



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 22
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDINAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS NA
MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Patrícia Mestas Valero Maria Cristina Dias Tavares*

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO
UNICAMP**

RESUMO

A manobra de energização de linhas de transmissão pode causar sobretensões elevadas não somente ao longo da linha de transmissão como também nos equipamentos conectados. Um método tradicional para limitar sobretensões de chaveamento a níveis aceitáveis é o uso de disjuntores com resistores de pré-inserção. Este trabalho descreve o estudo feito em um sistema real de transmissão de 500 kV considerando duas alternativas para limitar sobretensões de chaveamento durante a energização da linha: o uso de pára-raios de óxido metálico nos terminais e ao longo da linha e o fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor.

As simulações digitais foram feitas usando o PSCAD/EMTDC. O grau de compensação em derivação é tomado como um parâmetro independente.

PALAVRAS-CHAVE

Chaveamento sincronizado, Pára-raios de óxido metálico, Resistor de pré-inserção, Sobretensões transitórias, PSCAD.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em um sistema de transmissão, os níveis elevados de sobretensões originados por fenômenos transitórios, não podem ser evitados, porém seus valores podem ser reduzidos para se tornar compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema.

A energização de linhas de transmissão é uma manobra freqüente e a amplitude das sobretensões é influenciada pela configuração do sistema bem como pelas características dos equipamentos, conseqüentemente, medidas de controle da sobretensão têm que ser adotadas fornecendo a proteção apropriada para o sistema.

Tradicionalmente as sobretensões transitórias advindas de manobras de energização são limitadas por métodos convencionais, no caso estes métodos consistem na utilização de resistores de pré-inserção nos disjuntores. Apesar de ser este um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia tendente a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção. (1,2,5)

Um método alternativo analisado para substituir os resistores de fechamento é a instalação de pára-raios de óxido metálico em ambos terminais da linha. As características eficazes de proteção, a elevada confiabilidade e a alta capacidade de dissipação de energia dos modernos pára-raios de óxido metálico permitem em muitos casos a limitação de sobretensões de chaveamento de linhas de transmissão de extra alta tensão (EAT). Uma redução adicional da sobretensão de chaveamento pode ser conseguida pelo uso de um pára-raios adicional no meio da

linha ou pela aplicação de pára-raios especiais com um nível de proteção menor e maior capacidade de dissipação de energia. (3,4)

Um outro método para reduzir as sobretensões devido à energização da linha de transmissão é controlar o instante de fechamento dos pólos do disjuntor. Isto se deve ao fato de que os surtos originados de manobras de energização serem dependentes das tensões no instante do seu fechamento, e são consideravelmente reduzidos se estas tensões forem próximas de zero. Experiências positivas de campo têm sido obtidas durante os últimos anos com equipamentos de sincronização usados para controlar manobras de bancos de capacitores e reatores em derivação em sistemas de alta tensão. (1,2,5)

O objetivo do presente trabalho visa estimar os níveis de sobretensões geradas em uma linha de transmissão durante a manobra de energização em vazio. Tal levantamento é fundamental para inferir o desempenho do resistor de pré-inserção e/ou pára-raios versus o chaveamento controlado de disjuntores para finalmente fazer uma análise comparativa destas três tendências de mitigação de sobretensões e determinar as melhores condições técnicas para a otimização do processo de energização.

2.0 - SISTEMA ANALIZADO

A modelagem e simulação do sistema foram representadas no PSCAD/EMTDC, (Power System Computer Aided Design) programa que permite uma adequada representação da dependência dos parâmetros longitudinais da linha de transmissão em função da variação com a frequência (6), tendo-se como base para o estudo um sistema elétrico baseado em um sistema real de 500 kV de 1000 km. (Figura 1)

