

SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DECORRENTES DE MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES

F.M.P. Pamplona, M.J.G. Silva, R.C. Costa

Coordenadoria do Curso de Eletrotécnica – Grupo de Pesquisa de Eletrotécnica – CEFET-AL

Av. Barão de Atalaia, S/N Centro CEP 57.051-810 Maceió-AL

E-mail: franklin@cefet-al.br, magno@cefet-al.br, r.de.costa@uol.com.br

RESUMO

Um estudo de sobretensões transitórias resultantes da energização e desenergização de bancos de capacitores de alta tensão é apresentado. Ilustram-se como as manobras de bancos de capacitores podem causar transitórios significantes tanto na localização dos próprios bancos chaveados quanto em localizações remotas. Um programa tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program) é utilizado para realizar as simulações digitais. Estudos de análise de sensibilidade foram realizados para avaliar o efeito da representação das cargas, linhas de transmissão e pára-raios.

PALAVRAS-CHAVE: Manobras em bancos de capacitores; Chaveamento de capacitores; Surtos de chaveamento; Sobretensões transitórias.

1. INTRODUÇÃO

A energização de um banco de capacitores provoca distúrbios transitórios oscilatórios resultando em sobretensões que podem alcançar valores de pico fase-terra na ordem de 2 p.u.

Os primeiros estudos sobre os distúrbios transitórios decorrentes da energização de bancos de capacitores foram realizados na década de 1950 (SICKLE et al., 1951; SCHULTZ et al., 1959). A partir de então, diversos trabalhos encontrados na literatura vêm destacando os distúrbios causados por chaveamentos capacitivos (McGRANAGHAN et al., 1991). Os trabalhos mais recentes utilizam as ferramentas EMTP (Electromagnetic Transients Program) com o objetivo de investigar técnicas para redução dos transitórios oriundos de chaveamento de capacitores (GREBE e GUNTER, 1998).

Nestes tipos de estudo, a simulação digital é útil para (MARTINEZ, 1998):

- Entender como os distúrbios se propagam na rede;
- Determinar a distorção na forma de onda causada por diferentes fontes;
- Quantificar o impacto de alguns distúrbios;
- Testar técnicas de atenuação dos distúrbios;
- Determinar a melhor localização de equipamentos no sistema.

Os impactos da instalação de bancos de capacitores sobre os demais equipamentos de um sistema devem ser analisados através das correntes e tensões provocadas pelas manobras de energização desses bancos, para verificar como estes transitórios podem afetar diversos equipamentos de potência do sistema.

Dentre os diversos fatores que afetam a intensidade e duração das tensões transitórias durante o chaveamento de um banco de capacitores, destacam-se: tipos de chaveamento, dimensões do sistema, valores das capacitâncias, o nível de curto-circuito no local onde o capacitor será instalado e características de carga do sistema (McGRANAGHAN et al., 1992). Além das sobretensões, podem ocorrer sobrecorrentes transitórias com a duração de vários milissegundos (OLIVIER et al., 1993).

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CHAVEAMENTO DE CARGAS CAPACITIVAS

Sobretensões transitórias podem ocorrer tanto na energização quanto na desenergização de bancos de capacitores (GREENWOOD, 1991).

Há duas situações distintas correspondentes à manobras de energização:

- Energização de um banco isolado;
- Energização de um banco com outros em paralelo, manobra conhecida como energização *back-to-back*.

2.1. Sobretensões de Energização em Banco de Capacitores Isolado

No circuito da Figura 1, $v(t)$, R e L representam o equivalente de Thévenin de curto-circuito do sistema e C o banco de capacitores a ser energizado.

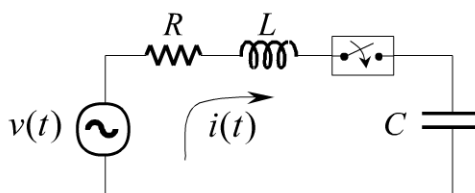


Figura 1. Energização de um banco de capacitores isolado.

