



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSC - 24
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

**AValiação TÉCNICA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA PLANOS DE EXPANSÃO DE
COMPENSAÇÃO REATIVA E CONTROLE DE TENSÃO**

Fabrcio Silveira Chaves Maria Helena Murta Vale*

Universidade Federal de Minas Gerais – LRC / Lightning Research Center

RESUMO

Neste artigo, os autores apresentam seus desenvolvimentos no tema Compensação Reativa e Controle de Tensão no que diz respeito à avaliação técnica de planos de expansão no contexto de transitórios eletromagnéticos. Em tal avaliação, é realizada modelagem dos equipamentos próximos à barra escolhida para a simulação das manobras dos capacitores sugeridos, verificando os valores de sobretensões e sobrecorrentes causadas pelo chaveamento. Um critério utilizado para a escolha das barras críticas, em relação aos transitórios, é apresentado. Também são mostrados resultados da aplicação da metodologia proposta em sistema elétrico real, incluindo situações que exigem a alteração do plano de expansão original.

PALAVRAS-CHAVE

Compensação Reativa *Shunt* Capacitiva, Controle de Tensão, Transitórios Eletromagnéticos, Avaliação Técnica, Manobras de Capacitores.

1.0 INTRODUÇÃO

Dentre as diversas alternativas que se apresentam para a expansão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) encontra-se a Compensação Reativa *Shunt* (CR). Trata-se de uma opção bastante adotada pelos planejadores devido aos diversos benefícios por ela trazidos ao sistema (melhor utilização da rede, diminuição das perdas, ajuste do fator de potência, dentre inúmeros outros) e por ser atrativa sob o ponto de vista econômico. A compensação reativa *shunt*, aliada ao Controle de Tensão (CT) do SEP, tem sido tema de trabalhos acadêmicos e de aplicação prática realizados pelos autores (1), (2), (3), (4), (5) sendo este artigo uma continuidade dos mesmos.

A elaboração de planos para CR/CT, normalmente, é realizada considerando o comportamento em *regime permanente* do SEP e visa especificar o montante e a localização de equipamentos relacionados à injeção e ao fluxo de potência reativa. Diferentes condições de operação do sistema são analisadas, tais como as situações de carga leve, média e pesada e os estados normal, emergência e restaurativo.

A ferramenta básica utilizada na preparação dos planos tem sido o *fluxo de potência ótimo*, onde são especificados um ou vários objetivos a serem alcançados e identificadas as restrições a serem obedecidas. Procura-se obter um maior e melhor aproveitamento dos recursos do SEP, atendendo condições de contorno impostas à rede, a um custo mínimo. Isto leva a formulações que apontam para objetivos específicos que, em geral, procuram *minimizar* o montante de injeção de potência reativa (Mvar) a instalar, a circulação de potência reativa pela rede, as perdas ativas e reativas, e os custos de aquisição, manutenção e operação dos equipamentos a serem alocados. Tais objetivos devem ser alcançados sem deixar de atender às restrições de ordem técnica, econômica, social e ambiental, além daquelas relacionadas à legislação do setor elétrico e à segurança do SEP e de seus usuários. O plano de CR/CT deve proporcionar um controle de tensão adequado.

A consideração de todos os aspectos acima mencionados traz grande complexidade à elaboração dos planos, tornando vital a existência de *políticas, critérios e procedimentos* que auxiliem as equipes de planejamento nas

*Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte - MG – BRASIL

LRC – Lightning Research Center / UFMG

Tel.: (031) 3499-5455 - Fax: (031) 3499-5455 – e-mail: chaves@cpdee.ufmg.br

suas decisões. A estratégia, que vem sendo desenvolvida e aprimorada pelos autores em conjunto com empresa do setor elétrico (1), (2), fundamenta-se na execução dos seguintes passos básicos: **(i)** Definição e Detecção de Deficiências do SEP; **(ii)** Definição da CR/CT; **(iii)** Avaliação Técnica e Econômica; e **(iv)** Definição do Plano de Expansão.

A etapa de avaliação técnica, passo **(iii)**, é extremamente importante para analisar a influência, no comportamento do SEP, da introdução dos novos equipamentos de CR/CT. Análises relativas aos aspectos de curto-circuito já são tradicionais, e aquelas relacionadas à estabilidade de tensão do sistema vêm sendo introduzidas (4), (5). Entretanto, nem sempre as análises relativas aos transitórios eletromagnéticos, relacionados às manobras de bancos de capacitores *shunt*, têm sido incluídas de forma sistemática nos procedimentos de expansão.