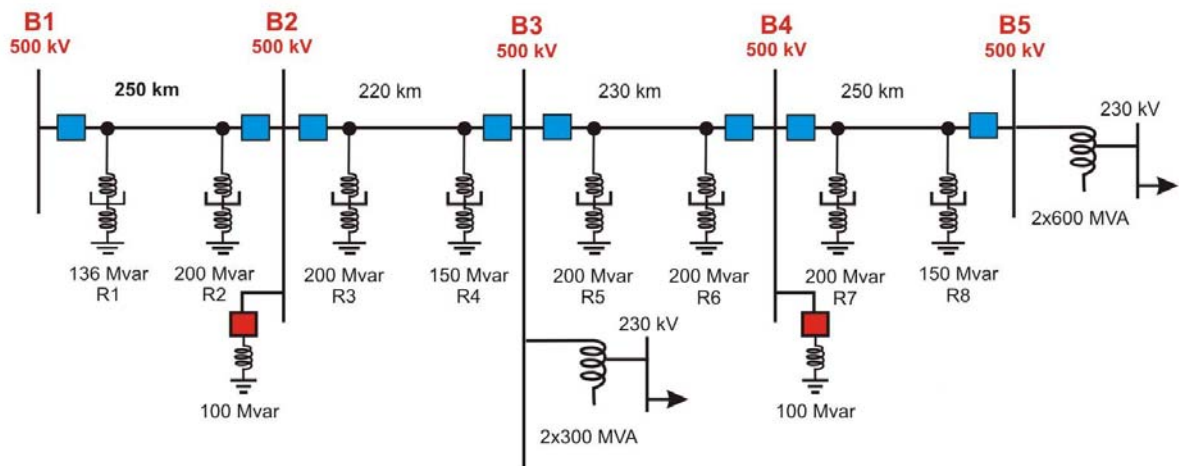


FIGURA 1- Esquema básico do sistema elétrico de 500 kV analisado

Os parâmetros da linha calculados para a frequência fundamental (60 Hz) foram calculados usando a rotina LINE CONSTANT do PSCAD e são apresentados na Tabela 1. A linha foi suposta idealmente transposta e os parâmetros longitudinais foram modelados com representação da dependência com a frequência (modelo das fases). (6)

TABELA 1 - Parâmetros de linha – 60 Hz

componentes	longitudinal (Ω/km)	transversal ($\mu\text{S}/\text{km}$)
não homopolar	$0.0161 + j 0.2734$	$j 6.0458$
homopolar	$0.4352 + j 1.4423$	$j 3.5237$

A energização da linha se realiza por trechos, supondo que a barra a montante da manobra já se encontra estabilizada e em níveis adequados de tensão antes da energização do trecho seguinte. As manobras foram realizadas no último trecho da linha que corresponde a um comprimento de 250 km, no sentido da Barra B4 → Barra B5 e a tensão de pré-manobra foi de 1,00 p.u. e 0,95 p.u. para 70% e 95% de compensação reativa em derivação respectivamente.

As sobretensões transitórias foram registradas em 7 pontos do trecho de linha B4 → B5, nos dois terminais e em 5 pontos intermediários.

3.0 - PÁRA-RAIOS

Os pára-raios de oxido metálico são dispositivos de proteção contra sobretensões de manobra e sobretensões atmosféricas que atuam como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível pré-estabelecido possam alcançar aos equipamentos para os quais fornecem proteção. Neste trabalho somente a proteção da sobretensão de manobra é considerada.

Considerando que os modernos pára-raios de oxido de zinco (ZnO) possuem níveis de proteção menores e alta capacidade de dissipação de energia, estas características podem fornecer um dispositivo potencialmente mais econômico e muito simples para a redução de sobretensões de manobra. Esta redução pode alcançar melhores resultados utilizando pára-raios adicionais no meio da linha ou com a aplicação de pára-raios especiais com menor nível de proteção e alta capacidade de dissipação de energia. (3,4)

Todos os pára-raios foram modelados apropriadamente de acordo com sua curva característica V-I. Nos casos simulados o pára-raios de oxido metálico assumidos foram:

