



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

CONTROLE ADAPTATIVO PARA RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO REATIVA EM DERIVAÇÃO VISANDO A REDUÇÃO DE SOBRETENSÕES TRANSITORIAS

Patricia Mestas Valero*

Maria Cristina Dias Tavares

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO
UNICAMP**

RESUMO

O presente trabalho descreve um método para o controle de sobretensões durante a manobra de religamento de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. Este método consiste em identificar com bastante antecedência a região ótima na tensão para o chaveamento do disjuntor, permitindo fechar o mesmo já no primeiro mínimo do batimento da tensão entre os contatos do disjuntor, após o tempo morto de atuação da proteção. O procedimento desenvolvido trabalha independentemente do cruzamento por zero da tensão, reduzindo significativamente o tempo morto antes do religamento. O método foi implementado no programa PSCAD / EMTDC e seu desempenho é comparado com um método de controle existente e com o resistor de pré-inserção. Uma análise realizada num sistema de transmissão real de 500 kV mostra a capacidade do método para reduzir sobretensões, enquanto o normal fornecimento de energia é feito com o mínimo de tempo de interrupção possível.

PALAVRAS-CHAVE

Chaveamento controlado, Sobretensões de manobra, Religamento trifásico, Linhas de transmissão, Transitórios eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Um fator principal no planejamento de linhas de transmissão de extra alta tensão (EAT) é a expectativa do nível de sobretensões de chaveamento. Para linhas de transmissão longas, os surtos de chaveamento mais severos são os resultantes de faltas seguidas de religamento trifásico rápido com carga residual na linha. Por esta razão, é necessário encontrar soluções mais eficazes, a fim de reduzir os efeitos nocivos das sobretensões nos sistemas de transmissão.

Atualmente, para o controle de sobretensões na manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão, de maneira geral, utiliza-se o resistor de pré-inserção nos disjuntores. Este embora seja um método efetivo apresenta baixa confiabilidade, além do alto custo agregado à fabricação e à manutenção dos disjuntores (1,2).

Uma alternativa ao uso da resistência de pré-inserção é a instalação de pára-raios de óxido metálico com menor nível de proteção e uma maior capacidade de dissipação de energia nos dois terminais. Uma redução adicional de sobretensões de chaveamento pode ser conseguida através da utilização de um para-raio adicional no meio da linha (1,2,3).

Outro método para reduzir as sobretensões é o chaveamento controlado. Este método consiste em controlar o instante de abertura ou fechamento dos pólos do disjuntor devido a que os surtos originados por manobras 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. (4,5)

O objetivo do presente trabalho é apresentar um novo método de chaveamento controlado para linhas de transmissão com compensação em derivação, visando à redução de sobretensões ocasionadas pelo religamento tripolar rápido. Este método consiste em identificar com bastante antecedência a região ótima na tensão permitindo fechar o disjuntor já no primeiro mínimo do batimento da tensão entre os contatos do disjuntor após o tempo morto de atuação da proteção. O religamento tripolar rápido é analisado considerando carga residual na linha e os efeitos da compensação em derivação. O desempenho do método proposto é comparado com um método existente e com o resistor de pré-inserção.

Nas seguintes secções o fenômeno de sobretensões transitórias durante o religamento de linhas com compensação em derivação é revisto. Posteriormente o artigo descreve o método proposto e apresenta alguns resultados de simulações em um sistema de transmissão real de 500 kV.

2.0 - SISTEMA ANALISADO

O sistema analisado é baseado em um sistema de transmissão real de 500 kV de 1052 km. Foram assumidos Pára-raios de oxido metálico de tensão nominal de 420 kV, instalados nos terminais dos trechos de linha (Fig. 1).