As manobras de capacitores *shunt* ocasionam sobretensões e sobrecorrentes no SEP. Dependendo das magnitudes destas grandezas e do amortecimento do sistema, os próprios capacitores e/ou outros equipamentos podem ser danificados. Por este motivo, a CR/CT sugerida no passo **(ii)**, otimizada nos aspectos de regime permanente, precisa ser avaliada quanto ao comportamento transitório. Caso algum problema seja detectado, o planejador poderá optar por alterar o plano proposto anteriormente ou, até mesmo, partir para outra solução de planejamento. Atuando desta forma, sérios problemas podem ser evitados na operação em tempo real. A *análise e a alteração de alternativas* não são triviais, principalmente em sistemas de grande porte onde as características das redes impõem estudos bastante complexos.

Diante do exposto acima, complexidade inerente ao tema e carência de estratégias de suporte à preparação de planos, nasceu a motivação para que fosse elaborado este trabalho, cujo objetivo é apresentar, de forma detalhada, uma proposta de procedimento para avaliação técnica de CR/CT em relação aos transitórios eletromagnéticos, bem como os resultados obtidos com a aplicação do mesmo.

Para cumprir tal objetivo, o presente artigo está assim estruturado: considerações sobre a influência dos capacitores nas sobretensões e sobrecorrentes; apresentação da metodologia de escolha das barras críticas; detalhamento dos passos do procedimento proposto para a avaliação técnica; exposição de resultados obtidos; conclusões.

2.0 INFLUÊNCIA DOS CAPACITORES NOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Pelo fato de os capacitores serem economicamente uma das mais interessantes alternativas, eles têm sido utilizados em grande escala no sistema elétrico para a compensação reativa *shunt* e para o controle de tensão. Conforme já citado, a manobra de tais equipamentos provoca sobretensões e sobrecorrentes as quais, em alguns casos, podem prejudicar a qualidade de energia e danificar alguns dispositivos.

A influência dos capacitores nos transitórios eletromagnéticos deve-se à frequência natural de oscilação dos circuitos LC, amplificando a tensão ou a corrente. A parte oscilatória do transitório, correspondente à manobra de capacitores, é resultado da troca de energia entre os elementos indutivos e capacitivos do circuito.

As sobretensões e sobrecorrentes originadas deste chaveamento são afetadas por diversos fatores, alguns relacionados à rede elétrica (características da carga, dimensões do sistema, capacidade de curto-circuito no local chaveado, valores das capacitâncias do circuito) e outros relacionados ao equipamento e sua manobra (tipo de chaveamento, carga residual do capacitor no instante do chaveamento, características do capacitor manobrado e daquele previamente energizado).

Além disso, as maiores sobretensões são provocadas pela energização de um único banco de capacitor e as maiores sobrecorrentes pela desenergização de bancos de capacitores na configuração *back-to-back* (desenergização de um segundo capacitor em paralelo com um primeiro).

Dentre os efeitos indesejáveis causados pelas sobretensões e sobrecorrentes no sistema elétrico, destacam-se: descargas em isoladores, atuação inadequada de proteções, disparo indevido de pára-raios, degradação do isolamento ou queima de fusíveis internos de capacitores e, principalmente, danificação de equipamentos em geral.

Vale salientar que a suportabilidade dos equipamentos do sistema às solicitações de sobretensões e sobrecorrentes depende da frequência de manobras. Quanto mais elevada, mais restritivos são os limites dos equipamentos em relação a tais grandezas. Além disso, quanto maior o número de manobras, maior o desgaste elétrico e mecânico dos disjuntores, aumentando os riscos de ocorrência de reignições durante a desenergização, e, conseqüentemente, os riscos de falha e de indisponibilidade do equipamento.

As causas e influências das manobras dos capacitores *shunt* têm sido tratadas pelo setor elétrico, conforme documentado em (6), (7), (8), (9), (10), (11). Neste trabalho, o enfoque é dado no sentido de se evitar, já na etapa da expansão, problemas advindos das manobras destes equipamentos.

3.0 BARRAS CRÍTICAS RELACIONADAS AOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

A avaliação de alternativas de compensação reativa, com relação aos efeitos transitórios, é realizada através de simulações considerando-se a manobra dos diversos capacitores. Em sistemas elétricos de grande porte, a avaliação das diferentes possibilidades constitui um problema de dimensão elevada para o planejamento, muitas vezes inviabilizando o seu estudo. Adicionalmente, a análise de todos os casos incluiria simulações desnecessárias.

Diante desses aspectos, propõe-se neste trabalho uma técnica para identificação das chamadas barras críticas, para subsidiar a escolha das situações a serem avaliadas. Tal identificação permite saber qual barra do sistema é a que sofre a maior sobretensão ou sobrecorrente na energização ou desenergização de um determinado capacitor. A técnica é utilizada para classificar as barras de acordo com a configuração do sistema: capacitor alocado, potência consumida, distância elétrica da fonte, equipamentos instalados etc.

