

ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE REDUÇÃO DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Daphne D. L. T. Barros – daphne.barros@ee.com.br

Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio de Veloso, 882, Bodocongó

58109-970 – Campina Grande - PB

Damásio Fernandes Jr - damasio@dee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio de Veloso, 882, Bodocongó

58109-970 – Campina Grande - PB

Resumo: Neste trabalho será apresentado um estudo comparativo entre métodos de redução de sobretensões transitórias devido a manobras de energização de linhas de transmissão. O estudo analisará o desempenho de três técnicas: pára-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado. Além disso, será avaliado o desempenho destas três técnicas em duas situações: com linhas de transmissão não transpostas e com linhas de transmissão com uma transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. O desempenho dos métodos também será avaliado segundo o grau de compensação reativa da linha. Para validar o estudo serão usados dados reais de linhas de transmissão e de equipamentos elétricos. A análise comparativa entre os métodos será feita a partir dos resultados de simulações realizadas com o programa ATP/EMTP.

Palavras-chave: Linha de transmissão, Sobretensões transitórias, Transposição de linha, Religamento trifásico, Métodos de redução de sobretensões transitórias.

1 INTRODUÇÃO

As sobretensões de manobras em linhas de transmissão acarretam problemas no sistema, desde a degradação da qualidade da energia à redução do tempo de vida útil dos equipamentos do sistema. Desta forma, é imprescindível a utilização de métodos de redução de sobretensões para minimizar estes efeitos negativos.

O método comumente usado para redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão utiliza disjuntores com resistores de pré-inserção. Porém, experiências em campo demonstraram que o método apresenta baixa confiabilidade, além do custo associado à aquisição e manutenção dos disjuntores com resistores de pré-inserção (LEGATE *et al*, 1988), (RIBEIRO *et al*, 1989). Estas constatações impulsionaram pesquisas para o desenvolvimento de métodos mais eficazes e confiáveis para a redução dos níveis de sobretensões oriundas de manobra em linhas de transmissão. Dentre os métodos propostos, o método do chaveamento controlado tem tido maior destaque.

O chaveamento controlado de disjuntores é uma técnica que, baseada no monitoramento de sinais elétricos de referência, controla o instante de fechamento ou abertura dos contatos do disjuntor. Apesar de ter sido estudada há vários anos atrás, a sua implementação só se tornou possível recentemente devido ao avanço tecnológico na área de dispositivos eletrônicos

voltados para sistemas de potência, além da viabilidade em termos econômicos (FROEHLICH *et al*, 1997a).

Neste artigo será avaliado o desempenho de três métodos de redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão: resistores de pré-inserção, pára-raios e chaveamento controlado. Estes métodos serão avaliados em um sistema de 500 kV com uma linha não-transposta e com uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6 em manobras de religamento trifásico. Este estudo comparativo permitirá avaliar a influência da transposição em linhas de transmissão no desempenho dos métodos analisados. Além disso, também será avaliada a influência da compensação reativa da linha.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os sistemas elétricos de potência, apesar de operarem em regime permanente na maior parte do tempo, devem ser projetados levando-se em consideração a ocorrência de distúrbios. Em geral, as solicitações mais extremas que um sistema elétrico pode ser submetido são causadas por distúrbios de natureza transitória. Os fenômenos transitórios podem ocorrer devido a diversos fatores, podendo gerar sobrecorrentes, sobretensões, formas de onda anormais e transitórios eletromecânicos (D'AJUZ *et al*, 1987).

Para sistemas elétricos em Extra Alta Tensão (EAT) caracterizados por longas linhas de transmissão, como é o caso do SIN (Sistema Interligado Nacional), as sobretensões de manobra afetam diretamente a coordenação de isolamento (DANTAS, 2007). Desta forma, o estudo de métodos para redução da amplitude destas sobretensões é de grande importância para o setor elétrico.

