

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO DE TRANSITÓRIOS DE RELIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE CHAVEAMENTO CONTROLADO

Raquel C. F. Gregory¹, Andréia C. dos Santos¹, José Carlos de Oliveira¹, Marcelo L. R. Chaves¹, Karcus M. C. Dantas², Washington L. A. Neves², Damásio Fernandes Jr.², Luiz Carlos de A. Fonseca³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE), Uberlândia – MG.

²Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

³Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, Recife – PE

raquel.filiagi@gmail.com, andrea.crico@gmail.com, jcoliveira@ufu.br, lynce@ufu.br, karcus@dee.ufcg.edu.br, waneves@dee.ufcg.edu.br, damasio@dee.ufcg.edu.br, lfonseca@chesf.gov.br

Resumo – A busca por alternativas visando à redução dos fenômenos transitórios associados com manobras de linhas de transmissão se apresenta como tema desafiador e com fortes impactos sobre a operação de grandes linhas de transmissão. Neste contexto, muito embora o reconhecimento de propostas clássicas, a exemplo dos disjuntores com resistores de pré-inserção, outras vias para se atingir estes objetivos têm sido exploradas. A partir de princípios já estabelecidos, este artigo se apresenta imbuído do propósito de expor os fundamentos físicos de uma técnica baseada em chaveamento controlado. Em consonância com esta estratégia, o trabalho tem por foco a implementação computacional deste processo por meio do simulador ATP, objetivando a realização de estudos de desempenho da metodologia ora contemplada.

Palavras-Chave – Chaveamento controlado, linhas de transmissão, religamentos de linhas, sobretensões de manobras, transitórios.

MODELING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES RECLOSING STRATEGY FOR TRANSIENT MITIGATION VIA CONTROLLED SWITCHING

Abstract – The search for alternatives to mitigate transmission lines reclosing transients is a challenging issue with great impact on the line operation. In this context, despite the use of circuit breakers equipped with pre-insertion resistors, other methods have been explored in literature. This work aims to expose the physical fundamentals of controlled switching techniques and to perform its modelling and computational implementation using the ATP. A performance analysis of this technique is accomplished.

Keywords - Controlled switching, transmission lines, lines reclosing, overvoltage maneuvers, transients.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são frequentemente submetidos a uma série de perturbações manifestadas, dentre outras, na forma de sobretensões de manobras. Sob tais circunstâncias, podem ocorrer falhas de isolamento nas linhas de transmissão (LT), transformadores, e demais componentes constituintes destes complexos. É sabido que, para algumas situações particulares, estas sobretensões podem chegar a valores de 4,0 p.u. [1] e, diante desta realidade, procedimentos voltados para a redução destes distúrbios se apresentam como objeto de interesse para as pesquisas e perspectivas futuras de aplicação pelo setor elétrico.

De fato, a redução do nível de isolamento de um sistema de transmissão, em decorrência da limitação de sobretensões, proporciona a minimização dos custos devido à possibilidade de utilização de torres mais compactas, além de favorecer a estimativa de vida útil dos equipamentos conectados à rede, a exemplo de transformadores de potencial (TPs) e transformadores de corrente (TCs) [2].

Neste particular, disjuntores com resistores de pré-inserção (RPI) se apresentam, na atualidade, como mecanismos para a minimização dos picos de tensão gerados pelas manobras. Embora esta solução seja tecnicamente eficaz, vale lembrar que, via de regra, sua aplicação apresenta elevados custos, diante da necessidade da implementação de dispositivos complementares aos tradicionais disjuntores, os quais se tornam construtivamente mais complexos e com maiores requisitos para manutenção [3] [4].

Alternativamente, reconhece-se que muitos fenômenos transitórios podem ser mitigados por meio de processos de religamento controlado. Esta técnica se baseia, fundamentalmente, em estabelecer meios físicos para que os contatos mecânicos dos disjuntores sejam fechados em momentos nos quais os valores instantâneos das tensões a montante e a jusante sejam idênticos em módulo e polaridade. Esta estratégia para atenuação dos transitórios provenientes das manobras se mostra técnica e economicamente atrativa para o aumento da confiabilidade



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

do sistema, redução de custos e dos requisitos de manutenção [5] [6].

