

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

PAOLA ARAGÃO GUARACY

Análise de Método de Detecção e Localização de Falhas de
Alta Impedância em Sistemas de Distribuição

JUIZ DE FORA

2016

PAOLA ARAGÃO GUARACY

Análise de Método de Detecção e Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Guaracy, Paola Aragão.

Análise de Método de Detecção e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição / Paola Aragão Guaracy. -- 2016.

55 p.

Orientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Localização de faltas. 2. Faltas de alta impedância. 3. Sistema de distribuição. I. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, orient. II. Título.

PAOLA ARAGÃO GUARACY

Análise de Método de Detecção e Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF
Orientadora

Prof. Leandro Ramos de Araujo, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

M.Sc. Fábio Miranda Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Débora pela oportunidade, confiança, atenção e conhecimento que auxiliaram a elaboração desse trabalho.

Agradeço também ao professor Leandro, cuja ajuda e sabedoria contribuíram para o desenvolvimento do projeto.

Aos meus pais, Rodrigo e Mônica, e à minha irmã, Patrícia, pelo amor, dedicação e suporte.

Ao meu namorado, Gustavo, pelo amor, paciência e companheirismo.

A toda a minha família e amigos, que sempre estiveram comigo, apoiando e incentivando.

A todos os professores, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação profissional, acadêmica e também pessoal.

RESUMO

Faltas de alta impedância possuem correntes normalmente pequenas, muitas vezes incapazes de sensibilizar a maioria dos equipamentos de proteção, que são normalmente baseados em sobrecorrentes. Apesar disso, tais faltas são frequentes nos sistemas de distribuição.

Algumas particularidades das redes de distribuição, como desequilíbrios e variação de carga, tornam essa detecção e localização ainda mais difícil.

Assim, o presente trabalho analisa métodos de detecção e localização de faltas de alta impedância nas redes de distribuição, principalmente a metodologia de Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ) (VIANNA, 2016).

A técnica PDSZ calcula a corrente diferencial de sequência zero utilizando medições fasoriais. Em situações de falta de alta impedância dentro da zona diferencial, essa corrente passa a ter um valor não nulo e pode ser detectada.

Simulações em software foram realizadas, a fim de confirmar a eficácia do método PDSZ na detecção e localização de faltas monofásicas de alta impedância em sistemas de distribuição.

ABSTRACT

High impedance faults usually have low value currents, which often are unable to be identified by the majority of protection equipment, since this equipment is usually susceptible to overcurrent. Despite this fact, these faults are frequent in distribution systems.

The detection and localization are challenging due to some particularities of distribution networks, such as imbalances, radiality and load variation.

Hence, this paper analyses methods of detection and localization of high impedance faults in distribution systems, essentially the Zero Sequence Differential Protection (ZSDP) methodology (VIANNA, 2016).

The ZSDP technique calculates the zero sequence differential current by phasor measurements. When a single-phase high impedance fault is occurring inside de differential zone, this current will have a non-zero value and can be detected.

Software simulations were performed in order to confirm the effectiveness of the Zero Sequence Differential Protection method of detection and localization single-phase high impedance faults in distribution systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Circuito simples com uma área de detecção	17
Figura 2. Circuito mais complexo com duas áreas de detecção	18
Figura 3. Comportamento da corrente diferencial de sequência zero	18
Figura 4. Exemplo de sistema de distribuição típico.....	21
Figura 5. Comparação entre o sistema norte americano e o europeu	22
Figura 6. Exemplo de sistema de potência trifásico em sequência de fase	24
Figura 7. Sistema trifásico em componentes simétricas.....	25
Figura 8. Curto-circuito monofásico	26
Figura 9. Curto-circuito bifásico	26
Figura 10. Curto-circuito bifásico-terra.....	27
Figura 11. Curto-circuito trifásico.....	27
Figura 12. Sistema ilustrativo do PDSZ na distribuição, em sequência de fase	29
Figura 13. Sistema ilustrativo do PDSZ na distribuição, em componentes simétricas	29
Figura 14. Sistema de distribuição com ramal bifásico, em sequência de fase.....	31
Figura 15. Erro da corrente diferencial de sequência zero em função do número de medidores e do carregamento do sistema.....	34
Figura 16. Modelo de gerador trifásico ideal	36
Figura 17. Modelo de transformador trifásico.....	36
Figura 18. Exemplo de modelo de carga	36
Figura 19. Modelo de controle de faltas	37
Figura 20. Transformação de coordenadas de fase em componentes simétricas	37
Figura 21. Ferramenta usada no cálculo da componente diferencial	37
Figura 22. Sistema representante da rede de distribuição simulado no PSCAD.....	38
Figura 23. Detalhe da subestação, primeira área de detecção, neutro multiterrado e algumas cargas desequilibradas	39
Figura 24. Áreas de detecção de faltas	40
Figura 25. Localização das faltas na simulação	41
Figura 26. Correntes de fase medidas no medidor 1	43
Figura 27. Correntes de fase medidas no medidor 2	43
Figura 28. Correntes de fase medidas no medidor 3	43
Figura 29. Corrente de falta monofásica	44
Figura 30. Corrente de sequência zero da área em que não há falta.....	44
Figura 31. Corrente de sequência zero da área 2, zona em que ocorre a falta.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cenários de corrente de sequência zero do sistema da Figura 12 (VIANNA, 2016)	32
Tabela 2. Resultados das simulações com uma zona de detecção.....	46
Tabela 3. Resultados das simulações com duas zonas de detecção.....	47
Tabela 4. Resultados das simulações com três zonas de detecção	48
Tabela 5. Resultados das simulações com quatro zonas de detecção.....	49
Tabela 6. Limiar de detecção para uma zona	50
Tabela 7. Limiar de detecção para duas zonas	50
Tabela 8. Limiar de detecção para três zonas.....	50
Tabela 9. Limiar de detecção para quatro zonas	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GD	Geração Distribuída
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
HIF	Falta de Alta Impedância (<i>High Impedance Fault</i>)
PDSZ	Proteção Diferencial de Sequência Zero
PMU	Unidade de Medição Fasorial (<i>Phasor Measurement Unit</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

I_1	Corrente de sequência positiva
I_2	Corrente de sequência negativa
I_0	Corrente de sequência zero
V_1	Tensão de sequência positiva
V_2	Tensão de sequência negativa
V_0	Tensão de sequência zero
V_A	Tensão da fase A
V_B	Tensão de fase B
V_C	Tensão de fase C
I_0^{DIF}	Corrente diferencial de sequência zero
I_0^{Mx}	Corrente de sequência zero medida pelo medidor x
I_{Ff}^{MIN}	Corrente de fase de falta
$\bar{I}_0^{DIF_F}$	Corrente diferencial de sequência zero calculada com medidas fasoriais
$\bar{I}_0^{DIF_NF}$	Corrente diferencial de sequência zero calculada com medidas não fasoriais

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
SUMÁRIO.....	XII
Capítulo 1 - Introdução.....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Objetivo.....	15
1.3 Revisão Bibliográfica	15
Capítulo 2 - Premissas Básicas e Conceitos Iniciais	19
2.1 Introdução.....	19
2.2 Sistemas de Distribuição	19
2.3 Proteção Diferencial de Sequência Zero	23
2.3.1 Componentes Simétricas	23
2.3.2 Medidores Fasoriais	27
2.3.3 Área de detecção	28
2.3.4 Algoritmo de detecção.....	28
Capítulo 3 - Implementação do Método de Detecção de Faltas de Alta Impedância no PSCAD	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 Ferramentas do PSCAD	35
3.3 Sistemas simulados	38
Capítulo 4 - Resultados	42
4.1 Introdução.....	42
4.2 Sistema teste.....	42
4.3 Resultados das simulações.....	45
Capítulo 5 - Conclusões.....	52
Referências Bibliográficas	54

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O sistema elétrico é projetado para operar de maneira adequada durante todo o tempo. Entretanto o sistema está sujeito a condições imprevisíveis, que podem causar falhas em qualquer ponto do sistema. Os principais causadores de faltas na rede elétrica são problemas de isolamento, mecânicos, elétricos, térmicos e de manutenção. Esses problemas ocorrem principalmente devido à qualidade do material dos equipamentos, ao desgaste dos mesmos, a ações da natureza (chuvas, ventos, neve), árvores, descargas atmosféricas, manobras na rede e ações humanas. Esses defeitos podem causar danos em equipamentos caso não sejam extintos rapidamente (KINDERMAN, 1997).

Existem quatro tipos de curtos-circuitos: monofásicos, bifásicos, bifásico-terra e trifásicos. Curtos também podem ser classificados quanto à impedância de falta, podendo ser curtos francos (impedância nula), de baixa, média ou alta impedância. Como a proteção de sistemas elétricos é dependente da corrente de falta e, pela Lei de Ohm, sabe-se que a corrente é inversamente proporcional à impedância, quanto maior a impedância da falta, menor a corrente, e mais difícil de detectar o defeito.

Desse modo, faltas de alta impedância (*High Impedance Fault* - HIF) caracterizam-se por pequenas correntes de falta, até 100 A, incapazes de sensibilizar o sistema de proteção tradicional. Por outro lado, faltas de baixa impedância possuem corrente de falta alta, o que as torna fáceis de serem detectadas pelo sistema de proteção.

No sistema de distribuição, faltas de alta impedância ocorrem quando o condutor primário entra em contato com superfícies de alto valor resistivo, como solo, árvores e estruturas metálicas. O rompimento de cabos é um exemplo de HIF comum nas redes de distribuição. Esse problema gera, além da interrupção no fornecimento de energia, riscos à população, uma vez que pessoas podem entrar em contato com partes energizadas do sistema.

Desse modo, o desenvolvimento de metodologias capazes de identificar e localizar esse tipo de defeito é relevante para o sistema.

As principais técnicas de detecção e localização de HIF em sistemas de distribuição baseiam-se em medições de parâmetros elétricos nas subestações, utilização de transformada de Wavelet e redes neurais artificiais.

O método mais utilizado para localização de faltas em sistemas de distribuição é a medição na subestação. O local de ocorrência da falta está relacionado à impedância aparente do sistema, que pode ser estimada pelos dados de tensão e corrente medidos na subestação. Tal método pode ser combinado com outras técnicas como algoritmo de Diferença Par (semelhante à proteção diferencial), Transformada de Fourier, comparação de magnitudes de sinais, medições fasoriais, análises de circuitos elétricos, etc. A principal vantagem dessas metodologias é que elas localizam faltas utilizando equipamentos já existentes no sistema (medidores das subestações), ou seja, possuem baixo custo de implantação. Entretanto, a precisão da localização pode deixar a desejar, uma vez que vários pontos do sistema podem possuir impedâncias aparentes próximas (FARIAS, 2014).

As ondas viajantes são sinais que se propagam do ponto onde ocorreu a falta até a carga e a fonte. Assim, essas ondas carregam informações da localização do defeito, que podem ser a frequência dos sinais transitórios ou o tempo de chegada desses sinais. Apesar de ser uma metodologia eficiente para localizar falhas, exige altas taxas de amostragem e é sensível a reflexões causadas pelos ramos laterais dos sistemas de distribuição. Os principais algoritmos dessa metodologia utilizam Transformada de Wavelet Contínua e Discreta e Transformada de Clark (FARIAS, 2014).

As redes neurais artificiais são um modelo matemático que realizam o reconhecimento de padrões de defeitos através de treinamento. Desse modo, elas conseguem identificar relações complexas entre variáveis e podem ser treinadas pela operação dos sistemas de distribuição. Essa técnica é muito usada em sistemas que possuem geração distribuída e os dados analisados pelo algoritmo podem ser informações de tensão e corrente medidos no sistema (FARIAS, 2014).

Cada método possui vantagens e desvantagens, e sendo o tema de grande importância, métodos para detecção e localização de falhas de na distribuição se mostram de grande importante para pesquisa.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é estudar métodos de detecção e localização de faltas de alta impedância nas redes de distribuição, com ênfase na metodologia de Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ), desenvolvida por VIANNA (2016), que será analisada.

Será feita uma revisão bibliográfica sobre os métodos mais usados, em seguida serão apresentadas características do sistema de distribuição e suas peculiaridades, depois o PDSZ será apresentado, e finalmente, serão feitas simulações.

1.3 Revisão Bibliográfica

Metodologias de detecção e localização de faltas de alta impedância em sistemas de transmissão são largamente usados atualmente. Já métodos para sistemas de distribuição vêm sendo desenvolvidos recentemente. Entre eles destaca-se principalmente a utilização de transformada de Wavelet e redes neurais artificiais.

Primeiramente, é preciso modelar o sistema de distribuição. A metodologia desenvolvida por ARAUJO et al. (2013) calcula o fluxo de potência ótimo de sistemas utilizando uma modelagem trifásica. A técnica proposta modela os componentes do sistema por meio do método de injeções de correntes trifásicas em coordenadas retangulares e realiza a otimização através do método primal-dual de pontos interiores. Através de uma modelagem mais completa do sistema, mostra-se a importância de considerar assimetrias, desequilíbrios, indutâncias mútuas e ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos dos sistemas, uma vez que os resultados das análises mais detalhadas diferenciam em até 20% dos resultados de métodos mais simplificados.

Uma metodologia para detecção de faltas monofásicas de impedância superior a 15 k Ω em sistemas de distribuição radial é proposto por ZAMORA et al. (2007). A detecção é realizada pela superposição de um sinal de tensão cuja frequência deve ser diferente da frequência de operação normal do sistema, usualmente 50 ou 60 Hz. Assim, identifica-se o alimentador, a fase da falta e uma aproximação da resistência da mesma. A eficiência do

método foi comprovada por uma simulação usando o modelo de um sistema de distribuição real.

As redes neurais artificiais são largamente utilizadas na detecção e localização de faltas de alta impedância. O método apresentado por FANUCCHI et al. (2013) utiliza redes neurais artificiais do tipo Perceptron Multicamada e Rede de Função de Base Radial para diferenciar HIF de outros estados do sistema, com base em distorções harmônicas. O método se mostrou eficiente para distinguir faltas de alta impedância de chaveamento de bancos de capacitores e energização de transformadores, que são estados de operação normal do sistema e, por isso, métodos de proteção não devem atuar nesses casos.