Admitindo-se que R seja desprezível com relação à reatância do sistema e que a tensão aplicada é

$$v(t) = V \cdot \cos(\omega t), \quad (1)$$

o valor da corrente de energização do capacitor C é calculado por:

$$i(t) = \frac{V}{Z_s} \cdot \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

sendo:

V a tensão no disjuntor no instante do fechamento,

$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$ a impedância de surto do sistema,

$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ a frequência angular característica de energização transitória.

Admitindo condições iniciais nulas e que o disjuntor feche no instante em que a tensão da fonte for máxima, o valor máximo da corrente de energização do capacitor C é

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{Z_s},$$

com uma frequência natural de oscilação

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Este transitório de energização pode gerar ressonâncias no sistema ou causar sobretensões de frequência elevada nos terminais dos transformadores.

As características das linhas de transmissão presentes no sistema podem ajudar a reduzir os transitórios de energização do banco de capacitores. A presença de outros bancos de capacitores nas proximidades do banco de capacitores manobrado ajuda a reduzir os transitórios de energização (IEEE WORKING GROUP 15.08.09, 1998).

A utilização de dispositivos de chaveamento com fechamento sincronizado pode reduzir os transitórios de energização, pois quanto mais próximo o fechamento do dispositivo à tensão nula, menor será o transitório resultante. Além disso, resistores e indutores de pré-inserção podem ser introduzidos para reduzir a severidade das sobretensões.

2.2. Energização de um Banco de Capacitores com Outros em Paralelo

O circuito da Figura 2 ilustra uma manobra de energização de um banco de capacitores com outros em paralelo. Admitindo-se que as perdas resistivas são desprezíveis, L_1 representa o equivalente de curto-circuito do sistema, C_1 a capacitância do banco em operação e L_2 a indutância equivalente entre o banco em operação e o banco a ser energizado.

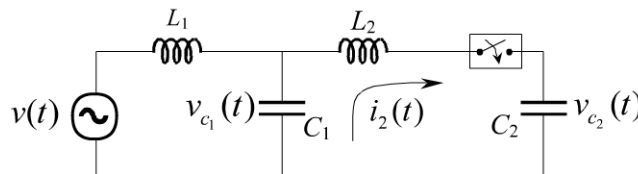


Figura 2. Energização de um banco de capacitores com outro em paralelo.

Neste caso, qualquer diferença de potencial entre os dois bancos será eliminada pela redistribuição de cargas, de forma que o banco em operação, C_1 , irá se descarregar para a energização do outro banco. A corrente de equalização na indutância L_2 é obtida por

$$i_2(t) = \frac{V_1 - v_{C_2}(0)}{Z_{S2}} \cdot \text{sen}(\omega_2 \cdot t) \quad (3)$$

em que:

V_1 é tensão no capacitor C_1 , no instante do fechamento do disjuntor,

$Z_{S2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_{eq}}}$ é a impedância de surto do sistema, vista pelo capacitor C_2 ,

$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C_{eq}}}$ é a frequência angular característica de energização do capacitor C_2 ,

$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ é a capacitância equivalente do circuito após o fechamento do disjuntor.

Admitindo condições iniciais nulas, que o disjuntor feche no instante em que a tensão da fonte for máxima (igual a $V_{\text{máx}}$), e que $L_1 \gg L_2$, o valor máximo da corrente de energização do capacitor C_2 é

$$I_{2\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{Z_{S2}} \quad (4)$$

com uma frequência de oscilação dada pela expressão abaixo:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_{eq}}} \quad (5)$$

O fenômeno oscilatório do transitório de chaveamento do capacitor é resultante da troca de energia entre os elementos indutivos e capacitivos no circuito. Se as correntes de energização são excessivas, reatores limitadores de corrente podem ser usados para trazerem-nas a níveis aceitáveis.

2.3. Sobretensões em Bancos de Capacitores Instalados no Lado de Baixa Tensão do Sistema

Tensões transitórias significativas podem acontecer em bancos de capacitores instalados no lado de baixa tensão de um sistema quando ocorre a energização de bancos de capacitores instalados no lado de alta tensão. O circuito da Figura 3 mostra um circuito com duas malhas LC que ilustra este fenômeno de amplificação de tensão.

