

UFG (Universidade Federal de Goiás)

EMC (Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação)

Curso de Engenharia Elétrica

Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito *infeed* em linhas de transmissão de energia elétrica

Eugênio Rodrigues de Oliveira

Goiânia - GO

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: **Eugênio Rodrigues de Oliveira**

Título do trabalho: **Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito *infeed* em linhas de transmissão de energia elétrica.**

2. Informações de acesso ao documento

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eugênio Rodrigues De Oliveira, Discente**, em 01/07/2026, às 13:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0,
informando o código verificador **6298817** e o código CRC **C1AD881A**.

Eugênio Rodrigues de Oliveira

Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito *infeed* em linhas de transmissão de energia elétrica

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do grau de engenheiro eletricista

Orientador: Prof Dr. Igor Kopcak

Goiânia - GO

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Oliveira, Eugênio Rodrigues de

Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito infeed em linhas de transmissão de energia elétrica [Manuscrito] = Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito infeed em linhas de transmissão de energia elétrica: Analysis of distance protection failures associated with the infeed effect in electric power transmission lines / Eugênio Rodrigues de Oliveira. - 2026.

LII, 52 f.: il. 2026

Orientador: Prof. Dr. Igor Kopcak

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2026.

Ilustrações.

Bibliografia.

Inclui: siglas, gráfico, lista de figuras.

1. Efeito Infeed. 2. Subalcance. 3. Relé de Distância. 4. Linhas de Transmissão. 5. Curto-circuito.

I. Kopcak, Igor, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 30 dias do mês de junho do ano de 2026 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Análise de falhas da proteção de distância associadas ao efeito infeed em linhas de transmissão de energia elétrica**”, de autoria de **Eugênio Rodrigues de Oliveira**, do curso de Engenharia Elétrica, da ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Igor Kopcak (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Leonor Silva de Almeida (EMC/UFG) e Prof. Dr. Gelson Antônio Andréa Brigatto (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de **9,0** (nove vírgula zero), tendo sido o TCC considerado **APROVADO**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Antonio Andrea Brigatto, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6298811** e o código CRC **AFA51ADF**.

RESUMO

O efeito *infeed/outfeed* ocorre quando há derivações na linha de transmissão (LT), para conexão de cargas e/ou fontes próximas ao seu traçado principal. Tais derivações são soluções econômicas que viabilizam a integração à rede, sem que haja o seccionamento da linha de transmissão por uma subestação. No entanto, esta solução dificulta os ajustes dos sistemas de proteção, particularmente a função de distância. Como o relé de distância tradicional compara as grandezas amostradas de apenas um terminal da LT, pode haver algumas situações em que a presença de injeção de corrente em pontos intermediários leve a sub ou sobre alcance dos relés de proteção de distância. Neste trabalho, pretende-se avaliar o efeito do *infeed/outfeed* no desempenho da função de proteção de distância em linhas de transmissão, por meio de simulações com o programa ATP¹/ATPDraw.

Palavras-chaves: efeito infeed; subalcance; relés de distância; linhas de transmissão; curto-circuito

¹ ATPDraw – Alternative Transients Program, Software de simulação de transientes de circuitos de potência

ABSTRACT

The infeed/outfeed effect occurs when there are branches in the transmission line to connect loads and/or sources close to its main route. Such branches are economical solutions that enable integration into the grid without the need to section the transmission line by a substation. However, this solution makes it difficult to adjust the protection systems, particularly the distance function. Since the traditional distance relay compares the sampled quantities from only one terminal of the transmission line, there may be situations where the presence of current injection at intermediate points leads to under- or over-range of the distance protection relays. This work aims to evaluate the effect of infeed/outfeed on the performance of the distance protection function in transmission lines, through simulations with the ATP²/ATPDraw program.

Keywords: Infeed effect; underreach; distance relays; transmission lines; short circuit

² ATPDraw – Alternative Transients Program, software for simulating transients in power circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Circuito interno Relé de distância.....	8
Figura 2- Zonas de proteção da função de distância	9
Figura 3 Relé de Impedância, direcional, admitância, quadrilateral	14
Figura 4- Sistema teste de 230 kV com LT de 3 terminais para avaliação do efeito infeed. ...	15
Figura 5- Medidores ATPdraw	16
Figura 6- Linha de transmissão com múltiplas derivações.....	20
Figura 7- Linha com impedância de derivação	21
Figura 8- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação.....	23
Figura 9- Corrente total, $\hat{I}_0$, da LT para situação pré-falta	24
Figura 10 - Tensão pré-falta no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.....	24
Figura 11- Corrente no ramo LT1, $\hat{I}_1$, para situação pré-falta	25
Figura 12 - Corrente no ramo LT2, $\hat{I}_2$, para situação pré-falta.	25
Figura 13- Corrente no ramo LT0, $\hat{I}_0$, para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de $1\ \Omega$	26
Figura 14 - Tensão pós-falta no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.	27
Figura 15- Corrente no ramo LT1, $\hat{I}_1$, para situação pós-falta, na fase a.	28
Figura 16 - Corrente no ramo LT2, $\hat{I}_2$, para situação pós-falta, na fase a.....	28
Figura 17- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação e impedância de $10\ \Omega$..	30
Figura 18- Corrente ramo 0 pré-falta exp 2, situação pré-falta.	30
Figura 19 - tensão pré-falta exp 2, no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a	31
Figura 20 - Corrente ramo 1 pré-falta exp 2,.....	32
Figura 21- Corrente ramo 2 pré-falta exp 2.....	32
Figura 22 - Corrente no ramo 0 pós-falta exp 2, para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de $10\ \Omega$	33
Figura 23- Tensão pós-falta exp 2 no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.....	38
Figura 24- Corrente no ramo 1 pós-falta exp 2,	35
Figura 25- Corrente no ramo 2 pós-falta exp 2.....	36
Figura 26- Sistema teste de linha de transmissão com derivações múltiplas	37
Figura 27- Corrente pré-falta ramo 0 exp 3.....	38
Figura 28- Tensão pré-falta exp 3 no terminal transmissor da LT, V_0	39
Figura 29- Corrente pré-falta ramo 1 exp 3.....	39
Figura 30- Corrente pós-falta ramo 0 exp 3, para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de $10\ \Omega$	40
Figura 31- Tensão pós-falta exp 3 no terminal transmissor da LT, V_0	41
Figura 32- Corrente pós-falta ramo 1 exp 3	42
Figura 33- Corrente pós-falta ramo 5 exp 3.	43
Figura 34- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação e com uma impedância de derivação/shunt.....	44
Figura 35- Corrente pré-falta no ramo 0 exp 4.....	45
Figura 36- Tensão pré-falta exp 4 no terminal transmissor da LT, V_0	45
Figura 37- Corrente pós-falta ramo 0 exp 4 para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de $10\ \Omega$	46
Figura 38- Tensão pós-falta exp 4 no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.....	47
Figura 39- Corrente pós-falta ramo 1 exp 4.	48

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. RELÉS DE DISTÂNCIA	12
3.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO <i>INFEED</i>	15
3.2. INFLUÊNCIA DO AUMENTO DO NÚMERO DE RAMOS.....	19
3.3. RAMOS DE DERIVAÇÃO SHUNT E IMPEDÂNCIA ENTRE LINHA E TERRA	21
3.4. GENERALIZAÇÃO DOS CASOS.....	23
4.1. METODOLOGIA.....	24
4.2. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED EM LINHA COM UMA DERIVAÇÃO	24
4.3. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED EM LINHA COM UMA DERIVAÇÃO E IMPEDÂNCIA DE FALTA 10Ω	25
4.4. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED PARA CIRCUITO COM MÚLTIPLAS DERIVAÇÕES E IMPEDÂNCIA DE FALTA 10Ω	25
4.5. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED PARA CIRCUITO DUPLO COM DERIVAÇÃO SHUNT E IMPEDÂNCIA DE FALTA DE 10Ω	26
5.1. SIMULAÇÃO	27
5.2. RELÉ OBSERVANDO UMA LINHA COM UMA DERIVAÇÃO.	27
5.3. RELÉ OBSERVANDO DUAS DERIVAÇÕES E IMPEDÂNCIA DE FALTA DE 10Ω :	33
5.4. RELÉ OBSERVANDO MÚLTIPLAS RAMOS EM PARALELO : 41	
5.5. EFEITO INFEED COM IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO	48
6. Conclusão	54
Referências	56

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos de proteção, em geral, devem cumprir alguns requisitos essenciais: seletividade (capacidade da proteção de isolar apenas a seção atingida); confiabilidade (atuar sobre perturbações ao qual foi dimensionado); sensibilidade (detectar problemas, mesmo desvios mínimos); e rapidez (acionar as medidas protetivas no menor intervalo de tempo possível).

Os relés de distância são equipamentos que tem como principal função localizar o ponto de uma falta, em casos de anomalias na rede, pela impedância equivalente estimada a partir dos sinais das tensões e correntes medidos no terminal de instalação dos equipamentos de proteção. Dentre os principais problemas que podem levar a erros de detecção da função de distância se destacam dois: o acoplamento eletromagnético entre linhas de transmissão (LT) com traçado paralelo, suficientemente próximas; e o efeito denominado de *infeed*, típico de linhas com 3 ou mais terminais, sendo o último o foco deste trabalho. Este se caracteriza pelo fato de injeções de corrente nos ramais que derivam do traçado principal da LT afetarem a estimativa da impedância pelo relé, interferindo na determinação da posição do ponto de falta.

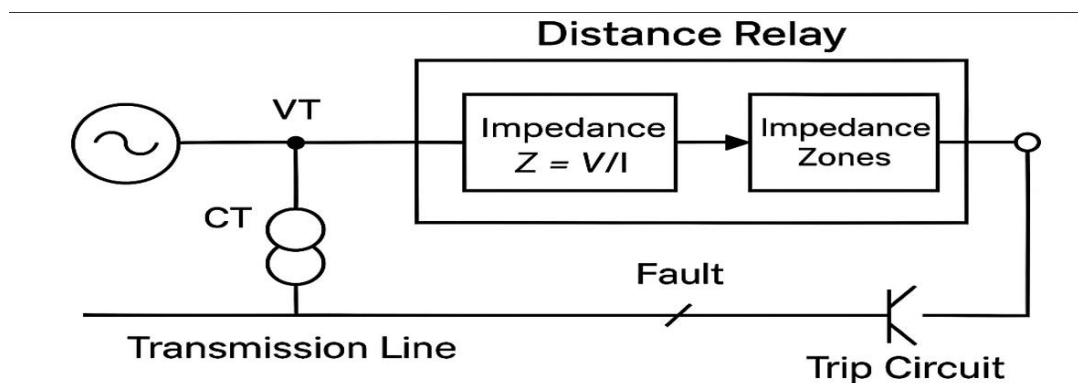
Neste trabalho, nos propomos estudar o efeito do *infeed*, por uma abordagem contextualizada em diferentes topologias de linhas de transmissão e níveis de injeção de corrente nos ramais secundários. Buscamos elucidar em que condições o efeito é amplificado, e pela análise das diferentes impedâncias de falta, propor um método que permita a solução do problema, dentro dos limites estabelecidos pela literatura. Com o auxílio de dados de simulação, aplicaremos o método, avaliando também seu desempenho.

Vale ressaltar que o trabalho foca apenas na localização da ocorrência do curto na investigação a proteção de distância, uma vez que se supõe já ter sido identificado o curto-circuito por outra função de proteção. Da mesma forma, a análise de tempos de coordenação entre relés, análise de zonas de proteção e a análise do sinal de *trip* serão abordados apenas superficialmente.

2. RELÉS DE DISTÂNCIA

O relé de distância desempenha a função de proteção de código ANSI 21, o qual tem como papel a localização da zona de atuação ao qual ocorre o curto-circuito, ou outras anomalias no sistema. Este é alimentado por transformadores de instrumentos, TP³ e TC⁴, que condicionam os valores das tensões e correntes da linha de transmissão em sinais adequados para os relés de proteção conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1- Circuito interno Relé de distância



Fonte: Anthony Huang, Relé de distância: Tipos, diagramas e princípios de funcionamento

Seu princípio de funcionamento se baseia na lei de Ohm, o qual, de forma simplificada, consiste na divisão do sinal de tensão pelo sinal de corrente, resultando em uma impedância equivalente estimada pelo dispositivo de proteção, a qual servirá de referência para determinar a que distância se encontra o ponto de defeito. Em outras palavras, quando um curto-circuito acontece em algum local da rede, na área em que o relé foi instalado para atuar, as variações nos sinais de tensão e corrente leva ao recálculo da impedância equivalente que, consequentemente resultará na estimativa da localização do ponto de falta, uma vez que a impedância da linha por unidade de comprimento é conhecida.

Seja $|p|$ um número real no intervalo $0 \leq |p| \leq 1$, Z_{relay} a impedância calculada pelo relé e Z_L a impedância da linha, tal que:

$$|p| = \frac{Z_{\text{relay}}}{Z_L} \quad (1)$$

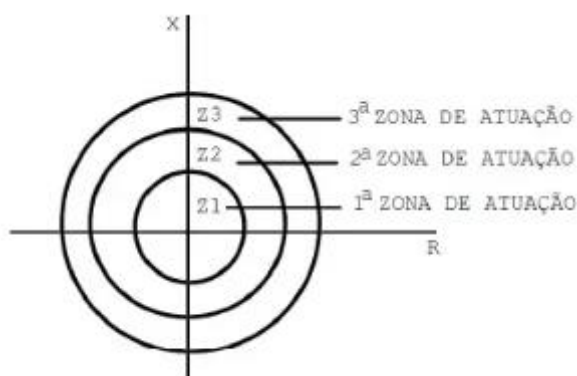
³ TP – Transformador de potencial, responsável por medir tensão em circuitos de potência

⁴ TC – Transformador de corrente, responsável por medir corrente em circuitos de potência

este indica, em termos relativos, a que distância se localiza a falta, a partir do terminal em que se encontra instalado o sistema de proteção, para uma LT de dois terminais (sem derivações intermediárias). Caso essa distância estimada se encontre dentro da zona de proteção do relé, é acionado um sinal de TRIP, que comanda a eliminação da falta.

Na filosofia de proteção da função de distância, o ajuste dos relés divide-se em zonas que delimitam os limites de atuação desse dispositivo. A Figura 2 exemplifica as três zonas principais de atuação do relé de distância, definidas no plano cartesiano “Resistência x Reatância”, em que a origem representa o terminal da LT em que se encontra instalado o sistema de proteção, na qual:

Figura 2- Zonas de proteção da função de distância



Fonte: Igoramin, Scribd, Relés de distância tipos e funcionalidades

Zona 1: É dimensionada para cobrir cerca de 70-90% do comprimento da linha de transmissão. Tem o menor tempo de atuação, sem retardo intencional, ou com o menor retardo possível no sinal de TRIP.

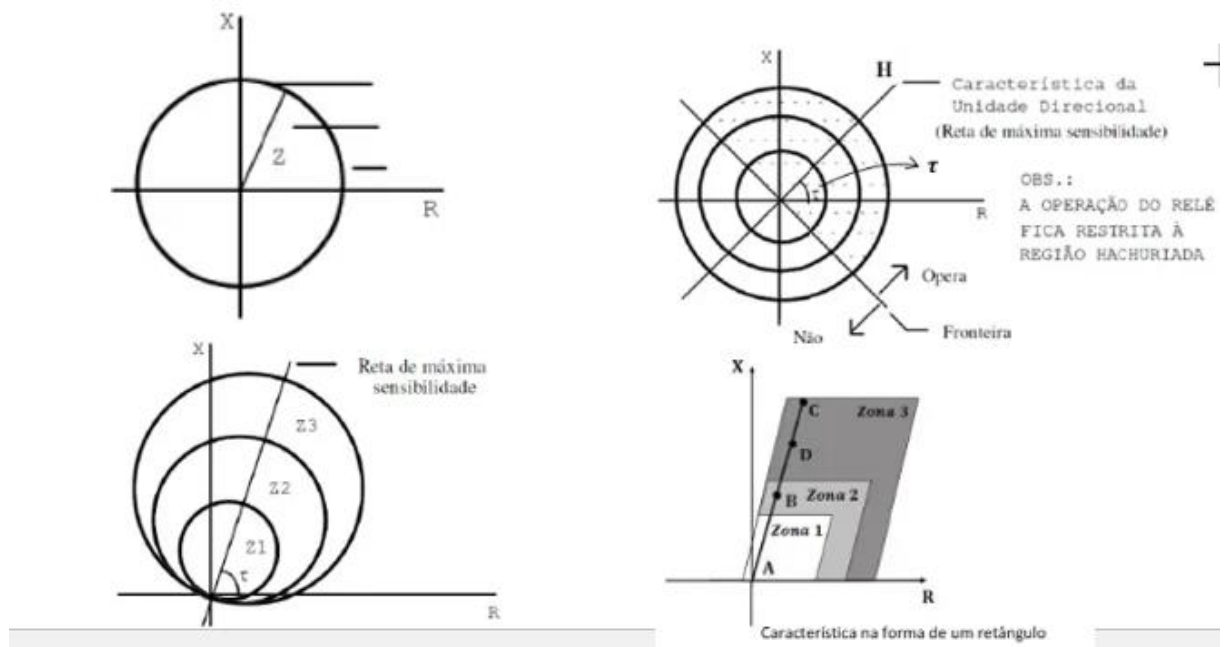
Zona 2: É geralmente ajustada para cobrir 100% do comprimento da LT, com um retardo de 0,3-0,5 segundos de margem, para assegurar a seletividade com outras funções de proteção e/ou relés de distância de linhas adjacentes.