O processo proposto se baseia na determinação de índices que consideram os coeficientes de reflexão e de refração do sistema, conforme (12). Tais coeficientes podem ser referentes à onda de tensão ou de corrente. Neste artigo é apresentada a metodologia utilizada para se identificar as barras críticas relacionadas às sobretensões, analisando a onda de tensão cujos coeficientes de reflexão (R_{FL}) e refração (R_{FR}) estão na equação 1. Z_A é a impedância equivalente anterior ao local onde são analisadas a reflexão e a refração, e Z_B é a impedância equivalente posterior. Raciocínio análogo ao exposto a seguir é adotado para a onda de corrente e seus respectivos índices.

$$R_{FL} = \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \quad R_{FR} = \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (1)$$

A análise é feita de forma pontual, considerando-se o sistema elétrico o mais simples possível, a fim de que estes indicadores dêem uma noção das sobretensões e sobrecorrentes provocadas pelos transitórios. Para o cálculo dos índices, é considerada uma fonte de tensão degrau unitário, adotando-se curtos espaços de tempo.

Com o objetivo de exemplificar o processo, adotou-se o circuito simples de 5 barras com 4 ramos, ilustrado na Figura 1. Cargas resistivas foram consideradas, por ser o circuito de resposta mais simples para a análise dos coeficientes de reflexão e refração. Os respectivos valores para as impedâncias Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4 (ohm) são 1,0, 2,0, 1,5 e 0,5. Adotou-se o tempo de propagação (τ) de $1\mu s$ para a linha de impedância Z_1 e de $5\mu s$ para as demais linhas.

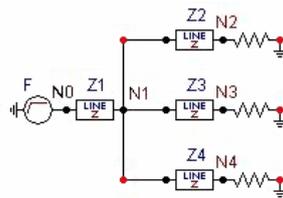


FIGURA 1 – Circuito para estudo dos coeficientes R_{FL} e R_{FR}

Para as análises, são montadas duas matrizes (C, D) de coeficientes, dimensão (4x2), como visto na Tabela abaixo, onde são mostrados valores do sistema exemplo. Na matriz C, são colocados os coeficientes dos pontos N0 (fonte), N2, N3 e N4 (cargas) e, na matriz D, os coeficientes referentes ao ponto N1, vistos através das quatro impedâncias. A fonte é considerada um curto-circuito, a onda de tensão que chega à fonte é totalmente refletida e sua refração é zero, devido ao fato de se adotar nula a reatância interna. Nestas matrizes, os coeficientes da primeira coluna são os de refração e os da segunda coluna são os de reflexão.

TABELA – Coeficientes de refração e reflexão do sistema da Figura 1

Matriz C	1 (R_{FR})	2 (R_{FL})	Matriz D	1 (R_{FR})	2 (R_{FL})
N0	0	-1	Z1	0,48	-0,52
N2	0,667	-0,333	Z2	0,24	-0,76
N3	0,8	-0,2	Z3	0,32	-0,68
N4	1,333	0,333	Z4	0,96	-0,04

A sobretensão depende dos coeficientes e do tempo de propagação da onda, o qual não é considerado. A consideração do número de reflexões (ou tempo de propagação) em cada ponto levaria a cálculos bastante complexos, equiparando-se ao tempo gasto nas simulações de transitórios realizadas em todas as barras. Além disso, não haveria grande diferença no índice, pois a cada reflexão seria somada uma parcela pouco significativa da onda original.

O índice ($C_{i \text{ total}}$) sugerido constitui-se no somatório da primeira onda refratada na carga (FR_C), da onda refletida no ponto N1 (FL_{N1}), da onda refletida na fonte (FL_F) e da onda refratada pelas cargas no ponto N1 (FR_{N1}) (equação 2). O índice ($C_{i \text{ total}}$) que possui o maior valor indica o ponto em que ocorre a maior sobretensão, identificando, assim, a barra crítica.

$$C_{i \text{ total}} = FR_C + FL_{N1} + FL_F + FR_{N1} \quad (2)$$

A FR_C é composta pela onda que vem da fonte que ultrapassa o ponto N1 (d_{11}) e refrata na carga (c_{11}). A FL_{N1} é uma onda FR_C que reflete na carga (c_{12}) e depois no ponto N1 (d_{12}) e refrata na carga (c_{11}). A FL_F é a onda que não atravessa o ponto N1 (d_{12}), reflete na fonte (c_{12}) e, em seguida, vai além do ponto N1 (d_{11}) e refrata na carga (c_{11}). A FR_{N1} é a onda que, após refletir em outras cargas (c_{12}), ultrapassa o ponto N1 em direção à carga desejada (d_{11}) e refrata nesta (c_{11}). Os índices i e j dos coeficientes da matriz C e D apresentados são sempre superiores a 1,

pois o objetivo é verificar o $C_{i \text{ total}}$ nas cargas. A equação 3, que é um detalhamento da equação 2, mostra o que foi exposto neste parágrafo.

