



ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMA DE POTÊNCIA – MANOBRAS COM LINHAS LONGAS TRIFÁSICAS

Palavras-Chave: Transitórios Eletromagnéticos, Reator de Neutro, Manobra de Abertura e Religamento Monopolar

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 abertura e religamento monopolar em uma linha de transmissão trifásica em 440 kV, fazendo uso dos Procedimentos de Rede. Para a realização da manobra também será realizado um estudo e especificação do reator de neutro para diminuir os efeitos eletromagnéticos que ocorrem entre as fases do sistema trifásico. O programa ATP (Alternative Transient Program) foi utilizado tanto para a modelagem do sistema quanto para as simulações necessárias para o estudo.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é formado por numerosas e extensas linhas de transmissão, que operam em diferentes níveis de tensão, e rotineiramente, estão sujeitas a diversos tipos de manobra, como abertura e religamento. A ocorrência de manobras é devido à manutenção ou alguma condição operativa em resposta à atuação da proteção do sistema.

Estas manobras podem gerar sobretensões no sistema elétrico. Além disso, é importante considerar que o sistema a ser estudado é uma evolução do sistema monofásico estudado durante o primeiro ano de iniciação científica, isto é, o sistema da presente pesquisa é trifásico, então há uma maior complexidade na análise dos fenômenos eletromagnéticos. Desse modo, é de suma importância o estudo da modelagem de sistemas trifásicos, bem como o estudo de maneiras de minimizar os efeitos

eletromagnéticos que surgem durante as manobras. Um exemplo é o caso da manobra de religamento monopolar após a ocorrência de um defeito na linha de transmissão em que devido ao acoplamento magnético entre as fases, surge uma corrente de arco secundário que pode impossibilitar o sucesso do religamento.

O sistema elétrico trifásico de estudo baseado em dados do sistema brasileiro e em dados fornecidos pela rotina Line Constants foi modelado no ATP. Além de validar o sistema teste, o principal foco da pesquisa foi minimizar os efeitos de acoplamento capacitivo e a especificação do reator de neutro, seguindo os Procedimentos de Rede. Foi necessário entender o que consiste a manobra de abertura e religamento monopolar, isto é, uma manobra que atua em apenas uma fase, cujo intuito é corrigir defeitos monofásicos (curto-circuito entre uma fase e a terra).

II. METODOLOGIA

A linha de transmissão a ser estudada consiste na linha em 440 kV entre Assis e Sumaré de 321 km. Para a realização dos estudos é necessário representar pelo menos uma linha antes e outra depois do objeto de estudo. Desse modo, o sistema trifásico a ser modelado é composto por três linhas baseadas no sistema elétrico de São Paulo, cujos comprimentos são de 113 km, 321 km e 47,2 km, respectivamente.

Para a modelagem do sistema, além de ser necessário determinar os parâmetros que caracterizam a LT, como impedância em série por unidade de comprimento e susceptância em derivação por unidade de comprimento, também é necessário haver uma fonte equivalente de geração de energia, bem como haver a presença de reatores de correção do Efeito Ferranti para a linha longa.

Visto que o sistema de estudo é trifásico, então para caracterizar a LT é necessário tanto os parâmetros de sequência positiva quanto os de sequência zero. O sistema SINDAT permite a identificação da malha de interesse, entretanto, apresenta apenas dados de sequência positiva. Então, no programa ANAFAS é possível realizar um equivalente de rede abrangendo o sistema em estudo, e assim encontrar os valores de impedância série de ambas as sequências. Para os valores de susceptância em derivação é preciso utilizar o software ANAREDE, no entanto, não há dados para a sequência zero.

Este desafio é comumente encontrado quando se trata da modelagem de sistemas trifásicos, pois nos programas que apresentam as bases do SIN esse parâmetro não é fornecido, então é necessário estimar esse parâmetro. Uma possível solução é utilizar a rotina Line Constants (LCC) no ATP, devido ao fato de que este módulo trata os dados de silhueta de torre e as características do condutor de fase e dos cabos para-raios e, como resposta, fornece parâmetros de sequência positiva e zero da linha de transmissão.

