

Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão

Karcus M. C. Dantas, Washington L. A. Neves, Damásio Fernandes Jr., Benemar A. Souza, e Luiz C. Fonseca

Resumo—Um método para chaveamento controlado de linhas de transmissão é apresentado com o intuito de reduzir os efeitos negativos causados por sobretensões de manobra, tais como a redução da vida útil dos equipamentos, a degradação da qualidade da energia fornecida pelo sistema elétrico e a imposição de restrições operativas tornando proibitivas algumas manobras. O método consiste no aprimoramento de técnicas já existentes e é implementado diretamente em um programa do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program), mais especificamente no ATP (Alternative Transients Program), fazendo uso da linguagem MODELS. Os instantes ótimos para o chaveamento de cada pólo do disjuntor são determinados de forma que o efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases seja minimizado. Os instantes ótimos determinados para o chaveamento de cada pólo são aqueles quando a tensão entre os contatos do disjuntor é zero e cuja dispersão entre o instante de fechamento do primeiro pólo e o instante de fechamento do último pólo seja a menor possível. Parte do SIN (Sistema Interligado Nacional) referente a ampliação da interligação Norte/Nordeste a ser efetivada até 2010 é utilizada para estudo de caso. Diversas condições de operação de chaveamento da linha são consideradas (energização e religamento tripolar de linhas com ou sem compensação e com ou sem carga residual). Os resultados obtidos via simulações digitais comprovam a eficiência do método em limitar as sobretensões de manobra a valores inferiores a 1,75 p.u. em 98% dos casos.

Palavras Chave—Chaveamento Controlado, Linhas de Transmissão, EMTP

I. INTRODUÇÃO

SOBRETENSÕES de manobra influenciam diretamente a coordenação de isolamento de sistemas elétricos caracterizados por longas linhas de transmissão em extra-alta tensão (EAT), a exemplo do Sistema Interligado Nacional (SIN). Desta forma, estudos relacionados aos meios para reduzir estas sobretensões são de extrema importância para o setor elétrico.

Tradicionalmente, disjuntores com resistores de pré-inserção têm sido utilizados para a redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão (LTs). No entanto, a aceitação desta tecnologia pelas concessionárias vem diminuindo com as experiências de campo, indicando baixa confiabilidade, além do custo agregado na manutenção dos disjuntores [1], [2]. A busca por alternativas para redução de sobretensões de manobra objetivando eliminar os resistores de pré-inserção é alvo de pesquisas e discussões na comunidade científica internacional do setor elétrico. Dentre estas alternativas destacam-se as técnicas de chaveamento controlado [3], [4], [5].

Este trabalho é financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através de uma bolsa de mestrado e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de um projeto do edital universal.

Karcus M. C. Dantas, Washington L. A. Neves, Damásio Fernandes Jr. e Benemar A. Souza fazem parte do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Brasil. (e-mail: karcus, waneves, damasio, benemar@dee.ufcg.edu.br). Luiz C. Fonseca é engenheiro da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. (e-mail: lfonseca@chesf.gov.br).

Chaveamento controlado é o termo utilizado para descrever o uso de equipamentos eletrônicos para controlar o fechamento e abertura mecânica dos contatos dos disjuntores em instantes ótimos [6]. Devido a viabilidade econômica e aos benefícios auferidos, este tema despertou interesse tanto das companhias quanto dos fabricantes de disjuntores [7], [8]. A importância do tema está relacionada com o fato de que o chaveamento controlado de linhas de transmissão pode levar a menores sobretensões e, conseqüentemente, uma redução nos efeitos negativos causados por estas sobretensões, tais como a degradação da qualidade da energia, a redução da vida útil dos equipamentos do sistema elétrico e a imposição de restrições operativas tornando proibitivas algumas manobras.

Neste trabalho apresenta-se um método de chaveamento controlado de LTs em vazio, considerando manobras usuais de energização e religamento tripolar, além de diferentes condições de operação para o chaveamento, tais como LTs com ou sem carga residual e LTs com ou sem compensação reativa. Simulações em um programa do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program) [9], mais especificamente o ATP (Alternative Transients Program) [10], são utilizadas para avaliar o método, o qual é implementado fazendo uso da linguagem MODELS, que proporciona uma interação dinâmica em tempo de execução com o próprio ATP, permitindo a simulação de dispositivos de controle tal como requerido para o desenvolvimento do trabalho. Parte do SIN, referente a ampliação da interligação Norte/Nordeste através do segundo circuito da LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí e da LT 500 kV São João do Piauí - Milagres, a qual está prevista para ser efetivada até 2010, é utilizada para estudo de caso.

