



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -10

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO DE UM CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO AO
RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Patrícia Mestas(*)

Maria Cristina Tavares

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO
UNICAMP**

RESUMO

Um método para reduzir sobretensões devido ao religamento trifásico de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação foi desenvolvido, implementado em hardware e validado através de testes em um Simulador Digital em Tempo Real (RTDS). Após a identificação do tipo de falha, o algoritmo detecta a primeira região do mínimo do batimento da tensão através dos pólos do disjuntor. O método funciona independente do cruzamento por zero da tensão, reduzindo significativamente o tempo de religamento. O presente trabalho reporta a avaliação paramétrica do método, incluindo uma variedade de sistemas de compensação, a influência da transposição e o desempenho do método proposto em comparação com método tradicional do resistor de pré-inserção e outros métodos de controle existentes.

PALAVRAS-CHAVE

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

1.0 - INTRODUÇÃO

As operações de chaveamento nos sistemas de energia são uma causa comum de distúrbios transitórios. Dependendo da configuração dos sistema e as características do chaveamento, estes transitórios podem causar efeitos indesejáveis, não só sobre a carga ligada, mas também em toda a rede. Estes efeitos incluem redução da vida útil dos equipamentos, falha dos equipamentos nas subestações e degradação da qualidade da energia.

Quando se trata de linhas de transmissão, de maneira geral, para o controle de sobretensões durante a manobra de religamento tripolar 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].

O chaveamento controlado tem se tornado um substituto econômico para resistores de pré-inserção sendo comumente utilizados para reduzir os surtos de manobra. Esta é uma técnica que usa um dispositivo eletrônico inteligente para controlar o tempo de fechamento e abertura de disjuntores de pólos independentes com relação ao ângulo de fase de um sinal de tensão ou corrente de referência [3] [4].

Nas 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. Fazendo uso da técnica do chaveamento controlado, no religamento tripolar, os contactos do disjuntor devem ser fechados no instante certo de forma a limitar a sobretensão para um valor adequado. Este instante varia de acordo com a configuração do sistema e deve ser determinado mediante um algoritmo de fechamento em relação à medida dos sinais de tensão do sistema fornecidos ao algoritmo. Além disso, a implementação desta solução deve considerar fatores importantes como a existência (ou não) da compensação reativa.

Outro aspecto importante a se analisar é o tipo de falta. Se a linha de transmissão está sob condições de falta externa, a tensão através dos pólos do disjuntor apresenta um batimento definido, especialmente para graus

(*)Av. Albert Einstein, 400, FEEC / DSCE, Caixa Postal 6101 CEP 13083-852 - Campinas SP,- Brasil
Tel: (+55 19) 3521-3738 – Fax: (+55 19) 3521-3866 – Email: pmestasv@dsce.fee.unicamp.br

elevados de compensação em derivação. Neste caso, o instante ideal para o religamento é o período de menor amplitude no batimento da tensão através dos pólos do disjuntor.

Por outro lado, se a linha de transmissão se encontra sob falta interna, a condição de fase defeituosa influencia o sinal das duas fases sãs. Por conseguinte, os sinais da forma de onda obtidos através dos pólos do disjuntor são muito complexos e outra abordagem de análise deve ser adotada.

O presente trabalho está focado na análise paramétrica de um método desenvolvido para religamento trifásico de linhas de transmissão com compensação em derivação sob condições de falta externa. O método proposto avalia a forma de onda da tensão através dos pólos do disjuntor, sem ter o cruzamento por zero da tensão como referência. Com este sinal, o algoritmo de detecção é consideravelmente simplificado e o instante ideal para o religamento pode ser encontrado mais rapidamente. O algoritmo foi também implementado em hardware e validado através de testes em um simulador digital em tempo real.

A análise paramétrica, considerando uma variedade de esquemas de compensação shunt, a influência de compensação série, a influência de diferentes esquemas de transposição e a comparação do desempenho do método proposto com o método tradicional do resistor de pré-inserção e outro método de controle existente são apresentados nas seções seguintes.

2.0 - RELIGAMENTO TRIFASICO DE LINHAS DE TRANSMISSAO

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 frequência fundamental do sistema de um lado do contato do disjuntor com a frequência natural da linha e equipamentos de compensação do outro lado do contato do disjuntor [5] - [8].