A localização do defeito também pode ser identificada pelo método de Wavelet. A metodologia desenvolvida por BAKAR et al. (2014) utiliza o método de ondas viajantes para detectar e localizar HIF em sistemas subterrâneos com eficiência e precisão, independente do tipo de falta. Para isso, são necessários apenas os dados de tensão e corrente trifásica da subestação principal. O método compara os coeficientes da transformada discreta de Wavelet do sinal de tensão medido com os de uma base de dados que possui os coeficientes de exemplos de HIF em diferentes localizações previamente testadas no sistema. A localização do defeito é realizada pela média dessa diferença, ou seja, a falta se localiza próxima ao exemplo em que as diferenças entre os coeficientes possuam o menor valor.

Um método analítico de localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição baseado nas leis de Kirchhoff para o domínio do tempo é proposto por IURINIC (2016). A metodologia estima os parâmetros do defeito e a localização da falta através do método de estimação por mínimos quadrados, usando como base dados de tensão e corrente em um terminal do sistema elétrico. A capacitância das linhas pode ou não ser considerada. O método não foi muito satisfatório na localização da falta, mas foi eficiente na detecção das mesmas. Como geralmente sistemas de distribuição possuem medições apenas na subestação, a metodologia apresentada pode ser aplicada em sistemas reais.

A técnica proposta por REN (2014) utiliza medições fasoriais de medidores instalados nos terminais do sistema de distribuição. Para localizar a falta, o algoritmo realiza iterações, calculando a tensão em cada barra pela tensão medida em cada sincrofasor, através de circuitos equivalentes de Thevenin. Em seguida, compara as tensões estimadas pelas medidas dos dois medidores. Caso o resultado seja menor do que um limite preestabelecido, a falta está localizada naquela barra. Esse método foi testado em um sistema real e mostrou-se

eficiente para detectar defeitos nos sistemas de distribuição. No entanto, é necessária uma rede de comunicação apropriada para que a localização seja realizada em tempo real.

O método de Proteção Diferencial de Sequência Zero, desenvolvido por VIANNA (2016), utiliza medições fasoriais para calcular a corrente diferencial de sequência zero. Em situações de operação normal do sistema, é esperado que o valor dessa corrente seja nulo. Caso contrário, há uma falta de alta impedância dentro da zona de detecção do sistema. A técnica se mostrou eficiente nas simulações realizadas em laboratório.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram simulações realizadas por VIANNA (2016) e refeitas usando o software PSCAD. A primeira mostra um exemplo mais simples, com apenas uma área de detecção e sem ramos bifásicos. Já a segunda esboça um sistema mais complexo, com duas áreas de detecção e ramos bifásicos e monofásicos. A terceira mostra como a corrente diferencial de sequência zero, usada na metodologia para detectar faltas, se comporta na ausência e presença de faltas de alta impedância dentro das zonas definidas. A falta foi aplicada entre 0,2 e 0,4 segundos.

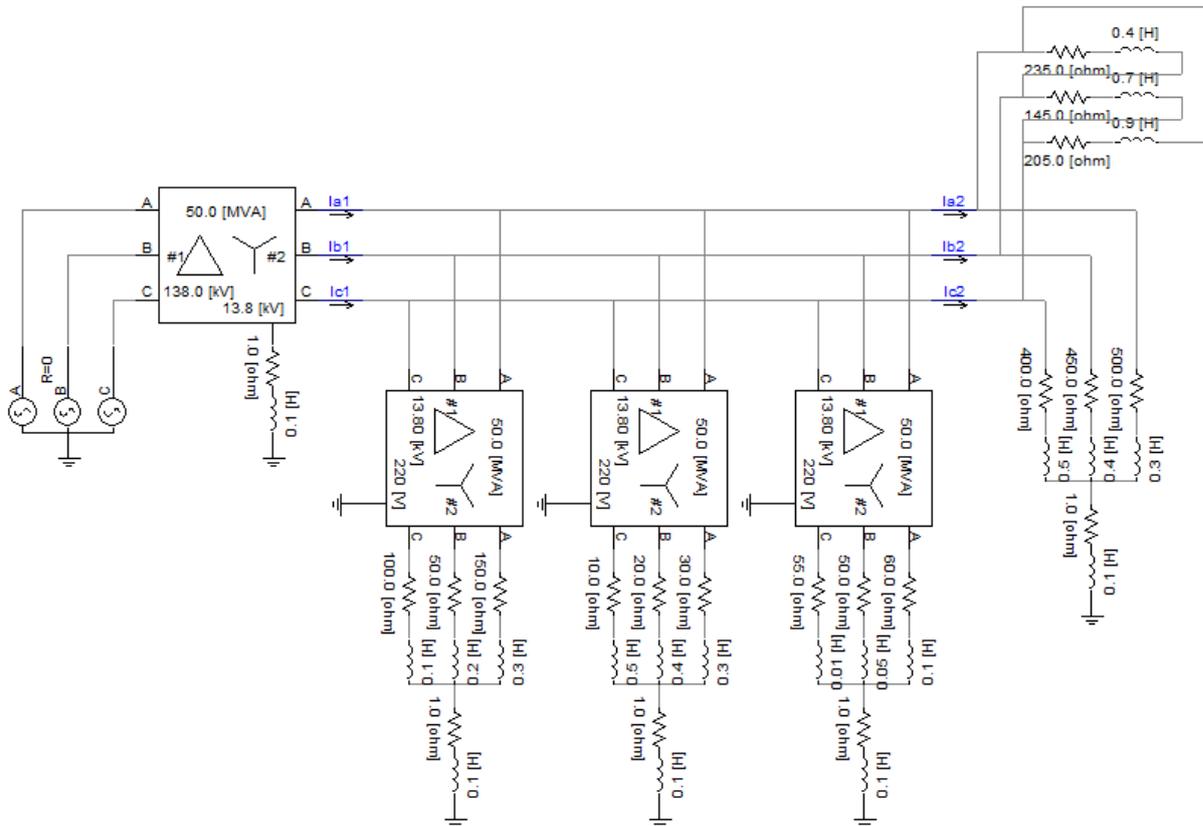


Figura 1. Circuito simples com uma área de detecção

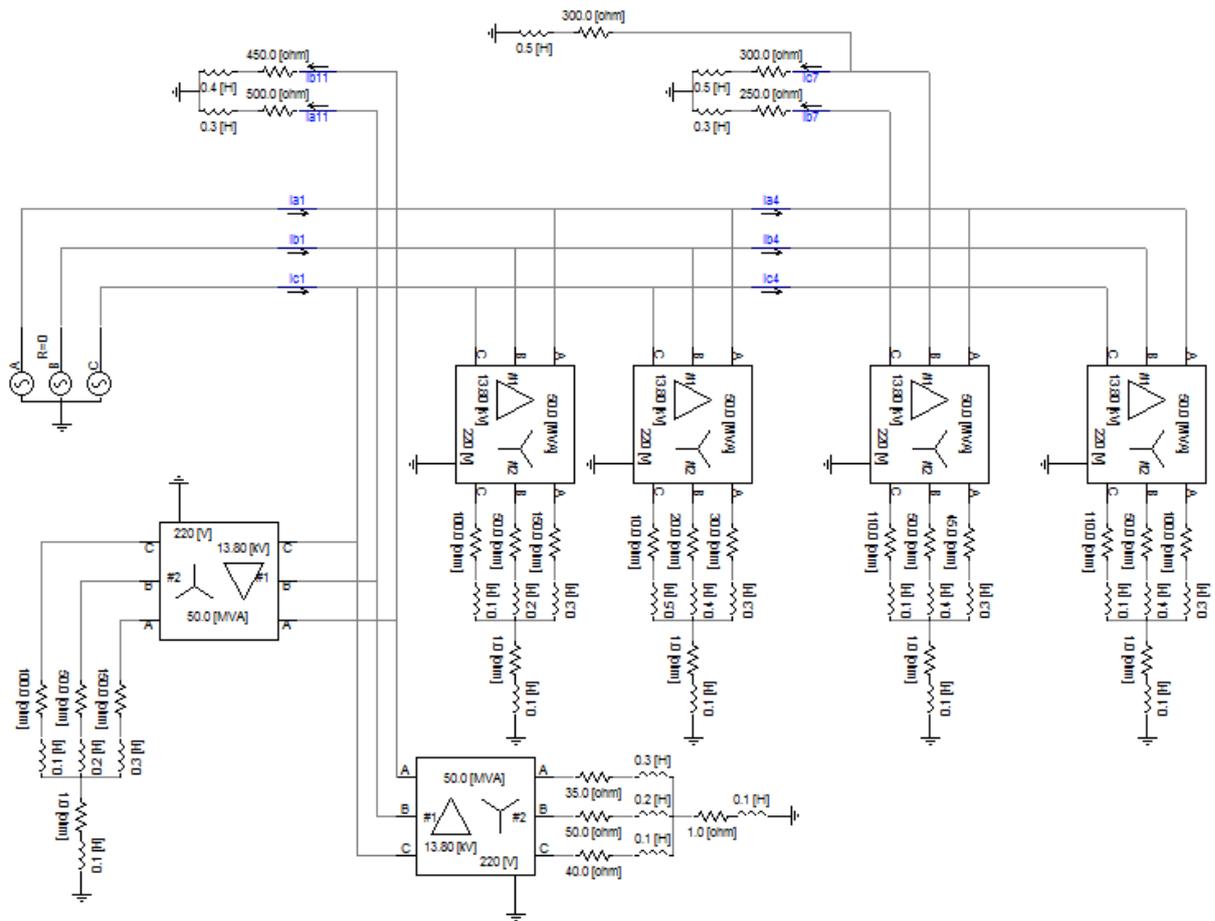


Figura 2. Circuito mais complexo com duas áreas de detecção

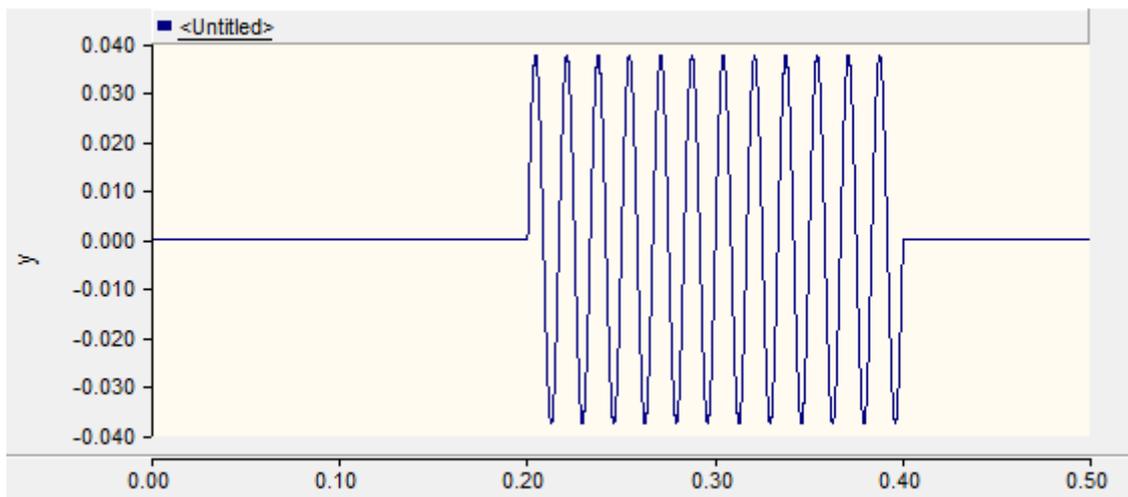


Figura 3. Comportamento da corrente diferencial de sequência zero

Estas figuras apenas ilustram o método PDSZ, maiores análises sobre ele são objeto desse trabalho e serão apresentadas adiante.

Capítulo 2

Premissas Básicas e Conceitos Iniciais

2.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentadas características dos sistemas de distribuição, segundo desequilíbrio de cargas, topologia de redes, etc. Uma revisão de componentes simétricas será realizada. Posteriormente será apresentado o método Proteção Diferencial de Sequência Zero (VIANNA, 2016).

2.2 Sistemas de Distribuição

Os sistemas de distribuição têm como objetivo levar energia até consumidores residenciais, comerciais e industriais. A rede de distribuição é a parte “final” do sistema elétrico de potência. Ela recebe a energia elétrica da rede de transmissão e a transporta aos consumidores finais. Esse sistema possui alimentadores primários e secundários.

Os alimentadores primários são circuitos de média tensão, normalmente em 13,8 kV. Também chamados de rede de média tensão, atendem consumidores primários e levam energia aos transformadores abaixadores, que transferem energia para os alimentadores secundários. O alimentador conectado à subestação é chamado de alimentador principal.

Os alimentadores secundários, ou rede de baixa tensão, são circuitos de tensão em 220/127 V ou 380/220 V. O objetivo dessa rede é transportar energia à maioria dos consumidores, atendendo assim à grande parte da carga.

O sistema de distribuição é desequilibrado, pois atende a inúmeros consumidores com diferentes tipos de cargas: residencial, comercial e industrial. As principais cargas residenciais são chuveiro e eletrodomésticos. As comerciais atendem em sua maioria iluminação e ar condicionado. Nas industriais há um predomínio de motores de indução. Além disso, a carga varia bastante ao longo do dia, uma vez que indústrias funcionam durante o dia, residências consomem mais no período da noite e durante a madrugada pouca energia é gasta. O atendimento à iluminação pública também depende da concessionária de distribuição.

As redes de distribuição podem ser aéreas ou subterrâneas. Por serem economicamente mais viáveis, as redes aéreas são mais usadas. Entretanto, as subterrâneas são usualmente empregadas em grandes centros de carga. Quanto à localidade, ela pode ser urbana ou rural.

De acordo com a topologia, as redes de distribuição podem ser radiais ou malhadas. Os sistemas radiais são largamente empregados, devido ao menor custo, menores correntes de falta e a facilidade de operação, proteção e controle do sistema. Por outro lado, sistemas malhados, ou em anel, são aplicados em regiões onde o sistema deve possuir maior confiabilidade e em grandes concentrações de carga (SHORT, 2004).

Alguns recursos, como chaves normalmente abertas ou fechadas, aumentam a confiabilidade dos sistemas de distribuição, uma vez que oferecem possibilidades de manobras em casos de defeito. Como o lucro das concessionárias depende da energia consumida, esses recursos são utilizados para diminuir o tempo de interrupção, aumentando assim a energia consumida, além de diminuir o preço de multas por descontinuidade no abastecimento de energia (VIANNA, 2016).