Zona 3: Ajustada para cerca de 120% do comprimento da LT cobrindo, portanto, além da LT protegida, com retardo da atuação do TRIP típico de 0,7 segundos. Funciona como retaguarda da proteção de outras linhas de transmissão, e da própria LT protegida, em caso de erros na estimativa da distância de faltas internas, vistas como externas.

Pode-se otimizar a comunicação entre zonas de proteção de diferentes relés utilizando teleproteção, por meio de ondas portadoras, ou fibra-óptica dos cabos OPGW⁵ (Optical Ground Wire).

Existem variações do tipo de relé de distância como: relés de impedância, relés de reatância, relés tipo mho, e quadrilateral (Figura 3). Consideraremos que o relé utilizado neste estudo é do tipo impedância e é sensibilizado em qualquer direção de corrente. O modelo simplificado do relé de impedância [1] é utilizado considerando apenas uma única zona de proteção.

Figura 3 Relé de Impedância, direcional, admitância, quadrilateral



Fonte: Igoramin, Scribd, Relés de distância tipos e funcionalidades

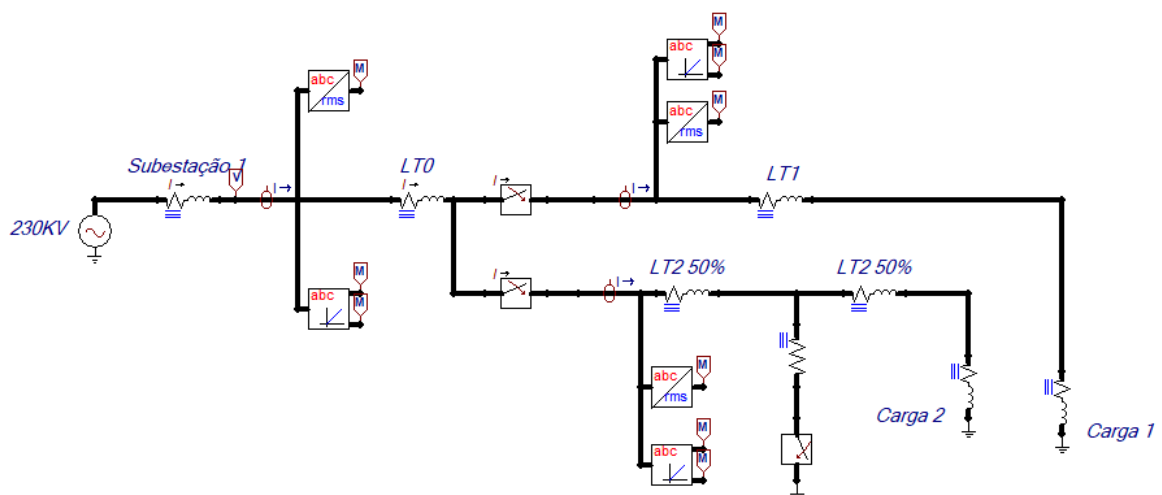
⁵ OPGW – Optical ground wire, cabo guarda instalado no topo de linhas de transmissão, que tem função de proteção contra descargas atmosféricas e de comunicação por fibras ópticas, contidas em seu interior.

3.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO *INFEED*

O efeito *infeed* é decorrente da variação da topologia da rede, quando as LT, tipicamente concebidas para transmissão ponto a ponto, sofrem derivações para atender a conexão de cargas/geradores ao longo do seu traçado principal. Este tipo de arranjo permite a alimentação de cargas e/ou geradores de pequeno porte, a construção de uma subestação intermediária seria economicamente inviável. Nessa situação, devido às diferentes contribuições de corrente nos ramais intermediários, a impedância calculada pelos relés de distância instalados nos terminais principais da LT pode estimar uma impedância incorreta devido a ocorrência das derivações de ramos oriunda do efeito *infeed*, consequentemente errando a localização do ponto de falta.

A Figura 3 mostra o diagrama unifilar do sistema teste utilizado neste trabalho para os estudos do efeito *infeed*, modelado no programa de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP/ATPDraw. O sistema consiste em uma subestação de 230 kV e 60Hz, representada por uma fonte ideal em série com sua impedância equivalente. A subestação alimenta uma linha de transmissão que se divide em dois ramais, a partir do seguimento identificado como LT0. Ambos ramais, LT1 e LT2 atendem cargas nos seus terminais, sendo que o último foi fracionado em dois trechos para simulação de curtos-circuitos ao longo do seu comprimento.

Figura 4- Sistema teste de 230 kV com LT de 3 terminais para avaliação do efeito *infeed*.



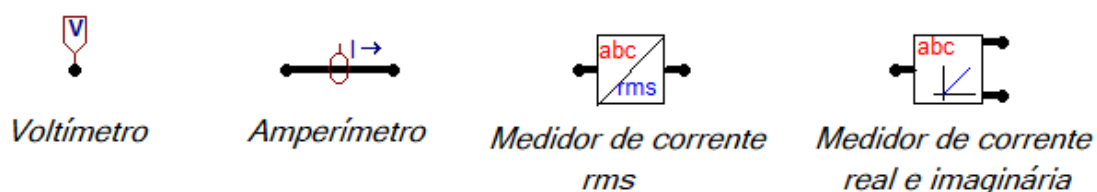
Fonte: própria do autor

Para monitorar o comportamento do sistema, na Figura 4 também podem ser observados os blocos de medição de tensão e corrente instalados em pontos estratégicos da rede, bem como os blocos conversores dessas grandezas instantâneas em valores eficaz e nos respectivos fasores de tensão e corrente, dados em coordenadas retangulares (valor real e imaginário).

A modelagem do diagrama unifilar (Figura) foi feito no software ATPdraw, o sistema é de 230kV trifásico linha a linha ao qual está alimentando cargas de 200Ω de resistência e indutância em série de 100mH cada, as linhas de transmissão são de 15Ω e 300mH cada, ao qual convergem em uma linha principal onde está o relé de $7,5\Omega$ e 150mH, ao qual está separado por uma subestação entre a linha e a geração 1Ω e 20mH (os valores são apenas figurativos e são utilizados apenas para compreensão dos efeitos).

É feito uma falta a 50% da linha que será usado o estudo do efeito com uma resistência de falta variável (representado na figura com uma resistência e uma chave ligado ao terra). Há quatro tipos de medidores na figura representados respectivamente por medidores de tensão senoidal; corrente senoidal; corrente rms; corrente de real e imaginária (ao qual será utilizado para a medição indireta de fase) como mostra a figura 5:

Figura 5- Medidores ATPdraw



Fonte: própria do autor

Embora o relé de distância não tenha sido formalmente modelado no ATPDraw usando somente outros parâmetros de medição, ele teria como sinais de entrada os medidores à esquerda da LT0, os quais podem ser interpretados como os TCs e TPs do sistema de proteção no terminal transmissor da linha de transmissão (saída da subestação). Este observa uma LT que deriva em dois ramais radiais. Aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Tensões, considerando-se o circuito do ponto de instalação do relé, até o pressuposto ponto de curto-circuito (no ramal LT2), e desprezando-se a impedância de falta.

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_2) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p \quad (2)$$

na qual, V_0 é a tensão no terminal transmissor da LT; I_0 é a corrente total, medida no terminal transmissor; I_2 é a corrente no ramal LT2; Z_0 é a impedância na linha ao qual está localizado o relé até a derivação, Z_{linha} é a impedância total do ramal LT2; e p é a porção do ramal LT2 em que acontece a falta.

É convencionalizado o sentido da corrente entrando no nó derivação, exceto a corrente de curto-circuito que sairá do nó, assim pela lei de kirchoff das correntes aplicado na equação (2):

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_0 + I_1) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p \quad (3)$$

Dividindo-se ambos os lados da equação (3) pela corrente I_0 , vale ressaltar que a orientação da corrente positiva é entrando no nó de derivação como positiva com exceção da corrente no ramo ao qual ocorre curto-circuito.

$$Z_{\text{relay}} = \frac{V_0}{I_0} = Z_0 + \left(1 + \frac{I_1}{I_0}\right) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p$$

A divisão da tensão do relé V_0 pela corrente I_0 é a impedância calculada pelo relé de distância, chama-se $\frac{I_1}{I_0}$ de uma variável M , dita fator de efeito *Infeed*: $M = \frac{I_1}{I_0}$. Onde I_0 é a corrente que passa pelo ramo onde se localiza o relé em direção a derivação e I_1 a corrente que sai da carga e vai em direção ao nó de derivação.

Note-se que, a princípio, foi escolhido o ramal LT2 como região da possível ocorrência do curto-circuito mas, analogamente, a equação para curtos-circuitos aplicados no ramal LT1 pode ser obtida fazendo-se $M = \frac{I_2}{I_0}$.

Podemos fazer tal diferenciação utilizando o pressuposto que o módulo da corrente dos ramos será maior perto do ponto de curto-circuito pois verá uma impedância menor.

Para determinação do ponto de curto-circuito:

Se o curto-circuito acontecer no ramal LT2, é de se esperar que $|I_2| > |I_1|$, por outro lado, caso o curto-circuito tiver acontecido no ramal LT1, espera-se que $|I_1| > |I_2|$.

Sem perda de generalidade vamos supor curto-circuito no ramal LT2, tal que

$$Z_{\text{relay}} = \frac{V_0}{I_0} = Z_0 + (1 + M) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p \quad (4) \quad [5,4,8,6]$$

$$p = \frac{Z_{relay} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{linha}} \quad (5)$$

p seria, idealmente, um número real, pois ao desprezar-se a impedância de falta, as impedâncias Z_{relay} , Z_0 e Z_{linha} , teriam o mesmo ângulo de fase. Entretanto, erros de medição dos TCs e TPs, bem como desbalanços nas tensões e correntes, devidos a imprecisões no modelo e aos transitórios da falta, tem-se que p resulta em um número complexo, com pequeno ângulo de fase.

Se $M = 0$, o efeito *infeed* seria desconsiderado, não haveria contribuições de correntes de linhas derivadas do tronco principal. Chamaremos p' de posição percentual do curto-circuito desconsiderando o *infeed*:

$$p' = \frac{Z_{relay} - Z_0}{Z_{linha}} \quad (6)$$

Que é a posição da falta estimada pelo relé, considerando o trecho linear desde uma impedância Z_0 .

Se $|1 + M| < 1$, $p > p'$ tem-se a ocorrência de **sobrealcance** o relé estima a posição do curto-circuito a uma distância menor do que ela realmente ocorre.

Se $|1 + M| > 1$, $p < p'$ tem-se a ocorrência de **subalcance**, que é quando o relé mede a posição do curto a uma distância maior do que ela realmente ocorre.

Em ambos os casos, os erros por sub e sobrealcance são decorrentes das injeções de correntes em ramais secundários da LT, chamados genericamente de *efeito infeed*.

Perceba que a análise aqui feita foi para um certo tipo de configuração particular da rede, na qual há apenas um ramo em derivação. No entanto, pode-se dizer que o efeito *infeed* é amplificado quanto maior o número de ramificações da LT. Também foi desconsiderada uma possível impedância de falta a qual é, em geral, desconhecida. Mas quanto maior for seu valor, mais difícil será analisar a posição exata do ponto de falta, aumentando a incerteza na estimativa da distância, independentemente da existência de *infeed*.

Ressalta-se que, neste estudo, as LT foram modeladas como parâmetros concentrados. Esta simplificação parte do pressuposto que, geralmente, não são comuns derivações em LT de Extra Alta Tensão e Ultra Alta Tensão, nas quais uma modelagem a parâmetros distribuídos seria quase mandatória. Linhas de transmissão multiterminais são mais frequentes em redes de distribuição e subtransmissão, estas últimas operando, tipicamente, em tensões de

69 kV até 230 kV, e com comprimentos menores. Nessas condições, a modelagem por parâmetros concentrados é considerada suficiente para os objetivos deste trabalho.

Também por simplificação, as análises limitaram-se aos curtos-circuitos do tipo trifásico, ou equilibrados, os quais apresentam os maiores níveis de sobrecorrente. No entanto, um estudo mais abrangente demandaria a inclusão de faltas desequilibradas, cuja modelagem deveria incluir uma análise das impedâncias de sequência, obtidas pela transformação de Fortescue, para avaliação mais generalista do efeito *infeed* na estimativa da localização de faltas pela função de distância. Tal detalhamento foge ao escopo deste trabalho.

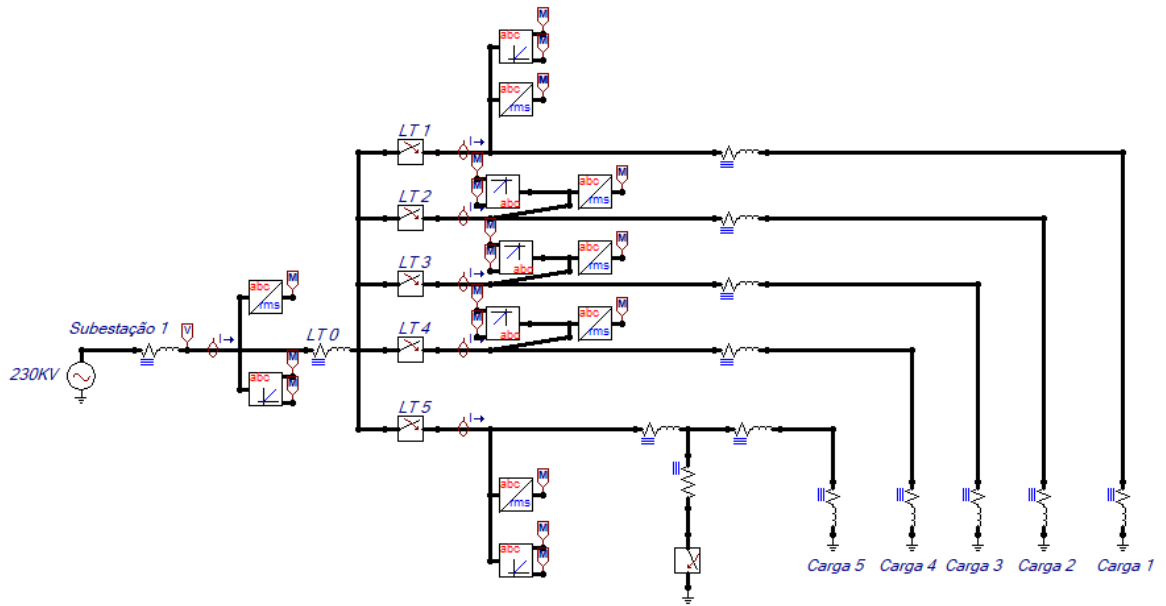
Finalmente, foi considerado o efeito *infeed* de forma isolada, desconsiderando-se a presença de outras possíveis causas de falha da função de distância, como interferências devidas ao acoplamento eletromagnético com LT paralelas, à resistência de arco⁶, aos capacitores de compensação, a grandes oscilações de potência, ou defeitos muito próximos de subestações.

3.2. INFLUÊNCIA DO AUMENTO DO NÚMERO DE RAMOS

A Figura 4 apresenta uma variação do sistema teste, acrescentando à LT original múltiplas derivações. Embora seja uma topologia incomum, sua concepção visa amplificar o efeito *infeed*, pelo aumento das correntes, devido ao maior número de ramos paralelos ao que sobre a falta (Figura 6).

⁶ Resistência de arco refere-se a capacidade de um meio isolante de suportar e extinguir a formação de um arco elétrico.

Figura 6- Linha de transmissão com múltiplas derivações



Fonte: Própria do autor

Analogamente a análise da seção anterior, e considerando que as faltas serão aplicadas no ramal identificado por LT5, cuja corrente é I_5 a tensão no terminal transmissor da linha de transmissão pode ser calculada por (desconsiderando a impedância de falta)

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_5) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p$$

Aplicando-se a LKC no nó de derivação, arbitrando-se todas as correntes entrando no nó, com exceção da corrente no ramo em que ocorre o curto-circuito como o sentido positivo, a equação pode ser reescrita como:

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_0 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p$$

Dividindo-se ambos os lados por I_0 , obtemos a impedância vista pelo relé:

$$Z_{\text{relay}} = \frac{V_0}{I_0} = Z_0 + \left(1 + \frac{\sum_k I_k}{I_0}\right) \cdot Z_{\text{linha}} \cdot p \quad [4,5]$$

tal que o fator de *infeed*, M , para esta topologia de sistema será:

$$M_{\text{infeed}} = \frac{\sum_k I_k}{I_0}$$

Para múltiplos ramos onde o fator de *infeed* se torna um somatório das contribuições de cada ramo, o valor é determinante também na determinação de subalcançe ou sobrealcançe, onde de maneira análoga:

$|1 + M| < 1$ ocorrência de sobrealcance, efeito *outfeed*.