Para atingir os propósitos supramencionados, é preciso estabelecer as diretrizes que se mostram como base para a implementação prática do processo de chaveamento controlado. Inserido, pois, neste cenário, e fundamentado em princípios estabelecidos em [7], o presente trabalho destina-se à apresentação do desenvolvimento dos fundamentos físicos da estratégia, estudos de desempenho e modelagem computacional para o chaveamento controlado de uma linha de transmissão de 500kV, implementada no software ATP.

II. CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES REMANESCENTES APÓS A ABERTURA DE CURTO-CIRCUITOS

A abertura de disjuntores numa linha de transmissão, previamente energizada e que tenha sido alvo de um curto-circuito, ocorre quando a corrente passa por zero, fato este que conduz a uma interrupção em um instante no qual a tensão não é nula. Isto resulta o que se denomina por “tensão residual” ou “carga residual”, a qual passa a excitar, logo após a abertura dos contatos do disjuntor, circuitos osciladores associados com os componentes da linha desenergizada, nos termos considerados na sequência [8].

De fato, uma vez manifestada uma falta na linha e ocorrida a atuação do sistema de proteção, os polos do disjuntor não são eletricamente interrompidos de forma simultânea. Isto se deve, sobretudo, ao fato do arco elétrico e a dispersão mecânica serem inerentes ao processo de manobra da chave. Nessas circunstâncias, os sinais de tensão e corrente que se manifestam na linha que fora objeto da interrupção, além de apresentarem componentes de sequência positiva, podem ainda conter componentes de sequência zero [7].

Em linhas compensadas por reatores em derivação, o circuito que se estabelece a jusante do disjuntor se apresenta com uma composição física similar à de um oscilador. A tensão residual se apresenta como fonte de excitação para um circuito envolvendo capacitores, indutores e resistências próprios da linha, assim como os parâmetros dos mencionados reatores de compensação. Nestas condições, há de se reconhecer um comportamento oscilatório que contém diferentes componentes de frequência [9]. A partir desta constatação se estabelece a base do mecanismo para a mitigação dos fenômenos transitórios associados ao tema central deste artigo.

Visando embasar os procedimentos ora referidos, são consideradas, a seguir, as particularidades de cada tipo de falta envolvida no processo. Vale observar que as mesmas, conforme sua natureza, possuem particularidades que tornam possível a sua identificação e tratamento específico para se atingir as metas pretendidas.

A. Curto-circuito Fase-terra (FT)

O circuito equivalente representativo de um curto-circuito desequilibrado numa rede elétrica, genericamente, pode ser tratado com o auxílio de transformações modais utilizando a matriz de Karrenbauer, assumindo que as linhas de transmissão sejam perfeitamente transpostas. A aplicação

dessa teoria tem se mostrado eficaz também para sistemas de transposição reais.

Para um defeito envolvendo uma fase e a terra, sob condições ideais, ou seja, desprezando-se a impedância de defeito e a reatância da linha, os circuitos modais para o conjunto linha-reator são aqueles indicados na Figura 1 [7]. Os parâmetros constituintes do arranjo equivalente são clássicos e dispensam maiores detalhes de identificação.

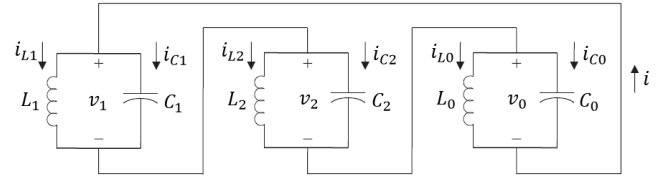


Fig. 1. Circuito equivalente modal para representação de um curto-circuito fase-terra.

A Figura 1 mostra que a relação entre as tensões modais, enquanto a falta persistir, pode ser escrita tal como (1).

$$v_1 + v_2 + v_0 = 0 \quad (1)$$

Onde:

v_i ($i = 0,1,2$) – tensões modais na presença do curto-circuito fase-terra.