2.1 Manobras de religamento

O religamento de linhas de transmissão ocorre, em geral, quando há interrupção do fornecimento de energia elétrica de forma inesperada. Neste caso o religamento automático é efetuado a fim de colocar o sistema em funcionamento o mais rápido mais possível. Devido ao retardo no início de fechamento dos contatos do disjuntor, a linha permanece um intervalo de tempo desligada, conhecido como “tempo morto”.

Ao desligar uma linha em vazio, devido ao seu comportamento predominantemente capacitivo, a corrente somente é interrompida quando passa por zero. Consequentemente, neste instante a tensão é máxima. Com isto, uma “carga residual” permanece na linha, e esta não é igual em todas as fases devido ao acoplamento eletromagnético entre elas. Desta forma, a primeira fase que teve sua corrente interrompida poderá apresentar uma tensão de até 1,3 p.u. Caso a linha seja religada antes do decaimento total da carga residual e o fechamento do disjuntor seja efetuado quando a polaridade da tensão está oposta a polaridade da carga, as sobretensões podem atingir até 5,0 p.u. (D'AJUZ *et al*, 1987).

Quando a linha é compensada por reatores em derivação, a carga residual passa a ter uma forma oscilatória que é causada pela troca de energia entre a capacitância da linha com a indutância do reator. A frequência de oscilação depende do grau de compensação da linha, e geralmente assume valores entre 30 e 55 Hz (FROEHLICH, 1997a). O grau de compensação é dado por:

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (1)$$

em que Q_r é a potência reativa indutiva associada aos reatores em derivação e Q_l é a potência reativa capacitiva associada à capacitância da linha. E a frequência de oscilação da carga residual é dada por:

$$f_{osc} = f_{nom} \cdot \sqrt{k} \quad (2)$$

em que f_{nom} é a frequência nominal do sistema.

2.2 Transposição de linhas de transmissão

A geometria de uma linha de transmissão é definida pelo número de condutores por fase, o modo como estão dispostos entre si, a distância entre eles e em relação à terra, entre outras informações. Esta geometria tem implicação direta no desequilíbrio dos sinais de tensão e de corrente nas fases, pois devido ao acoplamento eletromagnético entre os condutores, a tensão e a corrente em uma fase não serão iguais nas demais fases. A fim de minimizar o desequilíbrio entre as tensões e correntes de fase, realiza-se a transposição em linhas de transmissão. A transposição consiste, basicamente, em alterar a posição das fases por meio de mudanças nas posições físicas dos condutores de fase.

Na prática, o esquema de transposição utilizado é o com três torres de transposição, conforme mostrado na Figura 1. Este tipo de transposição também é conhecido como 1/6-1/3-1/3-1/6 devido ao comprimento de cada trecho da linha. Como é possível observar na Figura 1, a linha de transmissão é dividida em quatro trechos, onde o primeiro trecho possui 1/6 do comprimento da linha, o segundo trecho possui 1/3 do comprimento da linha, assim como o terceiro, e o último possui um 1/6 do comprimento da linha. Com este tipo de transposição, cada fase ocupa todas as posições na torre por comprimentos iguais, ou seja, por 1/3 do comprimento da linha.

Neste trabalho, os métodos de redução de sobretensões de manobras em linhas de transmissão serão avaliados em uma linha não-transposta e em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

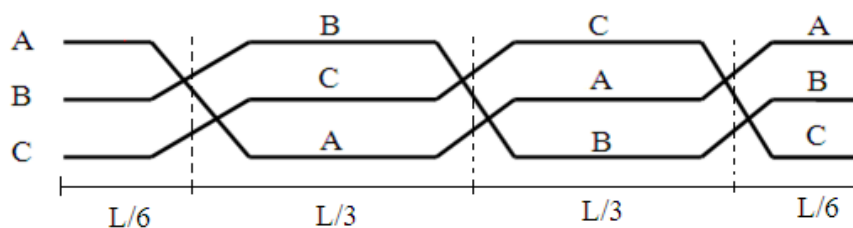


Figura 1 – Esquema de transposição com três torres de transposição.

