

Análise da Manobra de Energização em Linhas de Transmissão em Ultra-Alta-Tensão

Lucas E. S. Fernandes*, Milton E. Z. Alcahuaman **
Fernando A. Moreira ***

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia,
(e-mail: lucasesfernandes@gmail.com)*

** *Departamento de Eletrotécnica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia da Bahia
(e-mail: miltonelvis@ifba.edu.br)*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal da Bahia,
(e-mail: moreiraf@ufba.br)*

Abstract: The challenge of transporting large blocks of energy over long distances with low cost and high efficiency has attracted several studies to the area of power transmission above 1000 kV. In this work an analysis of the energization switching in UHV (Ultra High Voltage) lines is made, for lines with voltage levels between 1000 kV and 1200 kV, long lines above 900 km and considering the variation of reactive compensation. This analysis seeks to know the levels of the most severe transient overvoltages, looking for methods to mitigate these disturbances in the energization switchings of the lines. The overvoltages resulting from the simulated operations were obtained with the PSCAD software, widely used for the simulation of electromagnetic transients in power systems.

Resumo: O desafio de transportar grandes blocos de energia a longas distâncias com baixo custo e alta eficiência tem atraído diversos estudos para a área de transmissão de energia a partir de 1000 kV. Neste trabalho é realizada uma análise da manobra de energização em linhas de UAT (Ultra Alta Tensão), para linhas com níveis de tensão entre 1000 kV e 1200 kV, linhas longas acima de 900 km e considerando a variação da compensação reativa. Esta análise busca conhecer os níveis de sobretensões transitórias mais severas, procurando métodos para mitigar essas perturbações nas manobras de energização das linhas. As sobretensões resultantes das operações simuladas foram obtidas com o software PSCAD, amplamente utilizado para a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

Keywords: Ultra high voltage transmission (UAT); Long lines; Transient overvoltages; Power-up maneuvers.

Palavras-chaves: Transmissão em ultra alta tensão (UAT); Linhas longas; Sobretensões transitórias; Manobras de energização.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica continua crescendo de forma significativa no Brasil e no mundo e, mais recentemente, com uma forte preocupação ambiental. Com a expansão dos grandes centros industriais e um número crescente de instalações de geração localizadas longe dos grandes centros de carga, é bastante importante o estudo de novas tecnologias para transmissão de grandes blocos de energia.

No Brasil, país com dimensões continentais onde existe uma considerável distância entre geração e os principais centros consumidores, a geração de energia elétrica vem sendo expandida de forma significativa devido ao crescimento principalmente da geração eólica e solar, localizadas em grande parte na região Nordeste do país. Esse aumento exigirá a transmissão de grandes blocos de energia elétrica por longas

distâncias, devido à localização dos principais centros consumidores estarem na região Sudeste do país.

Em um sistema de transmissão de energia elétrica, certamente ocorrerão sobretensões em certos pontos do sistema o que dificilmente pode ser evitado, assim como sua total supressão é extremamente difícil, entretanto, amplitudes podem ser limitadas para que sejam compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema. Por este motivo são necessários estudos dos comportamentos das linhas frente a perturbações de manobras, como é o caso da energização, trazendo abordagens tradicionais e novas que busquem soluções cada vez mais eficientes com a finalidade de diminuir os efeitos das sobretensões nos sistemas de transmissão. Nesse sentido, a avaliação precisa do comportamento dos sistemas de potência frente a sobretensões torna-se uma missão prioritária para pesquisadores que buscam melhorar a proteção dos

sistemas, a diminuição dos custos de projeto, a identificação de sistemas vulneráveis e seus impactos efetivos.

