



IX SEPOPE

23 a 27 de maio de 2004
May, 23th to 27th – 2004
Rio de Janeiro (RJ) – Brasil

**IX SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO
DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA**

**IX SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC
OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING**

SP-048

Influência da Representação de Motores de Indução e de Dispositivos de Controle Automáticos e Discretos em Estudos de Segurança de Tensão

LUIZ CLÁUDIO DE A. FERREIRA¹
ONS

RICARDO M. HENRIQUES²
CEPEL

JOÃO A. PASSOS FILHO³
CEPEL

NELSON MARTINS
CEPEL

DIALMA M. FALCÃO
UFRJ/COPPE

SUMÁRIO

Este artigo avalia o impacto de uma modelagem mais acurada para a representação dos dispositivos lentos e discretos de controle de tensão e das cargas do tipo motor de indução nos estudos de planejamento, operação e segurança de tensão. Os resultados são mostrados em um sistema de grande porte, através da aplicação da modelagem em uma grande área pertencente ao sistema elétrico interligado brasileiro.

Se a representação incompleta dos recursos discretos de controle de tensão, pode produzir resultados conservativos da margem de carregamento de um sistema, este artigo mostra, por outro lado, o impacto contrário nesta margem, quando da não representação das cargas do tipo motor de indução, além do risco de informações distorcidas com relação à interação entre os dispositivos de controle de tensão.

Keywords: Motores de indução, instabilidade de tensão, curva QV, controle de tensão, fluxo de potência.

1. INTRODUÇÃO

Técnicas de análise estática vêm sendo empregadas nas análises de segurança de tensão, complementando técnicas dinâmicas e sinalizando as condições desta segurança tanto em um ponto de operação conhecido, como também a margem de carregamento do sistema e o seu desempenho em um ponto futuro frente a uma pequena perturbação prevista, como um aumento da carga ou reajuste nos dispositivos de controle deste sistema [1, 2].

Em verões passados, ocorrências de afundamento da tensão na área Rio de Janeiro/Espírito Santo foram verificadas com a carga ativa da área abaixo dos valores críticos estudados e com todos os recursos de controle

de tensão disponíveis. Todavia, durante estes eventos, medições nos principais pontos de interligações com as empresas de distribuição mostraram valores da carga reativa superiores aos esperados. A diferença entre as condições estudadas e as observadas, aumenta para condições de temperatura elevada na área, o que pode ser atribuída a não representação dos motores de indução, presentes principalmente nas cargas de refrigeração.

Os motores de indução são cargas que apresentam alto consumo de potência reativa durante as condições em que há queda de tensão e, portanto, merecem cuidadosa consideração nos estudos de segurança de tensão. Entretanto, a obtenção dos dados deste tipo de carga, para sua correta representação, não é tarefa simples. As dificuldades de acesso aos dados de grandes consumidores industriais e informações imprecisas sobre estas cargas, de âmbito residencial e comercial, apontam para a busca de uma solução satisfatória, de forma a garantir uma resposta coerente nas simulações de crescimento da parcela deste tipo de carga nos estudos de segurança de tensão.

2. MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE NO FLUXO DE POTÊNCIA

Uma representação flexível de dispositivos de controle no fluxo de potência é obtida acrescentando-se, ao sistema original, equações que descrevem a ação de cada controle e a variável controlada associada β . Este sistema de equações aumentado é descrito em (1):

¹ Rua Real Grandeza, 219 Bloco E – Sala 406 – Botafogo – Rio de Janeiro – RJ (lclaudio@ons.org.br)

² Av. Um s/r^o – Cidade Universitária – CEP: 21941-590 – Rio de Janeiro – RJ (rmh@cepel.br)

³ Av. Um s/r^o – Cidade Universitária – CEP: 21941-590 – Rio de Janeiro – RJ (jpPASS@cepel.br)

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

O modelo matemático adotado para representação dos dispositivos de controle, abordados neste trabalho, consiste na adição de uma equação de controle ao sistema de equações original. Desta forma, a nova matriz Jacobiana tem maior dimensão do que a matriz Jacobiana original, conforme mostrado na equação (1).

