

Avaliação Computacional da Eficácia da Metodologia do Religamento Controlado de Linhas de Transmissão para Mitigação das Sobretensões de Manobras

Raquel Cristina Filiagi Gregory / UFU

Andréia Crico dos Santos / UFU

José Carlos de Oliveira / UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves / UFU

Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – NQEE

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Uberlândia – MG, Brasil

Karcus Marcelus Colaço Dantas / UFCG

Washington Luiz Araújo Neves / UFCG

Damásio Fernandes Jr. / UFCG

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Campina Grande – PB, Brasil

Luiz Carlos de Alcântara Fonseca / Chesf

Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf

Recife – PE, Brasil

Resumo — A busca por soluções mitigatórias, no que tange aos efeitos das sobretensões transitórias atreladas às manobras de energizações e religamentos das linhas de transmissão, contemplam um tema desafiador e com fortes impactos sobre a coordenação de isolamento dos sistemas elétricos. Muito embora o reconhecimento de propostas clássicas e comerciais para a atenuação destes fenômenos, outras possibilidades, certamente, ainda são meritórias de destaque e investigações. Neste contexto, o presente trabalho encontra-se alicerçado na exposição dos fundamentos físicos e matemáticos de uma estratégia baseada em chaveamentos controlados, em que os instantes para o religamento da linha são pré-programados. A avaliação computacional da eficácia da metodologia é feita utilizando o simulador ATP, no qual são realizados estudos em um sistema elétrico típico submetido à ação de faltas fase-terra e fase-fase-terra seguidas de desligamentos e subsequentes religamento, sob a ação da tecnologia aqui focada e com a ausência da mesma.

Palavras-chave -- Chaveamento controlado, linhas de transmissão, religamento controlado, sobretensões de manobras, transitórias.

I. INTRODUÇÃO

As manobras de disjuntores, visando aos processos de chaveamento de linhas de transmissão, podem provocar diversos efeitos indesejáveis à operação do sistema. Caso os impactos destes fenômenos excedam valores pré-definidos em projetos e especificações das proteções contra sobretensões, podem ocorrer falhas de isolamento nas linhas de transmissão, transformadores e demais componentes constituintes destes complexos, em virtude da manifestação dos elevados níveis de sobretensões transitórias no sistema [1]. Diante do exposto, procedimentos voltados para a redução destes distúrbios se apresentam como objeto de fundamental interesse para o setor elétrico.

Na atual conjuntura, os tradicionais disjuntores com resistores de pré-inserção (RPI) são mecanismos largamente

utilizados, todavia, muito embora esta solução seja tecnicamente eficaz, vale ressaltar que normalmente sua aplicação representa elevados custos, diante da necessidade da implantação de dispositivos complementares aos tradicionais disjuntores, os quais se tornam construtivamente mais complexos e com maiores requisitos de manutenção [2], [3]. Alternativamente, estudos relacionados à inserção de para-raios de óxido de zinco (ZnO) em pontos estratégicos da linha apresentam resultados positivos no tocante à mitigação de transitórios [4].

Não obstante às soluções mencionadas, a tecnologia fundamentada nos chaveamentos controlados continua a oferecer atrativos e desafios para os pesquisadores [5], [6]. De fato, tal designação é utilizada para intitular os dispositivos capazes de identificar os instantes propícios para o fechamento ou abertura dos contatos dos disjuntores, por meio da observação dos sinais de tensão, ou corrente [7], [8]. Esta estratégia, por conseguinte, elimina a necessidade do RPI, mostrando-se técnica e economicamente atrativa para o aumento da confiabilidade do sistema [1], [9]. Ademais, a implementação do controle, juntamente com a instalação de para-raios de óxido metálico, permite a redução do nível de isolamento da linha, possibilitando o uso de torres mais compactas e contribuindo para o decréscimo dos custos gerais do sistema [10], [11].

Inserido neste cenário, e fundamentado em princípios estabelecidos em [11], o presente trabalho destina-se à apresentação de uma síntese dos conceitos físicos da estratégia, as bases para sua modelagem e implementação computacional visando a limitação de sobretensões de manobras de uma linha de transmissão comercial de 500 kV. Para tanto, mediante o uso do simulador ATP, são realizados estudos investigativos envolvendo a ocorrência de curtos-circuitos fase-terra e fase-fase-terra, considerando subsequentes desligamentos e posteriores ações de religamentos da linha de transmissão.