$|1 + M| > 1$, ocorrência de subalcance, efeito *infeed*.

Lembrando que, nesta análise, é desconsiderada a influência da impedância de falta e outros efeitos.

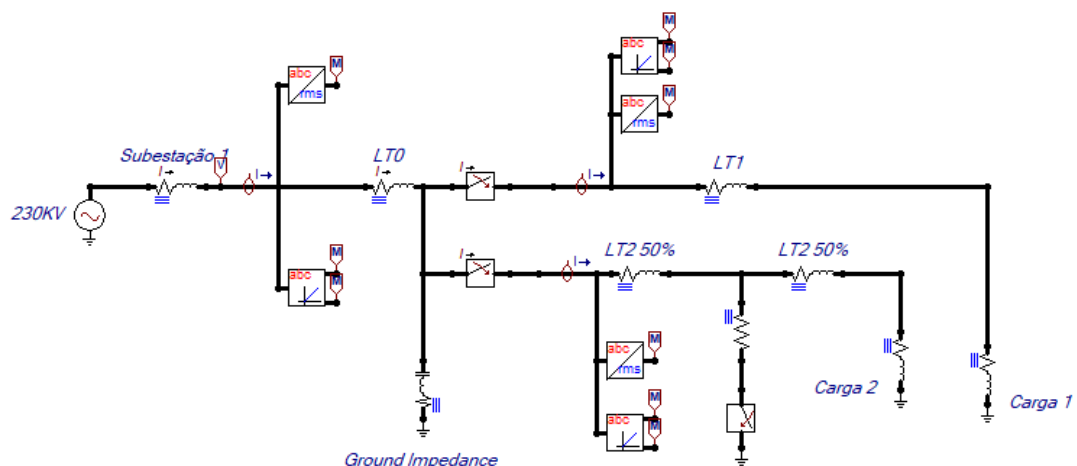
A localização do curto é dada de maneira análoga ao caso da LT com duas ramificações:

$$p = \frac{Z_{\text{relay}} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{\text{linha}}}$$

3.3. RAMOS DE DERIVAÇÃO SHUNT E IMPEDÂNCIA ENTRE LINHA E TERRA

A Figura 7 mostra uma nova variação do sistema teste apresentado na Figura 3, adicionando-se uma impedância em derivação, para a qual supõe-se não haver medição das tensões e correntes. Esta irá contribuir para o *infeed* se comportando como um ramo em paralelo.

Figura 7- Linha com impedância de derivação



Fonte: própria do autor

Conexões em derivação podem representar a capacitância de linhas de transmissão, bancos de capacitores, ou reatores, para compensação de potência reativa do sistema, bem como cargas derivadas muito próximas ao traçado da LT.

Como não há medição no ramo em derivação, podemos obter sua corrente, denominada I_{ground} , a partir das correntes conhecidas:

$$I_{ground} = I_0 - (I_1 + I_2) \quad (7)$$

Analogamente, calcula-se a lei de kirchoff das tensões do relé ao ponto de curto-circuito e desprezando-se a impedância de falta, vale ressaltar que o sentido positivo da corrente é entrando dentro do ramo de derivação com exceção da corrente do ramo ao qual ocorre curto-circuito:

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_2) \cdot Z_{linha.p} \quad (8)$$

Fazendo a lei de kirchoff das correntes no nó de derivação em (8):

$$V_0 = Z_0 \cdot I_0 + (I_0 + I_1 + I_{ground}) \cdot Z_{linha.p} \quad (9)$$

Dividindo-se ambos os lados por I_0 em (9) obtemos a impedância vista pelo relé.

$$Z_{relé} = \frac{V_0}{I_0} = Z_0 + \left(1 + \frac{I_1}{I_0} + \frac{I_{ground}}{I_0}\right) \cdot Z_{linha.p} \quad (10) \quad [7]$$

O novo fator de infeed é incrementado de uma nova corrente que se comporta como um ramo em paralelo.

$$M = \frac{I_1 + I_{ground}}{I_0} \quad (10)$$

Analogamente aos outros casos:

$|1 + M| < 1$ ocorrência de sobrealcance, efeito outfeed

$|1 + M| > 1$, ocorrência de subalcance, efeito infeed.

3.4. GENERALIZAÇÃO DOS CASOS

O esquema apresenta bons resultados para um relé observando n linhas em paralelo, para obtermos informação necessária precisamos da impedância da linha a ser monitorada e as correntes em cada ramo. Não é necessário conhecimento de impedâncias de carga ou configuração topológica da rede posterior desde que possam ser reduzidas a um sistema equivalente.

Para estruturas mais complexas podemos escrever:

$$Z = p.Z_{\text{linha}} + \Delta Z \quad (11) \quad [3,9]$$

Onde $\Delta Z = F(X)$, sendo F uma função não linear (pela disposição dos ramos em um circuito equivalente) e X um vetor cujo conjunto de variáveis associado ao sistema, onde:

$\Delta Z > 0$ temos a condição de subalcance

$\Delta Z < 0$ temos a condição de sobrealcance

4.1. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os diversos casos utilizados para avaliar o comportamento do efeito *infeed* e seu possível impacto no cálculo da posição das faltas pela função de proteção de distância.

4.2. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEEED EM LINHA COM UMA DERIVAÇÃO

Primeiramente, será analisado o efeito *infeed* em uma LT com uma derivação (Figura 3), aplicando-se curtos-circuitos equilibrados, com uma impedância de falta pequena, 1Ω .

A partir das medições das tensões e correntes no terminal transmissor, no ramo LT0, será calculada a impedância que seria estimada pelo relé de distância, similarmente às condições em que um relé recebendo os sinais dos TC e TP, conforme (12) e (13).

$$|Z_{relay}| = \frac{V_0 \text{ rms}}{I_0 \text{ rms}} \quad (12) \quad \theta_0 = \arg\{\hat{I}_0\} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) \quad (13)$$

Nessas equações, considera-se que a impedância equivalente da subestação é muito pequena, tal que faremos a aproximação de que o ângulo da tensão V_0 é praticamente zero. Assim, o ângulo da impedância resultante à montante do relé pode ser aproximado pelo ângulo de fase da corrente I_0 .

São também monitorados os valores das correntes em cada ramo. O programa ATP/ATPDraw possui blocos que convertem os valores instantâneos das simulações em seus valores eficazes, bem como nos respectivos fasores, estes últimos em coordenada retangular. Portanto, a partir dos valores das partes real e imaginária de cada corrente, podem ser calculados os respectivos ângulos de fase dos fasores de corrente, nas condições de pré-falta e pós-falta.

$$\arg(\hat{I}_K) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) \quad \text{para } k = 1,2 \quad (14)$$

Diferenciou-se em que ramo o curto está acontecendo comparando os módulos das correntes em cada ramo a que possui maior módulo é o ramo de maior probabilidade da ocorrência real do curto.

Faz-se o cálculo do fator de *infeed* e da posição do curto-circuito, comparando-se com a posição do curto-circuito desconsiderando-se a existência de *infeed*:

$$M = \frac{I_1}{I_0} \quad (\text{para um curto na linha 2}) \quad (15)$$

$$p = \frac{Z_{relay} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{linha}} \quad (16)$$

$$p' = \frac{Z_{relay} - Z_0}{Z_{linha}} \quad (17)$$

4.3. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED EM LINHA COM UMA DERIVAÇÃO E IMPEDÂNCIA DE FALTA 10Ω

Será observado o efeito do aumento da impedância de falta para o esquema da simulação anterior, aumentando apenas a impedância de falta de 1Ω para 10Ω.

Todos os demais procedimentos e equações serão os mesmos adotados na Seção 5.2.

4.4. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED PARA CIRCUITO COM MÚLTIPLAS DERIVAÇÕES E IMPEDÂNCIA DE FALTA 10Ω

Espera-se observar a amplificação do efeito infeed pelo aumento do número de ramos no sistema, foi mantido uma impedância de falta de 10Ω, como no caso da Seção 5.3, supondo que seria a situação mais crítica para a detecção do ponto de ocorrência da falta.

Ressalta-se que o cálculo da impedância equivalente vista pelo relé permanece inalterado, independentemente do número de ramais da LT, pois a proteção baseia-se exclusivamente nas tensões e correntes medidas no terminal transmissor da LT. Assim:

$$|Z_{relay}| = \frac{V_0 \text{ rms}}{I_0 \text{ rms}} \quad (18) \quad \arg(\hat{I}_0) = = tg^{-1} \left(\frac{im\{\hat{I}_0\}}{re\{\hat{I}_0\}} \right) \quad (19)$$

No entanto, serão calculados tantos ângulos de fase quanto forem os ramos em derivação da LT, um para cada corrente. Sendo que, neste caso, são cinco derivações de igual impedância de linha e mesma carga.

$$\arg(\hat{I}_K) = = tg^{-1} \left(\frac{im\{\hat{I}_0\}}{re\{\hat{I}_0\}} \right) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (20)$$

Calcula-se o fator de infeed para essa configuração de rede e a posição do curto juntamente com a posição do curto desconsiderando o efeito infeed.

$$M_{\text{infeed}} = \frac{\sum_k I_k}{I_0} \quad (21)$$

na qual I_k é a corrente de cada ramo, excetuando-se a corrente no ramo em que ocorre o curto-circuito. Portanto, neste caso, como a falta será aplicada no ramo 5, k varia de 1 a 4. Lembrando que para conferir generalidade, bastaria diferenciar o ramo sob falta pelo maior módulo da corrente observada.

$$p = \frac{Z_{\text{relay}} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{\text{linha}}} \quad (22) \quad p' = \frac{Z_{\text{relay}} - Z_0}{Z_{\text{linha}}} \quad (23)$$

4.5. SIMULAÇÃO DO EFEITO INFEED PARA CIRCUITO DUPLO COM DERIVAÇÃO SHUNT E IMPEDÂNCIA DE FALTA DE 10Ω

Veremos a influência de ramos de derivação shunt, onde não há medição de corrente, sendo que o seu valor a partir da medição das demais correntes do circuito..

$$I_{\text{ground}} = (I_1 + I_2) - I_0 \quad (24)$$

Deve haver a preocupação da orientação correta do sentido da corrente de derivação à terra.

Novamente calculamos a tensão, corrente rms, corrente real e imaginária vista pelo relé de distância no começo da linha de transmissão LT0. A função 21 faria nesse modelo automaticamente os cálculos realizados.

$$|Z_{\text{relay}}| = \frac{V_0 \text{ rms}}{I_0 \text{ rms}} \quad (25) \quad \arg(\hat{I}_0) = = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) \quad (26)$$

Simula-se a corrente rms, parte real da corrente e parte imaginária de corrente em cada ramo da linha de transmissão.

$$\arg(\hat{I}_K) = = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (27)$$

Calcula-se por fim o fator de infeed para esta topologia de rede e a posição do curto como também a posição do curto desconsiderando o efeito infeed

$$M = \frac{I_1 + I_{\text{ground}}}{I_0} \quad (\text{supondo curto na linha 2}) \quad (28)$$

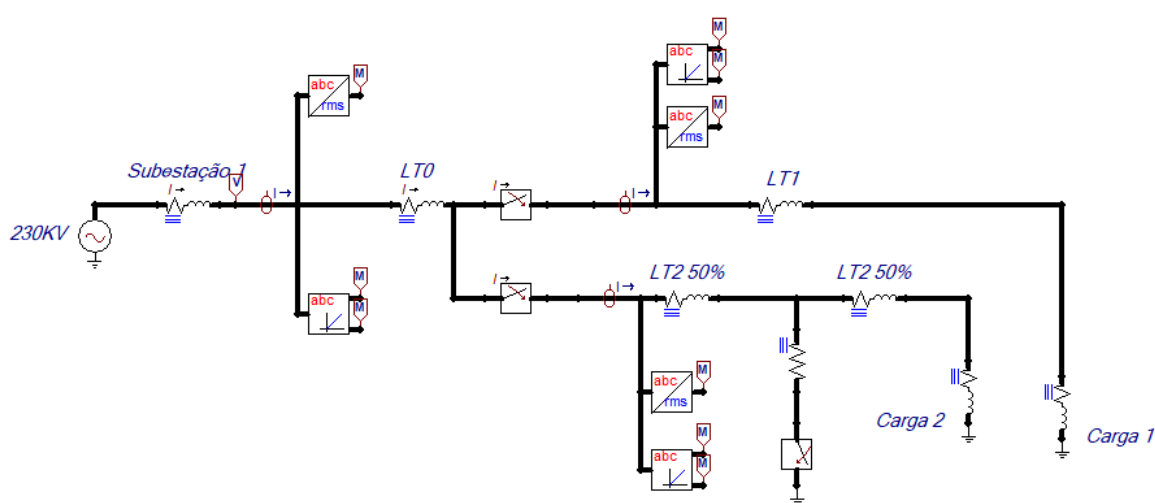
$$p = \frac{Z_{\text{relay}} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{\text{linha}}} \quad (29) \quad p' = \frac{Z_{\text{relay}} - Z_0}{Z_{\text{linha}}} \quad (30)$$

5.1. SIMULAÇÃO

5.2. RELÉ OBSERVANDO UMA LINHA COM UMA DERIVAÇÃO.

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações para o caso descrito na Seção 5.2, em que se considera uma LT com uma derivação e uma impedância de falta de 1Ω com o curto aplicado a 50% da linha 2, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação.



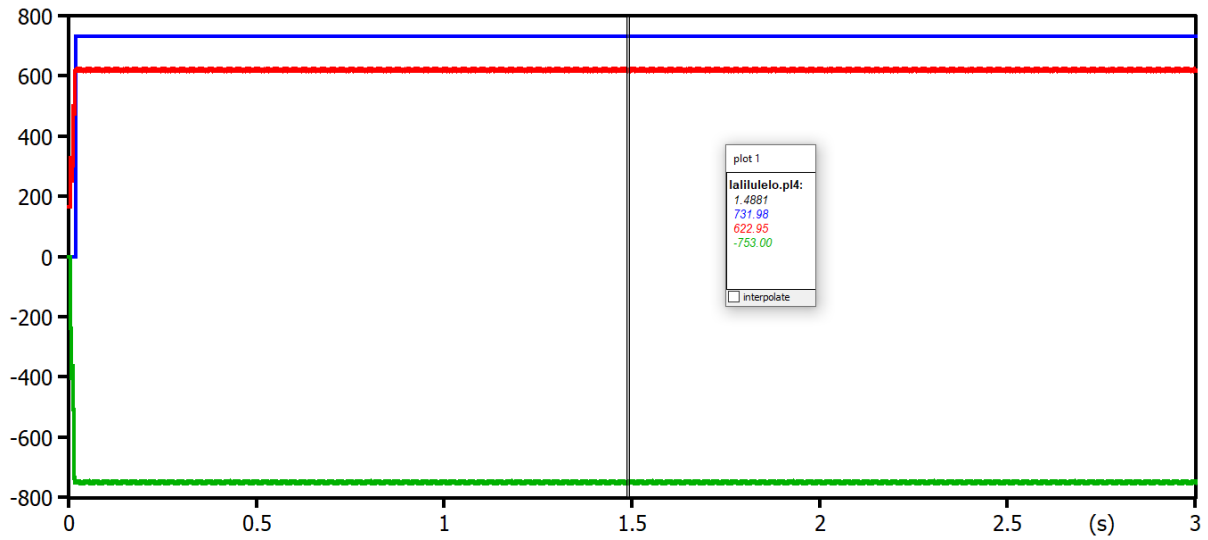
Fonte própria do autor

Considerando-se que todos em todos os testes foram consideradas cargas e faltas equilibradas, são apresentadas as respostas do sistema apenas para a fase a , uma vez que as demais fases terão comportamento similar.

Nesse sentido, a Figura 8 mostra a corrente total da LT, $\hat{I}_0$ que é a corrente medida no seu terminal transmissor, onde supõe-se instalado o sistema de proteção. Os resultados foram obtidos para o sistema operando sem falta, em regime permanente. Na Figura 7, a curva em azul corresponde ao valor eficaz (RMS) da corrente na fase a , enquanto as curvas vermelha e verde apresentam, respectivamente, a parte real e a parte imaginária do fasor da corrente $\hat{I}_0$.