As frequências de oscilação referentes ao modo 1 e modo 0, para a presente situação, são dadas por (2) e (3), respectivamente.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2L_1 + L_0}{L_1 L_0 (C_1 + 2C_0)}} \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

Após a extinção da falta, a relação observada em (1) deixa de ser válida, já que os circuitos modais são desacoplados e a frequência de oscilação da tensão residual, referente ao modo 0, passa a ser determinada por (4):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0}} \quad (\text{Hz}) \quad (4)$$

B. Curto-circuito Fase-fase-terra (FFT)

Na presença de defeitos que envolvam duas fases e a terra, e baseando nas mesmas premissas idealizadas para a situação anterior, a análise dos circuitos modais conduz ao arranjo equivalente da Figura 2 [7].

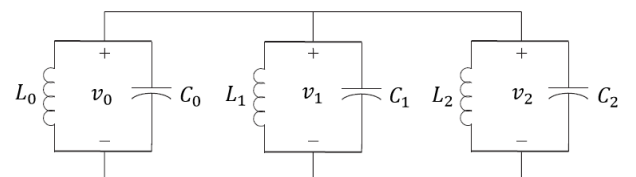


Fig. 2. Circuito equivalente modal para representação de um curto-circuito fase-fase-terra.

Com base na Figura 2, pode-se escrever a relação apresentada em (5).

$$v_1 = v_2 = v_0 \quad (5)$$

Durante o defeito, a fase sã apresenta apenas uma frequência de oscilação, a qual é dada por (6).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + 2L_0}{L_1 L_0 (C_0 + 2C_1)}} \quad (\text{Hz}) \quad (6)$$

Uma vez extinta a falta, a igualdade obtida em (5) deixa de ser válida e as frequências de oscilação apresentam valores determinados por (2) e (4).

Com o objetivo de uniformizar o método proposto, a avaliação dos defeitos FFT é realizada de forma similar a ocorrência de faltas FT, visto que os primeiros envolvem apenas uma das fases antes de sua completa extinção, fato este que permite o tratamento de forma isolada. Portanto, tanto para a condição anterior, como a presente, o critério para a detecção que a falta fora extinta encontra-se claramente exposto.

C. Curto-circuito Fase-fase e Trifásico

Na presença de defeitos fase-fase (sem envolvimento do terra) pode-se inferir que, apesar de o modo 0 não estar presente na modelagem da falta, é possível que esta componente seja excitada durante a abertura da linha. Desenvolvimentos realizados a partir da análise do circuito equivalente modal deste tipo de falta revelam que as frequências de oscilação são as mesmas durante e após o término do curto-circuito. Tais frequências são definidas para os modos 0 e 1 pelas expressões (2) e (4), respectivamente. Diante desse cenário, a não alteração do comportamento dos osciladores torna inviável a definição de um critério capaz de possibilitar a detecção da extinção de faltas fase-fase a partir da perspectiva de observação de frequências de oscilação.

Também para as situações envolvendo defeitos trifásicos, aterrados ou não, são encontradas dificuldades para definição do fim da falta. Na situação em que o terra é parte do defeito trifásico, os circuitos modais 0, 1 e 2 são curto-circuitados e praticamente não há tensão residual na linha de transmissão, uma vez que não há energia armazenada nas capacitâncias das mesmas. Já na situação em que a terra não é envolvida no defeito, apenas os circuitos modais 1 e 2 são curto-circuitados e o circuito modal 0 pode ser excitado no momento da abertura da linha, porém esta componente também é rapidamente amortecida. Nessa conformidade, percebe-se as dificuldades de definir meios capazes de estabelecer a extinção de curtos trifásicos.

Do exposto segue que a lógica sugerida para o chaveamento controlado fica restrita aos religamentos associados com a ocorrência de defeitos FT e FFT. Lógicas para os defeitos fase-fase e trifásicos ainda são objetos de pesquisas dos autores.