Em (He, 2010) é feito um estudo sobre métodos de supressão de transitórios em linhas de UAT CA na China, onde diferentes para-raios são avaliados como medidas alternativas para eliminar resistores de fechamento em sistemas de 1000 kV de ultra-alta tensão. Dois tipos de para-raios com menor tensão residual são introduzidos para suprimir sobretensões de comutação. O desempenho desses para-raios em diferentes condições de operação também é analisado, é mostrado que os resistores de fechamento em sistemas UAT CA podem ser eliminados após a aplicação de para-raios adequados e a adoção de certas medidas de distribuição.

Em (Silveira, 2017) apresenta uma solução de transmissão em corrente alternada por linhas de 1000 kV, que se mostrou mais econômico na transmissão de potências superiores a 3.500 MW e distâncias de 1400 km. Neste trabalho foi analisado o escoamento da energia das regiões Norte e Nordeste para a região Sudeste devido ao crescimento dos empreendimentos de geração eólica. No trabalho foi escolhida a alternativa em 1000 kV CA com tensão máxima de 1100 kV, ligando o sul do Ceará até a região central de Minas Gerais, passando pela região central da Bahia.

Em (Jardini, 2016) são discutidos os modelos e os resultados da energização e religamento, bem como a coordenação do isolamento de uma linha de 1000 kV em estudo no Brasil. Os meios para reduzir as sobretensões, como o uso de resistores de fechamento / abertura e comutação sincronizada, são examinados e comparados.

Estes e outros estudos comprovam a importância e os temas que estão sendo estudados sobre transmissão de energia elétrica em UAT no Brasil e ao redor do mundo. No presente estudo será abordada uma análise da manobra de energização em uma linha de UAT. Com níveis de tensão entre 1000 kV e 1200 kV, e comprimentos acima dos 900 km, considerando também a variação da compensação reativa na linha, esta análise buscou conhecer os níveis de sobretensões transitórias oriundas da manobra de energização, procurando métodos para mitigar essas perturbações. As simulações foram realizadas com o auxílio do software PSCAD, o qual é amplamente utilizado para a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

Neste artigo, de forma a estruturar e organizar as etapas da pesquisa, é abordado na seção 2 a definição da topologia de compensação da linha, assumindo uma topologia de compensação série e derivativa para o sistema estudado. Na seção 3 é definido o nível de compensação em derivação, seguindo critérios dos limites de sobretensão das normas brasileiras, para o qual o sistema opere em segurança. Após as definições de topologia e níveis de compensação série e *shunt* são realizadas na seção 4 as simulações das manobras de energização da linha para os valores de tensão e comprimento pré-definidos. Na seção 5 são comparados métodos para mitigação das sobretensões transitórias oriundas da manobra de energização da linha. Finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 6.

2. DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DE COMPENSAÇÃO DA LINHA

A. Considerações sobre a linha

A metodologia aplicada aos estudos consiste em definir inicialmente o arranjo da compensação série e em derivação ao longo da linha de transmissão. Com o intuito de estudar um sistema consolidado e com parâmetros reais, foram utilizados os parâmetros elétricos da linha russa Ekibastuz-Kokchetav-Kustanai de 900 km dividida em três trechos (com 300 km cada) e quatro subestações, com um nível de tensão de 1000 kV (Epri, 2005). Os parâmetros elétricos da linha foram obtidos por um algoritmo desenvolvido no MATLAB e os dados estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elétricos da linha de teste.

SEQUÊNCIA ZERO	SEQUÊNCIA POSITIVA
$Z_0 = 0.248 + j1.125 \Omega/\text{km}$	$Z_+ = 0.0095 + j0.34 \Omega/\text{km}$
$Y_0 = j2.689 \text{ S/km}$	$Y_+ = j 4.349 \text{ S/km}$
POTÊNCIA NATURAL (MVA):	4723,21
IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA (Ω):	280

Nos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, o controle de reativo, em geral, é feito com a ajuda de dispositivos conectados à rede, que tenham a característica de gerar e/ou absorver reativos (Rezende et al. 2013).