A Figura 4 ilustra um sistema de distribuição radial típico. Na parte superior da figura encontra-se a subestação abaixadora, que recebe a energia do sistema de transmissão e a transporta para o sistema de distribuição. Da subestação sai o alimentador principal, que é conectado a ramos laterais monofásicos e trifásicos através de fusíveis, para aumentar a confiabilidade do sistema. O religador, equipamento de proteção usado na distribuição para detectar defeitos, também é representado na figura. A rede de baixa tensão não está ilustrada, mas é a continuidade do sistema, depois dos transformadores abaixadores.

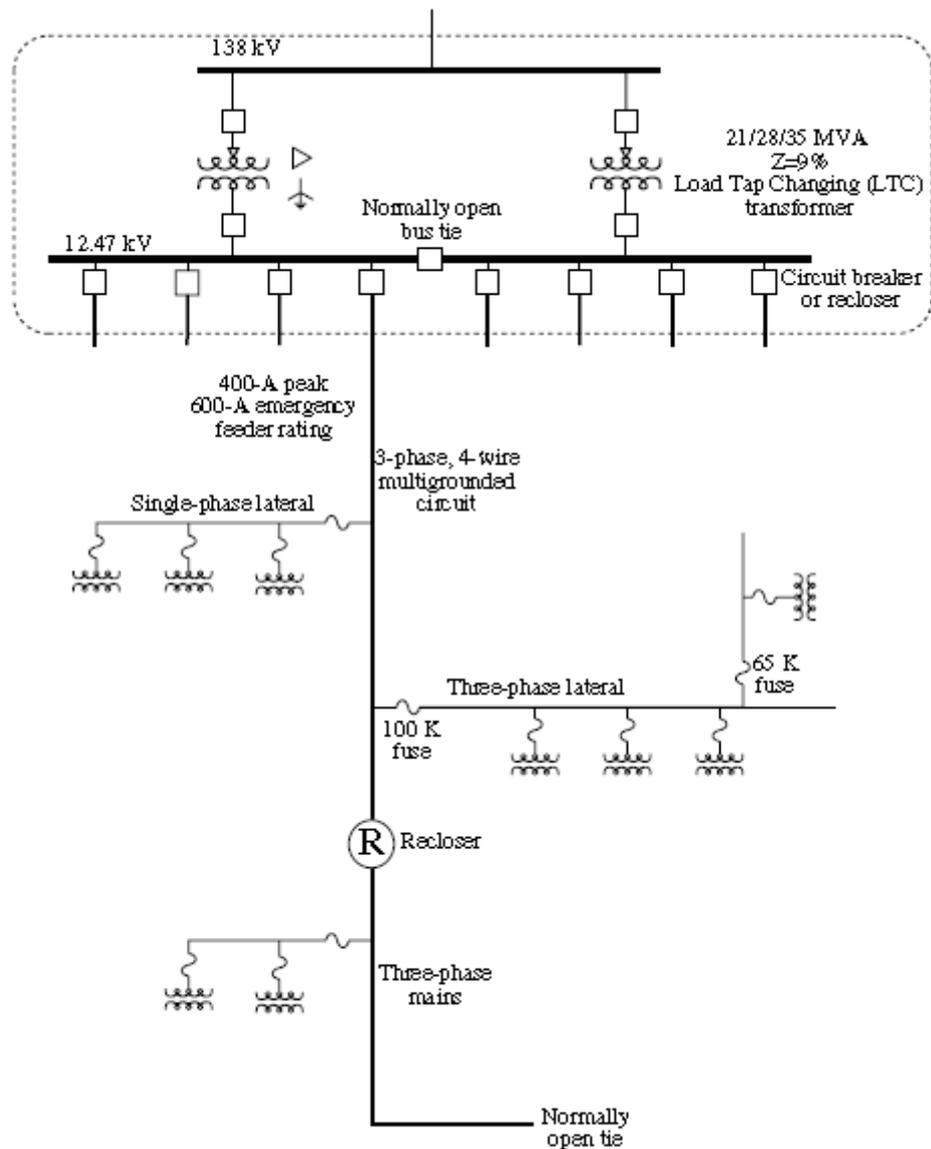


Figura 4. Exemplo de sistema de distribuição típico

Fonte: (SHORT, 2004)

Existem diversos tipos de sistemas de distribuição, mas os dois principais são o sistema norte americano e o europeu. Uma comparação entre esses sistemas é ilustrada na Figura 5.

A rede primária do sistema europeu é trifásica a três condutores, aterrada em apenas um ponto da subestação. Já a norte americana é trifásica a quatro fios com neutro multiaterrado (SHORT, 2004).

A rede secundária do sistema norte americano é monofásica em sua maioria, menor em comprimento e possui tensão 120/410 V, enquanto a do europeu é trifásica, mais longa e a tensão varia de 220 V a 480 V (SHORT, 2004).

O sistema europeu possui mais consumidores por transformador, necessitando assim de transformadores de maior capacidade. Nesse sistema, os transformadores são conectados em Δ -Y aterrado (SHORT, 2004).

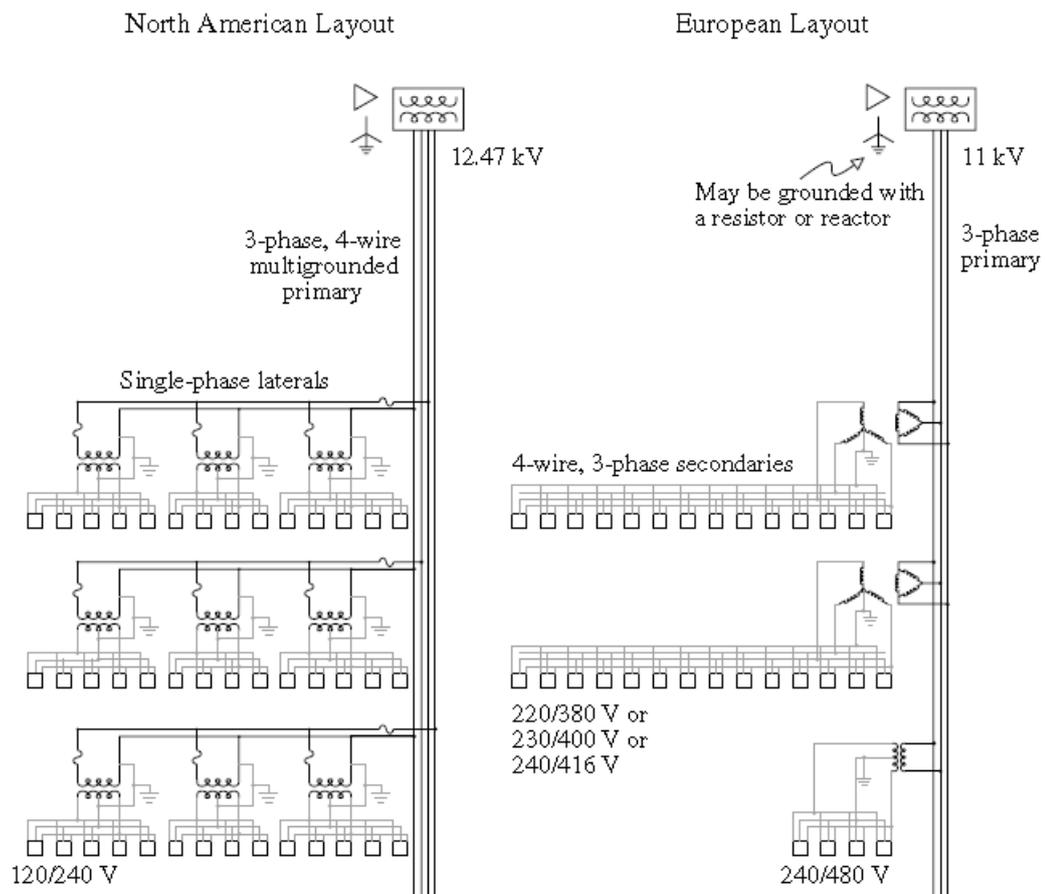


Figura 5. Comparação entre o sistema norte americano e o europeu

Fonte: (SHORT, 2004)

O sistema de distribuição brasileiro é semelhante ao europeu. Contudo, o sistema de baixa tensão brasileiro possui neutro multiterrestros em todos os transformadores abaixadores. Com essa topologia, em operação normal, descontando cargas conectadas diretamente na rede primária, não há corrente de sequência zero na média tensão (VIANNA, 2016).

Atualmente vem crescendo a participação de geração distribuída (GD) na rede de distribuição e espera-se que esse crescimento aumente em um futuro próximo. Geração

distribuída (GD) são pontos de geração independentes, por exemplo, geração fotovoltaica, realizada pelos próprios consumidores dos sistemas de distribuição. Dessa forma, essa contribuição de corrente é realizada em sentido contrário ao fluxo de potência normal do sistema, que é da subestação para o consumidor, e por isso deve ser estudada em detalhes. Além disso, gerações fotovoltaicas são usualmente monofásicas, ou seja, injetam potência na rede através de um ramo monofásico. Sendo assim, para estudar os efeitos dessa geração em sistemas de distribuição, é importante realizar a modelagem trifásica do sistema (ARAÚJO et al., 2015). A geração distribuída implica em diferenças no comportamento do sistema em casos de defeitos, por isso é apenas indicada neste trabalho, não sendo analisada.

2.3 Proteção Diferencial de Sequência Zero

Nessa sessão é apresentado o método de Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ), proposto por VIANNA (2016), que utiliza medidas fasoriais de sequência zero para identificar e localizar faltas de alta impedância no sistema de distribuição.

2.3.1 Componentes Simétricas

A decomposição de um sistema trifásico em componentes simétricas é largamente utilizada nas análises de circuitos elétricos, principalmente nos estudos de curtos-circuitos. Criada por FORTESCUE (1918) transforma as fases A, B e C em três sistemas trifásicos simétricos: sequência positiva, negativa e zero. Desse modo, um sistema trifásico desequilibrado pode ser analisado como três sistemas monofásicos.

A sequência positiva é um conjunto de três fasores balanceados, cujo ângulo é o mesmo da sequência de fase do sistema desbalanceado original. Já a sequência negativa é o conjunto de três fasores balanceados cujo ângulo é o oposto da sequência de fase do sistema original. A sequência zero possui três fasores em fase.

A transformação de componentes simétricas em coordenadas de fase para tensões é realizada pela equação (1) e a transformação inversa é dada por (2). Equações semelhantes são usadas para corrente.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde $\alpha = 1 \angle 120^\circ$.

Cada sequência de componente simétrica possui um significado. A sequência positiva, simbolizada pelo número 1, representa a fração balanceada do sistema trifásico desbalanceado. A sequência negativa, cujo índice é 2, reproduz a parte desbalanceada do sistema. Por fim, a sequência zero, de símbolo 0, corresponde à ligação à terra do sistema, ou seja, intensamente relacionada ao aterramento do mesmo.

As Figuras 6 e 7 exemplificam a decomposição de um sistema de potência trifásico em suas três componentes simétricas. A Figura 6 mostra o circuito trifásico em sequência de fase e a Figura 7 apresenta a decomposição do sistema em componentes simétricas.

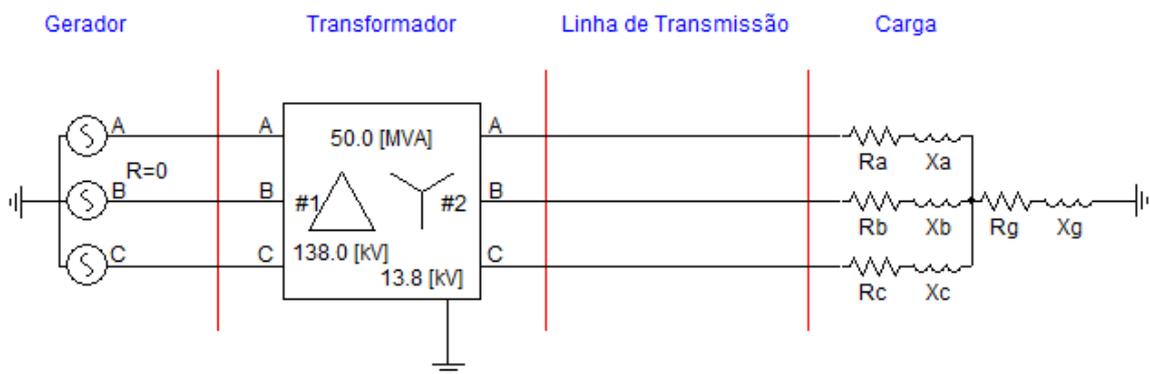


Figura 6. Exemplo de sistema de potência trifásico em sequência de fase

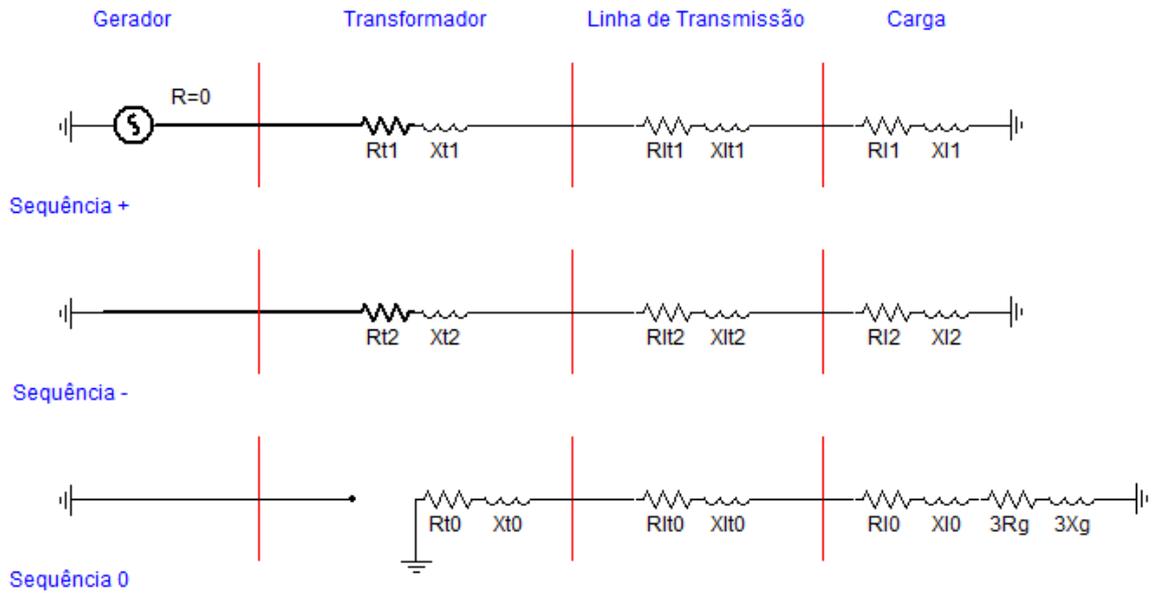


Figura 7. Sistema trifásico em componentes simétricas

Para a análise de curtos-circuitos, cada tipo de curto possui uma configuração usando componentes simétricas (KINDERMANN, 1997). Curtos monofásicos, que são os que serão estudados no presente trabalho, são representados pelos circuitos das três componentes simétricas em série (Figura 8), para o sistema anteriormente mostrado. Curtos bifásicos são determinados pela seqüência positiva e negativa em série (Figura 9). Já curtos bifásicos-terra são representados pelas três seqüências em paralelo (Figura 10). Enfim, o curto circuito trifásico é caracterizado por um curto na seqüência positiva (Figura 11). Para outros arranjos de sistemas, configurações semelhantes podem ser montadas.