III. ESTRATÉGIA PARA O CONTROLE DO CHAVEAMENTO

A lógica de controle para o estabelecimento do denominado chaveamento controlado, de acordo com [10], encontra-se sintetizada na Figura 3. Esta se apresenta subdividida em dois estágios, um primeiro encarregado da análise do sinal durante o defeito (vermelho), e um segundo, associado com o comportamento da tensão entre os contatos do disjuntor, após o término da falta, e definição dos instantes para o religamento otimizado (azul).

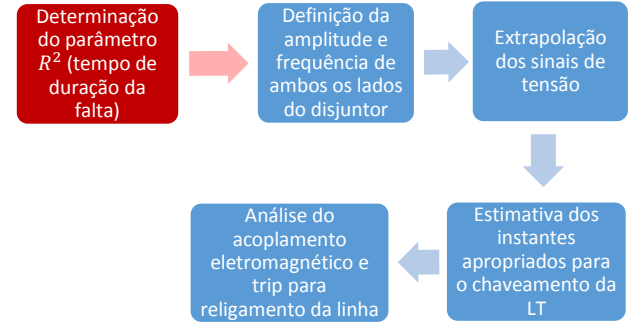


Fig. 3. Diagrama de blocos da lógica de controle.

Como indicado, para que a linha de transmissão possa ser religada é necessário, primeiramente, identificar se a falta foi extinta dentro do tempo morto. Caso o defeito persista, deve-se interromper o processo de religamento visando garantir que isto não ocorra enquanto a falta perdurar. Para o atendimento a este quesito, uma das estratégias se apoia na observação dos sinais das tensões modais [10].

De fato, a análise do exposto em (1) conduz à expressão mostrada em (7).

$$(v_1 + v_2) = -v_0 \quad (7)$$

A partir desta correlação é possível constatar que:

- Se $(v_1 + v_2) = -v_0$, a falta ainda persiste;
- Se $(v_1 + v_2) \neq -v_0$, a falta foi extinta.

Entretanto, em se tratando de uma situação real, a igualdade expressa em (7) deixa de ser rigorosamente observada, já que a soma das tensões modais está diretamente associada com a impedância do defeito [11]. Nestas circunstâncias, a alternativa utilizada se baseia na comparação da proximidade entre os valores de $(v_1 + v_2)$ e $(-v_0)$, o que é feito através do emprego de um parâmetro estatístico denominado por “coeficiente de determinação R^2 ” [12]. Esta grandeza é adimensional e permite quantificar a qualidade do ajuste do sinal entre zero e um, sendo definido conforme (8) [13]:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

Onde:

SSE – É a soma quadrática das diferenças entre os sinais $(v_1 + v_2)$ e $(-v_0)$, tomadas ponto a ponto, em um intervalo de N amostras;

SST – É a soma quadrática das diferenças entre as amostras de $(-v_0)$ e o valor médio desse sinal (\bar{v}_0) no intervalo de N amostras.

Após a abertura do disjuntor, idealmente, seria esperado que o fator R^2 se apresentasse com valores próximos a um e, com a extinção da falta, que tal grandeza fosse nula.

Identificada a extinção do defeito, o passo seguinte consiste na obtenção das amplitudes e frequências dos sinais presentes em ambos os lados do disjuntor. Isto tem por meta estimar os instantes apropriados para a efetivação do chaveamento no tempo requerido. Para tanto, é feita a extrapolação das componentes de frequência da tensão em cada fase, tanto do lado da fonte quanto do lado da linha. Objetivando maior precisão ao processo, este é iniciado após três passagens por zero (t_{zero3}) contados a partir da extinção do defeito. A Figura 4 [7] ilustra o exposto para o denominado modo 1, considerando que o defeito foi eliminado no momento identificado por $t_{inicial}$.