Sendo assim, utilizou-se de uma silhueta típica de torre para transmissão em 440 kV, que é representada na figura 1. Com isto e com as características dos condutores e cabos, são obtidos os valores da susceptância de sequência zero.

Em relação à fonte de energia, visto que o sistema é todo interligado, então é necessário produzir um equivalente de fonte em cada extremidade do sistema em análise, além disso, há dois casos de análise para este equivalente, um

barramento forte e outro fraco. Comumente o barramento fraco é mais susceptível a oscilações que as manobras podem causar na rede, enquanto para o barramento forte tem um comportamento mais estável, com menores sobretensões.

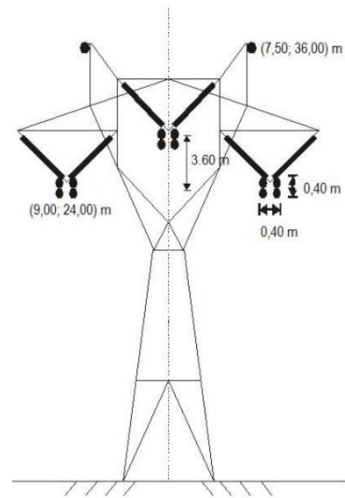


Figura 1. Silhueta típica de torre de transmissão em 440 kV [1]

Para a compensação do Efeito Ferranti, efeito este que ocorre em linhas longas e consiste no aumento da tensão da linha devido à sua resposta capacitiva na condição sem carga, é necessário o uso de reatores em cada fase do sistema, de modo que esse ganho de tensão seja de no máximo 1,05 em regime permanente. Desta forma, evitam-se sobretensões sustentadas nos equipamentos e componentes da linha enquanto em operação. Estes reatores de compensação geralmente possuem um valor entre 70% e 80% da admitância transversal da linha, então para o presente estudo, a compensação será de 70%.

O sistema trifásico base foi modelado e validado com os resultados obtidos para a análise do sistema monofásico anterior. Especificamente, foram feitas manobras de energização em diferentes condições, tanto determinística quanto estatisticamente, incluindo o uso do resistor de pré-inserção (RPI) para reduzir as sobretensões. A seguir foram tratados dos principais temas de estudo da pesquisa, que são a especificação do reator de neutro com o intuito de diminuir o acoplamento magnético entre as fases do sistema e a realização da manobra de abertura e religamento monopolar com o reator de neutro ótimo.

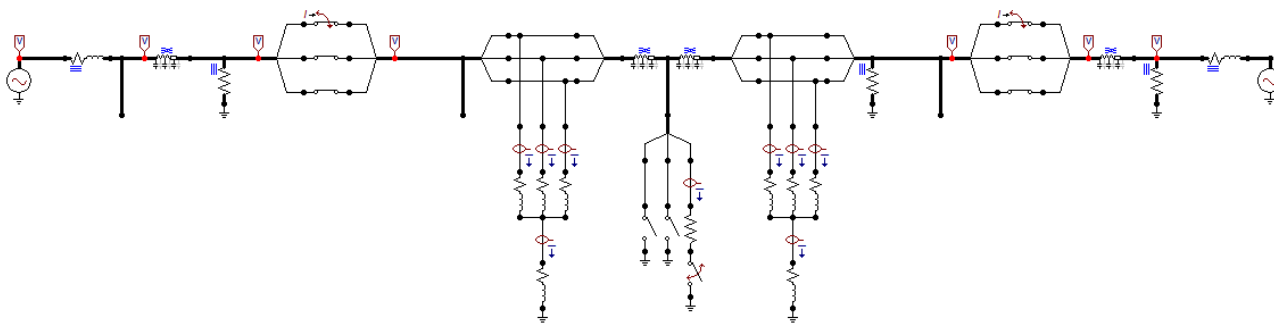


Figura 2. Linha de transmissão com reator de neutro

A. Manobra de abertura e religamento monopolar

Considerando uma linha sob defeito monofásico, geralmente há duas maneiras de eliminar o defeito, uma é a abertura e religamento tripolar e a outra é a abertura e religamento monopolar. Uma manobra trifásica pode causar um grande impacto no sistema, devido ao fato de que por um determinado período a linha estará totalmente fora de operação. Enquanto na manobra monopolar, apenas a fase defeituosa é desconectada do sistema, e assim, a linha de transmissão em manobra continua em operação, entretanto, com capacidade reduzida.