II. PRINCÍPIOS DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

O fenômeno físico responsável pelas sobretensões de manobra em LTs é a propagação das ondas eletromagnéticas ao longo das linhas. A propagação da onda é iniciada no instante em que começa a circular corrente pelo disjuntor e a amplitude inicial da onda de tensão é a tensão de pré-arco. Conseqüentemente, a amplitude das sobretensões devido a manobras estão diretamente relacionadas com a amplitude da tensão de pré-arco, o que torna o chaveamento controlado um método eficiente para o controle de sobretensões.

Os efeitos negativos causados por estas sobretensões podem ser reduzidos controlando-se a abertura ou o fechamento dos contatos dos disjuntores de forma que a manobra seja realizada em um instante ótimo pré-determinado, tomando-se como referência sinais elétricos de tensão ou corrente. Como conseqüência das ondas viajantes, para o chaveamento de LTs, este instante ótimo ocorre idealmente quando a tensão entre os contatos do disjuntor for zero.

Neste trabalho será utilizado o chaveamento controlado apenas em manobras de fechamento como energização e religamento tripolar de LTs. Para tanto, tomaremos como sinal de referência a tensão entre os contatos do disjuntor a fim de que o fechamento de cada pólo seja ajustado para ocorrer em um instante onde esta tensão seja mínima. No entanto, para alcançar este objetivo, são necessárias diferentes estratégias de acordo com as condições de operação de chaveamento da linha de transmissão (energização ou religamento de linhas com ou sem carga residual e com ou sem compensação reativa) [4].

III. ESTRATÉGIAS PARA O CHAVEAMENTO CONTROLADO

Normalmente, o comando para energização ou religamento de linhas de transmissão é realizado em um instante aleatório ($t_{comando}$) em relação à forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor. Além disto, a manobra somente é efetivada após um certo período, comumente denominado tempo de operação do disjuntor ($T_{operacao}$). No entanto, quando um disjuntor é solicitado a realizar uma manobra deste tipo, antes que os seus contatos se acoplem fisicamente, pode ser iniciada uma corrente por meio do chamado pré-arco. O intervalo de tempo entre o instante em que o pré-arco é estabelecido e o instante em que ocorre o acoplamento físico dos contatos do disjuntor é denominado de tempo de pré-arco ($T_{pre-arco}$).

Na Figura 1 é ilustrado de forma simplificada a estratégia para controle de manobras de fechamento dos contatos de disjuntores, onde o efeito do pré-arco é desprezado e o instante ótimo (t_{otimo}) para o acoplamento físico dos contatos do disjuntor é no pico do sinal de referência. O procedimento consiste em controlar o instante $t_{comando}$ atrasando-o por um intervalo de tempo T_{atraso} de forma que t_{otimo} , já previamente determinado, ocorra em um instante $T_{atraso} + T_{operacao}$ depois de $t_{comando}$.

$T_{operacao}$ é determinado pelo intervalo de tempo entre a energização do circuito de fechamento do disjuntor e o acoplamento físico entre os seus contatos. Um valor típico para este intervalo é 50 ms [7], [11]. Já o intervalo T_{atraso} adicionado ao instante $t_{comando}$ pode ser determinado por três subintervalos:

- $T_{calcula}$: intervalo de processamento interno do sistema de controle do chaveamento para determinação do instante ótimo;
- $T_{pre-arco}$: nos casos em que o tempo de pré-arco é considerado;
- $T_{sincronizacao}$: intervalo para sincronização com o instante ótimo pré-determinado, considerando o $T_{operacao}$.

A seguir, são discutidas as estratégias para o chaveamento controlado de linhas de transmissão em EAT para cada condição de operação abordada neste trabalho.

A. Energização de Linhas de Transmissão

Geralmente, energizações e desligamentos de LTs são manobras programadas que podem ocorrer rotineiramente em sistemas de potência. No entanto, o tempo entre um desligamento e uma energização é suficiente para que possíveis cargas residuais presentes na linha sejam descarregadas.

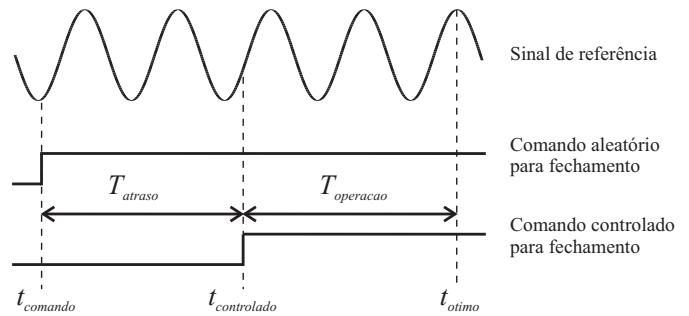


Fig. 1. Temporização do chaveamento controlado.

