Universidade de São Paulo- USP
Escola de Engenharia de São Carlos-EESC
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação- SEL

Gustavo Mundim Caixeta

**Método para Detecção e Localização de Faltas em Linhas
VSC-HVDC de Sistemas Multiterminais**

São Carlos

2019

Gustavo Mundim Caixeta

**Método para Detecção e Localização de Faltas em Linhas
VSC-HVDC de Sistemas Multiterminais**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2019

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C133m Caixeta, Gustavo Mundim
Método para Detecção e Localização de Falhas
em Linhas VSC-HVDC de Sistemas Multiterminais / Gustavo
Mundim Caixeta; orientador José Carlos de Melo Vieira
Júnior. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de
Concentração em Sistemas Elétricos de Potência --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. Localização de Falhas. 2. VSC-HVDC. 3. Redes
de Corrente Contínua. 4. HVDC Multiterminal. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO MUNDIM CAIXETA**.

Título da dissertação: "Método para detecção e localização de faltas em linhas VSC-HVDC de sistemas multiterminais".

Data da defesa: 05/04/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **José Carlos de Melo Vieira Júnior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Ricardo Caneloi dos Santos**
(Universidade Federal do ABC/UFABC)

APROVADO

Prof. Dr. **Renato Machado Monaro**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Lista de siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSC	<i>Current Source Converter</i>
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i>
<i>FastICA</i>	<i>Fast Independent Component Analysis</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTO	<i>Gate Turn-off</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MTDC	<i>Multi-terminal HVDC</i>
PLL	<i>Line Commutated Converter</i>
PLL	<i>Phased-Locked Loop</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
WT	<i>Wavelet Transform</i>

Lista de Figuras

Figura 1: Partes de uma Estação Conversora.	18
Figura 2: Esquemático de uma Torre de Corrente Contínua e um Cabo Subterrâneo.	20
Figura 3: Conversor Monofásico.....	21
Figura 4: Onda Quadrada Gerada pelo Conversor.	21
Figura 5: Modulação PWM.....	22
Figura 6: Saída do inversor com modulação PWM.	23
Figura 7: Conversor Trifásico.	24
Figura 8: Sequência de Chaveamento para Condução 180°.....	25
Figura 9: Tensões de Linha para Condução 180°.....	26
Figura 10: Tensões de Fase para Condução 180°.....	27
Figura 11: Sequência de Chaveamento pra Condução 120°.	28
Figura 12: Tensões de Linha e de Fase para Condução 120°.....	28
Figura 13: Tensões de Linha e de Fase para Condução 120°.....	29
Figura 14: Conexão de um Conversor a um Sistema CA.....	29
Figura 15: Estrutura do Controle dq.....	31
Figura 16: Sistema HVDC Configuração Monopolar Assimétrico.....	32
Figura 17: Sistema HVDC Configuração Monopolar Simétrico.	33
Figura 18: Sistema HVDC Configuração Bipolar.....	33
Figura 19: Exemplo de uma Rede MTDC.....	35
Figura 20: Propagação da Onda Produzida por uma Falta.	37
Figura 21: Reflexões de Onda em uma Linha de Transmissão.	39
Figura 22: Sistema de Testes CIGRÉ.....	43
Figura 23: Sistema Simulado.	44
Figura 25: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2.....	45
Figura 26: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3.....	45
Figura 27: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1	46
Figura 28: Sentido das correntes.	47
Figura 29: Proteção diferencial modelada no <i>software</i> EMTDC/PSCAD.	47
Figura 30: Proteção direcional modelada no <i>software</i> EMTDC/PSCAD.	49
Figura 35: Detecção da onda na linha faltosa e linha adjacente: (a) Barramento Bm-B2, (b) Barramento Bm-B3, (c) Barramento Bm-F1.....	50
Figura 36: Resultado do sistema de detecção da falta na linha: (a) linha 1, (b) linha 2.	51
Figura 31: Sistema de localização de faltas implementado no PSCAD.	52
Figura 32: Fluxograma da atuação do sistema de localização de faltas.	53
Figura 33: Diagrama de distância considerando a amostragem do sinal.....	54
Figura 34: Má operação devido à uma falta no extremo da linha.	55
Figura 37: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância.	57
Figura 38: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância de Bm-B2.	58
Figura 39: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância de Bm-B2.	58

Figura 40: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2 para uma falta na linha 2 a 60 km de distância de Bm-B3.	59
Figura 41: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3 para uma falta na linha 2 a 50 km de distância de Bm-B3.	60
Figura 42: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1 para uma falta na linha 2 a 50 km de Bm-B3.	60
Figura 43: Valor Calculado da Distância.	63
Figura 44: Média dos Erros Relativos Calculados.	64
Figura 44: Cabos Modelados.....	67

Resumo

CAIXETA, G. M.. **Método para Detecção e Localização de Faltas em Linhas VSC-HVDC de Sistemas Multiterminais**. 71p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Com o aumento de uso de fontes renováveis para geração de energia e o aprimoramento da tecnologia de conversores fonte de tensão (VSC– *Voltage Source Converter*), sistemas baseados em corrente contínua não só se tornaram viáveis como também se tornaram uma alternativa vantajosa em diversas situações. O uso de diversos conversores conectados em uma rede, isto é uma rede VSC-HVDC multiterminal, se apresenta como um caminho para a conexão de diversas fontes, como geradores eólicos e solares de maneira eficiente e economicamente vantajosa. No entanto, este tipo de rede possui algumas limitações, por exemplo, é mais sensível a faltas que um sistema de corrente contínua baseado em conversores do tipo fonte de corrente (CSC – *Current Source Converter*). Desta forma, o estudo de faltas em sistemas VSC-HVDC é necessário para o desenvolvimento de mecanismos de proteção para estes sistemas. Neste contexto é importante o desenvolvimento de metodologias para a localização de faltas em sistemas MTDC, uma vez que este tipo de informação pode ajudar as equipes de manutenção a encontrarem as falhas e resolverem o problema da maneira mais rápida possível. Embora existam diversos estudos e metodologias desenvolvidas para sistemas de corrente alternada, ou para sistemas de corrente contínua de dois terminais, os estudos em redes de corrente contínua multiterminais ainda são poucos e em geral atendem a apenas um tipo de rede, mostrando assim a necessidade de mais estudos na área. Desta forma, o objetivo desta dissertação de mestrado é o desenvolvimento de uma metodologia localização de faltas em um sistema HVDC multiterminal, que contará também com técnicas já propostas na literatura para a detecção das falhas. Neste documento são mostrados o embasamento teórico, os estudos realizados para o desenvolvimento do tema, bem como os resultados obtidos para a localização de faltas em um sistema teste de simulação.

Palavras Chaves: Localização de Faltas; VSC-HVDC; Redes de Correntes Contínua, HVDC Multiterminal.

Abstract

CAIXETA, G. M.. **Fault Detection and Location Method for multiterminal VSC-HVDC Systems**. 71p. Master Dissertation - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The increase of the use of renewable sources for power generation and the enhancement of Voltage Source Converter (VSC) technology, DC-based systems have become viable and an advantageous alternative in many situations. The use of several converters connected in a network, ie a multi-terminal VSC-HVDC network, is presented as a way to connect several sources, such as wind and solar generators in an efficient and economically advantageous way. However, this type of network has some limitations, for example, it is more sensitive to faults than a DC current system based on Current Source Converter (CSC). Therefore, the study of faults in VSC-HVDC systems is necessary for the development of protections for these systems. In this context it is important to develop fault location methodologies in MTDC systems since this type of information can help maintenance teams to find fault and solve the problem as quickly as possible. Although there are several studies and methodologies developed for alternating current systems or for two-terminal DC systems, there are few studies on multi-terminal DC networks and this studies generally address only one type of network, thus showing the need for more studies in the area. Thus, the objective of this master's thesis is the development of a fault localization methodology in a multi-terminal HVDC system, which will also have techniques already proposed in the literature for the detection of faults. In this document are shown the theoretical background, the studies carried out for the development of the theme, as well as the results obtained for fault localization in a simulation test system.

Keywords: Fault Location; VSC-HVDC; Continuous Current Networks, HVDC Multiterminal.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer aos meus familiares e amigos pelo grande apoio, não apenas ao longo do mestrado, mas durante toda minha caminhada.

Agradeço também ao meu orientador, Professor Doutor José Carlos de Melo Vieira Júnior, por toda a paciência, empenho durante o projeto de IC, TCC e agora no mestrado.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica - LSEE, pelo companheirismo e ajuda.

Quero agradecer especialmente à Universidade de São Paulo pelo apoio institucional.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), processo: nº 2016/13762-4, pelo suporte financeiro concedido para a realização da pesquisa. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Sumário

1.	Introdução	1
1.1	Objetivos	5
1.2	Organização do Documento	5
1.3	Publicação	6
2.	Localização de Faltas em Sistemas HVDC	7
2.1	Localização de falta através de ondas viajantes.	7
2.2	Localização de faltas baseados em medições de regime permanente	11
2.3	Métodos baseados em sistemas inteligentes e reconhecimento de padrões	14
3.	Sistemas de transmissão HVDC.....	17
3.1	Componentes de um sistema VSC-HVDC.....	18
3.2	Conversores VSC	20
3.2.1	Conversores trifásicos	23
3.2.2	Controles	29
3.3	Configurações de um sistema HVDC	31
3.4	Sistemas multiterminais	33
4.	Localização de Faltas Utilizando Ondas Viajantes	37
4.1	Método de dois terminais	38
4.2	Método de um terminal	39
4.3	Localização de faltas em sistemas multiterminais	41
5.	Metodologia Proposta	42
5.1	Componentes do Sistema Elétrico.....	42
5.2	Metodologia para Detecção e Localização de Falta da Falta	46
5.2.1	Detecção de falta	46
5.2.2	Localização da falta.....	51
5.2.4	Influência do valor velocidade de propagação da onda na localização da falta	56
6.	Resultados	57
6.1	Análises do comportamento do sistema sob condições de falta.....	57
6.2	Análise do método de localização de faltas.....	61
7.	Conclusões	65
7.1	Trabalhos Futuros.....	66
	Anexo	67

Referências Bibliográficas	69
----------------------------------	----

1. Introdução

Desde a criação de sistemas para o fornecimento de energia elétrica sempre houve o questionamento sobre qual seria o tipo de sistema mais adequado para este propósito. Um destes questionamentos é qual o melhor tipo de sistema para a transmissão de energia, corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA)[1]. A princípio a dificuldade de trabalhar com corrente contínua fez com que a corrente alternada fosse escolhida como a mais adequada e até hoje os sistemas baseados neste tipo de corrente são os mais empregados para a transmissão de energia.

A corrente contínua, por outro lado, ganhou força com o desenvolvimento de conversores eletrônicos e com as vantagens que sistemas baseados nestas tecnologias possuem, como por exemplo, as menores perdas na transmissão da energia elétrica. Apesar dos custos elevados dos conversores, esta tecnologia pode ser vantajosa principalmente para sistemas com longas distâncias e redes submarinas, no entanto, ainda hoje sistemas CC (mais conhecidos pela sigla HVDC – *High Voltage Direct Current*) são usados principalmente na conexão de sistemas CA assíncronos[1].

Os sistemas HVDC tradicionais são baseados em conversores fonte de corrente (CSC – *Current Source Converter*). Esta tecnologia é bastante consolidada. No Brasil, por exemplo, ela é usada na transmissão de uma parte da energia de Itaipu e, mais recentemente, o sistema para conectar as usinas de Santo Antônio e Jirau ao sudeste do país utiliza esta tecnologia. No entanto, ela possui baixa flexibilidade, limitando seu uso a sistemas de dois terminais e elevados níveis de potência.