3 SISTEMA ELÉTRICO MODELADO

O sistema elétrico de potência modelado para realizar a análise comparativa dos métodos de redução de sobretensões de manobra é fictício, porém os seus dados são baseados em dados reais obtidos do sistema elétrico de potência de 500 kV da CHESF (Companhia Hidro Elétrica de São Francisco). O esquema básico do sistema modelado é apresentado na Figura 2. Em seguida são dadas as especificações dos equipamentos do sistema usadas para realizar as simulações.

O sistema foi modelado no ATP (*Alternative Transients Program*), que é um programa de simulação digital usado para estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). O ATP é um dos programas do tipo EMTP

(*Electromagnetic Transients Program*), consistindo basicamente de uma continuação das versões anteriores do EMTP.

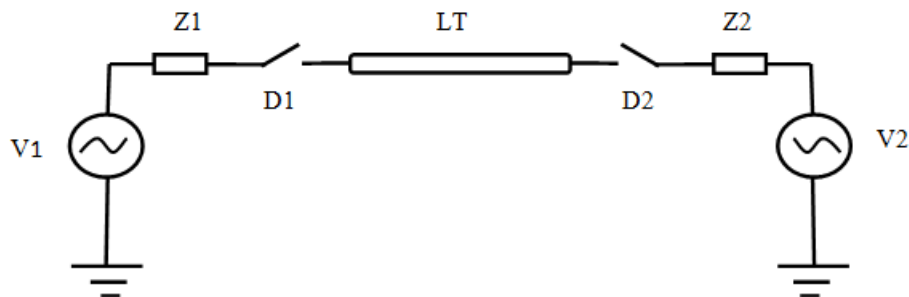


Figura 2 – Esquema básico do sistema elétrico de potência modelado.

Os dados de módulo e de fase das fontes de tensão utilizadas no sistema simulado são apresentados na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentados os dados das impedâncias das fontes.

Tabela 1 – Módulo e fase das fontes de tensão (Base 550 kV).

Barra	Módulo (p.u.)	Fase (°)
Fonte 1	1,00	0
Fonte 2	0,99	- 10

Fonte: (DANTAS, 2007)

Tabela 2 – Impedâncias das fontes.

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Fonte: (DANTAS, 2007)

Utilizou-se uma linha de transmissão de 400 km, a qual foi modelada segundo os seus dados de geometria, que são referentes a uma linha da CHESF (Linha de 500 kV São João do Piauí - Milagres). A geometria da linha é mostrada na Figura 3, e os dados dos condutores são apresentados na Tabela 3. Para modelar a linha de transmissão no ATP a partir dos seus dados de geometria, utilizou-se a rotina LINE CONSTANTS do ATP.

É importante destacar também que a linha foi segmentada em quatro trechos, tanto para modelar a linha não-transposta como para modelar a linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Devido ao esquema de transposição a linha foi dividida da seguinte forma:

- Primeiro trecho: 1/6 do comprimento total da linha (66,67 km);
- Segundo trecho: 1/3 do comprimento total da linha (133,33 km);
- Terceiro trecho: 1/3 do comprimento total da linha (133,33 km);
- Quarto trecho: 1/6 do comprimento total da linha (66,67 km).

Tabela 3 – Dados dos condutores da linha São João do Piauí – Milagres.