II. CARACTERÍSTICAS DAS TENSÕES RESIDUAIS NA LINHA DE TRANSMISSÃO

A energização trifásica de uma linha de transmissão consiste em sua inserção no sistema por meio do fechamento dos contatos dos disjuntores localizados em seus terminais. Vale lembrar que, por se tratar de uma manobra tripolar, os polos do disjuntor normalmente não sofrem fechamento simultâneo e isto se deve ao fato de o arco elétrico e a dispersão mecânica serem inerentes ao processo de manobra da chave. Por conseguinte, transitórios se propagarão pela linha sendo refletidos nos terminais remotos, os quais normalmente encontram-se abertos, podendo ocasionar elevadas sobretensões [12]. Tipicamente, os transitórios de energização podem atingir valores próximos a 2 p.u. [13].

A abertura de disjuntores numa linha de transmissão previamente energizada ocorre quando a sua corrente passa por valores próximos a zero, fato este que pode resultar, para o momento desta ação, numa tensão instantânea com valores elevados, visto as defasagens existentes entre estes dois sinais. Isto ocasiona o surgimento de uma “tensão residual”, a qual apresenta comportamento distinto para cada fase. Transcorridos pequenos intervalos de tempo, se necessário, são iniciados os processos de religamentos, cuja manobra ocorre sob a presença das mencionadas tensões residuais [14].

Em linhas compensadas por reatores em derivação, na ocorrência de uma interrupção, o circuito que se estabelece a jusante do disjuntor apresenta uma composição física similar a um oscilador. A tensão residual se comporta como fonte de excitação para um circuito envolvendo capacitores, indutores e resistências próprios da linha, bem como para os parâmetros dos reatores de compensação. Nestas condições, há de se reconhecer um desempenho elétrico oscilatório para as tensões e correntes, as quais, naturalmente, se apresentam com diferentes componentes de frequência [15]. A partir deste fundamento são estabelecidas as bases da estratégia para a mitigação dos fenômenos transitórios associados ao tema central deste artigo.

Visando embasar os procedimentos ora referidos, são consideradas, na sequência, as características das faltas que podem ser envolvidas no processo. Vale observar que as mesmas, conforme sua natureza, possuem particularidades que tornam possível a identificação e tratamento específico para se atingir as metas pretendidas.

A. Curto-circuito Fase-terra (FT)

O circuito equivalente representativo de um curto-circuito numa rede elétrica, genericamente, pode ser tratado com o auxílio de transformações modais utilizando a matriz de Karrenbauer e assumindo um arranjo de transposição ideal.

Considerando um defeito envolvendo uma fase e a terra, desprezando-se a impedância do defeito e a reatância da linha, os circuitos modais para o conjunto linha-reator são aqueles indicados na Fig. 1 [11]. Os parâmetros constituintes do arranjo equivalente são clássicos e dispensam maiores detalhes de identificação.

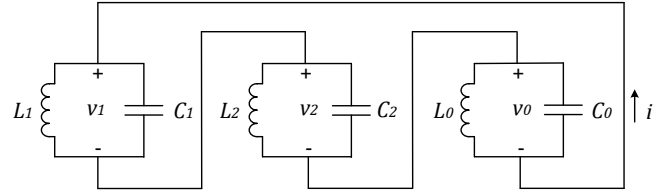


Figura 1. Arranjo no domínio modal representativo de uma falta fase-terra.

A Fig. 1 ilustra a relação entre as tensões modais durante o intervalo de ocorrência da falta, resultando na expressão definida em (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.

L_i, C_i ($i = 0,1,2$) – parâmetros elétricos do conjunto linha-reator no domínio modal.

As frequências de oscilação referentes ao modo 1 e modo 0, nestas condições, 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 ocorrência de curtos-circuitos que envolvam duas fases e a terra, e baseando-se nas mesmas premissas idealizadas para a situação anterior, a análise dos circuitos modais resulta no arranjo paralelo da Fig. 2 [11].

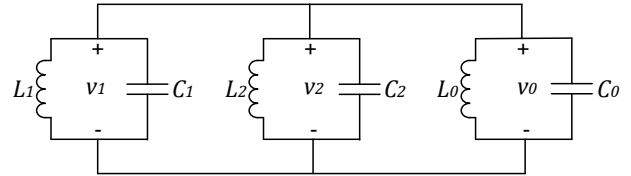


Figura 2. Arranjo no domínio modal representativo de uma falta fase-fase-terra.