A condição em que não há a presença de carga residual na linha de transmissão no instante de fechamento do disjuntor é certamente a mais simples para a realização do chaveamento controlado. Neste caso, o instante ótimo ocorre na passagem por zero da tensão do lado da fonte. Assim, para cada fase, basta o monitoramento deste sinal de tensão o qual será o sinal de referência para o controle do instante ótimo para o chaveamento. Na Figura 2, estão indicados através de setas os possíveis instantes ótimos para uma fase da LT.

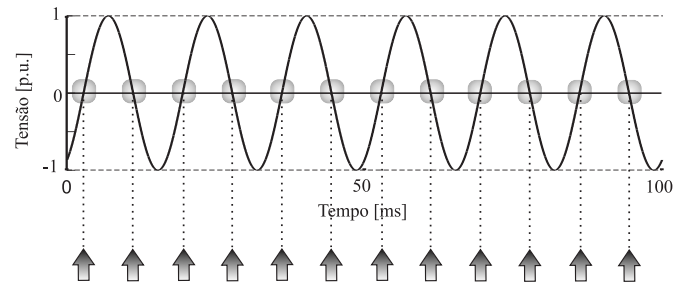


Fig. 2. Tensão entre os contatos do disjuntor para LTs sem carga residual.

B. Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação

Operações de religamento ou religamento-automático de LTs em EAT, normalmente são efetivadas com a presença de cargas residuais. No entanto, o comportamento da carga residual depende, dentre outros fatores, do grau de compensação da linha de transmissão.

No caso de LTs sem compensação, devido ao efeito capacitivo da linha, idealmente a carga residual permanece constante e a tensão na linha fica em torno de ± 1 p.u. Porém, este comportamento verifica-se apenas nas simulações quando o modelo computacional utilizado não leva em consideração a condutância da linha de transmissão para a terra [12]. Na prática, a carga residual possui uma atenuação praticamente exponencial, mas com uma constante de tempo relativamente alta, devido à baixa condutância da linha para a terra. Assim, após o tempo morto, a tensão na LT ainda apresenta valores significativos.

Por conseguinte, a estratégia apresentada para o religamento de LTs não se altera e o sinal de referência para cada fase é a tensão entre os contatos do disjuntor, a qual é ilustrada na Figura 3. Nesta figura também estão mostrados os possíveis instantes ótimos para o religamento de LTs com terminais em aberto e sem compensação.

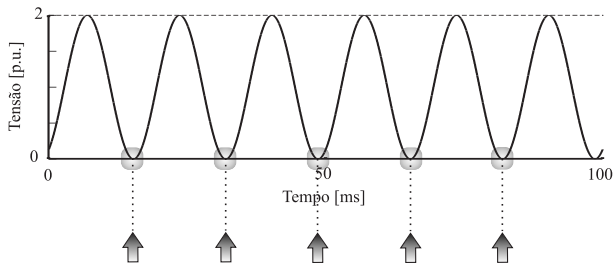


Fig. 3. Tensão entre os contatos do disjuntor para LTs em aberto sem compensação.

C. Religamento de Linhas de Transmissão com Compensação

Quando a linha de transmissão possui compensação em derivação, após a abertura da linha, a carga residual apresenta uma oscilação devido ao circuito formado entre a capacitância da linha e a indutância dos reatores em derivação. Esta oscilação tem uma frequência menor que a frequência nominal do sistema, tipicamente com valores entre 30 e 50 Hz, e depende do grau de compensação da linha.

Assim como para linhas sem compensação, o sinal de referência é a tensão entre os contatos do disjuntor, cuja forma de onda vai depender conseqüentemente do grau de compensação. Para graus de compensação elevados (Figura 4), a tensão entre os contatos do disjuntor apresenta uma forma de onda com pulsação bem definida, enquanto que graus de compensação menores apresentam uma forma de onda mais complexa (Figura 5). Em ambos os casos, os instantes ótimos para o chaveamento de cada fase, os quais também estão destacados nas Figuras 4 e 5, ocorrem na passagem por zero do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor e no período de menor pulsação deste sinal. Com isto, pode-se minimizar o efeito do pré-arco no momento do fechamento dos contatos do disjuntor, aumentando assim a confiabilidade do chaveamento controlado.

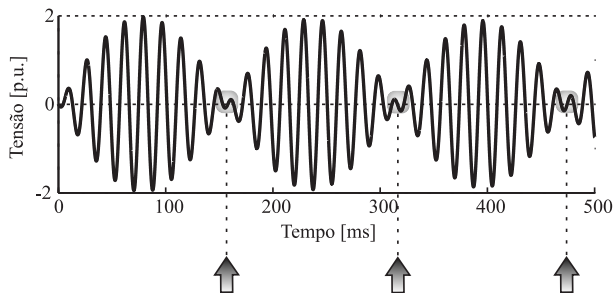


Fig. 4. Tensão entre os contatos do disjuntor para LTs em aberto com grau de compensação de 80%.