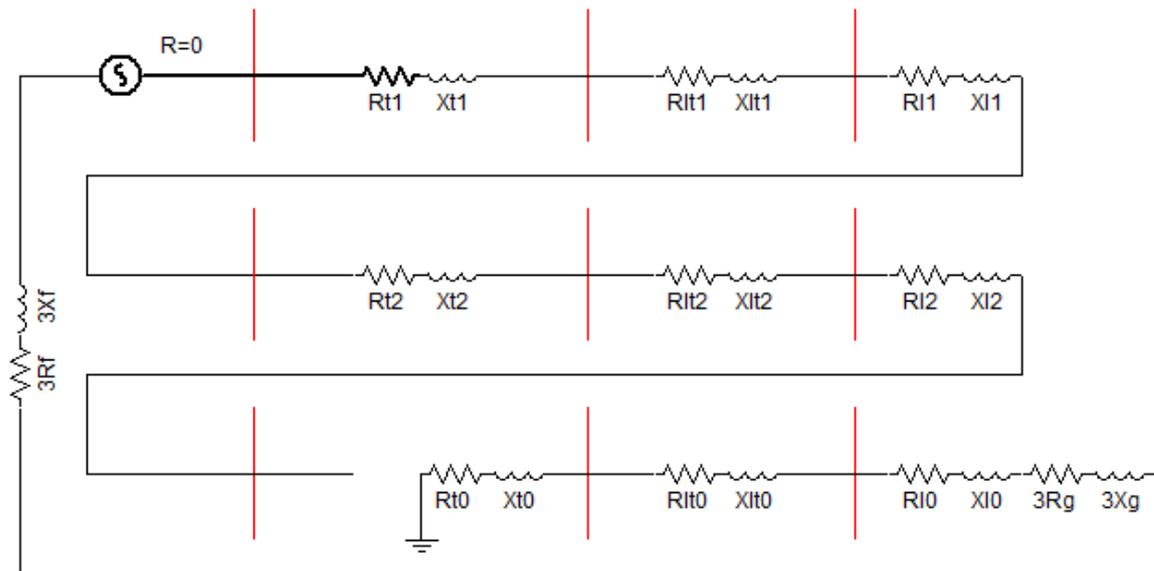


Figura 8. Curto-circuito monofásico

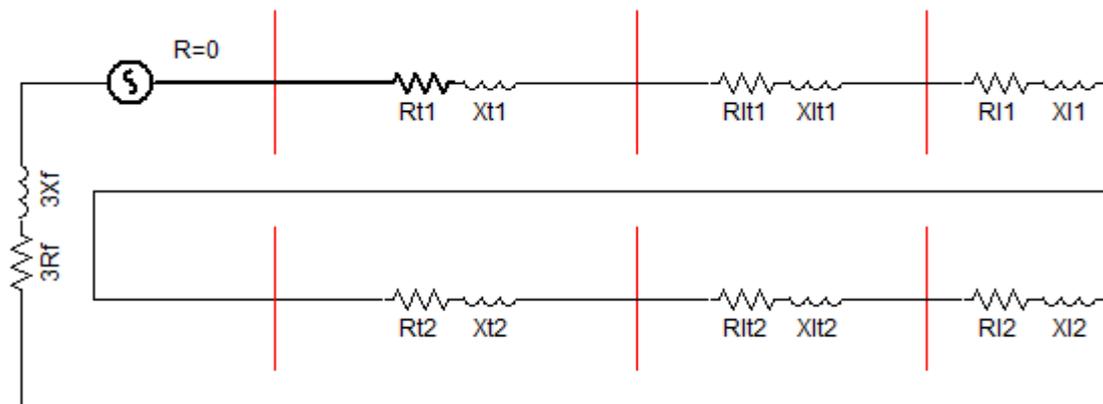


Figura 9. Curto-circuito bifásico

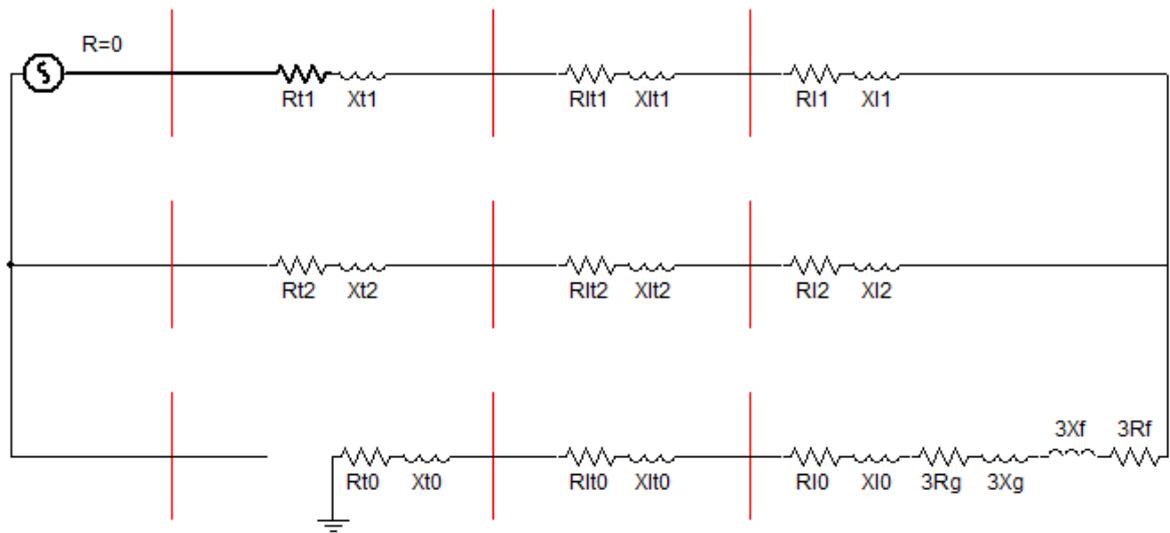


Figura 10. Curto-circuito bifásico-terra

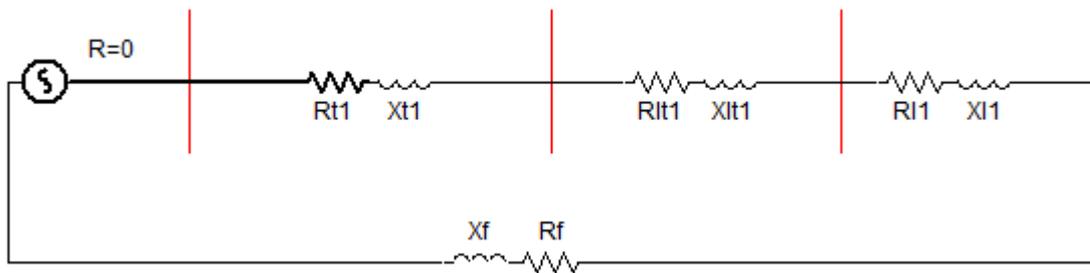


Figura 11. Curto-circuito trifásico

2.3.2 Medidores Fasoriais

Uma tecnologia que realiza as medições fasoriais são os sincrofasores, cujo modelo mais apreciados atualmente no sistema de distribuição é o PMU (*Phasor Measurement Unit*). A principal característica dos sincrofasores é medir grandezas elétricas com indicação de tempo, ou seja, medir módulo e ângulo, permitindo assim uma informação dinâmica do sistema.

Cada PMU possui uma taxa de amostragem para aquisição de dados, cujo valor depende da aplicação desejada, e deve estar conectado a um receptor de sinal de GPS (MARINI, 2005).

Desse modo, o modelo proposto por VIANNA (2016) considera que o sistema de distribuição possua medidores fasoriais alocados em diferentes pontos da sua rede, além de uma rede de comunicação, um sistema de sincronização temporal e uma central concentradora de dados. Entretanto, atualmente, as redes distribuição possuem medidores apenas nas subestações e nos religadores. Nesse sentido, o método é mais apropriado para utilizações futuras.

2.3.3 Área de detecção

As áreas de detecção de faltas no método proposto por VIANNA (2016) são chamadas de regiões diferenciais. Tais regiões encontram-se no circuito primário (média tensão) entre dois medidores fasoriais. Caso existam ramais monofásicos ou bifásicos conectados ao circuito primário, deve ser instalado um medidor em cada ramal.

2.3.4 Algoritmo de detecção

O método proposto por VIANNA (2016), batizado de Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ), baseia-se na proteção diferencial – código ANSI 87 (ANSI; IEEE, 2008), para detectar e localizar faltas monofásicas de alta impedância. Em situações normais, espera-se que o resultado da diferencial de corrente seja zero. Resultados diferentes de zero indicam contato indesejado no equipamento.

A Figura 12 e a Figura 13 mostram um sistema estudado por VIANNA (2016), em sequência de fase e em componentes simétricas, respectivamente. As faltas consideradas no sistema serão aplicadas nos pontos F1, F2 e F3.

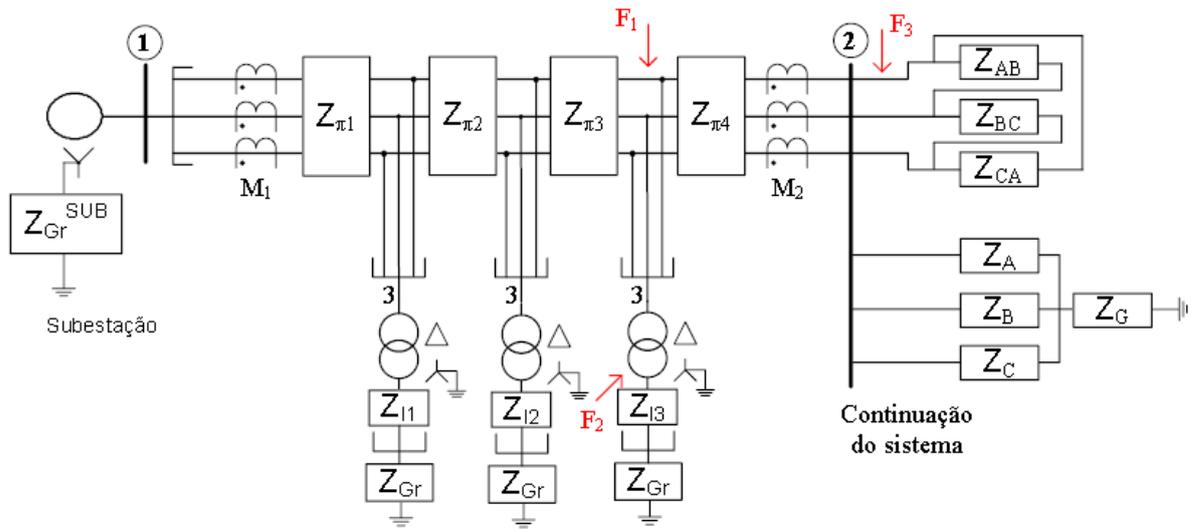


Figura 12. Sistema ilustrativo do PDSZ na distribuição, em sequência de fase

Fonte: (VIANNA, 2016)

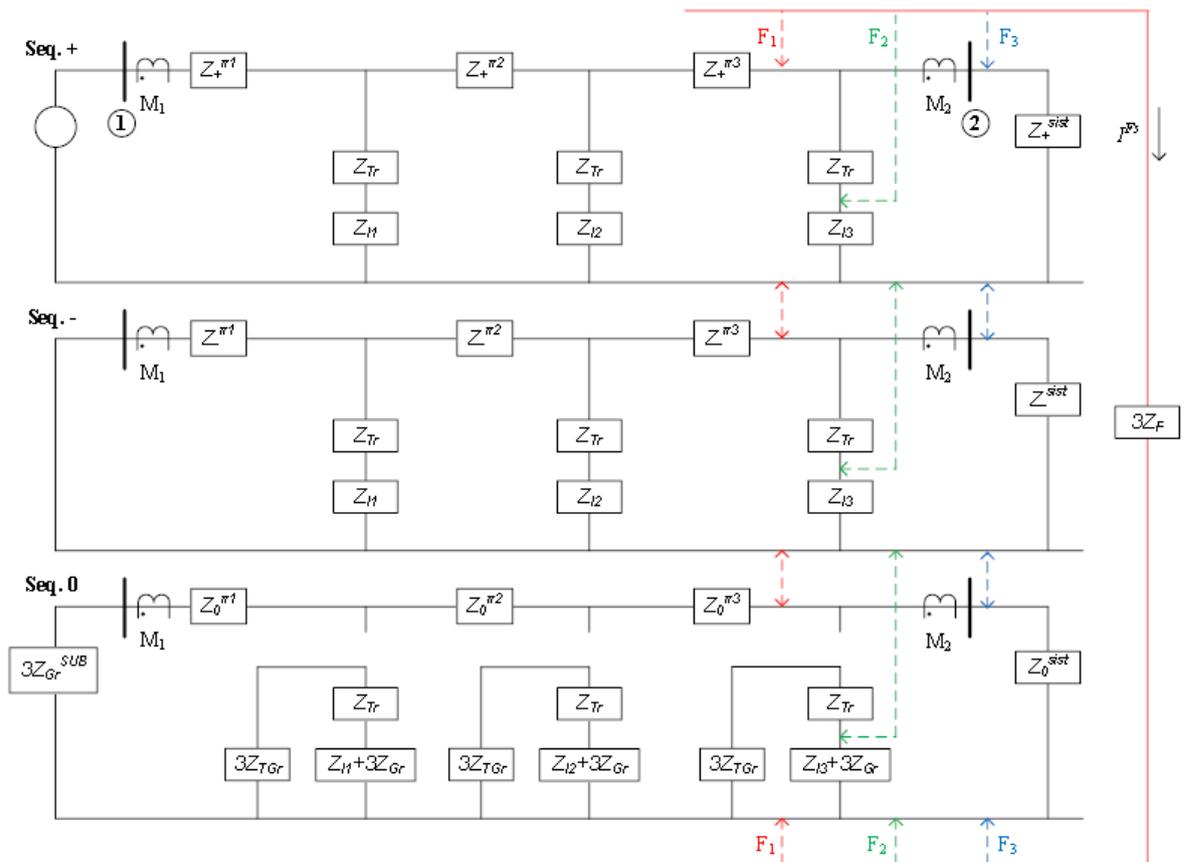


Figura 13. Sistema ilustrativo do PDSZ na distribuição, em componentes simétricas

Fonte: (VIANNA, 2016)

Aplicando as leis de Kirchhoff no circuito da sequência zero da Figura 13, observa-se que a corrente diferencial de sequência zero, calculada pela equação (3) deve ser nula para o funcionamento normal do sistema. Todavia, para o caso de falta dentro da zona diferencial monitorada, a corrente diferencial de sequência zero não será nula.

$$\bar{I}_0^{DIF} = \bar{I}_0^{M1} - \bar{I}_0^{M2} \quad (3)$$

Para determinar a eficiência do método, foram aplicadas faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas nos pontos F1, F2 e F3 do sistema testado. O método deveria identificar falhas monofásicas de alta impedância dentro da zona diferencial especificada, ou seja, entre os medidores 1 e 2. Desse modo, faltas no ponto F3 não devem ser identificadas. Como não há ligação entre a baixa e a média tensão no circuito de sequência zero, faltas aplicadas no ponto F2 (circuito de baixa tensão) também não serão detectadas pelo método.

