

XV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI 2002

Transitórios Devidos ao Restabelecimento de Alimentadores num Sistema Elétrico de Distribuição na Presença de Bancos de Capacitores Fixos Instalados em Derivação

C. J. Santos Gerência de Ativos Nordeste CPFL Cia Paulista de Força e Luz Ribeirão Preto (SP) claudio@cpfl.com.br	D. V. Coury Dept. de Eng. Elétrica Esc. Eng. de São Carlos Universidade de São Paulo São Carlos (SP) coury@sel.eesc.sc.usp.br	M. Oleskovicz Dept. de Eng. Elétrica Esc. Eng. de São Carlos Universidade de São Paulo São Carlos (SP) olesk@sel.eesc.sc.usp.br	E. F. Arruda Dept. de Eng. Elétrica Esc. Eng. de São Carlos Universidade de São Paulo São Carlos (SP) franklin@sel.eesc.sc.usp.br
---	---	---	---

Palavras-chave – ATP, Chaveamento de Capacitores, Qualidade da Energia, Restabelecimento de Alimentadores, Transitórios.

Resumo - Tanto bancos de capacitores fixos quanto automáticos são utilizados, em derivação, no sistema elétrico de distribuição, dependendo das condições operacionais e dos critérios técnicos aplicados pela concessionária. A aplicação de bancos fixos mostra-se mais econômica, em virtude da ausência de componentes associados ao padrão dos bancos automáticos. Devido às características dos laços L-C dos circuitos formados entre a rede, as cargas e os bancos fixos, problemas de Qualidade da Energia podem surgir durante o restabelecimento dos alimentadores. Este estudo apresenta a simulação da rede sob condições de restabelecimento de alimentadores, verificando-se as características dos transitórios originados pela presença de bancos de capacitores associados aos componentes indutivos do circuito. São apresentadas as ondas de correntes e tensões transitórias, e são feitas análises espectrais, identificando o conteúdo harmônico destas ondas. Um circuito representando um sistema de distribuição real típico, 13,8 kV, da CPFL (Cia Paulista de Força e Luz) foi simulado através do programa ATP (Alternative Transients Program).

I. INTRODUÇÃO

Através da instalação de Bancos de Capacitores (B.C.) em derivação é suprida parcela da potência reativa demandada pelos Sistemas Elétricos de Potência. A instalação dos B.C. em derivação produz benefícios ao sistema como: redução do carregamento e das perdas elétricas, liberação de capacidade, além da melhoria do fator de potência. Em redes primárias de distribuição são aplicados tanto B.C. fixos quanto automáticos, dependendo das condições operacionais e dos critérios técnico/econômicos adotados pela concessionária. Normalmente uma combinação destes tipos é empregada, em função das características das cargas e das condições operacionais em cada ponto do sistema elétrico. A instalação de B.C. fixos mostra-se mais econômica do que de B.C. automáticos em função da diferença entre os

padrões. Por exemplo, componentes que fazem parte da estrutura para B.C. automáticos comandados por corrente, como: relés de corrente, transformador de corrente, caixa de controle e chaves a óleo, não fazem parte da estrutura física dos B.C. fixos (Fig. 1). Com isto, os custos para instalação de bancos automáticos por corrente são cerca de 50% maiores daqueles associados aos bancos fixos.

As redes de distribuição primárias freqüentemente são interrompidas através dos equipamentos de proteção, quando da ocorrência de falhas no sistema. A presença de B.C. fixos ao longo dos alimentadores interferem nas características dos transitórios gerados durante o restabelecimento dos alimentadores. Estes transitórios, que podem gerar sobretensões e sobrecorrentes, surgem devido a presença dos laços L-C formados pela configuração do sistema de distribuição. Surgem assim problemas de Qualidade da Energia, que podem provocar perturbações às instalações dos consumidores daquele circuito e, conseqüentemente, perdas em seus processos produtivos [1].

Por outro lado, consumidores industriais e comerciais são incentivados a instalar bancos de capacitores, para evitar penalidades impostas pelas concessionárias em função do baixo fator de potência. A presença destes capacitores podem resultar em amplificação das sobretensões transitórias em suas instalações.