Para a representação do chaveamento automático da compensação shunt variável, a susceptância do equipamento é considerada uma nova variável de estado [3, 4]. Para o controle de tensão feito através de transformadores do tipo LTC, o tape do transformador é considerado como variável de estado adicional [3].

Considerando uma barra k cuja tensão deve ser controlada através do chaveamento automático de dispositivos shunt localizados na barra m , tem-se [4]:

$$\Delta x = \Delta b_m^{sh} \quad (2)$$

Para o caso do controle de tensão na barra k ser feito através do tape de um transformador, e ainda adotando-se este equipamento conectado entre as barras m e n , a nova variável de estado é [3]:

$$\Delta x = \Delta a_{mn} \quad (3)$$

A equação adicional mostrada em (1) é relativa à barra onde a tensão é controlada, sendo idêntica para ambos os tipos de controle: tape ou shunt chaveado. Logo, tem-se que:

$$\Delta y = V_k^{esp} - V_k \quad (4)$$

onde,

- V_k : Tensão na barra k em coordenadas polares
- x : Variável de controle
- V_k^{esp} : Valor especificado da tensão controlada na barra k
- Δy : Erro da tensão controlada na barra k
- a_{mn} : Tape do transformador conectado entre as barras m e n

É importante destacar que na modelagem adotada, a tensão controlada deve permanecer dentro de uma faixa de operação permitida, e não ser mantida em um valor fixo. Desta forma, a estrutura de controle adicional à matriz Jacobiana, mostrada em (1), somente fará parte do processo de solução quando o valor da tensão controlada estiver fora de sua faixa de operação permitida.

O valor do elemento shunt varia de forma discreta tal como em sistemas reais, onde são chaveados bancos de capacitores/reatores de valores fixos. Como no modelo matemático a variação é feita de forma contínua, após a

convergência do processo iterativo, há necessidade de se ajustar o tamanho do banco para um valor discreto. Este procedimento é feito através de uma análise de sensibilidade de tensão simplificada com o objetivo de preservar o perfil de tensão na barra controlada. Em seguida, retoma-se o processo de solução incluindo-se o valor discreto do banco, sem a representação do controle contínuo do banco *shunt*. Este procedimento pode eventualmente ocasionar valores finais da tensão controlada ligeiramente fora da faixa de operação permitida, mas com resultados ainda bem satisfatórios.

3. MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO EM ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA

A modelagem proposta para representação dos motores de indução inclui a implementação do modelo destas cargas no problema de fluxo de potência, utilizando-se o método de Newton-Raphson, aplicado às equações de potência em coordenadas polares e a implementação de modelos de motor de indução agregados ao programa de fluxo de potência continuado [5].

Um modelo de circuito elétrico amplamente utilizado para representar motores de indução é o que contém 3 barras, como mostrado na Figura 1.

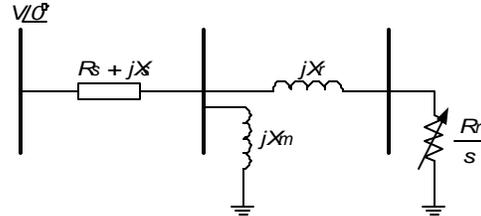


FIGURA 1 – MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PARA REPRESENTAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO

Onde,

- s → escorregamento do rotor
- R_s → resistência do estator
- X_s → reatância de dispersão do estator
- X_m → reatância de magnetização
- X_r → reatância de dispersão do rotor
- R_r → resistência do rotor

Contudo, o modelo de duas barras mostrado na Figura 2 é mais adequado para a implementação em um programa de fluxo de potência [6].

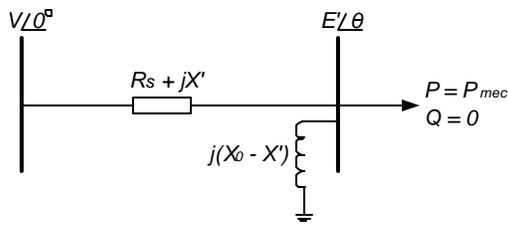


FIGURA 2 – MODELO DE REGIME PERMANENTE DE 2 BARRAS PARA MOTORES DE INDUÇÃO

Onde,

$$P_{mec} \rightarrow \text{Potência Mecânica}$$

$$X_0 = X_s + X_m \rightarrow \text{Reatância de Circuito Aberto}$$

$$X' = X_s + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m} \rightarrow \text{Reatância Transitória}$$

A Figura 3 mostra o circuito equivalente para o motor de indução que considera suas características dinâmicas.