$$C_{i \text{ total}} = d_{11} \cdot c_{i1} + d_{11} \cdot c_{j2} \cdot d_{j2} \cdot c_{i1} + d_{12} \cdot c_{j2} \cdot d_{11} \cdot c_{i1} + \left(\sum_{j \neq i}^n d_{11} \cdot c_{j2} \cdot d_{j1} \right) \cdot c_{i1} \quad (3)$$

Reescrevendo a equação 3 de forma simplificada, tem-se:

$$C_{i \text{ total}} = \left[1 + c_{j2} \cdot d_{j2} + d_{12} \cdot c_{j2} + \sum_{j \neq i}^n c_{j2} \cdot d_{j1} \right] \cdot d_{11} \cdot c_{i1} \quad (4)$$

Para validar este índice, foram feitos inúmeros testes sendo a seguir apresentados os resultados de sua aplicação no sistema exemplo. Os índices obtidos, respectivamente, para os pontos N2, N3 e N4 são 0,65, 0,73 e 0,87. Pela Figura 2 observa-se que o ponto N4 é aquele que atinge a maior sobretensão. Nota-se que o maior índice também aponta para o ponto N4, confirmando que este indica a barra crítica em que ocorre a maior sobretensão.

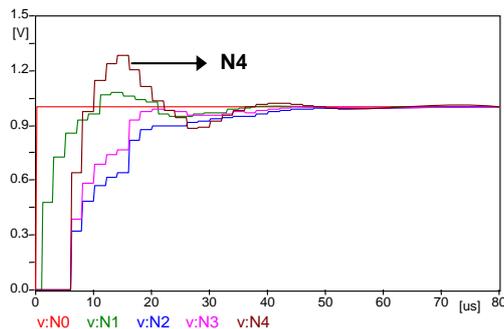


FIGURA 2 – Tensões em cada ponto do circuito da Figura 1

4.0 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS – AVALIAÇÃO TÉCNICA DA COMPENSAÇÃO REATIVA

O procedimento proposto para a avaliação técnica da CR/CT relacionada aos transitórios eletromagnéticos, basicamente, constitui-se de quatro análises de características distintas: energização e desenergização do primeiro banco de capacitores; energização e desenergização do segundo banco. A seguir são apresentados os passos do procedimento proposto e o fluxograma desta avaliação (Figura 3).

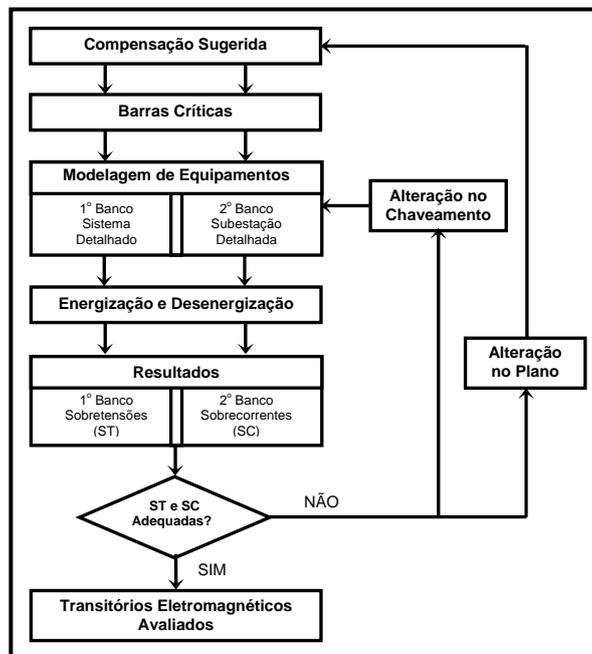


FIGURA 3 – Avaliação Técnica de Expansão – Transitórios Eletromagnéticos

i. Compensação Sugerida

Esta primeira etapa está relacionada à entrada de dados da avaliação técnica e corresponde à compensação

reativa inserida no sistema, sugerida pelo planejador da expansão.

ii. Barras Críticas

A barra crítica é aquela que tem o maior índice $C_{i\text{total}}$, conforme explicado no item 3. Neste passo são identificadas as barras que produzem as maiores sobretensões e sobrecorrentes e para as quais são feitas as simulações.

iii. Modelagem de Equipamentos

A partir deste passo, caracterizam-se dois tipos de análises distintas: chaveamento do primeiro banco e do segundo banco. Em ambas as análises, considera-se o efeito da dispersão entre os contatos do disjuntor e são representados os limites dos pára-raios.

• Análise 1 – 1º Banco

Esta análise tem como meta avaliar as sobretensões causadas pelo chaveamento de um único banco alocado em uma barra. Nesta etapa, modela-se o sistema de forma macro. São representados, para a simulação, duas a três barras adjacentes àquela em que ocorrerá o chaveamento, estando incluídos transformadores, linhas adjacentes, fontes equivalentes, capacitores, pára-raios etc.