O chaveamento de B.C. provocam sobretensões transitórias que, teoricamente, podem alcançar valores fase-terra máximos da ordem de 2,0 p.u.. Também podem surgir sobretensões amplificadas em B.C. remotos, devido à natureza oscilatória do circuito acoplado [2]. Vários fatores que afetam a amplificação das tensões transitórias, durante o chaveamento de B.C., devem ser mencionados: a potência do B.C. chaveado, a potência de curto-circuito no local onde o B.C. está instalado, a potência do transformador e as características das cargas do consumidor [3]. Deve ser notado que podem surgir altas correntes transitórias, alcançando valores superiores até dez vezes a corrente nominal do banco, com duração de alguns milissegundos [4]. Vários parâmetros que podem afetar a máxima corrente de “inrush” foram analisados em [5], tal como:

dispersão de pólos, resistor de amortecimento inserido junto ao reator limitador de corrente, frequência natural e saturação do reator limitador de corrente.

Os transitórios originados do restabelecimento de alimentadores, onde existem bancos de capacitores fixos instalados, foram objetos de estudo neste trabalho. Várias condições em que os B.C. da concessionária pudessem ser instalados, ao longo do alimentador, também foram levadas em consideração nas simulações, a fim de obtermos informações como: a intensidade e os componentes harmônicos dos transitórios de tensão e corrente, que são gerados nas diversas situações. Verificou-se os reflexos dos transitórios no primário e no secundário dos transformadores de distribuição da concessionária e particulares, considerando a presença de capacitores instalados pelo cliente, para correção do fator de potência. Assim, a amplificação da tensão transitória no sistema com vários níveis de tensão e com capacitores instalados é verificada conforme indicado em [6].



Fig. 1. Estrutura padrão - B.C. automático por corrente instalado na rede de distribuição primária da CPFL.

II. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ENERGIZAÇÃO DE CAPACITORES

A fim de qualificarmos o fenômeno da energização de capacitores tomemos o circuito mostrado na Fig. 2 como exemplo, onde as resistências foram omitidas por simplificação.

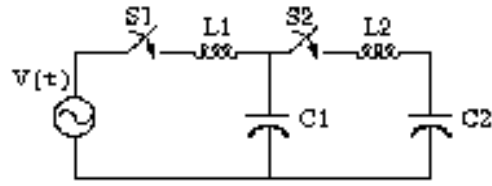


Fig. 2. Circuito com dois laços L-C.

Considerando as frequências naturais dos laços L-C muito maiores do que a frequência fundamental (60 Hz), podemos supor a tensão fundamental com valor constante V durante a resposta da tensão transitória de alta frequência [6]. As expressões para a corrente e a tensão no capacitor C_1 durante o fechamento da chave S_1 da Fig. 2, estando S_2 aberta, são dadas respectivamente por [7]:

$$V_{C1}(t) = V - [V - V_{C1}(0)]. \cos \omega_1 t \quad (1)$$

$$I_1(t) = \frac{V}{Z_1} \sin \omega_1 t \quad (2)$$

onde:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ é a frequência natural;}$$

$V_{C1}(0)$ é a tensão inicial em C_1 ;

V é a tensão nos terminais da chave no instante do fechamento de S_1 e

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ a impedância de surto.}$$

Considerando novamente a Fig. 2, agora com o fechamento da chave S_1 , estando S_2 já fechada, teremos para a tensão sobre o capacitor remoto C_2 , em p.u. da tensão aplicada, a seguinte equação [2]:

$$\frac{V_{C2}}{V} = 1 + A \cos \phi_1 t + B \cos \phi_2 t \quad (3)$$

sendo:

$$A = -\frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^4 - \left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^2} - \left[\left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1}$$

$$B = +\frac{1}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^4 - \left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^2} + \left[\left(\frac{\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\Delta\omega_2}{2\omega_1} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1}$$

$$\phi_1 = \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{2} + \frac{\Delta\omega_2^2}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{2} + \frac{\Delta\omega_2^2}{2} \right)^2 - \omega_1^2 \omega_2^2}}$$

$$\phi_2 = \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{2} + \frac{\Delta\omega_2^2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2}{2} + \frac{\Delta\omega_2^2}{2} \right)^2 - \omega_1^2 \omega_2^2}}$$

$$\Delta = \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right), \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