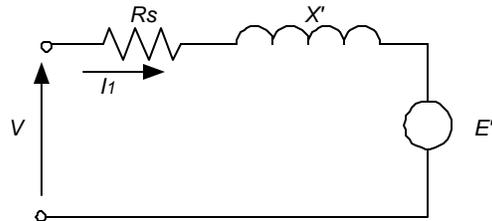


FIGURA 3 – CIRCUITO EQUIVALENTE DINÂMICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Como descrito em [5], o valor em regime permanente para a tensão interna E' é calculado através da corrente I_1 , que flui através dos dois ramos que estão em paralelo na Figura 4: um ramo puramente indutivo; outro, puramente resistivo.

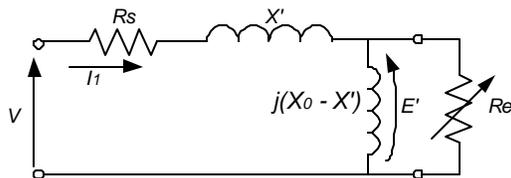


FIGURA 4 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE REGIME PERMANENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO

Os valores para a resistência equivalente do rotor e para P_{mec} (Figura 2) são assim calculados:

$$R_e = \frac{(X_0 - X')}{s w_0 T_0} \quad (5)$$

$$P_{mec} = \frac{(E')^2}{R_e} \quad (6)$$

O modelo de motor com dois nós da Figura 2, pode ser utilizado de forma direta em programas de fluxo de

potência, se a potência mecânica entregue à carga e os parâmetros do motor de indução são considerados independentes da velocidade do rotor [7].

A rede elétrica é aumentada de uma barra PQ ($P = P_{mec}$; $Q = \text{zero}$) para cada motor que é individualmente modelado, com um elemento em derivação adicional acoplado, sendo esta barra PQ conectada à barra terminal do motor via uma impedância adicional $R_s + j \cdot X'$. Portanto, para um sistema com m motores, m barras PQ adicionais serão criadas, juntamente com m ramos em derivação adicionais e outros m ramos série. Uma vez obtida a solução do fluxo de potência, o escorregamento do rotor para cada motor pode ser calculado através das equações (5) e (6).

A Tabela 1 lista os tipos de motor de indução [8, 9, 10] que podem ser utilizados no programa de fluxo de potência continuado.

TABELA 1 – PARÂMETROS TÍPICOS PARA MOTORES DE INDUÇÃO

TIPO DO MOTOR	CARACTERÍSTICAS
1	Industrial Pequeno I
2	Industrial Grande
3	Valor médio de motores de 11 kVA
4	Industrial Pequeno II
5	Comercial + Alimentador
6	Residencial
7	Monofásico

A capacidade MVA de cada motor indica o percentual da carga na barra que será modelada como motor. O programa de fluxo de potência calcula ambos os consumos de potência ativa e reativa do motor de indução. A tensão E' da barra interna e seu ângulo \mathbf{q} , juntamente com o escorregamento s do rotor, são também calculados. O restante da carga original na barra, definidos pelas variáveis P' e Q' na Figura 5, é representado pelo modelo ZIP convencional.

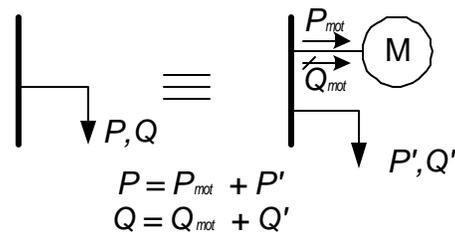


FIGURA 5 – CONDIÇÃO INICIAL DAS BARRAS COM CARGA DO TIPO MOTOR DE INDUÇÃO

Nos estudos feitos com o fluxo de potência continuado, a carga tipo motor de indução é elevada pelo aumento apropriado da base MVA do motor. Através deste artifício, é simulado o aumento do número de motores conectados a uma dada barra ou área do sistema.

