Universidade de São Paulo – USP

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – SEL

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Fabricio Andrade Mourinho

Proteção de Linhas de Transmissão de Sistemas VSC-HVDC utilizando Limitadores de Corrente de Falta

São Carlos
2016

Fabricio Andrade Mourinho

Proteção de Linhas de Transmissão de Sistemas VSC-HVDC utilizando Limitadores de Corrente de Falta

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2016

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.

Mourinho, Fabricio Andrade

929p Proteção de Linhas de Transmissão de Sistemas VSC-HVDC utilizando Limitadores de Corrente de Falta / Fabricio Andrade Mourinho; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. São Carlos, 2016.

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, 2016.

1. HVDC. 2. VSC-HDVDC. 3. Proteção de Linhas de Transmissão. 4. Linhas em Corrente Contínua. 5. Limitadores de Corrente de Falta. 6. Materiais Supercondutores. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FABRICIO ANDRADE MOURINHO.**

Título da dissertação: "Proteção de linhas de transmissão de sistemas VSC-HVDC utilizando limitadores de corrente de falta".

Data da defesa: 08/04/2016

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Dr. **José Carlos de Melo Vieira Júnior (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Ghendy Cardoso Junior** (Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)	APROVADO
Prof. Dr. **Silvio Giuseppe Di Santo** (Escola Politécnica/EP-USP)	Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as minhas conquistas e ensinamentos e a extrema bondade ao traçar minha trajetória.

Agradeço aos meus pais, Levaldo e Rosane, por infinitos motivos, mas destaco aqui a oportunidade que me forneceram em ter uma formação de qualidade, sempre me motivando e desejando o melhor. Adicionalmente, agradeço a minha família, em especial ao meu irmão Lucas e à minha namorada Marina por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço a todos os amigos do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, aos amigos da pós-graduação e aos amigos da República Alabama, por toda amizade, companheirismo, futebol e churrascos durante os dois anos de mestrado. Não me limitarei a citar nomes, mas sei que saio de São Carlos com a certeza de que fiz grandes amigos.

Ao amigo, Prof. Daniel Motter, por tantos conselhos, amizade e pela significativa ajuda com o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

A todos os meus professores da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e da Universidade de São Paulo, por toda a contribuição na minha formação profissional e pessoal, que de forma direta e indireta contribuíram para a conclusão desta pesquisa. Em especial, gostaria de mencionar o Prof. Jonas Roberto Pesente, Prof. Roberto Cayetano Lotero e Prof. Robson Almir de Oliveira, por tanto terem me ensinado e incentivado.

Agradeço ainda ao Prof. Mário Oleskovicz, pela amizade e colaboração em diversos trabalhos desenvolvidos durante esta pesquisa de mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, pela excelente orientação, paciência, ensinamentos e amizade, as quais serviram de motivação para a execução deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Ghendy Cardoso Junior e Prof. Silvio Giuseppe di Santo, por aceitarem o convite de avaliar e contribuir com o trabalho de modo a enriquecê-lo.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, à Escola de Engenharia de São Carlos e à Universidade de São Paulo, por toda a infraestrutura a mim disponibilizada.

Por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisada do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro.

Resumo

MOURINHO, F. A. **Proteção de Linhas de Transmissão de Sistemas VSC-HVDC utilizando Limitadores de Corrente de Falta**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Tecnologias HVDC que utilizam conversores do tipo fonte de tensão, o VSC-HVDC, ainda não são completamente difundidas e aplicadas no Brasil, em contraste com outros países que começaram a estudar e empregar este tipo de transmissão. Comparado com o HVDC tradicional, o VSC-HVDC é uma tecnologia de transmissão mais eficiente e pode superar deficiências encontradas na transmissão em corrente contínua convencional. O VSC-HVDC pode ser utilizado de maneira mais eficiente nas novas redes de energia, para alimentar ilhas, integração de geração eólica, renovação das linhas em centros urbanos, aplicações multiterminais e conexão com sistemas fracos. Por se tratar de uma tecnologia recente, o VSC-HVDC ainda não é amplamente adotado e uma das principais limitações da utilização destes sistemas é a sua fragilidade diante faltas na linha de corrente contínua. Neste contexto, limitadores de corrente de falta (LCF) podem ser utilizados para minimizar o impacto das faltas. A ação dos limitadores é benéfica ao sistema durante condições de falta, contudo, ainda assim é necessária a atuação do sistema de proteção para extinguir a condição faltosa. Portanto, este trabalho visa propor e avaliar um novo esquema de proteção que opere de maneira seletiva e confiável para sistemas VSC-HVDC na presença de LCF baseados em materiais supercondutores ou LCF indutivos. Para tanto, foram implementadas quatro funções de proteção tradicionais das linhas em CC, a saber: direcional de corrente, diferencial, sobrecorrente com restrição de tensão e ondas viajantes, e ainda, foi proposta uma nova função de proteção, a de condutância, a qual apresentou o menor tempo de identificação de falta, considerando as faltas mais severas. Adicionalmente, foi avaliado o comportamento destas funções quando o sistema apresenta os LCF em série com a linha. Foi demonstrado que é possível extrair os benefícios dos LCF sem deteriorar a qualidade dos resultados das funções de proteção, o que aumenta a segurança e confiabilidade dos sistemas VSC-HVDC, uma vez que os impactos das faltas são minimizados e as mesmas são identificadas em um curto intervalo de tempo.

Palavras-chave: HVDC, VSC-HDVC, Proteção de linhas em corrente contínua, Limitadores de Corrente de Falta.

Abstract

MOURINHO, F.A. **Transmission Line Protection of VSC-HVDC Systems using Fault Current Limiters**. 2016. Dissertation (Master Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

HVDC technology based on voltage source converters, VSC-HVDC, are not yet fully disseminated and applied in Brazil, in contrast to other countries that have begun to study and widely employ this type of transmission technology. When compared with traditional HVDC systems, VSC-HVDC systems are more efficient and can overcome the challenges encountered in the conventional direct current transmission. The VSC-HVDC can be used more efficiently in the new energy networks to feed islands, integration of wind generation, renewal of lines in urban centers, multiterminal applications and connection with weak systems. Because it is a recent technology, VSC-HVDC is not yet widely adopted and a major limitation of using these systems is their weakness against faults in the DC line. In this context, fault current limiters (FCL) can be used to minimize the impact of faults. The action of the limiters is beneficial to the system during fault conditions, however, the use of protection schemes to detect the fault and extinguish the faulty condition is still required. Therefore, this work aims to propose and evaluate a new protection scheme operating in selective and reliable way for VSC-HVDC systems in the presence of FCL based in superconductor materials or inductive FCL. To reach such a goal, in this work it has been implemented four traditional DC lines protection functions, namely: directional current, differential, overcurrent with voltage restraint and traveling waves, and also proposed a new protection function, which is based on the conductance. This last protection function has presented the lowest detection time, when considering the most severe faults. In addition, it was evaluated the behavior of these functions when the system presents the FCL in series with the DC line. It has been shown that it is possible to extract the benefits of FCL without deteriorating the quality of the results of the protection functions, which increases the safety and reliability of the VSC-HVDC systems, since the impact of faults is minimized and they are identified in a short time.