A tensão resultante amplificada no capacitor remoto é constituída por três componentes: a tensão da fonte e dois componentes oscilatórios ϕ_1 e ϕ_2 . Este fenômeno, designado como amplificação da tensão, foi analisado por [2] onde um circuito com dois laços L-C, cada um com uma frequência natural de oscilação $\omega = 1/\sqrt{LC}$, apresentará amplificação de tensão quando as

freqüências tiverem valores próximos. Foi verificado também um aumento da amplificação da tensão quando a impedância de surto, $z = \sqrt{L/C}$, do segundo laço torna-se maior do que a impedância de surto do primeiro laço. Um fator que muito contribui para a amplificação de tensões transitórias é a existência de capacitores ligados em derivação em vários níveis de tensão em um mesmo sistema de potência. A medida em que são formados novos laços L-C, ocorrerão sobretensões transitórias provocadas pelo chaveamento do capacitor do primeiro laço L-C (tensão superior) mais elevadas no capacitor do último laço (tensão inferior) [6]. Simulações computacionais e medições de campo têm indicado que a amplificação destes transitórios são possíveis sobre uma larga faixa de potência de capacitores de baixa tensão. Na Fig. 2 considerando agora o fechamento da chave S_2 , com S_1 já fechada, teremos o fenômeno transitório onde a diferença de potencial entre os dois bancos é eliminada através da redistribuição de suas cargas, por meio da corrente de equalização, que flui pela indutância L_2 , dada como sendo [8]:

$$I_2(t) = \frac{V_1 - V_{C2}(0)}{\sqrt{L_2 \frac{(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}}} \sin \omega_2 t \quad (4)$$

$$\omega_2 = \left(\sqrt{L_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \right)^{-1} \quad (5)$$

V_1 - tensão sobre C_1 no instante do fechamento de S_2

$V_{C2}(0)$ - tensão inicial em C_2

ω_2 - freqüência do transitório

A parte oscilatória do transitório de chaveamento de capacitores é resultado da troca de energia entre os elementos indutivos e capacitivos do circuito. A energia armazenada nos elementos capacitivos ($1/2CV^2$) fluirá para os elementos indutivos ($1/2LI^2$). As oscilações transitórias que surgem durante o chaveamento de B.C. nos sistemas elétricos podem ser de baixa freqüência (300 a 600 Hz) quando houver interação do B.C. com a fonte, e de média freqüência (2 a 10 kHz) quando o banco é chaveado em paralelo com outro banco ou outros elementos capacitivos tal como cabos (IEEE, PES Surge Protective Devices Committee WG 3.4.17, 1996). Outros autores também contribuem para o estudo de harmônicos e sobretensões transitórias devido ao chaveamento de capacitores, apresentando resultados interessantes como em [9] e [10].

Várias técnicas disponíveis podem ser aplicadas a fim de atenuar as sobretensões transitórias durante o chaveamento de B.C., as quais incluem a pré-inserção de indutores/resistores em série com os capacitores, o controle de fechamento síncrono e instalação de pára-raios de óxido metálico, sendo que as duas últimas mostram-se como mais efetivas na mitigação dos

transitórios [11]. Em [12] é sugerido que os ASDs (Adjustable Speed Drives) sejam equipados com reatores no barramento c.a., juntamente com uma destas técnicas de atenuação, para que as sobretensões sobre sua barra c.c., resultantes do chaveamento de B.C., sejam limitadas a valores que não ocasionem disparos de seus dispositivos de proteção.

O SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Um circuito representando um alimentador real do sistema de distribuição primário, 13,8 kV, da CPFL (Cia Paulista de Força e Luz), foi simulado. O transformador da subestação teve sua curva de saturação representada no modelo. Este alimentador consiste de rede primária com cabo de alumínio nú CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional, representado por elementos RL acoplados, e supri uma mescla de cargas residenciais, comerciais e industriais.

Para efeito das análises o circuito real foi simplificado conforme mostrado na Fig. 3. Assim foram representadas quatro instalações industriais, sendo que, apenas uma com a modelagem do transformador, incluindo sua curva de saturação. Dois transformadores de distribuição da concessionária também foram representados e os demais foram agrupados em quatro conjuntos de cargas RL equivalentes, ligadas diretamente na rede primária. As cargas equivalentes das instalações particulares foram modeladas através de uma impedância RL em paralelo com um capacitor C, o qual corresponde à necessidade de kVar da instalação para correção do fator de potência de 0,75 para 0,92. Todas as simulações foram feitas considerando-se todas as cargas, bem como, os capacitores das instalações particulares, ligados.