4. APLICAÇÃO E METODOLOGIA

O modelo matemático, implementado no programa de análise de redes – ANAREDE, do CEPEL, foi testado na área Rio de Janeiro/Espírito Santo. Esta área foi escolhida para teste por ter seu desempenho fortemente influenciado pela coordenação entre os diversos recursos de controle, internos e externos à área e, ainda devido a sua característica de grande centro de carga, sujeito a temperaturas elevadas nos dias de verão, em que a componente reativa da carga é muito dependente das cargas de refrigeração (Figura 6).

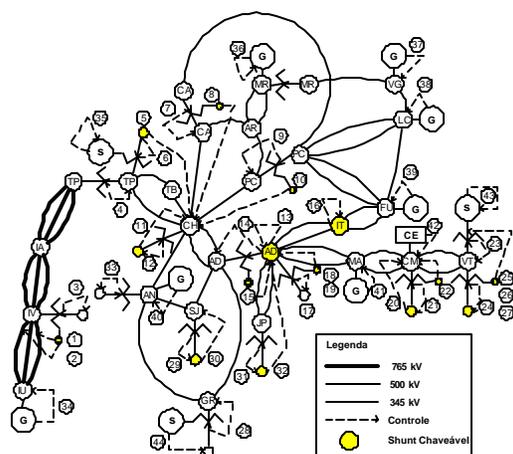


FIGURA 6 – ÁREA RIO DE JANEIRO/ESPÍRITO SANTO

A área Rio de Janeiro/Espírito Santo possui 370 barras. Deste grupo, 273 são barras de carga e 134 possuem grandes motores de indução, subdivididas em 4 empresas de distribuição. As áreas comercial e residencial somam outras 66 barras de carga, perfazendo um total de 200 barras, representadas com diferentes percentuais de participação de motores na área. A rede completa simulada (Sistema Interligado Brasileiro) possui 2819 barras, 4014 circuitos, atendendo, em carga pesada, cerca de 52000 MW.

A Tabela 2 apresenta a distribuição dos tipos de motor de indução e o percentual de participação deste tipo de motor na carga própria de cada uma das três principais empresas de distribuição da área.

TABELA 2 – PERCENTUAIS DA CARGA TIPO MOTOR DE INDUÇÃO

Motor de Indução Distribuição	Light	Cerj	Escelsa	Média
	Res/Com	65	53	49
Industrial	35	47	51	38
% Carga Total Empresa	74	38	41	62

Resumidamente, a Tabela 2 estima que cerca de 60% da carga da área é motor de indução, com uma relação de distribuição de 60% do tipo residencial/comercial e 40% industrial.

Utilizando o módulo de fluxo de potência continuado [11] do programa ANAREDE, a parcela da carga do tipo motor de indução de cada barra de carga, é elevada através do aumento da base MVA do motor, com o

restante da carga de cada barra, modelado como P e Q constante.

As barras de carga do tipo industrial não participam da rampa de carga, mantendo constantes seu carregamento durante o processo. Uma outra consideração inclui a modelagem de cargas de áreas residenciais de grande porte como carga de motor do Tipo 5 (Comercial + Alimentador).

O aumento de geração necessário para fazer frente ao aumento de carga e perdas foi concentrado nas usinas geradoras localizadas em São Paulo, conectadas à área estudada através dos troncos de 765 e 500 kV.

A definição das estratégias de controle dos recursos discretos de potência reativa, caracterizada pela escolha das barras controladas e faixas de tensão para manutenção do perfil de tensão, refletiram a experiência acumulada na operação do sistema, respeitando-se todos os limites operativos dos equipamentos e da operação do sistema [12].

Para se verificar a eficácia e robustez do método proposto, foram indisponibilizados dois importantes recursos de controle de tensão da área: a Usina Termonuclear Angra 2 (1350 MW; -600/600 Mvar, aproximadamente) e um banco de capacitores de 200 Mvar na SE Tijuco Preto.

5. RESULTADOS

A Figura 7 compara resultados das curvas PV de uma barra importante da área, com e sem a modelagem da carga do tipo motor de indução, obtidas para níveis crescentes de utilização dos recursos de controle de tensão da área estudada. Nesta figura, são mostradas as margens de carregamento para modelagem da carga como motor de indução, para a representação da carga como P e Q constantes e, ainda, a margem de carga quando da representação de suas parcelas totais de potência ativa e reativa, como corrente e impedância constantes, respectivamente [8].