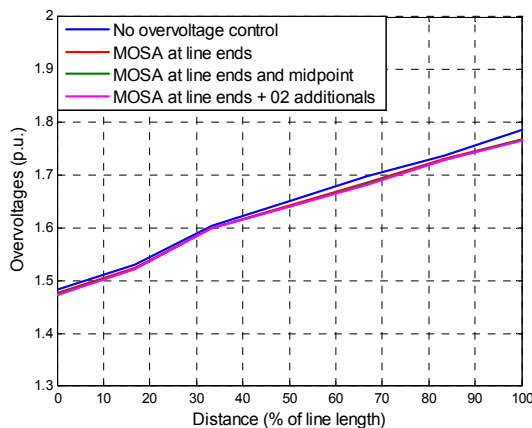
- Pára-raios de tensão nominal 420 kV, com nível de proteção 830 kV at 2 kA, que normalmente são especificados para as linhas de transmissão de 500 kV nos sistemas de Brasil.
- Pára-raios de tensão nominal de 396 kV, com nível de proteção de 783 kV at 2 kA.
- Pára-raios de tensão nominal de 360 kV, com nível de proteção de 742 at 2 kA.

Os pólos do disjuntor de circuito foram fechados quando a tensão em cada fase estava no seu máximo, simulando a condição mais severa da sobretensão. Os perfis da sobretensão ao longo das linhas são dados para 70% e 95% da compensação reativa em derivação e para os quatro casos considerados como segue:

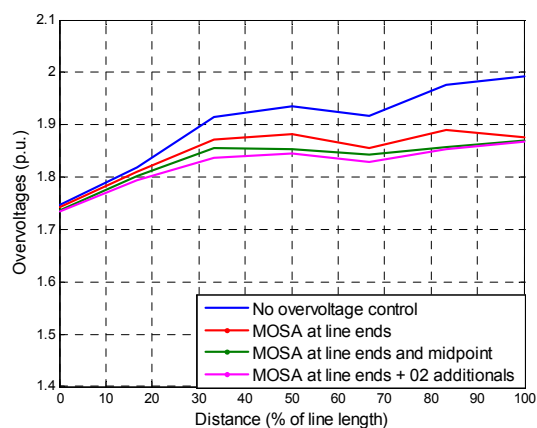
- Sem pára-raios para limitar as sobretensões
- Pára-raios localizados nos terminais da linha
- Pára-raios localizados nos terminais e no meio da linha
- Pára-raios localizados nos terminais e em dois pontos intermediários correspondentes a 1/3 e 2/3 do comprimento da linha.

Pára-raios de tensão nominal 420 kV. Como pode ser observado na Figura 2- (a), para a linha com 95 % de compensação em derivação, o perfil de sobretensão ao longo da linha não foi reduzido notavelmente. No terminal remoto o nível de sobretensão es reduzido somente em 1,1%.

A energização da linha com 70% de compensação em derivação alcança níveis de sobretensão maiores, como es esperado, pelo que o desempenho dos pára-raios apresenta um melhor desempenho na redução de sobretensões. No terminal remoto o valor das sobretensões es reduzido em 5 %, mas não alcança o valor desejado de 1,7 p.u. (Figura 2-(b))



(a) 95% de compensação reativa em derivação



(b) 70% de compensação reativa em derivação

FIGURA 2. Perfis de sobretensões ao longo da linha usando pára-raios Ur = 420 kV Classe 5

Pára-raios com tensão nominal de 396 kV. De acordo ao perfil de sobretensão ao longo da linha segundo a Figura 3(a) e a Figura 3(b), utilizando este tipo de pára-raios a sobretensão no terminal remoto é reduzida em 6,15 % e 13,56 %, alcançando valores de 1,68 e 1,72 p.u. para linhas com 95% e 70% de compensação em derivação, respectivamente. Utilizando pára-raios com este nível de tensão nominal, um melhor desempenho em reduzir sobretensões es observada para ambos casos.