Parâmetros	Condutor fase	Condutor pára-raios
Tipo de cabo	Cabo Rail	Cabo EHS 3/8''
Diâmetro externo (cm)	2,96	0,914
Raio médio geométrico (cm)	1,1735	0,0302
Resistência CA (Ω)	0,0674	4,271

Fonte: (DANTAS, 2007)

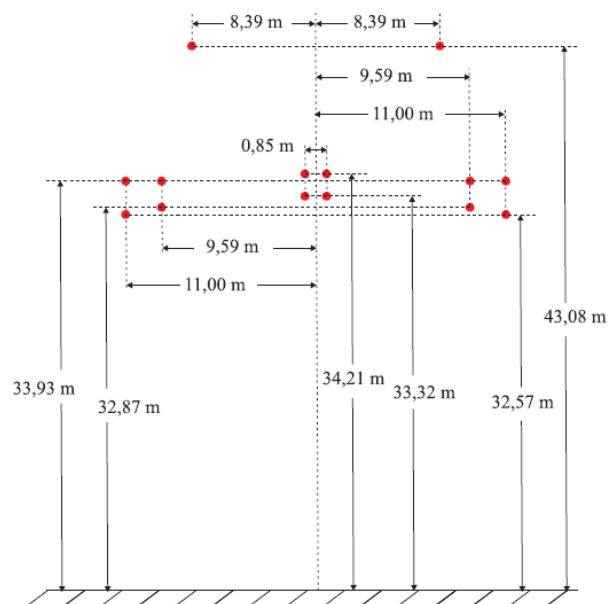


Figura 3 – Geometria da linha de 500 kV São João do Piauí – Milagres.

Fonte: (DANTAS, 2007)

Utilizaram-se pára-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV. Os dados de corrente e de tensão de sua curva característica são apresentados na Tabela 4. A partir destes dados o pára-raios foi modelado no ATP como uma resistência não-linear.

Tabela 4 – Características dos pára-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV.

Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
0,001	643,72
0,010	681,23
0,050	721,27
0,100	738,70
0,200	756,14
0,400	775,75
0,700	793,18
1,000	806,26
2,000	830,23
5,000	873,81

Fonte: (DANTAS, 2007)

Na Tabela 5 são apresentadas as especificações dos reatores usados na compensação de 30% (reator 1) e na de 60% (reator 2). Estes reatores foram modelados no ATP como elemento concentrado.

Tabela 5 – Valores dos reatores.

Reator	Resistência (Ω)	Reatância Indutiva (Ω)
Reator 1	6,5	2618,0
Reator 2	2,8	1122,0

Os resistores de pré-inserção foram modelados no ATP como elemento concentrado, com valor de resistência por fase de 400 Ω .

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações feitas no ATP para avaliar o desempenho dos métodos de redução de sobretensões na linha não transposta e na linha com transposição de 1/6-1/3-1/3-1/6 em manobras de religamento trifásico. São avaliados três casos de compensação reativa da linha de transmissão: Caso 1 – sem compensação; Caso 2 – linha com grau de compensação de 30%; Caso 3 - linha com grau de compensação de 60%.

O desempenho dos métodos na linha não-transposta e na linha com transposição será avaliado a partir das Figuras 4, 5 e 6.