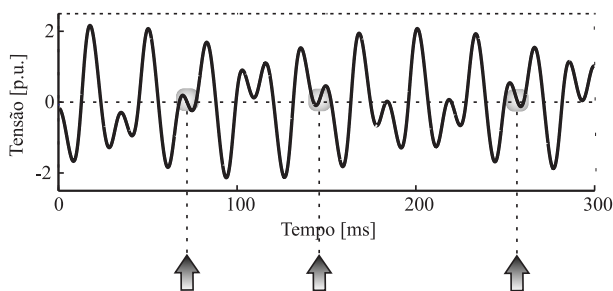


Fig. 5. Tensão entre os contatos do disjuntor para LTs em aberto com grau de compensação de 30%.

IV. MÉTODO DESENVOLVIDO

O método desenvolvido para o chaveamento controlado de linhas de transmissão baseia-se em estimar o sinal de referência em instantes futuros de forma que uma lista de possíveis instantes ótimos para cada fase seja prevista assim que o comando para a operação do disjuntor ocorra. Porém, ao contrário de outros métodos já existentes [7], o método ora apresentado determina os instantes ótimos para o chaveamento de cada pólo do disjuntor de forma que o efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases seja minimizado.

Para tanto, é necessário que os sinais de referência sejam obtidos a partir do sistema elétrico, a fim de que suas formas de onda sejam determinadas possibilitando assim as suas estimativas futuras. No entanto, como discutido na seção anterior, os sinais de referência podem variar significativamente a depender das condições de operação de chaveamento da LT. Desta forma, faz-se necessário uma discussão do método para cada uma destas condições.

A. Energização de Linhas de Transmissão

Inicialmente, os sinais de tensão do lado da fonte referentes a cada fase são obtidos e filtrados para que componentes de alta frequência sejam eliminadas. Em seguida, estes sinais são amostrados a uma frequência de 960 Hz. Logo, a periodicidade dos sinais de referência pode ser determinada através da detecção de duas passagens por zero consecutivas, obtendo assim, meio período destes sinais.

Este procedimento se repete em tempo real até que o comando para o chaveamento do disjuntor ocorra. Neste instante, tomando como referência o último valor determinado para o período e a última passagem por zero dos sinais de referência, possíveis instantes ótimos, relacionados com os instantes onde estes sinais são nulos, são determinados para cada fase.

B. Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação

Neste caso, apesar dos sinais de referência serem os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor, avalia-se as tensões do lado da fonte e do lado da linha separadamente. Os sinais de tensão do lado da fonte são estimados de forma semelhante a estimativa realizada para a manobra de energização de LTs. Já para os sinais de tensão do lado da LT, devido a presença de cargas residuais, apenas a polaridade da tensão da linha para cada fase é detectada. Desta forma, dependendo da polaridade, o instante ótimo a ser considerado pode situar-se no pico positivo ou negativo do sinal de tensão do lado da fonte.

C. Religamento de Linhas de Transmissão com Compensação

Para esta condição de operação de chaveamento da LT, devido ao caráter oscilatório da carga residual, as tensões do lado da fonte e do lado da linha também devem ser estimadas separadamente. Isto simplifica consideravelmente os esforços para estimativa dos instantes ótimos, pois os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor podem apresentar uma forma de onda complexa, o que não ocorre com os sinais de tensão do lado da fonte e do lado da linha, que apresentam um comportamento senoidal. Ainda, sinais senoidais podem ser estimados facilmente, bastando para isto conhecer as respectivas amplitudes, períodos e fases.

Desta forma, o método determina a frequência de oscilação da carga residual, e compara os sinais de tensão do lado da linha com os do lado da fonte, a fim de estimar os possíveis instantes ótimos para o chaveamento de cada fase. Para tanto, as etapas discutidas a seguir são realizadas.

Inicialmente, os sinais do lado da linha e do lado da fonte são obtidos e estimados fazendo uso do mesmo procedimento para a energização de LTs. Além disto, a amplitude de cada sinal é determinada detectando-se o valor de pico entre dois zeros consecutivos. Assim, no instante em que ocorre o comando para o chaveamento do disjuntor, tomando como referência os últimos valores determinados para os períodos, amplitudes e passagens por zero dos sinais do lado da linha e do lado da fonte, estes sinais são estimados em instantes futuros e postos em conjunto para que possíveis instantes ótimos referentes aos instantes de mínimo dos sinais de tensão entre os contatos dos disjuntores sejam determinados.