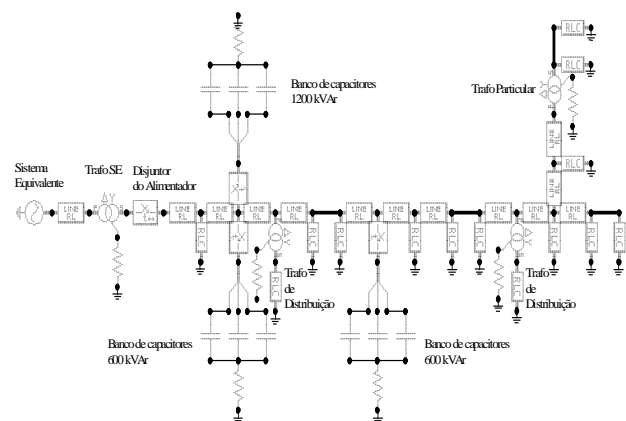


Fig. 3. Sistema de Distribuição equivalente gerado através do ATPDRAW.

As cargas foram dimensionadas considerando-se a corrente máxima do alimentador, razão pela qual as sobretensões são mitigadas, conforme visto em [13].

Foi utilizado o programa ATP (Alternative Transients Program) na simulação do circuito sob várias possibilidades de se obter a compensação reativa necessária do alimentador. Inicialmente considerou-se um B.C. fixo de 1200 kVar na rede durante a energização do alimentador. Após isto buscou-se avaliar os transitórios com a distribuição desta potência reativa

através de dois B.C. fixos de 600 kVAr. Também foram simulados casos considerando B.C. automáticos, que eram energizados com o sistema em regime. A influência dos bancos de capacitores instalados no alimentador foi comparada com a energização do mesmo sem suas presenças. Como base, utilizou-se os valores de tensão e corrente nos diversos pontos do alimentador em regime com dois B.C. de 600 kVAr, para avaliação das sobretensões e sobrecorrentes transitórias (fig. 3).

As sobretensões associadas ao chaveamento de circuitos com capacitores, dependem da relação entre as frequências naturais e entre suas capacitâncias nos laços L-C formados [6]. Todavia neste estudo preocupou-se em verificar situações típicas, que ocorrem na rede de distribuição.

As tensões fase-terra e as correntes de carga transitórias foram avaliadas em quatro pontos representativos do sistema, a saber:

- saída do transformador da subestação;
- baixa tensão de um transformador de distribuição(T3);
- alta tensão de um transformador de distribuição(T45);
- alta tensão de um transformador particular(Tp1).

Para alguns pontos do sistema elétrico determinou-se o espectro de frequência das ondas de tensão e corrente transitórias, verificando-se seus componentes harmônicos.

IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NO ATP

IV.1. Máximas Sobretensões

Pode ser observado na tab. I os valores máximos das tensões fase-terra transitórias, verificados nos vários pontos em análise do sistema. Em geral, as máximas sobretensões que ocorreram com a presença de B.C. fixos foram superiores em relação às condições simuladas com o chaveamento do B.C. automático de 1200 kVAr no alimentador. Entretanto observou-se que estes valores foram muito próximos aos verificados durante a energização do alimentador sem quaisquer B.C. instalados. O chaveamento do B.C. automático de 600 kVAr, considerando o outro B.C. de 600 kVAr já energizado, produziu sobretensões mais elevadas que no caso anteriormente citado. As sobretensões foram transmitidas para o lado da baixa tensão dos transformadores de distribuição, com valores, em p.u., próximos àqueles do lado da alta tensão.

TABELA I
VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO TRANSITÓRIA.

Pontos do Sistema em Análise	Regime c/ 2 BC600 (V)	Tensão Máxima				
		Durante a Energização (p.u.)				
		Sem bancos	BC fixo 1200	BC fixos 2x600	BC auto 1200	BC fixo 600 + auto 600
Subestação	11.163	1,50	1,52	1,57	1,61	1,54

T45 lado primário concessionária	11.075	1,81	1,85	1,80	1,53	1,84
T3 lado secundário concessionária	185	1,77	1,82	1,85	1,40	1,81
Tp1 lado primário particular	11.087	1,74	1,77	1,80	1,59	1,76