A partir da Fig. 2, pode-se escrever a relação enunciada em (5).

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

Durante a falta, a fase sã apresenta apenas uma frequência de oscilação definida 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 extinto o defeito, a igualdade observada em (5) deixa de ser válida e as frequências de oscilação apresentam valores determinados por (2) e (4).

Com o propósito de uniformizar a metodologia ora referida, a avaliação dos defeitos FFT é realizada de forma similar a ocorrência de faltas FT, visto que os primeiros podem envolver apenas uma das fases antes de sua completa extinção, fato este que permite o tratamento de cada fase de forma isolada. Por conseguinte, tanto para a condição anterior, como a presente, o critério para a detecção que a falta fora extinta encontra-se exposto em consonância com (1).

C. Curto-circuito Fase-fase e Trifásico

Na presença de defeitos fase-fase, sem envolvimento da terra, pode-se inferir que, apesar de o modo 0 não estar presente na modelagem do curto-circuito, é possível que esta componente seja excitada durante a abertura da linha. Desenvolvidos 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, sendo 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 detectar a extinção de faltas fase-fase a partir da perspectiva de observação das frequências de oscilação [11].

Para os casos envolvendo defeitos trifásicos, aterrados ou não, são encontradas dificuldades no tocante a determinação do término da falta. Na condição em que a terra é parte do defeito trifásico, os circuitos modais 0, 1 e 2 são curto-circuitados, sendo praticamente inexistente a presença da tensão residual na linha de transmissão, uma vez que não há energia armazenada nas suas capacitâncias. Já na situação em que a terra não é envolvida no defeito, apenas os circuitos modais 1 e 2 são curto-circuitados. Ainda que o circuito modal 0 possa ser excitado no momento da abertura da linha, esta componente é rapidamente amortecida. Por conseguinte, percebem-se as dificuldades de definir meios capazes de identificar o término de curtos-circuitos dessa natureza.

Do exposto segue que a lógica sugerida para o chaveamento controlado fica restrita aos religamentos associados à ocorrência de defeitos FT e FFT [11]. O controle para o chaveamento de linhas submetidas aos defeitos fase-fase e trifásicos ainda se apresenta como tema para desenvolvimentos de pesquisa por parte dos autores.

III. ESTRATÉGIA PARA O CHAVEAMENTO CONTROLADO

A lógica de controle para o estabelecimento do denominado chaveamento controlado, de acordo com [16], encontra-se sintetizada na Fig. 3. Esta se apresenta subdividida em dois estágios, um primeiro encarregado da análise do sinal durante o defeito (vermelho), e um segundo associado à definição dos instantes apropriados para o religamento após o término da falta (em azul).

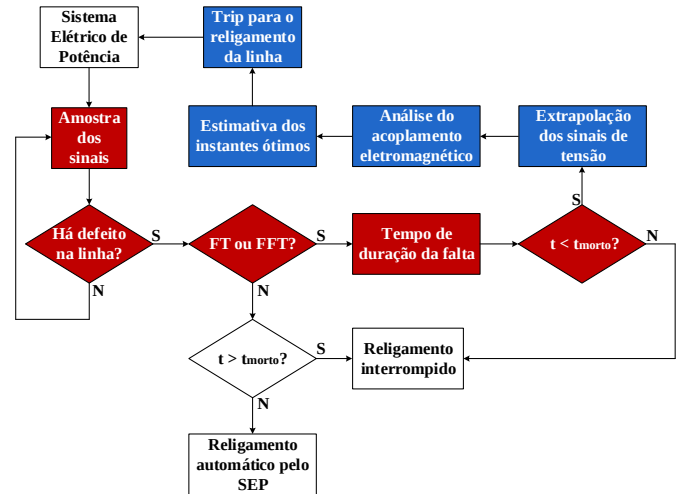


Figura 3. Diagrama da lógica estabelecida para a estratégia de controle.

Para que a linha de transmissão possa ser reinserida no sistema, 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 [16].

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 considerar que:

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

No entanto, em se tratando de uma situação real, a igualdade expressa em (7) deixa de ser rigorosamente observada, já que a soma das tensões modais é diretamente associada à impedância do defeito [17]. 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 por meio do emprego de um parâmetro estatístico denominado “coeficiente de determinação R^2 ” [18]. Esta grandeza é adimensional e permite quantificar a qualidade do ajuste do sinal entre zero e um [19], sendo definido em (8).