No caso de faltas monofásicas no ponto F1, as correntes que circulam pelos medidores 1 e 2 são calculadas pelas equações (4) e (5), respectivamente. Substituindo esses valores na equação (3), nota-se que a componente diferencial de sequência zero está diretamente relacionada com a corrente de falta, como mostrado na equação (6).

$$\bar{I}_0^{M1} = \frac{Z_0^{SIST}}{Z_0^{MO} + Z_0^{SIST}} \cdot \bar{I}^{Fs} \quad (4)$$

$$\bar{I}_0^{M2} = -\frac{\bar{Z}_0^{MO}}{\bar{Z}_0^{MO} + \bar{Z}_0^{SIST}} \cdot \bar{I}^{Fs} \quad (5)$$

$$\bar{I}_0^{DIF} = \bar{I}_0^{Fs} \quad (6)$$

Como a corrente de falta monofásica de sequência zero equivale a um terço da corrente de falta de fase, a relação entre a corrente diferencial de sequência zero e a corrente de falta é dada por (7).

$$\bar{I}_0^{DIF} = \frac{\bar{I}^{Ff}}{3} \quad (7)$$

O ponto F2 representa faltas que ocorrem no circuito secundário. Portanto, para faltas monofásicas ocorridas no ponto F2, a corrente identificada pelo medidor 1 é a mesma identificada pelo 2, como exemplificado pela equação (8). Substituindo esses valores na equação (3), nota-se que a componente diferencial de sequência zero é nula, como mostrado na equação (9). Sendo assim, a formulação matemática confirma a eficácia do método proposto, que deve identificar apenas faltas de alta impedância ocorridas dentro da zona diferencial definida.

$$\bar{I}_0^{M1} = \bar{I}_0^{M2} \quad (8)$$

$$\bar{I}_0^{DIF} = 0 \quad (9)$$

Faltas ocorridas no circuito primário, mas fora da zona diferencial, são representadas pelo ponto F3. Assim como em F2, para faltas monofásicas ocorridas no ponto F3, a mesma corrente circula por ambos os medidores. Sendo assim, a componente diferencial de sequência zero é nula, comprovando mais uma vez a proposta do método.

A Figura 14 mostra um sistema que possui um ramal bifásico, para exemplificar a obrigatoriedade do medidor nesse ramal, além de formular o problema matematicamente.

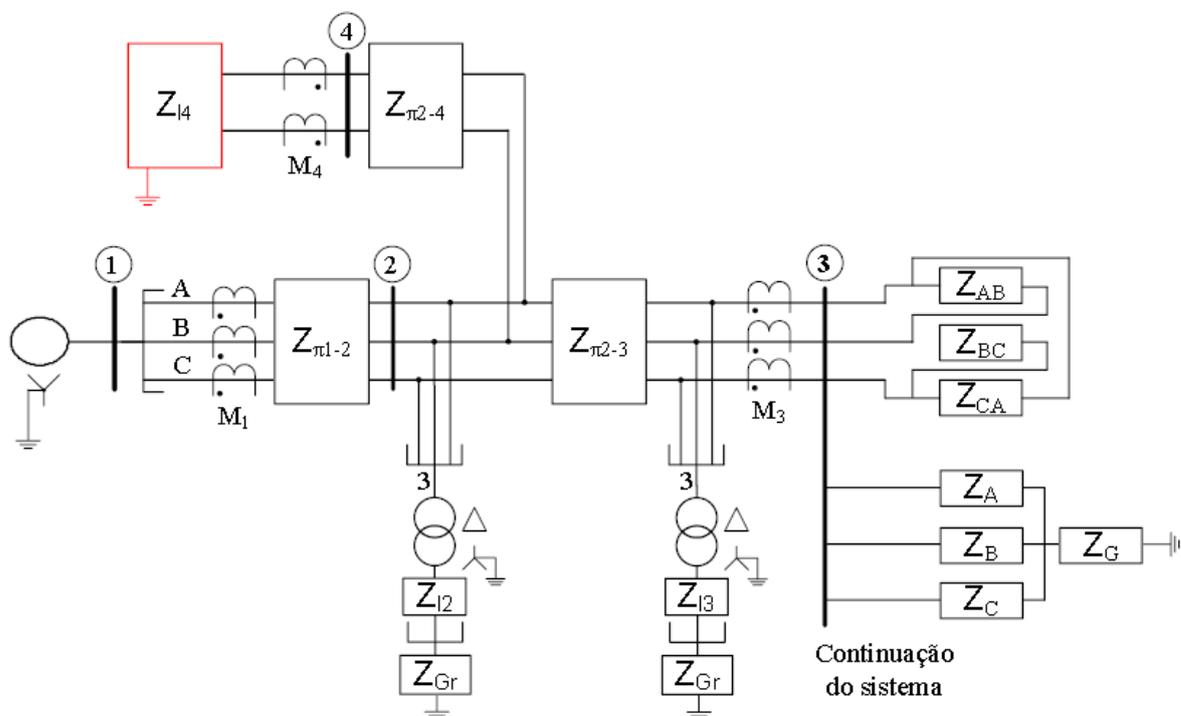


Figura 14. Sistema de distribuição com ramal bifásico, em sequência de fase

Fonte: (VIANNA, 2016)

Analisando a Figura 14, nota-se que a zona diferencial está delimitada pelos medidores 1, 3 e 4. Assim, a corrente de sequência zero passa a ser calculada pela equação (10). Da mesma forma que nos casos anteriores, essa corrente deve ser nula para o funcionamento normal do sistema e não nula para o caso de falta dentro da zona diferencial monitorada.

$$\bar{I}_0^{DIF} = \bar{I}_0^{M1} - \bar{I}_0^{M3} - \bar{I}_0^{M4} \quad (10)$$

Nesse caso, foram estudados três supostos cenários, a fim de exemplificar a importância da medição fasorial. Tais cenários, assim como as correntes de sequência zero de cada medidor e o resultado da equação (10) para medidas fasoriais e não-fasoriais (apenas módulo) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Cenários de corrente de sequência zero do sistema da Figura 12 (VIANNA, 2016)

Cenário	\bar{I}_0^{M1} (A)	\bar{I}_0^{M3} (A)	\bar{I}_0^{M4} (A)	$\bar{I}_0^{DIF_F}$ (A)	$\bar{I}_0^{DIF_NF}$ (A)
1	$70\angle 30^\circ$	$70\angle 30^\circ$	$0\angle 0^\circ$	0	0
2	$76\angle -90^\circ$	$36,5\angle -140^\circ$	$60\angle -62^\circ$	0	-20,5
3	$95\angle -70^\circ$	$36,5\angle -140^\circ$	$60\angle -62^\circ$	$18,6\angle 90,6^\circ$	-1,5

O cenário 1 ilustra que, caso a corrente do ramal bifásico seja nula, o medidor M4 é dispensável. Já o cenário 2 exemplifica a importância da medição fasorial, uma vez que a resposta fasorial é nula e a não fasorial não é, ou seja, caso o medidor 4 não fosse um medidor fasorial, o sistema mostraria, erradamente, a ocorrência de uma falta. Por fim, o cenário 3 exemplifica um caso em que tanto a medição fasorial quanto a não fasorial demonstram a ocorrência de falta dentro da zona diferencial.

Para avaliar o erro no cálculo da corrente diferencial de sequência zero pelo algoritmo proposto, o erro máximo de cada medidor foi considerado como 3%. Como a corrente de sequência zero em cada medidor é dada por (11), o erro provável de cada medidor é calculado pela equação (12). Assim, o erro total do sistema, considerando os erros da corrente de sequência zero de cada medidor, é dado pela equação (13).

$$\bar{I}_0^{MY} = \frac{\bar{I}_A^{MY} + \bar{I}_B^{MY} + \bar{I}_C^{MY}}{3} \quad (11)$$

$$\Delta \bar{I}_0^{MY} = \frac{\sqrt{(\Delta \bar{I}_A^{MY})^2 + (\Delta \bar{I}_B^{MY})^2 + (\Delta \bar{I}_C^{MY})^2}}{3} \quad (12)$$

$$\Delta \bar{I}_0^{DIF} = \sqrt{(\Delta \bar{I}_0^{M1})^2 + (\Delta \bar{I}_0^{M2})^2 + \dots + (\Delta \bar{I}_0^{Mn})^2} \quad (13)$$

Onde \bar{I}_A^{MY} e \bar{I}_0^{MY} é a corrente de fase e de sequência zero de cada medidor, respectivamente, com Y variando de 1 até n, sendo n o número de medidores. Portanto, a precisão de cada medidor impacta significativamente no erro do método proposto.

O limiar de detecção do algoritmo, ou seja, a corrente mínima que o mesmo é capaz de identificar como corrente de falta, emitindo o alarme de detecção de falta. Essa corrente mínima é dada por (14), uma vez que a corrente de fase de falta é dada pela equação (7).

$$I_{Ff}^{MIN} = 3 \cdot \Delta I_0^{DIF} \quad (14)$$

Caso todos os medidores sejam iguais, ou seja, possua o mesmo grau de precisão, as equações (13) e (14) podem ser reescritas nas formas (15) e (17).

$$\Delta I_0^{DIF} = \frac{\Delta I_0^{MAX}}{3} \cdot \sqrt{N} \quad (15)$$

$$\Delta I_0^{MAX} = I_{Ff}^{MAX} \cdot \Delta I_0^M \quad (16)$$

$$I_{Ff}^{MIN} = I_{Ff}^{MAX} \cdot \Delta I_0^M \cdot \sqrt{N} \quad (17)$$

Onde ΔI_0^{MAX} é o maior erro da corrente de sequência zero, dentre os medidores do sistema; I_{Ff}^{MAX} é a maior corrente de fase da região diferencial analisada; ΔI_0^M é a precisão dos medidores; e N é o número de medidores.

Deste modo, a Figura 15 apresenta o erro da componente diferencial em relação ao número de medidores e a corrente de carregamento do sistema. A análise do gráfico mostra

que quanto maior o número de medidores, maior o erro. Assim como quanto maior o carregamento do sistema, maior a corrente de fase, consequentemente, maior o erro.

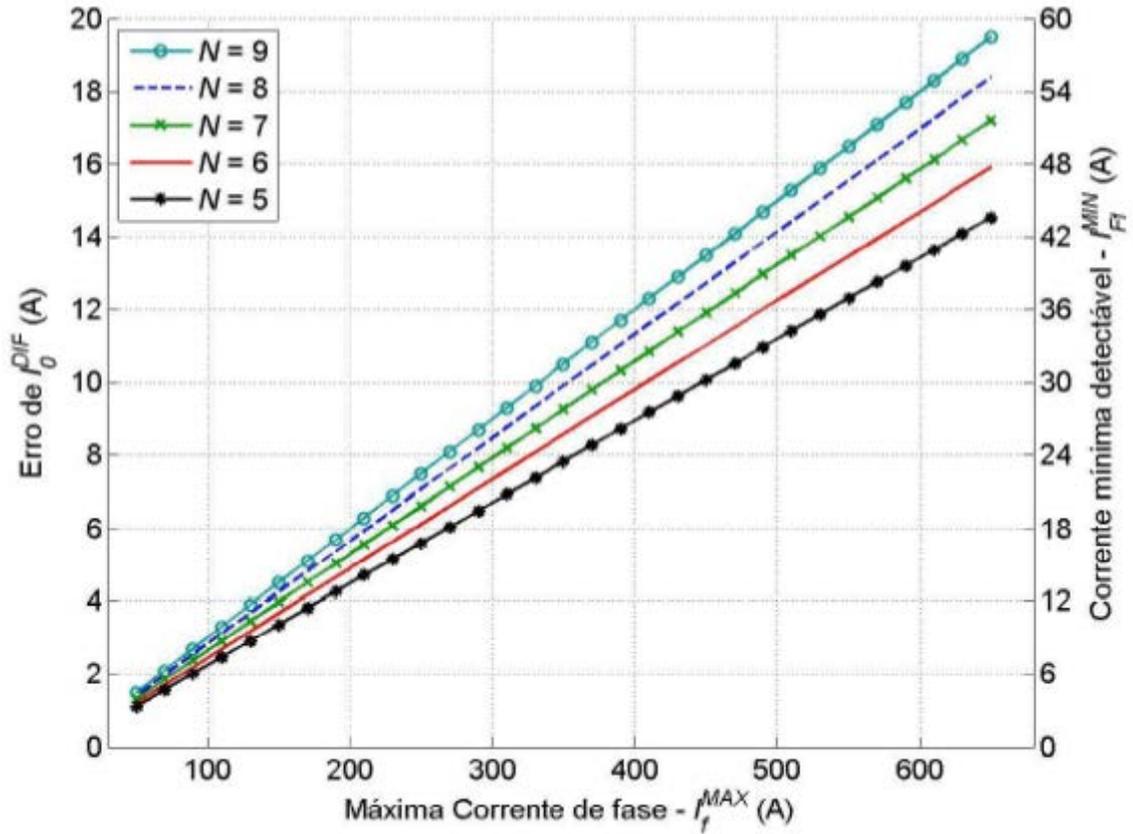


Figura 15. Erro da corrente diferencial de sequência zero em função do número de medidores e do carregamento do sistema

Fonte: (VIANNA, 2016)

Após a detecção da falta, que ocorre quando a corrente de falta é maior do que o limiar de detecção, determina-se que a mesma se encontra dentro da zona diferencial, entre os medidores que a indicaram, realizando assim a localização da falta.