2.1 Linha de Transmissão sob falta interna

A seqüência de eventos do religamento tripolar devido a faltas internas incluem: a ocorrência da falta, abertura da linha nas três fases para isolar a seção sob falta, extinção da falta e finalmente religamento da linha de transmissão.

A Fig. 1(a) mostra a corrente de falta durante o religamento de uma linha de transmissão com 90 % de compensação em derivação. Depois da abertura trifásica, a extinção de falha ocorre 100 ms após da falta. As Figs. 1 (b) – (d) mostram as formas de onda de tensão através do disjuntor. A fase A (sob falta) influencia o sinal das outras duas fases sãs (fases B e C), portanto os sinais obtidos são muito complexos e o batimento esperado é distorcido. Os dados de linha são apresentados na secção 5.

2.2 Linha de Transmissão sob falta externa

Para este caso, a seqüência de eventos para as operações de religamento automático inclui a abertura automática do disjuntor e posterior religamento, após um intervalo de tempo predeterminado. A tensão através do disjuntor mostra um batimento definido e a forma de onda é semelhante para as três fases.

O período do batimento depende do grau da compensação da linha. Nas Figs. 2 (a) - (c), são mostradas formas da onda de tensão através dos pólos do disjuntor para níveis de compensação alto (90%), médio (70%) e baixo (50 %), respectivamente.

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. 2 (a).

Para linhas pouco compensadas, o tempo morto para atuação da proteção deve ser levado em consideração. Assumindo um tempo morto de 12 ciclos da frequência fundamental para a atuação da proteção, a região ótima para religamento trifásico corresponde ao mínimo de segundo batimento (Fig. 2b) e ao mínimo do quarto batimento (Fig. 2c).

3.0 - METODOS DE RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LINHAS DE TRANSMISSAO COM COMPENSAÇÃO EM DERIVACAO

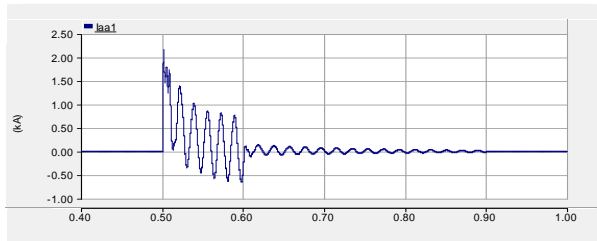
O método mais comum consiste em utilizar um sistema auxiliar que inclui um resistor de pré-inserção em série com um par de contatos auxiliares, sendo o sistema auxiliar montado em paralelo com a câmara de corte. Os contatos auxiliares são acionados alguns instantes antes de entrar em contato com os contatos principais, de modo a inserir os resistores de pré-inserção no circuito. Com isso em duas etapas de chaveamento é possível reduzir as sobre-tensões, com grande eficácia. Esta primeira solução, apesar de muito eficaz, tem o inconveniente de ser muito cara [1],[2].

Atualmente existe um método que utiliza o chaveamento controlado para religamento trifásico de linhas de transmissão compensadas sob falta externa [5, 6]. Em forma geral, o método identifica a primeira região de amplitude mínima e envia uma ordem para o disjuntor fechar na próxima região semelhante.

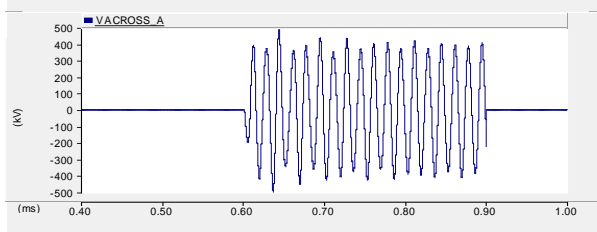
Três condições devem se cumprir para identificar a região de mínimo batimento: o cruzamento por zero do sinal da tensão do lado da fonte e do lado da linha deve ocorrer ao mesmo tempo, as derivadas dos dois sinais devem ter a mesma polaridade e a amplitude destes sinais deve ser a mesma.

O período T do batimento é obtido a partir de duas determinações sucessivas do mínimo batimento, 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. Por outro lado a sobretensão é maior quando o fechamento ocorre para as regiões de amplitude mínima subseqüentes.