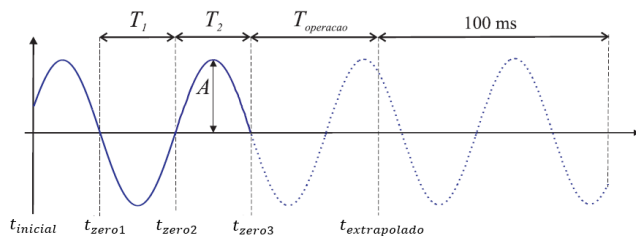


Fig. 4. Extrapolação do sinal de tensão referente ao modo 1.

A partir das considerações anteriores segue que as equações para o cálculo da tensão e frequência, referentes ao modo 1, são expressas por (9) e (10), respectivamente.

$$v_{mod1}(t) = A \times \text{sen}\left[2\pi f_1 \times \left(t + T_{operação}\right)\right] \quad (9)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2T_1} + \frac{1}{2T_2}\right) \quad (10)$$

Onde:

A – Amplitude do sinal;

f_1 – Frequência do sinal.

Em consonância com recomendações advindas de [10], os sinais são extrapolados durante um intervalo de 100ms, através da atualização dos valores de amplitude e frequência da tensão entre os contatos do disjuntor. A extrapolação só é interrompida quando forem encontrados três instantes apropriados para cada uma das fases.

Por fim, a determinação dos instantes ideais para o chaveamento é feita concomitante à extrapolação dos sinais entre os contatos do disjuntor. O procedimento é baseado na observação dos sinais extrapolados do lado da fonte e da linha, para determinação dos momentos nos quais as tensões entre os contatos do disjuntor são nulas. Em seguida, é realizado o produto das derivadas da tensão da linha e da fonte. Se o resultado for um valor positivo, o momento assim determinado se apresenta como aquele apropriado para o chaveamento. Caso contrário, este instante não é adequado, por não se situar no período de menor pulsação do sinal.

Vale ressaltar que o acoplamento eletromagnético entre as fases da linha de transmissão pode causar uma redução da

eficiência do controle, acarretando em desvios consideráveis nos sinais de tensão utilizados para determinar os instantes apropriados para o chaveamento [14].

Com o objetivo de reduzir estes efeitos, os tempos ótimos para o chaveamento da linha ocorrem quando o intervalo entre o instante de fechamento do primeiro e último polo é o menor o possível [15]. Isto feito, os sinais são enviados para o religamento das linhas com a expectativa que as sobretensões transitórias sejam reduzidas [16].

IV. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA

Com intuito de validar, computacionalmente, o processo exposto, foi utilizado o simulador ATP (*Alternative Transients Program*). Como é sabido, esta é uma ferramenta de domínio público e tem sido largamente difundida para análise de sistemas elétricos no domínio do tempo. A estratégia de controle, nos termos aqui apresentados, foi implementada utilizando a linguagem MODELS, por meio de duas etapas: sendo a primeira (M1) destinada à determinação do instante de extinção da falta, e a segunda (M2) responsável, propriamente, pela determinação dos instantes apropriados para o religamento.

O procedimento realizado teve como base uma taxa de 16 amostras por cada ciclo da frequência fundamental. É importante esclarecer que os aspectos relacionados ao reconhecimento do tipo de falta e das fases envolvidas fazem os dados de entrada das MODELS.

Em M1, o cálculo de R^2 é feito separadamente para cada uma das fases que participam do defeito. A partir do momento em que este parâmetro assume valores próximos a zero para todas as fases, indicando que a falta foi totalmente extinta, é enviado um sinal de entrada para M2, de modo a habilitar sua execução. Esta, por sua vez, recebe as tensões trifásicas do lado da linha e a tensão da fase A do lado da fonte. Na sequência, é feita a decomposição desses sinais de acordo com a matriz de Karrenbauer, com posterior execução dos procedimentos capazes de estimar a forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor em instantes futuros.

Ressalta-se, ainda, que informações adicionais acerca dos procedimentos implementados são descritas na sequência, com o auxílio dos resultados obtidos nas simulações.

A Figura 5 exibe parte da configuração elaborada, na qual é possível observar que a lógica foi aplicada para o caso do chaveamento de uma linha de 500 kV do sistema de transmissão da CHESF.