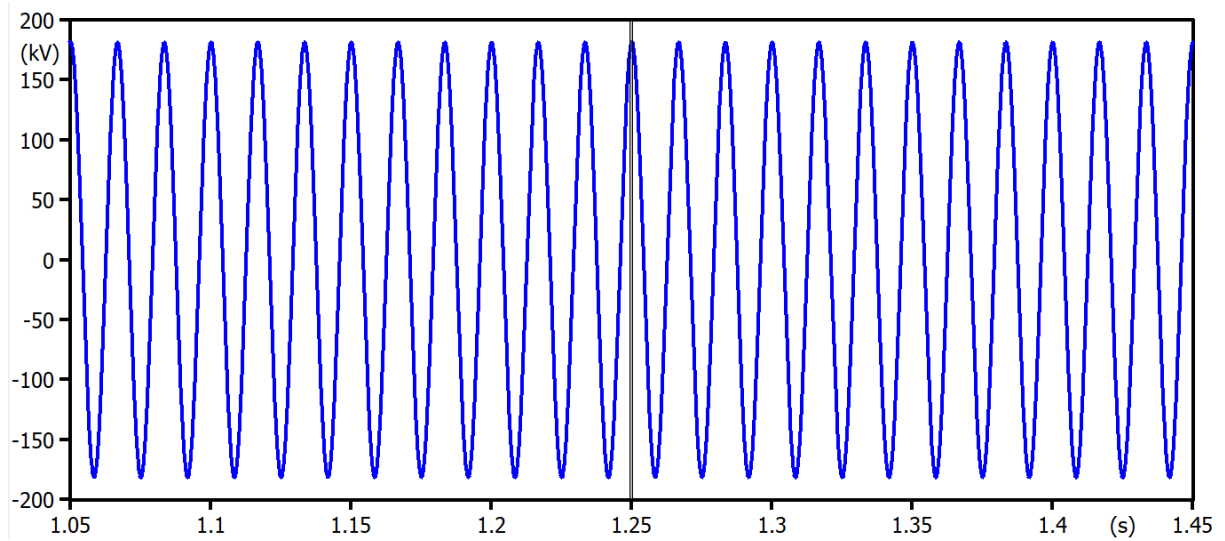
Similarmente, a Figura 8 apresenta a tensão pré-falta no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a , em valor instantâneo, com um valor de pico $V_{0p} = 181,139 \text{ kV}$, que resulta em um valor eficaz de fase $V_{0f} = 128,084 \text{ kV}$.

Figura 9- Corrente total, $\hat{I}_0$, da LT para situação pré-falta, na fase a . Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Figura 10 - Tensão pré-falta no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

A partir das Figura 9 e Figura 10, pode-se calcular a impedância que seria estimada pelo relé de distância, conforme as equações (12) e (13), apresentadas nas seções anteriores:

$$|Z_{relay}| = \frac{V_{0\,rms}}{I_{0\,rms}} = \frac{128.084}{731,98} = 174,98\Omega$$

$$\phi_0 = tg^{-1} \left(\frac{im\{\hat{I}_0\}}{re\{\hat{I}_0\}} \right) = tg^{-1} \left(\frac{-753}{622,95} \right) = -50,4^\circ$$

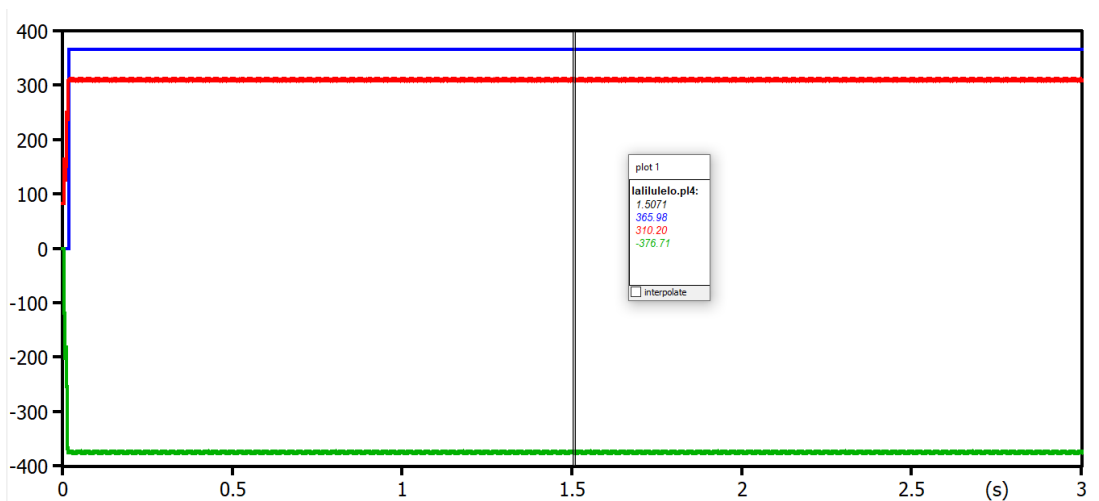
tal que, assumindo-se a defasagem de V_0 desprezível,

$$Z_{relay} = 174,98 \angle 50,4^\circ \Omega$$

é a impedância estimada pelo relé, para a situação do sistema operando com carga normal.

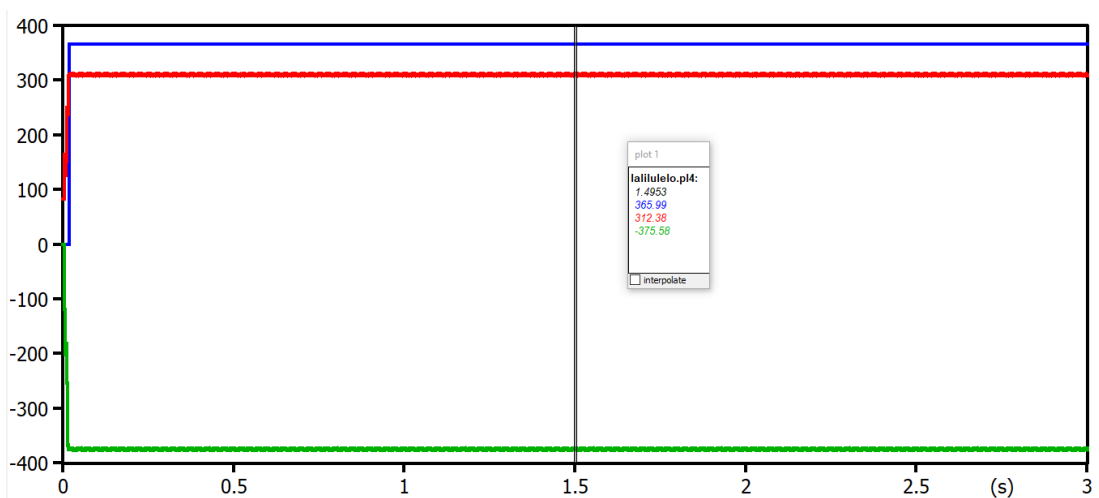
A título de ilustração, para permitir comparações com as próximas simulações, as Figura 11 e Figura 12 mostram as correntes nas duas ramificações da LT, $\hat{I}_1$ e $\hat{I}_2$, respectivamente, na condição de operação em regime permanente (sem aplicação da falta). Em ambas as figuras, as curvas em azul correspondem aos valores eficazes (RMS) das correntes na fase *a*, enquanto as curvas vermelhas e verdes apresentam, respectivamente, as partes reais e as partes imaginárias dos fasores de cada corrente.

Figura 11–Corrente no ramo LT1, $\hat{I}_1$, para situação pré-falta, na fase *a*. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

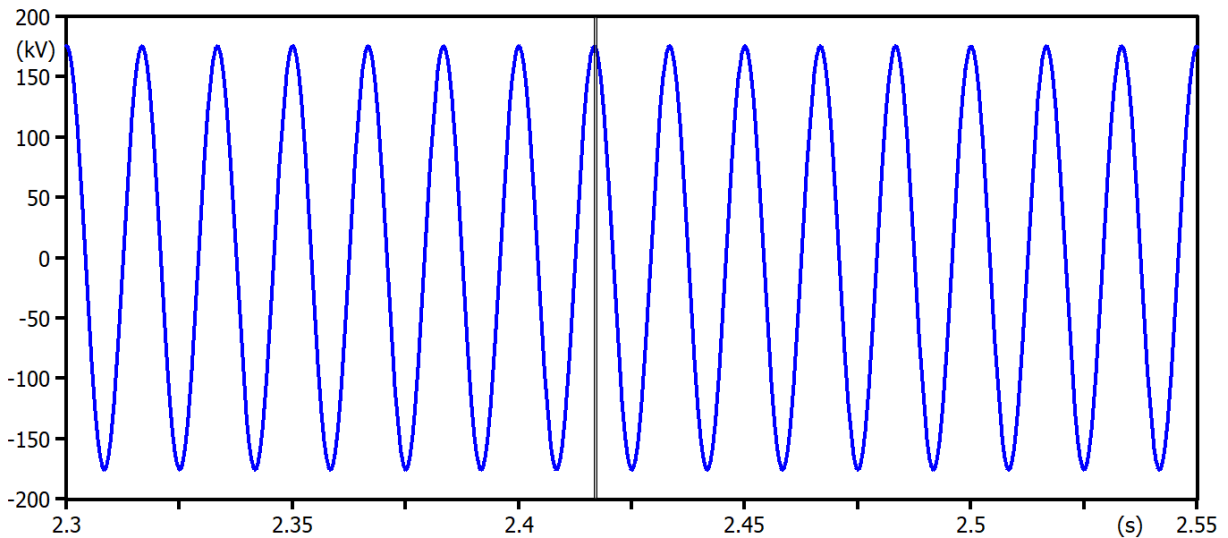
Figura 12 - Corrente no ramo LT2, $\hat{I}_2$, para situação pré-falta, na fase *a*. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

A Figura 14 mostra a tensão V_0 pós falta, na qual é possível observar a queda do valor de pico devido à corrente de falta, $V_{op} = 175,240$ kV, que resulta em um valor eficaz de fase $V_{of} = 123,913$ kV.

Figura 14 - Tensão pós-falta no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.



Fonte: própria do autor

Com os valores pós-falta extraídos da Figura 13 podemos calcular

$$\phi_{of} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{im}\{\hat{I}_{of}\}}{\operatorname{re}\{\hat{I}_{of}\}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-1518,1}{305,46} \right) = -78,64^\circ$$

De tal forma, que a impedância vista pelo relé resulta em

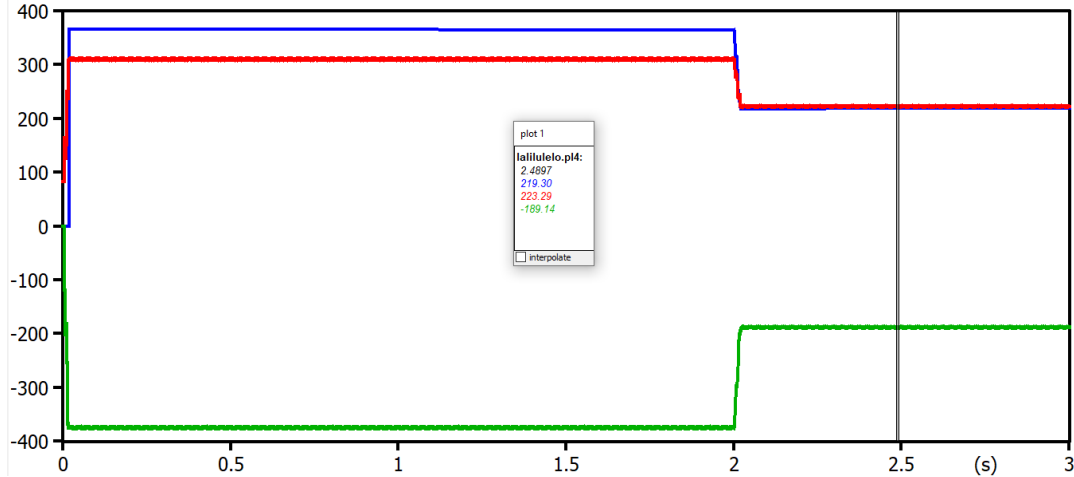
$$|Z_{relay}| = \frac{V_{of}}{I_{of}} = \frac{123.913,0}{1.169,3} = 105,99 \, \Omega$$

$$Z_{relay} = 150,99 \angle 78,64^\circ \, \Omega$$

Complementarmente, as Figura 15 e Figura 16 mostram, respectivamente, o comportamento das correntes no ramal são (ramo LT1) e no ramal sob falta (ramo LT2). Note-se que há uma queda da corrente, devido ao afundamento da tensão causado pela falta aplicada no ramal vizinho. Adicionalmente, o fator de potência apresenta crescimento, pois aumenta a influência da impedância da carga com a queda de corrente no ramal. Por outro lado, o ramal sob falta, Figura 14, apresenta um comportamento similar ao já discutido para a

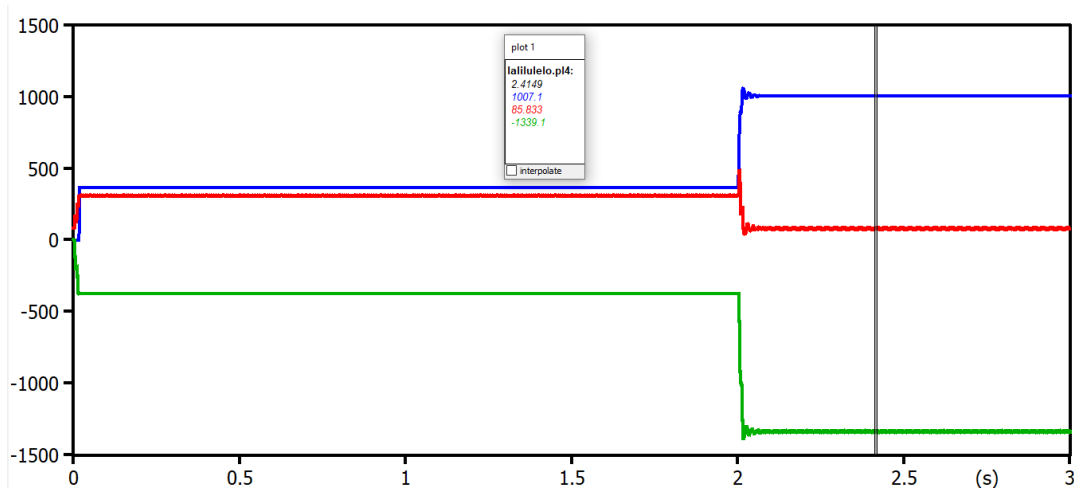
corrente total da LT, em que, sendo o ramo sob falta, percebe-se uma variação mais acentuada da corrente.

Figura 15— Corrente no ramo LT1, $\hat{I}_1$, para situação pós-falta, na fase a . Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Figura 16 - Corrente no ramo LT2, $\hat{I}_2$, para situação pós-falta, na fase a . Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Partindo dessa análise geral da resposta do sistema à falta, faz-se o estudo do impacto da corrente de derivação, do ramal são, sobre a estimativa da localização do ponto da falta, pela função de proteção de distância.

Da Figura 15 pode-se calcular

$$\phi_{1f} = tg^{-1} \left(\frac{im\{\hat{I}_{1f}\}}{re\{\hat{I}_{1f}\}} \right) = tg^{-1} \left(\frac{-189,14}{223,29} \right) = -40,27^\circ, \text{ tal que, } \hat{I}_{1f} = 219,3 \angle -40,27^\circ$$

A impedância teórica total da LT, vista do terminal transmissor, até o terminal final do ramal 2, Z_{linha} , é dada a seguir:

$$Z_{linha} = 15 + j113,097 = 114,0873 \angle 82,445^\circ \Omega$$

De tal forma que a impedância teórica vista do terminal transmissor até o ponto da falta, desprezando-se a impedância de falta e a impedância do ramo 1, é dada por

$$Z_0 = 7,5 + j56,549 = 57,044 \angle 82,445^\circ \Omega$$

Portanto, o ponto da falta, considerando-se o fator de compensação da corrente de *infeed* pode ser obtido pela aplicação de (15)

$$\begin{aligned} M_{infeed} &= \frac{-I_1}{I_0} = 0,21775 \angle -141,65^\circ \\ p &= \frac{Z_{relay} - Z_0}{(1 + M_{infeed})Z_{linha}} = \frac{105,99 \angle 78,62^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{(1 + 0,21775 \angle -141,65^\circ)114,087 \angle 82,445^\circ} \\ &= 0,5135 \angle 0,996^\circ \end{aligned}$$

Nota-se que $|p| = 0,5135$, o que equivale a uma localização da falta à 51,35 % do comprimento da LT, portanto, apresentando um erro na localização de 1,35% em relação a localização real, considerando-se que a falta foi aplicada em 50% do ramal 2.