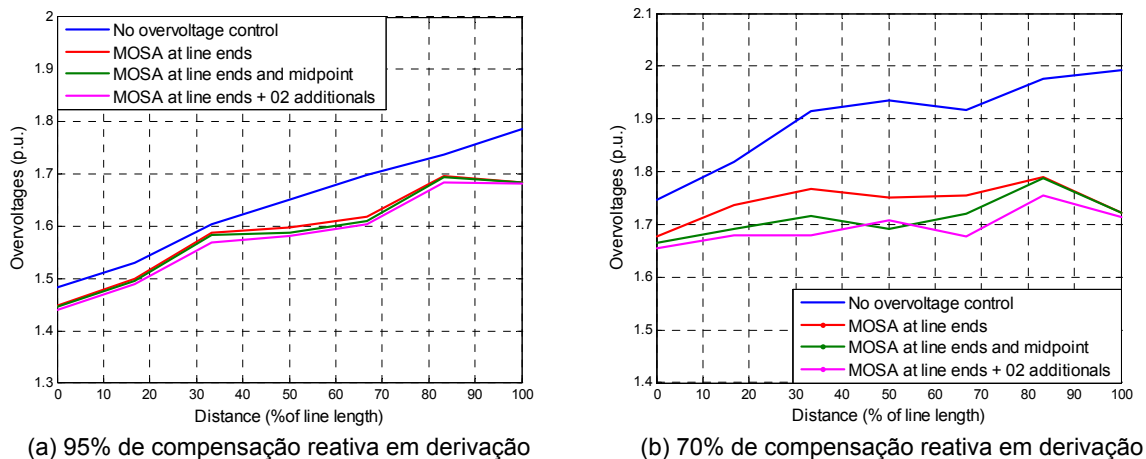


FIGURA 3. Perfis de sobretensões ao longo da linha usando pára-raios $U_r = 396$ kV Classe 5

Pára-raios de tensão nominal de 360 kV. A Figura 4(a) e a Figura 4(b) apresentam o resultado do perfil de sobretensão ao longo da linha usando pára-raios com tensão nominal de 360 kV. As sobretensões ao longo da linha são reduzidas, particularmente nos terminais sendo possível obter sobretensões de aproximadamente 1,5 p.u. Este caso é apresentado com uma finalidade ilustrativa e comparativa uma vez que um parâmetro importante para a seleção dos pára-raios é o nível de proteção, mas como os elementos ativos dos pára-raios são forçados continuamente pela tensão de serviço, a apropriada seleção é determinada pelo nível de proteção como também pelas características de operação do sistema, as sobretensões temporárias e a tensão máxima de operação.

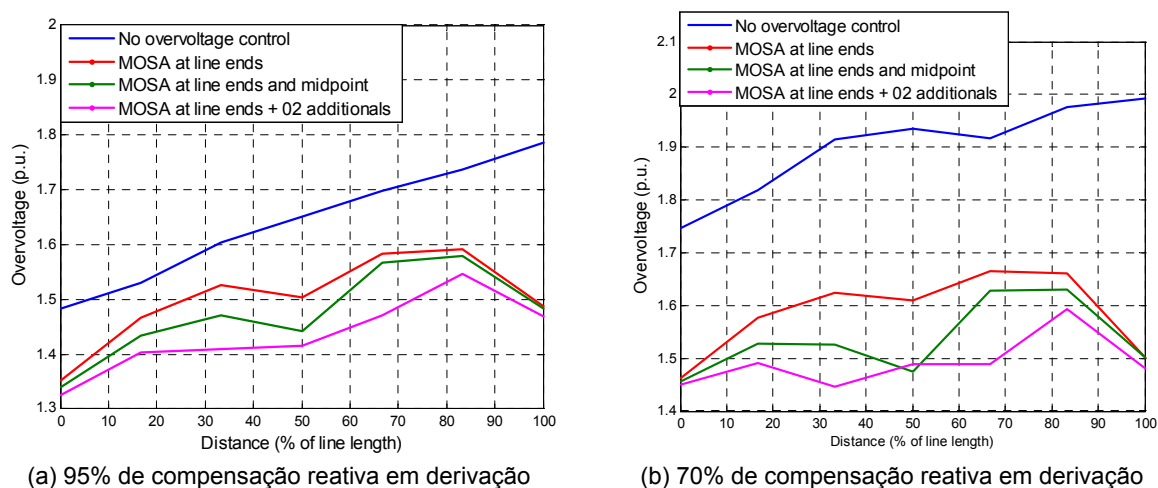


FIGURA 4. Perfis de sobretensões ao longo da linha usando pára-raios $U_r = 360$ kV Classe 3