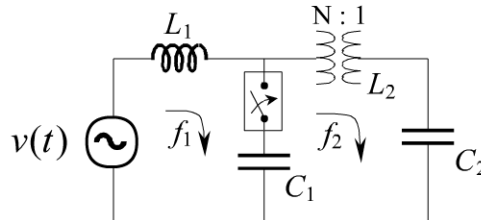


Figura 3. Amplificação da tensão em bancos de capacitores no lado de baixa tensão do sistema.

McGranaghan et al. (1992) mostram que uma sobretensão transitória elevada ocorrerá no banco de capacitores (C_2) do lado de baixa tensão do sistema, durante a energização do banco de capacitores (C_1) instalado no lado de alta tensão, quando: (i) as frequências naturais

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1.C_1}} \text{ e } f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2.C_2}},$$

são aproximadamente iguais; (ii) a impedância de surto da segunda malha é maior que a impedância de surto da primeira malha.

3. ESTUDO DE CASO

O diagrama da Figura 4 representa o sistema de 138 kV proposto pelo IEEE Working Group 15.08.09 (1998), como um sistema típico de alta tensão para realizar estudos de distúrbios transitórios decorrentes de chaveamentos em bancos de capacitores. Este circuito foi adotado para os propósitos do estudo apresentado neste trabalho com algumas considerações relacionadas a seguir.

A fonte é considerada senoidal ideal, com uma impedância equivalente de seqüência zero de $0,5 + j5,0 \Omega$ e uma impedância equivalente de seqüência positiva de $0,58 + j5,8 \Omega$, em 60 Hz. A tensão da fonte foi monitorada para que a tensão na barra de 138 kV atingisse 1,025 p.u. em regime permanente.

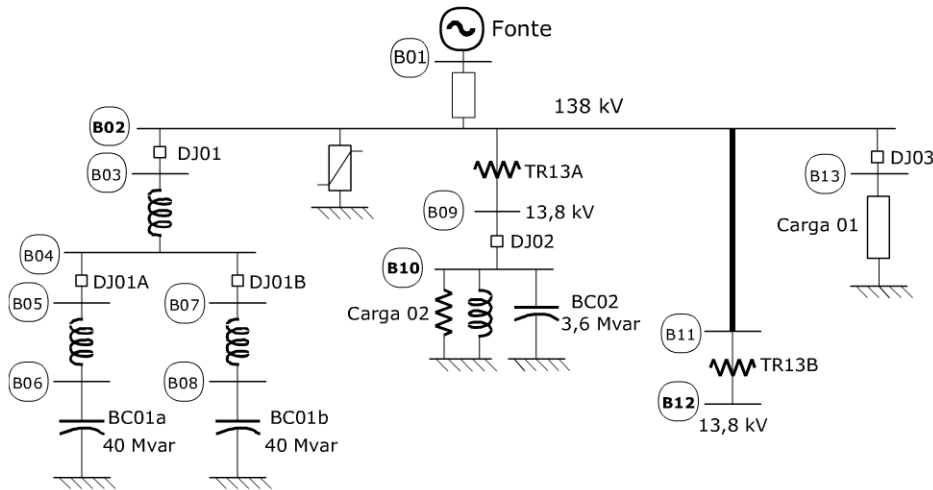


Figura 4. Diagrama do sistema utilizado para os estudos de simulação de energização de banco de capacitores.

O sistema possui dois conjuntos de bancos de capacitores. O primeiro conjunto, identificado como BC01, possui dois bancos de capacitores comutáveis com potência nominal de 40 Mvar, e estão localizados no barramento de 138 kV. Ambos são equipados com reatores individuais de 0,15 mH para limitação da corrente de energização e um reator comum de 1 mH. O segundo conjunto, identificado como BC02, é fixo e está instalado na barra de 13,8 kV identificada como B10. Este banco possui 3,6 Mvar de potência nominal e é utilizado para tornar unitário o fator de potência da carga instalada nesta mesma barra.