Nesta parte do trabalho foi utilizada a representação da linha por um quadripolo, utilizado pelas características de simplicidade de cálculo e versatilidade que oferecem.

O modelo ABCD, ilustrado na Fig. 1, é definido a partir das equações de tensão e corrente como segue:

$$\dot{V}_1 = A\dot{V}_2 + B\dot{I}_2 \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{V}_2 + D\dot{I}_2 \quad (2)$$



Fig. 1 Quadripolo típico de linha de transmissão.

Para o cálculo das constantes de quadripolo, foi considerado a classificação da linha como, curta, média ou longa. Para o caso estudado, a linha de comporta como linha longa devido a sua extensão física.

B. Compensação em Derivação

A compensação em derivação tem por objetivo reduzir o efeito da capacitância *shunt* das linhas de transmissão através de reatores em derivação que absorvem energia reativa de sinal oposto. Empregam-se reatores indutivos para compensar as reatâncias capacitivas naturais das linhas. Neste tipo de compensação procura-se, principalmente, a redução do *Efeito Ferranti*, que é responsável pelo aumento da tensão no terminal receptor da linha em relação ao terminal emissor,

quando a linha opera em vazio ou com baixa carga. Neste trabalho foi definido que seriam alocadas em ambas as extremidades dos trechos da linha reatores indutivos.

C. Compensação Série

A reatância indutiva e a resistência, parâmetros série das linhas de transmissão, são os responsáveis pelas grandes quedas de tensão nas linhas, logo a compensação série eleva a estabilidade da rede através da redução da reatância indutiva da linha de transmissão, que é responsável pelo ângulo de potência da linha (Lima et al. 2012). Elevando desta forma a capacidade de transmissão nos regimes permanente e dinâmicos, conforme Fig. 2, onde (U_1, δ_1) e (U_2, δ_2) representam respectivamente o módulo e o ângulo das tensões nas barras da fonte e da carga.

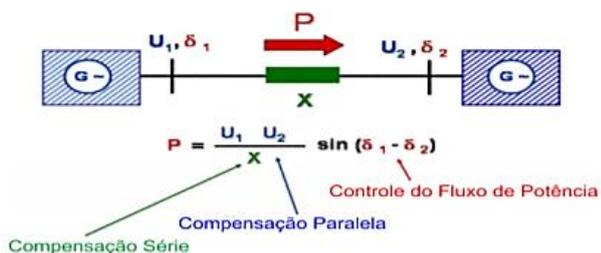


Fig. 2 Princípio de funcionamento da compensação série.

Fonte: Lima, et al. 2012.

A compensação poderá então ser realizada através de capacitores ligados em série, capaz de reduzir a reatância série da linha, quando vistos dos terminais. Neste estudo os bancos de capacitores séries foram dimensionados para compensar um total de 50 % da reatância série de toda a linha, sendo alocados no início do Trecho B-C da linha de transmissão.

Na Fig.3 é ilustrada a topologia definida para a compensação da linha de transmissão, em que serão realizados os estudos apresentados neste artigo.

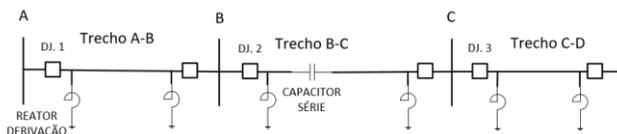


Fig. 3 Unifilar do sistema estudado com compensação série alocada no trecho B-C da linha.

3. NÍVEL DA COMPENSAÇÃO SHUNT

Para definição do nível de compensação shunt da linha de transmissão foi calculado através do software Matlab. Simulando a energização de diferentes comprimentos de linha e variando assim os valores percentuais de compensação *shunt* dos trechos de linha, seguindo a topologia definida no item anterior.

Os valores de tensão representados na Tabela 2 foram obtidos das simulações no software. Onde analisou-se a sobretensão em regime permanente da linha para a variação do nível de compensação *shunt*, fixado o valor de compensação série de 50% da reatância série total da linha.