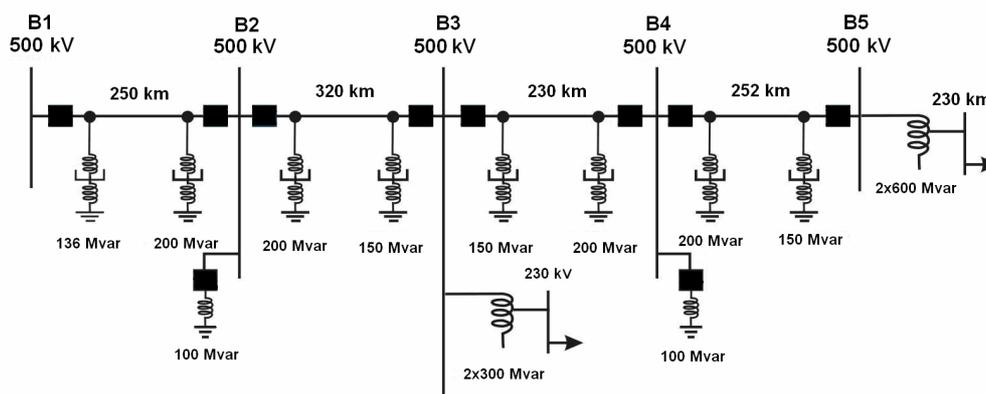


Figura 1- Esquema básico do sistema elétrico de 500 kV analisado

A modelagem e simulação do sistema em estudo foram realizadas no PSCAD/EMTDC (Power System Computer Aided Design) (6). Os parâmetros de linha foram calculados para frequência fundamental (60 Hz) e são apresentados na Tabela I. A linha foi considerada idealmente transposta, e a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência foi modelada utilizando o Modelo de Fases.

TABELA 1 - Parâmetros de linha – 60 Hz

Componentes	Longitudinal (Ω/km)	Transversal ($\Omega\text{S}/\text{km}$)
Não homopolar	$0.0161 + j 0.2734$	$j 6.0458$
Homopolar	$0.4352 + j 1.4423$	$j 3.5237$

Para considerar os efeitos da compensação em derivação, o estudo centrou-se nas seguintes seções da linha:

- Segmento final da linha que corresponde a um comprimento de 252 km em direção da barra B4 →barra B5 com 91% de compensação em derivação.
- Segundo segmento da linha que corresponde a um comprimento de 320 km em direção da barra B2 →barra B3 com 71% de compensação em derivação.

3.0 - RELIGAMENTO TRIFÁSICO

O religamento de linhas de transmissão ocorre após uma seqüência de eventos, tais como ocorrência da falta, abertura da linha para eliminar o curto-circuito e religamento. Após a ocorrência de uma falta na linha de transmissão, a proteção irá proceder à abertura tripolar, ou seja, das três fases da linha, isolando o trecho sob falta. Como a grande maioria das faltas que atingem as linhas de transmissão não são permanentes após um tempo pré-definido a proteção irá religar o trecho de linha aberto para garantir a continuidade do fornecimento de energia.

Quando um disjuntor opera na função de abrir uma linha, a corrente da linha é interrompida ao passar pelo zero e quando isto ocorre, a tensão na linha estará passando pelo seu valor máximo deixando uma carga residual na linha, que não é igual nas três fases. A fase que primeiro interrompe a corrente pode chegar a ter uma tensão de até 1,3 p.u. e, a menos que esta carga seja drenada por um transformador, um reator, ou uma carga, a linha permanecerá carregada por muito tempo.

Se a linha for religada antes da carga residual ter sido drenada e os contatos do disjuntor fecharem quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da linha, a sobretensão transitória será elevada. O decaimento da carga de uma linha em vazio quando da não existência de equipamentos conectados a terra ou de carga é muito lento, sendo governado pelas condições climáticas e ocorrendo através do escoamento da carga pela cadeia de isoladores. Desta forma, a linha mantém-se carregada com praticamente sua tensão máxima por um longo período após a interrupção da corrente, sendo este tempo da ordem de 2 a 5 minutos para a descarga total da linha podendo atingir 15 minutos em condições muito secas.