IV.2. Máximas Sobrecorrentes

Em relação aos máximos valores de correntes transitórias, na saída do alimentador constatou-se valores por volta de 30% superiores, na presença de bancos de capacitores fixos (4,83 e 4,77 p.u.), daqueles observados sem eles instalados (3,69 p.u.). A corrente máxima neste ponto quando o B.C. de 1200 kVAr automático é chaveado, ficou na ordem de 77% (2,83 p.u.) da corrente máxima do alimentador energizado sem a presença de B.C. fixos (tab. II). Entretanto, a simulação da energização de um B.C. automático de 600 kVAr, considerando o outro B.C. de 600 kVAr já energizado, gerou correntes na subestação da ordem de 4,33 p.u. Altos valores de correntes também foram verificados junto as instalações particulares providas de capacitores para correção de fator de potência. Para esta situação a presença de B.C. fixos atenuaram os picos de corrente, que foram muito mais elevados durante o chaveamento do banco automático de 1200 kVAr, atingindo 12,25 vezes da corrente de carga.

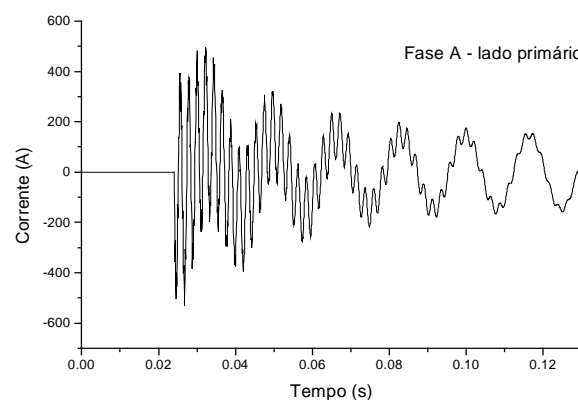
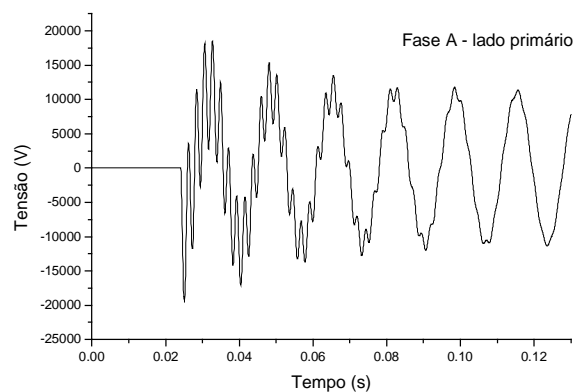


Fig. 4 Formas de ondas da tensão e da corrente na fase A, lado primário de um transformador particular.

IV.3. Análise das Ondas de Tensão e Corrente

A figura 4 ilustra as formas de onda de tensão e corrente obtidas, junto ao lado primário de um transformador particular (Tp1), considerando o alimentador sendo religado na presença de um B.C. fixo de 1200 kVAR. Na fig.5 podemos ver o espectro de frequência destas ondas, mostrando seus componentes harmônicos. As frequências envolvidas são sensivelmente diferentes dos valores teoricamente esperados, devido aos efeitos de amortecimento das cargas e perdas no sistema. Quando mais do que um banco de capacitores são conectados, as frequências de oscilação são determinadas pela interação dos diferentes circuitos L-C [14].

As ondas de tensão e corrente quando consideramos a energização do alimentador sem B.C. fixos não são muito diferentes. Na fig. 6 podemos ver os espectros de frequência das ondas de tensão e corrente para este caso. Em relação ao conteúdo harmônico das ondas, foram observadas diferenças nas várias situações simuladas. Ressalta-se a forte presença da componente de 60 Hz nas ondas de tensão e corrente.

TABELA II
VALORES MÁXIMOS DE CORRENTE TRANSITÓRIA.

Pontos do Sistema em Análise	Regime c/ 2 BC600 (A)	Corrente Máxima				
		Durante a Energização (p.u.)				
		Sem bancos	BC fixo 1200	BC fixos 2x600	BC auto 1200	BC fixo 600 + auto 600
Subestação	275	3,69	4,83	4,77	2,83	4,33
T45 Lado primário concessionária	9	1,24	1,33	1,31	1,15	1,30
T3 concessionária	0,03	1,16	1,22	1,22	1,14	1,21
Tp1 lado primário particular	148	4,19	3,61	3,55	12,25	10,14