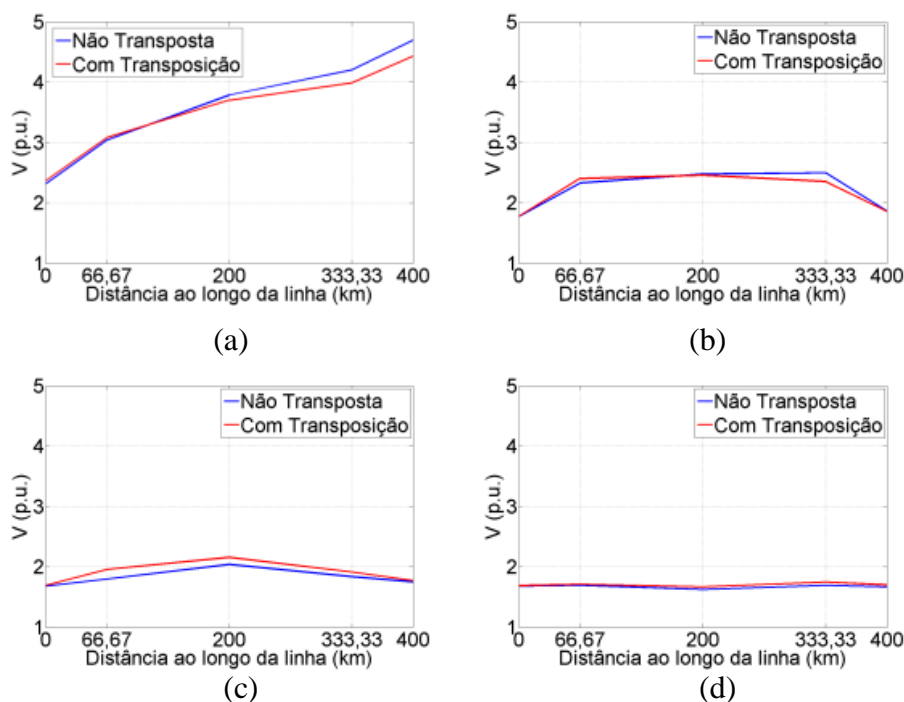


Figura 4 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de religamento para o Caso 1: (a) Sem método de redução, (b) Com para-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

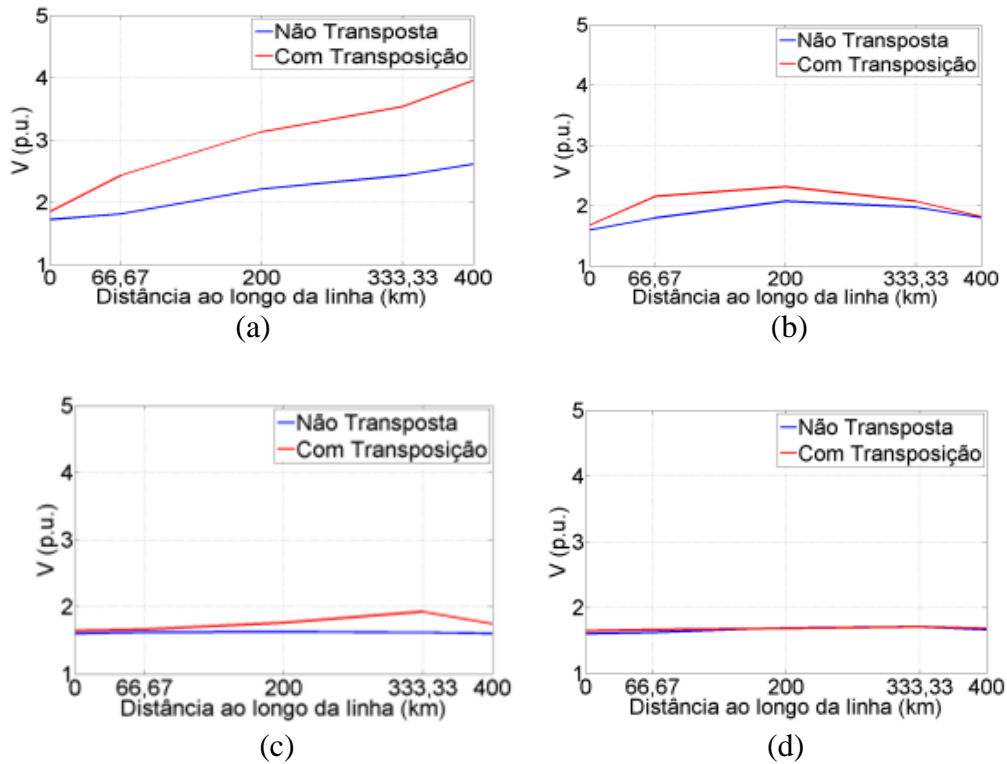


Figura 5 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de religamento para o Caso 2: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