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

Onde:

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

Imediatamente após a abertura dos disjuntores da linha, idealmente, espera-se que o fator R^2 se apresente com valores próximos a unidade e que tal grandeza seja nula a partir do instante em que a falta é extinta.

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 estimado o comportamento dos sinais em instantes futuros mediante a extrapolação 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 Fig. 4 [11] ilustra o fundamento do que foi exposto para o denominado modo 1, considerando que o defeito é eliminado no momento identificado por ($t_{inicial}$).

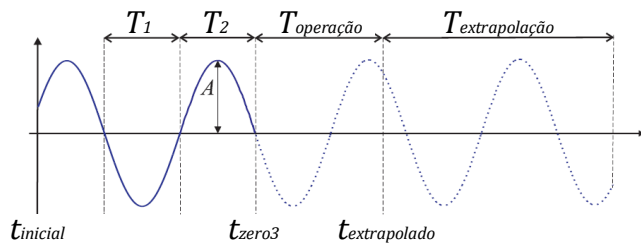


Figura 4. Extrapolação do sinal de tensão referente ao modo 1.

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.

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

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

Onde:

A – máximo valor absoluto entre as duas últimas passagens por zero;

f_1 – média aritmética dos valores de frequência a cada duas passagens por zero.

Em consonância com recomendações advindas de [16], os sinais são extrapolados durante um intervalo de 100 ms, atualizando-se os valores de amplitude e frequência a cada nova passagem por zero. A extrapolação só é interrompida quando forem encontrados três instantes apropriados para o fechamento de cada uma das fases.

A determinação dos instantes ideais para o chaveamento é feita concomitante à extrapolação da tensão entre os contatos do disjuntor. O procedimento é baseado na observação dos sinais extrapolados do lado da fonte e da linha, separadamente, para determinar o momento no qual a tensão entre os contatos do disjuntor é nula. Em seguida, é realizado o produto das derivadas das tensões a montante e a jusante do disjuntor. Se o resultado for um valor positivo, o momento assim determinado se apresenta como aquele apropriado para o chaveamento. Caso contrário, o instante é considerado inadequado 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 [7]. Com o propósito de reduzir estes efeitos, os tempos ótimos para o chaveamento da

linha são considerados quando o intervalo entre o instante de fechamento do primeiro e último polo é o menor possível [20]. Isto feito, os sinais são enviados para o religamento da linha com a expectativa que as sobretensões transitórias sejam reduzidas [8].

IV. ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA

Com intuito de validar computacionalmente o processo exposto, foi utilizado o simulador ATP (Alternative Transients Program), a qual se apresenta como uma ferramenta de domínio público. A estratégia de controle, nos termos aqui considerados, foi implementada utilizando a linguagem MODELS, mediante a execução de duas etapas: uma primeira (M1) destinada à determinação do tempo de duração e extinção da falta, e uma segunda (M2) responsável pela determinação dos instantes apropriados para o religamento. É importante esclarecer que os aspectos atrelados ao reconhecimento do tipo de falta e das fases envolvidas perfazem os dados de entrada das MODELS.

A Fig. 5 exhibe parte da configuração do arranjo elétrico modelado. Nesta é possível observar que a lógica foi aplicada para o chaveamento de uma linha de transmissão de 500 kV que interliga Milagres à São João do Piauí. As fontes de tensão foram ajustadas para fornecer 550 kV na barra de Milagres, que é a máxima tensão operativa definida para um sistema elétrico em 500 kV. Em M1 (vermelho), o cálculo do R^2 é feito separadamente para cada fase envolvida no defeito. A partir do momento em que este parâmetro assume valores próximos a zero, é enviado um sinal para M2 (azul), de modo a habilitar sua execução. Esta, por sua vez, recebe as tensões trifásicas do lado da linha e a respectiva tensão da fase A do terminal emissor. Na sequência, é feita a decomposição destes sinais de acordo com a matriz de Karrenbauer, com posterior execução dos procedimentos capazes de estimar o comportamento da tensão entre os contatos do disjuntor em instantes futuros.