• Análise 2 – 2º Banco

Esta análise tem como principal meta avaliar as sobrecorrentes causadas pelo chaveamento de um segundo banco. Nesta etapa, modela-se o sistema de forma micro. É representada, detalhadamente, a subestação onde se encontra o capacitor analisado, abrangendo pára-raios, disjuntores, motores, geradores, LTCs, compensadores etc. As barras e ramos adjacentes à subestação são representados por um equivalente de Thevenin.

iv. Energização e Desenergização

A partir deste passo, caracterizam-se dois tipos de simulações: energização e desenergização. Estas são realizadas para as análises do primeiro e do segundo bancos.

• Simulação 1 – Energização

Considerando-se a modelagem adequada para cada análise, energizam-se os capacitores, verificando-se as sobretensões e sobrecorrentes causadas por ele. As medições são apuradas no capacitor, na carga e em equipamentos mais sensíveis ou os inutiliza. Tais limites dependem dos equipamentos instalados e do número de manobras de capacitores realizadas durante o ano.

• Simulação 2 – Desenergização

Nesta etapa, seguem-se as mesmas recomendações da simulação 1. A diferença marcante entre as duas simulações é que a desenergização é com *restrike*. Isto quer dizer que existe um fluxo de corrente em um certo período de tempo após a desenergização.

v. Resultados

Neste passo são gerados gráficos e relatórios para se extrair das simulações os valores de sobretensões (ST) do primeiro banco e sobrecorrentes (SC) do segundo, utilizando *softwares* para transitórios.

vi. ST e SC Adequadas?

As ST e as SC devem ser inferiores à máxima suportada pelos equipamentos próximos. Além desta avaliação, verifica-se se o pára-raios suporta a energia produzida no chaveamento, sendo examinado se há risco deste equipamento queimar ou abrir o circuito. Observa-se, também, se a manobra causa alteração no funcionamento normal de equipamentos mais sensíveis ou os inutiliza. Tais limites dependem dos equipamentos instalados e do número de manobras de capacitores realizadas durante o ano.

vii. Alteração no Plano

Caso alguma sobretensão ou sobrecorrente ultrapasse os máximos permitidos, ou caso a energia absorvida pelo pára-raios seja superior aos seus limites, ou ainda se a manobra cause dano a algum equipamento, é necessário fazer alterações no plano de expansão sugerido. Tal procedimento considera a avaliação de diferentes opções, tais como:

(a) Alterar o número de capacitores sem modificar o montante de reativo já alocado. Isto é feito através de análise conjunta considerando-se chaveamentos ditados pelas diferentes cargas (leve, média e pesada).

(b) Substituir o capacitor alocado por outro equipamento cuja manobra seja mais suave.

(c) Escolher uma ou mais barras a terem sua compensação modificada. A mudança consiste em alterar o montante de reativo alocado ou em eliminar a alocação em determinadas barras. Para a escolha destas barras é proposta uma análise de sensibilidade que aponta a barra candidata que mais influencia a barra crítica (aquela com problemas de transitórios). Para a candidata, é transferido parcial ou integralmente o montante de reativo.

No presente trabalho, adota-se a análise já utilizada pelos autores em outras avaliações de alternativas (5). Aloca-se 1 Mvar de cada vez nas demais barras e verifica-se quais delas mais influenciam a barra crítica em termos do módulo de tensão. Este procedimento é realizado desta forma para que a mudança no plano de expansão sugerido não leve o sistema a se afastar da solução otimizada e/ou a violar limites (tensão, fator de potência, carregamento etc.) anteriormente respeitados.

Para esta análise é importante levar em consideração os índices $C_{i\text{total}}$ das barras candidatas, a fim de não ser escolhida uma barra que seja apropriada para a compensação reativa, mas inadequada com relação aos

transitórios. O montante de reativo deve ser deslocado para barras com os índices $C_{i \text{ total}}$ de menor valor, para se evitarem aumentos de sobretensões e sobrecorrentes nas barras escolhidas.

viii. Alteração no Chaveamento

Uma alternativa para se evitar os problemas é a mudança no tipo de chaveamento. Pode-se fazer uso de um chaveamento sincronizado ou de um resistor ou reator de pré-inserção para que sejam reduzidas as sobretensões e sobrecorrentes causadas pela manobra.

A utilização do chaveamento controlado tem como objetivo fazer com que a manobra ocorra no momento em que a tensão passa por zero. Para tal, é calculado o tempo de atraso de fechamento ou de abertura do disjuntor em função das características mecânicas da chave e do comportamento da rigidez dielétrica entre os contatos. O chaveamento sincronizado é recomendado por não introduzir perdas elétricas no sistema e por reduzir os desgastes observados nos disjuntores causados pela passagem de correntes elevadas nas câmaras auxiliares.