As alternativas para os sistemas CSC são os sistemas baseados em conversores fontes de tensão (VSC – *Voltage Source Converter*). Esta tecnologia utiliza IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) ou GTOs (*Gate Turn-off*) para a fazer a conversão da corrente contínua para a alternada e vice-versa, possuindo como vantagens, uma maior flexibilidade no controle

do fluxo de potência e a possibilidade de conexão de vários terminais (HVDC multiterminal ou MTDC –*Multi-terminal* HVDC), isto é três ou mais conversores conectados por linhas de transmissão de corrente contínua [2].

Entre as possibilidades de aplicação de sistemas VSC- HVDC podem-se citar as seguintes [1]–[4]:

1. Cargas isoladas – a localização de comunidades isoladas e distantes do sistema de transmissão de energia elétrica em CA dificulta a conexão destas com a rede elétrica, desta forma elas são em geral alimentadas por pequenas fontes geradoras. A interconexão destas comunidades com a restante da rede utilizando sistemas VSC – HVDC pode ser uma solução, uma vez que este tipo de sistema pode conectar redes com pouca ou nenhuma geração, mesmo em locais de difícil acesso.
2. Potência elétrica adicional para centros urbanos – os cabos CC ocupam menos espaço do que linhas CA e por isso a transmissão em corrente contínua torna-se uma solução para aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica para alimentar centros urbanos, onde muitas vezes é difícil e caro conseguir permissão para a construção de novas linhas.
3. Fornecimento de energia elétrica para ilhas – a geração de energia elétrica em locais isolados como ilhas em geral é cara, bem como a transmissão de energia para estes lugares, principalmente se houver a necessidade de uso de cabos submarinos. Neste sentido, sistemas VSC-HVDC podem conectar a ilha à rede elétrica localizada em terra e importar a energia elétrica necessária para suprir os consumidores.
4. Sistemas Multiterminais – a tecnologia CSC permite o uso de sistemas de dois terminais, em geral, simplesmente, ligando dois sistemas CAs. Por outro lado, a tecnologia VSC fornece do lado CC uma tensão fixa o que permite a conexão em paralelo com outros VSC-HVDC, constituindo sistemas multiterminais. Tal característica de conversores VSC permite criar sistemas malhados em corrente contínua, similar a sistemas em CA. Desta forma é possível conectar diversos sistemas

de geração, como fontes alternativas de energia, por exemplo melhorando o desempenho destes sistemas.

5. Interconexões de sistemas de potência – o uso de HVDC para conexão, como mencionado anteriormente, é uma aplicação bastante interessante. A vantagem de se utilizar sistemas VSC-HVDC é a possibilidade de controlar o intercâmbio de potência ativa e reativa de forma independente, auxiliando no controle da tensão no ponto de conexão. O uso dessa função pode aumentar a eficiência do sistema de transmissão, pode melhorar o fator de potência do sistema ao qual o VSC está conectado, o que minimiza investimentos em banco de capacitores e compensadores síncronos para regular o fator de potência do sistema, ou melhorar o perfil de tensão.

As vantagens do uso de VSC-HVDC para a transmissão de energia motivam o estudo destes sistemas principalmente na melhoria do desempenho dos sistemas de controle dos VSC-HVDC. Um ponto bastante sensível para o funcionamento dos VSC-HVDC é a ocorrência de curtos-circuitos. Enquanto os sistemas CSC-HVDC apresentam reatores em série com a linha que limitam as correntes de falta, os sistemas VSC-HVDC não contam com esses limitadores de corrente de falta intrínsecos aos mesmos, e a detecção, eliminação e localização das faltas devem ser processos rápidos e eficazes [5].

Em relação à localização de faltas, este tipo de análise é importante para facilitar o trabalho de equipes de manutenção que devem reparar as avarias das linhas no menor tempo possível [3]. Se os cabos forem subterrâneos ou submarinos, este tipo de estudo é ainda mais importante. A localização de falta também se torna mais complexa com o aumento das redes VSC-HVDC, isto é, construindo-se sistemas multiterminais.

Em linhas CA este tipo de estudo é feito utilizando-se medidas de tensão e corrente na frequência fundamental, mas principalmente medidas de impedância, ondas viajantes, componentes de alta frequência na tensão e na corrente geradas devido às faltas, e técnicas baseadas em inteligência artificial [3].

Para a resolução do problema de localização de faltas em redes HVDC é preciso adaptar as técnicas utilizadas em sistemas CA para sistemas de corrente contínua. As técnicas mais

utilizadas são baseadas em ondas viajantes [4], [6]–[12]. Este tipo de método aproveita o fato que no momento de ocorrência da falta é gerada uma onda que se propaga pela linha nos dois sentidos. Desta forma é possível identificar o momento em que a frente de onda se encontra com o terminal da linha. Sabendo a diferença no tempo da onda em cada terminal, e conhecendo a velocidade de propagação de onda na linha é possível calcular a distância entre o terminal e a falta. Este tipo de técnica traz um resultado bastante satisfatório e não depende dos parâmetros da linha. No entanto, é necessário identificar com precisão o instante de chegada da frente de onda no terminal. Além disso, as medições nos terminais devem ser sincronizadas para que a diferença de tempo de chegada da onda seja calculada corretamente. Uma opção para que não seja necessária a sincronização dos medidores é o uso de apenas um medidor em um terminal. Neste caso, além da detecção da onda, é necessária a detecção das reflexões de onda. Este tipo de técnica é mais barata, no entanto tem uma precisão menor[12].

O procedimento descrito anteriormente pode ser utilizado para redes de dois terminais. No entanto, para sistemas multiterminais existem mais caminhos possíveis para a propagação da onda e, portanto, ao medir a chegada da frente de onda não é possível saber qual o caminho que a onda fez. Para resolver este problema, em [10] é proposto um método para redes multiterminais conectadas em estrela, isto é, com um ponto comum. Neste caso ao se detectar a falta, assume-se que ela ocorreu em um ramo do sistema e calcula-se a localização. Como existem mais de dois terminais é possível calcular a localização mais de uma vez, utilizando-se a diferença de tempo na chegada da onda para dois terminais. Repete-se o procedimento considerando todos os ramos e, ao final do processo, apenas uma das localizações encontrada será coerente de acordo com todos os cálculos realizados[10].

Outros tipos de abordagem para o problema de localização de faltas utilizam análises no domínio do tempo como em [13]. Neste caso é necessário conhecer os parâmetros da linha. A vantagem deste tipo de técnica é a não necessidade de detecção da chegada da onda. Desta forma, qualquer intervalo pós-falta pode ser utilizado e a sincronização dos medidores não é algo tão crítico como para os métodos baseados em ondas viajantes.

Outros tipos de técnicas podem ser utilizados para localização de faltas, tais como técnicas baseadas em aprendizagem de máquinas e reconhecimento de padrões como em[14]. Neste caso é necessário conhecer algum tipo de parâmetro de pós falta, como a tensão, por exemplo, para uma determinada localização de falta. Assim a localização é feita a partir das semelhanças entre os dados da falta medidos e os dados já conhecidos previamente.

A maioria dos trabalhos realizados na área de localização de faltas em sistemas de corrente contínua considera um sistema de dois terminais, muitas vezes sistemas baseados em conversores fonte de corrente. Ainda necessita-se de estudos mais aprofundados para sistemas VSC-HVDC multiterminais. Em [10], por exemplo, é considerada uma rede mais complexa, mas a técnica apresentada se limita a sistemas do tipo estrela com um ponto comum, não sendo viável para sistemas com outras topologias. Mais detalhes sobre os trabalhos de localização de faltas em sistemas HVDC serão apresentados no Capítulo 2.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho de mestrado é o desenvolvimento de uma metodologia para localização de faltas em um sistema de transmissão de energia baseado em conversores VSC multiterminal utilizando o princípio de ondas viajantes e considerando dados de dois terminais de cada linha. A metodologia conta com um módulo de detecção de falta em que são empregadas técnicas já propostas na literatura para detectar o evento e disparar o cálculo da localização. É necessário que esta metodologia seja capaz de identificar corretamente o trecho do sistema em que o curto-circuito ocorreu, bem como fornecer o cálculo preciso da distância da falta.

1.2 Organização do Documento

Esta dissertação de mestrado está organizada da seguinte maneira. No capítulo 2 serão apresentados resumidamente trabalhos de localização de faltas em sistemas de corrente contínua. Essa revisão bibliográfica tem por objetivo mostrar quais linhas de pesquisa têm sido mais utilizadas para resolver o problema de localização de falta, ponto de partida deste trabalho.

No capítulo 3 é apresentado o funcionamento de um sistema HVDC. São apresentados os principais componentes deste tipo de sistema, bem como é explicado mais detalhadamente o funcionamento dos conversores fonte de tensão (VSC), bem como as principais topologias de sistemas HVDC.

No capítulo 4 é feita uma explicação dos princípios da localização de faltas através de ondas viajantes. São apresentados os métodos de dois terminais, o método de um terminal, bem como os métodos para detecção da frente de onda.

No capítulo 5 é apresentado o sistema teste utilizado neste trabalho para desenvolver a metodologia proposta.

No capítulo 6 são apresentados os resultados das simulações e da aplicação do método de localização de falta. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

1.3 Publicação

Foi submetido e aceito um artigo para o VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, que ocorreu nos dias 12 a 16 de maio de 2018 em Niterói no estado do Rio de Janeiro.

O título do trabalho é "*Analysis of the Cable Length Impact on the Performance of Differential and Directional Protections in Multi-terminal VSC-HVDC Systems*" e se refere aos métodos de detecção e proteção dos sistemas VSC-HVDC por meio dos algoritmos utilizados neste trabalho (os métodos diferencial e direcional) e o impacto que o tamanho da linha tem na atuação desses sistemas de proteção, bem como o impacto da adição de um indutor nos terminais da linha.

2. Localização de Falhas em Sistemas HVDC

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os métodos de localização de faltas em sistemas de transmissão HVDC. Basicamente existem três tipos de métodos para localização de faltas: métodos baseados em ondas viajantes e transitórios, métodos baseados em regime permanente e métodos baseados em sistemas inteligentes e reconhecimento de padrões. Mais detalhes sobre esses métodos são mostrados nas seções 2,1, 2,2 e 2,3 a seguir.

2.1 Localização de falta através de ondas viajantes.

O primeiro conjunto de métodos, baseados em ondas viajantes, apoia-se no fato de que quando ocorre um distúrbio em um sistema elétrico, este distúrbio provoca uma onda eletromagnética que se propaga pelas linhas a uma determinada velocidade. Conhecendo os tempos de chegada da onda nos terminais da linha é possível determinar a distância do local de ocorrência do distúrbio. Portanto, para esse tipo de método são necessários dispositivos que detectem a chegada da onda. Alguns métodos, embora não levem em consideração a velocidade da onda para o cálculo da distância da falta, utilizam dados do transitório eletromagnético no terminal da linha e, portanto, exigem a correta medição no instante em que esse transitório ocorre. Nesta seção serão apresentados trabalhos que utilizam métodos baseados em ondas viajantes para localizar faltas em sistemas HVDC.

Em [6] os autores utilizam um método fundamentado em ondas viajantes baseado na medição de apenas um terminal para localizar faltas em um sistema baseado em CSC. Para isso, foi empregado o método chamado *Fast Independent Component Analysis* (FastICA) para identificar se a segunda onda detectada no terminal é proveniente da reflexão da primeira onda no ponto de falta, ou se é proveniente da reflexão de onda no outro terminal da linha. Desta forma, dependendo da natureza desta segunda chegada da onda é utilizada uma formulação para o cálculo da localização da falta. Os resultados mostram que o método FastICA é capaz de

detectar corretamente a origem da segunda chegada de onda e o erro médio da distância calculada é menor que 1 km para uma linha de 300 km.

Em [7] é proposto um método para localização de faltas em um sistema de dois terminais baseado em ondas viajantes utilizando medições de apenas um terminal em um sistema VSC-HVDC de dois terminais. Diferentemente de outros métodos este utiliza a detecção da chegada de três frentes de onda. Segundo os autores, este tipo de abordagem elimina o efeito da velocidade da onda nos cálculos. Para a detecção da frente de onda é utilizada a transformada S. Para diferenciar se a segunda e a terceira onda tratam da reflexão da onda no ponto de falta ou no outro terminal da linha, é utilizada a diferença de primeira ordem do sinal determinando-se assim a polaridade da onda. Os resultados mostraram que o método foi capaz de calcular a distância com uma precisão menor que 1 km para uma linha de 1000 km.