No entanto, os instantes ótimos a serem considerados não são aqueles que ocorrem apenas na passagem por zero dos sinais de referência, mas sim aqueles que ocorrem na passagem por zero e no período de menor pulsação destes sinais. Para se determinar estes instantes, verifica-se que para cada fase, eles ocorrem quando os sinais do lado da linha e do lado da fonte são iguais, ou seja, têm a mesma amplitude e além disto, também possuem derivada com o mesmo sinal. Na Figura 6 é ilustrada tal situação, onde o instante ótimo é indicado por uma seta. Pode-se visualizar que neste instante os sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte apresentam uma derivada com inclinação negativa, ou seja, as derivadas de ambos os sinais de tensão têm um valor negativo.

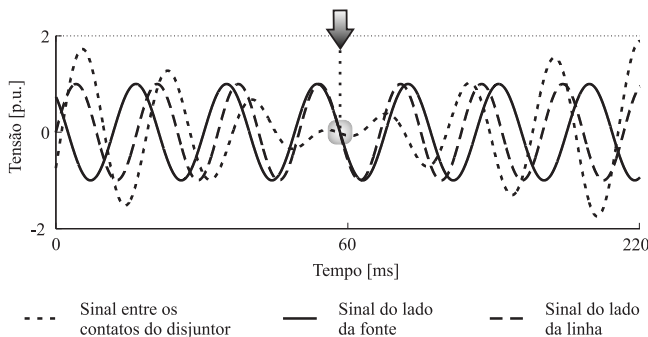


Fig. 6. Determinação do instante ótimo para LTs com compensação.

D. Acoplamento Eletromagnético

O acoplamento eletromagnético entre as fases nas linhas de transmissão pode ocasionar desvios nos instantes ótimos previstos, resultando em perda de eficiência no controle de sobretensões por meio do chaveamento controlado. Isto ocorre, pois quando o primeiro pólo do disjuntor é fechado, uma tensão é induzida nas outras fases, e o mesmo acontece com a terceira fase após a segunda fase ser energizada. A Figura 7 ilustra os desvios nos sinais de tensão entre os contatos dos disjuntores com relação aos instantes ótimos previstos para o chaveamento de cada fase, onde pode-se observar que o efeito do acoplamento é mais significativo para a terceira fase do que para a segunda, resultando em um desvio maior em relação ao instante ótimo previsto para a terceira fase.

Com o intuito de minimizar este efeito, os instantes ótimos para cada fase são determinados em conjunto e não individualmente. Ou seja, ao invés de considerar apenas o conjunto de instantes ótimos disponíveis mais próximos do comando para operação de chaveamento do disjuntor, o conjunto de instantes ótimos escolhidos para o chaveamento são aqueles cuja dispersão entre o instante de fechamento da primeira fase e o instante de fechamento da última fase é a menor possível.

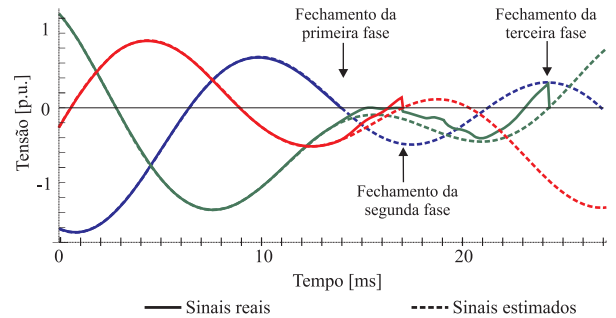


Fig. 7. Efeito do acoplamento eletromagnético nos sinais de tensão entre os contatos do disjuntor.

V. IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

No presente trabalho, o programa ATP é utilizado para implementar e avaliar o método desenvolvido para chaveamento controlado aplicado para minimizar as amplitudes das sobretensões oriundas de manobras de energização e religamento de linhas de transmissão em vazio. A seguir são discutidos os aspectos relacionados à implementação das rotinas para o chaveamento controlado fazendo uso da linguagem MODELS do ATP, a qual proporciona uma interação dinâmica em tempo de execução com o próprio ATP, permitindo a simulação de dispositivos de controle tal como requerido para o desenvolvimento do trabalho.

A rotina MODELS permite uma maior flexibilidade nas simulações, de modo que o estado do sistema pode ser modificado dinamicamente durante a simulação a partir de programas (ou modelos) implementados nestas rotinas. A MODELS é uma linguagem de uso geral, baseada na descrição de estruturas, ou modelos, com características semelhantes à programação orientada a objetos. Os modelos podem ser desenvolvidos separadamente, agrupados em bibliotecas e usados em outros modelos como blocos independentes [13].