Pode-se observar na Tabela 2 que a capacidade de absorção da energia dos pára-raios não esteve excedida em nenhuma simulação, ainda no caso de pára-raios com $U_r = 360$ Classe 3 (2,8 MJ). Os níveis de dissipação da energia são bastante menores da capacidade dos pára-raios.

TABELA 2 – Energia dissipada nos Pára-Raios

Pára-raios	Capacidade de absorção dos pára-raios Energia (kJ)	Compensação em Derivação de 95% Energia (kJ)	Compensação em Derivação de 70% Energia (kJ)
420 kV Classe 5	6400	6	120
396 kV Classe 5	6100	61	391
360 kV Classe 3	2800	266	815

4.0 - CHAVEAMENTO CONTROLADO

O chaveamento controlado é um método para reduzir os transitórios mediante o controle do tempo de iniciação das operações de fechamento dos pólos do disjuntor. O comando do fechamento dos pólos é definido para que o instante do fechamento dos pólos do disjuntor aconteça no ótimo instante do tempo relacionado com o ângulo de fase do circuito. No caso do chaveamento de linha descarregada este instante corresponde ao zero da tensão. Um circuito especial de controle inicia os comandos baseados na informação do sistema e nas características dos disjuntores. (1,2)

A simulação do controle sincronizado do disjuntor foi implementada usando os componentes SEQUENCERS que são parte de um grupo especial de elementos do controle do PSCAD/EMTDC com duas variantes:

- Fechamento sincronizado das fases quando a onda de tensão de cada fase cruza consecutivamente o zero da tensão.
- Fechamento da primeira fase (A) no instante do zero da tensão e fechamento subsequente das demais fases a cada 60° (fase C e B, sucessivamente).

Teoricamente estas duas condições não são as mesmas durante o chaveamento devido aos transitórios. No caso específico do sistema em estudo a diferença é mínima como é mostrada na Figura 5. A Figura 6 apresenta o perfil de tensão para os dois casos quando a linha tem uma compensação em derivação de 95%.

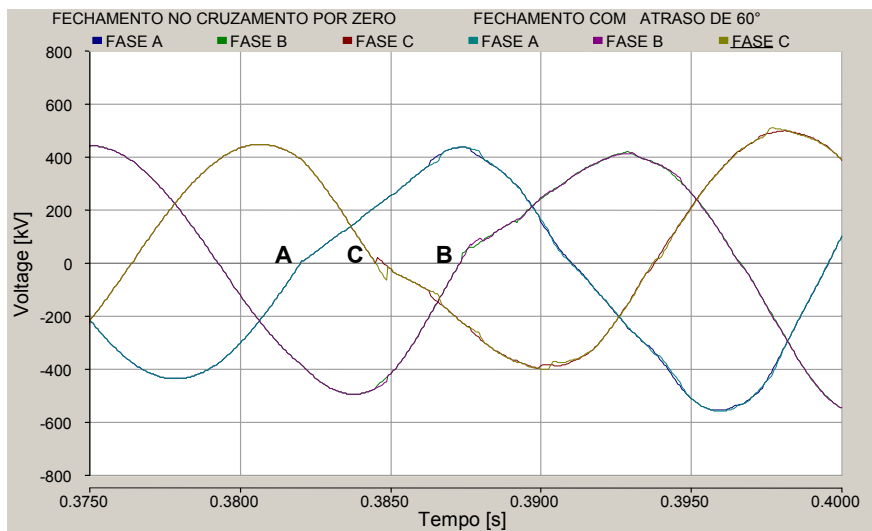


FIGURA 5. Forma da onda de tensão para as duas modalidades de fechamento sincronizado.