Por outro lado, desconsiderando-se a injeção de corrente do ramal 1, ou seja, negligenciando-se o efeito de *infeed*, o ponto de falta estimado pelo relé seria dado por (16), tal que

$$p' = \frac{Z_{relay} - Z_0}{Z_{linha}} = \frac{105,99 \angle 78,62^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{114,087 \angle 82,445^\circ} = 0,4346 \angle -12,53^\circ$$

Curto-circuito desconsiderando o efeito previsto para 43,46% da linha (simulação real a 50% da linha),

$$M_{infeed} = \frac{-I_1}{I_0} = 0,21775 \angle -141,65^\circ \text{ como } |1 + M_{infeed}| = 0,84016 < 1$$

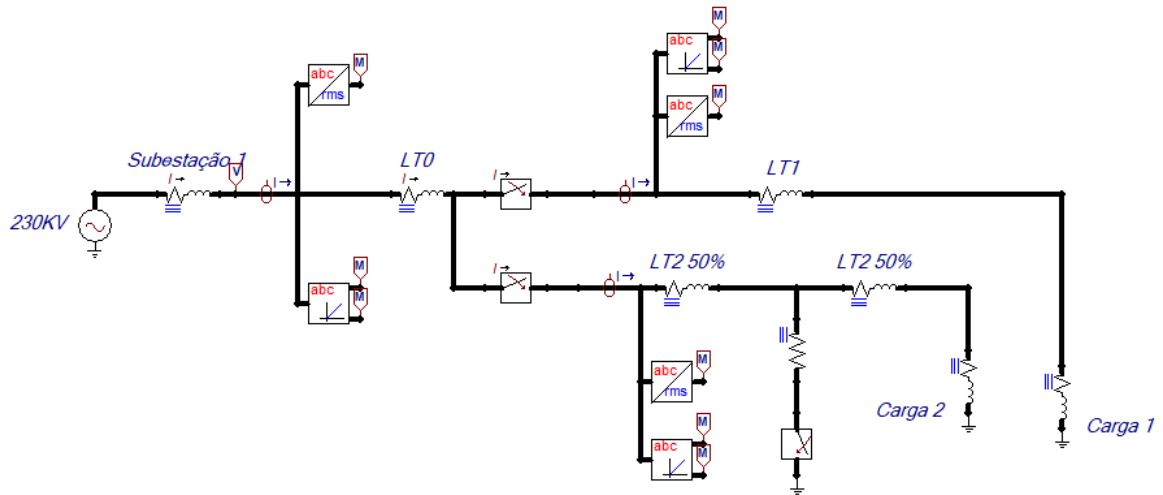
Temos assim a condição de sobrealcance medido pelo relé devido ao efeito *infeed*.

5.3. RELÉ OBSERVANDO DUAS DERIVAÇÕES E IMPEDÂNCIA DE FALTA DE 10Ω:

Foi implementado um modelo idêntico ao anterior só que a alterando a impedância de falta de um valor de 1Ω para 10Ω, desejando-se estudar a variação da amplitude do erro que será

implementado uma vez que a uma análise estatística de uma provável valor da impedância de falta é uma tarefa difícil e não aplicada no modelo utilizado (Figura 17).

Figura 17- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação e impedância de 10Ω

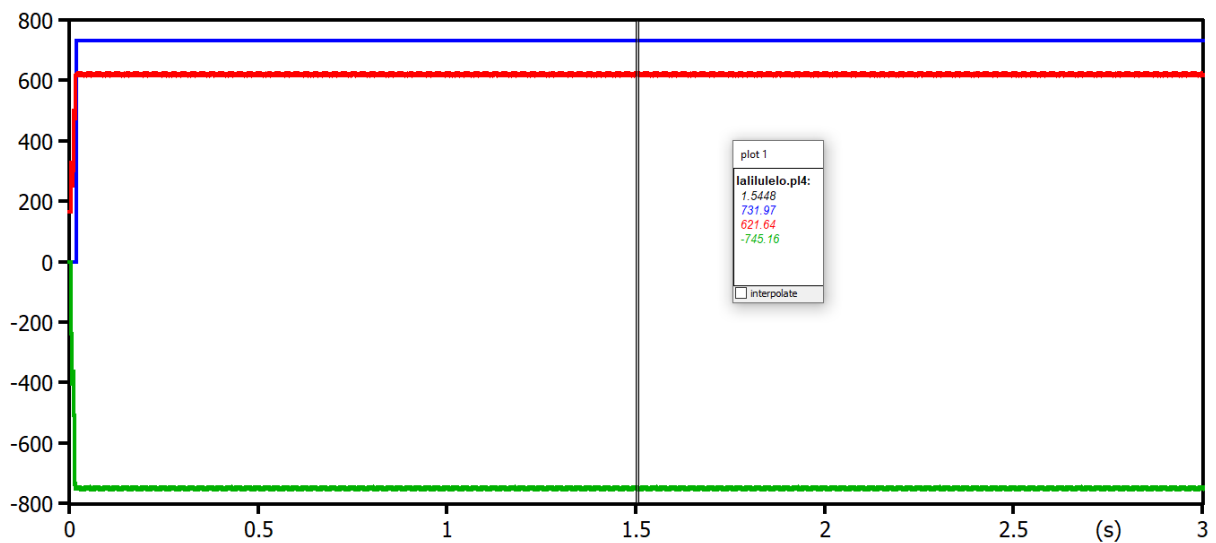


Fonte: própria do autor

Nas condições pré-falta temos que:

Fazendo o plot da corrente no ramo 0 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

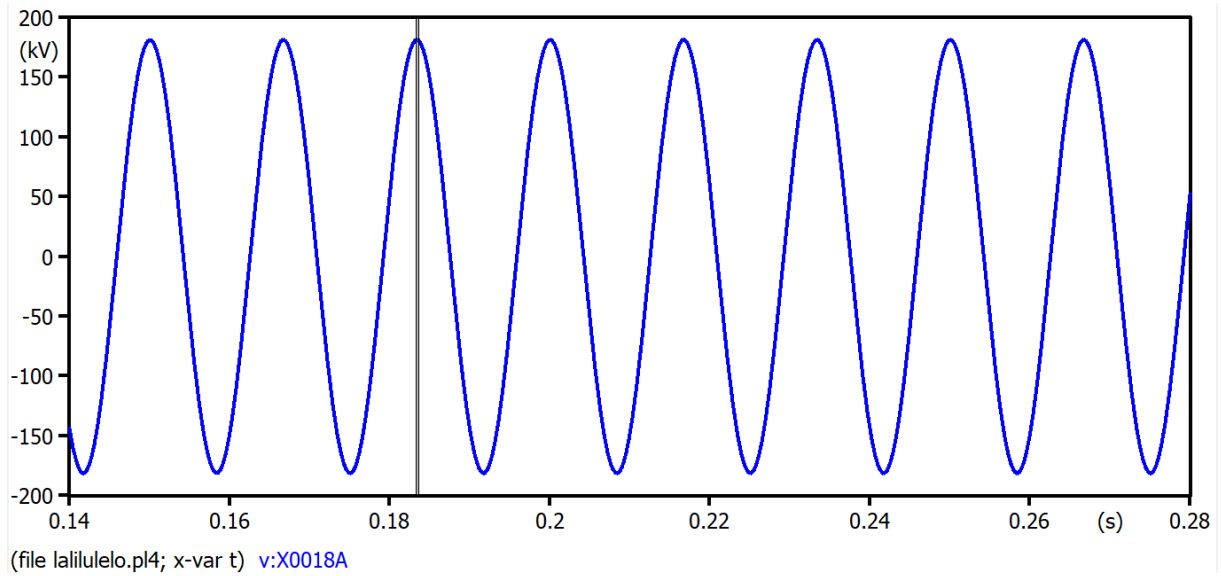
Figura 18- Corrente ramo 0 pré-falta exp 2, situação pré-falta, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Fazendo também a medida da tensão no relé localizado no ramo 0 temos:

Figura 19 - tensão pré-falta exp 2, no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

Pelos gráficos das figuras 18 e 19 tem-se:

$$V_{0\text{ pico}} = 181,175 \text{ kV} \quad V_{0\text{ rms}} = 128,11 \text{ kV}$$

$$|Z_{\text{relay/pré-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{128110}{731,97} = 175,02$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-745,16}{621,64} \right) = -50,16^\circ$$

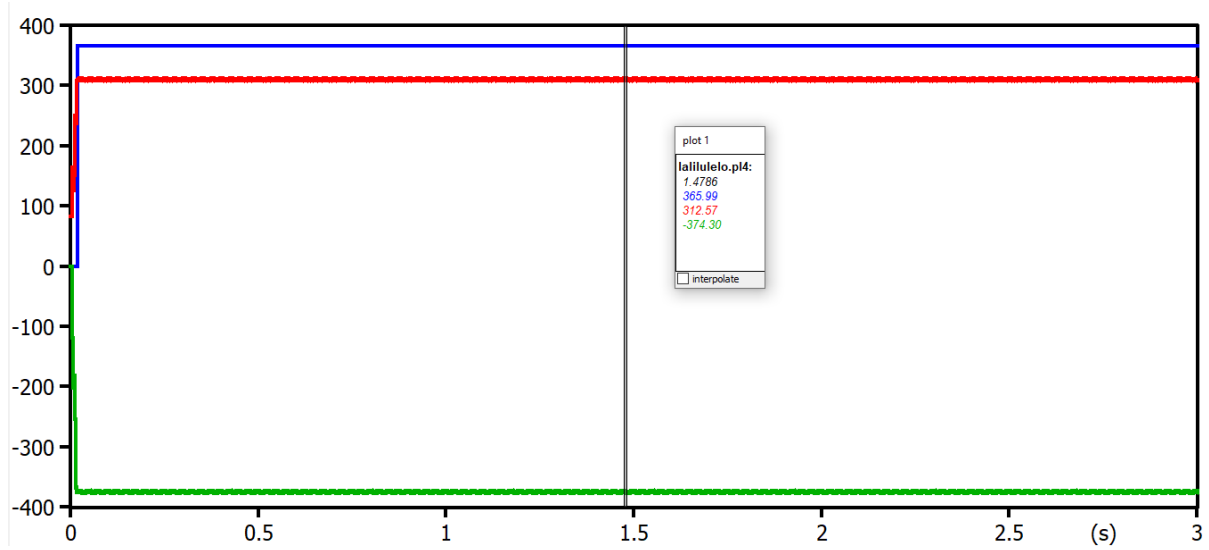
$$Z_{\text{relay/pré-falta}} = 175,02 \angle -50,16^\circ \Omega$$

Como a defasagem da fonte é muito pequena tem-se que o ângulo da tensão é 0° por referência, ocorre que:

Fazendo os cálculos das correntes I_1 , I_2 nas condições pré-falta:

Plotando a corrente I_1 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 20 - Corrente ramo 1 pré-falta exp 2, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

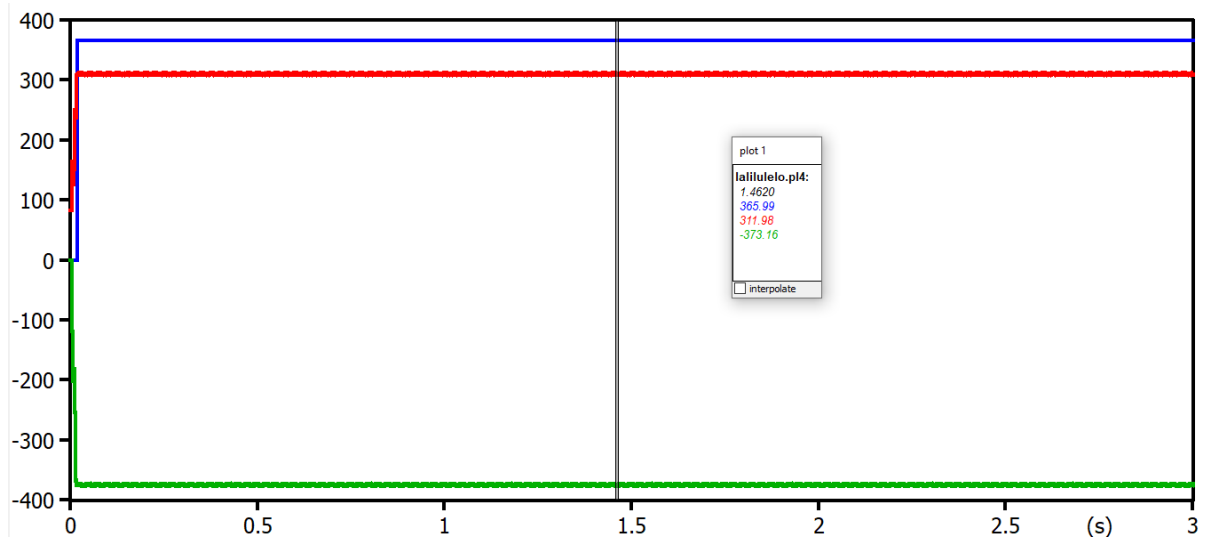
Pela figura 20 tem-se:

$$I_{1\text{ rms}} = 365,99 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-374,3}{312,57} \right) = -50,14^\circ$$

Calculando a corrente I_2 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 21- Corrente ramo 2 pré-falta exp 2, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

Pela Figura 21 tem-se:

$$I_{2\text{ rms}} = 365,99 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-373,16}{311,98} \right) = -50,10^\circ$$

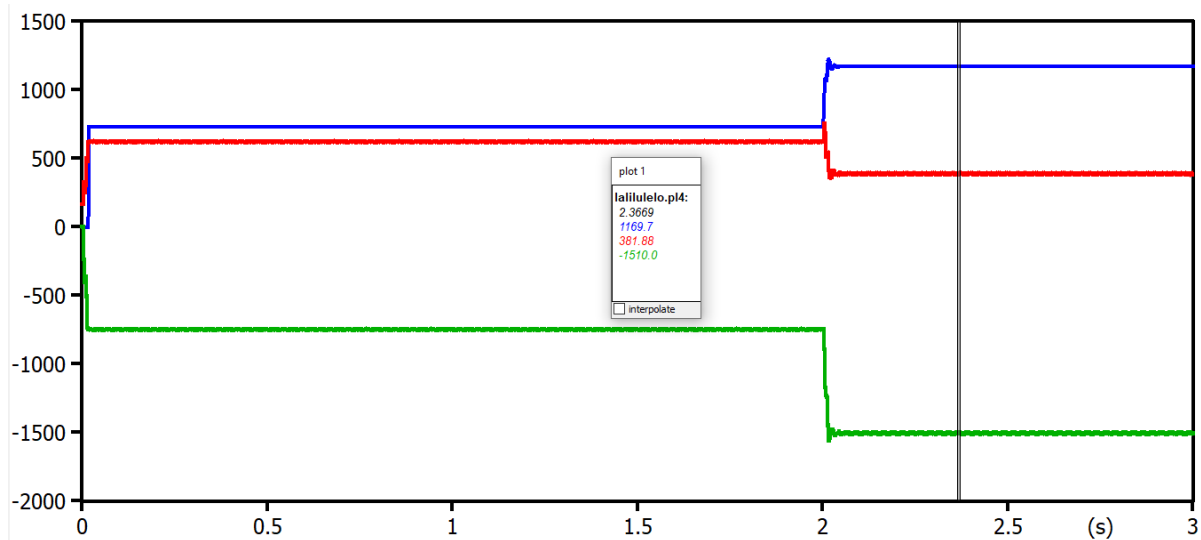
Como esperado pois as linhas são iguais alimentando mesma carga.

Após o curto (Condição pós-falta):

Supondo um estudo de pior caso onde temos um curto circuito trifásico com impedância de falta de 10Ω em um momento $t=2\text{s}$.