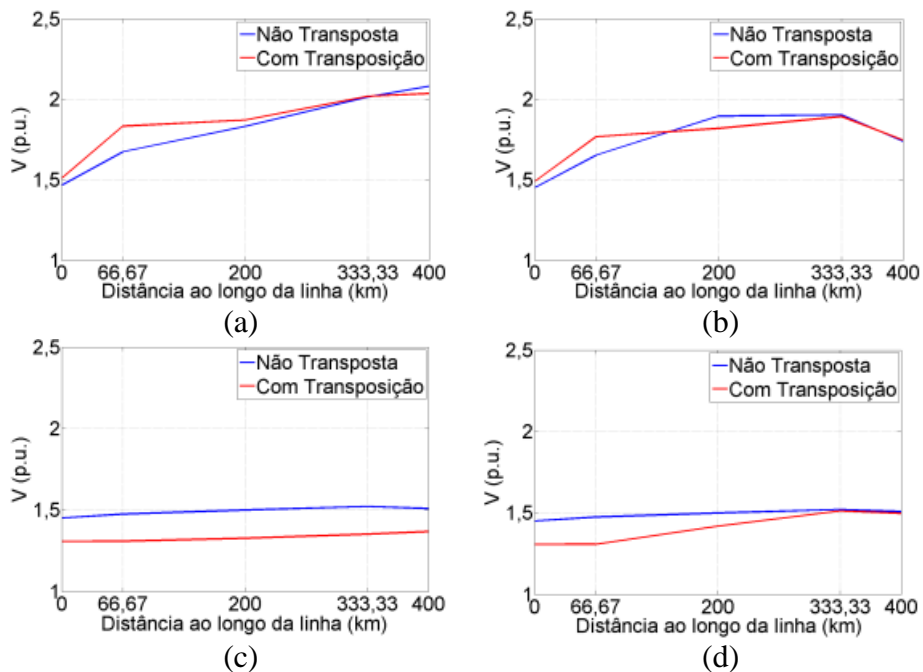


Figura 6 – Perfil de sobretensões ao longo da linha de transmissão em manobras de religamento para o Caso 3: (a) Sem método de redução, (b) Com pára-raios, (c) Com resistores de pré-inserção e com pára-raios e (d) Chaveamento controlado com pára-raios.

A amplitude das sobretensões em manobras de religamento de linhas de transmissão está diretamente associada com a tensão entre os contatos do disjuntor no instante em que ocorre o fechamento dos mesmos. Nas manobras de religamento trifásico, a compensação reativa tem grande influência devido à presença da carga residual na linha. Considerando-se estes dois aspectos, os resultados obtidos com a linha não-transposta e com a linha com transposição serão analisados.

No primeiro caso, quando a linha de transmissão não está compensada, observa-se que o comportamento das sobretensões na linha não-transposta não difere muito do que se observa na linha com transposição. Ao visualizar os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor no momento do religamento nas duas situações, verificou-se que os níveis de tensão são praticamente os mesmos, conforme pode ser visto na Figura 7.

No entanto, para o caso 2 observou-se que as maiores sobretensões ocorreram na linha com transposição. Ao verificar os níveis de tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no instante do religamento, observou-se que na linha com transposição estes níveis de tensão estavam bem mais elevados em comparação com o que se observou na linha não-transposta, como pode ser visualizado na Figura 8.

No terceiro caso, em que se tem um maior grau de compensação, observou-se, de maneira geral, que os métodos de redução de sobretensões obtiveram melhor desempenho na linha com transposição. Os níveis de tensão entre os contatos do disjuntor no instante em que se efetua o religamento, tanto na linha não-transposta como na linha com transposição, são mostrados na Figura 9. Como é possível visualizar, os níveis de tensão são praticamente os mesmos nas duas situações.

Portanto, com estes resultados foi possível constatar que quando os sinais de tensão sobre o disjuntor no instante de religamento são praticamente os mesmos em ambas as linhas, as sobretensões tendem a ser menores na linha com transposição, ou seja, os métodos de redução apresentam um desempenho relativamente melhor.