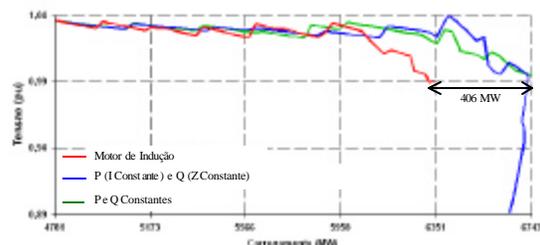


FIGURA 7 – CURVAS PV DA BARRA DE ADRIANÓPOLIS 345 kV

A Figura 7 mostra que a não representação da carga do tipo motor de indução pode apresentar um erro de 6,5% (406 MW) na margem de carga da área Rio de Janeiro / Espírito Santo, estimando uma margem maior que a real.

O aumento da geração de potência reativa nas principais máquinas durante o carregamento da área, é apresentado na Figura 8. Vale observar que, para a representação ou não da carga do tipo motor de indução, a lógica de controle adotada para o chaveamento automático dos

bancos de capacitores/reatores e LTC, através de faixas de tensão, privilegiou a reserva de potência reativa nestas máquinas, de forma que seus limites fossem preferencialmente atingidos nas proximidades do valor de máximo carregamento [12].

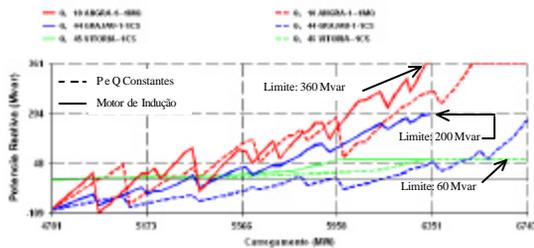


FIGURA 8 – POTÊNCIA REATIVA GERADA EM ANGRA (40), GRAJAÚ (44), VITÓRIA (43)

A Figura 9 apresenta, para as principais barras de transmissão da área, a evolução da margem de potência reativa em função do seu carregamento. Estas margens foram obtidas através do levantamento das curvas QV para os últimos incrementos de carga.

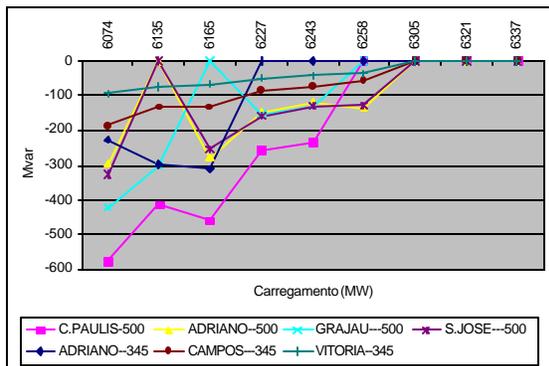


FIGURA 9 – MARGEM REATIVA DAS PRINCIPAIS BARRAS DE TRANSMISSÃO DA ÁREA RJ / ES

Na Figura 9 observa-se que as barras de transmissão de Adrianópolis, São José e Grajaú, todas em 500 kV, apresentam margem zero de potência reativa em instantes anteriores ao de máximo carregamento, situações onde a ação em LTC com impacto de redução na tensão destas barras, deverá ser estudada.

As Figuras 10 e 11 comparam o intercâmbio de potência reativa e o fator de potência das três principais empresas de distribuição com o sistema da Área Rio de Janeiro / Espírito Santo. Um passo (6227 MW), durante o processo de carregamento da área, quando a primeira barra de transmissão (Adrianópolis 345 kV, na Figura 9) apresenta, e sustenta, margem zero de potência reativa, foi escolhido para a comparação da influência da modelagem proposta da carga. Desta maneira, a partir de um caso inicial (4781 MW), as Figuras 10 e 11 comparam as diferenças entre as simulações com a modelagem da carga como P e Q constantes (6227) e como motor de indução (6227 MI), em um mesmo instante, durante o processo de carregamento da área.