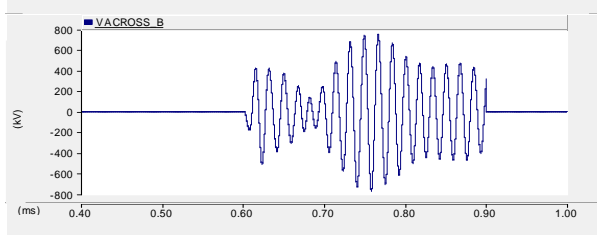
Outro fator a considerar é que para linhas pouco compensadas a forma da onda da tensão aparece mais complexa, com um batimento menos pronunciado (Fig. 2c) podendo acontecer que algumas passagens por zero sejam omitidas. Neste caso, a consequência é que no intervalo de tempo disponível para aquisição de dados, a periodicidade dos zeros da tensão pode não ser encontrada como é desejado.



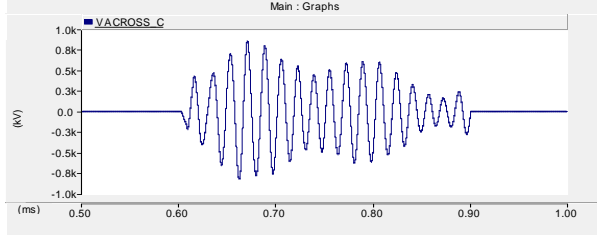
(a) Corrente de falta. Fase A sob falta.



(b) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase A



(c) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase B



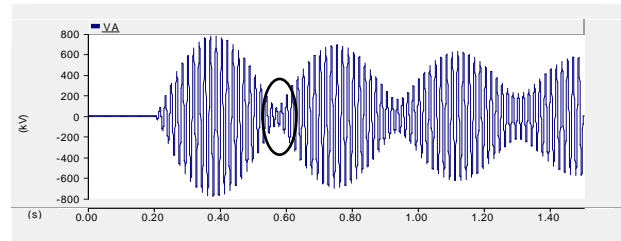
(d) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase C

FIGURA 1 – Corrente de falta e forma de onda através do disjuntor. Linha de transmissão de 500 kV com 90 % de compensação.

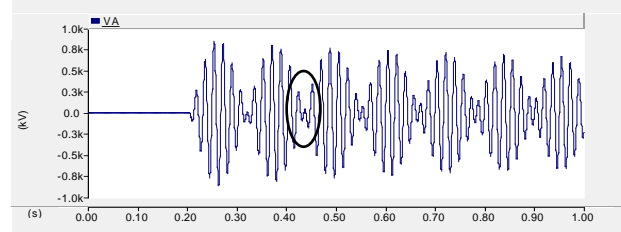
3.1 Método proposto

A estratégia do método proposto [9,10] é atrasar apropriadamente os comandos de fechamento dos pólos do disjuntor para que este 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.

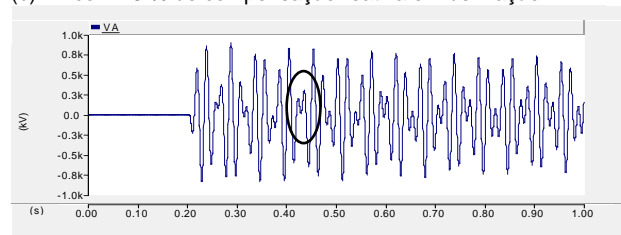
A tensão de um sistema de potência é monitorada constantemente por transformadores de potencial (TPs). Para efeitos de simulação trabalha-se com a tensão real do sistema, mas no caso de implementação do algoritmo desenvolvido nos equipamentos de proteção serão utilizadas grandezas reduzidas transformadas 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.



(a) LT com 90 % de compensação reativa em derivação.



(b) LT com 70 % de compensação reativa em derivação.



(c) LT com 50 % de compensação reativa em derivação.

FIGURA 2 – Instantes ótimos de religamento para vários níveis de compensação. Linha de transmissão de 500 kV.

Primeiramente, a tensão no lado do sistema e a tensão no lado da linha são medidas para determinar a forma de onda V_{brk} a traves dos pólos do disjuntor como mostrado na Fig. 3. Com o processamento do sinal, o envelope da curva é determinado e se torna o sinal de referência V_{ref} .