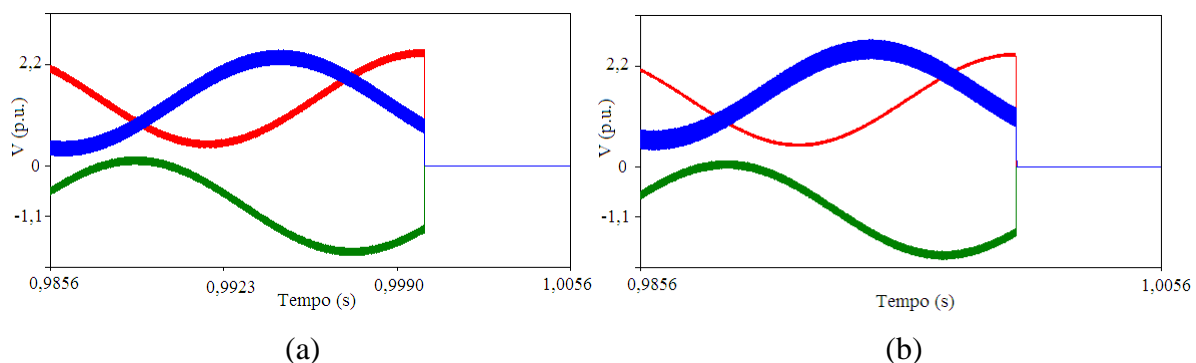


Figura 7 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no Caso 1 na: (a) linha não transposta, (b) linha com transposição.

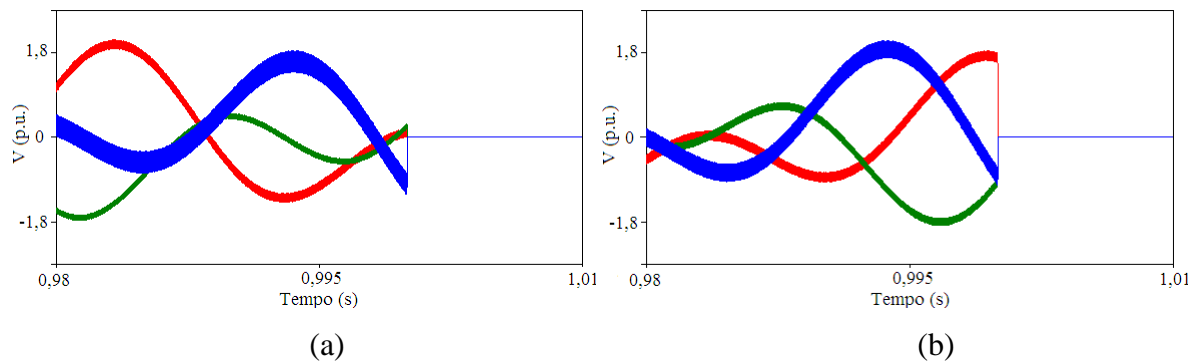


Figura 8 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no Caso 2 na: (a) linha não transposta, (b) linha com transposição.