Na Figura 8, apresenta-se o diagrama de blocos do esquema utilizado para implementação do método desenvolvido para chaveamento controlado de linhas de transmissão. Uma discussão sobre este diagrama é realizada a seguir.

A partir do sistema elétrico de potência, obtém-se os sinais de tensão relacionados com os sinais de referência para o chaveamento controlado. Estes sinais são aplicados a um filtro passa-baixas para que componentes de alta frequência sejam eliminados. Em seguida, os sinais filtrados são amostrados a uma frequência de 960 Hz e dependendo da condição de operação da LT, é realizada a detecção da passagem por zero dos sinais senoidais e também a detecção da polaridade da carga residual.

Com isto, os sinais de referência são estimados em instantes futuros e uma lista de possíveis instantes ótimos para cada fase é determinada. Posteriormente, com o comando para a operação de chaveamento do disjuntor, a lógica do controlador atua atrasando este comando por um intervalo de tempo necessário para a realização do chaveamento controlado. Por fim, o sinal de disparo para o disjuntor, o qual é comandado pela MODELS, é emitido controlando assim o comando para o fechamento dos seus contatos.

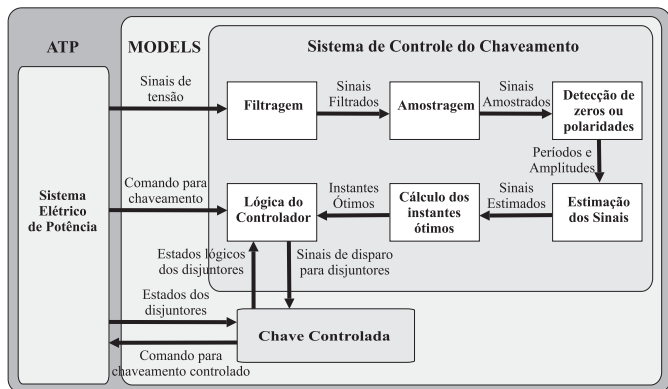


Fig. 8. Diagrama de blocos para o chaveamento controlado.

VI. AVALIAÇÃO DO MÉTODO

O método desenvolvido para chaveamento controlado de LTs é avaliado através de simulações digitais de manobras de energização e religamento tripolar de linhas de transmissão, considerando diferentes condições de chaveamento e fazendo uso do programa ATP para modelar parte do SIN referente a ampliação da interligação Norte/Nordeste através do segundo circuito da LT 500 kV Colinas - Ribeiro Gonçalves - São João do Piauí e da LT 500 kV São João do Piauí - Milagres, a qual está prevista para ser efetivada até o ano de 2010. O diagrama unifilar para esta interligação é apresentado na Figura 9. Para estudo de caso, será utilizada mais especificamente a LT 500 kV São João do Piauí - Milagres, que possuirá 400 km de extensão e reatores em derivação de 180 Mvar em cada extremidade. A LT foi modelada com parâmetros distribuídos constantes com a frequência e os seus respectivos dados são apresentados na Tabela I.

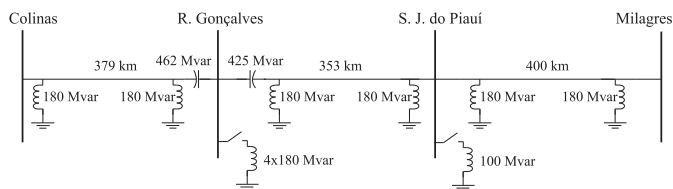


Fig. 9. Diagrama unifilar de parte do SIN referente a ampliação da interligação Norte/Nordeste a ser efetivada até 2010.

TABELA I

DADOS DE SEQUÊNCIA DA LT SÃO JOÃO DO PIAUÍ - MILAGRES.

Sequência	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ωC ($\mu\text{U}/\text{km}$)
Zero	0.4930	1.339	2.890
Positiva	0.0186	0.267	6.124

Para uma correta avaliação do método, é necessário que os disjuntores sejam representados de forma adequada, ou seja, através de dispersões estatísticas (σ) em relação ao tempo de operação [14]. Estas dispersões podem ser representadas por chaves estatísticas, modeladas no ATP, com distribuição de probabilidade Gaussiana. Além disto, outra característica importante a ser representada é a taxa de decaimento da susceptibilidade dielétrica dos disjuntores (dv_{disj}/dt). Os valores adotados para estes parâmetros foram:

- σ : 0,67 ms, considerando uma dispersão máxima no tempo de operação do disjuntor de 2 ms [6];
- dv_{disj}/dt : maior que o máximo valor da derivada da tensão do sistema, o que evita a ocorrência do pré-arco [15]. No entanto, para análise de um disjuntor específico, dv_{disj}/dt deve ser modelada apropriadamente [16].