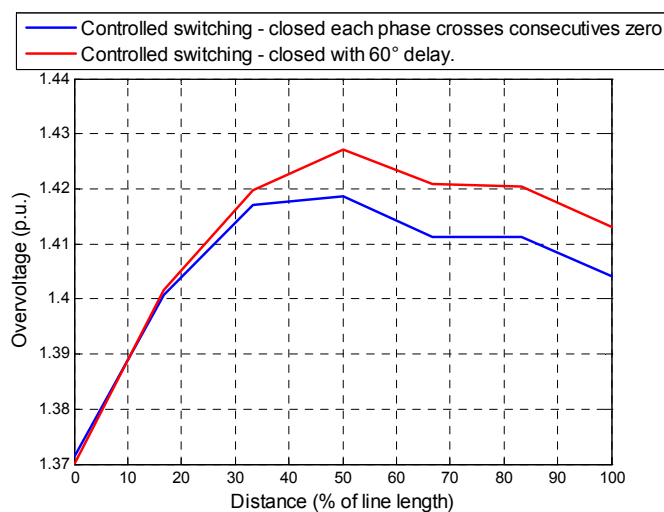
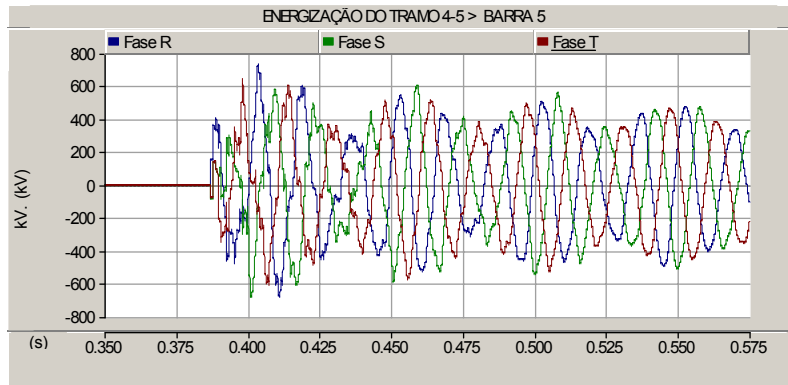
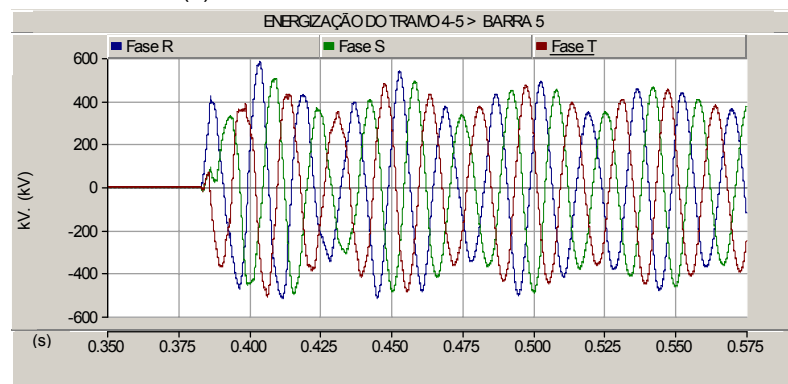


FIGURA 6. Perfil de tensão para as duas modalidades de fechamento sincronizado.

Para a linha com uma compensação de 95%, a figura 7(a) apresenta a forma das ondas de tensão durante a manobra de energização sem nenhum controle para mitigar sobretensões, o fechamento dos pólos do disjuntor se realiza na pior condição, ou seja, quando a onda de tensão passa pelo máximo. Já na Figura 7(b) se mostra a mesma manobra, mas utilizando o chaveamento sincronizado dos disjuntores para controlar as sobretensões e dizer quando a onda de tensão passa pelo zero. Pode-se observar que não somente a sobretensão foi reduzida com o chaveamento controlado como também a forma de onda apresenta menor conteúdo harmônico.