Os testes realizados por VIANNA (2016) mostraram que o método proposto se comporta de forma adequada para todos os tipos de faltas, em todas as localizações, na presença ou ausência de ramais monofásicos e bifásicos.

Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em VIANNA (2016).

Capítulo 3

Implementação do Método de Detecção de Falhas de Alta Impedância no PSCAD

3.1 Introdução

Nesse capítulo será explicado como foram realizadas as simulações do método de detecção e localização de falhas de alta impedância em um sistema de distribuição, para fins de análises do mesmo. Uma implementação simplificada e simulações foram realizadas no software PSCAD.

3.2 Ferramentas do PSCAD

Para implementar o problema no PSCAD, foram utilizadas algumas ferramentas ofertadas pelo software, como os modelos de gerador, transformador, impedâncias, amperímetro, simulações de falhas, transformação de coordenadas de fase em componentes simétricas, etc.

Para representar a energia que chega à subestação de distribuição, foi usado o modelo de gerador trifásico ideal, mostrado na Figura 16. Esse gerador é de 138 kV de tensão e 60 Hz de frequência.

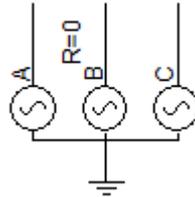


Figura 16. Modelo de gerador trifásico ideal

O modelo de transformador presente no software de simulação é representado pela Figura 17. Esse modelo permite escolher as conexões do transformador (Y ou Δ), a potência, as tensões primária e secundária, a frequência e a saturação. Nas simulações foram usados transformadores Δ -Y, 60 Hz, relações de tensão 138-13,8 kV e 13,8-0,220 kV.

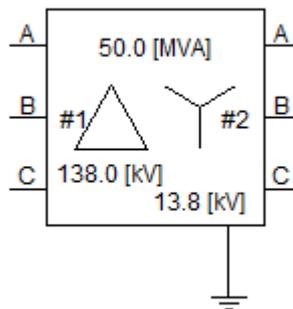


Figura 17. Modelo de transformador trifásico

As cargas dos sistemas foram criadas utilizando resistores e indutores, com fases desequilibradas. Foram usadas cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas (conectadas em Y e Δ), aterradas ou não. Um exemplo de carga trifásica, desequilibrada, conectada em Y, aterrada por impedância, é apresentado na Figura 18.

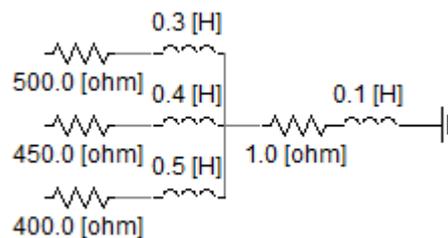


Figura 18. Exemplo de modelo de carga

As simulações de faltas são criadas através de duas ferramentas: a “Three Phase Fault” e o “Timed Fault Logic”, como mostrado em Figura 19. O primeiro permite aplicar faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, além da impedância da falta e da escolha de quais fases sofrerão a falta. Já o segundo permite escolher o tempo em que a falta será aplicada e sua duração. Foram escolhidas impedâncias de falta para que a corrente de defeito não ficasse acima dos 100 A que caracteriza HIFs. Todas as faltas foram aplicadas no tempo 0,2 segundos e possuem duração de 0,2 segundos.

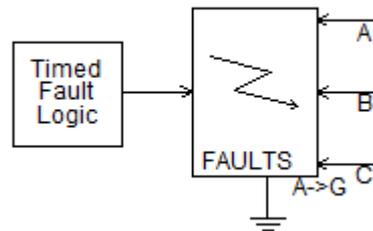


Figura 19. Modelo de controle de faltas

A transformação de coordenadas de fase em componentes simétricas é realizada por “abc to dq0 transformation”. A Figura 18 demonstra que essa ferramenta é como uma caixa, cuja entrada são as fases A, B e C e a saída são as sequências positiva (D), negativa (Q) e zero (0).

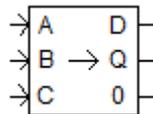


Figura 20. Transformação de coordenadas de fase em componentes simétricas

Por fim, o cálculo da componente diferencial é realizado pela ferramenta “Summing/Differencing Junctions” (Figura 21), em que se escolhe se a entrada será somada ou subtraída.

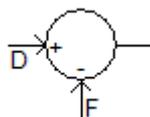


Figura 21. Ferramenta usada no cálculo da componente diferencial

Usando todos esses recursos do PSCAD, foi possível desenvolver os sistemas simulados.

3.3 Sistemas simulados

De posse dessas ferramentas, foi desenvolvido o sistema apresentado na Figura 20, que representa um sistema típico de distribuição brasileiro, com uma subestação, alimentador primário ligado por toda a rede, baixa tensão conectada à média tensão através de transformadores Δ -Y, cabo neutro multiaterado e cargas desequilibradas. A Figura 23 mostra parte esse sistema com mais detalhe.

Esse sistema foi dividido de uma a quatro áreas de detecção, a fim de exemplificar que quanto mais áreas definidas, mais precisa é a localização da falta. A Figura 24 especifica as zonas de detecção de falta para o caso com quatro áreas de detecção.

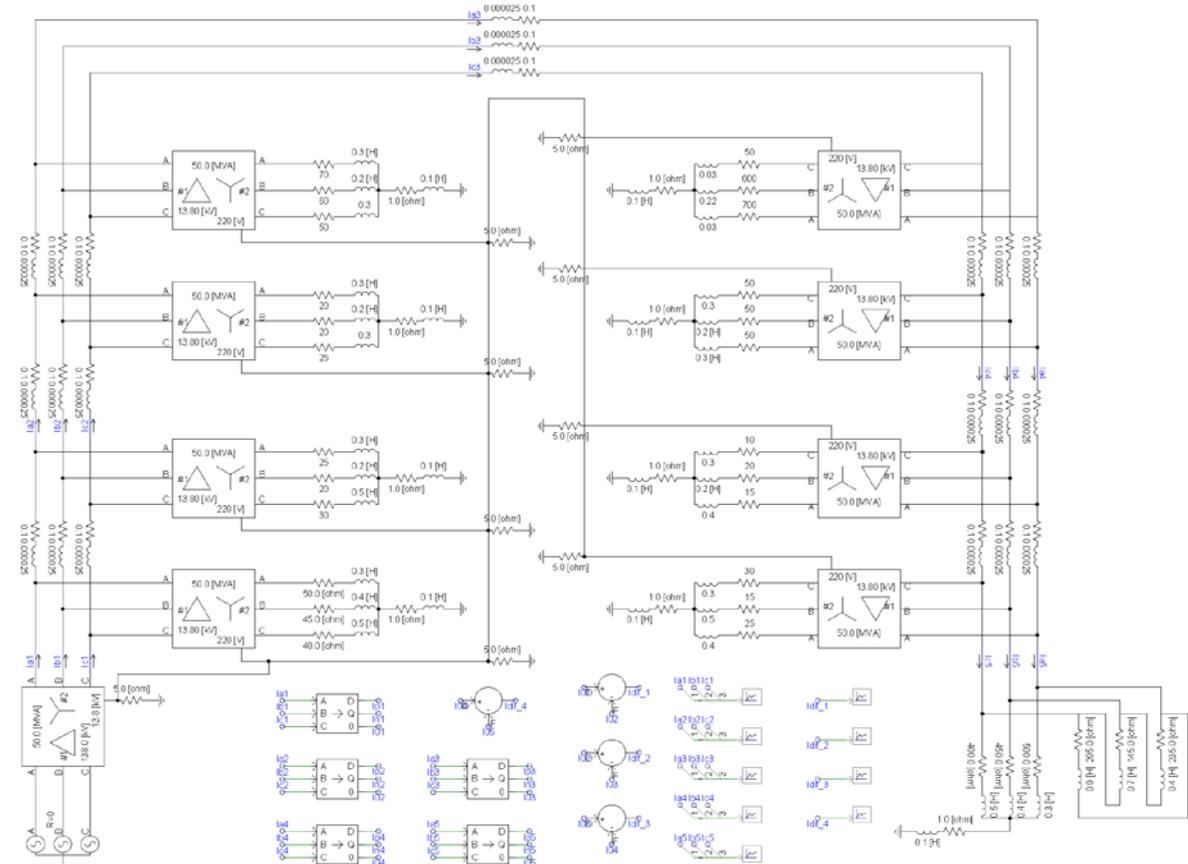


Figura 22. Sistema representante da rede de distribuição simulado no PSCAD

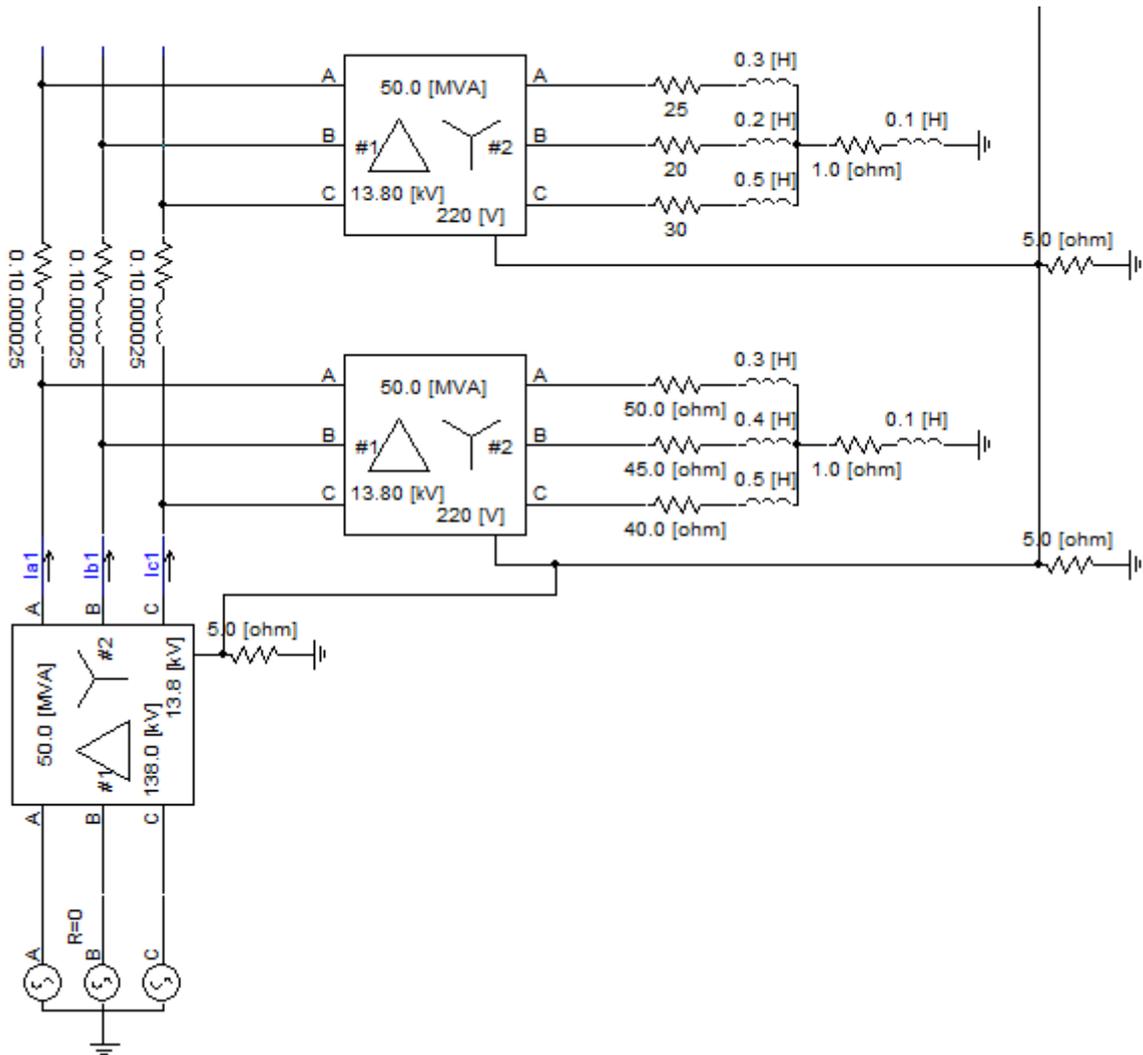


Figura 23. Detalhe da subestação, primeira área de detecção, neutro multiterrado e algumas cargas desequilibradas