O sistema apresenta duas cargas. A primeira carga está instalada na barra de 138 kV e consome uma potência de 180 MW e 80 Mvar na condição de carga máxima. O fator de potência desta carga é corrigido para 1,0 com a atuação dos bancos de capacitores BC01. A segunda carga está instalada no lado de baixa tensão do transformador TR13A, em 13,8 kV. Na condição de carga máxima esta carga consome uma potência de 3,6 MW e 3,6 Mvar. Seu fator de potência é corrigido para 1,0 pelo banco de capacitores BC02.

Em geral, as cargas de um sistema de potência são representadas por um circuito equivalente com elementos resistivos e indutivos em paralelo. A correção do fator de potência é representada por uma capacitância em paralelo com os elementos resistivos e indutivos da carga. Esta é a representação utilizada para a carga 02, instalada no lado de baixa tensão (13,8 kV) do sistema.

Com o objetivo de se fazer uma análise de sensibilidade de carga, foram considerados dois modelos para a carga 01: circuito equivalente com elemento resistivo e indutivo em paralelo e uma impedância Z_s em série com o circuito equivalente paralelo R-L, como mostra a Fig. 5. Essa impedância é modelada como 50% da impedância total da carga.

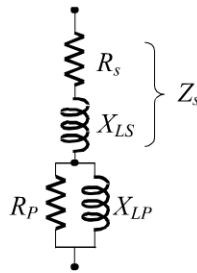


Figura 5. Representação série-paralela da carga 01.

Um pára-raios de classe de tensão 108 kV, sem centelha dor, foi simulado no barramento de 138 kV do sistema. A característica $v - i$ deste pára-raios, estimada a partir de uma forma de onda de impulso de manobra superior a 30/60 μs (D'ajuz et al., 1985), é mostrada na Tabela I.

Tabela I. Característica não linear do pára-raios.

Corrente (A)	Tensão (kV)
10	159,25
100	173,95
1000	192,33
3000	210,70
10000	238,88

Para representar o cabo de conexão entre a barra de 138 kV e o pára-raios foi usada uma indutância concentrada. Considerando um comprimento médio de 5 metros, utilizou-se um valor de 5 μH para esta indutância.

O sistema possui dois transformadores de potência. O primeiro (TR13A) têm potência nominal de 18 MVA e está instalado diretamente no barramento de 138 kV. Este transformador possui três enrolamentos por fase com tensões de 138/13,8/4,8 kV e ligações Y-Y- Δ , respectivamente. As impedâncias dos enrolamentos terciário e de alta e baixa tensão, são, respectivamente de 17,78%, 39,44% e 0,01% na base de 100 MVA.

O segundo transformador (TR13B) está localizado no terminal receptor da linha de transmissão de 138 kV. Este transformador possui uma potência nominal de 80 MVA, dois enrolamentos por fase com tensões de 138/13,8 kV e ligações Y- Δ , respectivamente. A impedância de curto-circuito do transformador é 10,7% na base de 100 MVA, sendo metade deste valor modelada em cada enrolamento. Para ambos os transformadores, a relação X/R é 20 e o neutro de todas as ligações Y está solidamente aterrado.

A característica não linear do núcleo magnético dos transformadores foi levada em conta neste estudo. O ponto de joelho da curva de saturação do transformador TR13A é 1,15 p.u., enquanto que para o transformador TR13B, o ponto de joelho é 1,20 p.u. A indutância do núcleo de ar para ambos os transformadores foi modelada de acordo com Dommel (1996). Na Tabela II apresenta-se a característica não linear $\lambda - i$ para ambos os transformadores.

No modelo dos transformadores foram levadas em conta as capacitâncias das suas buchas e dos seus enrolamentos (Greenwood, 1991). Entretanto, como a frequência natural do sistema é baixa, a presença dessas capacitâncias não altera os resultados das simulações.

Tabela II. Característica não linear do núcleo magnético dos transformadores TR13A e TR13B.