Fazendo uso dos Procedimentos de Rede [4] pode-se entender as etapas necessárias para realizar a manobra de abertura e religamento monopolar. Sendo assim, considerando o sistema em regime permanente e operando normalmente, aplica-se um defeito monofásico no sistema de estudo. Para simular a atuação da proteção, realiza-se a abertura do disjuntor mais próximo do defeito em 80 ms, enquanto o disjuntor mais distante abre 20 ms após a abertura do terminal mais próximo, ou seja, 100 ms após a identificação do defeito.

Realizada a abertura monopolar, no local de falta a corrente de defeito fica alimentada pelo acoplamento com as fases sãs. O reator de neutro ótimo serve para diminuir o acoplamento e permitir realizar uma manobra de religamento monopolar com sucesso (força a extinção do arco).

Desse modo, ainda seguindo os Procedimentos de Rede, após 3 ciclos (50 ms) em que a manobra de abertura foi realizada, é

recomendado retirar o defeito da linha de transmissão. E por fim, para realizar o religamento monopolar, espera-se um tempo morto de 1 s para o disjuntor do terminal principal, e 1,5 s para o disjuntor do terminal remoto.

B. Reator de Neutro

Em sistemas trifásicos existe o fenômeno de acoplamento magnético entre as fases, isto é, cada fase do sistema pode induzir uma tensão nas demais fases. Quando uma linha tem a sua fase sob falta aberta, a corrente de defeito é alimentada pelo acoplamento com as fases sãs. Para que o defeito seja eliminado é necessário que a corrente de arco tenha baixa magnitude. Considera-se que um valor eficaz maior que 50 A não permitirá a extinção do arco – a manobra não terá sucesso.

Sendo assim, em linhas de comprimento longo que possuem reator de compensação em cada fase, pode-se utilizar um arranjo de quatro reatores, com a presença do reator de neutro. Este último é responsável por anular ou minimizar o acoplamento capacitivo entre as fases da LT.

O valor típico do reator de neutro para a linha em 440 kV é de 800 Ω , entretanto, para o presente estudo optou-se por analisar e dimensionar o reator de neutro ótimo, reator este que praticamente anula o efeito do acoplamento. Desse modo, para anular o efeito é necessário que a componente de admitância mútua da linha seja igual à dos reatores [2][3]. Analisando o circuito com quatro reatores presente na figura 2, tem-se que a admitância de sequência zero e positiva são dadas por:

$$Y_0^R = \frac{1}{X_f + 3X_n} \text{ e } Y_1^R = \frac{1}{X_f}$$

Onde X_f é o reator de compensação e X_n é o reator de neutro.

Sabendo que a admitância mútua pode ser escrita como $Y_m = \frac{Y_0 - Y_1}{3}$, então igualando a admitância mútua da linha e dos reatores, obtém-se que:

$$Y_m^{LT} = Y_m^R \Rightarrow Y_m^{LT} = \frac{\frac{1}{X_f + 3X_n} - \frac{1}{X_f}}{3}$$

Desenvolvendo a igualdade, pode-se obter a seguinte relação para o reator de neutro:

$$X_n = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3Y_m^{LT} + \frac{1}{X_f}} - X_f \right)$$

Portanto, considerando os parâmetros da linha de transmissão em estudo, o valor do reator de neutro ótimo é de 695,126 Ω , note que é um valor relativamente próximo do reator de neutro típico.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, é importante validar a eficácia do reator de neutro em diminuir o acoplamento entre as fases do sistema. Para isto, realizou-se apenas a manobra de abertura monopolar, isto é, considerando as recomendações dos Procedimentos de Rede para a abertura, então pode-se analisar a corrente de arco secundário, que é a corrente que surge no local de falta.