Em [8] é utilizado um algoritmo baseado em ondas viajantes para a localização de faltas em um sistema CSC. Os autores utilizam a técnica com medição em um terminal e dois terminais. Para a detecção da frente de onda foi utilizada a transformada S. Os resultados mostraram que para o estudo conduzido os métodos são eficazes, com um erro máximo da ordem de 3% da distância total da linha. Em geral, o método de dois terminais se mostrou mais preciso em relação ao método de um terminal.

Em [4] é utilizado um método baseado em ondas viajantes para localização de faltas em um sistema de transmissão CSC-HVDC. Diferentemente da maioria dos métodos que utiliza o sinal de tensão nos terminais, ou a medição de corrente, os autores propõem a utilização de uma sobreposição destes sinais. A partir deste sinal sobreposto é utilizado um filtro morfológico (Morfologia Matemática) para detectar a chegada da frente de onda no terminal. É feito um estudo teste do método utilizando medições de um terminal e dois terminais, em que o erro máximo do estudo realizado foi de cerca de 5%, sendo que para esse estudo o método de dois terminais se mostrou mais eficaz.

Em [9] os autores utilizam ondas viajantes para localizar faltas em um sistema CSC de dois terminais em uma linha composta por segmentos aéreos e subterrâneos. A dificuldade adicional neste caso é a diferença de velocidade de propagação da onda viajante em cada segmento da linha, o que impede o uso das equações tradicionais diretamente. Neste caso, a distância é calculada considerando que a falta acontece em cada segmento de linha diferente. Depois verifica-se qual dos valores calculados é coerente com o comprimento dos segmentos e assim determina-se em que segmento está a falta. A detecção da onda é feita com a transformada wavelet (WT do inglês *Wavelet Transform*) discreta e considera-se a medição nos dois terminais da linha, o que exige a sincronização das medições via GPS. O método foi testado com sinais ruidosos. Neste caso a precisão do método caiu.

Por sua vez [10] utiliza ondas viajantes para localizar faltas em sistemas multiterminais em estrela, isto é, sistemas cujos conversores são conectados com um ponto comum. Neste caso, para definir em qual segmento a falta ocorreu, os cálculos são realizados considerando todas as possibilidades tomando os dados de dois terminais. Isso significa que para cada segmento possível são determinados diferentes valores de distância. A seguir é feita uma análise que avalia quais valores de distância são coerentes e assim determina-se qual o segmento correto. Para detectar a frente de onda é utilizada a transformada wavelet contínua (CWT - *Continuous Wavelet Transform*). Por se tratar de um método que utiliza dados de dois terminais é necessária a sincronização das medições. O método se mostrou eficaz na determinação do segmento do sistema em que a falta ocorre, bem como no cálculo da distância da falta em relação aos terminais da linha. No entanto, o método se limita a sistemas do tipo estrela, não podendo ser aplicado para outras topologias.

Em [11] foi utilizado um método baseado em ondas viajantes para sistemas multiterminais. De acordo com os autores, esse método pode ser utilizado em um sistema com qualquer topologia contendo malhas e partes radiais. O método se baseia na ideia de que quando uma falta ocorre, a onda viajante se propaga e chega primeiramente ao detector da onda através do menor caminho (considerando-se as possíveis diferenças de velocidade em diferentes

segmentos de linha) e assim é possível determinar o segmento e a localização da falta. O método se utiliza de informações de diversos detectores de onda sendo necessária, portanto, a sincronização dos medidores. Contudo, não é preciso que se utilizem os detectores em todos os nós do sistema. Para a detecção da frente de onda foi utilizada a transformada wavelet contínua. Os resultados do estudo apresentado mostraram que o método é eficaz, sendo que o maior erro encontrado foi de aproximadamente 1%.

Em [12] é usado um método baseado em ondas viajantes para a localização de faltas em um sistema de dois terminais baseado em conversores fonte de corrente. Os autores demonstram a relação entre a frequência natural desta onda, o seu coeficiente de reflexão e a distância da falta. O método utiliza uma janela de 10ms de medição de corrente em um terminal da linha, isto é, não é necessário o uso de comunicação entre os terminais. O método se mostrou eficiente para a localização das faltas e mostrou robusto frente a variações de resistência de falta.

Em [15] é proposto um método de detecção e localização de faltas polo-polo em um sistema HVDC multiterminal malhado baseado na medição da tensão do reator CC. Para este método é necessário definir limites de tensão no reator e é medido o tempo que esta tensão leva para atingir tais limites. Este tempo então é usado como parâmetro para a detecção e localização da falta. Para evitar que se detectem outros eventos que não são de interesse é necessário estipular um valor de tempo mínimo que se quer observar. O método se mostrou eficiente e robusto contra variações do valor de resistência de falta. Uma vantagem deste método é a não necessidade de comunicação entre os terminais do sistema de transmissão. Embora o método não utilize os princípios de localização de falta por ondas viajantes, foi inserido nesta subseção por utilizar dados de transitório do sistema, o que exige a correta medição deste transitório no instante de chegada da onda.

Em [16] é apresentado um método de localização de faltas para sistemas MTDC baseado em *electromagnetic time reversal*. Para isso, a localização de falta considera a atuação da proteção e a abertura dos disjuntores. É necessário conhecer previamente a configuração do

sistema, bem como suas características. Desta forma o algoritmo assume uma determinada localização da falta e é calculada a energia do sinal de falta para a localização considerada até que isso seja feito para todo sistema. A localização da falta enfim é tomada a partir da maior energia encontrada. Segundo os autores, o método se mostrou eficiente e um bom indicativo da linha faltosa.

Em [17] é proposto um método de localização de faltas para um sistema de dois terminais, baseado em ondas viajantes de um terminal, sendo que a linha de transmissão pode ser composta por diversos segmentos de linha, como cabos subterrâneos, submarinos e linhas aéreas. Nesta metodologia são detectados, além dos tempos de chegada das frentes de onda, a polaridade das ondas no terminal. De posse destes tempos são feitas diversas simulações de faltas, em diferentes locais da linha, utilizando os parâmetros teóricos desta linha. Aquela posição simulada que obtiver os tempos mais parecidos com os medidos, respeitando a polaridade das ondas medidas, é considerada a posição de falta. De acordo com os autores, o método mostrou bons resultados e possui a vantagem de ser um método de apenas um terminal, porém possui a desvantagem da necessidade do conhecimento dos parâmetros do sistema, o que geralmente não é necessário em um método de ondas viajantes. Além disso, de acordo com os autores o método pode obter melhores resultados caso seja aplicado nos dois terminais da linha e a distância indicada seja a média dos dois cálculos. Embora isso leve à utilização das medidas nos dois terminais da linha, não leva à necessidade de sincronização destas medições.

2.2 Localização de faltas baseados em medições de regime permanente

Métodos baseados em regime permanente buscam calcular a distância da falta por meio do valor da resistência medida em um terminal da linha. No entanto, este tipo de técnica é bastante suscetível a diferentes valores de resistência de falta. Nesta seção são apresentados métodos baseados em medições de regime permanente. Em geral a grande vantagem deste tipo de método é a possibilidade de a medição ser feita em qualquer momento pós falta, não sendo necessário analisar o transitório.

Em [13] os autores utilizam um método baseado na distribuição de tensão em um sistema de dois terminais baseado em conversores fonte de corrente (CSC). Este método utiliza medição de pós falta nos dois terminais da linha. Desta forma, para cada terminal o algoritmo calcula a distribuição de tensão baseada na queda de tensão devido à resistência da linha. Tal distribuição de tensão será correta apenas entre o terminal analisado e o ponto de falta. Comparando-se as informações extraídas dos dois pontos de falta, calcula-se o ponto de menor erro entre as duas distribuições calculadas, e, conseqüentemente, o ponto de falta. O método se mostrou eficiente para diferentes valores de resistência de falta e não necessita de uma alta frequência de amostragem e tampouco de uma perfeita sincronização entre a medição dos terminais.

Em [18] mostra-se uma comparação entre a localização de faltas com ondas viajantes e um método baseado em impedância "ativa" em um sistema de dois terminais baseado em conversores fonte de tensão. Para o caso de ondas viajantes, os autores utilizam tanto o método de um terminal quanto o método de dois terminais, sendo que a detecção é feita por meio da transformada wavelet contínua. O método de impedância ativa, por sua vez, consiste na introdução de uma fonte de tensão no sistema após a abertura das chaves. Desta forma, a medição de corrente e tensão é usada para calcular a impedância aparente entre o terminal da linha e o ponto de falta. Uma limitação desta técnica é que ela pode ser usada apenas para uma linha de dois terminais. O método se mostrou capaz de localizar as faltas, no entanto, obteve maiores erros em comparação com os métodos de ondas viajantes. Além disso, o método de impedância ativa necessita da fonte de tensão, o que aumenta os custos de emprego da técnica.

Em [19] é proposta uma melhoria no algoritmo apresentado em [13]. Neste caso também é utilizado o cálculo da distribuição de tensão ao longo da linha. No entanto, é realizado um estudo que mostra que os cálculos da localização da falta podem ficar mais precisos caso a distribuição de tensão seja calculada considerando uma janela que abrange o tempo de ocorrência da falta. Para garantir o uso desta janela, é usada a transformada wavelet para detectar o tempo de chegada da onda nos terminais da linha e assim estimar o tempo de

ocorrência da falta. Comparando os resultados obtidos em [13] e [19] é possível notar que os erros obtidos na localização da falta foram menores em [19] mostrando que de fato o método foi aprimorado utilizando-se a janela de dados contendo a chegada da falta.

Em [20], utiliza-se um método chamado "*hand shaking method*" para manter o funcionamento da rede CC, mesmo que não seja possível o uso de disjuntores CC para isolar a linha faltosa. Para isso são utilizadas chaves CC, que não são capazes de abrir o sistema enquanto existe corrente circulando por elas, mas cujo uso é mais viável, segundo os autores. Como essas chaves não são capazes de abrir o circuito energizado é necessária a abertura de todos os disjuntores CA. O método "*handshaking*" funciona da seguinte maneira: comparando-se os dados de pré-falta com os dados de pós-falta é possível identificar qual o sentido da corrente de falta em cada terminal. Com esses dados, cada terminal elege uma linha como sendo a possível porção faltosa e abre a chave desta linha. Depois de um tempo pré determinado, os disjuntores CA são fechados e as tensões CC são restabelecidas, as chaves abertas cujas tensões se igualam, são fechadas, restabelecendo assim a rede CC, porém com a linha faltosa isolada. Não se trata de um método que determina com precisão a localização da falta no sistema, mas os resultados mostram que ele é capaz de indicar a linha em que essa falta se encontra. No entanto a necessidade de isolar todo o sistema por um determinado tempo dificulta seu uso na prática.

Em [21] é proposto um método para a localização de faltas de alta impedância em um sistema de transmissão VSC-HVDC utilizando análise de harmônicos. Neste trabalho, os autores demonstram que, para um sistema sob uma condição de falta de alta impedância, existe uma relação entre a defasagem dos harmônicos da tensão e da corrente no sistema. Desta forma, para o cálculo da distância da falta, é feita uma decomposição dos sinais de tensão e corrente CC do sistema, através de uma FFT (*Fast Fourier Transform*), em que a frequência base para o cálculo dos harmônicos é a frequência do sistema CA. Para o cálculo da defasagem entre a tensão e a corrente, então é utilizada a harmônica de maior amplitude.