Transformador	Corrente (A)	Fluxo (V.s)
TR13A	17,68	20,7
	10000,0	25,89
TR13B	27,32	62,12
	10000,0	75,68

Uma análise de sensibilidade com relação à modelagem da linha de transmissão de 138 kV e comprimento de 40 km foi realizada neste estudo. A linha foi representada através de dois modelos computacionais: um modelo a parâmetros distribuídos e constantes na frequência, e outro modelo a parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. O objetivo dessa análise é verificar como a consideração da dependência da frequência afeta a interação entre as múltiplas reflexões nos terminais da linha. A Tabela III mostra os dados utilizados no modelo da linha a parâmetros dependentes da frequência.

Tabela III. Características da linha de transmissão de 138 kV parâmetros dependentes da frequência.

Configuração do circuito	horizontal
Tipo de cabo	477 ACSR “Hawk”
Condutor	27 fios de alumínio e 6 de aço
Número de fases	3
Resistência CC	0,1221 Ω , a 25° C
Distância entre fases	4 m
Altura	8 m
Comprimento	40 km
Resistividade do solo	100 Ω .m

3.1. Resultados da Simulação

Diversos casos de simulação foram executados utilizando como ferramenta EMTP o software MICROTRAN[®] (Microtran Power System Analysis Corporation, 1992). Analisou-se a influência dos modelos empregados para representação das cargas, linhas de transmissão e da atuação do pára-raios nos distúrbios transitórios provocados pela energização dos bancos de capacitores instalados no lado de alta tensão do sistema.

As análises são apresentadas para três fenômenos transitórios distintos. O primeiro é o transitório de sobretensão na própria localização do banco de capacitores chaveado (B02). O segundo é o fenômeno de amplificação de tensão no banco de capacitores instalado na barra de 13,8 kV do sistema – B10. O terceiro é a sobretensão nos terminais do transformador (TR13B) localizado no terminal receptor da linha de transmissão de 138 kV (B12).

Considerou-se o fechamento simultâneo dos pólos do disjuntor de chaveamento do banco de capacitores. Em todos os casos analisados não houve saturação magnética dos transformadores. Isto já era uma condição esperada, visto que o fluxo é inversamente proporcional a frequência.

A representação adotada para a carga 01, instalada na barra de 138 kV pode amortecer e atenuar as sobretensões transitórias resultantes (Figura 5). Verifica-se que o modelo de carga a ser utilizado afeta a precisão do transitório simulado, mesmo para as formas de onda observadas, com uma frequência de oscilação relativamente baixa, entre 300 e 600 Hz.

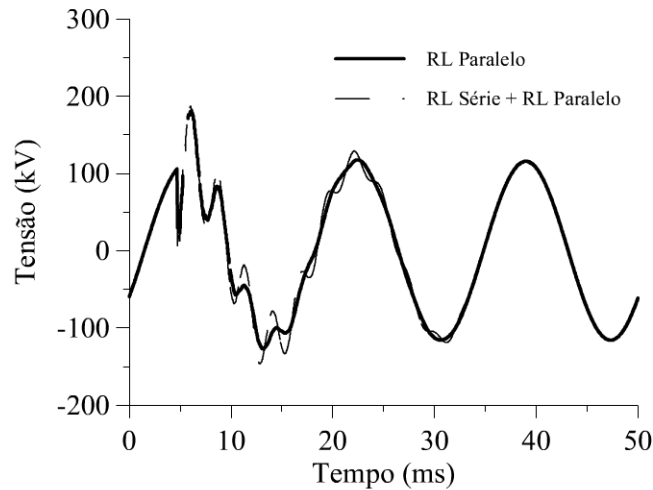


Figura 5. Tensão na fase B da barra de 138 kV (carga média).

Nas simulações de energização do banco de capacitores BC01 localizado na barra de 138 kV foram empregadas três condições de carregamento do sistema: carga nula, carga média e carga máxima. Os valores máximos obtidos foram: 1,510 p.u. para carga máxima, 1,590 p.u. para carga média e 1,680 p.u. para carga nula. Isto mostra como as condições de carregamento do sistema afetam as sobretensões transitórias resultantes.

