos de Tamanho Pré-Definidos	28,96 % (1322 MW)
Compensação Total	28,77 % (1 314 MW)

A Figura 7 mostra o perfil de tensão da barra “VITORIA-345”. Há melhoria no comportamento tensão no decorrer da simulação, quando o chaveamento dos capacitores é feito de forma automática.

No caso onde não há compensação no sistema, o limite inferior da faixa de tensão é rapidamente atingida quando há aumento de 12 % (550 MW) no carregamento (Figura 7). Por outro lado, quando o chaveamento dos bancos é automático, a tensão é mantida dentro da faixa de controle até que haja um aumento de 25 % (1140 MW) no carregamento (Figura 7). Quando o carregamento está 19 % (870 MW) acima do inicial, é feita a inserção automática dos últimos bancos de capacitores disponíveis.

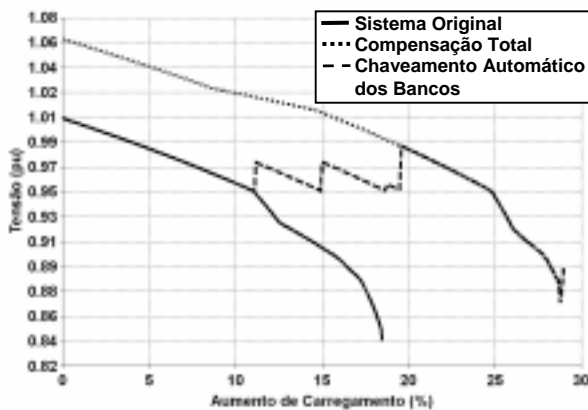


Figura 7 – Perfil de tensão da barra “VITORIA-345”.

A Figura 7 mostra ainda que quando toda a compensação reativa disponível é acionada desde o ponto de operação inicial, há violação no limite superior de tensão.

A Figura 8 mostra os perfis de tensão das barras “CAMPOS-345” e “VITORIA-345”. Podem ser verificadas a atuação dos controles e a influência do chaveamento dos bancos no perfil de tensão das barras.

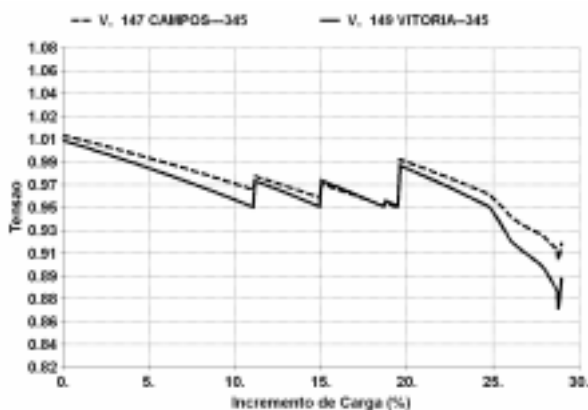


Figura 8 – Perfis de tensão das barras “CAMPOS-345” e “VITORIA-345”.

7. Conclusões

Este artigo apresenta a descrição do modelo e a implementação do chaveamento automático de bancos de capacitores/reatores num programa de fluxo de potência continuado.

A formulação utiliza um sistema de equações lineares aumentado, a fim de representar as relações entre a ação de controle e as variáveis controladas. A estrutura da matriz Jacobiana do fluxo de potência é preservada. Um sistema tutorial é utilizado para ilustrar os conceitos envolvidos na formulação.

A implementação foi avaliada em um sistema de grande porte: uma configuração do Sistema Interligado Brasileiro com 2900 barras. A utilização de bancos com chaveamento automático apresenta vantagens para estudos com fluxo de potência continuado:

representação mais realista do sistema e melhor regulação de tensão.

Referências

- [1] **Alvarado, F. L.**, 1994a, “Voltage Stability, Bifurcation Parameters and Continuation Methods”, In: *Proceedings of the IV SEPOPE*, IP 27, Foz do Iguaçu, Brasil, May.
- [2] **A. J. Monticelli**, Power System Load Flow, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983. (in Portuguese)
- [3] **C. W. Taylor**, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [4] **H. J. C. P. Pinto, J. L. R. Pereira, N. Martins, J. A. Passos Filho, S. G. Junior, F. R. M. Alves, J. C. R. Ferraz, R. M. Henriques and V. M. Costa**, “Needs and Improvements in Power Flow Analysis”, *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, PR, May 2000.
- [5] **J. A. Passos Filho, J. L. R. Pereira, V. M. Da Costa**, “Controle Secundário de tensão em Regime Permanente Usando o Método de Newton Raphson”, *XIII CBA*, setembro de 2000 – Florianópolis – SC.
- [6] **J. C. R. Ferraz, N. Martins, H. J. C. P. Pinto and D. Falcão**, “Continuation Power Flow and Modal Analysis for Assessing and Enhancing Voltage Stability in Large Scale Power System”, *Proceedings of the VII SEPOPE*, Curitiba, PR, May 2000.
- [7] **P. Kundur**, *Power System Control and Stability*, EPRI-Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [8] **V. M. da Costa, N. Martins and J. L. R. Pereira**, “Representation of user defined Controls in the Power Flow Problem”, *Proceedings of VI SEPOPE*, Salvador, BA, Brazil, May 1998. (in Portuguese)