3.1 Religamento trifásico de linhas sem compensação reativa em derivação

As operações de religamento de linhas de transmissão são normalmente realizadas com carga residual na linha e as características de carga residual dependem do grau de compensação em derivação da linha de transmissão. A tensão residual na linha determina a forma de onda de tensão entre os contatos do disjuntor. No caso de linhas sem compensação a forma de onda é aproximada à função 1-cos (4). A otimização do religamento trifásico de este tipo de linha consiste em fechar o disjuntor no vales da onda de tensão, ou seja, quando a tensão está mais próxima de zero (Fig. 2).

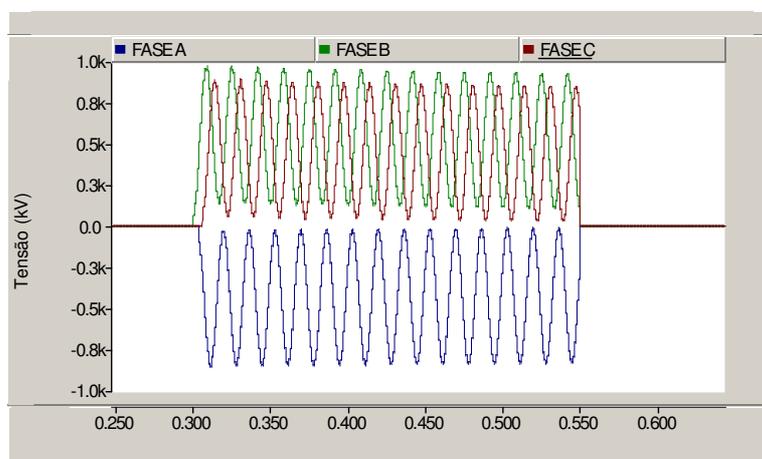


Figura 2 - Forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor LT sem compensação reativa em derivação

3.2 Religamento trifásico de linhas com compensação reativa em derivação.

Quando a linha é compensada com reatores em derivação, o grau de compensação tem um efeito importante na forma de onda de tensão entre os pólos do disjuntor. Devido ao circuito formado entre a admitância transversal da linha e a indutância dos reatores em derivação, a tensão entre os pólos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento) com composição entre a freqüência fundamental do sistema de um lado do contato do disjuntor com a freqüência natural da linha e equipamentos de compensação do outro lado do contato do disjuntor (4,7).

O período do batimento depende do grau de compensação da linha. Dois exemplos são apresentados: Tensão entre os contatos do disjuntor para uma linha altamente compensada (Fig. 3) e para uma linha pouco compensada (Fig. 4).

A perda da carga do trecho de linha em vazio produz um amortecimento na amplitude da tensão no decorrer do tempo sendo a descarga função do fator de qualidade do reator. Como resultado a amplitude do batimento entre os contatos do disjuntor tende a diminuir, mas a amplitude da região de mínimo do batimento aumenta com o tempo. Em função destas condições, a região ótima nas ondas de tensão entre os pólos do disjuntor para religar o disjuntor corresponde aos primeiros intervalos de menor amplitude do batimento da tensão, conforme ilustra a Fig. 3, onde encontra-se destacada a primeira região de mínimo do batimento (8).

Para linhas pouco compensadas, o tempo morto para atuação da proteção deve ser tomado em conta. No presente exemplo são considerados 12 ciclos da frequência fundamental para a atuação da proteção e então a região ótima para religamento trifásico corresponde ao mínimo de segundo batimento (Fig. 4).