Fazendo o plot da corrente no ramo I_0 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 22 - Corrente no ramo 0 pós-falta exp 2, para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de 10Ω .
Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

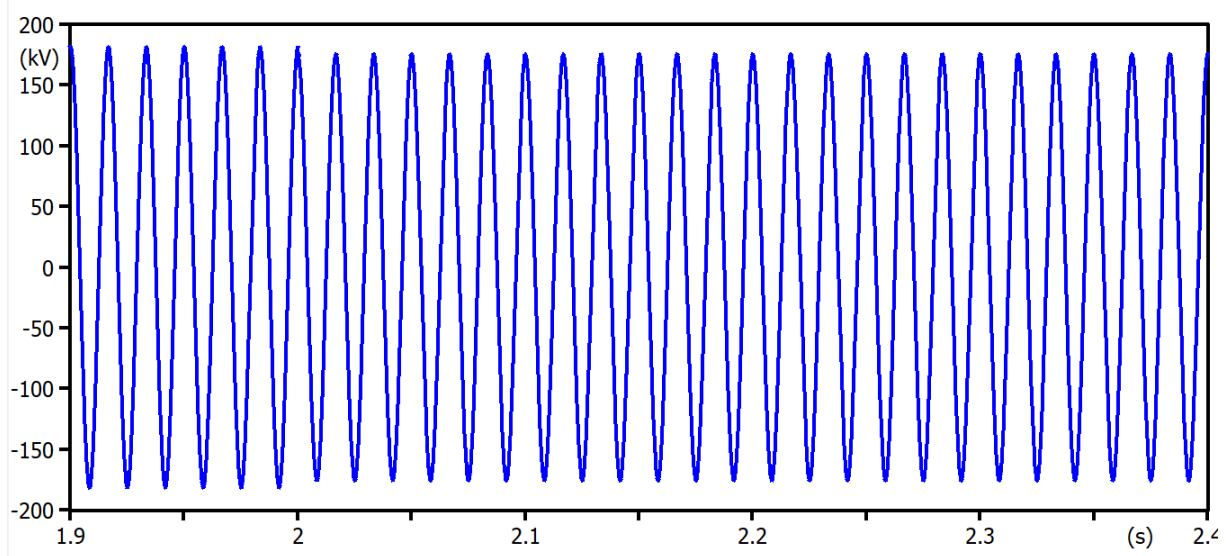
Pela figura 22 vê-se que:

$$I_{0\text{ rms}} = 1169,7 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{im}\{\hat{I}_0\}}{\operatorname{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-1510}{361,88} \right) = -75,81^\circ$$

Fazendo a análise da tensão no relé no ramo 0 temos:

Figura 23- Tensão pós-falta exp 2no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

Pela figura 23 observa-se que:

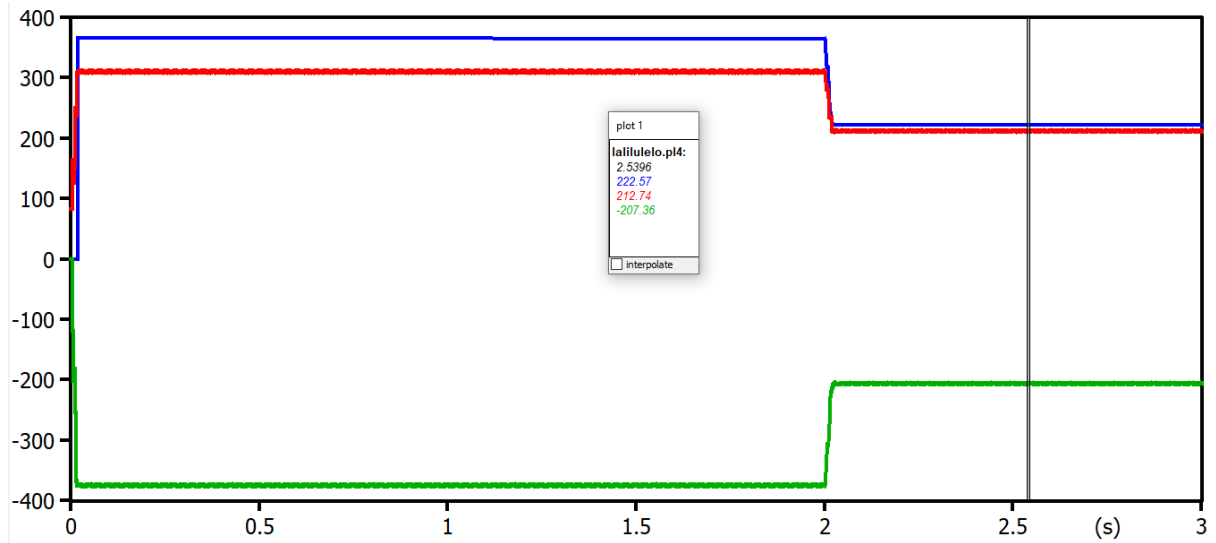
$$V_{0\text{ pico}} = 175,309 \text{ kV}$$

$$V_{0\text{ rms}} = 123,96 \text{ kV}$$

$$|Z_{\text{relay/pós-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{123960}{1169,7} = 105,976 \Omega$$

Fazendo o cálculo da corrente no ramo 1 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 24- Corrente no ramo 1 pós-falta exp 2, , na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

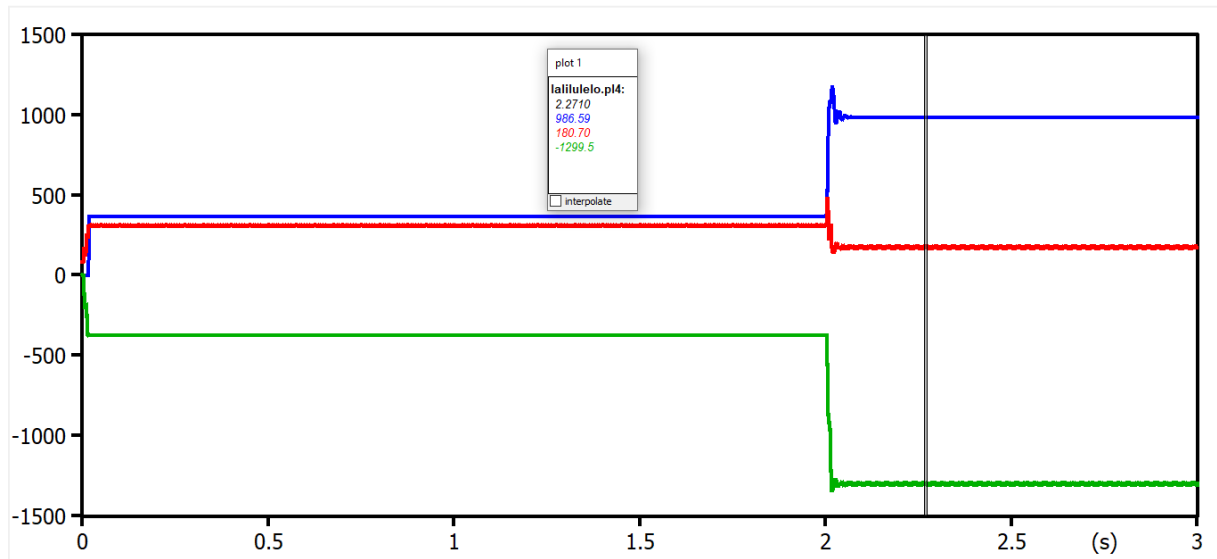
Pela figura 24 tem-se que:

$$I_{1\text{ rms}} = 222,57 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{im}\{\hat{I}_0\}}{\operatorname{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-207,36}{212,74} \right) = -44,27^\circ$$

Fazendo o cálculo da corrente no ramo 2, onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 25- Corrente no ramo 2 pós-falta exp 2, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

Pelo gráfico da Figura 25 tem-se:

$$I_{2\text{ rms}} = 986,59 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-1299,5}{180,7} \right) = -82,08^\circ$$

Como $I_{2\text{ rms}} = 986,59 \text{ A}$ e $I_{1\text{ rms}} = 222,57 \text{ A}$ é esperado que o curto tenha ocorrido na linha 2,

Fazendo o cálculo do ponto de ocorrência, sendo os parâmetros da rede dados por:

$$Z_0 = 7,5 + 56,549i = 57,044 \angle 82,445^\circ \Omega$$

$$Z_{\text{linha}} = 15 + 113,097i = 114,0873 \angle 82,445^\circ \Omega$$

$$p = \frac{Z_{\text{relé}} - Z_0}{(1 + \frac{(-I_1)}{I_0}) \cdot Z_{\text{linha}}} = \frac{105,976 \angle 75,81^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{(1 + \frac{(-222,57 \angle -44,27^\circ)}{1169,7 \angle -75,81^\circ}) 114,0873 \angle 82,445^\circ} = \frac{49,7526 \angle 68,2^\circ}{96,25786 \angle 75,67^\circ} =$$

$$0,5168 \angle -7,47^\circ$$

Posição do curto considerando o efeito ocorre a 51,68% da linha, confere com o curto simulado ocorrendo a 50% da linha.

Fazendo a análise desconsiderando o efeito infeed:

$$Z_0 + p' \cdot Z_{\text{linha}} = Z_{\text{relé}}$$

$$p' = \frac{Z_{\text{relé}} - Z_0}{Z_{\text{linha}}} = \frac{105,976 \angle 75,81^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{114,0873 \angle 82,445^\circ} = 0,43609 \angle -14,24^\circ$$

Desconsiderando o efeito a posição do curto é 43,609% da linha (simulação real a 50% da linha),

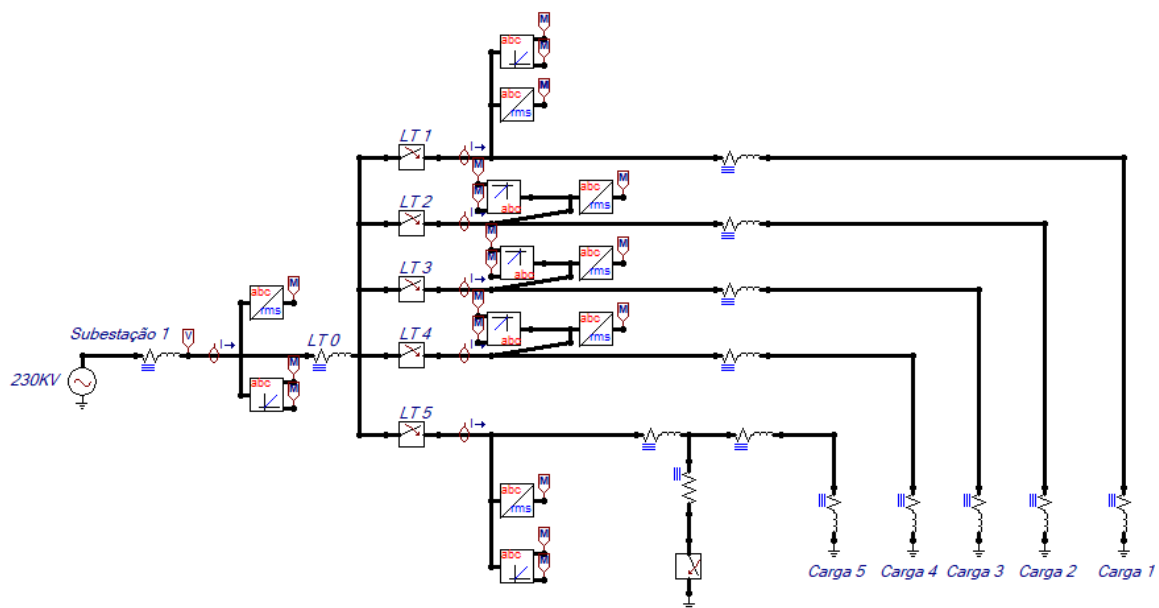
$$M_{\text{infeed}} = \frac{-I_1}{I_0} = 0,19028 \angle -148,46^\circ \text{ como } |1 + M_{\text{infeed}}| = 0,84372 < 1$$

Tem-se que, para o curto dado a condição ser trata de um sobrealcance.

5.4. RELÉ OBSERVANDO MÚLTIPLAS RAMOS EM PARALELO :

Foi implementado 5 ramos ao qual contém características aos ramos citados nas simulações anteriores com a intenção de ver a influência do aumento do número de ramos no efeito infeed, é aplicado um curto a 50% da linha de transmissão 5 que será determinado analiticamente pelo algoritmo implementado (Figura 26).

Figura 26- Sistema teste de linha de transmissão com derivações múltiplas

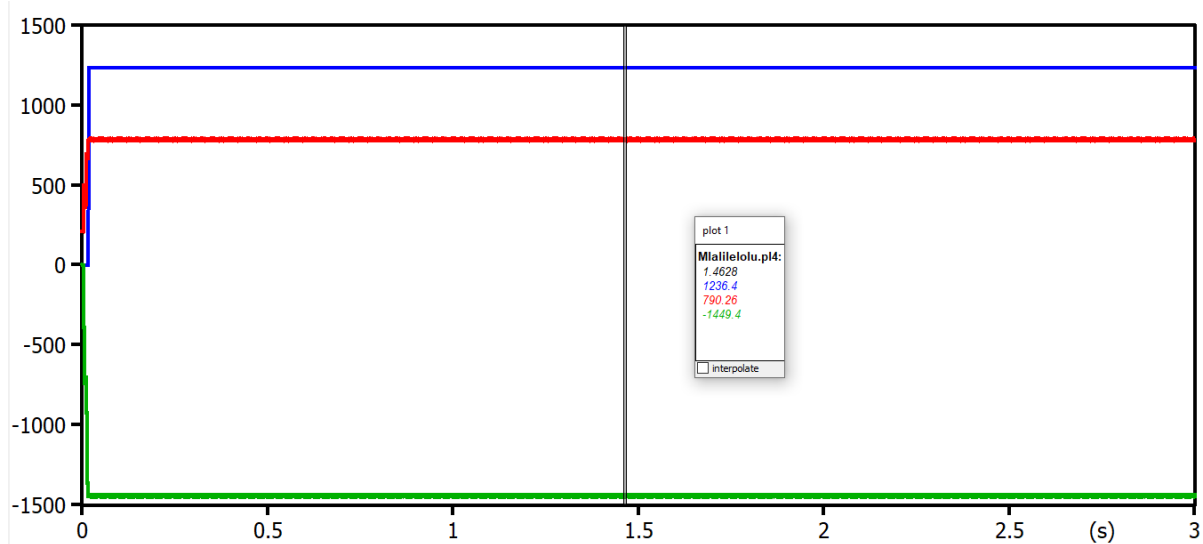


Fonte: própria do autor

Analisando a condição pré-falta:

Fazendo a corrente no ramo 0 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 27- Corrente pré-falta ramo 0 exp 3, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

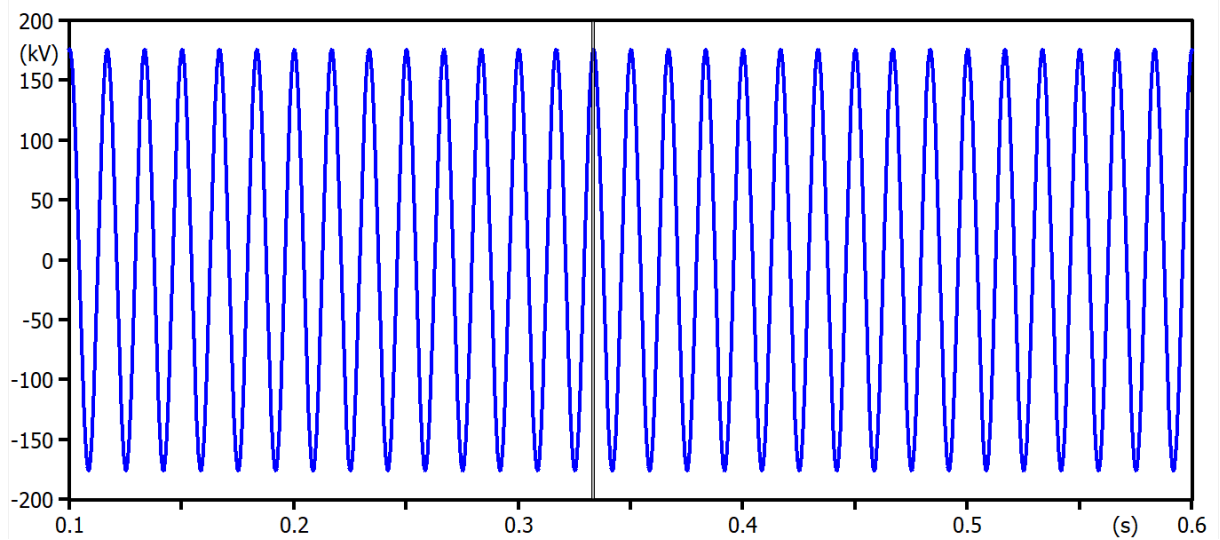
Pelo gráfico da Figura 27 tem-se:

$$I_{0\text{ rms}} = 1236,4 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-1449,4}{790,26} \right) = -61,4^\circ$$

A tensão no relé na linha 0 foi calculada como:

Figura 28- Tensão pré-falta exp 3no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

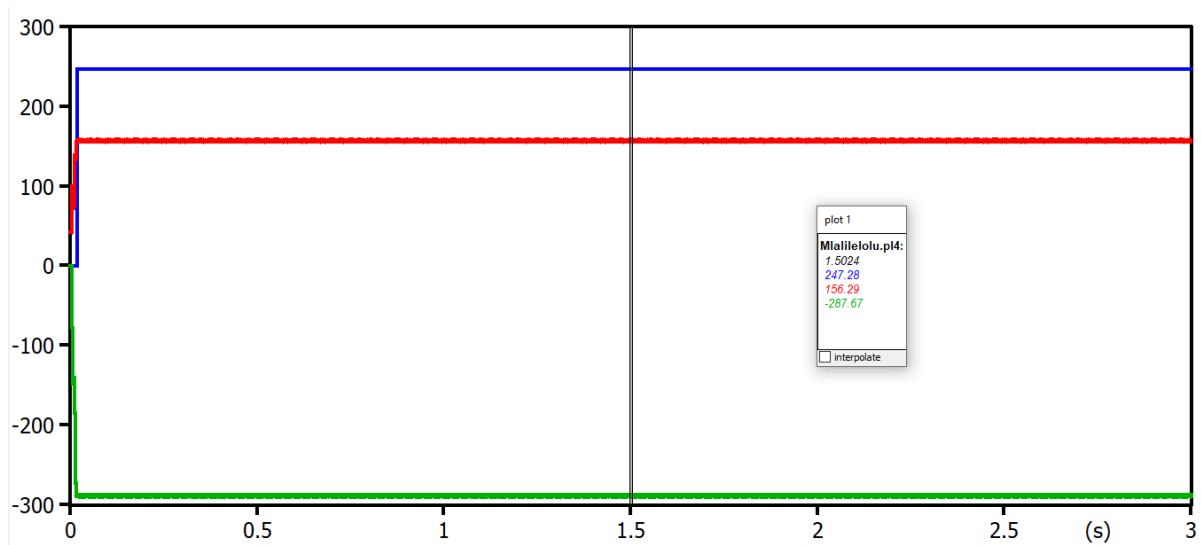
Pela Figura 28 temos que:

$$V_{0\text{ pico}} = 174,935 \text{ kV}$$

$$V_{0\text{ rms}} = 123,69 \text{ kV}$$

Sendo a corrente no ramo 1 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 29- Corrente pré-falta ramo 1 exp 3, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Pelo gráfico da figura 29 vê-se que:

$$I_{1\text{ rms}} = 247,29 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{im}\{\hat{I}_0\}}{\operatorname{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-297,67}{156,29} \right) = -59,72^\circ$$