Keywords: HVDC, VSC-HDVC, Protection of DC lines, Fault Current Limiters.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Componentes básicos de um sistema VSC-HVDC. 35
Figura 2.2 - VSC trifásico de dois níveis. 37
Figura 2.3 - Diagrama básico de um sistema VSC-HVDC de dois terminais. 38
Figura 2.4 – Região de operação do VSC. 39
Figura 2.5 – Conversor VSC de dois níveis e forma de onda de saída. 40
Figura 2.6 – Princípio de Funcionamento do PWM senoidal. 41
Figura 2.7 – Controle direto do índice de modulação e do ângulo de fase. 43
Figura 2.8 – Controle vetorial do índice de modulação e do ângulo de fase. 43
Figura 2.9 – Diagrama de blocos representativo da queda de tensão no reator do VSC. 45
Figura 2.10 – Malha de controle interna. 45
Figura 2.11 – Diagrama de blocos da malha de controle externa. Controle da potência ativa e potência reativa. 48
Figura 2.12 - Zonas de proteção de sistemas VSC-HVDC. 49
Figura 2.13 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante operação normal. 53
Figura 2.14 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta interna. . 53
Figura 2.15 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta externa do lado 1. 53
Figura 2.16 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta externa do lado 2. 54
Figura 3.1 – Componentes do RSCAD no RTDS®. Adaptado de [28]. 59
Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo. 60
Figura 3.3 – Diagrama multifilar do sistema elétrico em estudo (ambiente *Draft* do RSCAD). 61
Figura 3.4 – Diagrama multifilar do sistema elétrico em estudo no *Small Time Step – Draft*. 61
Figura 3.5 – Diagrama esquemático do controle do VSC1. 62
Figura 3.6 – Controle do VSC1 implementado no RSCAD. 63
Figura 3.7– Diagrama de blocos do p-PLL. Adaptado de [30]. 64
Figura 3.8 – Comportamento do fluxo de potência na linha CC para degrau na referência da potência ativa do VSC1. 65

Figura 3.9 – Corrente no polo positivo do VSC_1 para falta polo-terra terra a 0% (curva em azul), a 50% (curva em verde) e a 100% (curva em vermelho) do comprimento da linha a partir de VSC_1. 67
Figura 3.10 – Comportamento das tensões na linha CC para faltas polo-terra a 0% (curvas em vermelho) e 50% (curvas em azul) do comprimento da linha a partir de VSC_1. 68
Figura 3.11 – Comportamento das correntes de saída do VSC_1 para faltas polo-polo a 0% (curvas em azul) e 50% (curvas em vermelho) e 100% (curvas em verde) do comprimento da linha a partir de VSC_1. 68
Figura 3.12 – Comportamento das tensões na linha CC para uma falta polo-polo a 50% da linha a partir de VSC1. 69
Figura 4.1 – Influência de um LCF na corrente de curto-circuito. 72
Figura 4.2 – Diagrama ilustrativo de um LCFS. (Adaptado de: [34]). 74
Figura 4.3 – Fluxograma de operação do modelo do LCFSR. 78
Figura 4.4 - Diagrama representativo do modelo implementado no *C-Builder*/RSCAD. 79
Figura 4.5 – Parâmetros de entrada do modelo do LCFSR desenvolvido. 79
Figura 4.6 – Diagrama equivalente de um sistema com LCFS com resistência em paralelo. . 80
Figura 5.1 – Correntes no lado CA para curto-circuito polo-terra no início da linha CC..... 82
Figura 5.2 – Correntes nos diodos para curto-circuito polo-terra no início da linha CC..... 83
Figura 5.3 – Diagrama equivalente de um curto-circuito polo-terra no início da linha..... 83
Figura 5.4 – Sistema VSC-HVDC com LCFS..... 85
Figura 5.5 – Máximos valores de corrente no polo positivo após a limitação dos LCFS..... 86
Figura 5.6 – Correntes no polo positivo para três faltas polo-terra distantes do VSC1..... 87
Figura 5.7 – Temperatura do LCFS1 para três faltas polo-terra distantes do VSC1. 87
Figura 5.8 – Comportamento resistivo do LCFS1 para as três faltas analisadas. 88
Figura 5.9 – Correntes no polo positivo para três faltas polo-terra distantes do VSC1, considerando o resistor shunt em paralelo com o LCFS..... 89
Figura 5.10 - Corrente no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos LCFS. 90
Figura 5.11 - Tensão no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos LCFS. 91
Figura 5.12 - Corrente no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos limitadores indutivos..... 92
Figura 5.13 - Tensão no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos limitadores indutivos..... 93

Figura 5.14 - Corrente no polo positivo para falta polo-terra com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 10 km da estação retificadora. Comparação entre os LCF. 94
Figura 5.15 - Tensão no polo positivo para falta polo-terra com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 10 km da estação retificadora. Comparação entre os LCF. 95
Figura 6.1 – Fluxograma da proteção direcional de corrente. 99
Figura 6.2 – Exemplificação da filosofia da função de proteção direcional de corrente para falta interna polo-terra. 100
Figura 6.3 – Exemplificação da filosofia da função de proteção direcional de corrente para falta externa à jusante do VSC_2. 100
Figura 6.4 – Função de proteção direcional de corrente implementada no RSCAD..... 102
Figura 6.5 – Função de proteção diferencial implementada no RSCAD. 103
Figura 6.6 – Função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão implementada no RSCAD 104
Figura 6.7 – Função de proteção de ondas viajantes implementada no RSCAD. 104
Figura 6.8 – Função de proteção de condutância implementada no RSCAD. 106
Figura 6.9 – Metodologia de ajuste das funções de proteção de linhas de sistemas VSC-HVDC. 109
Figura 6.10 – Localização das faltas para testes da metodologia de ajuste. 109
Figura 6.11 – Metodologia para ajuste da função de proteção do VSC_1. Falta aplicada em F3. 111
Figura 6.12 – Metodologia para ajuste da função de proteção do VSC_2. Falta aplicada em F1. 111
Figura 6.13 – Resposta do sistema diante da falta em F4..... 112
Figura 6.14 – Resposta do sistema diante da falta em F5..... 113
Figura 7.1 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1. 118
Figura 7.2 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1..... 118
Figura 7.3 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1. 119
Figura 7.4 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1. 120
Figura 7.5 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1..... 120

Figura 7.6 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1. 121
Figura 7.7 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1. 122
Figura 7.8 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1. 122
Figura 7.9 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1. 123
Figura 7.10 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1..... 123
Figura 7.11 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1..... 124
Figura 7.12 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1. 124
Figura 7.13 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC1. 125
Figura 7.14 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1. 125
Figura 7.15 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1..... 126
Figura 7.16 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1..... 127
Figura 7.17 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1. 127
Figura 7.18 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1. 128
Figura 7.19 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1. 128
Figura 7.20 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1..... 129

Figura 7.21 – Tempo de detecção das funções de proteção para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω com o LCFS com resistor shunt. Distância a partir do VSC_1. 129
Figura 7.22 – Tempo de detecção das proteções para falta polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1. 130
Figura 7.23 – Tempo de detecção das proteções para falta polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1. 132

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características das componentes de corrente durante falta. 54
Tabela 5.1 – Síntese dos resultados da metodologia. 85
Tabela 6.1 – Síntese dos resultados para ajuste das funções de proteção. 114
Tabela 7.1 – Tempo médio de detecção de faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. 131
Tabela 7.2– Tempo médio de detecção de faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. 131

Sumário

RESUMO **11**

SUMÁRIO **23**

1. INTRODUÇÃO **27**

1.1 Justificativa **31**

1.2 Objetivos **32**

1.3 Organização do trabalho **33**

1.4 Publicações **34**

2. SISTEMAS VSC-HVDC **35**

2.1 Componentes de Sistemas VSC-HVDC **35**

2.2 Operação de Sistemas VSC-HVDC **38**

2.2.1 Controle de Transferência de Potência *38*

2.2.2. Princípio de Operação do VSC *40*

2.3 Controle de VSC **42**

2.4 Proteção de linhas de sistemas HVDC **48**

2.4.1 Proteção de linhas HVDC tradicionais *50*

2.4.2 Proteção de linhas de sistemas VSC-HVDC *52*

2.5 Considerações finais sobre o capítulo **54**

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DE SISTEMAS VSC-HVDC **57**

3.1 RSCAD/RTDS® **57**

3.2 Modelagem do Sistema VSC-HVDC **59**

3.3 Faltas na linha em CC de sistemas VSC-HVDC **66**

3.4 Considerações finais sobre o capítulo **69**

4. LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA **71**

4.1 Categorias de Limitadores de Corrente de Falta 72

4.2 Modelagem de LCFS resistivos 76

4.3 Considerações finais sobre o capítulo 80

5. ANÁLISE DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA APLICADOS EM SISTEMAS VSC-HVDC 81

5.1 Metodologia de projeto efetivo do LCFS 81

5.2 Simulações de falta considerando os LCFS propostos 85

5.3 Análise do comportamento dinâmico do sistema com LCFS 90

5.5 Comparação entre o impacto dos LCF no comportamento dinâmico do sistema 93

5.6 Considerações finais sobre o capítulo 95

6. MODELAGEM E AJUSTE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO 97

6.1 Modelagem da função de proteção direcional de corrente 97

6.2 Modelagem da função de proteção diferencial 102

6.3 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão .. 103

6.4 Modelagem da função de proteção de ondas viajantes 104

6.5 Modelagem da função de proteção de condutância 105

6.6 Metodologia de ajuste das funções de proteção 106

6.8 Considerações finais sobre o capítulo 115

7. RESULTADOS 117

7.1 Influência da resistência de falta no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas 117

7.2 Influência dos limitadores indutivos no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas 121

7.3 Influência dos limitadores de corrente de falta supercondutores no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas 126

