



ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMA DE POTÊNCIA - ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO LONGA

Palavras-Chave: Transitórios Eletromagnéticos, Chave Estatística, Resistor de Pré-Inserção

Autores:

Pedro Henrique Simenton, FEEC/UNICAMP

Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Dias Tavares (Orientadora), FEEC/UNICAMP

Resumo - Este estudo tem como intuito realizar a manobra de energização estatística de uma linha de transmissão em 440 kV, aplicando as recomendações dos procedimentos de rede. O programa ATP (Programa de Transitórios Eletromagnéticos) foi utilizado tanto para a obtenção dos parâmetros elétricos da linha de transmissão quanto para a implementação das simulações. Foi possível observar que o método de redução de sobretensões baseado no resistor de pré-inserção (RPI) é muito eficaz.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por uma grande quantidade de linhas de transmissão (LT) de variados níveis de tensão. Além de diferentes tensões, os tamanhos das linhas são diversos também. Pode-se classificar como linhas curtas as de até 80 km de comprimento, as linhas médias possuem um comprimento entre 80 km e 240 km, e as linhas longas têm mais de 240 km de comprimento. Adicionalmente, dada a importância do sistema e o fato de estar sempre em expansão, se faz importante a modelagem e o estudo do desempenho de linhas de transmissão sob diversas condições operativas.

Durante o período de transitório eletromagnético ocorrem as maiores sobretensões que as linhas de transmissão podem estar sujeitas. A energização ou desenergização de linhas de transmissão

originam um tipo de sobretensão conhecida como surtos de manobra ou de chaveamento. Como os surtos de tensão podem ser superiores ao nível em que a linha e os equipamentos são projetados, então também é importante o estudo de métodos que possam reduzir as sobretensões.

Desse modo, modelada a linha de transmissão baseada em dados do sistema brasileiro, o principal estudo da pesquisa está voltado a realizar a manobra de energização utilizando uma chave estatística, e também realizar o controle de sobretensão, da LT modelada, com o método de resistor de pré-inserção.

II. METODOLOGIA

O sistema a ser manobrado consiste em uma linha de transmissão em 440 kV entre as subestações de Assis e Sumaré (332 km), e para a análise e o estudo desse sistema, também será considerada a linha entre Taquaruçu e Assis (173,35 km). Para a modelagem da LT, serão utilizados os dados do circuito de sequência positiva, sendo assim uma modelagem monofásica.

Além dos parâmetros de sequência positiva fornecidos pelo SINDAT [1], os quais são dados como comprimento da linha, a resistência em série em porcentagem, a reatância em série em porcentagem e a potência reativa do componente em derivação, para a modelagem do sistema teste também é

necessário ter uma fonte equivalente de geração de energia, bem como a presença de reatores de correção, uma vez que se trata da energização de uma linha longa.

Quanto à fonte de energia, haverá duas análises, uma com barramento fraco e outra com barramento forte. Para o barramento fraco adota-se uma corrente de curto de 13 kA e uma razão de reatância e resistência igual a 7, enquanto para o barramento forte atribui-se uma corrente de curto de 30 kA e uma razão entre reatância e resistência igual a 8.

Para a compensação, geralmente são utilizados reatores de correção em derivação, os quais possuem valor entre 70% e 80% da admitância transversal da linha. O intuito da utilização desses componentes é efetuar a correção de alguns efeitos que podem ocorrer em linhas de transmissão consideradas longas, como o Efeito Ferranti, que é visto como o aumento de tensão ao final da LT quando comparada com o nível de tensão inicial da linha. E para o caso em estudo, a compensação será de 70%.

Ademais, visto que é uma linha longa, os parâmetros serão representados de maneira distribuída, e para a energização, será considerada que a linha está em vazio.

Sendo assim, com a LT devidamente modelada, o estudo da manobra de energização será realizado considerando um estudo estatístico, o qual possibilita realizar e analisar diversas manobras cujo tempo de fechamento da chave é uma distribuição de probabilidades ao redor de um valor médio especificado. Além disso, para ter um maior controle da sobretensão, será utilizado o método do resistor de pré-inserção (RPI).

Por fim, o software a ser utilizado tanto para a modelagem do sistema quanto para a manobra de energização será o ATP (Programa de Transitórios Eletromagnéticos).