A Figura 6 mostra a influência da modelagem dos pára-raios na energização do banco de capacitores BC01 para a condição de carga média. A falha do pára-raios implica em sobretensões mais elevadas.

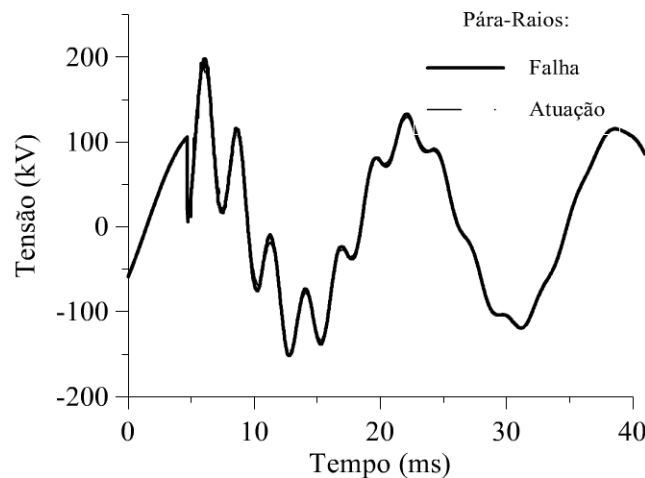


Figura 6. Sobretensão na fase B da barra de 138 kV (carga média).

No instante em que a sobretensão ultrapassa o valor de tensão estabelecido por sua característica não linear, o pára-raios atua drenando uma corrente de descarga, conseqüentemente limitando a sobretensão resultante nos seus terminais, conforme pode ser visto na Figura 7.

A reignição de uma das fases do disjuntor de chaveamento do banco de capacitores pode ocorrer durante uma desenergização. Neste caso, surgirá uma tensão de restabelecimento transitória (TRT) entre os contatos do disjuntor, com frequência e amplitude elevadas. A análise desta condição é importante para determinar a energia que deverá ser dissipada pelos pára-raios durante tal distúrbio.

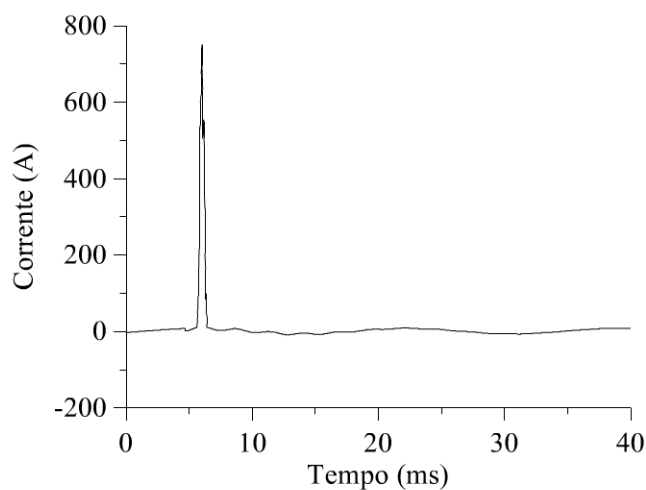


Figura 7. Atuação do pára-raios na fase B da barra de 138 kV (carga média).

Esse estudo apresenta o resultado de um caso de desenergização do banco de capacitores BC01 com reignição do disjuntor no pico da tensão da fase A, como mostra a Figura 8. A energia dissipada pelo pára-raios é mostrada na Figura 9.