7.4 Comparação entre as funções de proteções avaliadas 130

7.5 Considerações finais sobre o capítulo 132

8. CONCLUSÕES.....135

REFERÊNCIAS 139

APÊNDICE A 143

1. Introdução

A transmissão de energia elétrica em corrente contínua, comumente referenciada por HVDC (*High Voltage Direct Current*), é adequada para a transmissão de elevados níveis de potência a longas distâncias e para a transmissão subterrânea ou submarina com distâncias superiores a 50 km, uma vez que a transmissão equivalente em corrente alternada apresentaria maiores custos e maiores perdas de potência nessas situações [1]. Um sistema de transmissão em corrente contínua (CC) é basicamente uma interface entre dois sistemas em corrente alternada (CA). O princípio básico que rege seu funcionamento é a conversão estática CA-CC, denominada retificação, quando tal conversão é realizada de corrente alternada para corrente contínua; e inversão para o processo inverso.

Tradicionalmente, a transmissão HVDC é baseada em conversores fonte de corrente (CSC – *Current Source Converter*). Esta tecnologia, a CSC-HVDC, é bem estabelecida e consolidada em todo o mundo. No Brasil, por exemplo, existe o sistema de transmissão em corrente contínua que transmite a energia excedente (energia elétrica gerada em 50 Hz e não utilizada pelo Paraguai) gerada pela usina hidrelétrica de Itaipu. Este sistema opera em ± 600 kV e transmite cerca de 6.000 MW, caracterizando-se como um dos maiores sistemas HVDC do mundo [2]. Contudo, a transmissão HVDC baseada em conversores fonte de corrente oferece baixa flexibilidade ao sistema de transmissão, limitando seu uso basicamente a aplicações ponto a ponto com elevados níveis de potência [3].

Outra tecnologia empregada para a transmissão em corrente contínua é baseada em conversores fonte de tensão (VSC – *Voltage Source Converter*), usualmente conhecida como VSC-HVDC, a qual utiliza GTO (*Gate Turn-off*) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) para a conversão de energia. Esta tecnologia vem sendo amplamente empregada em países como a Noruega, Suíça, Dinamarca, França, Espanha e Itália [4], devido às características de possuir controles mais rápidos e flexíveis quando comparada à tecnologia que emprega conversores fontes de corrente. A utilização de sistemas VSC-HVDC nos últimos anos era limitada pelo nível de potência de transmissão, que em geral era cerca de 300 MVA [2]. Entretanto, a potência nominal dos conversores vem aumentando significativamente, sendo que recentemente foi concebido um projeto de um sistema VSC-HVDC de 1000 MVA entre a Espanha e a França [5].

Os sistemas VSC-HVDC apresentam vantagens em relação aos sistemas CSC-HVDC, tais como: permitem o controle independente do fluxo de potência ativa e reativa, permitem a conexão do conversor a um sistema sem geração CA, utilizam filtros mais compactos e mais baratos, cabos mais leves e, principalmente, permitem aplicações multiterminais em corrente contínua. Este tipo de aplicação consiste em um conjunto de três ou mais estações conversoras utilizadas para criar uma rede em CC de forma a permitir a transmissão de potência para longas distâncias de maneira tecnicamente mais confiável e flexível do que a transmissão ponto a ponto [6], [7]. De modo geral, os sistemas VSC-HVDC podem ser utilizados de modo mais eficiente do que os outros tipos de sistemas de transmissão convencionais em uma série de aplicações emergentes, tais como segue [8]-[9].

- **Cargas isoladas**: muitas comunidades isoladas não são conectadas à rede elétrica, sendo dependentes da geração local para atender a sua demanda. Usualmente, a fonte de geração local é baseada em fontes não renováveis, e ainda, o preço da energia é mais caro do que se a comunidade fosse conectada à rede elétrica [8]. A integração da comunidade por um sistema VSC-HVDC é atraente, pois tais sistemas podem ser integrados mesmo que a rede receptora não possua geração própria ou ainda possua pequena geração instalada. A tecnologia VSC-HVDC também é uma possível alternativa para a transmissão de energia para localidades de difícil acesso, tal como para o acionamento a longa distância de máquinas de elevada potência. Para esta aplicação destaca-se o projeto executado para a plataforma de gás *Troll A*, na Noruega, onde a geração em terra é transmitida para a plataforma no mar através de um sistema VSC-HVDC [10], [11].
- **Potência elétrica adicional para centros urbanos:** uma vez que cabos em CC ocupam menos espaço do que linhas em CA e podem transmitir mais potência do que o equivalente em CA, 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 muito caro conseguir permissão para a construção de novas linhas.
- **Fornecimento de energia elétrica para ilhas:** normalmente o custo da energia elétrica em ilhas é bastante caro, já que, usualmente, a alimentação das cargas é realizada através de geração local. Sistemas VSC-HVDC podem conectar a ilha à rede elétrica localizada em terra e importar a energia elétrica de menor custo nela disponível de maneira mais eficiente do que outras tecnologias de transmissão [8], [9].

- **Sistemas Multiterminais:** o lado em CC de um conversor VSC pode ser caracterizado como uma fonte de tensão com polaridade fixa, o que permite a conexão em paralelo com outros sistemas VSC, constituindo sistemas multiterminais. Tal característica de conversores VSC permite criar sistemas malhados em corrente contínua, similar a sistemas em corrente alternada. De acordo com o relatório *Renewable Energy Policy Network for 21th Century* [12] a energia produzida a partir dos ventos é uma das mais limpas e promissoras e tem-se expandido continuamente. Adicionalmente, as plataformas de produção petrolífera são alimentadas a partir de turbinas a gás ou geradores diesel, de forma isolada da rede elétrica. Assim, o uso de sistemas multiterminais, em que fazendas eólicas são conectadas ao sistema elétrico no continente e às plataformas de extração de petróleo e gás, pode melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia, diminuir as emissões de CO_2 na atmosfera, maximizar o aproveitamento energético e reduzir os custos operacionais dos empreendimentos [13]. Tal cenário pode vir a ser amplamente adotado na matriz energética brasileira [3].
- **Interconexões de Sistemas de Potência:** sistemas VSC-HVDC são adequados para a conexão de sistemas de potência diferentes, principalmente se forem assíncronos. Esta característica é devido à possibilidade do VSC operar sincronizado com qualquer sistema em CA. Adicionalmente, é possível 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, melhorar o fator de potência do sistema ao qual o VSC está conectado, o que minimiza, portanto, investimentos em banco de capacitores e compensadores síncronos para regular o fator de potência do sistema ou melhorar o perfil de tensão [11].

A título de exemplificação, a Tabela 1.1 ilustra os principais projetos de sistemas VSC-HVDC instalados até o ano de 2009, assim como suas principais caraterísticas. É notável, a partir da Tabela 1.1, que, com o passar dos anos, a potência nominal de tais projetos apresentou um crescimento acentuado [2].