No intuito de atenuar os componentes de alta frequência, um filtro Butterworth é empregado. O sinal filtrado V_{ref} terá um atraso em relação a V_{brk} . A correção deste atraso é feita automaticamente no algoritmo geral. Antes da abertura do disjuntor, V_{ref} tem magnitude zero, portanto, usando um comparador é identificado o instante da abertura dos contatos do disjuntor t_{open} .

O meio período $T/2$ é identificado mediante a determinação do ponto t_{max} em que V_{ref} atinge seu primeiro máximo. Assim, se o sinal de religamento do disjuntor é dada no próximo mínimo do batimento, o atraso para fechar a partir do instante t_{max} é $T_{d1}=T/2$.

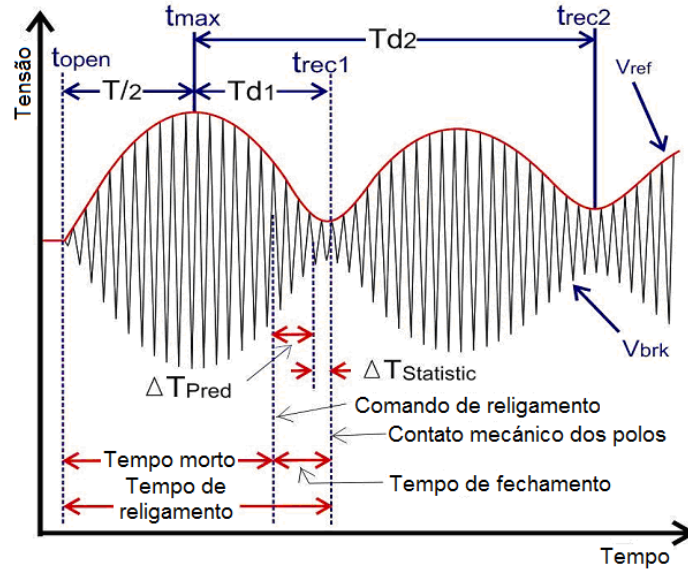


Figura 3. Identificação do instante ótimo para o religamento.

O método tem de se adaptar a qualquer grau de compensação em derivação. Por exemplo, quando a linha é levemente compensada [como na fig. 2 (b)], $T_{d1}=T/2$ pode ser demasiado curto para processar o sinal de fechamento, devido a que deve ser considerado o tempo morto da proteção. Nesse caso, o atraso deve ser estendido para $T_{d2}=3T/2$, onde ocorre o próximo mínimo do batimento. Para níveis menores de compensação [como na fig. 2 (c)], o atraso deve ser estendido ainda nos próximos mínimos do batimento como $5T/2$. Observa-se, que ao contrário dos métodos anteriores, este método não se baseia no cruzamento por zero do sinal, e o atraso pode ser determinado com antecedência. Uma ligeira correção é feita com o tempo de fechamento do disjuntor para incluir as características específicas do disjuntor. Isto é explicado na seguinte sub-seção.

3.2 Tempos de operação

Os tempos de operação de um disjuntor real variam significativamente com o tipo de disjuntor, o tipo de operação e as condições ambientais. Algumas das variações do tempo são previsíveis e outras são puramente estatísticas [11]. Como mostrado na Figura 2, o tempo de religamento do disjuntor é expresso como a soma dos três termos:

$$T_{rec} = T_{dead} + \Delta T_{Pred} + \Delta T_{Statistic}$$

O tempo morto da proteção T_{dead} é o intervalo de tempo entre o instante da energização do circuito para abrir o disjuntor e o primeiro re-establishimento da corrente em qualquer dos pólos da operação de fechamento subsequente. O período ΔT_{Pred} é uma variação previsível desde a energização da bobina de fechamento do disjuntor até o instante do contato mecânico. O período $\Delta T_{Statistic}$ é uma variação puramente estatística do tempo de operação.