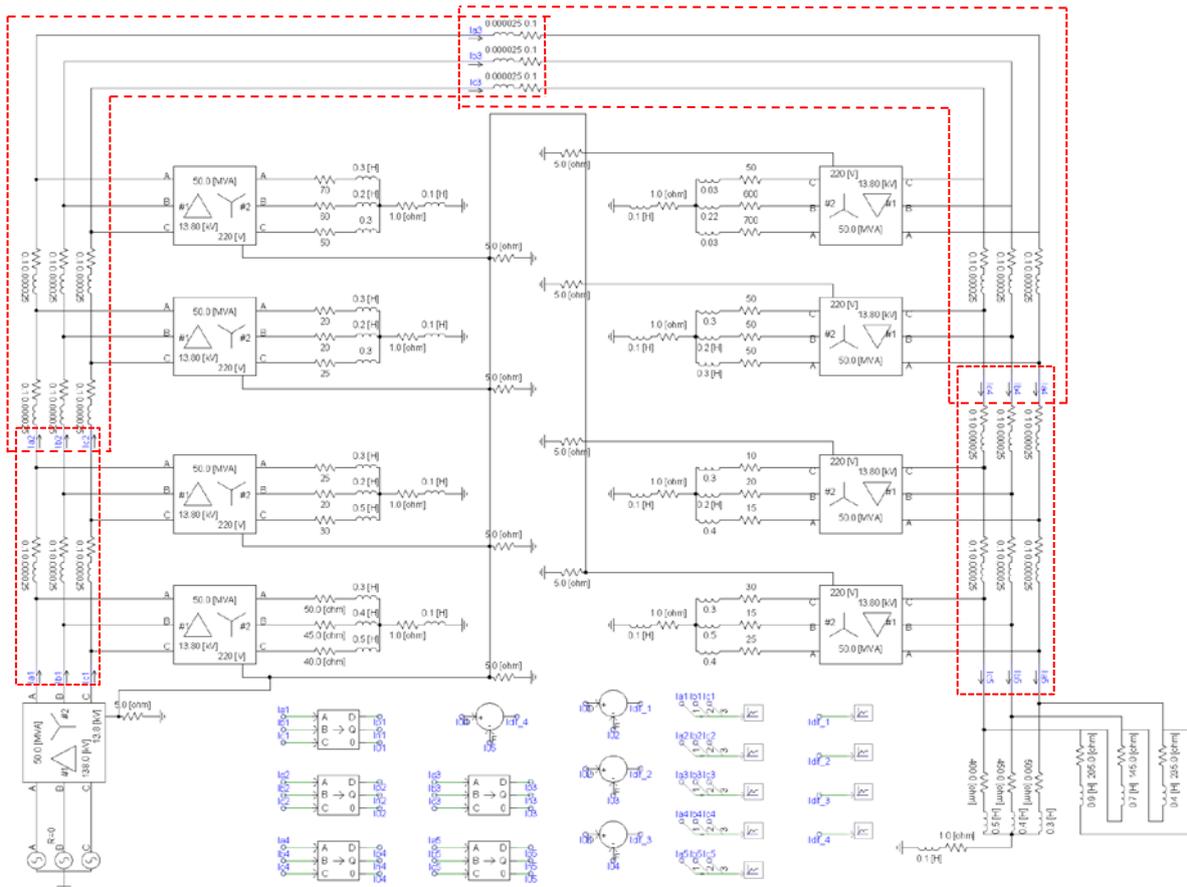


Figura 24. Áreas de detecção de falhas

A fim de avaliar a eficácia do método, foram aplicadas faltas monofásicas de alta impedância em seis posições diferentes: uma dentro de cada zona diferencial (F1, F2, F3 e F4), uma na média tensão depois do último medidor (F5), ou seja, fora das áreas de detecção, e uma na baixa tensão (F6). A Figura 25 determina os locais dos defeitos. Cada área deve detectar faltas ocorridas apenas dentro dos seus limites de atuação, ou seja, as faltas na baixa tensão e na continuação do alimentador primário não deverão ser detectadas em momento algum.

As simulações foram feitas para o mesmo sistema, variando a fase de falta (A, B e C), o ponto em que ocorre o defeito e o número de áreas de detecção.

Os resultados obtidos nas simulações serão apresentados no próximo capítulo.

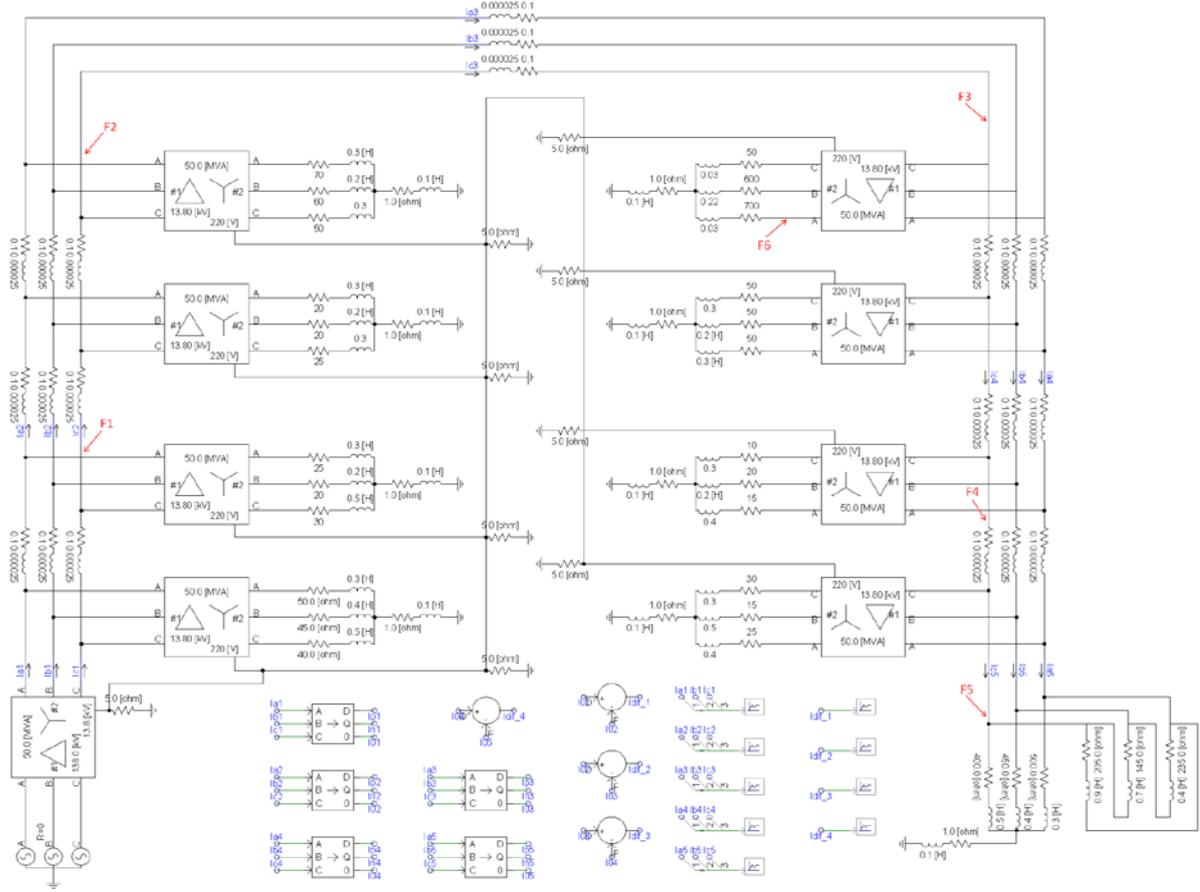


Figura 25. Localização das faltas na simulação

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas no software PSCAD.

4.2 Sistema teste

Para melhor exemplificar a dificuldade de detecção de faltas de alta impedância em sistemas em coordenadas de fase, as correntes medidas na simulação com duas áreas de detecção e falta monofásica na fase A no ponto F3 serão apresentadas nas Figuras 26, 27 e 28. Comparando as correntes dos três medidores, percebe-se que a falta não é identificada por nenhum medidor, o que é um problema para sensibilizar os equipamentos de proteção baseados em critérios de sobrecorrente.

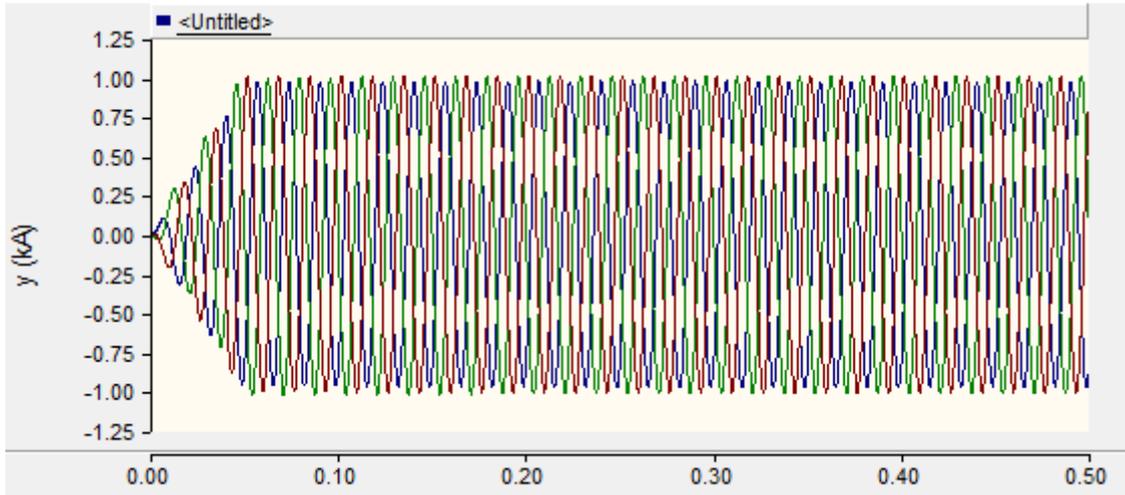


Figura 26. Correntes de fase medidas no medidor 1

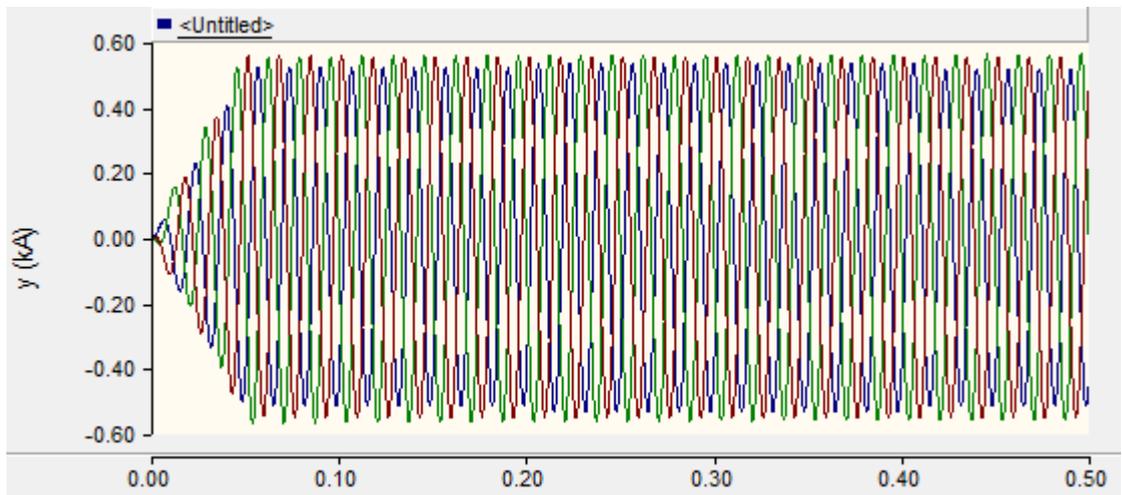


Figura 27. Correntes de fase medidas no medidor 2

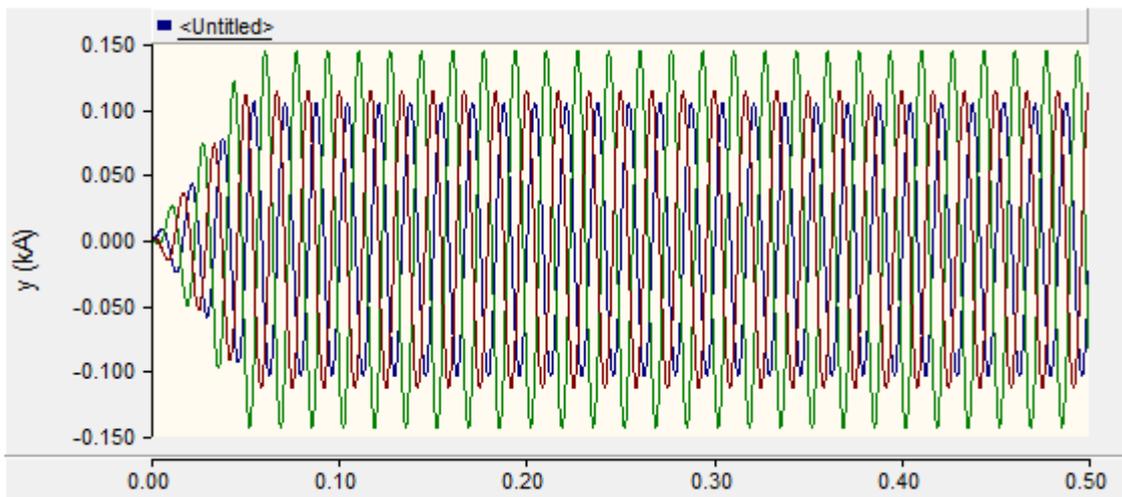


Figura 28. Correntes de fase medidas no medidor 3

A Figura 29 mostra como a corrente de falta é pequena (aproximadamente 71,76 A pico) e as Figuras 30 e 31 ilustram as correntes diferenciais de sequência zero. Percebe-se, desse modo, que a corrente diferencial de sequência zero da zona onde não ocorreu a falta é nula durante todo o tempo de simulação e a da zona onde ocorre a falta é não nula durante o período de defeito, possibilitando assim sua detecção e localização.