5.0 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Na realização das simulações, foi utilizado o programa de estudos de transitórios eletromagnéticos ATPDraw (13). Para se chegar aos resultados, criou-se um sistema fictício a partir de alterações introduzidas em uma rede real de 19 barras de tal forma que, com a manobra dos capacitores sugeridos, fossem obtidas sobretensões e sobrecorrentes prejudiciais ao sistema e, assim, ilustrar o processo aqui proposto. No caso, a avaliação técnica indicou ser necessária a alteração do plano de expansão como proposto no item 4.

A compensação sugerida é alocada nas barras de 13,8 kV com capacitores de 2,4 e 4,8 Mvar. Para se identificar a barra crítica são escolhidas três barras com características bem distintas. Tais barras têm, respectivamente, cargas de 16,6 MVA, 20 MVA e 71,2 MVA e, como compensação sugerida, dois capacitores de 4,8 Mvar para a primeira, um de 2,4 Mvar para a segunda, e um de 4,8 Mvar para a última. Além disso, próxima à segunda barra há uma outra carga de 75,4 MVA. As linhas que atendem a estas cargas são de 50km, 100km e 200km.

Os índices para a sobretensão ($C_{i \text{ total}}$) das três barras são 1,61, 1,46 e 1,26. A barra crítica é a primeira, a qual tem a menor carga e o maior índice. A Figura 4 apresenta as tensões do sistema simplificado que engloba as três barras citadas. Pela Figura 4, confirma-se que a maior sobretensão ocorre na barra 1, representada pela letra B. A letra S representa a tensão na fonte. A barra crítica para a sobrecorrente coincidentemente foi a mesma barra.

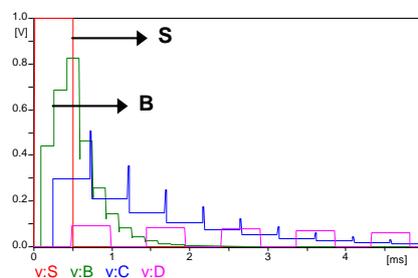
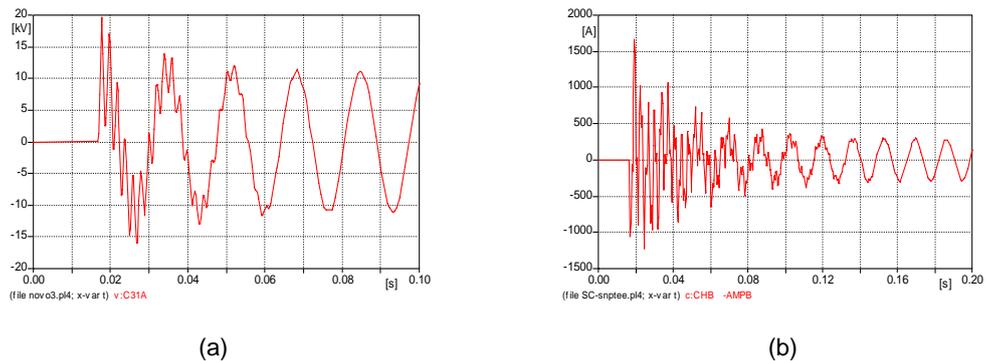


FIGURA 4 – Identificação da barra crítica

A seguir, modela-se o sistema de forma macro para o primeiro banco de capacitores (barras adjacentes, transformadores, linhas de transmissão, fontes equivalentes, capacitores, pára-raios etc.) e de forma micro para o segundo banco (pára-raios, disjuntores, capacitores, fontes equivalentes etc.). Para que sejam obtidos os resultados, realizam-se manobras de energização e desenergização para o primeiro e segundo bancos. No presente artigo, são mostrados os resultados da energização e a respectiva alteração do plano.

Ao se energizar o primeiro banco de 4,8 Mvar, gera-se o gráfico da Figura 5 (a) e é constatada uma sobretensão de 1,86 pu, cujo transitório permanece por aproximadamente 61 ms. Considerando-se que esta manobra seja realizada 400 vezes por ano, o limite adotado para o capacitor utilizado é de 1,80 pu por 50 ms. Portanto, torna-se necessária a alteração do plano.

Já no segundo banco de 4,8 Mvar, é obtido o gráfico da Figura 5 (b). Verifica-se uma sobrecorrente de 5,72 pu cujo transitório persiste por aproximadamente 180 ms. Um limite típico adotado é de 4,0 pu durante 1 s, sendo assim preciso modificar o plano.



(a) (b)
 FIGURA 5 – (a) Transitório de tensão na energização do primeiro banco e
 (b) transitório de corrente na energização do segundo banco

Uma opção para a modificação do plano seria manter o montante e a localização sugeridos, pois estes já são indicados pelo planejador como sendo os mais adequados para a compensação reativa considerando a otimização em regime permanente. Para esta alternativa é preciso que se altere o número de capacitores alocados na barra crítica.