A partir dos dados obtidos através da simulação da energização da linha para os diferentes níveis comprimento e variando assim também os níveis de compensação *shunt*, foi determinado que o nível de compensação *shunt* adotado para a linha de transmissão seria o de 90 %. Pois, para tal nível de compensação os valores de sobretensão, em regime permanente, estão dentro do limite estabelecido em projeto (± 5 % de sobretensão em regime permanente). Como não há normas vigentes no Brasil que regulem os limites de sobretensão em regime permanente para classes de tensões iguais ou superiores a 1000 kV, foi definido como limites os valores pré-estabelecidos para sobretensões nos níveis de 765 kV (maior nível de tensão normatizado). Por norma o valor limite de sobretensão em regime permanente é de 1,046 em pu (ONS, 2018).

Tabela 2. Ganho de Tensão da linha com 50 % da compensação série variando o nível de compensação *shunt* para os diferentes valores de comprimento de 900 km a 1200 km.

Ganho para Linha com Compensação Reativa em Derivação							
Sistema Convencional	Ganho de Tensão sem Compensação	Ganho de Tensão com Compensação					
		Compens. 70%	Compens. 80%	Compens. 85%	Compens. 90%	Compens. 95%	Compens. 100%
L (km)	V_2/V_1						
900	2,180	1,126	1,068	1,041	1,015	0,985	0,966
1000	2,876	1,167	1,090	1,055	1,021	0,990	0,982
1200	8,844	1,279	1,151	1,095	1,044	0,997	0,987

4. ENERGIZAÇÃO DA LINHA

Para determinação das sobretensões transitórias na linha a manobra de energização foi simulada através de uma distribuição estatística nos tempos de fechamento dos disjuntores, com o intuito de analisar os piores casos e plotar as formas de ondas de tais casos, foram analisadas 100 amostras com um tempo médio de fechamento de 70 ms e um desvio padrão de 1 ms, dados inseridos no DJ.1.

A manobra de energização nesta linha de transmissão foi realizada por trechos, onde definido o intervalo de tempo de fechamento do primeiro trecho, o trecho seguinte foi fechado após ser alcançado o regime permanente do trecho a montante. Assim, foram definidos os tempos de fechamentos dos disjuntores DJ.2 e DJ.3, 0,7 s e 1,4 s respectivamente. No disjuntor DJ.1 foi realizado o chaveamento estatístico.

A. Determinação das sobretensões máximas

Afim de estudar as sobretensões que ocorrem ao longo da linha de transmissão no instante da energização dos trechos de linha, foram utilizados os resultados obtidos nos itens anteriores e através do programa PSCAD foi simulada a linha de transmissão para os diferentes níveis de tensão e valores de comprimento total da linha.

A energização da linha foi realizada a partir de cada extremidade da linha, variando sistematicamente o instante de fechamento dos disjuntores. Considerando uma linha de transmissão com um nível de tensão de 1000 kV e variando o comprimento. Os comprimentos de linha são divididos em três trechos igualmente espaçados, diferente somente para a linha de 1000 km, que tem trechos da seguinte forma: Trecho A-B e Trecho B-C com 300 km cada, e o Trecho C-D com 400 km. Na Tabela 3 são ilustradas as sobretensões máximas encontradas para cada trecho da linha.

Tabela 3 - Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1000 kV e comprimentos de 900 km, 1000 km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 816,5 kV.

Pico de Sobretensão (pu*)				
Trecho	Subestação	Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,568	1,567	1,488
	B	2,333	2,315	2,430
B-C	B	1,839	1,758	2,003
	C	1,933	1,813	1,763
C-D	C	1,552	1,594	1,477
	D	1,774	2,034	1,583

$$*V_{base} = 816,5 \text{ kV}$$

Pode-se observar, com base nos resultados da Tabela 3, que os maiores valores de sobretensões transitórias ocorrem na seção A-B quando a linha é energizada através da subestação A. Para os três comprimentos totais de linha, este é o ponto onde ocorrem os maiores valores de sobretensões transitórias devido a manobra de energização da linha.