2.3 Métodos baseados em sistemas inteligentes e reconhecimento de padrões

Os métodos baseados em sistemas inteligentes, em geral, usam dados históricos de tensão e corrente de eventos de faltas. A partir desses dados aplica-se alguma ferramenta que reconhece o padrão entre a resposta da tensão e/ou da corrente em relação ao local de ocorrência da falta. Essa ferramenta inteligente pode ser, por exemplo, uma rede neural artificial. Uma dificuldade de uso destes métodos é a necessidade de um banco de dados de faltas representativo em relação às características das faltas que podem ocorrer no sistema elétrico. Nesta seção são apresentados trabalhos que usam estes métodos.

Em [22] é utilizada uma rede neural artificial para a localização de faltas em um sistema VSC-HVDC de dois terminais. Foi utilizada uma rede neural com treze neurônios na camada escondida e um neurônio na camada de saída. A entrada utilizada na rede foi o sinal de corrente pré-processado através de uma análise wavelet para representação no domínio da frequência. Os resultados mostraram que a rede neural foi capaz de calcular a localização da falta com uma boa precisão tendo se mostrada ainda mais precisa para faltas de baixa impedância. No entanto, é necessária uma grande quantidade de dados de falta para a realização do treinamento da rede neural.

Na referência [14] é utilizado um método baseado em reconhecimento de padrões e correlação de Pearson para a localização de faltas em um sistema CSC-HVDC. A vantagem deste método é que utiliza dados de um único terminal, não sendo necessária a comunicação entre os terminais e, além disso, é possível usá-lo para quaisquer tipos de falta. São utilizados dados de pós-falta, mais especificamente dados de uma janela da tensão pós-falta. É então calculada a similaridade entre os dados de entrada e padrões já definidos previamente por meio dessa correlação. Uma limitação deste método é a necessidade de treinamento, o que exige uma grande quantidade de dados de falta.

Em [23] os autores utilizam um método misto que combina ondas viajantes, transformada wavelet e lógica *Fuzzy*, para localização de faltas em um sistema multiterminal. Desta forma o sinal de corrente é pré-processado pela transformada wavelet, estes dados pré-processados alimentam o analisador *Fuzzy* que determina o tipo de falta. As regras *Fuzzy* e as funções de pertinência do sistema foram definidas com base em simulações anteriores. A partir daí é utilizado o princípio das ondas viajantes para determinar a localização da falta no sistema. Os resultados mostram que o método foi eficaz na localização das faltas no sistema estudado. A dificuldade do uso de uma técnica *Fuzzy* é a necessidade de ajustes das regras e funções de pertinência o que pode exigir, como neste caso estudado, a simulação previa do sistema.

3. Sistemas de transmissão HVDC

Como colocado no Capítulo 1, a flexibilidade e simplicidade que os elementos como transformadores e motores de indução dão a sistemas de corrente alternada tornaram este tipo de sistema preferível para o uso da energia elétrica. No entanto, os estudos em torno da utilização da corrente contínua e suas vantagens continuaram, e hoje em dia se reconhece a vantagem de sistemas HVDC em algumas situações.

A principal dificuldade no uso de tecnologias envolvendo HVDC é a necessidade do uso de conversores. Este tipo de equipamento, que tem por objetivo a transformação da corrente alternada em corrente contínua, ou vice versa, possui um custo muito elevado em comparação com um transformador, por exemplo. Inicialmente foram desenvolvidos sistemas baseados em conversores a válvulas, com comutação pela linha (*Line Commutated Converter* - LCC). Posteriormente, as válvulas foram substituídas por tiristores e alguns sistemas foram construídos ao redor do mundo com reconhecida vantagem econômica.

Tal vantagem econômica se deve pelo seguinte motivo: inicialmente a construção de uma linha de transmissão em corrente contínua possui um custo mais elevado, uma vez que uma estação conversora é mais cara. No entanto, as linhas e as torres para transmissão em CC são mais simples que as linhas e torres para CA. Portanto têm um menor custo de implantação por quilômetro de linha. Em alguns casos, em sistemas CA, é necessária a instalação de compensadores no sistema, o que aumenta ainda mais os custos. Além disso, a redução do número de cabos e a diminuição do efeito pelicular fazem com que a perda de energia seja menor em um sistema de corrente contínua.

Desta forma, para sistemas com longas distâncias, os custos de um sistema CA se igualam, ou até mesmo ultrapassam os custos de um sistema HVDC, tornando este último mais vantajoso[2].

3.1 Componentes de um sistema VSC-HVDC

Um sistema de transmissão HVDC é composto por diversos elementos que ajudam na interface entre os sistemas CA e o sistema de transmissão CC. Estes elementos serão descritos mais detalhadamente a seguir. A Figura 1 apresenta resumidamente uma estação conversora e seus elementos.

Figura 1: Partes de uma Estação Conversora.

Transformador

O transformador faz a interface entre o sistema CA e o inversor. Pode ser utilizado para fazer o ajuste do nível de tensão entre a rede e a entrada do inversor. Além disso, fornece uma reatância adicional para o sistema, que deve ser levada em conta para o controle das potências ativa e reativa do sistema. Com o intuito de isolar a corrente de sequência zero do conversor o transformador geralmente é ligado em delta.

Filtro CA

O chaveamento dos conversores gera harmônicos na tensão e corrente do sistema CA. Com o intuito de minimizar estes harmônicos é introduzido um filtro CA no sistema.

Reator do conversor

Este reator permite o controle da potência no sistema. Além disso, o reator limita a corrente de falta durante um possível curto-circuito na linha CC.

Conversor

Um conversor é o elemento que efetivamente faz a interface entre o sistema CA e o sistema CC. É no conversor CC que de fato o controle de tensão e potência através do controle do chaveamento dos elementos semicondutores. Os conversores podem ser do tipo CSC ou VSC. Na seção 3.2 será apresentado o princípio básico da operação do conversor VSC, uma vez que sistemas VSC-HVDC são os objetos de estudo deste trabalho.

Capacitor CC

Este capacitor ajuda a manter a tensão CC constante, condição necessária para o correto funcionamento das chaves. Desta forma, os controles são capazes de atuar mantendo o fluxo de potência ativa e reativa nos níveis desejados.

Filtro CC

Assim como ocorre do lado CA, o chaveamento do conversor imprime uma variação no nível de tensão CC (harmônicos). Para minimizar esse efeito pode ser inserido um filtro CC em paralelo com o capacitor supracitado.

Reator de Alisamento

A função do reator CC é diminuir as oscilações da corrente na linha CC, bem como limitar a corrente de uma possível falta no sistema. Este tipo de reator é imprescindível para sistemas CSC.

Linha CC

A linha de transmissão é o elemento que faz a ligação entre as diferentes estações conversoras no sistema HVDC. Em relação a um sistema CA, em que são necessários três fases para o transporte de energia, em um sistema CC são necessários apenas dois cabos, e, em alguns casos apenas um, como descrito na seção 3.3. A Figura 2 a seguir mostra,

esquemáticamente, uma torre de transmissão CC e um cabo subterrâneo CC ilustrando uma linha de transmissão em corrente contínua.

Figura 2: Esquemático de uma Torre de Corrente Contínua e um Cabo Subterrâneo.

3.2 Conversores VSC

Para entender o funcionamento de uma rede de transmissão baseada em tecnologia VSC-HVDC é fundamental entender o funcionamento e o controle dos conversores fonte de tensão.

A Figura 3 mostra um conversor simples de dois níveis com apenas uma fase.

Figura 3: Conversor Monofásico.
Adaptado de [24].

O funcionamento do conversor se dá da seguinte maneira. Em um primeiro momento, fecham-se as chaves C2 e C3. Consequentemente, a tensão sobre a carga será $-V_{cc}$, em seguida abrem-se essas chaves e fecham-se as chaves C1 e C4, resultando em uma tensão na carga igual a V_{cc} completando um ciclo. Esse processo então se repete produzindo uma onda quadrada. A Figura 4 mostra essa onda de tensão resultante na carga. O tempo T é o período da onda e varia de acordo com a frequência do sistema CA que se pretende utilizar o conversor. Por exemplo, no Brasil a frequência é 60 Hz, portanto o período é de aproximadamente 16,67 ms.

Figura 4: Onda Quadrada Gerada pelo Conversor.
Adaptado de [24].

Idealmente a forma de onda da tensão em um sistema CA é senoidal, o que contrasta com a forma quadrada apresentada na Figura 4. Uma análise da transformada de Fourier [24] deste sinal nos mostra que este tipo de onda pode ser decomposta em uma soma de diferentes senóides com frequências distintas. A senóide de frequência igual à frequência da rede é chamada de componente fundamental e as demais são chamadas componentes harmônicas. A

presença das componentes harmônicas no sinal de tensão pode ocasionar diversos problemas na rede como, por exemplo, sobre aquecimento dos componentes e diminuição da sua respectiva vida útil [25].

Desta forma é importante o uso de técnicas para diminuir os componentes harmônicos do sinal de saída do conversor. Uma das maneiras mais empregadas é a utilização da modulação PWM (*pulse-widthmodulation*) [24]. Esse tipo de técnica substitui o chaveamento contínuo durante o semi-ciclo positivo e o semi-ciclo negativo por um chaveamento variável de acordo com a comparação entre uma portadora (de alta frequência) e a onda que se deseja obter na saída (modulante).

A Figura 5 ilustra a modulação de uma onda senoidal por uma portadora triangular. Quando o valor da onda senoidal for maior que a onda triangular deve-se fechar as chaves 1 e 4, e caso contrário, deve-se fechar as chaves 2 e 3.

Figura 5: Modulação PWM.
Adaptado de [24].

Como resultado deste tipo de operação o sinal de tensão na saída fica como na Figura 6. É mostrado também o primeiro harmônico da saída de tensão. Os valores das demais harmônicas ficam menores que em um caso sem PWM [26].

Figura 6: Saída do inversor com modulação PWM.
Adaptado [24].

Para o correto funcionamento dos conversores, como descrito anteriormente é necessário o uso de dispositivos semicondutores apropriados para VSC. Os tiristores utilizados em CSCs não são adequados para conversores VSCs. Em geral as chaves utilizadas são os IGBTs ou GTOs, por se tratarem de chaves alto-comutadas, isto é, enquanto os tiristores só conseguem interromper a corrente quando esta passa naturalmente pelo zero, os IGBTs e GTOs são capazes de interromper a corrente cortando-se o sinal do *gate*.

3.2.1 Conversores trifásicos

O princípio de funcionamento de um conversor trifásico é similar ao funcionamento de um conversor monofásico. A Figura 7 mostra um exemplo de um conversor trifásico, que possui três braços, cada braço corresponde a uma fase.

Figura 7: Conversor Trifásico.
Adaptado [26].

As chaves C1 e C4 correspondem à fase a, as chaves C3 e C6 à fase b e as chaves C5 e C2 à fase c. Caso as chaves C1 e C6 estejam fechadas, por exemplo, a tensão V_{ab} entre as fases a e b será V_{cc} , por outro lado, caso as chaves C1 e C3 estejam fechadas ao mesmo tempo essa diferença de tensão será nula. Os diodos conectados em paralelo com os IGBTs permitem a circulação de corrente no sentido contrário ao permitido pelas chaves, mesmo que estas não estejam acionadas. Desta forma estes diodos são chamados de diodos de roda livre.

Em uma situação de falta a corrente nos braços do conversor aumenta consideravelmente, o que pode causar danos às chaves. Para evitar esses danos o chaveamento é desligado e as IGBTs param de conduzir. No entanto, a corrente ainda circula pelos diodos de roda livre, o que faz com que o conversor passe a se comportar como um retificador não controlado.

Para produzir uma tensão trifásica equilibrada na saída do conversor é comum utilizar dois tipos de operação: condução em 180° e condução em 120° [24]. Caso seja necessário conectar esse dispositivo em uma rede ativa (com geração) é necessário o sincronismo do conversor com essa rede, neste caso utiliza-se um PLL (*phased-locked loop*) para indicar a referência de fase do sistema[26].

3.2.1.1 Condução 180°

Neste tipo de operação as chaves se mantêm em operação por 180°, isto é, metade do período de onda. Neste caso é necessário o cuidado de que duas chaves e um mesmo braço não sejam acionadas ao mesmo tempo para evitar curto-circuitar a fonte CC.