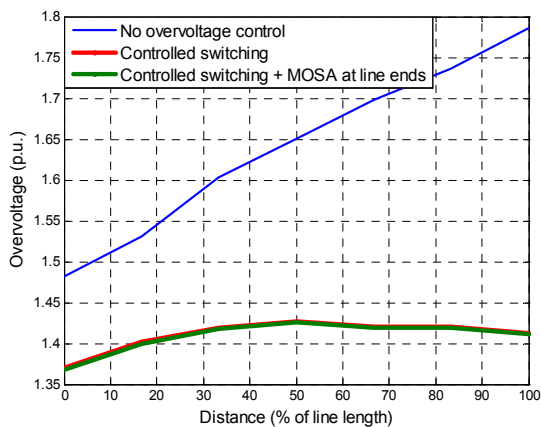
(a) Sem nenhum controle de sobretensão



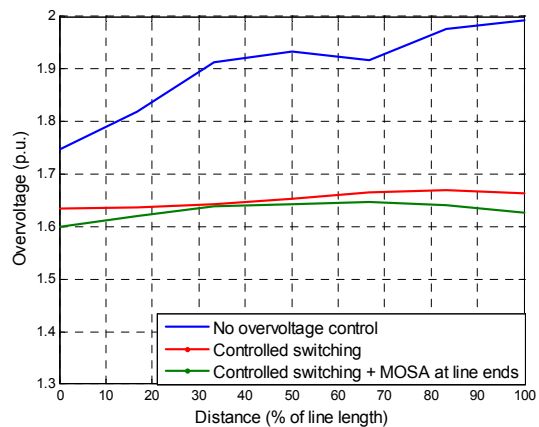
(b) Fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor

FIGURA 7- Formas de onda no terminal da linha na manobra de energização.

Os benefícios trazidos pelo chaveamento controlado são apresentados no perfil de tensão na Figura 8(a) e na Figura 8(b). A redução de sobretensões mediante este método foi importante. A sobretensão no terminal remoto é reduzida em 21 % e em 16 %, alcançando valores de 1,41 e 1,66 p.u para a linha com compensação de 95 % e de 70 %, respectivamente. No sistema estudado este método apresentou um desempenho melhor para a linha com 95 % de compensação em derivação e o uso dos pára-raios melhora somente no caso da linha com 70 % de compensação em derivação. Uma consequência da aplicação do chaveamento controlado é que os pára-raios geralmente estão menos forçados e a capacidade de dissipação de energia requerida é reduzida.



(a) 95% de compensação reativa em derivação



(b) 70% de compensação reativa em derivação

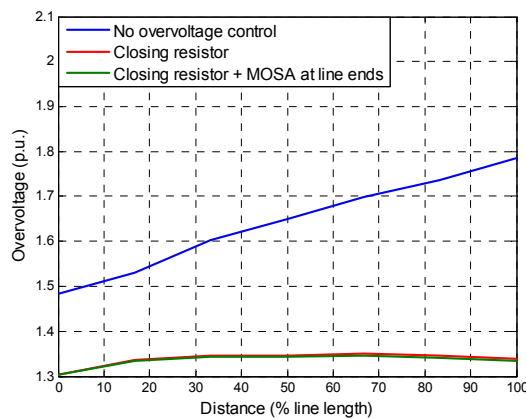
FIGURA 8. Perfis de sobretensões ao longo da linha usando chaveamento controlado.

5.0 - RESISTOR DE PRE-INSERÇÃO

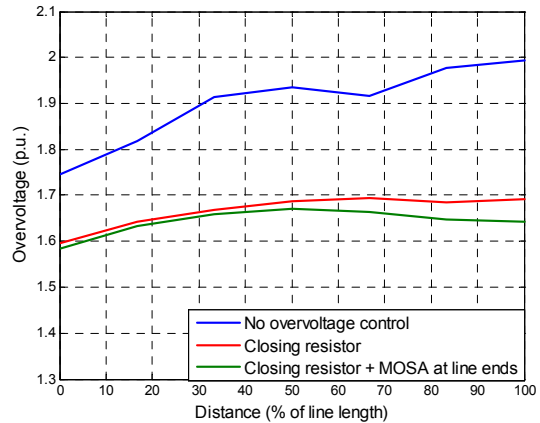
O método tradicional para limitar sobretensões de chaveamento nas manobras de fechamento e religamento de linhas de transmissão de EAT é utilizar disjuntores equipados com resistores de pré-inserção. Esta é ainda uma prática comum em Brasil onde quase todas as linhas de transmissão novas têm este tipo do disjuntor especificado.