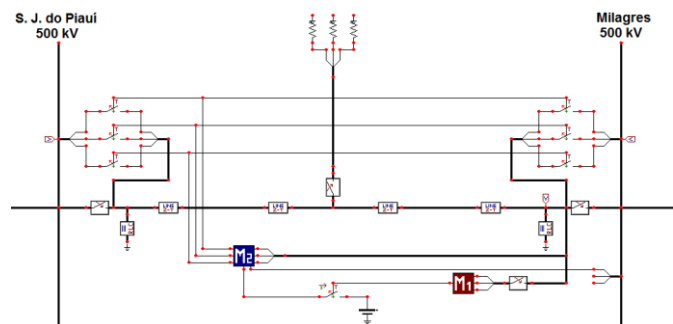


Figura 5. Sistema elétrico utilizado para os estudos de desempenho do religamento controlado e implementado no ATPDraw.

As demais informações, a respeito dos parâmetros constituintes do sistema elétrico implementado, são descritas em detalhes na referência [11].

A. Religamento Sob a Ação de Curto-circuito Fase-terra

Para o estudo em pauta, considerou-se a manifestação de uma falta entre a fase A e a terra localizada ao meio da linha. A Fig. 6 ilustra o comportamento da tensão na fase A da linha de transmissão e os limites do coeficiente de determinação R^2 na presença de um o curto-circuito estabelecido em 0,1 s. O cálculo do R^2 inicia-se no instante de 0,2 s, quando os

disjuntores da linha são abertos. Nota-se que, após 0,45 s, o fator R^2 assume valores próximos a zero, indicando que a falta foi extinta.

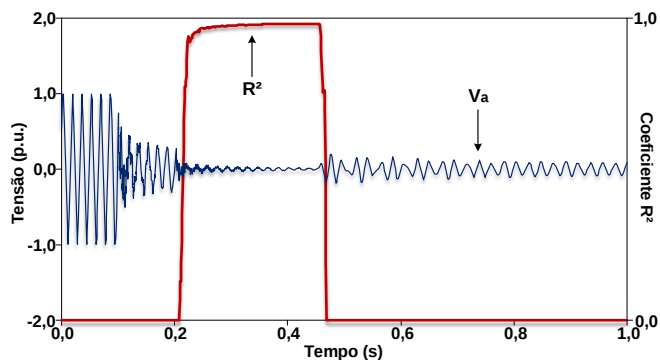


Figura 6. Forma de onda da tensão na fase A e identificação do instante de extinção da falta pelo coeficiente R^2 – falta fase-terra.

Identificado o término da falta, determina-se, então, a frequência e a amplitude dos sinais no domínio modal. Seguidamente, realiza-se a extrapolação dos sinais de tensão durante um intervalo de 100 ms. De posse destas informações, obtêm-se os instantes apropriados para o religamento, considerando que o tempo de resposta da operação do disjuntor possui um valor típico de 50 ms.

Adicionalmente, os instantes apropriados auferidos são analisados sob o ponto de vista do acoplamento eletromagnético, ambicionando estabelecer o menor intervalo possível entre o fechamento dos contatos das três fases.

Por fim, o efeito do controle pode ser observado na Fig. 7, na qual são apresentadas as tensões trifásicas na barra de Milagres, antes e após o religamento controlado da linha de transmissão em 606 ms (fase A), 629 ms (fase B) e 611 ms (fase C).

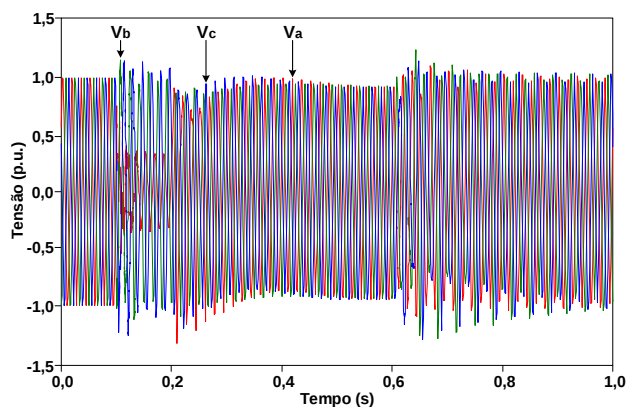


Figura 7. Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra, com chaveamento controlado.

A Fig. 8 exibe, para fins ilustrativos, o comportamento trifásico da tensão na barra de Milagres, considerando uma manobra genérica ocorrida em um tempo morto próximo a 500 ms considerado após a abertura dos disjuntores da linha, sem o emprego do controle otimizado.