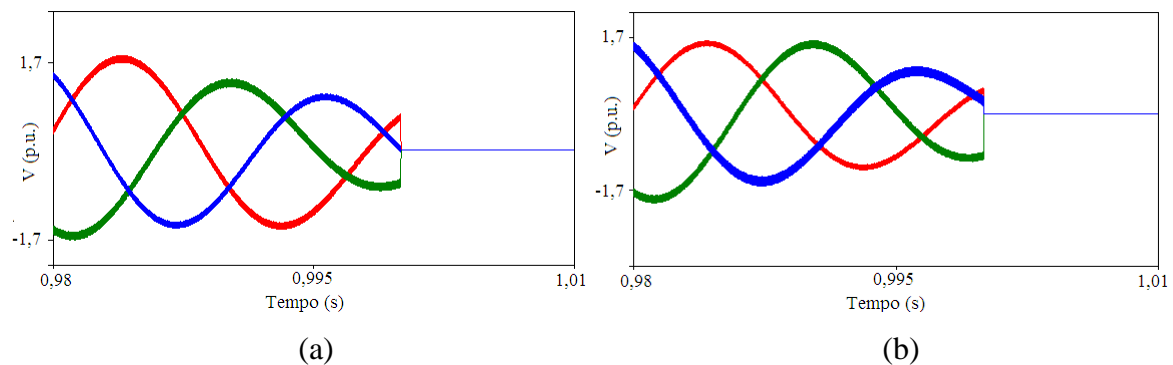


Figura 9 – Tensão entre os contatos do disjuntor do terminal emissor no Caso 3 na: (a) linha não transposta, (b) linha com transposição.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos a partir de simulações realizadas no ATP, constatou-se a importância dos métodos de redução de sobretensões. Quando o sistema está desprovido de qualquer método de redução de sobretensões, observou-se que as sobretensões podem chegar a 5,0 p.u. Estas sobretensões provocam a degradação da qualidade da energia e redução da vida útil dos equipamentos, o que compromete a confiabilidade do sistema elétrico. Portanto, a aplicação de técnicas para minimizar os efeitos destas sobretensões é indispensável.

Os três métodos estudados apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, foram capazes de reduzir as sobretensões. Dentre os três métodos, o chaveamento controlado merece destaque por ser um método mais confiável, além de ter apresentado desempenho superior em muitas situações.

O desempenho dos métodos foi avaliado em uma linha não-transposta e em uma linha com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Foi possível constatar que os métodos de redução foram mais eficientes na linha com transposição, exceto em um dos casos de simulação. Esta exceção foi compreendida ao verificar os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor no momento do religamento nas duas linhas, pois na linha com transposição os sinais de tensão estavam relativamente elevados quando ocorreu a manobra. Portanto, de um modo geral, constatou-se que os métodos de redução de sobretensões oriundas de manobras em linhas de transmissão apresentaram melhor desempenho em uma linha com transposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., AMON, J. F., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**. FURNAS, Rio de Janeiro, 1987.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Setembro de 2007.

FROEHLICH, K., HOELZL, C., STANEK, M., CARVALHO, A. C., HOFBAUER, W., HOEGG, P., AVENT, B. L., PEELO, D. F., SAWADA, J. H. “Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 2, p. 734–740, April 1997a.

LEGATE, A. C., BRUNKE, J. H., RAY, J. J., YASUDA, E. J. “Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 1, p. 223–231, January 1988.

LEUVEN EMTP CENTER. **ATP – Alternative Transients Program – Rule Book**, Heverlee, Belgium, July 1987.

RIBEIRO, J. R., MCCALLUM, M. E. “An Application of Metal Oxide Surge Arresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 282–291, January 1989.

A COMPARATIVE STUDY OF THE METHODS OF REDUCING TRANSIENT OVERVOLTAGES IN TRANSMISSION LINES

Abstract: *In this paper we present a comparative study of methods to reduce transient overvoltage due to maneuvers of power transmission lines. The study will examine the performance of three techniques: surge arresters, pre-insertion resistors and controlled switching. In addition, the performance of these three techniques will be evaluated on two situations: with non-transposed transmission lines, and transmission lines with a transposition of the type 1/6-1/3-1/3-1/6. The performance of the methods will also be evaluated according to the degree of the line reactive compensation. To validate the study, it will be used actual transmission lines and electrical equipment data. The comparative analysis between the methods will be obtained from the results of simulations performed with the ATP / EMTP program.*

Key-words: *Transmission lines, Transient overvoltage, Line transposition, Three-Phase Reclosing, Methods of reducing transient overvoltage.*