Modificando o nível de tensão para 1150 kV e com a mesma variação de comprimento da linha, o resultado das

sobretensões máximas encontradas ao longo da linha é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1150 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 939 kV

Pico de Sobretensão (pu*)				
Trecho	Subestação	Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,571	1,567	1,491
	B	2,234	2,230	2,621
B-C	B	1,861	1,775	1,956
	C	1,947	1,856	1,781
C-D	C	1,544	1,598	1,496
	D	1,753	2,033	1,595

$$*V_{base} = 939 \text{ kV}$$

Assim como as simulações anteriores, para um nível de tensão de 1000 kV, o comportamento das sobretensões transitórias são semelhantes, sendo o final do primeiro trecho A-B da linha o ponto onde são encontrados os maiores valores das sobretensões.

Para um nível de tensão de 1200 kV e considerando as mesmas variações do comprimento da linha, as sobretensões máximas encontradas seguem o mesmo padrão encontrado nos resultados anteriores, como ilustra a Tabela 5.

Tabela 5. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1200 kV e comprimentos de 900 km, 1000 km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 979,8 kV

Pico de Sobretensão (pu*)				
Trecho	Subestação	Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,562	1,558	1,533
	B	2,222	2,215	2,661
B-C	B	1,856	1,769	1,942
	C	1,954	1,854	1,782
C-D	C	1,541	1,589	1,480
	D	1,734	2,018	1,575

$$*V_{base} = 979,8 \text{ kV}$$

5. APLICAÇÃO DE MÉTODOS PARA DIMINUIÇÃO DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS

Após simulação das manobras de energização na linha de transmissão, foi realizada uma análise dos efeitos de diferentes métodos para mitigação das sobretensões transitórias ocorridas na linha, para uma comparação entre os resultados obtidos em cada método. Os métodos analisados foram, a inserção de para-raios nas extremidades de cada trecho de linha, a inserção de resistores de pré-inserção nos disjuntores e por último o chaveamento controlado.

A. Para-Raios

Os para-raios são basicamente resistores não lineares que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente de surto e que limitam os níveis de sobretensões a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos que protegem (Giarola, 2016).

A eficiência dos dispositivos para-raios em mitigar os níveis de sobretensão transitória se deve a característica não linear. Entretanto, os limites de absorção de energia não podem ser excedidos. Nos casos em estudo foram utilizados para-raios nos dois extremos de cada trecho da linha (Fig.4).

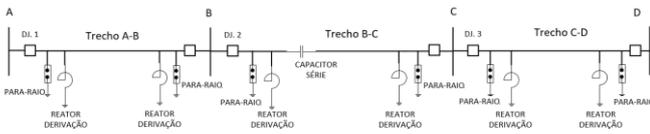


Fig. 4 Linha de transmissão com para-raios instalados nos extremos de cada trecho da linha.

Os dados dos para-raios utilizados para simulação foram extraídos do manual de equipamentos de um modelo comercial para sistemas com tensão de fase em rms de 800 kV. O para-raio possui uma tensão nominal em rms de 588 kV. Conforme manual, estes para-raios possuem um limite de absorção de energia no valor de 15 kJ/kV (ABB, 2019). O software PSCAD utiliza um modelo de resistor não linear para a simulação do para-raio na rede.