Destaca-se ainda que pesquisadores na Europa estão estudando e investigando uma proposta de uma *Super Rede em Corrente Contínua*, que emprega conversores VSC. Tal rede permitirá a integração de diferentes fontes intermitentes de energia elétrica, como a energia eólica proveniente do Reino Unido e a energia solar proveniente da Espanha [14]. Desta forma, a utilização da tecnologia VSC permitirá a interligação de sistemas com diferentes

frequências, mais compactos, com menores perdas técnicas nas linhas e facilitando a integração das energias renováveis em grade escala.

Vale reforçar que desde 2008 companhias como ABB, Alstom, Siemens, dentre outras, formaram uma organização denominada *Friends of Supergrid* com intuito de estudar, regulamentar, desenvolver e implantar esta *Super Rede* na Europa [14].

Tabela1. 1 - Resumo e características dos projetos VSC-HVDC instalados no mundo [2].

Nome do Projeto	**Ano de comissio-namento**	**Potência Nominal**	**Tensão CC**	**Tamanho dos cabos CC**	**Principais Comentários**	**Topologia**
Hellsjön,' Suécia	1997	3 MW, ± 3 MVAr	±10 kV	10 km, Linhas aéreas	Sistema de transmissão teste	2 níveis
Gotland HVDC Light, Suécia	1999	50 MW -55 a + 50 MVAr	± 80 kV	2x70 km, Cabos submarinos	Integração com energia eólica (suporte de tensão)	2 níveis
Eagle Pass, EUA	2000	36 MW ± 36 MVAr	±15,9 kV	*Back-to-back*	Conexão assíncrona. Controle de tensão e intercâmbio.	3 níveis NPC
Tjaereborg, Dinamarca	2000	8 MVA	± 9 kV	2x4,3 km, Cabos submarinos	Projeto de demonstração com integração eólica	2 níveis
Terrenora Inteconnection, Austrália	2000	180 MW -165 a +90 MVAr	± 80 kV	6x59 km, Cabos subterrâneos	Conexão assíncrona. Fácil permissão para cabos subterrâneos.	2 níveis
Murray Link, Austrália	2002	220 MW -150 a +140 MVAr	±150 kV	2x180 km, Cabos subterrâneos	Conexão assíncrona. Fácil permissão para cabos subterrâneos.	3 níveis ANPC
CrossSound, EUA	2002	330 MW ± 150 MVAr	± 150 kV	2x40 km, Cabos submarinos	Controle de intercambio.	3 níveis ANPC
Troll A offshore, Noruega	2005	84 MW -20 a +24 MVAr	± 60 kV	4x70 km, Cabos submarinos	Redução de emissão de CO_2. Acionamento de carga em alto mar.	2 níveis
Estlink, Estônia-Finlandia	2006	350 MW ±125 MVAr	± 150 kV	2x31 km, subterrâneos e 2x74 km submarinos	Conexão assíncrona e cabos subterrâneos.	2 níveis
NORD E.ON 1, Alemanha	2009	400 MW	±150 kV	2x75 km subterrâneos e 2x128 km submarinos	Integração com fazenda eólica *offshore*. Sistemas assíncronos.	-
Caprivi Link, Namíbia	2009	300 MW	350 kV	970 km, Linhas aéreas	Conexão com rede fraca.	-

1.1 Justificativa

As vantagens de sistemas VSC-HVDC em relação a outros tipos de sistemas de transmissão de energia elétrica, aliadas aos avanços tecnológicos da eletrônica de potência vêm motivando a realização de pesquisas e projetos sobre este tópico em todo o mundo [1-15]. Grande parte dos esforços se concentra nas técnicas de controle dos conversores, contudo, a limitação da utilização de sistemas VSC-HVDC até os dias de hoje é devida, principalmente, à fragilidade desses sistemas para faltas na linha em CC [2]. Sendo assim, é imprescindível a necessidade de estudos relacionados ao sistema de proteção das linhas em corrente contínua.

Devido às características construtivas dos sistemas VSC-HVDC, o impacto de um curto-circuito na linha em CC difere significativamente do impacto associado à mesma perturbação para os sistemas CSC-HVDC. Estes têm a natural habilidade de suportar curtos-circuitos na linha CC devido aos indutores em série com a linha, os quais ajudam a limitar a corrente durante situações faltosas. Os sistemas VSC-HVDC, entretanto, são mais vulneráveis a faltas CC, uma vez que não apresentam reatores capazes de limitar as correntes de falta [2] e, ainda, o limite de suportabilidade a sobrecargas das estações conversoras para estes sistemas é inferior ao equivalente CSC-HVDC [6]. Esta peculiaridade obriga que a proteção de sistemas VSC-HVDC seja mais veloz do que a correspondente CSC-HVDC. Dado que os sistemas VSC são uma tecnologia recente para a transmissão de energia elétrica, os esquemas de proteção para tais sistemas não estão completamente estabelecidos, então, há margens para contribuições técnicas nesta área. Esta pesquisa, portanto, está inserida dentro do contexto da proteção de linhas de transmissão em corrente contínua utilizando conversores fonte de tensão.

Tradicionalmente, as proteções empregadas para detecção de faltas na linha CC de sistemas HVDC são: proteção de ondas viajantes e proteção de taxa de variação de tensão como proteções principais, aliadas à proteção de subtensão e proteção diferencial como retaguarda [15]-[16]. Um recente método de proteção, baseado na variação do sentido da corrente de falta, proposto em [17], tem a capacidade de também trabalhar como proteção principal para identificar faltas na linha CC de sistemas VSC-HVDC. Adicionalmente, em [18] é apresentado um método de detecção de falta na linha em CC baseado na sobrecorrente aliado à subtensão que apresenta uma resposta rápida e eficiente para aplicações utilizando conversores fonte de tensão.

Outra vertente de estudos entre as pesquisas relacionadas à proteção de sistemas VSC-HVDC incorpora a utilização de limitadores de corrente de falta baseados em materiais supercondutores (LCFS) [19]-[20]. Os LCFS podem minimizar significativamente os impactos das elevadas correntes de curto-circuito e melhorar o desempenho do sistema durante a falta [20].

Limitadores de corrente de falta (LCF), de modo geral, são dispositivos que apresentam uma resistência praticamente nula em condições normais e alta resistência durante condições faltosas [19]-[20]. Esta característica de incrementar o valor da resistência em função da elevação da corrente é benéfica ao sistema, uma vez que a sobrecorrente é limitada e as oscilações no sistema são amortecidas, o que tende a aumentar as margens de estabilidade do sistema. Contudo, ainda assim se fará necessária a atuação do sistema de proteção das linhas CC, com intuito de isolar a linha faltosa para que a operação segura do sistema possa ser restabelecida.

Ainda em relação a LCF aplicados em sistemas VSC-HVDC, em [21] é proposta a utilização de limitadores de corrente de falta indutivos (LCFI) em série com a linha CC. Estes limitadores atrasam o crescimento da corrente de falta, o que permite que o sistema de proteção das linhas tenha mais tempo para extinguir a condição faltosa.

Neste contexto, um ponto em aberto nas pesquisas na área da proteção de sistemas VSC-HVDC é o estudo em sinergia de LCF com as funções de proteção da linha CC, uma vez que os principais estudos da área não analisam o desempenho dessas funções considerando os LCF, tampouco os seus impactos nos ajustes de tais proteções [16]-[21].

1.2 Objetivos

Esta pesquisa de mestrado tem como objetivo geral avaliar as funções de proteção contra faltas na linha em CC de sistemas VSC-HVDC na presença de limitadores de corrente de falta baseado em materiais supercondutores e limitadores de corrente de falta indutivos.