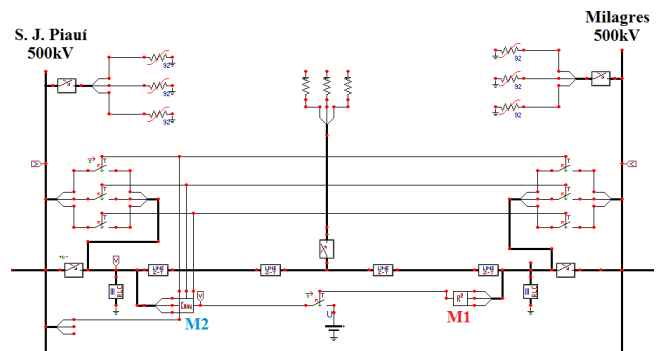


Fig. 5. Linha de transmissão de 500kV modelada no ATPDraw.

Utilizando como estudo de caso a manifestação de uma falta entre a fase A e a terra, no meio da referida linha, a Figura 6 mostra o comportamento do parâmetro R^2 . Como pode ser observado, o curto-circuito ocorre em 0,1s e tem duração de 0,35s (os disjuntores da linha abrem em 0,2s, quando se inicia o cálculo de R^2). Nota-se que, após 0,45s, o fator R^2 assume valores próximos a zero, indicando que a falta foi extinta. Também é visível que a relação observada em (7) é mantida durante todo o instante da falta e, após sua extinção, tal igualdade deixa de ser observada.

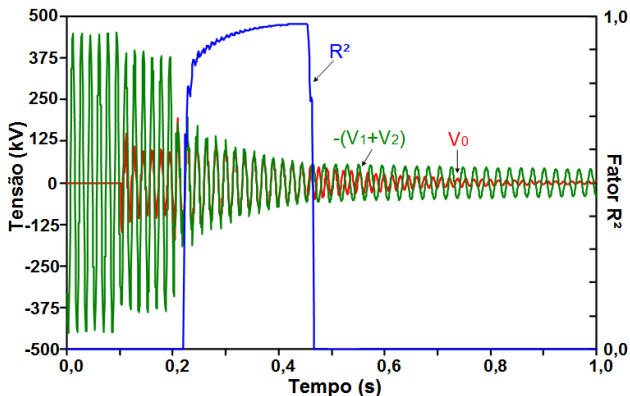


Fig. 6. Forma de onda das tensões $-(V_1+V_2)$, V_0 e do fator R^2 .

Após a extinção da falta, são determinadas as grandezas associadas com a amplitude e a frequência dos sinais de tensão para os dois lados do disjuntor. A Figura 7 apresenta a tensão simulada e a extrapolada do lado da linha. Os resultados evidenciam grande similaridade entre ambas.

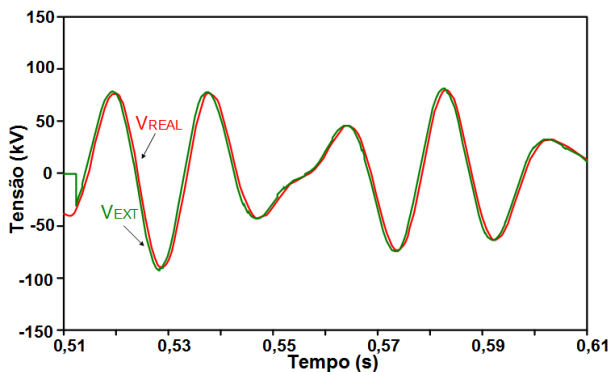


Fig. 7. Forma de onda simulada e extrapolada da tensão na fase A - lado da linha.

Conforme explicitado, para o sinal de cada modo pertencente ao estudo, a definição das frequências foi realizada com base na contagem de tempo decorrido entre passagens consecutivas por zero. Já os valores das amplitudes foram determinados a partir da detecção dos pontos de inflexão das formas de onda em análise.