Os para-raios juntamente com os resistores de pré-inserção em disjuntores, são comumente adotados para controlar sobretensões de manobra em sistemas de extra-alta-tensão (EAT) e sistemas de UAT. Se os resistores de fechamento forem eliminados e apenas os para-raios forem utilizados, pode ser difícil atingir os níveis aceitáveis de sobretensão. Nos sistemas UAT, o requisito é ainda mais rigoroso, tornando mais difícil a eliminação dos resistores de fechamento. Uma das técnicas que pode ser utilizada é a redução do nível de proteção dos para-raios, o que pode ser alcançado pela redução da tensão residual dos para-raios. Além disso, a distribuição de para-raios ao longo da linha de transmissão é outra maneira de fazer uso dos mesmos para o controle de sobretensões de manobra (He et al. 2012). No sistema de UAT na China, a tensão nominal dos para-raios é selecionada como 828 kV após considerações cuidadosas (Gu et al.2006). Valores estes que serão utilizados como referência para o projeto.

B. Resistor de Pré-Inserção

A utilização dos resistores de pré-inserção com a finalidade de reduzir os níveis de sobretensão transitória consiste em uma energização em duas etapas. Na primeira etapa o fechamento é realizado com o resistor inserido em série com o sistema criando assim um divisor de tensão. Com isso a tensão aplicada à linha é reduzida a um valor bem abaixo da tensão nominal.

Na segunda etapa o resistor de pré-inserção é curto-circuitado e assim a tensão nominal é aplicada a linha (Vidigal, 2010).

O valor do resistor de pré-inserção é normalmente especificado como próximo ao módulo da impedância característica da linha, e o tempo de ajuste para que o resistor de pré-inserção seja curto-circuitado deve ser maior que duas vezes o tempo de propagação da onda viajante até a extremidade remota da linha (Valero, 2007).

Para as simulações de energização da linha com resistores de pré-inserção foi assumido neste artigo um valor de resistor de 280 Ω e um tempo de ajuste para curto-circuito do resistor de 9 ms, dados estes que são inseridos no modelo de disjuntor adotado pelo software PSCAD, o qual simula a inserção de um resistor interno nos contatos do disjuntor.

C. Chaveamento Controlado

O método do chaveamento controlado consiste em fechar cada polo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra passa pelo zero. Dessa forma os transitórios provocados por manobras podem ser consideravelmente reduzidos.

Os componentes principais de um chaveamento controlado são o disjuntor e o sincronizador propriamente dito. O sincronizador (ou controlador) é um dispositivo eletrônico que permite realizar a operação da manobra de energização em um ponto ótimo da onda de tensão. O princípio básico de funcionamento do sincronizador é reconhecer o padrão do sinal de referência e, prever o ponto ótimo da onda de tensão para a manobra do disjuntor (Valero, 2007).

A partir dos resultados das simulações de energização da linha foram escolhidos dois casos para simulação e comparação dos métodos de mitigação da sobretensão transitória. A primeira escolha foi o sistema inicialmente simulado da linha com comprimento de 900 km e nível de tensão de 1000 kV, e o segundo caso escolhido foi para o modelo que apresentou a maior sobretensão transitória ao longo dos trechos de linha, sendo escolhido o caso da linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km (maior sobretensão máxima). A partir dos resultados simulados foram construídas tabelas, com intuito de uma melhor visualização dos efeitos nas sobretensões para cada método e facilidade para a análise futura dos dados.

O resultado das simulações dos métodos de inserção dos para-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado para uma linha com nível de tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km, está representado na Tabela 6.

Dos resultados obtidos nesta primeira etapa (da simulação dos métodos de mitigação da sobretensão transitória na linha), por meio da Tabela 6 foi observado que os três métodos apresentam reduções nas sobretensões transitórias de forma significativa. O que apresenta melhor resultado é o resistor de pré-inserção, se comparado com a utilização somente dos para-raios ou do chaveamento controlado.

Tabela 6 - Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km, para os diferentes métodos de mitigação.