Os objetivos específicos deste projeto de pesquisa são apresentados a seguir:

- Executar simulações para analisar os impactos devido às faltas na linha em CC de sistemas VSC-HVDC;
- Modelar e ajustar as principais proteções utilizadas em linhas HVDC, quando aplicadas em sistemas VSC-HVDC;

- Modelar limitadores de corrente de falta baseados em materiais supercondutores aplicados a sistemas VSC-HVDC e avaliar seus impactos na resposta do sistema e no comportamento das funções de proteção empregadas no trabalho; e
- Avaliar os impactos de limitadores de corrente de falta indutivos no comportamento dinâmico de sistemas VSC-HVDC e seus impactos no comportamento das funções de proteção utilizadas.

As simulações e modelagens implementadas nesta pesquisa serão realizadas com o auxílio do *software* RSCAD [22], que é uma ferramenta computacional utilizada para a simulação de sistemas elétricos, e representa a interface gráfica do simulador em tempo real RTDS®. O simulador RTDS® é uma combinação de *software* e *hardware* capaz de realizar simulações de transitórios em sistemas de potência em tempo real e malha fechada, com flexibilidade para o uso de portas analógicas e digitais de entrada e saída, interface gráfica amigável e extensa biblioteca de componentes de sistemas de potência, proteção e controle. A motivação da utilização de simuladores em tempo real é a possibilidade de executar testes em malha fechada de equipamentos de proteção e controle, permitindo testar, por exemplo, o comportamento de dispositivos comerciais em ambientes de simulação [22].

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está segmentado de acordo com a seguinte estrutura:

Capítulo 2: é apresentada a revisão bibliográfica acerca de sistemas VSC-HVDC, no que diz respeito ao seu princípio de funcionamento, operação e controle. Nesse capítulo ainda é apresentada uma sucinta revisão bibliográfica sobre proteção de linhas de transmissão em corrente contínua.

Capítulo 3: é apresentada a modelagem do sistema VSC-HVDC em estudo no *software* RSCAD. Ademais, são apresentadas simulações de falta no domínio do tempo nas linhas em CC, com o intuito de ilustrar a fragilidade destes sistemas quando sujeitos a estas faltas.

Capítulo 4: é apresentada a revisão bibliográfica sobre limitadores de corrente de falta, especificamente sobre os limitadores baseados em materiais supercondutores. Adicionalmente, neste capítulo é apresentado o modelo matemático do LCFS implementado no RSCAD, com auxílio da ferramenta *C-Builder*.

Capítulo 5: é apresentada a metodologia para determinar qual a mínima resistência o LCFS deve impor no circuito, de modo que a máxima corrente de falta do sistema não

ultrapasse um patamar previamente selecionado. Adicionalmente, são apresentadas as principais simulações de falta nas linhas em CC de sistemas VSC-HVDC na presença de LCFS e LCFI. É evidenciado neste capítulo o impacto benéfico da utilização de limitadores de corrente de falta em tais sistemas.

Capítulo 6: é apresentada neste capítulo a modelagem das cinco funções de proteção utilizadas nesta pesquisa, sendo que uma delas é proposta originalmente por este trabalho. Adicionalmente, este capítulo apresenta a metodologia de ajuste das funções de proteção que foi utilizada neste trabalho, o que também é caracterizada como uma das contribuições técnicas do trabalho.

Capítulo 7: neste capítulo são apresentados os resultados acerca do desempenho das funções de proteção implementadas, diante de centenas de simulações de falta, com diferentes cenários considerados. Este capítulo ilustra o impacto dos LCF em cada função de proteção, sendo que, em alguns casos, os LCF podem impedir a detecção de determinadas faltas na linha em CC.

Capítulo 8: são apresentadas neste capítulo as principais conclusões obtidas nesta pesquisa de mestrado, assim como uma visão geral do que foi realizado, destacando os principais resultados obtidos.

1.4 Publicações

Até o momento, este trabalho resultou no seguinte artigo publicado:

F. A. Mourinho, D. Motter, J. C. M. Vieira, R. M. Monaro, S. P. Le Blond, M. Zhang and W. Yuan, “Modeling and Analysis of Superconducting Fault Current Limiters applied in VSC-HVDC Systems” in *2015 IEEE PES General Meetin*g, Denver, CO, USA, July, 2015.

Adicionalmente, foi aceito o seguinte artigo para publicação:

F. A. Mourinho, J. C. M. Vieira e R. Bertho Junior “Impacto de limitadores de corrente de falta no comportamento dinâmico e na proteção de sistemas VSC-HVDC durante faltas na linha CC” no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2016, Natal, RN, Maio, 2016.

2. Sistemas VSC-HVDC

É apresentada neste capítulo uma revisão acerca dos princípios de funcionamento, operação e controle de sistemas VSC-HVDC, bem como das principais funções de proteção empregadas nas linhas de corrente contínua destes sistemas.

2.1 Componentes de Sistemas VSC-HVDC

Os componentes clássicos de sistemas VSC-HVDC são: estações conversoras, que transformam a tensão em CC (estação retificadora) ou em CA (estação inversora), capacitores no lado CC, os quais fornecem uma fonte de tensão unidirecional; e reator do lado CA, para permitir o controle dos fluxos de potência ativa e potência reativa. Além destes elementos, complementam a composição destas estruturas: transformadores, reatores de alisamento, filtros CC, filtros CA, disjuntores e equipamentos de medição. A Figura 2.1 sintetiza a arquitetura básica de um sistema VSC-HVDC.

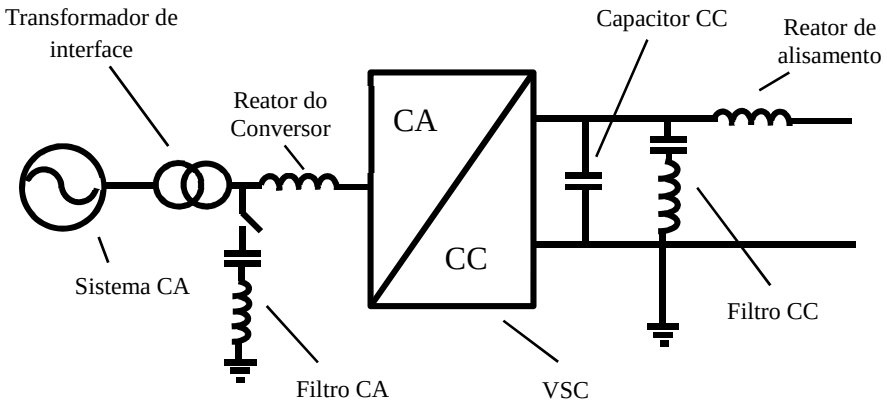

Figura 2.1 - Componentes básicos de um sistema VSC-HVDC.

A seguir, serão abordados sucintamente os componentes apresentados na estrutura da Figura 2.1.

Transformador de Interface

O transformador de interface figura como uma reatância que é utilizada, juntamente com o reator do conversor, para controlar a potência ativa e reativa de saída/entrada do VSC.

Adicionalmente, tal transformador pode ser utilizado como adaptador da tensão da rede e a tensão de saída do conversor.

Salienta-se que a ligação do transformador altera significativamente a resposta do sistema para faltas na linha CC [6]. Este fator deve ser analisado para a escolha da ligação mais apropriada.

Reator do Conversor

O reator do conversor é o elemento crucial para o controle do VSC. Tal componente permite o controle independente da potência ativa e reativa fornecida pelo conversor, assim como será ilustrado na próxima seção. Além desta característica, os reatores do conversor reduzem a corrente de falta, estabilizam a corrente CA e ajudam a minimizar os níveis das correntes harmônicas [6].

Filtro CA de Harmônicos

Normalmente um sistema VSC-HVDC é operado via modulação PWM, que gera harmônicos devido a chaveamentos da tensão de saída. Desta forma, faz-se necessária a utilização de filtros no lado CA para que os valores de distorções harmônicas sejam inferiores aos máximos estipulados por normas vigentes do setor elétrico. Cabe ressaltar ainda que tais filtros operam papel importante ao limitar a exposição do transformador a altos níveis de variação de tensão (*dv/dt*) gerados na modulação [7].

Conversores Fonte de Tensão

Os conversores do tipo fonte de tensão são os componentes essenciais para a conversão da tensão CA em CC na estação retificadora, e tensão CC em CA na estação inversora.