Desse modo, para analisar e comprovar a eficiência do reator de neutro, optou-se por analisar a corrente de arco secundário tanto para o caso sem reator de neutro quanto para o caso com reator de neutro ótimo. Adicionalmente, estudou-se a manobra de abertura para diferentes locais de falta. As correntes de arco secundário em cada local de falta e para cada tipo de simulação podem ser visualizadas graficamente nas figuras 3 e 4.

Pode-se dizer que para ambos os casos de barramento, a inserção do reator de neutro ótimo proporcionou uma significativa redução da corrente de arco secundário (por volta de 80%).

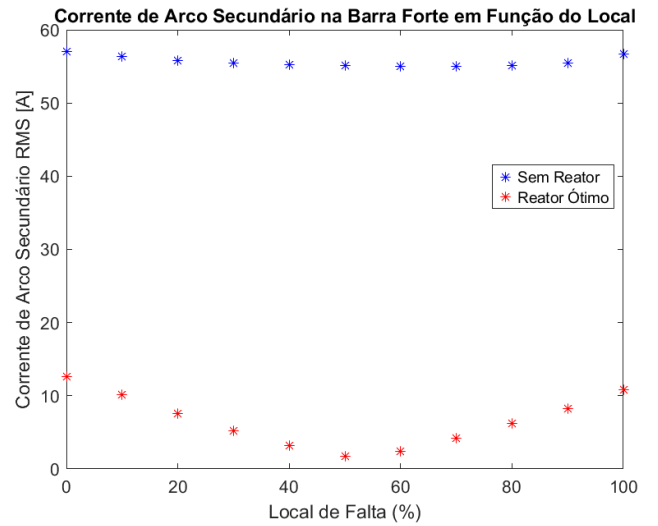


Figura 3. Corrente de arco secundário em função do local de falta para a barra forte

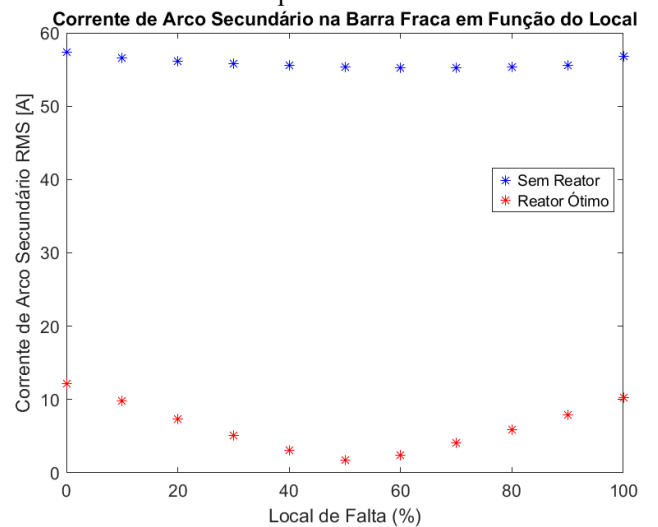


Figura 4. Corrente de arco secundário em função do local de falta para a barra fraca.

Além disso, um resultado interessante é o valor da corrente em cada ponto de defeito, que de modo geral, aproximadamente ao meio da linha é o local em que a corrente de arco é mínima. Isso se deve ao fato de que o meio da linha é o local de maior simetria, onde o modelo prático mais se aproxima do esperado, pois em teoria o uso do reator de neutro ótimo é capaz de anular os efeitos de acoplamento.

Executado o estudo de manobra de abertura da LT e aplicado o reator de neutro para diminuir a influência da corrente de arco secundário, é possível realizar a manobra de religamento monopolar com sucesso.