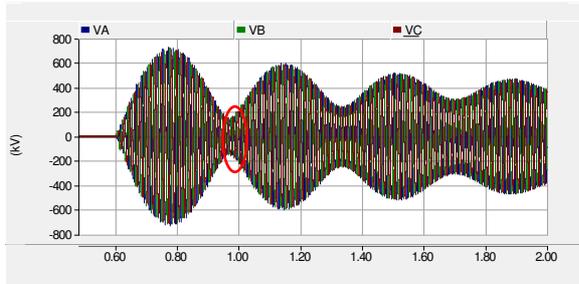


Figura 3 - Forma de onda entre os contatos do disjuntor. LT com 91 % de compensação reativa em derivação.

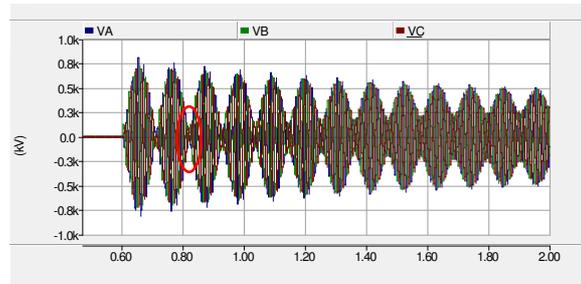


Figura 4 - Forma de onda entre os contatos do disjuntor. LT com 71 % de compensação reativa em derivação.

4.0 - METODO PROPOSTO

A estratégia do método proposto [9] é atrasar apropriadamente os comandos de fechamento dos pólos do disjuntor para que ocorra no primeiro mínimo do batimento da tensão, após o tempo morto da proteção. Este método é baseado na forma de onda de tensão entre os contatos do disjuntor, independente do cruzamento por zero da tensão.

A tensão trifásica de um sistema de potência é monitorada constantemente por transformadores de potencial (TPs). Para efeitos de simulação trabalha-se com a tensão real do sistema, mas no caso de implementação do algoritmo desenvolvido nos equipamentos de proteção serão utilizadas grandezas reduzidas transformadas pelos TPs. Por outro lado, mesmo sendo o sistema trifásico, o algoritmo necessita da tensão somente de uma das fases, a qual emitirá o sinal para operar o religamento das três fases (Fig 5).

Primeiramente, se mede a tensão no lado do sistema e a tensão no lado da linha. Assim a forma de onda entre os terminais do disjuntor aberto pode ser determinada. Seguidamente este sinal de tensão será tratada logicamente para obter a duração do primeiro semi-ciclo (Fig 6). Finalmente o valor deste semi-ciclo (Fig 7) se duplica obtendo-se a duração do período do batimento (Fig 8).

Logo após a abertura dos contatos do disjuntor, o relé deve ajustar o tempo do religamento para um valor muito elevado, podendo ser este valor de 60 s. No instante em que o sinal lógico da identificação do semi-ciclo for concluído uma ordem é fornecida para que o tempo do religamento seja substituído pelo período do batimento identificado.

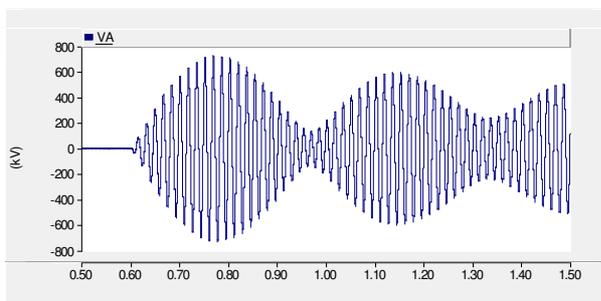


Figura 5 - Forma de onda entre os contatos do disjuntor LT com 91 % de compensação reativa em derivação.

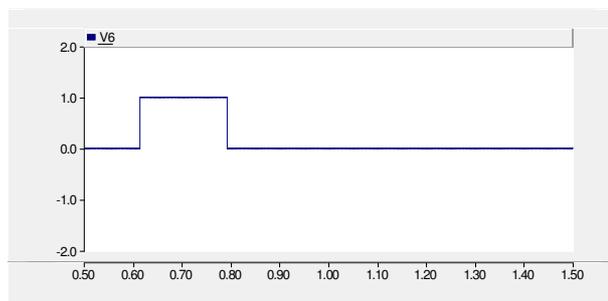


Figura 6 - Identificação da duração do meio período.