Para considerar os atrasos adicionais, o sinal de religamento é reduzido a partir do momento T_{d1} obtidos com o algoritmo de controle principal, mediante $\Delta T_{Pred} + \overline{\Delta T_{Statistic}}$, onde $\overline{\Delta T_{Statistic}}$ é a meia de $\Delta T_{Statistic}$. Desta forma, o disjuntor fecha o mais próximo possível ao instante ideal, conforme mostrado na Fig. 3. Vale ressaltar que as proporções temporais são meramente ilustrativas.

3.3 Vantagens do método proposto

O método proposto apresenta maior confiabilidade na determinação do primeiro mínimo do batimento da tensão, após do tempo morto de proteção. O religamento no primeiro mínimo significa um menor tempo da linha de transmissão fora de serviço.

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 tempo de religamento depende do tempo morto de atuação da proteção, sendo sua identificação 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.

3.4 Implementação em hardware do controlador

O controlador foi implementado em um processador digital de sinais (3CP), que por sua vez contém três processadores do tipo 21062. Estes processadores são semelhantes aos utilizados no simulador RTDS e, portanto, a interface gráfica do RTDS foi usada para programar o algoritmo do controlador no código do RTDS.

4.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR EM UM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL

Depois de testes off-line usando um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos (PSCAD/EMTDC), o método proposto foi implementado em hardware físico, como mencionado no parágrafo anterior. Este hardware foi então testado em um simulador digital em tempo real (RTDS).

O RTDS é um simulador digital de sistemas de potência com capacidade de operação contínua em tempo real. Sua capacidade de interligação com equipamentos reais (relés, sistemas de controle, etc.) permite o comissionamento e a verificação do desempenho destes. Este equipamento funciona como um TNA digital, flexível, preciso e com grande capacidade de representação, através de modelos matemáticos, de um sistema elétrico e de seus equipamentos associados.

4.1 Testing of developed controller

Para avaliar o desempenho do controlador em tempo real é necessário realizar uma interface entre o controlador e o RTDS. Para isto, o sistema de potência deve ser modelado digitalmente na estação de trabalho mediante o RSCAD. A execução da simulação do sistema de potência gera sinais de tensões analógicas do lado da fonte e do lado da linha. Estes sinais são captados pelos canais de saídas analógicas do RTDS. Um conversor analógico -digital (OADC) é usado para converter estes sinais analógicos em sinais digitais que são ingressadas ao controlador. Após processar o algoritmo, no instante em que o tempo de religamento é identificado pelo controlador, uma ordem é enviada para fechar o disjuntor. A saída do controlador é um sinal digital. Para fornecer este sinal ao sistema de potência implementado na interface gráfica do RTDS se utiliza um sistema de isolamento óptico denominado MUX Interface Card (IMC) (Figura15).

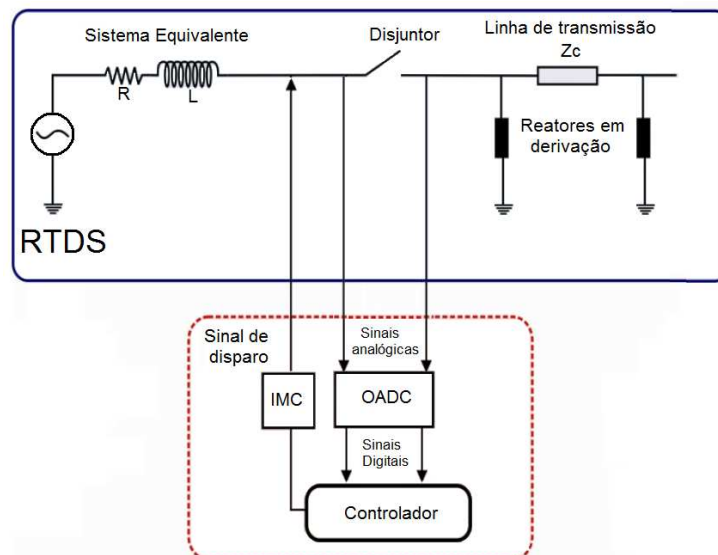


Figura 4 - Configuração da Interface do controlador com o RTDS

5.0 - ANÁLISE PARAMÉTRICA DO MÉTODO PROPOSTO

O sistema analisado é baseado em um sistema de transmissão real de 500 kV e 1052 km. Foram utilizados pára-raios de óxido metálico de tensão nominal de 420 kV, instalados nos terminais dos trechos de linha. O fator de qualidade dos reatores de linha e barra é de 400 e dos reatores de neutro é de 40. 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 foram modeladas utilizando o Modelo de Fases da linha de transmissão.