A Figura 8 a seguir mostra a sequência de chaveamento para a condução 180°, a Figura 9 mostra o valor das tensões de fase para essa mesma sequência de chaveamento.

Figura 8: Sequência de Chaveamento para Condução 180°.
Adaptado de [26].

Figura 9: Tensões de Linha para Condução 180°.
Adaptado de [26].

Por sua vez as tensões de fase podem ser obtidas através das relações

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (1)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

A Figura 10 mostra as tensões de fase para esse tipo de condução.

Figura 10: Tensões de Fase para Condução 180°.
Adaptado de [26].

3.2.1.2 Condução 120°

Neste tipo de operação do conversor a chave se mantém fechada por 120°, ou seja, um terço do período. Como consequência, apenas duas chaves conduzem a cada instante de funcionamento.

A Figura 11 mostra a sequência de chaveamento, enquanto a Figura 132 mostra a tensão de linha V_{ab} e a tensão de fase V_{an} para esse tipo de condução.

Figura 11: Sequência de Chaveamento pra Condução 120°.
Adaptado [26].

Figura 12: Tensões de Linha e de Fase para Condução 120°.
Adaptado [26].

Figura 13: Tensões de Linha e de Fase para Condução 120°.
Adaptado [26].

3.2.2 Controles

Uma das grandes vantagens do uso de conversores VSC é a possibilidade de controle independente da potência ativa e reativa [26]. A Figura 14 ilustra um conversor conectado a um sistema CA (representado por uma fonte de tensão) através da reatância equivalente do transformador e do reator do conversor.

Figura 14: Conexão de um Conversor a um Sistema CA.

A potência ativa e reativa podem ser expressas por meio das seguintes equações [2]

$$P = \frac{V_{sis} V_{conv} \sin(\delta)}{X_{eq}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{(V_{conv} \cos(\delta) - V_{sis}) V_{sis}}{X_{eq}} \quad (3)$$

Nessas equações V_{sis} representa a tensão no sistema, V_{conv} representa a tensão gerada pelo conversor e X_{eq} a reatância entre eles. O ângulo δ é a diferença angular entre as tensões do sistema e do conversor.

Desta forma, controlando-se a defasagem entre o sistema CA e a tensão do conversor é possível controlar o valor da potência ativa do sistema. Caso a tensão do conversor esteja atrasada em relação à tensão do sistema CA, o sistema estará injetando potência ativa no conversor, ou seja, o conversor estará se comportando como um retificador. Caso contrário (a tensão do conversor estiver adiantada em relação ao sistema) o conversor está se comportando como um inversor fornecendo potência ativa ao sistema CA.

Por outro lado, o controle da potência reativa é feito através do controle da magnitude da tensão do conversor. Como a variação do ângulo de fase é pequena isto significa que $\cos\delta$ é aproximadamente 1. Desta forma, caso a tensão do conversor seja menor que a tensão do sistema a porção $(V_{conv} \cos \delta - V_{sis})$ na equação (3) será negativa, isto é, Q será negativo e o conversor absorve reativos. Por outro lado, se a tensão do conversor for maior que a tensão do sistema, o conversor fornece reativos para o sistema.

Uma forma de controle alternativa para o controle direto da fase e amplitude da tensão de saída do conversor é o controle vetorial. Neste tipo de estratégia de controle os valores de tensão e corrente dos conversores são convertidos dos tradicionais valores de componentes de fase para componentes d-q, isto é eixo direto e eixo em quadratura. Estes valores de tensão e corrente d-q são utilizados na malha de controle e a saída deste controle é novamente transformada em componentes de fase para o chaveamento do conversor.

Neste caso as potências ativa e reativa do conversor podem ser descritas por meio das equações (4) e (5) a seguir [26].

$$P = \frac{3}{4} v_d i_d \quad (4)$$

$$Q = -\frac{3}{4} v_d i_q \quad (5)$$

Em que v_d e i_d são a tensão e corrente no eixo direto, respectivamente, e i_q é a corrente no eixo em quadratura.

As equações 4 e 5 mostram que o controle das potências ativa e reativa podem ser obtidos independentemente através do controle da corrente no eixo direto e o controle da corrente no eixo em quadratura, respectivamente. Desta forma, o controle vetorial é feito a partir de uma malha interna que controla a corrente e uma malha externa que fornece uma referência para esta corrente. Esta malha externa pode controlar diversos parâmetros, como as potências ativa e reativa ou tensão CC. A Figura 15 ilustra uma malha de controle, em que se controla a potência ativa e a potência reativa do conversor. Nesta figura o bloco PLL fornece a referência de ângulo do sistema, que é essencial para a transformação $d-q$. O elemento WL_{eq} representa a frequência e a indutância equivalente do sistema, e é importante devido ao acoplamento não desejado entre o sistema d e q que faz com que o controle em uma malha afete a outra [26]. Embora a figura apresente o controle de P e Q, estes poderiam ser substituídos pela tensão DC e tensão AC[26].

Figura 15: Estrutura do Controle dq.
Adaptado de [26].

3.3 Configurações de um sistema HVDC

Uma vez conhecidos os elementos de um sistema de transmissão HVDC, bem como o funcionamento do conversor fonte de tensão (VSC), é importante conhecer as diferentes configurações de sistemas de transmissão HVDC que são usualmente empregadas. Nesta seção

serão mostradas as diferentes configurações, e será feita uma breve descrição sobre cada uma delas.

A configuração mais simples para um sistema HVDC é a configuração monopolar assimétrica. Ela recebe este nome por possuir apenas um condutor. Este condutor pode representar o polo positivo ou o polo negativo e o retorno da corrente acontece pela terra. A Figura 16 a seguir mostra um sistema HVDC monopolar assimétrico.

Figura 16: Sistema HVDC Configuração Monopolar Assimétrico

Um sistema monopolar assimétrico possui a vantagem de ser mais barato, uma vez que utiliza um menor número de condutores. No entanto, não é tão confiável quanto outros tipos de configuração, além de sofrer, em alguns lugares, restrições legais devido ao retorno pela terra.

Uma alternativa a este tipo de sistema é a configuração monopolar assimétrica com retorno metálico. Neste tipo de configuração o retorno é feito por um segundo condutor de baixa tensão.

Outra configuração bastante utilizada é a configuração monopolar simétrico. Neste caso são utilizados dois condutores de polaridade oposta para a transmissão da potência. Apenas um conversor é utilizado e a referência de neutro é dada através dos capacitores CC. A Figura 17 mostra um exemplo deste tipo de configuração.

Figura 17: Sistema HVDC Configuração Monopolar Simétrico.

Por fim, uma configuração bastante interessante é a bipolar. Como no caso anterior a configuração bipolar utiliza dois condutores de polaridade opostas. No entanto, em cada terminal são utilizados dois conversores sendo que a referência de neutro é dada entre estes dois conversores. A Figura 18 ilustra esta configuração.

Figura 18: Sistema HVDC Configuração Bipolar.

Embora a adição de mais conversores aumente os custos de um sistema bipolar, este sistema é capaz de continuar suprindo metade da sua potência caso haja uma falta em uma das linhas, neste caso o sistema pode continuar operando como um sistema monopolar assimétrico, como descrito anteriormente. Com isto aumenta-se a disponibilidade do sistema.

3.4 Sistemas multiterminais

O uso de conversores fonte de tensão para a transmissão em corrente continua permite que mais de dois conversores sejam interconectados pelo lado CC. Isto é o que se denomina sistema HVDC multiterminal, ou MTDC. Esta possibilidade abre caminho para a criação de grandes redes que conectam diferentes fontes geradoras aos pontos de carga, semelhante ao que

ocorre para sistemas CA, e desta forma os sistemas CC deixam de ser apenas *links* que conectam grandes geradores a cargas longínquas ou façam a conexão entre sistemas com frequências diferentes, como a maioria das linhas CC hoje em dia.

Além disso, é possível aproveitar situações em que já seja necessária a inserção de algum tipo de conversor como sistemas fotovoltaicos e, em alguns casos, sistemas eólicos, para que a transmissão seja feita em corrente contínua, ou até mesmo em casos onde é vantajoso utilizar HVDC para transmissão em cabos submarinos, por exemplo.

A Figura 19 ilustra uma possível rede MTDC conectando diversas fontes o centro de carga contendo linhas aéreas, e cabos submarinos.

Figura 19: Exemplo de uma Rede MTDC.

4. Localização de Faltas Utilizando Ondas Viajantes

Neste capítulo serão detalhados os princípios de funcionamento dos métodos baseados em ondas viajantes para localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica. Este princípio baseia-se na seguinte ideia: quando uma falta ocorre em um sistema de transmissão, a perturbação gerada por essa falta irá se propagar através da linha como uma onda eletromagnética, portanto uma onda de tensão e corrente. Esta onda viajará a uma velocidade que depende das características da linha, conforme (6) [27].

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Em que L é a indutância característica da linha e C é a capacitância característica desta linha.

Uma vez calculada a velocidade de propagação da onda na linha estudada, é possível calcular a distância em que uma determinada falta ocorreu conhecendo o tempo que a onda demora para percorrer a linha até o seu terminal. A equação (7) mostra que o tempo (t) necessário para que a onda gerada no ponto de falta no instante t_0 chegue ao terminal 1 da linha da Figura 20 depende da velocidade e da distância percorrida.

Figura 20: Propagação da Onda Produzida por uma Falta.

Adaptado [10].

$$t - t_0 = \frac{d}{v} \quad (7)$$

É importante notar que a princípio não se tem conhecimento sobre qual é o instante t_0 de ocorrência da falta. Desta forma não é possível usar este instante de tempo como referência, sendo necessária a observação de, no mínimo, duas chegadas da onda para o cálculo de d .

Existem basicamente dois tipos de métodos para a localização de faltas utilizando ondas viajantes [8]. O método de dois terminais e o método de um terminal. Estes dois métodos serão detalhados a seguir.

4.1 Método de dois terminais

Este método consiste na medição dos instantes de tempo nos dois terminais da linha. Por exemplo: na Figura 20 uma falta no instante t_0 gera uma onda que se propaga nas duas direções da linha. Seja t_1 o instante de tempo que a onda chega ao terminal 1, e t_2 o instante de tempo que a onda chega ao terminal 2. Então, tem-se:

$$t_1 - t_0 = \frac{d}{v} \quad (8)$$

$$t_2 - t_0 = \frac{L - d}{v} \quad (9)$$

Subtraindo (8) de (9) temos:

$$(t_1 - t_0) - (t_2 - t_0) = \frac{d}{v} - \frac{L - d}{v} \quad (10)$$

Ou seja

$$(t_1 - t_2) = \frac{2d - L}{v} \quad (11)$$

Isolando d

$$d = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (12)$$

A equação (12) mostra que mesmo desconhecendo o instante t_0 é possível conhecer a distância da falta a partir da diferença de tempo entre a chegada da onda ao terminal 2 e terminal 1 ($t_2 - t_1$).

Neste caso a precisão do método está diretamente relacionada à precisão na medição desta diferença. Assim é necessária a sincronização dos medidores nos dois terminais da linha, além disso, é preciso que haja comunicação entre os dois terminais, o que aumenta o custo do sistema de localização de faltas.

4.2 Método de um terminal

Uma alternativa ao método de dois terminais é o método de um terminal. A vantagem deste método é a utilização da medição em apenas um terminal, o que dispensa a necessidade de comunicação e sincronização entre os medidores. Para isso o método utiliza as reflexões da onda propagada para o cálculo da distância. A Figura 21 ilustra as reflexões da onda em uma linha de transmissão.

Figura 21: Reflexões de Onda em uma Linha de Transmissão.
Adaptado [10].

Como pode ser notado pela Figura 21, diferentes reflexões da onda atingem um terminal da linha em diferentes instantes de tempo. Na Figura 21 (a), por exemplo, no instante de tempo t_2 o terminal 1 é atingido pela reflexão da onda no ponto de falta. Na Figura 21 (b), por outro, lado o instante de tempo t_2 indica a chegada no terminal 1 da onda refletida no terminal 2.