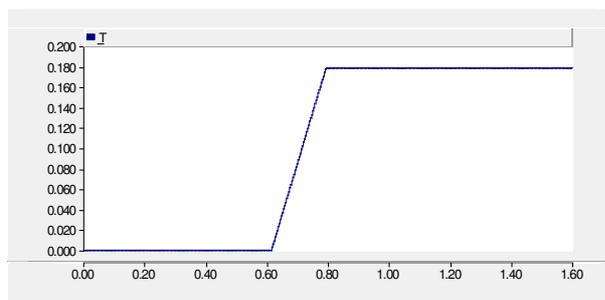


Figura 7 - Geração do tempo de duração do primeiro semi-ciclo.

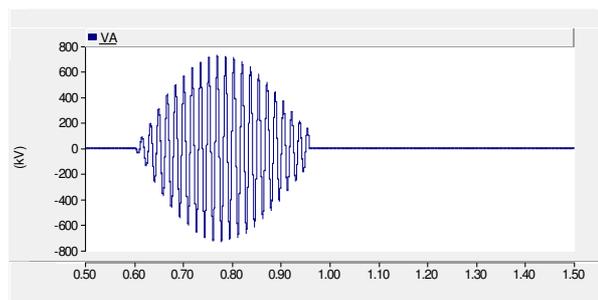


Figura 8 - Identificação do instante ótimo para o religamento do disjuntor.

O método se adapta a qualquer grau de compensação em derivação. Para as linhas altamente compensadas, o disjuntor irá fechar no primeiro mínimo do batimento e para linhas pouco compensadas o fechamento do disjuntor irá ocorrer no segundo ou terceiro mínimo do batimento. O tempo de religamento depende do tempo morto de atuação da proteção e sua identificação é um procedimento automático.

A identificação do instante ótimo do fechamento é obtida com vários ciclos de frequência fundamental de antecedência, possibilitando assim um ajuste adicional, se necessário, devido à dispersão dos pólos e à característica dielétrica do disjuntor. Devido à grande redução de sobretensões não é necessário procurar o cruzamento por zero da tensão. Como a detecção do instante ótimo de fechamento é muito rápida, este procedimento permite ter uma margem grande de tempo para operar o disjuntor.

5.0 - METODO EXISTENTE

Um dispositivo de controle atualmente no mercado, descrito em [7], utiliza um modelo que identifica a primeira região de mínimo batimento e envia uma ordem para o disjuntor fechar na próxima região semelhante. De acordo com este método, inicialmente os sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte são obtidos, estes sinais são monitorados num intervalo de tempo (normalmente num período da frequência fundamental) proporcionando um primeiro conjunto de dados. Estes dados são armazenados e um novo conjunto de dados é adquirido. Ambos os conjuntos são comparados entre si. Se os dois conjuntos de dados não forem iguais, um terceiro conjunto de dados é adquirido e assim por diante. Quando as equivalências são encontradas entre dois conjuntos de dados, a periodicidade dos sinais é concluída e a região de mínimo identificada.

Segundo este método, os instantes ótimos a serem considerados para religamento correspondem à passagem por zero da tensão no período de menor amplitude do batimento destes sinais. Por conseguinte tal método identifica a primeira região de amplitude mínima e envia uma ordem para o disjuntor fechar na próxima região semelhante. Assim o fechamento dos pólos somente irá ocorrer após a primeira região de amplitude mínima, o que implica em um tempo maior da linha fora de serviço. Além disso, a redução da sobretensão é menor quando o fechamento ocorre para as regiões de amplitude mínima subseqüentes, fazendo com que seu desempenho fique semelhante ao método do resistor de pré-inserção.