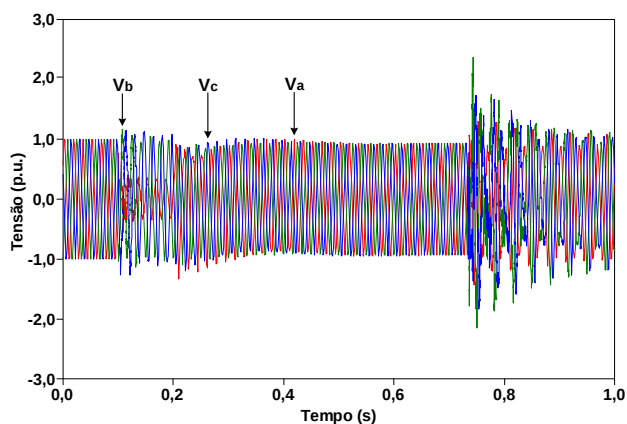


Figura 8. Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-terra, sem chaveamento controlado.

Comparando-se os resultados da Fig. 7 com os da Fig. 8, 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 2,37 p.u., enquanto que a utilização da estratégia apresentada conduziu a picos da ordem de 1,30 p.u.

B. Religamento Sob a Ação de Curto-circuito Fase-fase-terra

O fenômeno ora estudado compreende a manifestação de um curto-circuito entre as fases A e B e a terra. O cálculo do coeficiente de determinação se estabelece em 0,2 s, quando os disjuntores da linha sofrem abertura tripolar. A Fig. 9 apresenta o comportamento do R^2 para um curto-circuito ABT iniciado em 0,1 s e extinto em 0,45 s, momento no qual a fase A é restabelecida, permanecendo apenas a fase B e a terra até o instante de 0,6 s.

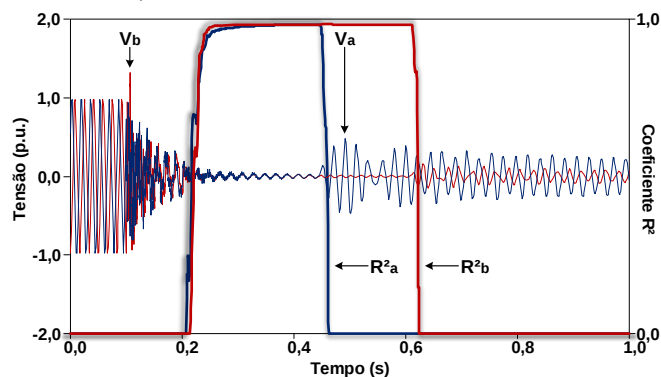


Figura 9. Formas de onda das tensões nas fases A e B e identificação do instante de extinção da falta pelo coeficiente R^2 – falta fase-fase-terra.

A etapa responsável pela definição dos instantes apropriados para o religamento da linha, implementada na MODELS M2, é executada imediatamente após a identificação da completa extinção do curto-circuito, a qual, para o presente caso, ocorre em 0,6 s.

Em consonância com os procedimentos previamente estabelecidos, a Fig. 11 mostra o comportamento das tensões trifásicas na barra de Milagres ao longo do processo, considerando a manobra em 756 ms (fase A), 754 ms (fase B) e 751 ms (fase C).

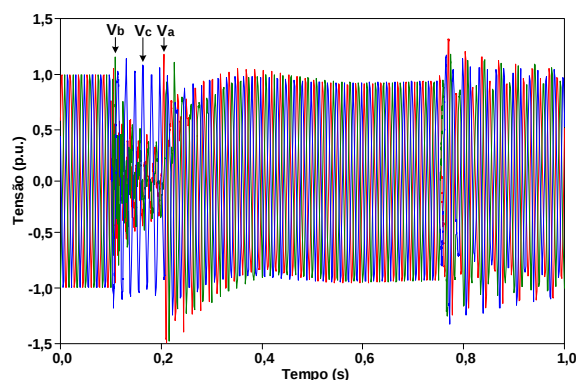


Figura 10. Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra, com chaveamento controlado.

Por fim, a Fig. 11 ilustra o comportamento das tensões na barra de Milagres após o religamento da linha de transmissão na ausência da lógica de controle, considerando um tempo morto típico de 500 ms após a abertura dos disjuntores.