Trecho	Subestação	Pico de Sobretensão (pu*)		
		Métodos de Mitigação		
		PARA-RAIOS	RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO	CHAVEAMENTO CONTROLADO
A-B	A	1,403	1,208	1,218
	B	1,439	1,387	1,756
B-C	B	1,439	1,286	1,399
	C	1,392	1,161	1,401
C-D	C	1,379	1,196	1,523
	D	1,392	1,236	1,543

$$*V_{base} = 816,5 \text{ kV}$$

No entanto, o resistor de pré-inserção tem duas restrições importantes. Primeiro, geralmente é muito caro. Para um disjuntor, o resistor de fechamento é responsável por uma parcela significativa do custo total. Segundo, o resistor de pré-inserção tem uma taxa de falha mais alta do que outros componentes, portanto a confiabilidade de todo o sistema é reduzida (He et al. 2012).

Para o método utilizando somente os para-raios ao longo da linha, a energia absorvida pelos para-raios ficou dentro dos limites estabelecidos para o tempo de manobra da energização. Sendo os para-raios instalados ao final do trecho A-B, os que tiveram os maiores valores de energia absorvida. Na Fig. 5 é ilustrado o gráfico da energia absorvida nos para-raios instalados no final do trecho A-B.

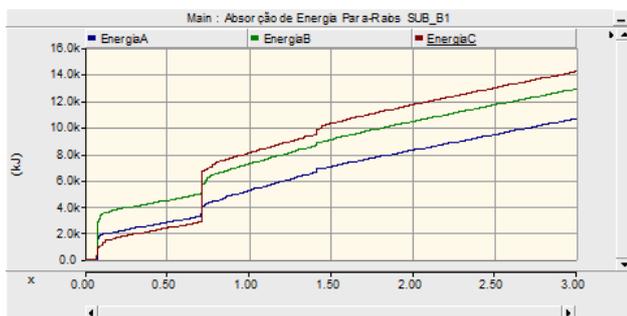


Fig. 5 Energia absorvida pelo para-raios instalados ao final do trecho A-B em cada fase (A, B e C) da linha de transmissão.

Ainda na Fig. 5, a cada energização de trecho de linha, há um ganho em degrau na energia absorvida pelo para-raios, devido a modificação no comprimento da linha, interferindo assim na curva de energia absorvida pelo para-raios.

O resultado das simulações dos métodos de inserção dos para-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado para uma linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, com para-raios localizados no início e final de cada trecho de linha.

Trecho	Subestação	Pico de Sobretensão (pu*)		
		Métodos de Mitigação		
		PARA-RAIOS	RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO	CHAVEAMENTO CONTROLADO
A-B	A	1,587	1,352	1,350
	B	1,713	1,652	2,122
B-C	B	1,688	1,416	1,576
	C	1,646	1,251	1,484
C-D	C	1,476	1,197	1,484
	D	1,563	1,244	1,535

$$*V_{base} = 979,8 \text{ kV}$$

Dos resultados obtidos, é notado que de forma semelhante à simulação da linha de 900 km com nível de tensão de 1000 kV, o método que apresenta melhor resultado nesse caso é o resistor de pré-inserção.

Para a simulação da linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, foi necessário estimar os valores da curva de tensão versus corrente para os para-raios, pois não foram encontrados dados para construção da curva de tensão versus corrente em nenhum manual de fabricantes comerciais para esta classe de tensão, logo o ajuste foi feito tomando como base os dados da curva do para-raio comercial utilizado anteriormente fazendo assim um ajuste nos valores da curva de tensão versus corrente proporcionais à mudança da classe de tensão, afim de atenderem aos valores do sistema requerido.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo, é realizada uma análise de sensibilidade de uma linha de transmissão em um sistema UAT, observando as modificações nos valores das sobretensões transitórias para a manobra de energização devido a variação dos níveis de tensão e do comprimento da linha, que foram variados de 1000 a 1200 kV e de 900 a 1200 km, respectivamente. Foi realizado também ao final, a comparação de alguns métodos de mitigação para essa sobretensão transitória ocorrida.