A. Chave estatística

Para o estudo estatístico, primeiramente é necessário configurar a chave estatística no

ATP, isto é, colocar o ATP no modo estatístico, escolher o número de casos que serão simulados. Considerando os Procedimentos de Rede [6], para esse estudo foi escolhido a quantidade de 200 casos. Além disso, para o fechamento da chave estatística também é necessário escolher o valor do desvio padrão e a distribuição de probabilidade, então foi configurado um desvio padrão de 2 ms e uma distribuição de probabilidades gaussianas, a qual necessita de dois parâmetros, o desvio padrão e o valor médio a ser considerado. Uma propriedade interessante da distribuição gaussiana é que dentro de um intervalo de 1 desvio padrão da média há aproximadamente 68% de todas as observações, já em um intervalo de 2 desvios padrão da média há aproximadamente 95% de todas as observações, e em um intervalo de 3 desvios padrão há um pouco mais de 99% das observações.

Uma vez que o instante de tempo em que a manobra é realizada interfere diretamente no comportamento da tensão após manobra, então, para o estudo em questão, o valor médio a ser considerado é o qual ocorre o pior cenário de sobretensões, isto é, o fechamento médio será em 90° da forma de onda da tensão no barramento. Em outras palavras, o 0,01666 s será o instante médio de fechamento da chave.

B. Resistor de pré-inserção (RPI)

Em manobras de energização ocorrem surtos de tensão que podem ser superiores aos que o nível de isolamento da linha foi preparado para suportar, então um método de redução dessas sobretensões é o resistor de pré-inserção. A figura 1 apresenta a linha de transmissão implementada com o RPI e a chave estatística.

O procedimento para a realização da manobra de energização utilizando RPI consiste em que inicialmente as duas chaves estão abertas, e então a energização da linha ocorre com o fechamento da chave que está em série com o resistor, e após um tempo, chamado de tempo de inserção, ocorre o fechamento da outra chave, a qual curto-circuita o resistor.

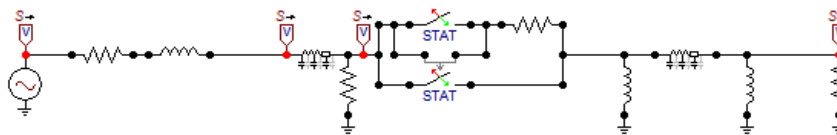


Figura 1. Linha de transmissão com resistor de pré-inserção e com chave estatística

Pode-se notar então que para cada fechamento de chave ocorre uma sobretensão. Dessa forma, no fechamento da chave em série com o resistor há a primeira sobretensão, mas é uma sobretensão relativamente menor do que se o resistor não estivesse presente na linha, uma vez que como o resistor está em série com a linha de transmissão então há um divisor de tensão entre o resistor e a LT. Já no fechamento da segunda chave, o resistor é colocado em curto-circuito, acarretando uma outra sobretensão.

Com a utilização do método de RPI, há mais momentos de sobretensão do que quando comparado à uma manobra de energização normal. Assim, para que essas sobretensões não sejam maiores do que as da manobra sem utilizar o método, alguns cuidados devem ser tomados, como escolher adequadamente o valor do resistor, bem como o tempo de inserção.

Para uma boa e efetiva utilização do método, é preciso que o tempo de inserção seja superior ao tempo em que a onda refletida no terminal da linha retorne ao ponto que ocorreu a energização. Na prática, o tempo de inserção varia de 6 a 10 ms.

E quanto ao valor do resistor, é interessante e recomendável que seu valor seja próximo do valor da impedância característica da linha de transmissão. Devido ao fato de que caso o resistor possua uma resistência muito alta, no fechamento da primeira chave haveria uma grande queda de tensão na LT, e assim no segundo fechamento haveria uma alta sobretensão devido ao curto-circuito no resistor de alto valor. E caso o componente possua um valor baixo, no fechamento da primeira chave haveria uma pequena queda de tensão, e assim, no fechamento haveria uma sobretensão quase

igual ao caso de não haver a presença do resistor no circuito.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando então o estudo da manobra da LT em 440 kV, uma vez que a impedância característica da LT a ser energizada é de 258Ω , foi adotado o mesmo valor para o resistor de pré-inserção. Além disso, o tempo de inserção utilizado é de 8 ms.