Assim pela simetria dos ramos todas as correntes têm mesmo perfil

Calculando a impedância pré-falta:

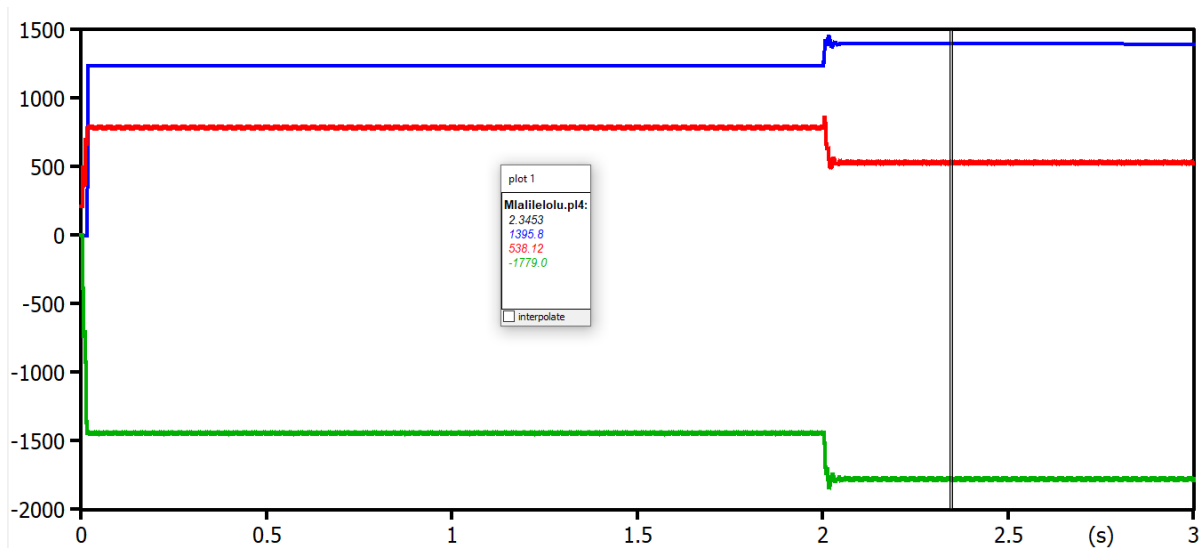
$$|Z_{\text{relay/pré-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{123690 \angle 0^\circ}{1236,4 \angle -61,4^\circ} = 105,98 \angle 61,4^\circ \Omega$$

Após o curto (Estágio pós-falta):

Supondo um estudo de pior caso onde temos um curto-circuito trifásico com impedância de falta de 10Ω em um momento $t=2\text{s}$ aplicado em 50% da linha.

Corrente no ramo I_0 onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 30- Corrente pós-falta ramo 0 exp 3, para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de 10Ω . Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

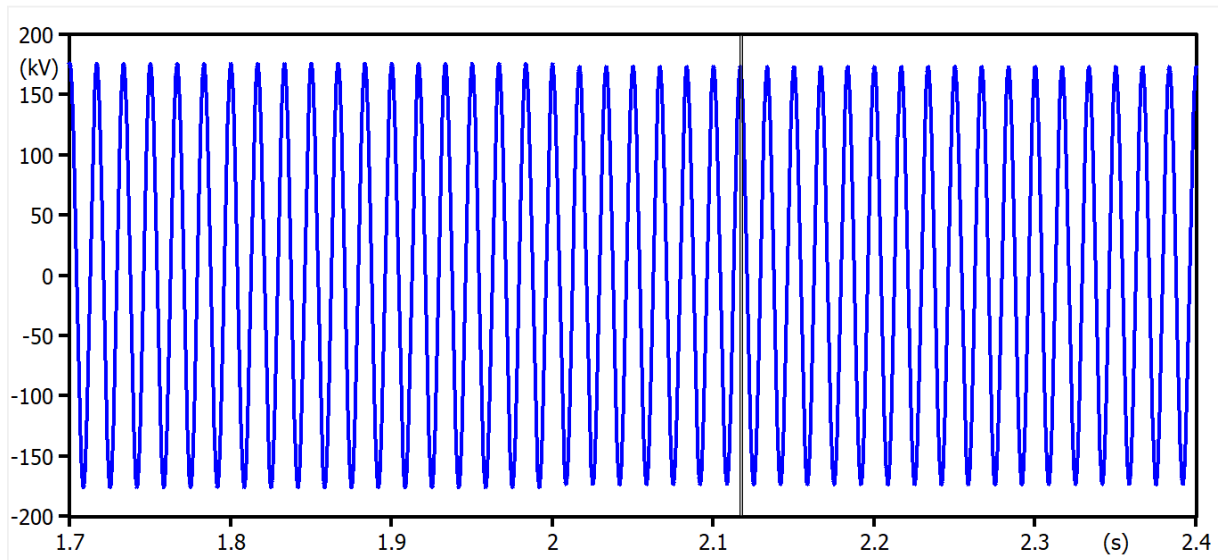
Pelos dados da Figura 30:

$$I_{0\text{ rms}} = 1395,8 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-1779}{538,12} \right) = -73,17^\circ$$

A tensão vista pelo relé no ramo LT0 é tal que:

Figura 31- Tensão pós-falta exp 3no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a.



Fonte: própria do autor

Pela Figura 31 observa-se que:

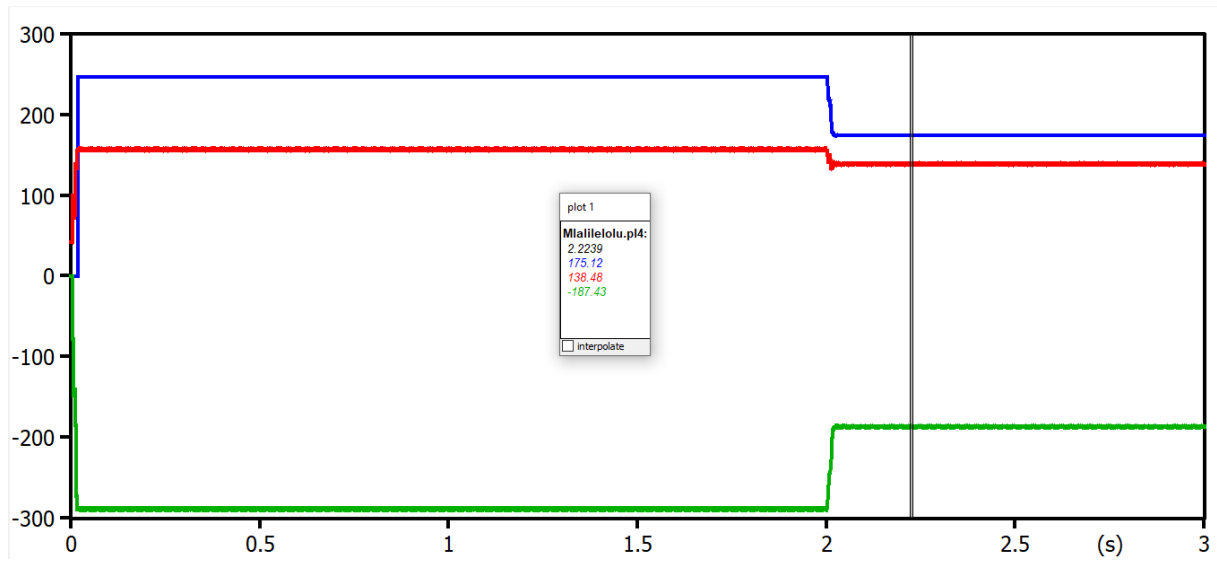
$$V_{0\text{ pico}} = 172,986 \text{ kV} \quad V_{0\text{ rms}} = 122,32 \text{ kV}$$

Impedância pós-falta:

$$|Z_{\text{relay/pós-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{122320 \angle 0^\circ}{1395,8 \angle -73,17^\circ} = 87,634 \angle 73,17^\circ \Omega$$

Plotando a corrente no ramo 1, onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 32- Corrente pós-falta ramo 1 exp 3, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

Pelo gráfico da Figura 32 tem-se:

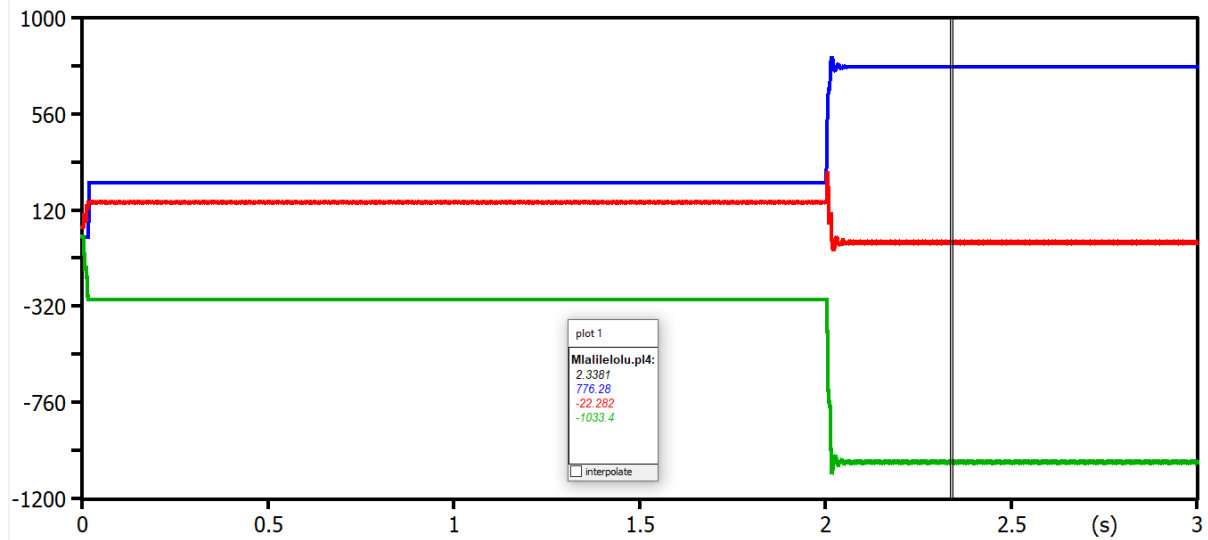
$$I_{1\text{rms}} = 175,12 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-187,43}{138,48} \right) = -53,54^\circ$$

Vê-se que pela simetria esse padrão se repetirá nas linhas 2,3,4

Analisando a corrente no ramo 5, onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 33- Corrente pós-falta ramo 5 exp 3, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Pela Figura 33 vê-se que:

$$I_{5\text{ rms}} = 776,28 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{im}\{\hat{I}_0\}}{\operatorname{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-1033,4}{-22,282} \right) = 88,76^\circ$$

Como o valor rms da corrente no ramo 5 é muito maior que a corrente nos demais ramos é esperado que o curto tenha acontecido nesta parte da linha aplicada inicialmente no software a 50% da linha, fazendo o cálculo do fator de infeed:

$$M = \frac{-(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)}{I_0} = \frac{-4 * 175,12 \angle -53,54^\circ}{1395,8 \angle -73,17^\circ} = 0,5018 \angle -160,4^\circ$$

$$1 + M_{\text{infeed}} = 0,55361 \angle -17,73^\circ$$

Este valor caracteriza-se como sobrealcance. Calculando a posição do ponto de falta:

$$p = \frac{Z_{\text{relé}} - Z_0}{(1 + M) \cdot Z_{\text{linha}}} = \frac{87,634 \angle 73,17^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{(1 + 0,5018 \angle -160,4^\circ) \cdot 114,0873 \angle 82,445^\circ} = \frac{32,6567 \angle 56,82^\circ}{63,1603 \angle 64,71^\circ} = 0,517 \angle -7,89^\circ$$

Fazendo o cálculo desconsiderando-se o efeito de infeed:

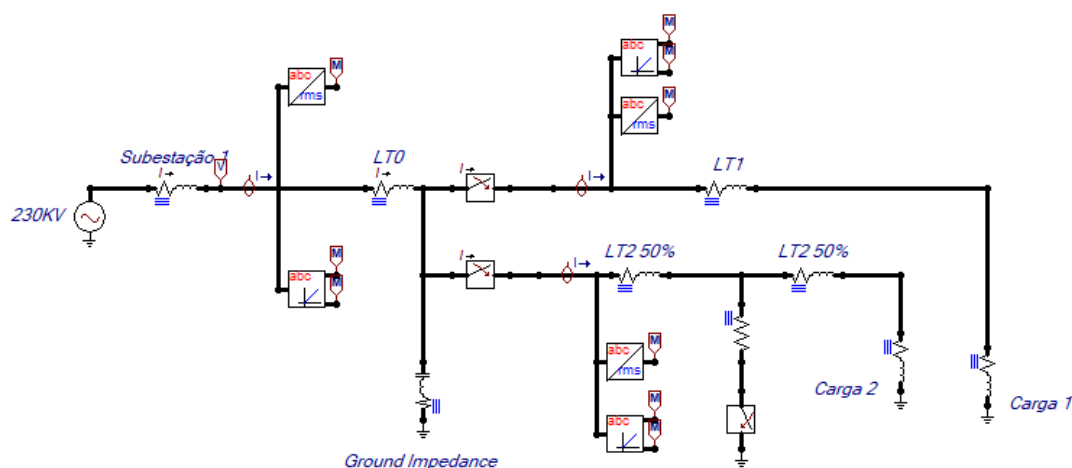
$$p' = \frac{Z_{\text{relé}} - Z_0}{Z_{\text{linha}}} = \frac{87,634 \angle 73,17^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{114,0873 \angle 82,445^\circ} = 0,2862 \angle -25,62^\circ$$

Assim sendo a previsão de ocorrência do curto com o efeito infeed é 51,7% da linha (simulação real a 50% da linha), desconsiderando o efeito temos ocorrência a 28,62% da linha, sobrealcance.

5.5. EFEITO INFEED COM IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

É colocado uma impedância de 30Ω e $150\mu F$ associados em série como um ramo de derivação que pode ter existência real ou virtual divergindo para diferentes modelos e aplicações, é aplicado um curto a 50% da linha de transmissão 2 a ser determinado pelo algoritmo implementado e fazer o estudo desta topologia (Figura 34).

Figura 34- Sistema teste de linha de transmissão com uma derivação e com uma impedância de derivação/shunt

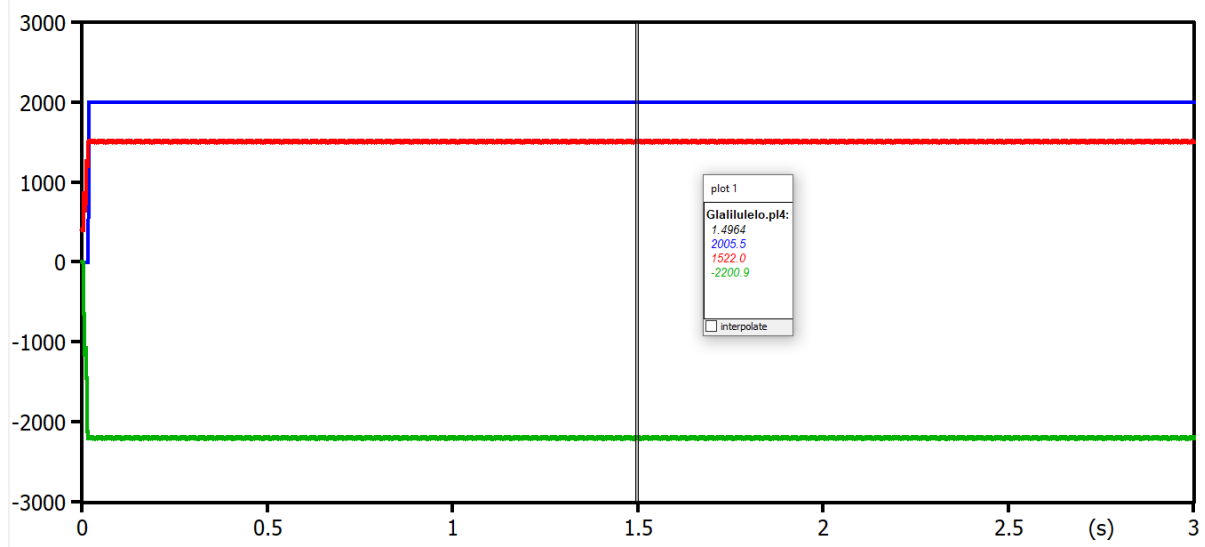


Fonte: própria do autor

Para as condições de pré-falta:

Calculando a corrente no ramo I_0 , onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 35- Corrente pré-falta no ramo 0 exp 4, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