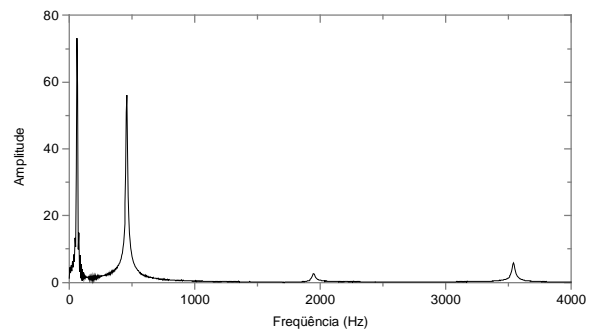
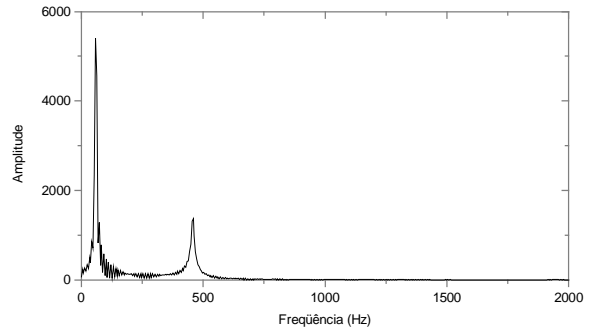


Fig. 5 Espectro de frequência das formas de ondas da tensão e corrente anteriormente ilustradas.

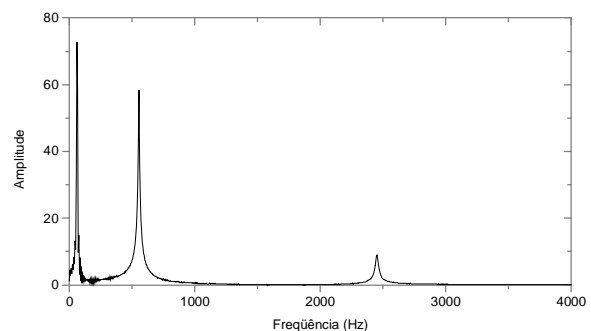
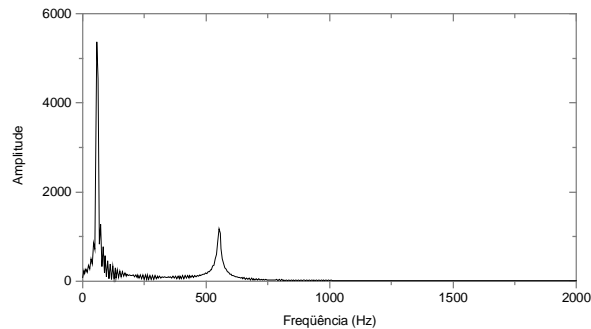


Fig. 6 Espectros de frequência para as ondas da tensão e corrente - energização do alimentador sem B.C. na rede.

V. MEDIÇÕES EM CAMPO DO CHAVEAMENTO DE UM B.C. AUTOMÁTICO

A fig. 7 ilustra os transitórios de corrente e tensão, medidos no barramento de 15 kV das instalações de uma indústria. Os registros foram feitos através do

equipamento BMI (Basic Measuring Instrument), modelo 7100, durante o chaveamento de um B.C. automático de 900 kVAr, instalado no alimentador.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas as sobretensões e as sobrecorrentes que surgem quando da energização de um alimentador real do sistema elétrico de distribuição da CPFL (Cia Paulista de Força e Luz). Suas intensidades foram comparadas com relação às várias condições em que bancos de capacitores possam ser instalados ao longo dos alimentadores de um sistema de distribuição real.

Durante as simulações, através do ATP, foram observados os seguintes aspectos:

- Mesmo ocorrendo valores de sobretensões transitórias menores com a utilização de B.C. automáticos (caso do 1200 kVAr), deve-se avaliar se isto traz os ganhos de qualidade necessários ao sistema, já que durante a própria energização do alimentador sem B.C. pode-se obter valores de sobretensão de intensidades próximas daquelas verificadas com B.C. fixos instalados.
- A condição com dois B.C. de 600 kVAr mostrou-se mais danosa ao sistema, em relação à intensidade das sobretensões e sobrecorrentes transitórias, do que quando considerado um único B.C. automático de 1200 kVAr.
- Altas correntes transitórias foram verificadas na saída do alimentador e junto às instalações particulares considerando-se todas as cargas, bem como, os capacitores das instalações particulares, permanentemente ligados.
- As sobretensões e as sobrecorrentes transitórias propagaram-se para o lado secundário dos transformadores de distribuição, com intensidades próximas àquelas observadas no lado primário.
- Deve ser avaliada a perda de vida útil dos ativos do sistema elétrico, quando submetidos frequentemente às altas correntes transitórias, durante vários milissegundos.
- O espectro de frequência das ondas mostraram que os componentes harmônicos, que surgem nas várias situações simuladas, podem ser sensivelmente diferentes tanto em relação às frequências quanto em relação à intensidade de cada componente, todavia com dominância da frequência de 60 Hz.
- É importante o entendimento dos fenômenos transitórios, que podem afetar a qualidade da energia elétrica, para que as concessionárias possam identificá-los e propor medidas que promovam sua mitigação.