O conversor de dois níveis, apresentado na Figura 2.2, é a forma mais simples de construir um VSC trifásico. Tal circuito é constituído por seis válvulas (também denominadas por chaves), em que cada válvula contém IGBTs com diodos em antiparalelo. A tensão nominal de cada IGBT é de aproximadamente 2,5 kV com frequência de comutação que varia, geralmente, entre 1 e 2 kHz [7].

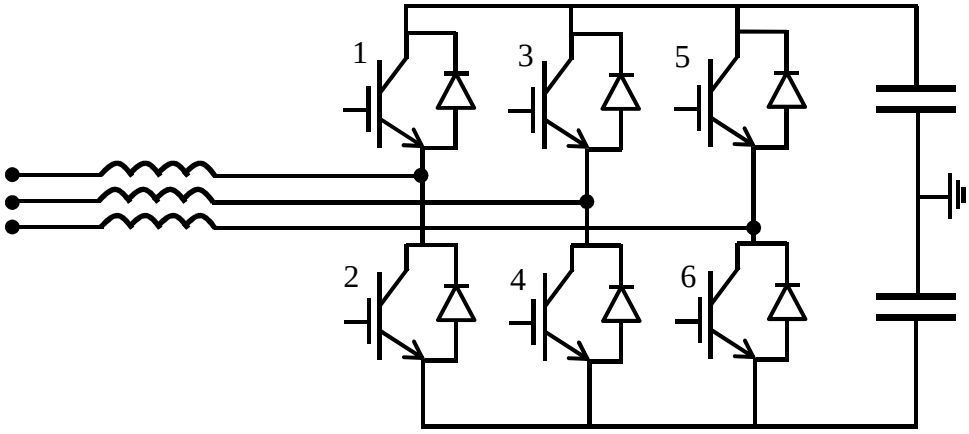

Figura 2.2 - VSC trifásico de dois níveis.

Para utilizar o conversor de dois níveis para aplicações de alta potência, os IGBT (com os diodos em antiparalelo) são ligados em série a fim de dividir a tensão imposta sobre cada componente. O número de dispositivos necessário é determinado pela potência e tensão nominal da estação e pode chegar a mais de 2000 dispositivos associados em série. É importante salientar que uma falha em um IGBT não deve criar um circuito aberto (prejudicando o funcionamento de todo conversor), mas deve fazer com que o dispositivo faltoso estabeleça um curto-circuito, de modo que o VSC seja capaz de operar até uma parada programada para manutenção [6].

Nas próximas seções serão explicados o seu princípio de funcionamento, operação e controle dos conversores.

Capacitor CC

Os capacitores do lado CC fornecem a tensão contínua necessária para a operação das chaves (IGBT) do VSC. Para que o sistema opere de maneira adequada, o nível da tensão CC do elo precisa se manter estável para que os controladores consigam atuar e controlar os fluxos de potência ativa e potência reativa. O capacitor deve ter a capacidade de manter tal valor constante ao armazenar energia em determinados períodos [7].

Reator de alisamento

A função principal deste reator é suavizar as ondulações do nível CC provocadas pelo chaveamento das válvulas e deixar a tensão CC com uma forma de onda com menor *ripple*, além de ajudar a atenuar as correntes de curto-circuito do lado CC do VSC.

Filtro CC

O filtro CC pode ser utilizado em paralelo com os capacitores CC para filtragem de harmônicos indesejáveis (como o de terceira ordem) e pode ainda servir como uma alternativa para aumentar o tamanho do capacitor em situações específicas [11].

2.2 Operação de Sistemas VSC-HVDC

Os conversores do tipo fonte de tensão têm a capacidade de controlar, independentemente, tanto a potência ativa quanto a potência reativa, através do controle da fase e amplitude da tensão CA de saída do VSC, respectivamente. Tal propriedade traz grandes vantagens no que diz respeito à flexibilidade de controle, uma vez que os controles são rápidos e desacoplados [6], [7], [23]. Maiores detalhes são apresentados nas subseções a seguir.

2.2.1 Controle de Transferência de Potência

A Figura 2.3 ilustra o diagrama básico, simplificado, de um sistema VSC-HVDC de dois terminais. A partir desta figura será apresentado o princípio do controle da potência ativa e reativa de saída (ou entrada) do conversor. A reatância entre a tensão do sistema CA (V_{sis}) e a tensão de saída do VSC (V_{conv}) ilustra o equivalente da reatância do transformador e do reator do VSC. As parcelas resistivas destes elementos foram suprimidas para facilitar a explicação do princípio de transferência de potência.

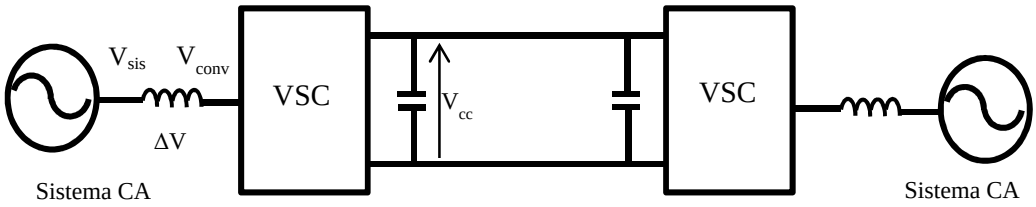

Figura 2.3 - Diagrama básico de um sistema VSC-HVDC de dois terminais.

As potências ativas e reativas fornecidas por um VSC podem ser expressas, de maneira aproximada, através da Equação 2.1 e da Equação 2.2 [6].

$$P = \frac{V_{sis} V_{conv} \sin \delta}{X} \tag{2.1}$$

$$Q = \frac{(V_{conv}\cos\delta - V_{sis})V_{sis}}{X} \tag{2.2}$$

em que: V_{sis} é o módulo da componente fundamental da tensão do lado CA, V_{conv} é o módulo componente fundamental da tensão de saída do VSC, δ é o ângulo entre V_{sis} e V_{conv} e X é a reatância entre o VSC e o sistema CA.

A potência ativa pode ser controlada, principalmente, ao variar o ângulo de fase δ. Se a fase da tensão de saída do VSC estiver em atraso em relação à tensão CA do sistema, o sistema injeta potência no VSC, ou seja, o VSC, neste caso, opera como retificador. De maneira análoga, se o ângulo da tensão no terminal do VSC estiver em avanço em relação ao ângulo da tensão do sistema CA, o VSC opera como inversor, fornecendo potência ativa ao sistema. A potência reativa, por sua vez, é controlada, principalmente, por meio da regulação da amplitude da tensão de saída (ou entrada) do VSC. Se a amplitude da tensão de saída do VSC (V_{conv}) for menor que a tensão do sistema CA (V_{sis}) o conversor absorve reativos (comportamento indutivo), e de maneira oposta, se o produto $V_{conv}cos\delta$ for maior que V_{sis} o VSC fornece reativos ao sistema (comportamento capacitivo).

Desta forma, um VSC pode operar em qualquer ponto dentro do círculo apresentado na Figura 2.4, ou seja, pode trabalhar como retificador ou inversor e com o fator de potência adiantado ou atrasado. Tal característica dos conversores VSC é uma das principais vantagens em relação aos conversores CSC [6].

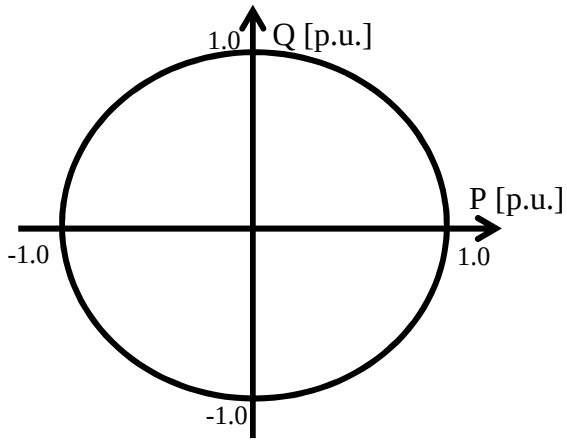

Figura 2.4 – Região de operação do VSC.