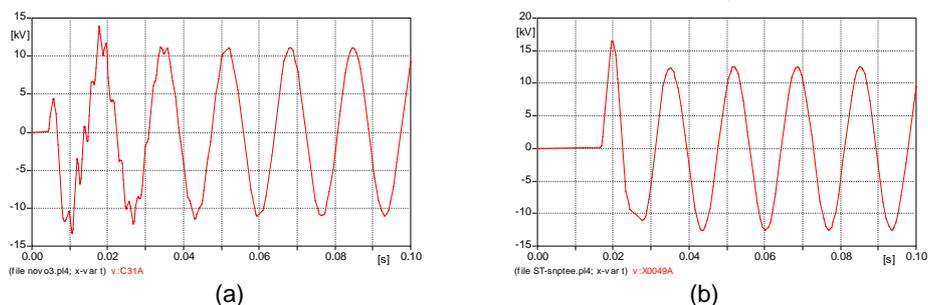
É simulada esta alteração para o caso exemplo, utilizando-se um capacitor de 9,6 Mvar em vez de dois de 4,8Mvar. Observa-se que, nesta nova configuração, o sistema apresenta uma sobrecorrente baixa, pois não energiza um segundo banco. Entretanto, a sobretensão aumenta para 1,89 pu durante 89 ms, não resolvendo o problema.

Outra opção é o remanejamento da compensação através da análise de sensibilidade que indica como barra candidata, levando-se em consideração os índices de transitórios, a barra de carga mais pesada (menor índice). Na barra candidata é acrescentado 8,4 Mvar, restando apenas 1,2 Mvar na barra crítica.

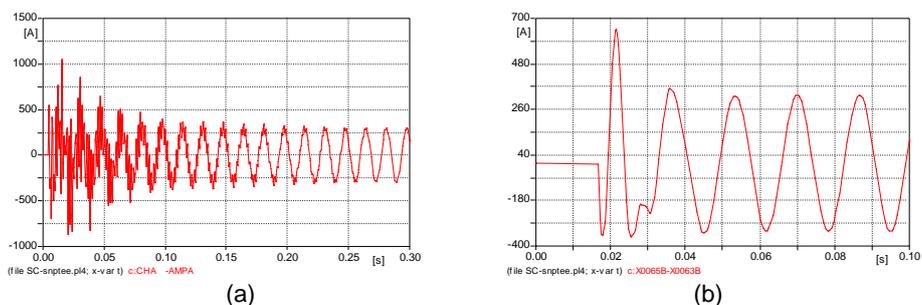
Nesta segunda alteração também não há a necessidade de se energizar um segundo banco. A sobretensão da barra crítica diminui para 1,75 pu, permanecendo por 69 ms, e a da barra candidata alcança 1,55 pu por um período de 25 ms. Ambas as sobretensões estão dentro do limite permitido.

Além destas duas alternativas, é simulada uma terceira opção relativa ao tipo de chaveamento, cujos transitórios gerados por uma das fases são vistos nas Figuras 6 e 7. Ao se utilizar o chaveamento sincronizado, verifica-se pela Figura 6 (a) que a sobretensão diminuiu para 1,23 pu, durando 57 ms, e constata-se pela Figura 7 (a) que a sobrecorrente caiu para 3,64 pu, permanecendo por 300 ms.

Com o emprego de um reator de pré-inserção, observa-se pela Figura 6 (b) que a sobretensão reduz para 1,52 pu, persistindo por 29 ms, enquanto a sobrecorrente é de 1,96 pu, durando 21 ms (Figura 7 (b)).



(a) (b)
 FIGURA 6 –Transitório de tensão na energização do primeiro banco (a) com chaveamento sincronizado e (b) com reator de pré-inserção



(a) (b)
 FIGURA 7 –Transitório de corrente na energização do segundo banco (a) com chaveamento sincronizado e (b) com reator de pré-inserção

Com as modificações no tipo de chaveamento, os limites de sobretensão e sobrecorrente ficam respeitados e estas grandezas são menores que as alcançadas pela mudança na compensação. Porém, suas desvantagens são o custo adicional e a inserção de perdas elétricas. Caberá ao planejador ponderar sobre as alternativas propostas, tanto do ponto de vista elétrico quanto do econômico, para que seja escolhida a opção mais apropriada.

Vale comentar que, embora neste artigo seja apresentado um exemplo de violação de limites do capacitor manobrado, tais limites poderiam ser de um equipamento instalado próximo ao chaveamento ou mesmo de um pára-raios que não suportasse a energia produzida pela manobra, queimando ou abrindo o circuito. Para estes casos, o procedimento de alteração do plano segue os mesmos passos, modificando apenas o limite a ser observado.