A tabela II mostra os dados da compensação em derivação da linha de transmissão. O esquema de compensação é composto por bancos de três reatores monofásicos (fator de qualidade = 400), aterrado através de reatores de neutro de 800Ω (fator de qualidade = 50).

Tabela 1 - Parâmetros da linha de transmissão – 60 Hz.

Componentes	Longitudinal (Ω /km)	Transversal (Ω S/km)
No homopolar	0.0161 + j 0.2734	j 6.0458
Homopolar	0.4352 + j 1.4423	j 3.5237

Tabela 2 - Dados da compensação em derivação

Segmentos da LT	Long. (km)	Potencia Reativa (MVar)		Nível de compens.
		Emissor	Receptor	
1st - (B1- B2)	250	136	200	100 %
2nd - (B2-B3)	320	200	150	70 %
3rd - (B3-B4)	230	150	200	100 %
4th - (B4-B5)	252	200	150	90 %

5.1 Diversos esquemas de compensação em derivação.

Para considerar os efeitos da compensação em derivação, o foram analisadas as seguintes seções da linha:

- Segmento final da linha que corresponde a um comprimento de 252 km em direção da barra B4 a B5 incluindo dois reatores em derivação (90 % de compensação).
- Segundo segmento da linha que corresponde a um comprimento de 320 km em direção da barra B2 a B3 com os dois reatores conectados (70 % de compensação).
- O mesmo segmento final de 252 km entre a barra B4 e B5 considerado em i), mas esta vez só com um reator em derivação conectado (50 % derivação).

A Figura 5 mostra os oscilogramas capturados nas saídas analógicas do RTDS para os três casos. O disjuntor é fechado no primeiro, segundo e quarto mínimo do mínimo do batimento. Em cada caso, o religamento se realiza no instante ótimo, considerando um tempo morto para a proteção de 12 ciclos.



Figura 5 - Tensões entre os contatos do disjuntor utilizando o controlador para o religamento.

A tabela III mostra a diferença entre a tensão máxima através do disjuntor e tensão na região do mínimo do batimento. Esta diferença permite observar a vantagem de efetuar o religamento na região do mínimo.

Tabela 3 – Máximos tensões através do disjuntor

Nível de compensação	Máxima tensão entre os pólos do disjuntor	Máxima tensão na região do mínimo do batimento entre os pólos do disjuntor
90 %	780 kV	125 kV (Primeiro mínimo)
70 %	840 kV	160 kV (Segundo mínimo)
50 %	900 kV	330 kV (Quarto mínimo)

Tabela 4 – Dados da compensação série

Comprimento da linha (km)	Capacitor Serie	
	Nível de compensação (%)	XC (Ω)
900	50	95.432

5.2 Influência da compensação série

Para linhas de transmissão muito longas, além da compensação em derivação são usados capacitores em série que aumentam a capacidade de transmissão, reduzem as perdas do sistema e melhoram o perfil de tensão da linha de transmissão. A tabela 4 mostra os dados da compensação série da linha de transmissão. A Fig. 6 mostra a comparação entre uma linha de transmissão com 90% de compensação em derivação e a mesma linha com 90% de compensação em derivação mais 50% de compensação em série. As simulações com o PSCAD / EMTDC demonstraram que os batimentos da tensão através do disjuntor para ambos casos são muito semelhantes, por isso, é possível concluir que a compensação série não interfere com o desempenho do método desenvolvido.

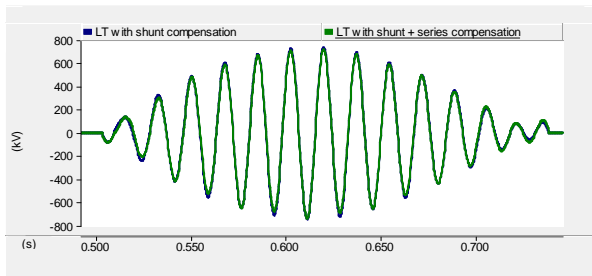


Figura 6 – Comparação LT com compensação em derivação vs. LT com compensação em derivação + compensação série.