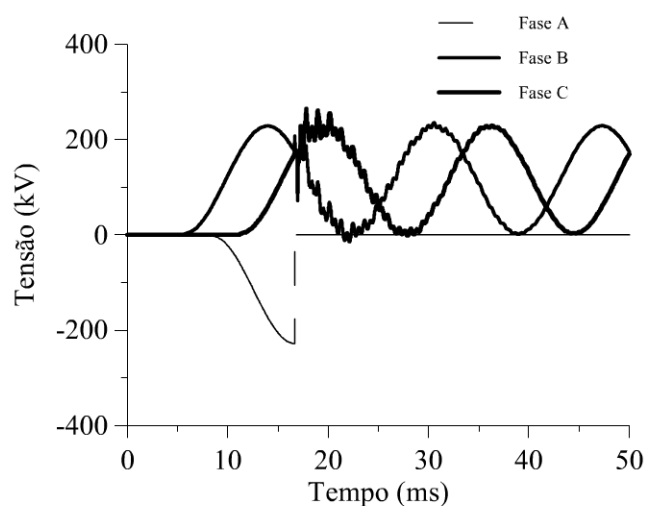


Figura 8. TRT nos terminais do disjuntor DJ01 devido à reignição da fase A (carga média).

Para este caso de desenergização, a energia dissipada pelo pára-raios está dentro da capacidade de dissipação de energia para um pára-raios de classe de tensão 108 kV.

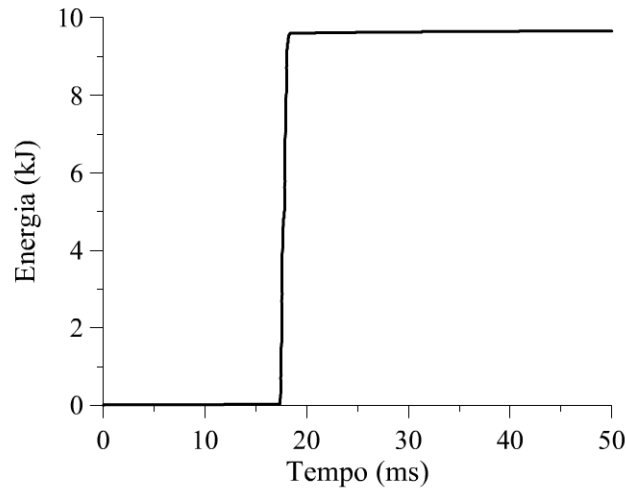


Figura 9. Energia dissipada pelo pára-raios na fase A (carga média).

Na Figura 10 ilustra-se o fenômeno de amplificação de tensão no banco de capacitores instalado na barra de 13,8 kV devido a energização do banco de capacitores BC01. A sobretensão máxima no enrolamento de 13,8 kV é 3,2 p.u., enquanto a máxima sobretensão no banco de capacitores BC01 é 1,8 p.u., para a condição de carga média.

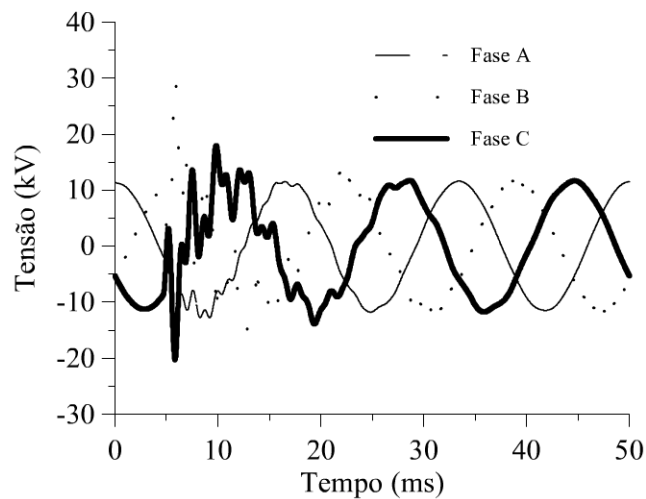


Figura 10. Amplificação da tensão na barra B10 (carga média).

Na simulação de transitórios envolvendo linhas de transmissão, resultados mais realistas são obtidos utilizando-se uma representação de linha com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. Na Figura 11, é mostrada uma análise de sensibilidade com relação ao modelo da linha de transmissão de 138 kV a parâmetros constantes e dependentes da frequência para as tensões no enrolamento de 13,8 kV do transformador TR13B.