Em contraste, o método proposto trabalha independente do cruzamento por zero da tensão e o religamento ocorre no primeiro mínimo do batimento após o tempo morto de proteção. Para a linha com um grau de compensação de 91%, um pronunciado batimento aparece e a região de mínimo do batimento para religamento é composto de vários ciclos da frequência industrial (Fig. 9). Para uma linha com um nível mais baixo de compensação, tais como de 71%, a forma de onda da tensão aparece mais complexa, com um batimento menos pronunciado podendo acontecer que algumas passagens por zero sejam omitidas (Fig. 10). Neste caso, utilizando o método existente, a consequência é que no intervalo de tempo disponível para aquisição de dados, a periodicidade dos zeros da tensão pode não ser encontrada como é desejado.

Este problema tinha de ser superado. A solução foi não tomar o cruzamento por zero da tensão como referencia, mas sim a forma de onda de tensão entre os contatos do disjuntor. O sinal tratado digitalmente é muito simples de manipular e a região ótima para religamento pode ser encontrada rapidamente.

Pode-se observar que o método proposto pode funcionar adequadamente com a dispersão dos pólos do disjuntor durante o religamento trifásico, uma vez que a região do mínimo do batimento é composta por vários ciclos de frequência industrial.

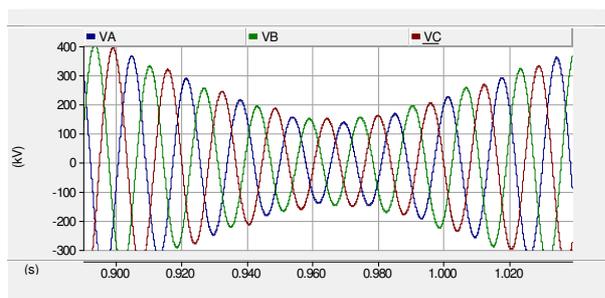


Figura 9 - Região de mínimo do batimento da tensão LT com 91 % de compensação reativa em derivação

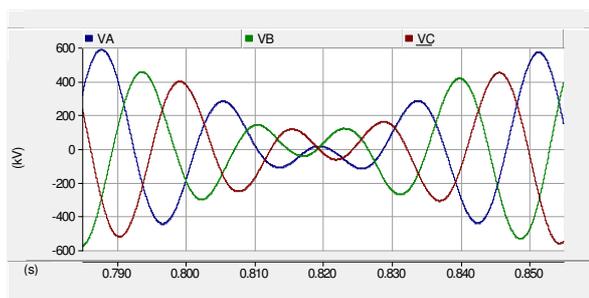


Figura 10 - Região de mínimo do batimento da tensão LT com 71 % de compensação reativa em derivação

6.0 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

O método proposto é avaliado mediante simulações digitais do religamento de linhas de transmissão tomando em conta a carga residual na linha e os efeitos da compensação em derivação.

As seguintes situações foram simuladas:

- Nenhum método para limitar sobretensões.
- Utilizando resistor de pré-inserção.
- Utilizando o método existente de chaveamento controlado.
- Utilizando o método proposto de chaveamento controlado.

Serão apresentadas as figuras das simulações de linhas de transmissão com 91 % de compensação. Os resultados das simulações da linha com 71 % são apresentados na Tabela II.

No primeiro caso nenhum método para limitar sobretensões é usado, ou seja, são utilizados somente pára-raios com tensão nominal de 420 kV localizados nos terminais da linha. O tempo morto considerado foi 550 ms. (os valores típicos para linhas de transmissão de 500 kV em Brasil estão na faixa de 500 a 1100 ms). Os contatos do disjuntor foram fechados no máximo do segundo batimento da tensão, representando a condição mais crítica.

Para representar a mesma situação para linhas de transmissão com 71% de compensação em derivação, os pólos do disjuntor devem ser fechados no máximo do quinto batimento da tensão, o que corresponde a um tempo morto de 500 ms.