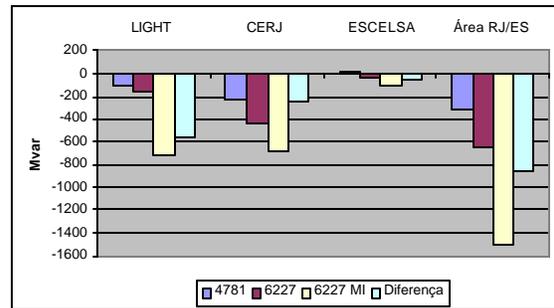


FIGURA 10 – VARIAÇÃO NO INTERCÂMBIO DE POTÊNCIA REATIVA DE PRINCIPAIS EMPRESAS DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA RJ / ES

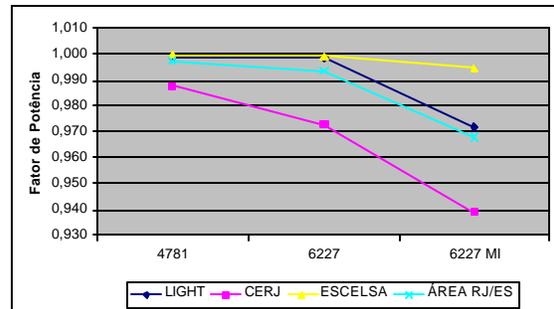


FIGURA 11 – FATOR DE POTÊNCIA DO INTERCÂMBIO DAS PRINCIPAIS EMPRESAS DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA RJ / ES

A Figura 10 mostra que adotar, nos estudos de segurança de tensão, o modelo de carga como P e Q constantes pode implicar na não consideração de um intercâmbio líquido adicional de potência reativa de cerca de 860 Mvar, com as empresas de distribuição da área Rio de Janeiro / Espírito Santo.

A comparação da distribuição detalhada do intercâmbio de potência reativa nas interligações das empresas de distribuição com o sistema de transmissão, é mostrada nas Figuras 12, 13 e 14.

Estas figuras mostram que as maiores diferenças de intercâmbio de potência reativa ocorrem nas SE em 138 kV, São José (SJ), Grajaú (GR), Adrianópolis (AD), Campos (CM) e Vitória (VT), com aquelas duas primeiras subestações, respondendo por quase o dobro da soma do intercâmbio de potência reativa das demais. Estes resultados estão de acordo com as diferenças de intercâmbios de potência reativa verificadas entre os casos de estudo e as medidas de tempo real, nos dias de temperatura elevada na área.

Estima-se que, juntas, as SE Grajaú e São José atendam a uma carga do tipo de motor de indução na composição de 75% do Tipo Comercial/Residencial e 25% do Tipo Industrial. Esta composição da carga também ratifica o período do dia (parte da tarde, carga média) onde se costuma verificar as maiores diferenças de intercâmbio de potência reativa com as empresas de distribuição, principalmente pelo acréscimo das cargas de refrigeração de consumidores do tipo residencial e comercial.