Inicialmente, para serem obtidos alguns valores como base para observar o comportamento da manobra, realizou-se um estudo determinístico, considerando um fechamento em 90° e o tempo de inserção já especificado. Então, para a barra forte obteve-se uma tensão máxima de 1,14 pu e para a barra fraca obteve-se uma máxima de 1,15 pu.

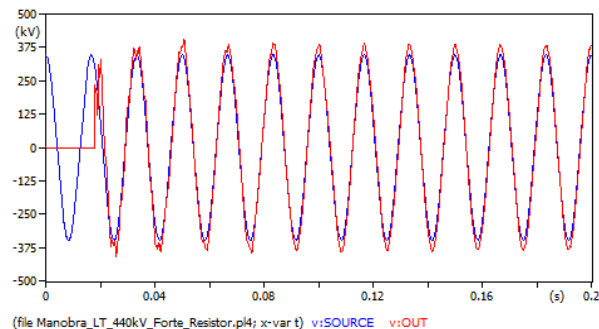


Figura 2. Sinal de tensão pós manobra para a barra forte

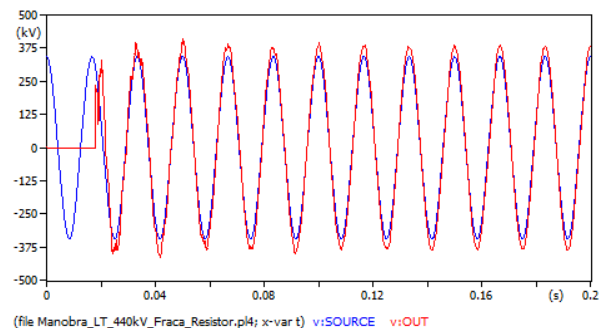


Figura 3. Sinal de tensão pós manobra para a barra fraca

Com esses dados iniciais como base, realizando então as devidas configurações de estudo estatístico no ATP, pode-se realizar a

simulação na qual o primeiro fechamento é em tempo médio de 90° , e o segundo fechamento ocorre após um tempo em torno de 8 ms.

Então, a partir da análise das 200 simulações realizadas estatisticamente pelo ATP, o programa fornece os valores de média e desvio padrão em pu, bem como fornece um resumo que possui os valores de tensão em pu e suas respectivas frequências. Utilizando esses dados pode-se realizar um gráfico que seja composto por um diagrama de barras com os valores do resumo e por uma curva gaussiana com a média e o desvio padrão. Assim, os gráficos para cada caso de estudo (barra forte e barra fraca) podem ser visualizados nas figuras 4 e 5 a seguir.

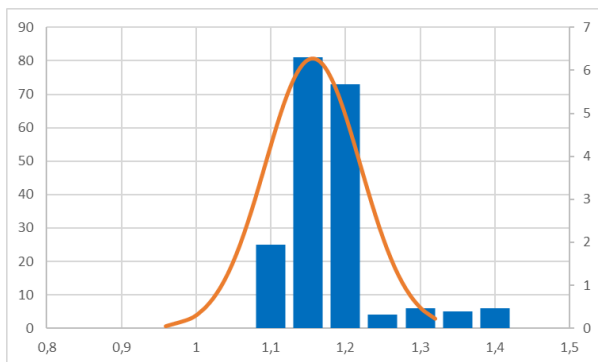


Figura 4. Gráfico da manobra de energização com resistor de pré-inserção para a barra forte

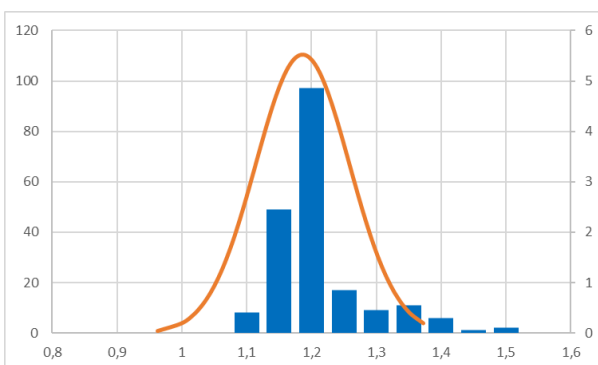


Figura 5. Gráfico da manobra de energização com resistor de pré-inserção para a barra fraca