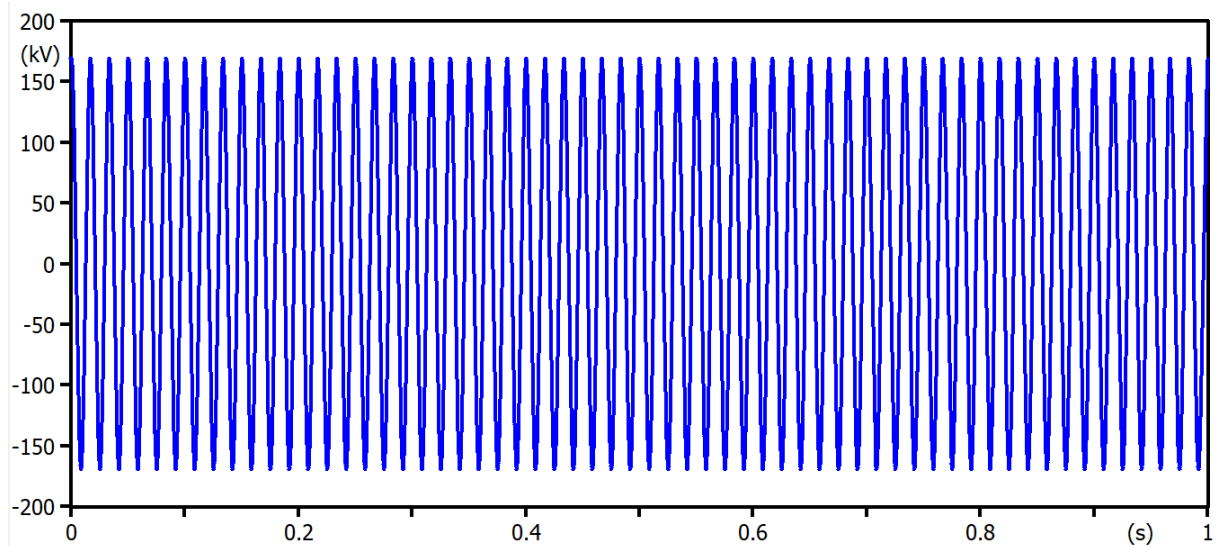
Pela Figura 35 tem-se:

$$I_{0\text{rms}} = 2005,5 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-2200,9}{1522} \right) = -55,33^\circ$$

A tensão vista pelo relé na linha de transmissão LT0:

Figura 36- Tensão pré-falta exp 4no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

Pela figura 36 vê-se que:

$$V_{0\text{ pico}} = 168,358 \text{ kV} \quad V_{0\text{ rms}} = 122,32 \text{ kV}$$

Calculando a impedância pré-falta:

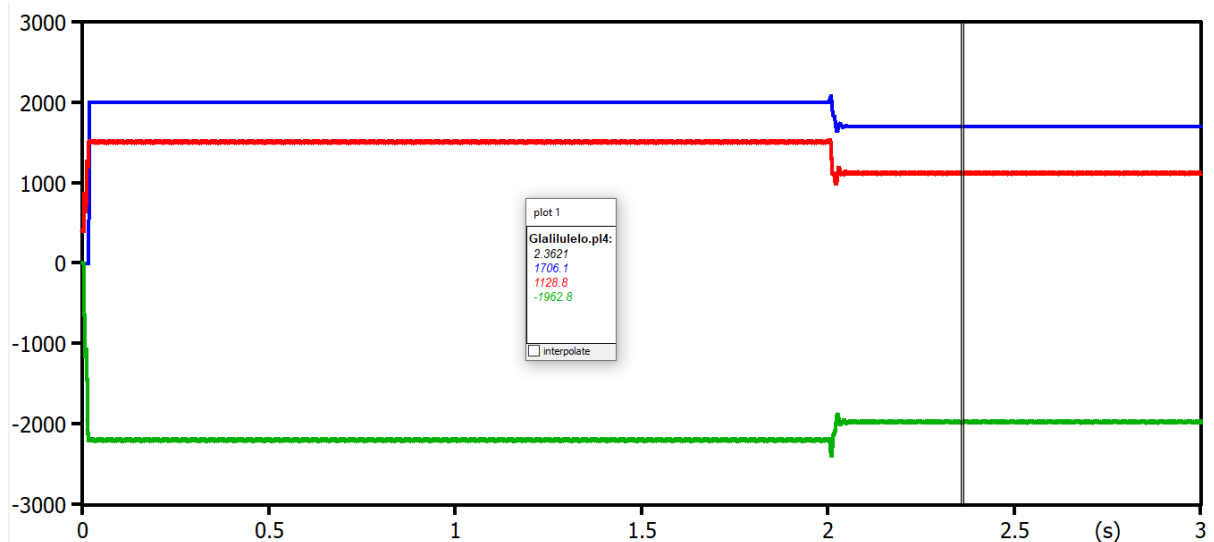
$$|Z_{\text{relay/pré-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{122320 \angle 0^\circ}{2005,5 \angle -55,33^\circ} = 60,992 \angle 55,33^\circ \Omega$$

Para a condição Pós-falta:

Considera-se uma falta acontecendo a 50% da linha feita no software na linha 2 com impedância de falta de 10Ω no instante $t = 2\text{s}$.

Plotando a corrente no ramo, onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde)::

Figura 37- Corrente pós-falta ramo 0 exp 4 para uma falta trifásica aplicada em 2 s, com impedância de falta de 10Ω . Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente



Fonte: própria do autor

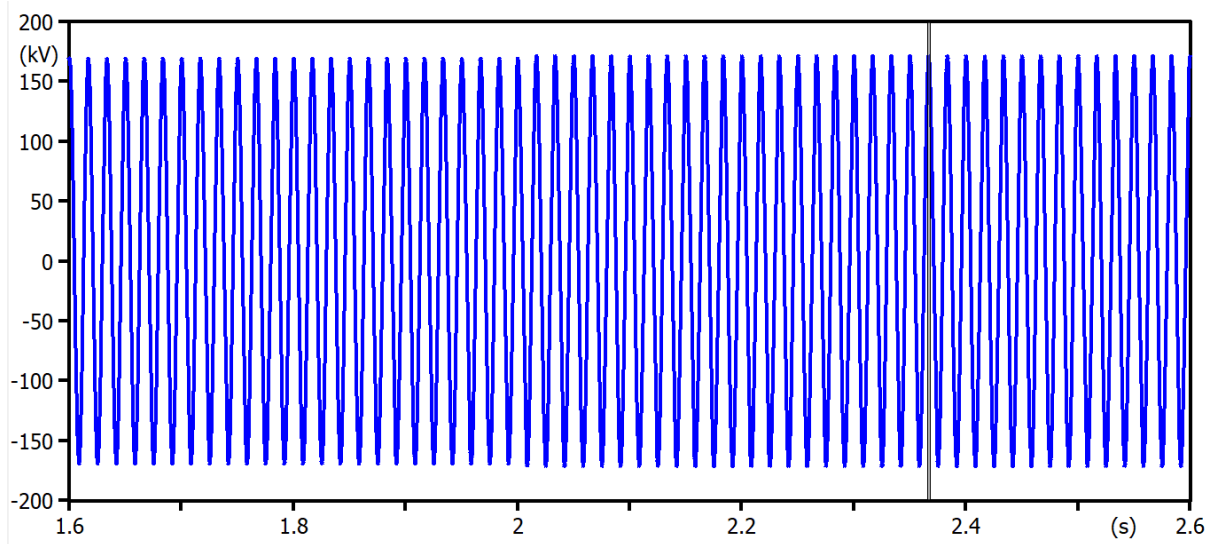
Pela Figura 37 vê-se que:

$$I_{0\text{ rms}} = 1706,1 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-1962,8}{1128,8} \right) = -60,1^\circ$$

Medindo a tensão no relé na linha LT0:

Figura 38- Tensão pós-falta exp 4no terminal transmissor da LT, V_0 , para a fase a



Fonte: própria do autor

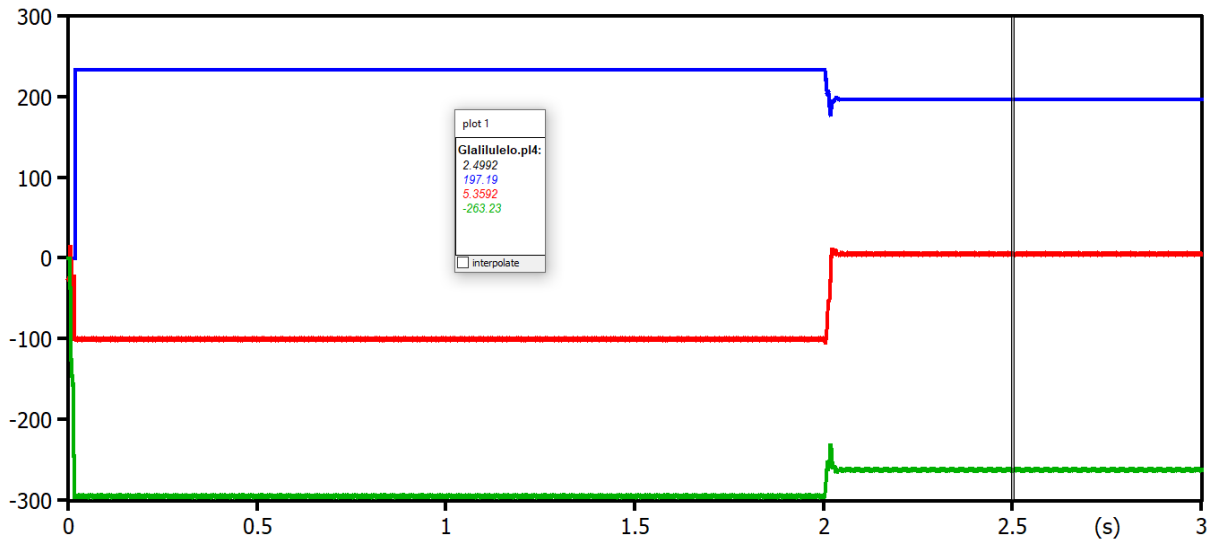
De acordo com o gráfico da Figura 38:

$$V_{0\text{ pico}} = 170,924 \text{ kV} \quad V_{0\text{ rms}} = 120,862 \text{ kV}$$

$$|Z_{\text{relay/pós-falta}}| = \frac{V_{0\text{ rms}}}{I_{0\text{ rms}}} = \frac{120862 \angle 0^\circ}{1706,1 \angle -60,1^\circ} = 70,841 \angle 60,1^\circ \Omega$$

Observando a corrente no ramo 1, onde a corrente média em valor rms (azul), parte real da corrente (vermelho), parte imaginária da corrente (verde):

Figura 39- Corrente pós-falta ramo 1 exp 4, na fase a. Curva azul: valor eficaz; curva vermelha: componente real do fasor da corrente; curva verde: componente imaginária do fasor da corrente.



Fonte: própria do autor

Pelo gráfico da Figura 39:

$$I_{1\text{ rms}} = 197,19 \text{ A}$$

$$\phi_0 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{-263,23}{5,3592} \right) = -88,8^\circ$$

A corrente no ramo 2 é tal que:

$$I_{2\text{ rms}} = 874,065 \text{ A} \quad \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{im}\{\hat{I}_0\}}{\text{re}\{\hat{I}_0\}} \right) = -126,86^\circ$$

Fazendo o cálculo da corrente de terra:

$$I_{\text{ground}} = 1706,1 \angle -60,1^\circ - [874,065 \angle -126,86^\circ + 197,19 \angle -88,8^\circ] = 1489,31 \angle -23^\circ \text{ A}$$

Vê-se que como a corrente no ramo 2 é muito maior que a corrente no ramo 1 o curto provavelmente aconteceu nesta linha. Fazendo o cálculo do fator de infeed:

$$M = \frac{-(I_1 + I_{\text{ground}})}{I_0} = \frac{-(197,19 \angle -88,8^\circ + 1489,31 \angle -23^\circ)}{1706,1 \angle -60,1^\circ} = 0,92633 \angle -149,43^\circ$$

$$1 + M = 0,5127. \angle - 66,75^\circ$$

Observa-se a condição se sobrealcance, calculando agora a posição do curto considerando o infeed:

$$p = \frac{Z_{relé}-Z_0}{(1+M).Z_{linha}} = \frac{70,841 \angle 60,1^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{(1+0,92633 \angle -149,43^\circ).114,0873 \angle 82,445^\circ} = \frac{28,2353 \angle 9,92^\circ}{58,493 \angle 15,7^\circ} = 0,4827. \angle - 5,78^\circ$$

Fazendo agora na condição de desconsiderar o efeito infeed:

$$p' = \frac{Z_{relé}-Z_0}{Z_{linha}} = \frac{70,841 \angle 60,1^\circ - 57,044 \angle 82,445^\circ}{114,0873 \angle 82,445^\circ} = 0,2475. \angle - 72,53^\circ$$

Considerando o efeito infeed a posição do curto prevista foi de 48,27%, enquanto que desconsiderando o efeito a posição do curto foi de 24,75% (posição do curto simulado foi de 50%)

6. Conclusão

Relés de distância e outros dispositivos de proteção constituem o sistema nervoso das redes de transmissão que constantemente averiguam anomalias presentes na rede. Assim, a busca de melhorias que aumentam a precisão de tais dispositivos é um tema presente no nosso cotidiano que depende cada vez mais de aumentar sua confiabilidade com a crescente demanda de energia elétrica.

O efeito infeed origina-se da topologia da rede que fornece corrente que criam desvios da posição real do curto-circuito, observa-se que o modelo teórico representado consegue averiguar com bastante precisão a posição do curto.

O segundo experimento mostra que variações da impedância de falta implementa um erro no sistema, mas como a dimensão da impedância de falta este pode ser considerado desprezível se não for próximo da magnitude da própria linha de transmissão algo de considerável rara ocorrência em sistemas reais.

Foi observado como esperado que o erro da medição aumenta com o aumento do número de ramos amplificando o efeito infeed, o aumento do número de ramos cria mais correntes de infeed que diferem ainda mais de um modelo linear e mudam consideravelmente a impedância equivalente vista do sistema e consequentemente dificultam tanto na correção do efeito e mudam consideravelmente a posição da falta.

A implementação de ramos de derivação sem medição de corrente que pode ser de existência real ou não também pode ser aplicado em modelos mais complexos de sistemas de transmissão e oferece grande importância no efeito infeed e na determinação do ponto de falta.

Os métodos modernos variam de cálculos numéricos iterativos e levam em consideração outros efeitos que não foi levado em consideração. Os resultados experimentais apresentaram valores aceitáveis dentro das condições ao qual foram implementados e pode ser empregado em aplicações práticas reais.

A modelagem é aplicável apenas para circuitos trifásicos, um possível aprimoramento do modelo poderia ser feito conhecendo-se as impedâncias no domínio da sequência do sistema, fazer a medição da corrente rms, real e imaginária nas três fases A,B,C converter os valores pela transformação de Fortescue e utilizar a redução do sistema em impedância equivalentes de Thévenin em função da posição relativa do curto “p” associadas em série e em

seguida usar métodos numéricos para a determinação da variável p , para curtos bifásicos poderia ser dimensionado em função do curto monofásico devido a maior dificuldade na modelagem.

Referências

- [1] Anthony Huang (s.d.). *Relé de Distância: Tipos, Diagramas e Princípios de Funcionamento*. Fonte: PCBasic: https://www.pcbasic.com/pt/blog/distance_relay.html , 24 de novembro de 2025.
- [2] Igoramin. (s.d.). *Relés de Distância: Tipos e Funcionalidades*. Fonte: Scribd: <https://pt.scribd.com/document/425357174/8-Aula-2-2017-PSE-II-un1-Reles-de-Distancia> ,
- [3] K. K. Li, K. David, L.L. Lai(s.d.). Stand Alone Intelligent Digital Distance Relay, 1 de fevereiro de 2000
- [4] K. Trunk, J. Jager, M. Ramold (s.d.). Coordination of Distance Protection Relays on Multiple Parallel Line Corridors.
- [5] Kleber M. Silva, Jéssica S.G. Pena, Mladen Kezunovic, Helon D., Life Fellow (s.d.). An Algorithm to Mitigate the Infeed Effect on Overreaching Distance Zones Settings, 4 de agosto de 2022
- [6] Pawel Regulski, Waldemar Revizant, Matthias Kereit, Sebastian Schneider (s.d.). Adaptive Reach of 3rd Zone of a Distance Relay with Synchronized Measurements, 1 de fevereiro de 2021.
- [7] Saad M.Saad, Naser El Naily, Faisal A Mohamed (s.d.). Investigating The effect of DG Infeed on The Effective Cover of Distance Protection Scheme in Mixed – MV Distribution Network, 8 de julho de 2018
- [8] Saumendra Sarangi, Ashok Kumar Pradhan. (s.d.). Adaptive Direct Underreaching Transfer Trip Protection Scheme for Three-Terminal Line, 6 de dezembro de 2015.
- [9] Y. Q. Xia, A. K. David, K.K.Li (s.d.). HIGH-RESISTANCE FAULTS ON A MULTI-TERMINAL LINE: ANALYSIS, SISIMULATED STUDIES AND AN ADAPTIVE DISTANCE RELAYING SCHEME, 1 de janeiro de 1994.