Este exemplo mostra uma dificuldade adicional no método de um terminal, comparado com o método de dois terminais. Enquanto que no método de dois terminais é necessário observar apenas a primeira frente de onda, no método de um terminal é necessário observar outras frentes de onda, sendo que a princípio não se sabe se as frentes de onda são devido à reflexão no ponto de falta, ou à reflexão no outro terminal.

Isto quer dizer que é necessário o uso de algum método para diferenciar a origem da onda refletida. Em geral os métodos utilizam a polaridade da onda como fator para essa diferenciação.

Considerando-se que a segunda frente de onda seja a reflexão no ponto de falta, o tempo entre a primeira e a segunda detecção da onda é o tempo para percorrer a distância d duas vezes. Portanto a distância é calculada através da equação (13).

$$d = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (13)$$

Caso a segunda frente de onda seja a reflexão no terminal dois (Figura 21 (b)), então o tempo entre a primeira e a segunda medição dependerá da distância total da linha e será calculada de acordo com a equação (14).

$$d = \frac{2L - v(t_2 - t_1)}{2} \quad (14)$$

Existem ainda trabalhos que consideram outras reflexões de onda [7] que não serão abordadas neste documento, porém o raciocínio é semelhante.

Independentemente do uso do método de um terminal ou dois terminais, a localização de falta através de ondas viajantes se baseia na correta detecção do tempo de chegada da frente de onda no terminal da linha. A técnica de detecção utilizada, portanto, é fundamental para a precisão do método.

As principais ferramentas de detecção de frente de onda que estão sendo empregadas para sistemas HVDC são: transformada wavelet discreta, transformada wavelet contínua, transformada S, morfologia matemática e detectores de onda colocados na linha[4], [6]–[12].

4.3 Localização de faltas em sistemas multiterminais

As técnicas apresentadas nas seções 4.1 e 4.2 foram descritas para sistemas de dois terminais, e a maioria dos trabalhos na área de detecção de faltas em sistemas HVDC se refere a esse tipo de sistema. Para sistemas multiterminais é interessante notar que o caminho da onda não é único, e múltiplas reflexões em diferentes partes do sistema devem ocorrer.

Deste ponto de vista é preciso expandir o raciocínio apresentado para sistemas multiterminais. As referências [10] e [11] apresentam-se métodos que adaptam a ideia de localização de faltas por ondas viajantes para sistemas multiterminais. Em [10] é utilizada a premissa de que o sistema é um sistema em estrela, e foi proposto um método simples e eficiente. No entanto, a configuração adotada não é a configuração mais usual para um sistema MTDC. Em [11] é utilizado um método que resolve este problema podendo ser aplicado em um sistema com outras topologias. No entanto, é preciso conhecer o sistema e aplicar uma série de análises matemáticas prévias para obter a localização da falta. Desta forma, caso o sistema seja alterado, é necessário refazer toda a análise.

Como pode ser notado, ainda não existe um método definitivo de localização de faltas em sistemas HVDC, sendo necessários mais estudos que indiquem quais são os melhores caminhos a seguir quanto a este problema.

5. Metodologia Proposta

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a localização de falta em redes HVDC multiterminais, bem como o sistema utilizado para os testes e simulações.

5.1 Componentes do Sistema Elétrico

Para a realização de um estudo detalhado da localização de falta utilizando ondas viajantes é necessário o desenvolvimento de um modelo de simulação que permita a realização dos testes necessários à pesquisa. Desta forma, a escolha do sistema de simulação, os modelos dos componentes, parâmetros de simulação, etc., é uma etapa importante da pesquisa.

Neste sentido, foi escolhido o uso do modelo de simulação proposto em [28]. Trata-se de um modelo desenvolvido por diversos grupos de pesquisa ligados ao *International Council on Large Electric Systems* (CIGRÉ) com base na necessidade de aplicação de estudos voltados a redes MTDC.

Além disso, a padronização de um sistema para a simulação é importante uma vez que permite o estudo independente, por diversos pesquisadores, do mesmo sistema e, desta forma o aumento a confiabilidade dos resultados.

O sistema proposto é mostrado na Figura 22. O sistema é composto por onze conversores do tipo VSC, dois conversores CC/ CC e conectando estes conversores uma rede de cabos e linhas aéreas. Além disso, do lado CA existem linhas de transmissão que conectam os geradores e cargas à rede CC.

Figura 22: Sistema de Testes CIGRÉ.
Fonte:[28].

Para o estudo desenvolvido nesse projeto de mestrado foi utilizada uma parte do sistema apresentado na Figura 22. Essa parte corresponde aos barramentos Bm-F1, Bm-B5, Bm-B3 e Bm-B2 conforme a Figura 23. Trata-se de uma parte pequena do sistema, o que facilita o desenvolvimento do modelo de simulação. No entanto, possui a característica de ser um sistema multiterminal (três terminais) e permite a análise do problema investigado. O uso deste sistema, no entanto, não impede o uso posterior de uma parte maior do sistema da Figura 22.

A tensão nominal das linhas 1 e 2 é ± 200 kV, e o comprimento total das linhas é 200 km. A potência nominal dos conversores Bm-B3 e Bm-F1 é 800 MVA e a potência do conversor Bm-B2 é 1200 MVA, sendo que a potência deste último foi considerada a potência base do sistema. Os parâmetros dos componentes do sistema são mostrados no anexo.

Figura 23: Sistema Simulado.

Para o desenvolvimento do sistema da Figura 23 foi utilizado o *software* PSCAD [30]. Trata-se de um *software* amplamente utilizado em estudos de sistemas HVDC.

Uma vez modelado o sistema da Figura 23 no *software* PSCAD foram realizadas simulações para observar o comportamento do sistema em regime permanente e sobre condições de falta.

As Figuras 25 a 27 a seguir mostram o comportamento do sistema em condições de regime permanente. Nesta simulação o conversor Bm-B3 foi utilizado para o controle de tensão no barramento CC e potência reativa no lado CA, enquanto o controle dos demais conversores controlam as potências ativas no sistema. Foi adotado que estes controles são feitos diretamente através do controle da defasagem do ângulo da tensão gerada pelo conversor.

Figura 24: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2

Figura 25: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3

Figura 26: Comportamento da tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1

5.2 Metodologia para Detecção e Localização de Falta da Falta

Nesta seção será apresentada a metodologia implementada para a detecção e localização de faltas, primeiramente será abordado os métodos de detecção de falta utilizados, e a seguir será apresentado o método de localização de faltas. Em seguida serão estudos da influencia da frequência de amostragem e do erro do cálculo da velocidade da onda nos resultados da metodologia implementada.

5.2.1 Detecção de falta

Conforme mencionado na seção 4.3 um problema para a localização de faltas em sistemas multiterminais é a determinação da linha faltosa. Um algoritmo de localização de faltas baseado em ondas viajantes, por exemplo, tem dificuldades de determinar em que linha a falta ocorreu, uma vez que a onda se propaga por todo o sistema e, portanto, vai ser detectada em todos os terminais do sistema.

Assim é necessária a implementação de um método que garanta a seletividade da linha em que a falta ocorreu. Neste projeto, foi escolhido o teste de dois métodos para verificar se são capazes de identificar corretamente a falta ocorrida no sistema. Estes métodos são a proteção diferencial [29] e a proteção direcional [30].

A proteção diferencial funciona de acordo com o somatório das correntes na linha. Em condições normais o somatório das correntes nos terminais das linhas é igual a zero, conforme e lei das correntes de *Kirchhoff*. Caso ocorra uma falta, conforme a Figura 27, uma parte da corrente começará a circular pelo caminho da falta e a condição de somatório igual a zero não será mais satisfeita e o *trip* da proteção deve atuar [29].

Figura 27: Sentido das correntes.

A Figura 28 mostra essa proteção modelada no EMTDC/PSCAD.

Figura 28: Proteção diferencial modelada no *software* EMTDC/PSCAD.

Nesta figura é possível observar que para a proteção atuar é necessário o somatório das correntes "I_local", isto é, a corrente localizada observada no terminal da proteção, e "I_remoto", isto é, a corrente do outro lado da linha.

O somatório é comparado com um valor de ajuste. Teoricamente tal valor poderia ser zero, no entanto, para fins práticos os valores das correntes serão levemente diferentes. Neste caso foi considerado um ajuste de 0,1 p.u. Por fim "trip_dif" é o sinal do *trip* da proteção diferencial, normalmente ele possui valor igual a zero, caso o valor do somatório passe o valor do ajuste ele se torna um e aciona os disjuntores CC.

Por sua vez, a proteção direcional atua de acordo com a direção do aumento da corrente no caso de ocorrência de uma falta. No caso de um sistema CC, a direção da corrente é bem definida, e assim quando uma falta ocorre, a corrente tende a aumentar no sentido de alimentar a falta, isto é no sentido de fora para dentro da linha faltosa. Desta forma, analisando o sentido de aumento da corrente em ambos os lados da linha é possível definir se é uma falta interna ou externa à linha analisada [30]. A Tabela 1 resume a atuação da proteção.

Tabela 1: Princípios da proteção direcional.

Tipo da falta	Direção de Crescimento da corrente		<i>Trip</i>
	Barramento 1	Barramento 2	
Interna	+	+	Acionado
Externa ao Barramento 1	-	+	Não Acionado
Externa ao Barramento 2	+	-	Não Acionado

Nesta tabela, "+" significa um aumento da corrente no sentido "barramento-linha" e "-" significa um aumento no sentido "linha-barramento". Caso o aumento das correntes seja "+" em ambos os lados da linha, o *trip* da proteção é acionado. A Figura 29 mostra a proteção direcional implementada no *software* EMTDC/PSCAD.

Figura 29: Proteção direcional modelada no software EMTDC/PSCAD.

Como pode ser notado na Figura 29 é feita uma operação de diferença para " I_{local} " e " I_{Remoto} " e os seu respectivos valores atrasados por um bloco " $\text{Delay } \Delta t$ ". Esta diferença, em condições normais, é igual a zero, mas com a ocorrência de uma falta, o aumento da corrente tornará este valor diferente de zero. Se essa diferença, em ambos os lados da linha, for positiva, ou melhor, acima de um valor de ajuste que garanta a seletividade, o " trip_{dir} " é acionado.

Para ajustar as proteções é necessário levar em conta o tempo de atuação, a confiabilidade e a seletividade da proteção. Desta forma, valores pequenos podem levar a uma atuação inadequada devido a pequenos ruídos nos sinais analisadas, por outro lado, valores grandes podem provocar a não atuação em determinados casos. Assim, para ajustar as proteções foi definido um valor arbitrário e simulados diversos casos de falta analisando a atuação das proteções. Se a proteção não atuava para algum caso de falta, o valor do ajuste era diminuído, para os casos em que a proteção atuava indevidamente o ajuste era aumentado. Este processo se repetiu até que o valor capaz de detectar corretamente o maior número de casos fosse encontrado.

Conforme será demonstrado na seção 5.2.2, quando uma falta ocorre na extremidade de uma linha, o método de ondas viajantes não é capaz de diferenciar em qual linha a falta ocorreu. Isto pode ser demonstrado através de simulações. A seguir é mostrado um exemplo deste fenômeno.

Foi aplicada uma falta na linha 1, próximo ao terminal Bm-B3 (1 km de distância). E o método de localização de faltas foi testado para identificar em qual linha seria detectada a onda.

A Figura 34 mostra a detecção do tempo de chegada da onda nos três terminais do sistema.

Figura 30: Detecção da onda na linha faltosa e linha adjacente: (a) Barramento Bm-B2, (b) Barramento Bm-B3, (c) Barramento Bm-F1.

É possível notar que a onda é detectada nos três terminais do sistema, ou seja, o sistema de detecção por ondas viajantes não é capaz de detectar em qual linha está a falta.