Os resistores de fechamento são introduzidos em série com a linha, os quais normalmente são curto-circuitados após de 8 a 10 ms, desse modo mitigam as sobretensões transitórias. No caso em estudo, um resistor de 400-Ω com um tempo de inserção de 8 ms, foi instalado.

Usando o resistor de pré-inserção, a sobretensão no terminal remoto foi reduzida em 25 % e em 15 %, alcançando valores de 1,34 e 1,69 p.u para a linha com compensação da derivação de 95 % e de 70 %, respectivamente (Figura 9(a) e Figura 9(b)). Para o sistema em estudo este método apresenta um desempenho melhor para a linha com 95 % de compensação em derivação e os pára-raios ajudaram somente no caso com 70 % de compensação em derivação.



(a) 95% de compensação reativa em derivação



(b) 70% de compensação reativa em derivação

FIGURA 9. Perfis de sobretensões ao longo da linha usando resistor de pré-inserção.

6.0 - CONCLUSÕES

A limitação de sobretensões de chaveamento na manobra do energização de uma linha de transmissão de 500 kV foi conseguida mediante o uso de pára-raios de oxido metálico e fechamento controlado dos pólos do disjuntor. Estas técnicas podem substituir o uso do disjuntor equipado com resistores de pré-inserção e seus problemas associados.

As características de proteção e a alta capacidade de dissipação de energia dos modernos pára-raios ZnO permitem uma boa limitação das sobretensões de chaveamento na energização da linha, no entanto, esta redução pode alcançar melhores resultados utilizando pára-raios adicionais no meio da linha o com a aplicação de pára-raios especiais com menor nível de proteção e alta capacidade de dissipação de energia.

No caso específico estudado, utilizando o fechamento sincronizado dos pólos do disjuntor, não se observaram diferenças importantes para os dois casos de controle implementados que foram:

- Fechamento sincronizado das fases quando a onda de tensão de cada fase cruza consecutivamente o zero da tensão.
- Fechamento da primeira fase (A) no instante do zero da tensão e fechamento subsequente das demais fases a cada 60° (fase C e B, sucessivamente).

A generalização dos resultados não é recomendável, cada sistema deve ser estudado de forma específica e com suas particularidades.

7.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) CARVALHO, A.C.; LACORTE, M.; KNUDSEN O., Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of MO-arrester and Controlled Switching, International Conference on Energy Management and Power Delivery, Proceedings of EMPD'95, 1995.

- (2) FROEHLICH, K.; CARVALHO, A.C.; AVENT, B.L.; HOELZL, C.; HOFBAUER, W.; PEELO, D.F.; STANEK, M.; HOEGG, P.; SAWADA, J.H. Controlled Closing on Shunt Reactor compensated Transmission Lines - Part II IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 741 -746, April 1997.
- (3) MOBEDJINA, M.; JOHNNERFELT, J.; STENSTROM, L. Design and Testing of Polymer-Housed Surge Arresters, GCC CIGRE 9th Symposium, Abu Dhabi, Octobre, 1998
- (4) STENSTROM, L.; MOBEDJINA, M. Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters In: CIGRE 1998 sc 33 International Conference, Zagreb, 1998.
- (5) ESMERALDO P.C.V., AMON FILHO J., CARVALHO F.M.S., CARVALHO A.S.S., MORAIS A.S. Circuit-breaker requirements for alternative configurations of a 500 kV transmission system. IEEE Transactions on Power Delivery, v 14, n 1, Janeiro, 1999, p 169-175
- (6) PSCAD®/EMTDCTM vs 3 User'Guide, Manitoba HVDC Research Centre, January 2005.