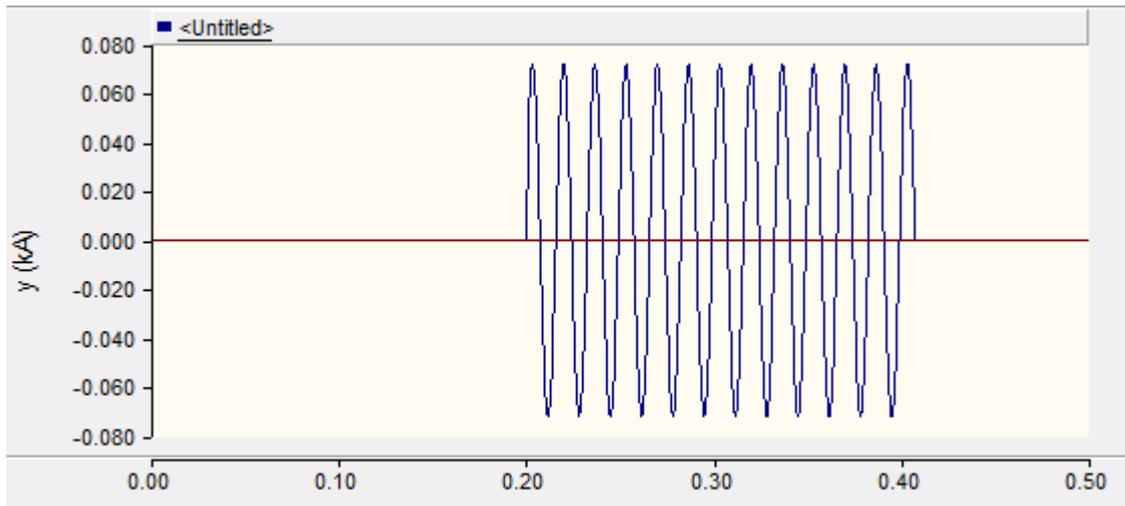


Figura 29. Corrente de falta monofásica

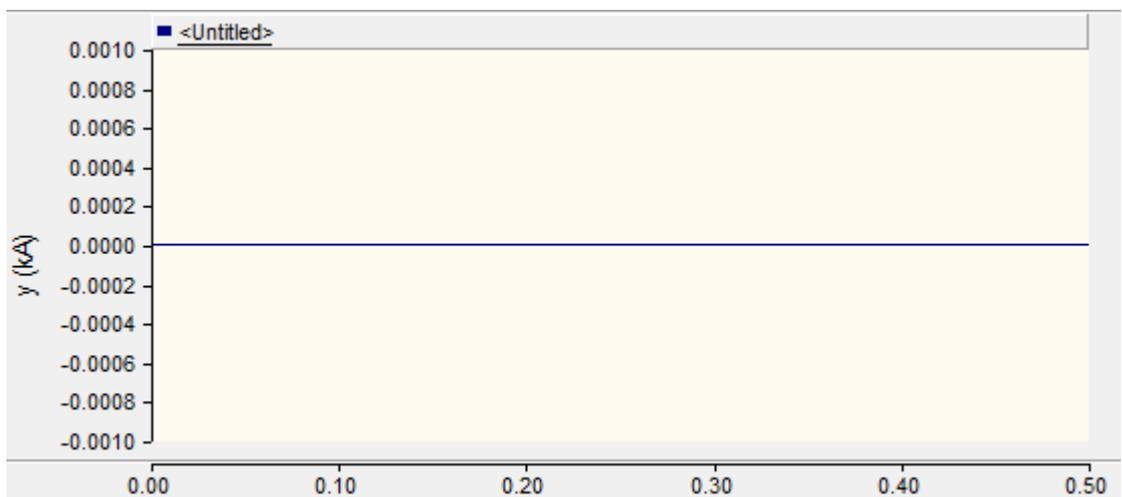


Figura 30. Corrente de sequência zero da área em que não há falta

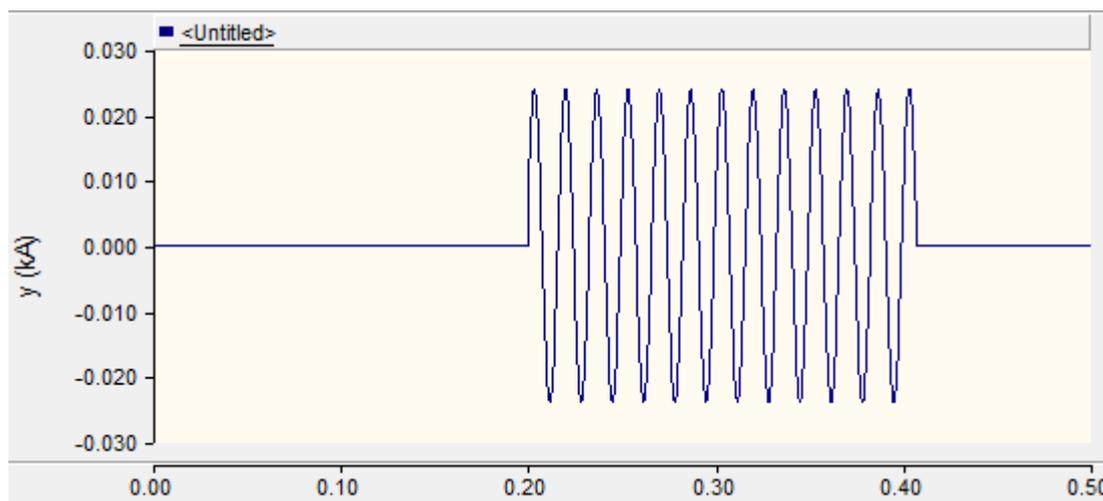


Figura 31. Corrente de sequência zero da área 2, zona em que ocorre a falta

4.3 Resultados das simulações

Nessa seção serão apresentados os resultados de todas as simulações realizadas, variando o número de áreas de detecção, a fase da falta e o ponto do defeito.

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados obtidos para uma, duas, três e quatro áreas de detecção, respectivamente.

Tabela 2. Resultados das simulações com uma zona de detecção

Posição da falta	Fase da falta	Detecção		I_dif_1 sem falta (A)	I_dif_1 com falta (A)	I de falta (A)
		Não	Ok			
F1	Sem falta	Não	Ok	0	-	-
	A	Sim	Ok	0	24,08	72,3
	B	Sim	Ok	0	24,06	63,39
	C	Sim	Ok	0	24,05	57,6
F3	Sem falta	Não	Ok	0	-	-
	A	Sim	Ok	0	23,88	71,68
	B	Sim	Ok	0	23,83	71,31
	C	Sim	Ok	0	23,87	61,3
F5	Sem falta	Não	Ok	0	-	-
	A	Não	Ok	0	0	71,32
	B	Não	Ok	0	0	63,58
	C	Não	Ok	0	0	55,38
F6	Sem falta	Não	Ok	0	-	-
	A	Não	Ok	0	0	1,13
	B	Não	Ok	0	0	1,09
	C	Não	Ok	0	0	1,14

Tabela 3. Resultados das simulações com duas zonas de detecção

Posição da falta	Fase da Falta	Detecção		I_dif_1 sem falta (A)	I_dif_1 com falta (A)	I_dif_2 sem falta (A)	I_dif_2 com falta (A)	I de falta (A)
		Não	Ok					
F1	Sem falta	Não	Ok	0	-	0	-	-
	A	Sim	Ok	0	24,08	0	0	72,3
	B	Sim	Ok	0	24,05	0	0	68,71
	C	Sim	Ok	0	24,05	0	0	70,02
F3	Sem falta	Não	Ok	0	-	0	-	-
	A	Sim	Ok	0	0	0	23,88	71,68
	B	Sim	Ok	0	0	0	23,83	63,67
	C	Sim	Ok	0	0	0	23,87	61,3
F5	Sem falta	Não	Ok	0	-	0	-	-
	A	Não	Ok	0	0	0	0	71,32
	B	Não	Ok	0	0	0	0	66,91
	C	Não	Ok	0	0	0	0	61,34
F6	Sem falta	Não	Ok	0	-	0	-	-
	A	Não	Ok	0	0	0	0	1,13
	B	Não	Ok	0	0	0	0	1,04
	C	Não	Ok	0	0	0	0	1,14

Tabela 4. Resultados das simulações com três zonas de detecção

Posição da falta	Fase da Falta	Detecção		I_dif_1 (A)	I_dif_2 (A)	I_dif_3 (A)	I de falta (A)
		Não	Ok				
F1	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	23,39	0	0	70,21
	B	Sim	Ok	23,42	0	0	43,58
	C	Sim	Ok	23,35	0	0	59,1
F2	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	0	23,24	0	69,75
	B	Sim	Ok	0	23,26	0	61,97
	C	Sim	Ok	0	23,22	0	59,52
F4	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	0	0	23,22	69,71
	B	Sim	Ok	0	0	23,29	45,07
	C	Sim	Ok	0	0	23,21	67,02
F5	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	-
	A	Não	Ok	0	0	0	69,71
	B	Não	Ok	0	0	0	62,41
	C	Não	Ok	0	0	0	54,22
F6	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	-
	A	Não	Ok	0	0	0	1,14
	B	Não	Ok	0	0	0	0,83
	C	Não	Ok	0	0	0	1,04

Tabela 5. Resultados das simulações com quatro zonas de detecção

Posição da falta	Fase da Falta	Detecção		I_dif_1 (A)	I_dif_2 (A)	I_dif_3 (A)	I_dif_4 (A)	I de falta (A)
		Não	Ok					
F1	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	24,08	0	0	0	72,3
	B	Sim	Ok	24,26	0	0	0	63,69
	C	Sim	Ok	24,04	0	0	0	60,79
F2	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	0	23,93	0	0	71,82
	B	Sim	Ok	0	23,88	0	0	63,65
	C	Sim	Ok	0	23,9	0	0	70,99
F3	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	0	0	23,88	0	71,68
	B	Sim	Ok	0	0	23,83	0	52,72
	C	Sim	Ok	0	0	23,86	0	70,92
F4	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Sim	Ok	0	0	0	23,76	71,32
	B	Sim	Ok	0	0	0	23,7	70,95
	C	Sim	Ok	0	0	0	23,75	61,33
F5	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Não	Ok	0	0	0	0	71,32
	B	Não	Ok	0	0	0	0	46
	C	Não	Ok	0	0	0	0	61,33
F6	Sem falta	Não	Ok	0	0	0	0	-
	A	Não	Ok	0	0	0	0	1,13
	B	Não	Ok	0	0	0	0	1,16
	C	Não	Ok	0	0	0	0	1,13

Os resultados mostram que o algoritmo usado detectou e localizou corretamente todas as faltas simuladas. Porém, os limiares de detecção não foram considerados. Desse modo, a corrente mínima necessária para a detecção de faltas de alta impedância em sistemas reais não foi analisada.

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 indicam os limiares de detecção para os casos de uma, duas, três e quatro zonas de detecção, respectivamente. Foram avaliados erros de medição de 1% e 3%. Os cálculos foram realizados através das equações (12), (13) e (14).

Tabela 6. Limiar de detecção para uma zona

Erro dos medidores	I_M1_max (A)	I_M2_max (A)	Delta_M_0 (A)	I_f_min (A)
	974,03	104,88		
3%	29,22	3,15	29,39	88,17
1%	9,74	1,05	9,8	29,39

Tabela 7. Limiar de detecção para duas zonas

Erro dos medidores	I_M1_max (A)	I_M2_max (A)	I_M3_max (A)	Delta_M_0 (A)	I_f_min (A)
	974,03	521,12	104,88		
3%	29,22	15,63	3,15	33,29	99,87
1%	9,74	5,21	1,05	11,1	33,29

Tabela 8. Limiar de detecção para três zonas

Erro dos medidores	I_M1_max (A)	I_M2_max (A)	I_M3_max (A)	I_M4_max (A)	Delta_M_0 (A)	I_f_min (A)
	973,97	747,5	521,1	104,86		
3%	29,22	22,42	15,63	3,15	40,14	120,41
1%	9,74	7,47	5,21	1,05	13,38	40,14

Tabela 9. Limiar de detecção para quatro zonas

Erro dos medidores	I_M1_max (A)	I_M2_max (A)	I_M3_max (A)	I_M4_max (A)	I_M5_max (A)	Delta_M_0 (A)	I_f_min (A)
	974	747,5	521,12	298,19	104,9		
3%	29,22	22,43	15,63	8,95	3,15	41,12	123,37
1%	9,74	7,48	5,21	2,98	1,05	13,71	41,12

A análise dos limiares mostra o impacto que a precisão do equipamento de medição causa detecção do defeito. Como a maioria das faltas possui valor de pico entre 60 e 70 A, para os casos em que foi considerado erros dos medidores de 3%, essas faltas não teriam sido detectadas, uma vez que o limiar está acima de 85 A. Já para erros de 1%, todas as faltas que deveriam ser identificadas seriam detectadas e localizadas corretamente. Sendo assim, a precisão do medidor é crucial para esse método de localização de falta de alta impedância.

Capítulo 5

Conclusões

Faltas de alta impedância são frequentes nos sistemas de distribuição. Entretanto, devido às características da rede, são difíceis de detectar e localizar. Como os sistemas de distribuição são desequilibrados e sofrem constante variação de carga, as pequenas variações de corrente causadas por HIFs podem ser interpretadas como situações normais de operação. Além disso, o valor da corrente desse tipo de falta não é suficiente para sensibilizar os equipamentos de proteção baseados em sobrecorrentes.

Métodos de detecção e localização de faltas de alta impedância nas redes de distribuição foram estudados e analisados, sendo o foco na metodologia de Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ) (VIANNA, 2016). As técnicas mais populares para detectar e localizar faltas de alta impedância em sistemas de distribuição têm como base medições de parâmetros elétricos nas subestações, utilização de transformada de Wavelet e redes neurais artificiais.

A metodologia PDSZ calcula a corrente diferencial de sequência zero utilizando medições fasoriais. Em situações de falta de alta impedância dentro da zona diferencial, essa corrente passa a ter um valor não nulo.

Os testes realizados mostraram a eficiência do algoritmo, que detectou e localizou corretamente todas as faltas simuladas. Contudo, verificou-se que a precisão dos medidores impacta diretamente nos limiares de detecção e, conseqüentemente, na identificação ou não das falhas.

Estudos de viabilidade econômica da implantação do método em sistemas reais, assim como análises detalhadas sobre a precisão dos medidores fasoriais e a alocação otimizada desses equipamentos nas redes de distribuição são propostas para futuros trabalhos.

Referências Bibliográficas

ANSI; IEEE. IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. **IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996)**, p. 1-48, out. 2008.

ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.; CARNEIRO JR, S.; PEREIRA, J. L. R. A methodology for optimization of unbalanced distribution systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n. 5, p. 1182-1189, set. 2013.

BAKAR, A. H. A. et al. High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms. **Elsevier Electrical Power and Energy Systems**, v. 55, p. 723-730, 2014.

FANUCCHI, R. Z.; OLESKOVICZ, M.; BARBOSA, D. Análise da detecção de faltas de alta impedância utilizando redes neurais artificiais com topologias baseadas em perceptron multicamadas e redes RBF. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Fortaleza, CE, out. 2013.

FARIAS, P. E.; COSTA, G. B.; MORAIS, A. P.; CARDOSO JUNIOR, G. Revisão e análise das técnicas para localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica. International Congress on Electricity Distribution, Buenos Aires, Argentina, 2014.

FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Atlantic City, NJ, jun. 1918.

IURINIC, L. U. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia**: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016. 174 p.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito. Sagra Luzzatto**, 2ª edição, Porto Alegre, RS, 1997.

MARINI, R. L. V. **Uso de medição fasorial sincronizada visando a melhoria da estabilidade de sistemas elétricos de potência.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005. 129 p.

VIANNA, J. T. A. **Métodos determinísticos para detecção e localização de falhas monofásicas de alta impedância sustentadas nos circuitos primários de sistemas de distribuição desequilibrados.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2016. 187 p.

REN, J.; VENKATA, S. S.; SORTOMME, E. An accurate synchrophasor based fault location method for emerging distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 1, p. 297-298, fev. 2014.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook.** CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004.

ZAMORA, I.; MAZÓN, A. J.; SAGASTABEITIA K, J.; ZAMORA, J.J. New method for detecting low current faults in electrical distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 4, p. 2072-2079, out. 2007.