Salienta-se ainda que os conversores fonte de tensão podem operar como compensadores de potência reativa e não entregar potência ativa para o sistema. Neste modo

de operação a potência ativa entregue é igual a zero ($\delta = 0$) e controla-se a magnitude da tensão V_{conv} para gerar ou absorver potência reativa do sistema.

2.2.2. Princípio de Operação do VSC

Na frequência fundamental, um VSC pode ser representado por um fasor de tensão, com a magnitude e a fase da tensão CA determinados pela tensão CC e pelo padrão de chaveamento adotado.

Para ilustrar o princípio de operação dos conversores VSC, considera-se o conversor de dois níveis monofásico apresentado na Figura 2.5, junto com sua a forma de onda da tensão de saída.

Os diodos em antiparalelo com as chaves estão ligados para assegurar que a tensão da estação conversora tenha apenas uma polaridade, enquanto que a corrente pode fluir em ambos os sentidos.

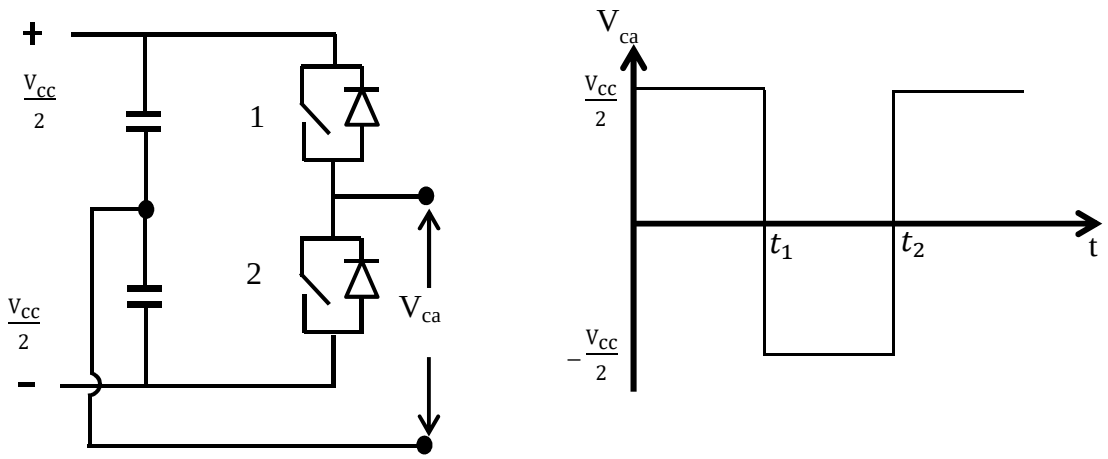

Figura 2.5 – Conversor VSC de dois níveis e forma de onda de saída.

O funcionamento do circuito pode ser sintetizado como segue:

Quando a chave 1 está ligada, a tensão de saída é $+{}^{V_{cc}}/_{2}$ e a corrente flui através do diodo 1 se a corrente for negativa ou através da chave se a corrente for positiva.

Quando a chave 2 está ligada, a tensão de saída é $-{}^{V_{cc}}/_{2}$ e a corrente flui através da chave 2 se a corrente for negativa ou através do diodo se a corrente for positiva. A forma de onda da tensão de saída do conversor apresentada na Figura 2.5 ilustra uma onda quadrada, porém alternada que, se modulada de maneira conveniente e filtrada, apresentará comportamento senoidal com frequência fundamental igual à do sistema CA.

Deve-se atentar para as duas chaves não ficarem ligadas ao mesmo tempo, pois pode ocorrer um curto-circuito nos capacitores CC.

Técnica de Modulação PWM (*Pulse Width Modulation*)

A metodologia mais usual de controle do VSC é baseada na modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*), técnica que permite maior flexibilidade de controle e independência do controle de potência ativa e reativa além da habilidade de limitar a geração de harmônicos de baixa frequência.

Tal técnica consiste, essencialmente, no chaveamento em alta frequência de uma tensão contínua, em que a forma de onda de saída é filtrada para produzir uma componente fundamental e eliminar harmônicos de alta frequência [6].

Uma das formas mais utilizadas na implementação da técnica PWM, aplicada em conversores fonte de tensão, é a comparação de um sinal de referência senoidal com uma forma de onda triangular, técnica denominada de PWM senoidal. A Figura 2.6 sintetiza o princípio de funcionamento da técnica PWM.

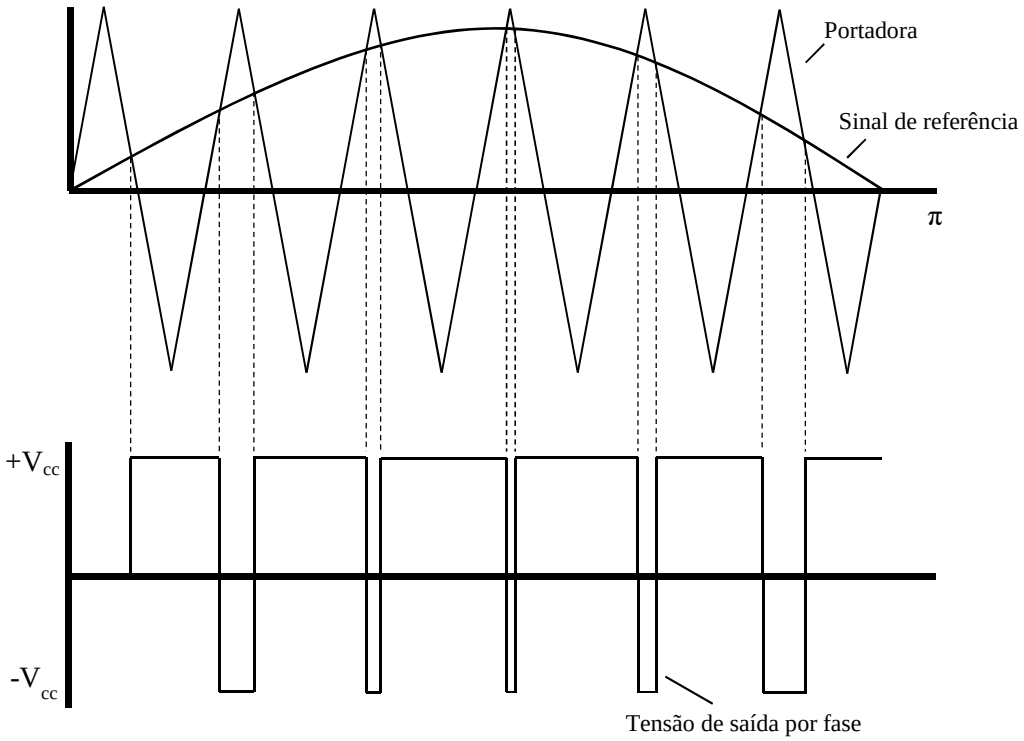

Figura 2.6 – Princípio de Funcionamento do PWM senoidal.

Nesta técnica, os momentos de inversão da tensão de saída (gráfico inferior da Figura 2.6) são determinados pelas interseções da tensão senoidal de frequência fundamental

(f) com a onda triangular (dente de serra - portadora) de frequência pf (gráfico superior da Figura 2.6). Destaca-se que o harmônico dominante desta alternativa é o de ordem p.

2.3 Controle de VSC

O controle de um VSC está diretamente relacionado com o controle da amplitude e da fase da componente fundamental da tensão CA nos terminais do conversor, como supracitado. A magnitude da tensão CA de saída do conversor é proporcional à tensão CC no elo, assim como ilustra a Expressão 2.3.

$$\lambda = \frac{V_{conv}}{V_{cc}} \tag{2.3}$$

em que: V_{conv} é o valor eficaz da componente fundamental da tensão do conversor; V_{cc} é a tensão nos terminais CC e λ é o fator de relação de tensão.