Isto demonstra que para que o algoritmo de localização de faltas baseado em ondas viajantes seja mais preciso é necessário combiná-lo com algum algoritmo de detecção da falta, como os algoritmos implementados na etapa 3, ou algum outro algoritmo que garanta a proteção da linha.

A Figura 35 mostra o resultado da mesma simulação descrita anteriormente para as proteções diferencial e direcional.

Figura 31: Resultado do sistema de detecção da falta na linha: (a) linha 1, (b) linha 2.

Desta forma é possível, através da análise do sistema de detecção da falta identificar a linha faltosa, no caso a linha 1.

5.2.2 Localização da falta.

A revisão bibliográfica feita mostrou que os métodos de ondas viajantes têm sido empregados para a localização de faltas em sistemas HVDC, principalmente para sistemas de dois terminais. Desta forma é preciso implementar a localização nos sistemas modelados no EMTDC/PSCAD e avaliar a aplicabilidade no sistema multiterminal. Assim foi implementado o procedimento descrito no Capítulo 4. Foi escolhido o método de dois terminais.

Como pode ser notado pela Figura 32 a onda é tratada através de uma transformada wavelet, o terceiro detalhe, então é comparado com um valor de referência. Caso o valor do detalhe da onda seja maior que a referência (0.1 p.u.) é considerado que foi detectada uma chegada de onda e é guardado o tempo de chegada da onda.

O procedimento descrito é repetido para os dois terminais da linha e assim são obtidos dos tempos de chegada. Desta forma é calculada a distância da onda conforme a equação:

$$d = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (15)$$

Neste tipo de método, um critério importante a ser levado em conta é a detecção da onda. O método utilizado na simulação para a detecção da chegada da onda foi o tratamento do sinal de tensão através do uso de uma transformada wavelet discreta com as seguintes características:

- Wavelet Mãe: Haar;
- Frequência de amostragem: 50 kHz;
- Nível de detalhe: 3.

Estes parâmetros foram escolhidos através do método de tentativa e erro, variando algumas dessas características, como a wavelet mãe e o nível de detalhe utilizado.

Figura 32: Sistema de localização de faltas implementado no PSCAD.

Para testar de maneira mais consistente qual seria o melhor método de detecção de chegada da onda, foram simulados 304 casos de falta no sistema, considerando diferentes localizações das faltas, diferentes resistências de faltas, e diferentes tipos de falta (polo-polo ou polo-terra). A seguir, os dados de tensão e corrente durante a falta em ambas as linhas foram exportados para o MatLab, e foram feitos diversos testes variando o método de detecção da onda.

A Figura 31 mostra o fluxograma do algoritmo de localização de faltas completo. Nessa configuração a distância da falte sempre é calculada caso a onda seja detectada, no entanto essa distância só é fornecida caso a detecção pelos métodos diferencial ou direcional aponte a

existência de falta na linha, caso contrário, entende-se que a falta foi externa e o valor calculado é descartado.

Figura 33: Fluxograma da atuação do sistema de localização de faltas.

Cabe ressaltar que a detecção da onda viajante é mais rápida que a detecção pelos métodos diferencial e direcional e, portanto o cálculo da onda fica limitado pelo tempo desses métodos. No entanto, o tempo do cálculo da distância não é um problema crítico, uma vez que tem como objetivo auxiliar o trabalho das equipes de manutenção.

5.2.3.1 Influência da frequência de amostragem na localização da falta.

O cálculo da distância de falta utilizando ondas viajantes está sujeito a erros como problemas nas medições e problemas no cálculo da velocidade de onda. Outro fator a ser considerado para a erro neste tipo estudo é a frequência de amostragem do sinal, uma vez que o cálculo da distância é dado pelo tempo de detecção da onda. Este tempo será afetado uma vez que a medida é feita apenas em determinados instantes de tempo. A Figura 34 mostra o diagrama de erro das distâncias considerando a amostragem do sinal [31].

Figura 34: Diagrama de distância considerando a amostragem do sinal.

Como pode ser notado, a onda não será detectada no instante em que ela chega ao terminal, e sim em no instante em que for feita a amostragem do sinal. Desta forma, seja t_{F1} o instante de tempo em que a onda chega ao terminal 1 da linha, então o valor de tempo lido pelo sistema de cálculo da distância será $t'_{F1} = t_{F1} + e$.

É possível notar, através da Figura 34 que:

$$0 \leq e < 1/f_s \quad (16)$$

Desta forma, é possível notar que quanto maior a frequência de amostragem, menor o erro de leitura do tempo.

De posse dessas informações é possível estimar o erro da distância calculada devido ao erro de leitura do tempo. Assim, sendo d_c a distância de falta calculada tem-se que:

$$d_c = d + \Delta d \quad (17)$$

Em que d é a distância real e Δd é o erro devido à amostragem do sinal.

Aplicando esse raciocínio na equação (15), tem-se:

$$d_c = \frac{L - v(t'_{F2} - t'_{F1})}{2} \quad (18)$$

$$d_c = \frac{L - v((t_2 + e_2) - (t_1 + e_1))}{2} \quad (19)$$

$$d_c = \frac{L - v(t_2 - t_1)}{2} + \frac{v(e_2 - e_1)}{2} \quad (20)$$

Comparando as equações (17) e (20) pode-se notar que:

$$\Delta d = \frac{v(e_2 - e_1)}{2} \quad (21)$$

Através de (16) é possível notar que

$$|e_2 - e_1| \leq 1/f_s \quad (22)$$

Substituindo (22) em (21),

$$|\Delta d| \leq \frac{v}{2f_s} \quad (23)$$

Desta forma é possível estimar o erro máximo da distância calculada devido à amostragem do sinal. É possível notar que quanto maior a frequência, menor o erro da distância calculada. Assim é possível também determinar qual é a frequência mínima de amostragem que se deve adotar para que o erro não ultrapasse o valor máximo admitido para o erro da distância.

$$f_{s_min} = \frac{v}{2|\Delta d_{max}|} \quad (24)$$

Em outras palavras

$$f_{s_min} = \frac{1}{(2|\Delta d_{max}| \sqrt{LC})} \quad (25)$$

Esta análise demonstra além da existência de um erro no cálculo da distância devido à frequência de amostragem, uma limitação do uso das ferramentas de ondas viajantes como único parâmetro para a proteção da linha. Isto porque para os extremos da linha, é possível que o método aponte como faltosa a linha adjacente. A Figura 35 demonstra essa situação.

Figura 35: Má operação devido à uma falta no extremo da linha.

Isto indica a necessidade do uso do método de ondas viajantes em conjunto com outro método de detecção da falta para garantir um melhor desempenho do sistema de localização de falta em sistemas MTDC.

5.2.4 Influência do valor velocidade de propagação da onda na localização da falta

Da mesma forma que a frequência de amostragem do sinal pode introduzir um erro no cálculo da distância, a determinação da velocidade da onda de forma errada também pode levar a um erro de resposta do método.

Assim considerando um erro e_v no cálculo da velocidade da onda:

$$v_c = v + e_v \quad (26)$$

em que v_c é o valor da velocidade calculada e v é a velocidade da onda.

O valor da distância calculada é:

$$d_c = \frac{L - v_c(t_2 - t_1)}{2} \quad (27)$$

$$d_c = \frac{L - (v + e_v)(t_2 - t_1)}{2} \quad (28)$$

$$d_c = \frac{L - v(t_2 - t_1)}{2} + \frac{e_v(t_2 - t_1)}{2} \quad (29)$$

Considerado Δd^v como sendo o erro no cálculo da distância devido ao erro do cálculo da velocidade:

$$\Delta d^v = \frac{e_v(t_2 - t_1)}{2} \quad (30)$$

Como a diferença $(t_2 - t_1)$ é maior quanto mais nas extremidades da linha, é possível notar que um erro no cálculo da velocidade da onda deve levar a um maior erro nessas extremidades e a um menor erro quanto mais próximo ao meio da linha.

6. Resultados

Uma vez modelado o sistema da Figura 23 no *software* PSCAD foram realizadas simulações para observar o comportamento do sistema sob condições de falta.

6.1 Análises do comportamento do sistema sob condições de falta

Com o intuito de testar a resposta do sistema frente a condições de falta foram simuladas duas condições de falta polo-polo francas (com resistência de falta igual a 0): a primeira na linha que liga os conversores Bm-B2 e Bm-B3 a 60 km do conversor Bm-B2 e a segunda falta na linha que liga os conversores Bm-B3 e Bm-F1 a 50 km do conversor Bm-B3. As Figuras 37 a 39 mostram a resposta do sistema frente à primeira situação de falta.

Figura 36: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância.

Figura 37: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância de Bm-B2.

Figura 38: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1 para uma falta na linha 1 a 60 km de distância de Bm-B2.

Como pode ser notado pela Figura 36a corrente no barramento Bm-B2 aumenta significativamente para uma falta na linha 1. Vale lembrar que quando ocorre uma falta em uma linha de um sistema baseado em conversores VSC, os conversores passam a se comportar como um retificador não controlado, isto é a corrente passa a circular pelos diodos de roda-livre do conversor. Já a corrente do barramento Bm-B3 (Figura 37) inverte o sentido, mostrando que depois da falta este barramento também passa a alimentar a falta.

Por sua vez, a Figura 36 mostra que a corrente no barramento Bm-F1 também aumenta para uma falta na linha 1. Isto mostra a importância de um sistema que selecione corretamente a linha em que ocorreu a falta de maneira a não isolar uma linha não faltosa (considerando um sistema que possua a capacidade de isolar apenas a linha faltosa através de disjuntores CC).

As Figuras 38 a 40 apresentam o comportamento do sistema frente a uma falta na linha 2 a 50 km do barramento Bm-B3.

Figura 39: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B2 para uma falta na linha 2 a 60 km de distância de Bm-B3.

Figura 40: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-B3 para uma falta na linha 2 a 50 km de distância de Bm-B3.

Figura 41: Comportamento da Tensão e da Corrente do Conversor Bm-F1 para uma falta na linha 2 a 50 km de Bm-B3.

O que pode ser tirado do comportamento do sistema para uma falta na linha 2 são semelhantes às conclusões que podemos tirar para uma falta na linha 1. Também para este caso

houve um aumento significativo da corrente. E o distúrbio se propagou para outra parte do sistema, chegando a linha 1.

6.2 Análise do método de localização de faltas

Com o intuito de isolar as faltas, foi proposto o teste de dois métodos de detecção de faltas: a proteção direcional e a proteção diferencial. Para testar se tais métodos são adequados para a detecção seletiva da falta e da linha faltosa foram aplicadas faltas na linha do sistema, bem como faltas externas e analisada a resposta de cada uma das proteções. Foi variada a posição da falta, sendo que as faltas foram aplicadas nas extremidades e no meio da linha, bem como foi variada a resistência da falta, neste caso foram adotados os valores de 0, 10 e 30 Ω .

A Tabela 2 mostra a atuação das proteções para o sistema de três terminais. Os ajustes foram feitos da mesma forma como descrito na subseção anterior e os valores adotados foram 0,1 p.u. para a proteção diferencial e 0,05 p.u. para a proteção direcional.

Tabela 2: Respostas das proteções para o sistema de três terminais.

Local da Falta	Resistência de Falta	Trip Direcional Linha 1	Trip Diferencial Linha 1	Trip Direcional Linha 2	Trip Diferencial Linha 2
Meio da linha 1	0	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	10	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Linha 1 próximo a Bm-B2	0	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	10	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Linha 1 Próximo a Bm-B3	0	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	10	Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Não Acionado	Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Meio da linha 2	0	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
	10	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado

	30	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Linha 2	0	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Próximo a	10	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Bm-B3	30	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Acionado
Linha 2	0	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Próximo a	10	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Bm-F1	30	Não Acionado	Não Acionado	Acionado	Acionado
Externa a	0	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Bm-B2	10	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Externa a	0	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Bm-B3	10	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Externa a	0	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
Bm-F1	10	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado
	30	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado	Não Acionado

A Tabela 2 mostra que o comportamento das proteções foi de acordo com o esperado, as proteções não atuaram para faltas externas as linhas correspondentes, o que mostra a seletividade dos métodos. Os únicos casos em que a proteção direcional não atuou adequadamente foram os casos bastante próximos à Bm-B3. Neste caso a detecção não ocorreu.