Para linhas de transmissão com 91 % de compensação sem método de controle (Fig. 11), a sobretensão no final da linha foi 744 kV.

O segundo caso reproduz o uso do resistor de pré-inserção com pára-raios Ur. 420 kV localizados nos terminais da linha. Neste estudo foi considerado um resistor de pré-inserção existente de 400 Ω com um tempo de inserção de 8 ms. A sobretensão no final da linha é 617 kV. (Fig. 12)

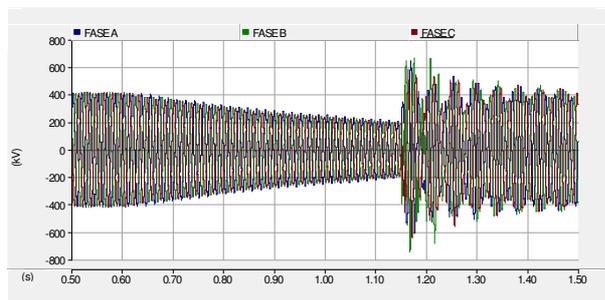


Figura 11 - Tensão no terminal receptor
Religamento tripolar sem método de controle

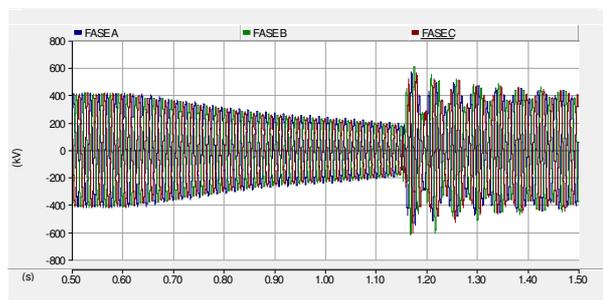


Figura 12 - Tensão no terminal receptor
Religamento tripolar utilizando resistor de pré-inserção

O terceiro caso utiliza o método existente para controle de sobretensões no religamento tripolar. Com este método o disjuntor deve ser fechado no cruzamento por zero do segundo e terceiro mínimo do batimento da tensão entre os pólos disjuntor para linhas com 91 % e 71 % de compensação em derivação, respectivamente. Para linhas com 91% de compensação em derivação (Fig. 13), a sobretensão no terminal da linha foi de 511 kV.

Usando o método existente para linhas o disjuntor foi fechado no segundo mínimo do batimento da tensão. Este é um caso ideal, porque pode ser muito difícil prever o cruzamento por zero da tensão no primeiro mínimo e provavelmente este procedimento deverá ser repetido continuamente até periodicidade do cruzamento por zero da tensão seja encontrada. Neste caso, o tempo antes do novo religamento aumentará.

Finalmente, utilizando o método proposto, o disjuntor é fechado, no primeiro e segundo mínimos do batimento entre os contatos do disjuntor para linhas com 91% e 71% de compensação em derivação, respectivamente. Neste caso, para a linha com 91% de compensação em derivação (Fig. 14), a sobretensão no final da linha é de 502 kV.

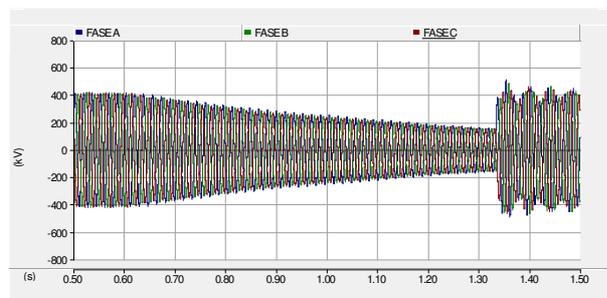


Figura 11 - Tensão no terminal receptor
Religamento tripolar utilizando o método existente