Seguindo então os Procedimentos de Rede para a manobra de religamento, isto é, eliminando o curto-circuito após 3 ciclos (50 ms) que ocorreu a abertura da última fase, e

esperando o tempo morto especificado para cada terminal (principal e remoto), tem-se então o seguinte comportamento dos sinais de tensão no início e no final da linha em estudo para a manobra de abertura e religamento monopolar com a presença do reator de neutro ótimo.

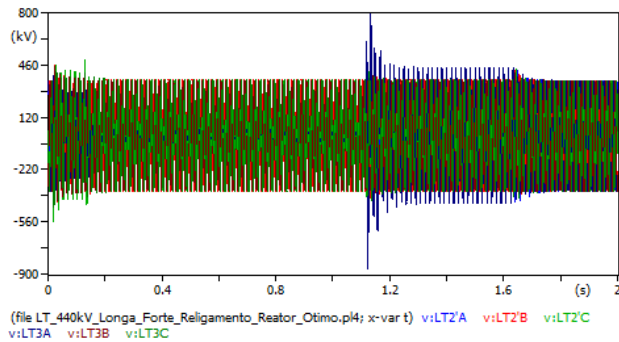


Figura 5. Comportamento dos sinais de tensão durante a manobra de abertura e religamento monopolar

No início do gráfico é possível observar o desbalanceamento dos sinais de tensão devido à falta monofásica e a subsequente manobra de abertura monopolar. Após essa região, nota-se que mesmo com uma das fases aberta ainda é possível manter a transmissão de potência. Findo o tempo morto do terminal principal, observa-se a maior sobretensão presente no gráfico, que é justamente a sobretensão devido ao religamento da fase. Nota-se também que as três fases apenas voltam ao equilíbrio após o religamento do terminal remoto.

Portanto, do estudo realizado, pode-se dizer que a inserção do reator de neutro ótimo é muito eficiente para a diminuição do acoplamento entre fases, e consequentemente para a diminuição das sobretensões que ocorrem durante a manobra. No entanto, mesmo com essa evidente eficiência, pode-se notar para o caso em estudo que a sobretensão no momento de religamento ainda é relativamente elevada, com valores ligeiramente superiores a 2 pu.

IV. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, pode-se verificar a importância de diminuir o efeito do acoplamento magnético entre as fases de um sistema, bem como as vantagens de realizar manobra de abertura e religamento monopolar.

Então pode-se concluir que a manobra monopolar é interessante para a eliminação de defeitos monofásicos, visto que mesmo durante a

manobra ainda é possível transmitir potência através das outras fases. Além disso, o reator de neutro é muito importante para a diminuição ou eliminação do acoplamento capacitivo presente no sistema, e consequentemente a diminuição da corrente de arco secundário, fato este que possibilita uma manobra de religamento com sucesso.

Por fim, visto que apesar da eficiência do reator, houve uma sobretensão relativamente elevada no momento do religamento, desse modo, uma alternativa é utilizar o método do resistor de pré-inserção (RPI), cuja eficácia na mitigação de sobretensões foi estudada e comprovada durante as pesquisas.

Ademais, para uma próxima pesquisa é interessante estudar mais componentes que fazem parte da malha de linhas de transmissão, como é o caso de transformadores e bancos de capacitores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAVARES, M. C. Notas de Aula: Propagação de Ondas.
- [2] KIMBARK, E. W. Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shut Reactors. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, v. 83, n. 3, p. 285-290, Mar. 1964.
- [3] DULTÁN, Luis. DULTÁN, Walter. Sintonización de reactores de neutro en líneas de 500 kV del sistema eléctrico ecuatoriano. EPN - XXVI Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2016.
- [4] Procedimentos de Rede - Submódulo 2.3: Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Disponível em: <https://ecmservice.ons.org.br/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.3-CR_2022.10.pdf>

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Sr.^a Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Dias Tavares e ao LTRANSF/FEEC por toda a orientação, inspiração e conhecimento passado 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 durante esses anos de pesquisa.