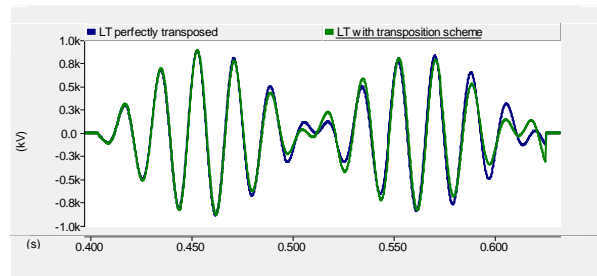


Figura 7 – Comparação LT perfeitamente transposta vs. LT com esquema de compensação 1/6 - 1/3 - 1/3 - 1/6

5.3 Influência da transposição

O desempenho do método de chaveamento controlado foi avaliado por meio de linhas de transmissão perfeitamente transpostas na Seção 5.1. Por esta razão, o método aumenta a sua eficácia porque os parâmetros de sequência negativa e positiva da linha são os mesmos. Por conseguinte, para a linha de transmissão com compensação, a tensão do lado da linha após a desenergização mostra principalmente uma componente de frequência, associados aos parâmetros de sequência positiva.

No entanto, as linhas atuais não são idealmente transpostas, ou seja, a linha não é balanceada para todas as frequências envolvidas no transitório eletromagnético. Para sinais de altas frequências as longitudes não são muito maiores do que o ciclo de transposição, e, portanto, a transposição da linha deve ser devidamente representada.

Em geral, o setor elétrico brasileiro, usa o esquema de transposição 1 / 6 - 1 / 3 - 1 / 3 - 1 / 6 (com três torres de transposição). A fim de determinar a influência da transposição, a linha de transposição foi modelada como segue: idealmente transposta e sem esquema de transposição.

O segundo segmento do sistema em estudo foi utilizado para a análise. A Figura 7 mostra a tensão entre os pólos do disjuntor quando o método desenvolvido foi aplicado a uma linha idealmente transposta e uma linha com o esquema de transposição de 1 / 6 - 1 / 3 - 1 / 3 - 1 / 6. O comportamento das formas de onda foi muito semelhante, pelo que se pode concluir que o desempenho do método foi satisfatório para ambos os casos.

5.4 Comparação de diferentes métodos

O algoritmo proposto (caso base) foi comparado com as seguintes situações:

- 1) Nenhum método para limitar sobretensões.
- 2) Utilizando resistor de pré-inserção.
- 3) Utilizando o método existente de chaveamento controlado.

Na simulação do caso 1) nenhum método para limitar sobretensões foi usado, ou seja, foram utilizados somente pára-raios com tensão nominal de 420 kV localizados nos terminais da linha. O tempo morto considerado foi de 500 ms (os valores típicos para linhas de transmissão de 500 kV em Brasil estão na faixa de 500 a 1100 ms).

A simulação do caso 2) reproduz o uso do resistor de pré-inserção. Neste estudo, um resistor de 400 Ω existente foi simulado, com um tempo de inserção de 8 ms. Foi testado também outro resistor com valor próximo à impedância de surto da linha, os resultados foram semelhantes aos obtidos como o resistor real.

No caso 3) foi utilizando o método existente para religamento tripolar. O disjuntor deve ser fechado no cruzamento por zero do segundo, terceiro e quinto mínimo do batimento da tensão entre os pólos disjuntor para linhas com 90, 70 e 50 % de compensação em derivação, respectivamente. Este instante para o religamento é ideal, na realidade o método pode apresentar dificuldade para encontrar a exata periodicidade.

Na simulação do algoritmo proposto o disjuntor foi fechado, no primeiro, segundo e quarto mínimo do batimento entre os contatos do disjuntor para linhas com 90, 70 e 50 % de compensação em derivação, respectivamente.