No estudo desenvolvido é definida uma topologia de compensação da linha em que foi utilizado uma porcentagem de compensação série de 50 % da reatância série de toda linha e uma porcentagem de compensação em derivação de 90 % da reatância em derivação da linha. Estes níveis de compensação foram eficientes, mantendo os valores de sobretensão em regime permanente dentro dos limites estabelecidos em norma (ONS, 2018).

Foi encontrado uma maior influência nas modificações dos valores de sobretensão transitórias oriundas da manobra de energização das linhas devido a alteração no comprimento, do que em relação aos níveis de tensão. A configuração de linha que apresentou menores sobretensões em pontos críticos foi para uma linha com comprimento de 900 km e nível de tensão de 1000 kV, já a configuração que apresentou maiores sobretensões em pontos críticos foi à linha com comprimento de 1200 km e nível de tensão de 1200 kV, em que foram realizados os estudos dos métodos para mitigação para estas sobretensões.

A partir dos resultados obtidos das simulações da manobra de energização do sistema, o método que apresentou melhor resultado foi o resistor de pré-inserção, que apesar de efetivo, apresenta altos custos de implementação e manutenção.

Os requerimentos de energia dos para-raios devido ao transitório de energização de linhas de transmissão são consideravelmente menores do que a capacidade térmica permitida segundo norma IEC e manual do fabricante, porém a tensão máxima de operação do sistema e as sobretensões temporárias devem ser cuidadosamente consideradas para a especificação dos para-raios.

Este estudo analisou algumas condições de comprimento e nível de tensão, porém os resultados apresentados neste artigo não devem ser generalizados. Cada sistema deve ser estudado de forma específica e com particularidades, já que muitos parâmetros influem nas sobretensões transitórias de chaveamento, como a configuração da linha, comprimento da linha, resistividade do solo, grau de compensação em derivação, características dos para-raios e outros.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudo. A UFBA e ao IFBA por disponibilizarem suas instalações para execução do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABB. (2019). High Voltage Surge Arrester – Buyer’s guide. Disponível em: <http://new.abb.com/pt>. Acesso em: 17 out. 2019.
- EPRI. (2005). *AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, Third Edition*. Electric power research institute (EPRI), Palo Alto, California.
- Giarola B. N. (2016). Análise da influência de para-raios nas sobretensões atmosféricas por descarga direta em linhas de transmissão considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del-Rei.
- Gu, D., Zhou, P., Xiu, M., Wang, S., Dai, M., and Lou, Y. (2006). Study on overvoltage and insulation coordination for 1000 kV AC transmission system. *Gaodiana Jishu/High Voltage Engineering*, volume (32), page 1-6.
- He, J., Li, C., Hu, J., Zeng, R., and Yuan, J (2012). Elimination of Closing Resistors for Breakers in 1000-kV UHV System by Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume (27), no. 4, page 2168-2175.
- Jardini, J. A. et al. (2016). Electromagnetic Transients in a 1000 kV System. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA). Morelia, México.
- Lima, M.C., Alves, F.R., Oliveira, A.L., Silva, L.P., Lemes, M.N., and Siemens, R.Q. (2012). Aplicação de Bancos de Capacitores Série na Transmissão CA de Longa Distância: o Exemplo da Interligação Tucuruí – Macapá – Manaus, SBSE 2012, Goiânia.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). (2018) Submódulo 23.3 Diretrizes e Critérios para Estudos Elétrico. Disponível em: <http://ons.org.br/>. Acesso em: 10 mai. 2020.
- Rezende, P.H.O., Santilho, F.P., Vasconcelos, L.E., and Silva, T. V. (2013). Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadores estáticos fixos. XI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Silveira, P. O. (2017). Planejamento de sistemas de transmissão em área com fonte de geração intermitente, apoiado no uso de tecnologias avançadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 98.
- Valero, P. M. (2007). Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão. Dissertação Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Vidigal R. F. (2010). Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante a manobra de energização. Dissertação Mestrado, UNICAMP, Campinas.