Conforme descrito na seção 2.4 o método de detecção da onda viajante que apresentou melhor desempenho foi o método wavelet Haar, analisando-se o 3º nível de detalhe. O que está de acordo com o processo feito por tentativa e erro anteriormente. O resultado usando esse método de detecção no algoritmo de localização descrito no fluxograma da Figura 33: Fluxograma da atuação do sistema de localização de faltas.e mostrado a seguir.

A Tabela 3 mostra os resultados do valor calculado para faltas monopolares (MO) e bipolares (BI) simuladas na linha 1 a 10 km de distância do conversor Bm-B3, variando a resistência de falta em 0, 10, 20 e 30 ohms.

Tabela 3: Distância Calculada (em km) para uma falta a 10 km de distância de Bm-B3.

Resistência (Ω)	Tipo de falta	
	MO	BI
0	2,35	3,40
10	2,35	3,40
20	2,35	3,40
30	2,35	3,40

Como pode ser notado, o valor da resistência de falta não interferiu no cálculo da distância. A Figura 42 mostra os valores médios da localização calculada em relação ao valor original da falta aplicada.

Figura 42: Valor Calculado da Distância.

Já a Figura 43 mostra o erro médio da distância calculada para cada localização de falta aplicada na linha 1, para faltas polo-polo e polo-terra conforme a equação (31).

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|d_c - d_r|}{L_t}}{n} \quad (31)$$

Em que e_m é o erro médio calculado, d_c e d_r correspondem à distância calculada e a distância real, respectivamente e n o número de faltas aplicadas para cada posição.

Figura 43: Média dos Erros Relativos Calculados.

Como pode ser notado, o erro é maior quanto mais próximo da extremidade. Isto ocorre, conforme demonstrado na seção 5.3.1, devido aos possíveis erros no cálculo da velocidade da onda em relação ao modelo utilizado no *software* de simulação, além disso, os erros para faltas polo-polo se mostraram menores que para os casos polo-terra.

7. Conclusões

A localização de faltas em sistemas de potência é fundamental para facilitar o trabalho das equipes de manutenção da linha no caso de ocorrência de um distúrbio. Neste contexto, este trabalho de mestrado se propôs a estudar métodos de localização de faltas para um sistema de transmissão HVDC multiterminal.

Nesse sentido foram estudadas as principais linhas de pesquisa na área. Estas linhas de pesquisa foram divididas em três vertentes principais: sistemas baseados no cálculo de impedância; sistemas baseados em ondas viajantes e sistemas baseados em inteligência artificial e aprendizagem.

Dentre essas linhas, foi escolhido utilizar o princípio de ondas viajantes devido a suas vantagens tais como: boa precisão; Insensibilidade ao valor de resistência de falta; rapidez no resultado; não necessidade de uma base de dados de falta, no entanto, apesar dessa precisão este tipo de método possui algumas dificuldades, tais como necessidade de conhecimento dos parâmetros do sistema para o cálculo da velocidade da onda; sistema de detecção da chegada da frente da onda.

Ao longo do desenvolvimento deste projeto de mestrado, também notou-se que em determinados casos a aplicação de uma falta em uma linha resulta em uma onda que é detectada na outra linha. Isto mostrou que este tipo de método necessita de um sistema auxiliar que faça a detecção da linha faltosa, enquanto que a onda viajante é utilizada para o cálculo da distância da falta.

Quanto ao método de detecção da frente da onda viajante, foram testadas várias configurações de wavelet, variando-se a wavelet mãe e o nível de detalhamento. Dentre as configurações testadas a que apresentou melhor resultado foi wavelet mãe Haar com 3 níveis de detalhe.

O sistema de localização final, portanto agrega duas etapas. A primeira um sistema de detecção de faltas, baseado nos métodos direcional e diferencial, implementados na etapa 3 que garante que o cálculo será feita para a linha correta. A segunda etapa, que calcula a distância da falta na linha indicada na primeira etapa.

Os sistemas de detecção diferencial e direcional implementados foram capazes de selecionar a linha correta, não permitindo que o fosse disponibilizada a distância de falta da linha errada, sendo que o sistema diferencial se mostrou mais assertivo para faltas próximo aos limites da linha.

O erro máximo da distância calculado foi de 3,825% em uma linha de 200 km, este erro ocorreu para o caso de uma falta monopolar a 10 km de distância, foi verificado que quanto maior a proximidade das extremidades da linha, maior o erro observado, no entanto não foi observada uma relação entre a resistência de falta e o erro da distância calculada.

7.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um método para localizar faltas em sistemas HVDC multiterminais buscando uma boa precisão e diferenciando corretamente a linha faltosa.

Para aprimorar o método é necessário que sejam feitas análises mais detalhadas tais como:

Análise do método em sistemas com outras topologias, tais como sistemas malhados;

Análise de outras tecnologias de conversores tais como conversores com mais de dois níveis, e assim medir o impacto na precisão do método;

Estudar se o uso de mais métodos de localização de faltas, poderia levar a um melhor desempenho quanto a velocidade de resposta do método;

Aproximar as condições da simulação à realidade do sistema, como acrescentado ruídos nos sinais de tensão e analisar o impacto nos cálculos da localização da falta.

Anexo

Neste anexo são mostrados os parâmetros dos cabos utilizados no sistema teste apresentado neste trabalho. A Tabela 4 a seguir mostra a configuração dos cabos modelados, conforme a Figura 44.

Figura 44: Cabos Modelados.

Tabela 4: Parâmetro dos cabos modelados.

Seção do condutor (mm ²)	1800
D_{core} (mm)	50.25
ρ_{core} (Ωm)	2.2×10^{-08}
ϵ_{r1}	2.3
$\tan j1 / G$ (Ω^{-1}/km)	$0.0004 / 5.5 \times 10^{-08}$
R_{in} (mm)	45.125
R_{ext} (mm)	47.125

$r_{sh}(\Omega m)$	27.4×10^{-8}
ϵ_{r2}	2.3
$\tan \delta / G (\Omega^{-1}/km)$	$0.001 / 1.3$ $\times 10^{-6}$
$R'_{in} (mm)$	50.225
$R'_{ext} (mm)$	55.725
$r'_{arm}(\Omega m)$	18.15×10^{-8}
ϵ_{r3}	2.3
$\tan \delta$	0.001
$S_{cabo} (mm)$	121.45
Profundidade em relação a superfície do Solo(m)	1.5

Referências Bibliográficas

- [1] J. Arrillaga, *High Voltage Direct Current Transmission*, 2nd ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [2] J. Arrillaga, Y. H. Liu, and N. R. Watson, *Flexible Power Transmission: The HVDC Options*. 2007.
- [3] M. M. Saha, J. Yzykowski, and E. Rosolowski, *Fault Location on Power Networks*. New York: Springer, 2010.
- [4] J. P. Triveno, V. P. Dardengo, and M. C. De Almeida, “An Approach to Fault Location in HVDC Lines Using Mathematical Morphology,” no. 1, 2015.
- [5] J. Yang, J. E. Fletcher, J. O. Reilly, and S. Member, “Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables,” vol. 59, no. 10, pp. 3827–3837, 2012.
- [6] L. Yue, “Research on hvdc single-ended fault traveling wave location method based on fastica,” 2016.
- [7] C. Xi, Q. Chen, and L. Wang, “A Single-Terminal Traveling Wave Fault Location Method for VSC-HVDC Transmission Lines Based on S-transform,” 2016.
- [8] Y. Zou, X. Wang, H. Zhang, and C. Liu, “Traveling-Wave Based Fault Location with High Grounding Resistance for HVDC Transmission Lines,” pp. 1651–1655, 2016.
- [9] O. M. K. K. Nanayakkara, A. D. Rajapakse, and R. Wachal, “Location of DC line faults in conventional HVDC systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 279–288, 2012.
- [10] O. K. Nanayakkara, A. D. Rajapakse, and R. Wachal, “Traveling Wave Based Line Fault Location in Star-Connected Multiterminal HVDC Systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp. 2286–2294, 2012.
- [11] S. Azizi, M. Sanaye-Pasand, M. Abedini, and A. Hassani, “A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multiterminal DC systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 6, pp. 2552–2560, 2014.

- [12] Z. Y. He, K. Liao, X. P. Li, S. Lin, J. W. Yang, and R. K. Mai, "Natural frequency-based line fault location in HVDC lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 2, pp. 851–859, 2014.
- [13] J. Suonan, S. Gao, G. Song, Z. Jiao, and X. Kang, "A novel fault-location method for HVDC transmission lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 1203–1209, 2010.
- [14] M. Farshad and J. Sadeh, "A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on similarity measure of voltage signals," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 4, pp. 2483–2490, 2013.
- [15] R. Li, L. Xu, and L. Yao, "DC Fault Detection and Location in Meshed Multi-terminal HVDC Systems Based on DC Reactor Voltage Change Rate," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [16] R. Razzaghi, M. Paolone, F. Rachidi, J. Descloux, B. Raison, and N. Retière, "Fault Location in Multi-Terminal HVDC Networks Based on Electromagnetic Time Reversal with Limited Time Reversal Window," no. i.
- [17] A. Burek and P. Balcerak, "New single ended fault locator for HVDC lines," *2018 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2018 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. (EEEIC / I&CPS Eur.*, pp. 1–6, 2018.
- [18] T. Peng, D. Tzelepis, A. Dy, and I. Glesk, "Assessment of Fault Location Techniques in Voltage Source Converter based HVDC systems."
- [19] Y. Qiu, H. Li, J. Wu, Y. Guo, and G. Wang, "An Improved Time-domain Fault-location Algorithm for HVDC Transmission Line," pp. 2529–2533, 2016.
- [20] L. Tang and B. T. Ooi, "Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1877–1884, 2007.
- [21] B. Hoseinzadeh, M. H. Amini, and C. L. Bak, "High Impedance DC Fault Detection and Localization in HVDC Transmission Lines Using Harmonic Analysis," pp. 5–8, 2018.
- [22] S. Vasanth, Y. M. Yeap, S. Member, A. Ukil, and S. Member, "Fault Location Estimation for VSC-HVDC System Using Artificial Neural Network," pp. 502–505,

2016.

- [23] A. H.- Eldin, A. Lotfy, M. Elgamal, M. Ebeed, and A. P. Authority, “Combined Traveling Wave and Fuzzy Logic Based Fault Location in Multi-Terminal HV DC Systems,” 2016.
- [24] I. Barbi and D. Martins, *Eletrônica de Potência Introdução ao Estudo de Conversores CC- CA*. Edição dos Autores, 2005.
- [25] R. C. Dugan, M. F. Granaghan, and H. W. Beatyr, *Electrical Power Systems Quality*. McGraw Hill, 2002.
- [26] D. Jovcic, *High Voltage Direct Current Transmission : Converters, Systems, and DC Grids*, vol. 1542. 2015.
- [27] W. H. Hayt and J. A. Buck, *Eletromagnetismo*. LTC, 2001.
- [28] T. K. Vrana, Y. Yongtao, D. Jovcic, S. Dennetire, J. Jardini, and H. Saad, “The CIGRE B4 DC Test System.” 2013.
- [29] Y. Li, X. Shi, F. Wang, L. M. Tolbert, and J. Liu, “Dc fault protection of multi-terminal VSC-HVDC system with hybrid dc circuit breaker,” *ECCE 2016 - IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Proc.*, 2017.
- [30] G. Song, X. Chu, X. Cai, and S. Gao, “A novel pilot protection principle for VSC-HVDC cable lines based on fault component current,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 426–433, 2013.
- [31] F. B. Costa *et al.*, “Two-Terminal Traveling-Wave-Based Transmission-Line Protection,” vol. 32, no. 3, pp. 1382–1393, 2017.