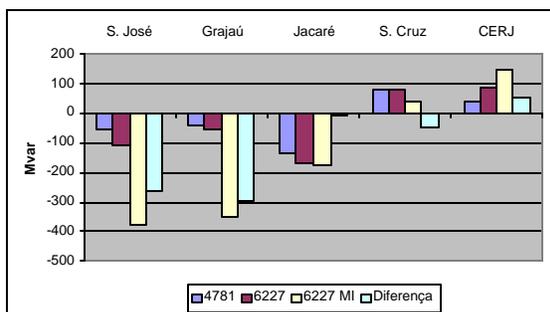


FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO DO INTERCÂMBIO DE POTÊNCIA REATIVA COM A LIGHT

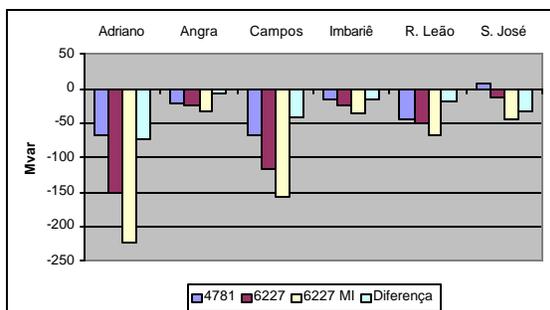


FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO DO INTERCÂMBIO DE POTÊNCIA REATIVA COM A CERJ

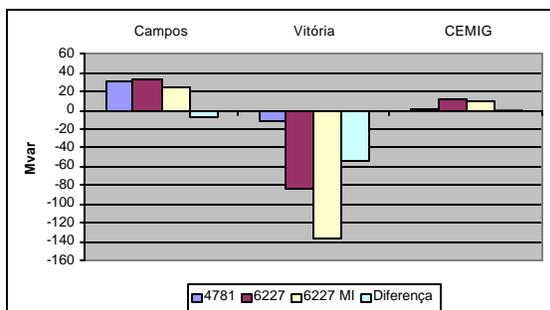


FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO DO INTERCÂMBIO DE POTÊNCIA REATIVA COM A ESCELSA

6. CONCLUSÕES

A correta representação de dispositivos de controle e da carga é cada vez mais importante nas análises de segurança de tensão do sistema elétrico brasileiro, em função da sua complexidade crescente e da necessidade de ações operativas mais precisas.

Se a representação incompleta dos recursos discretos de controle de tensão, pode produzir resultados conservativos da margem de carregamento de um sistema, este artigo mostra, por outro lado, o impacto contrário nesta margem, quando da não representação das cargas do tipo motor de indução, além do risco de informações distorcidas com relação à interação entre os dispositivos de controle de tensão.

A modelagem da carga proposta neste artigo para as cargas do tipo motor de indução, através de modelos típicos agregados e de sua representação direta na matriz Jacobiana, mostrou-se atraente por sua robustez e flexibilidade, permitindo a fácil simulação do

crescimento da parcela deste tipo de carga, nos estudos de segurança de tensão.

7. REFERÊNCIAS

1. R.B. Prada, E.G.C. Palomino, J.O.R. dos Santos, A. Bianco, L.A.S. Pilotto, "Voltage Stability Assessment for Real Time Operation", Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, Issue 2, March 2002, pp.175-180.
2. Souza, A. C. Z., Jardim, J. L. A., Silva Neto, C. A., Alves da Silva, A. P., Torres, G. L., Ferreira, C., Ferreira, L. C. A., "A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment," Electric Power Systems Research, 1999.
3. 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.
4. J. A. Passos Filho, N. Martins, J. C. R. Ferraz, D. Falcão, H. J. C. P. Pinto, "Modelagem de Chaveamento Automático de Banco de Capacitores/Reatores para Estudos com Fluxo de Potência Continuado", Proceedings of the VIII SEPOPE, Brasília, DF, May 2002.
5. R.M. Henriques, N. Martins, J.C.R. Ferraz, H.J.C.P. Pinto, A.C.B. Martins, S. Carneiro Jr., "Impact of Induction Motors Loads into Voltage Stability Margins of Large Systems", Proceedings of PSCC 2002, Seville, Spain, June 2002.
6. IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
7. Bompard, E., Carpaneto, E., Chicco, G., Napoli, R., "Asynchronous Motor Models for Voltage Stability Analysis", Proceedings Bulk Power System Voltage Phenomena III – Voltage Stability Security and Control, ECC Inc, Davos, Switzerland, August 1994.
8. Kundur, P., Power System Control and Stability, McGraw-Hill Inc, USA, 1994.
9. Van Cutsem, T., Vournas, C., Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 1998.
10. Rogers Nozari, G.J., Manno, J., Alden, R.T.H., "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-103, No. 4, April 1984.
11. Canizares, C. A., Alvarado, F. L., "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol.8, n.1, pp. 1-8, 1993.
12. João A. Passos Filho, Luiz Claudio A. Ferreira, N. Martins, A. C. Zambroni de Souza, "Benefícios da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores/Reatores e de LTC Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão", Proceedings of the XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, Outubro 2003.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos engenheiros Alejandro Castillo Cortés, da ESCELSA, Wanda Beatriz Massière Y Corrêa, da CERJ e Amélia Yukie Takahata, da LIGHT, pelo fornecimento dos dados dos motores de indução nas empresas de distribuição, tornando possível a realização deste artigo.