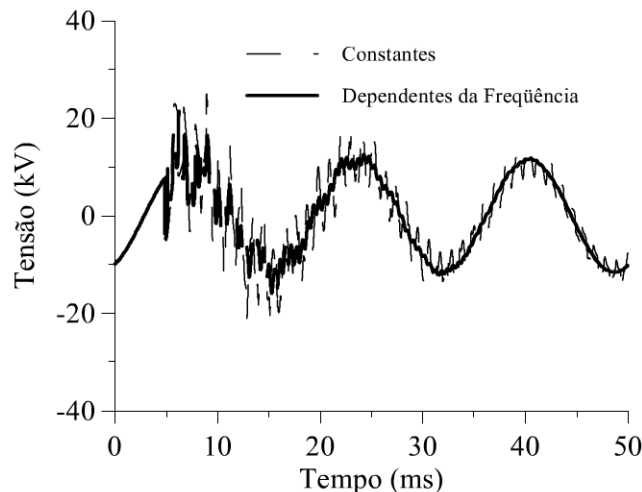


Figura 11. Tensão de fase nos enrolamentos de 13,8 kV do transformador TR13B (carga média).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo de sobretensões transitórias resultantes de manobras de bancos de capacitores. O EMTP foi utilizado para realizar as simulações digitais.

Uma análise de sensibilidade com relação ao modelo de carga foi realizada. A sua representação pode atenuar as formas de onda de tensão transitória e modificar a frequência natural de oscilação.

Foi observado que, as sobretensões geradas pela desenergização de um banco de capacitores com reignição do disjuntor no pico da tensão de uma das fases, são mais severas que as sobretensões de energização.

Para uma representação mais realista dos fenômenos transitórios, deve-se utilizar o modelo de linhas de transmissão a parâmetros distribuídos e dependentes da frequência.

A atuação dos pára-raios limita as sobretensões transitórias em conformidade com os níveis de tensão estabelecidos pela sua característica não linear e sua capacidade de dissipação de energia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG pelo apoio técnico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D'ajuz, A., Resende, F. M., Carvalho, F. M. S., Nunes, I. G., Amon Filho, J., Dias, L. E. N., Pereira, M. P., Kastrup Filho, O., Morais, S. A. **Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão**, Rio de Janeiro, FURNAS, 300p, 1985.

Dommel, H. W. **EMTP Theory Book**, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canada, 1996.

Grebe, T. E., Gunter, E. W. **Application of the EMTP for analysis of utility capacitor switching mitigation techniques**. 8th ICHQP Proceedings, Greece: 1:583-589, 1998.

Greenwood, A. **Electrical Transients in Power Systems**, John Wiley & Sons Inc., New York, 751p, 1991.

IEEE Working Group 15.08.09. **Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs**. IEEE Power Engineering Society, Piscataway, NJ 08855-1331, EUA, 1998.

Martinez, J. A. **Power quality analysis using electromagnetic transients programs**. 8th ICHQP Proceedings, Greece, 1:590-597, 1998.

McGranaghan, M. F., Grebe, T., Hensley, G., Samotyj, M., Singh, T., Hensley, G. **Impact of utility switched capacitors on customers systems. Part II – adjustable speed drive concerns**. IEEE Transactions on Power Delivery, EUA, 6(4):1623-1628, 1991.

McGranaghan, M. F., Zavadil, R. M., Hensley, G., Singh, T., Samotyj, M. **Impact of utility switched capacitors on customers systems – magnification at low voltage capacitors**. IEEE Transactions on Power Delivery, EUA, 7(2):862-868, 1992.

Microtran Power System Analysis Corporation, **Transients Analysis Program Reference Manual**, Vancouver, B.C., Canada, 1992.

Olivier, G., Mougharbel, Dobson-Mack, G. **Minimal transient switching of capacitors**. IEEE Transactions on Power Delivery, EUA, 8(4):1988-1994, 1993.

Schultz, A. J., Johnson, I. B., Schultz, N. R. **Magnification of switching appears**, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, EUA, 77:1418-1426, 1959.

Sickle, R. C. V., Zaborsky, J. **Capacitor switching phenomena**. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, EUA, 70(I):151-159, 1951.