A extrapolação dos sinais foi realizada durante um intervalo de 100ms, considerados a partir da detecção da extinção do defeito. De posse destas informações, tanto do lado da fonte quanto do lado da linha, obtêm-se os instantes apropriados para o religamento, considerando que o tempo de resposta da operação do disjuntor possui um valor típico de 50ms.

Adicionalmente, os instantes apropriados obtidos, são analisados, por fim, sob o ponto de vista do acoplamento eletromagnético. Isto visa ao estabelecimento do menor intervalo possível entre o fechamento dos contatos das três fases.

A Figura 8 apresenta a forma de onda dos sinais de tensão para ambos os lados do disjuntor. Como pode ser constatado, o instante ótimo encontrado para fase A ocorre quando as tensões do lado da fonte e da linha são iguais, e a derivada de ambas possui mesmo sinal.

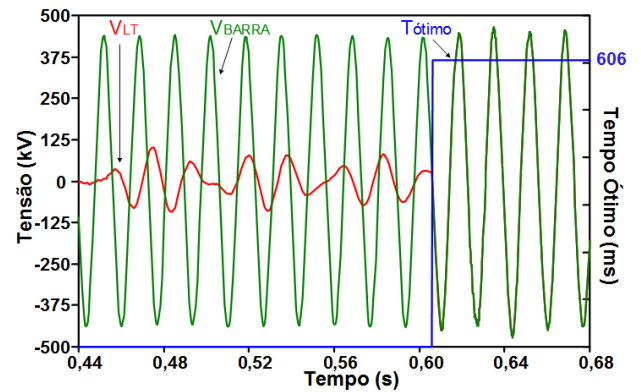


Fig. 8. Forma de onda das tensões da fase A do lado da fonte e do lado da linha e tempo ótimo para o religamento da fase A.

Através dos resultados obtidos é possível inferir que a sequência de fechamento dos polos do disjuntor é iniciada pela fase A (em 605,8ms), seguida pela fase C (em 611,2ms) e finalizada pela fase B (em 621,7ms).

O efeito do chaveamento controlado pode ser, por fim, observado na Figura 9. Esta apresenta as tensões trifásicas na barra de Milagres após o religamento da linha de transmissão.

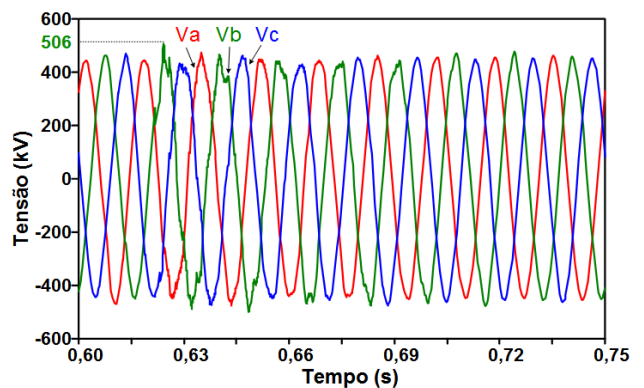


Fig. 9. Forma de onda da tensão trifásica obtida na barra de Milagres - com controle do chaveamento.

A Figura 10 exhibe, para fins ilustrativos, o comportamento trifásico da tensão na barra de Milagres para um instante genérico do chaveamento, ocorrido em 600ms, o qual não se encontra embasado no controle otimizado.

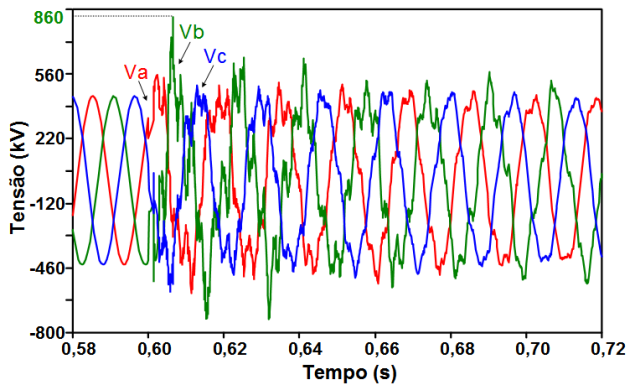


Fig. 10. Forma de onda da tensão trifásica na barra de Milagres para um instante de energização genérico.