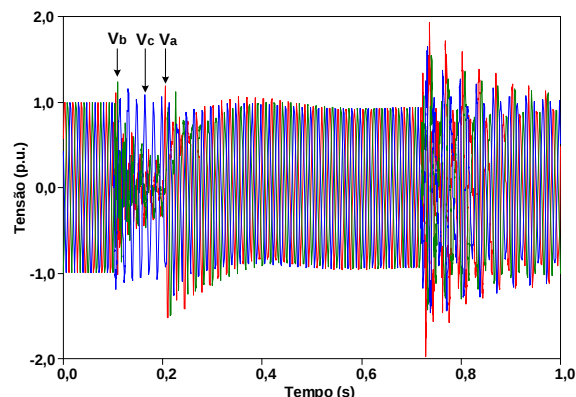


Figura 11. Formas de onda das tensões trifásicas na barra de Milagres – falta fase-fase-terra, sem chaveamento controlado.

Nota-se uma redução substancial das sobretensões quando da utilização do chaveamento controlado. De fato, sem a implementação da estratégia proposta, as sobretensões atingem amplitudes próximas a 2,00 p.u., contra cerca de 1,34 p.u. na presença da lógica do chaveamento controlado.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo visou à proposição e avaliação de desempenho de uma metodologia para o controle das sobretensões de manobras em linhas de transmissão. Para tanto, contemplou a síntese dos fundamentos físicos e matemáticos da proposta, a implementação computacional e a análise dos resultados auferidos, diante de situações típicas encontradas em campo. Não obstante a metodologia já tenha sido alvo de avaliação computacional pelo Simulador Digital em Tempo Real (RTDS™), destaca-se que a contribuição fundamental deste trabalho se encontra alicerçada na implementação da estratégia de controle no simulador ATP, uma ferramenta gratuita e amplamente disseminada no setor elétrico.

As investigações conduzidas a partir dos estudos de caso evidenciaram, com clareza, o sucesso da metodologia. Isto aponta para novas possibilidades no que tange ao controle das sobretensões de manobras, fenômenos estes que determinam os

princípios responsáveis, dentre outros fatores, para projetos e construções de linhas e seus respectivos isolamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE Working Group A3.07, Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers, Benefits & Economic Aspects, Jan. 2004.
- [2] 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*, vol. 3, n. 1, pp. 223-231, Jan. 1988.
- [3] 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*, vol. 4, n. 1, pp. 282-291, Jan. 1989.
- [4] L. Stenstrom e M. Mobedjina, "Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters", in *CIGRE 1998 sc 33 International Conference, Zagreb, Croácia*, 1998.
- [5] CIGRE Task Force 13.00.1., "Controlled Switching: A State of the Art Survey - Part I," *ELECTRA*, n. 162, pp. 65-97, Oct. 1995.
- [6] H. Ito, "Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES*, 2002.
- [7] CIGRE Working Group 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 1st Part," *ELECTRA*, n.183, pp. 42-73, Apr. 1999.
- [8] CIGRE Working Group 13.07, "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 2nd Part," *ELECTRA*, n. 185, pp. 36-57, Aug. 1999.
- [9] ABB, Controlled Switching, Buyer's & Application Guide. 3 ed, Ludvika, Sweden, Apr. 2009.
- [10] K. Froehlich, C. Hoelzl, M. Stanek, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, P. Hoegg, B. L. Avent, D. F. Peelo e J. H. Sawada, "Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 12, n. 2, pp. 734-740 Apr. 1997.
- [11] K. M. C. Dantas, "Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão", Tese (Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- [12] A. E. A. Araújo e W. L. A. Neves, *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- [13] P. M. Valero, "Controle Adaptativo para Religamento Tripolar Aplicado a Linhas de Transmissão com Compensação Reativa em Derivação", Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- [14] L. C. Zanetta Jr., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [15] 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.
- [16] K. Dantas, W. Neves e D. Fernandes, "An approach for controlled reclosing of shunt-compensated transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, n. 3, pp. 1203-1211, Jun. 2014.
- [17] T. Gönen, *Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design*, 2nd. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [18] M. R. Spiegel, J. Schiller e R. A. Srinivasan, *Probability and Statistics*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- [19] The MathWorks, Inc., *Curve Fitting Toolbox User's Guide*, [S.1.], 2007.
- [20] 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*, Jul. 2008.