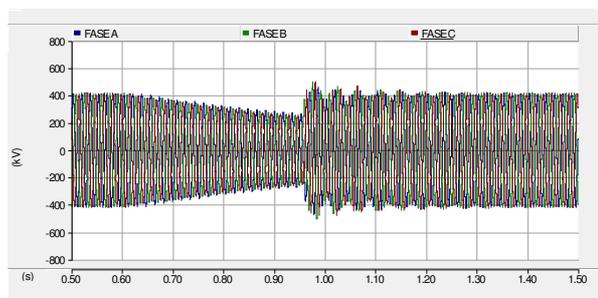


Figura 12 - Tensão no terminal receptor
Religamento tripolar utilizando o método proposto

A tabela II apresenta os valores das sobretensões no terminal da linha para os dos graus de compensação reativa em derivação analisados.

TABELA II
Sobretensões no terminal receptor da linha de transmissão

	91% de compensação		71% de compensação	
	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo morto (ms)	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo morto (ms)
Sem controle de sobretensões	1,82	550	2,59	500
Resistor de pré-inserção	1,51	550	1,41	500
Método de chaveamento controlado existente	1,25	740	1,16	320
Método de chaveamento controlado proposto	1,23	367	1,14	220

7.0 - CONCLUSIONES

Um método novo para religamento tripolar controlado de linhas de transmissão foi proposto e avaliado por meio de simulações digitais utilizando PSCAD / EMTDC.

As simulações demonstram a eficiência do método proposto para reduzir as sobretensões de advindas do religamento tripolar rápido otimizando o tempo morto e reduzindo o tempo de interrupção do fornecimento de energia.

O procedimento apresenta maior confiabilidade na determinação do primeiro mínimo do batimento de tensão, independente do cruzamento por zero da tensão. Este método permite também ter uma ampla margem de tempo para operar o disjuntor já que a detecção do mínimo do batimento ocorre com vários ciclos da frequência fundamental de antecedência.

O método proposto permite a considerar a dispersão e a característica dielétrica dos pólos do disjuntor durante o religamento trifásico, uma vez que a região do mínimo do batimento é composta de vários ciclos da frequência fundamental.

A utilização do religamento tripolar controlado adaptativo elimina a necessidade do resistor de pré-inserção,

reduzindo os custos dos disjuntores da linha de transmissão. Como consequência, o religamento controlado pode proporcionar um aumento da vida útil dos equipamentos e a melhoria da qualidade no fornecimento da energia.

8.0 - REFERENCES

- (1) A. C. Legate, J. H. Brunke, J. J. Ray, and E. J. Yasuda, "Elimination of closing resistors on EHV circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 1, pp. 223-231, Janeiro 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 Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 282-291, Janeiro 1989.
- (3) L. Stenstrom, M. Mobedjina, "Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters" In: CIGRE 1998 sc 33 International Conference, Zagreb, 1998.
- (4) A.C. Carvalho, M. Lacorte, O. 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.
- (5) H. Ito, "Current Status and Future Trend of Controlled Switching System", Mitsubishi Electric ADVANCE, Março 2007.
- (6) PSCAD[®]/EMTDC[™] vs 4.2.1 User'Guide, Manitoba HVDC Research Centre, Agosto 2006.
- (7) K. Froehlich, A.C. Carvalho, B.L. Avent, C. Hoelzl, W. Hofbauer, D.F. Peelo, M. Stanek, P. Hoegg, J.H. Sawada, "Controlled Closing on Shunt Reactor compensated Transmission Lines - Part I", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 734-740, Abril 1997.
- (8) P. Mestas, "Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitorias durante a energização e religamento de linhas de transmissão", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, Julio 2007.
- (9) C. Tavares, P. Mestas, "Método para religamento tripolar rápido em linhas de transmissão com compensação reativa em derivação" Instituto Nacional de Propriedade Industrial INPI. Depósito Patente 13.10.08 – PI0804330-2, Brasil Outubro, 2008.