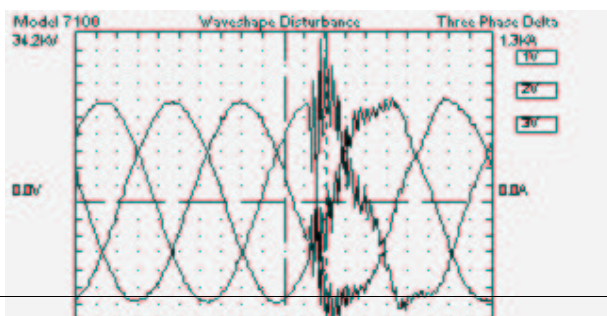


Figura 6/7

Fig. 7. Ondas de tensão e corrente medidas durante o chaveamento de um B.C. automático num alimentador.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), ao Dept. de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, bem como à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo suporte financeiro e técnico que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.J. Sullivan, T. Vardell, B. N. Suddeth, A. Vojdani, "Interruption Costs, Customer Satisfaction and Expectations for Service Reliability", *IEEE Trans. on PAS*, vol. 11, no. 2, May 1996, pp. 989-995.
- [2] A. J. Schultz, I. B. Johnson, N. R. Schultz, "Magnification of Switching Appears", *AIEE Trans. on PAS*, vol. 77, February 1959, pp. 1418-1426.
- [3] M.F. McGranaghan, R. M. Zavadil, G. Hensley, T. Singh, M. Samotyj, "Impact of Utility Switched Capacitors on Customer Systems - Magnification at Low Voltage Capacitors", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, April 1992, pp. 862-868.
- [4] G. Olivier, I. Mougharbel, G. Dobson-Mack, "Minimal Transient Switching of Capacitors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, October 1993, pp. 1988-1994.
- [5] R. S. Aradhya, S. Subash, K. S. Meera, "Evaluation of Switching Concerns Related to Shunt Capacitor Bank Installations", *IPST'95* -

International Conference On Power System Transients, Lisbon, September 3-7, 1995.

- [6] D. M. Dunsmore, E. R. Taylor, B. F. Wirtz, T. L. Yanchula, "Magnification of Transient Voltages in Multi-Voltage-Level, Shunt Capacitor Compensated, Circuits", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, April 1992, pp. 664-673.
- [7] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power System*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [8] R. C. Van Sickle; J. Zaborszky (1951). *Capacitor Switching Phenomena*, *AIEE Transactions, PAS*, vol. 70, pp. 151-159.
- [9] A. A. Girgis, C. M. Fallon, J. C. P. Rubino, R. C. Catoe, "Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 6, November/December 1993, pp. 1184-1188.
- [10] R. A. Jones; H. S. Fortson Jr. (1993). "Consideration of Phase-to-Phase Surges in the Application of Capacitor Banks", *IEEE Transactions on Power Delivery, PWRD* - vol. 1, no. 3, pp. 240-244.
- [11] T. E. Grebe (1995). "Technologies for Transient Voltage Control During Switching of Transmission and Distribution Capacitor Banks", *IPST'95-International Conference On Power System Transients, Lisbon, September 3-7.*
- [12] T. A. Bellei, R. P. O'Leary, E. H. Camm, "Evaluating Capacitor-Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable-Speed Drives Due to Voltage Magnification", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, July 1996, pp. 1373-1378.
- [13] C. J. Santos; D. V. Coury; M. C. Tavares; M. Oleskovicz. "An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System". *IPST'01 - International Conference On Power System Transients, Rio de Janeiro, 24-28 de junho, 2001.*
- [14] R. A. Adams, S. W. Middlekauff, E. H. Camm, J. A. McGee, "Solving Customer Power Quality Problems Due to Voltage Magnification", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, October 1998, pp. 1515-1520.