Comparando os resultados da Figura 9 com os da Figura 10, é notória a eficácia do mecanismo aqui explorado. De fato, quando da ausência de meios para o chaveamento controlado, as tensões atingiram valores de pico próximos a 1,90 p.u., enquanto que a utilização da estratégia apresentada conduziu a picos da ordem de 1,12 p.u.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram sintetizados os fundamentos que norteiam a técnica do chaveamento controlado através de transformações modais, com intuito de atenuar os transitórios de chaveamento de disjuntores em uma linha de transmissão de extra alta tensão. Muito embora o processo utilizado já tenha sido implementado e avaliado por meio do simulador RTDS (*Real Time Digital Simulator*), evidencia-se que a principal contribuição deste trabalho se refere à implementação da lógica no software ATP, que é uma ferramenta livre, de fácil acesso e amplamente disseminada.

A partir das simulações computacionais realizadas no software ATP, foi possível constatar que o comportamento das tensões trifásicas, na ausência de controle, pode apresentar níveis acentuados, com impactos sobre os isolamentos do complexo de transmissão e componentes como um todo. Entretanto, o emprego da estratégia de mitigação apresentada se mostrou extremamente efetiva no sentido de minimizar os transitórios de chaveamento, com subsequentes efeitos sobre projetos, construção e operação dos sistemas de transmissão.

Diante desse cenário, conclui-se que a técnica do chaveamento controlado possibilita a mitigação das sobretensões de manobras oriundas do religamento de linhas de transmissão, dispensando o uso de resistores de pré-inserção e reduzindo os custos de manutenção de disjuntores, além de proporcionar maior confiabilidade ao sistema.

REFERÊNCIAS

[1] A. E. A. d. Araújo e W. L. A. Neves, “Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia,” UFMG, Belo Horizonte - MG, 2005.

[2] K. Froehlich, et al., “Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, 734-740, v. 12, n. 2 April 1997.

[3] A. C. Legate, J. H. Brunke, J. J. Ray e E. J. Yasuda, “Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, pp. 223-231, v. 3, n. 1, January 1988.

[4] J. R. Ribeiro e 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*, pp. 282-291, v. 4, n. 1, January 1989.

[5] CIGRE Task Force 13.00.1., “Controlled Switching: A State of the Art Survey - Part I,” *ELECTRA*, pp. 65-97, n. 162, October 1995.

[6] A. Carvalho, M. Lacorte e O. Knudsen, “Improved EHV Line Switching Surge Improved EHV Line Switching Surge,” *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, vol. 1, pp. 292-297, November 1995.

[7] K. M. C. Dantas, “Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão,” Tese (Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

[8] L. C. Zanetta Jr., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, São Paulo - SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

[9] A. D’ajuz, C. S. Fonseca, F. M. S. Carvalho, J. A. Filho, L. E. N. Dias, M. P. Pereira, P. C. V. Esmeraldo, R. Vaisman e S. d. O. Frontin, *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão*, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

[10] K. Dantas, W. Neves, and D. Fernandes, “An approach for controlled reclosing of shunt-compensated transmission lines,” *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 3, pp. 1203–1211, June 2014.

[11] T. Gönen, *Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design*. 2nd, Boca Raton, FL - USA: CRC Press, 2009.

[12] M. R. Spiegel, J. Schiller e R. A. Srinivasan, *Probability and Statistics*, New York - USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.

[13] THE MATHWORKS, INC, *Curve Fitting Toolbox User's Guide*, [S.l.], 2007.

[14] CIGRE Working Group 13.07, “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 1st Part,” *ELECTRA*, pp. 42-73, n.183, April 1999.

[15] K. M. C. Dantas, D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, B. A. Souza e L. C. A. Fonseca, “Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching,” *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, Pennsylvania - USA, July 2008.

[16] CIGRE Working Group 13.07., “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 2nd Part,” *ELECTRA*, pp. 36-57, n. 185, August 1999.