Diferentes condições de operação para o chaveamento da LT São João do Piauí - Milagres foram avaliadas considerando Milagres como o terminal líder (primeiro terminal a ser religado) e um tempo morto de 500 ms para as manobras de religamento tripolar:

- Caso 1: Energização com reatores em ambas as extremidades (58% de compensação);
- Caso 2: Religamento com reatores em ambas as extremidades (58% de compensação);
- Caso 3: Energização com reatores apenas na extremidade de Milagres (29% de compensação);
- Caso 4: Religamento com reatores apenas na extremidade de Milagres (29% de compensação);
- Caso 5: Energização com reatores apenas na extremidade de São João do Piauí (29% de compensação);
- Caso 6: Religamento com reatores apenas na extremidade de São João do Piauí (29% de compensação);
- Caso 7: Energização sem reatores;
- Caso 8: Religamento sem reatores.

Além disto, o desempenho do chaveamento controlado é comparado com métodos tradicionais para redução de sobretensões de manobra, tais como resistores de pré-inserção e pára-raios. Considerou-se um valor de 400 Ω para o resistor de pré-inserção e um tempo de inserção de 8 ms. Já para os pára-raios, considerou-se um nível de proteção de 1,7 p.u. com localização nos terminais da linha de transmissão. Ainda, a aplicação do chaveamento controlado e de resistores de pré-inserção foi feita em conjunto com pára-raios.

Para cada caso avaliado, um total de 300 simulações estatísticas foram realizadas. Destas simulações, os valores de sobretensões, os quais têm probabilidade de ocorrência menor ou igual a 2% são apresentados na Figura 10. A partir destes valores estatísticos, os quais são normalmente utilizados para a coordenação de isolamento de sistemas elétricos [17], os benefícios do chaveamento controlado em relação à redução das sobretensões de manobra comparado com os demais métodos abordados, podem ser observados para diferentes condições de operação da LT. O desempenho do chaveamento controlado em conjunto com pára-raios elimina a necessidade da utilização de resistores de pré-inserção e limita as sobretensões ao longo da linha a valores inferiores a 1,75 p.u. em todos os casos considerados.

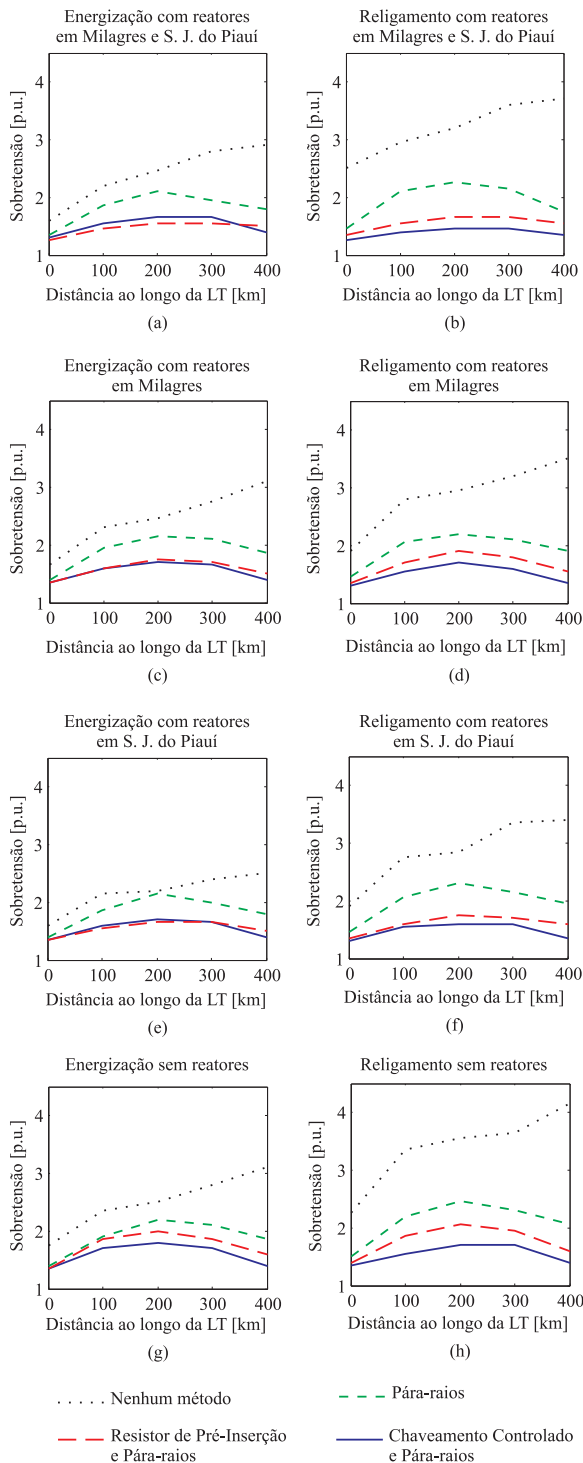


Fig. 10. Sobretensões ao longo da LT São João do Piauí - Milagres: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso 4; (e) Caso 5; (f) Caso 6; (g) Caso 7; (h) Caso 8.