O valor de 1,0 pu corresponde a 359,26 kV. Para o estudo com barra forte, quando analisados os resultados do ATP, a média foi de 1,156 pu e o desvio padrão de 0,0635 pu. Além disso, analisando os dados presentes no resumo e também visualmente na

figura 4, nota-se que a maioria dos valores se encontra entre 1,15 e 1,2 pu.

Adicionalmente, para a barra fraca, a média foi de 1,186 pu e o desvio padrão foi de 0,0723 pu. E a maioria dos casos simulados se encontra em torno de 1,2 pu.

Para efetuar uma comparação, também se realizou um estudo estatístico do circuito nas mesmas condições de fechamento, mas sem o RPI. Como resultados, para a barra forte obteve-se uma média de 1,916 pu e para a barra fraca obteve-se uma média de 1,968 pu.

Comparando as figuras 4 e 5, pode-se observar que em ambos os casos há uma relativa concentração dos dados ao redor dos valores obtidos deterministicamente. Além disso, comparando juntamente os resultados de média e desvio padrão, observa-se que estes resultados são maiores na barra fraca do que na barra forte, e conseqüentemente, graficamente há um maior espalhamento de dados para o caso da barra fraca, com dados presentes até o valor de 1,5 pu, enquanto a barra forte apresenta valores apenas até 1,4 pu.

Ademais, comparando os resultados de máxima de tensão das simulações com e sem a aplicação do método de resistor de pré-inserção, é explícita a influência e eficiência do uso de RPI, uma vez que houve uma diminuição considerável da sobretensão se comparado os casos.

IV. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos pode-se verificar a importância de métodos de redução de sobretensão, como é o caso do resistor de pré-inserção estudado nesta pesquisa.

Visto que além de reduzir de maneira eficiente a sobretensão do circuito, o sinal de tensão após manobra é mais controlado, com picos de tensão mais baixos e com isso, a tensão tende a se estabilizar em menor tempo do que quando comparado a energização sem o uso do método. Conseqüentemente, os equipamentos e a própria linha de transmissão podem trabalhar

de maneira mais segura com a aplicação do método.

Importante ressaltar também que o estudo estatístico permitiu constatar os resultados com uma maior certeza, uma vez que foram simulados e comparados 200 casos.

Por fim, uma vez que o estudo foi realizado considerando o circuito monofásico, é interessante para uma próxima pesquisa o estudo do circuito trifásico, que é um estudo mais complexo que utilizará os conceitos aprendidos com o sistema monofásico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Sistema Interligado Nacional - Rede de Operação - Horizonte 2024. **SINDAT**. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSi tema>>.

[2] STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. McGraw-Hill, 1986.

[3] CARVALHO, Paulo Fernando Santos Dias de. **Análise de transitórios eletromagnéticos de manobra em linhas de transmissão**. Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica, 2018.

[4] SOARES, Guilherme Beloti. **Análise de energização e religamento de linha de transmissão no software ATP**. Monografia de Graduação - Universidade de Brasília (UnB), 2017.

[5] SANT'ANA, Edilson da Silva. **Sobretensões de energização de linha de transmissão**. Projeto de Graduação - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

[6] Procedimentos de Rede - ONS. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>.

[7] ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

[8] BARBOSA, Marcos Antônio. **Sobretensões de manobra - Dimensionamento de resistor de pré-inserção**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, 1989.

[9] MESTAS VALERO, Patricia. **Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2007.

[10] ALMEIDA, Augusto César Albuquerque de. **Chaveamento controlado de linhas de transmissão por meio de disjuntores equipados com manobra tripolar**. Trabalho de conclusão de curso da Graduação - Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Sra. Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares e ao LTRANSP/FEECC por toda a orientação e inspiração no decorrer da pesquisa que agregou e agregará em muito o desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço também à FAPESP pelo Projeto de Iniciação Científica FAPESP (2023/01342-4) e por todo o auxílio fornecido.