A Tabela 5 resume os resultados das simulações incluindo os tempos de religamento. Pode-se observar que utilizando o método proposto o resultado das sobretensões mesmo sendo ligeiramente menor que para o método existente, apresenta vantagem na redução do tempo de religamento. Deve se considerar que o método existente foi modelado idealmente e os resultados apresentados são otimistas comparados com os apresentados em [5-Part II] (ao redor de 800 ms em lugar de 297 ms segundo reportado na Tabela 5). Isto porque particularmente para os níveis de compensação baixos, a tensão através do disjuntor tem batimentos pouco pronunciados e inclusive podem existir certos intervalos de tempo onde não há cruzamento por zero, tornando difícil para o método existente identificar o instante ideal para religamento no menor tempo possível.

Tabela 5 – Máxima tensão através dos pólos do disjuntor

	90 % de compensação		70 % de compensação		50 % de compensação	
	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)
Nenhum método	1.80	500	1.94	500	1.91	500
Resistor de pré-inserção	1.53	500	1.42	500	1.85	500
Método existente	1.25	740	1.28	350	1.61	297
Método proposto	1.24	360	1.15	230	1.59	239

6.0 - CONCLUSÕES

Um novo método para religamento tripolar de linhas de transmissão sob falta externa que não depende do cruzamento por zero foi desenvolvido. O método proposto foi implementado em hardware físico, e sua operação bem sucedida foi confirmada num Simulador Digital em Tempo Real.

O controlador é capaz de reduzir as sobretensões de manobra advindas do religamento tripolar e de garantir o religamento no menor tempo possível, reduzindo o tempo de interrupção do fornecimento de energia.

Em comparação com os métodos atualmente utilizados, o controlador apresenta maior confiabilidade na determinação do primeiro mínimo do batimento, para qualquer nível de compensação reativa em derivação. 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.

A análise paramétrica demonstra que o método proposto funciona satisfatoriamente, com diversos esquemas de compensação em derivação. A compensação série e a transposição da linha não influenciam o desempenho do método.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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) P. C. V. Esmeraldo, J. Amon, F. M. Salgado Carvalho, A. C. C. Carvalho, S. A. Moraes, "Circuit-breaker requirements for alternative configurations of a 500 kV transmission system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999
- (4) Paulo C. Fernandez, Paulo C. V. Esmeraldo, Jorge Amon Filho, Cesar Ribeiro Zani. Use of controlled switching systems in power system to mitigate switching transients trends and benefits – Brazilian experience. IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America, 2004.
- (5) L. Stenstrom, M. Mobedjina, "Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters" In: CIGRE 1998 sc 33 International Conference, Zagreb, 1998.
- (6) 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.
- (7) H. Ito, "Current Status and Future Trend of Controlled Switching System", Mitsubishi Electric ADVANCE, Março 2007.
- (8) 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: Closing Control Device Development. Part II: Application of Closing Control Device for High-Speed Autoreclosing on BC Hydro 500 kV Transmission Line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 734 -746, April 1997.
- (9) K. Dantas, W. L. Neves, D. Fernandes., G.. Cardoso, L. Fonseca "Mitigation of switching overvoltages in transmission lines via controlled switching". In: Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE
- (10) PSCAD®/EMTDC™ vs 4.2.1 User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre, Agosto 2006.
- (11) J. Marti, "Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101, #1, pp. 147-155, Jan. 1982
- (12) P. Mestas, "Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias durante a energização e religamento de linhas de transmissão", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, Julho 2007
- (13) M. 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.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Patrícia Mestas: Engenheira Mecânico-Eletricista pela Universidade Nacional San Agustín de Arequipa (UNSA) Peru, M.Sc (2007) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brazil. Trabalhou na elaboração de projetos, montagem e manutenção de linhas de transmissão. Atualmente cursa doutorado em Engenharia Elétrica na UNICAMP. Durante um ano (2009-2010), realizou estudos na Universidade de Manitoba, no Canadá. Suas áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos, linhas de transmissão e simulações computacionais do tipo EMTP, EMTDC.

Maria C. Tavares: Engenheira eletricista (1984) pela UFRJ – Universidade de Rio de Janeiro, M.Sc (1991) pela COPPE/UFRJ, D.Sc.(1998) pela UNICAMP. Trabalhou em firmas de consultoria em engenharia elétrica com análise de sistemas de potência, HVDC, desenvolvimento de modelos para o EMTP e planejamento de transmissão elétrica. Atualmente é professora Associada na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. Suas áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, transmissão a longa distância e aplicações computacionais para a análise de transitórios em sistemas de potência.