6.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma estratégia para se fazer a avaliação técnica de alternativas de expansão de CR/CT nos aspectos de transitórios eletromagnéticos. Com os resultados obtidos confirma-se a importância de se verificarem as sobretensões e as sobrecorrentes originadas pelas manobras de capacitores, pois estas grandezas podem provocar danos irreparáveis em equipamentos fundamentais ao desempenho do sistema. A falta de uma análise prévia e criteriosa de possíveis problemas, já na etapa de planejamento, pode acarretar sérias conseqüências ao SEP, tais como o não atendimento a cargas e a indisponibilidade de dispositivos quando solicitados.

A alteração de um plano de expansão de CR/CT pode ser feita no montante e na localização da compensação reativa *shunt* capacitiva ou no tipo de chaveamento. Cada opção tem suas propriedades, restando ao planejador avaliar qual é a mais adequada. Em casos muito específicos tais modificações podem não ser viáveis, sugerindo a escolha de uma outra alternativa para a expansão (novas linhas de transmissão, subestações etc.).

Para subsidiar a tomada de decisão acerca das diferentes opções, neste artigo é introduzido o conceito inédito de barras críticas aplicado à compensação reativa *shunt* capacitiva nos aspectos de transitórios eletromagnéticos. Estas barras críticas são escolhidas para viabilizar os cálculos e análises de planejamento. É proposto um índice que classifica as barras de forma a indicar aquelas que têm as maiores sobretensões e sobrecorrentes. Pelos resultados obtidos, confirmou-se que a aplicação destes índices é válida e importante para a escolha da compensação reativa.

Uma outra pesquisa que se encontra em andamento é a inclusão, na otimização, de restrições para alocação de compensação reativa em função dos transitórios gerados. Desta forma, o planejador terá como resultado do plano de expansão sugerido compensações que não causem problemas de sobretensões e sobrecorrentes. Pretende-se publicar os resultados de tal pesquisa em artigos futuros. Como próxima etapa, a estratégia aqui proposta será implementada na ferramenta PlanEx (3), compondo o conjunto de procedimentos de CR/CT, objetivando sua aplicação prática pelas equipes de planejamento.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. R., Valadares, M. H. M. Vale, "Políticas, Critérios e Procedimentos para Compensação Reativa e Controle de Tensão", XVI SNPTEE, Campinas, Outubro 2001.
- (2) F. S. Chaves, M. H. M. Vale "Controle de Tensão e Compensação Reativa – Procedimento Aplicado à Expansão de Sistemas Elétricos", XIV CBA, Natal – RN, Setembro 2002.
- (3) M.H.M. Vale, F.S. Chaves, B.A.C. Silva, J.R. Valadares, "PlanEx – Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão – Compensação Reativa/Controle de Tensão", X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- (4) M.H.M. Vale, F.S. Chaves, B.A.C. Silva, A.N. Cortez, J.R. Valadares, J.C. Teixeira, "Avaliação Técnica de Alternativas de Expansão – Compensação Reativa e Estabilidade de Tensão", IX SEPOPE, RJ, 2004.
- (5) M.H.M. Vale, F.S. Chaves, J.R. Valadares, A.N. Cortez, "Avaliação Técnica de Estabilidade de Tensão para Planos de Expansão de Compensação Reativa e Controle de Tensão", XI ERIAC, Paraguai, 2005.
- (6) A.R.F. Freire, "A Operação de Bancos de Capacitores e Reatores Manobráveis e os Custos e Riscos Associados para as Empresas de Transmissão", XVI SNPTEE, Campinas – SP, 2001.
- (7) D.V. Coury, C.J. Santos, M.C. Tavares, M. Oleskovicz, "Transitórios Devido ao Chaveamento de Bancos de Capacitores em um Sistema de Distribuição da CPFL", XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- (8) F.P. Pamplona, D. Fernandes Jr., B.A. Souza, W.L.A. Neves, "Sobretensões Transitórias Decorrentes de Manobras de Bancos de Capacitores", XIV CBA, Natal – RN, 2002.
- (9) P.C. Fernandez, P.C.V. Esmeraldo, J. Amon Filho, C.R. Zani, "Use of Controlled Switching Systems in Power System to Mitigate Switching Transients. Trends and Benefits – Brazilian Experience", X ERLAC, Puerto Iguazú – Argentina, 2003.
- (10) F.R. Alves, L.C.A. Fonseca, A.R.F. Freire, "Uso de Manobra Síncrona para Eliminação do Risco de Danificação de Transformadores Devido a Energização de Bancos de Capacitores 230kV", XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 1999.
- (11) F. Castro Júnior, L.H.S. Duarte, M.S. Novais, "Investigação Comparativa de Tecnologias Aplicáveis à Manobra de Bancos de Capacitores de Alta Tensão", XVII SNPTEE, Uberlândia – MG, 2003.
- (12) A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems, 2a Edição, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- (13) ATPdraw, Programa de Análises de Transitórios, Versão Windows 3.9.