VII. CONCLUSÕES

Um método para chaveamento controlado de linhas de transmissão foi apresentado e aplicado a parte do Sistema Interligado Nacional. Diversas condições de operação de chaveamento de LTs foram consideradas e o efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases foi minimizado. Os resultados comprovaram a eficiência do método em limitar as sobretensões de manobra em LTs em vazio com ou sem compensação.

Na situação mais adversa, as sobretensões foram limitadas a 1,75 p.u. em 98% dos casos. Como consequência, o chaveamento controlado pode propiciar uma melhoria na qualidade da energia elétrica e um aumento na vida útil de equipamentos, além de tornar possíveis operações antes proibitivas e eliminar o uso dos resistores de pré-inserção, aumentando assim a confiabilidade dos disjuntores e reduzindo os seus custos associados de fabricação e manutenção.

No entanto, o chaveamento controlado deve ser utilizado em conjunto com pára-raios localizados nas extremidades das linhas de transmissão. Ainda, os resultados ora obtidos, a priori não devem ser generalizados, e para cada sistema elétrico deve-se realizar uma análise detalhada do uso do método apresentado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores por suas valiosas sugestões.

REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Legate, J. H. Brunke, J. J. Ray, and E. J. Yasuda, "Elimination of closing resistors on ehv circuit breakers," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 3, no. 1, pp. 223–231, January 1988.
- [2] J. R. Ribeiro and M. E. McCallum, "An application of metal oxide surge arresters in the elimination of need for closing resistors in ehv breakers," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 282–291, January 1989.
- [3] CIGRE Task Force 13.00.1, "Controlled switching: A state of the art survey - part i," *ELECTRA*, no. 162, pp. 65–97, October 1995.
- [4] H. Ito, "Controlled switching technologies, state-of-the-art," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES*, 2002.
- [5] M. Sanaye-Pasand, M. Dadashzadeh, and M. Khodayar, "Limitation of transmission line switching overvoltages using switchsync relays," *International Conference on Power Systems Transients, Montreal, Canada*, June 2005.
- [6] CIGRE Working Group 13.07, "Controlled switching of hvac circuit breakers: Guide for application lines, reactors, capacitors, transformers - 1st part," *ELECTRA*, no. 183, pp. 42–73, April 1999.
- [7] K. Froehlich, C. Hoelzl, M. Stanek, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hoegg, B. L. Avent, D. F. Peelo, and J. H. Sawada, "Controlled closing on shunt reactor compensated transmission lines. part i and part ii," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, April 1997.
- [8] *Controlled Switching, Buyer's & Application Guide*, 2nd ed., ABB, Ludvika, Sweden, Sep 2006.
- [9] H. W. Dommel, *Electromagnetic transients program reference manual: EMTP theory book*, Portland, BPA, 1996.
- [10] *ATP - Alternative Transient Program*, Leuven EMTP Center, Herverlee, Belgium, 1987.
- [11] R. D. Garzon, *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*. New York, NY - USA: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [12] A. B. Fernandes, A. C. S. de Lima, e R. M. da Silva, "Religamento automático de linhas de transmissão: Distinções nos resultados em função do modelo computacional utilizado," *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Brasil*, 2005.
- [13] L. Dube, *Models in ATP: Language Manual*, 1996.
- [14] A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hogg, and K. Froehlich, "Controlled switching as a reliable mean to reduce stresses on the circuit-breaker and to the network," *CIGRE SC 13 Colloquium, Florianópolis, Brazil*, September 1995.
- [15] P. C. V. Esmeraldo, J. A. Filho, F. M. S. Carvalho, A. C. C. Carvalho, and S. A. Morais, "Circuit-breaker requirements for alternative configurations of a 500 kv transmission system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 1, pp. 169–175, January 1999.
- [16] R. Rocha, A. C. Carvalho, e J. L. Távora, "Manobra controlada: Modelagem da suportabilidade dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento," *XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Brasil*, 1997.
- [17] *IEEE Standard for Insulation Coordination - Definitions, Principles and Rules*, IEEE Std 1313.1-1996, New York, USA, 1996.