O controle da amplitude da tensão de saída (ou entrada) V_{conv} pode ser obtido por meio da variação do fator λ. Tal índice pode variar de 0 a 1 e pode ser ajustado de forma a controlar a potência reativa de saída do conversor. O controle da fase da tensão V_{conv} é obtido por meio do ângulo da frequência fundamental desta tensão com relação ao ângulo da componente fundamental da tensão CA do sistema, medida por um PLL (*Phase Locked Loop*). Uma variação neste ângulo permite a variação do fluxo de potência ativa de saída do VSC. Desta forma, pode-se dizer que a estratégia de controle do VSC é determinada por meio do controle do fator λ e ângulo de fase δ.

Existem, basicamente, duas estratégias de controle para implementar o controle do índice de modulação λ e do ângulo de fase δ: o controle direto e o controle vetorial. No controle direto o índice de modulação λ ou o ângulo de fase δ podem ser ajustados de forma direta, assim como apresentado na Figura 2.7. Entretanto, ao variar δ com objetivo de controlar a potência ativa altera-se também (em menor proporção) a potência reativa.

De maneira complementar, ao variar λ com o objetivo de controlar a potência reativa, a potência ativa também é alterada. As grandezas A e B são as grandezas a serem controladas pelo VSC, as quais serão comentadas na sequência do texto.

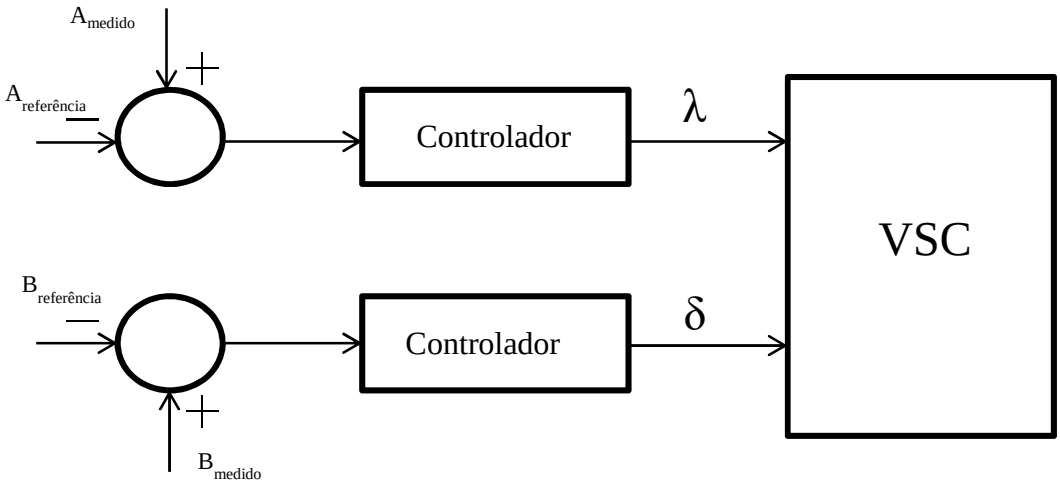

Figura 2.7 – Controle direto do índice de modulação e do ângulo de fase.

O controle vetorial, por sua vez, tem a vantagem de desacoplar a ação de ajuste do índice de modulação e do ângulo de fase, assim como ilustrado na Figura 2.8. No controle vetorial, as correntes trifásicas são transformadas para os eixos *d* e *q* e são sincronizadas com o sistema CA via um PLL. As tensões do eixo *d* e eixo *q* geradas pelo controle vetorial são transformadas novamente para domínio de fase, sendo que, após moduladas atuarão no VSC.

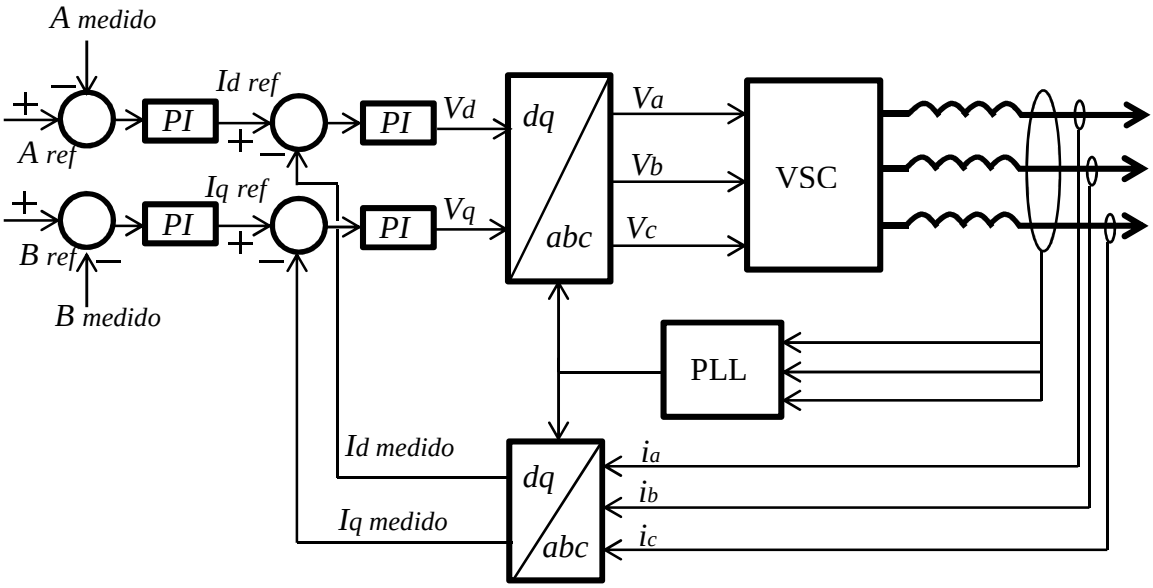

Figura 2.8 – Controle vetorial do índice de modulação e do ângulo de fase.

Basicamente, o controle vetorial é composto em uma malha de controle interna que controla as correntes de eixo direto e eixo em quadratura, e uma malha de controle externa, a qual fornece as referências para a malha de controle interna. Os controladores externos podem controlar a tensão CC, a transferência de potência ativa e reativa ou até mesmo a tensão CA

de saída do VSC. A escolha do parâmetro a ser controlado depende das particularidades de cada sistema. Destaca-se que em todas as combinações dos controladores externos, é necessário que um VSC controle a tensão CC, a fim de manter o balanço de potência ativa no sistema [24]. De modo geral, os controladores utilizados são os proporcionais-integrais (PI), com o intuito de zerar o erro em regime permanente e apresentar um desempenho dinâmico aceitável [6].

De modo geral, a malha de controle interna calcula a queda de tensão necessária no reator de fase do VSC para produzir correntes em CA dentro dos limites nominais dos conversores [25]. A queda de tensão sobre este reator pode ser calculada por meio da Equação 2.4.

$$V_{sis} - V_{conv} = R_f \cdot i_c + L_f \frac{d}{dt}(i_c) \tag{2.4}$$

em que R_f é a resistência do resistor de fase do VSC, L_f é a indutância do reator de fase do VSC e i_c é a corrente em tal reator. Estas equações, quando transformadas para coordenadas *d*-*q* resultam na Equação 2.5 e Equação 2.6 [25].

$$V_{sis_d} - V_{conv_d} = R_f \cdot i_{c_d} + L_f \frac{d}{dt}\left(i_{c_d}\right) - \omega \cdot L_f \cdot i_{c_q} \tag{2.5}$$

$$V_{sis_q} - V_{conv_q} = R_f \cdot i_{c_q} + L_f \frac{d}{dt}\left(i_{c_q}\right) + \omega \cdot L_f \cdot i_{c_d} \tag{2.6}$$

em que ω é a frequência angular do sistema, V_{sis_d}, V_{conv_d}, i_{c_d} são as grandezas elétricas refletidas no eixo direto e V_{sis_q}, V_{conv_q}, i_{c_q} são as mesmas grandezas refletidas no eixo de quadratura. Cabe salientar que estas equações consideram apenas as grandezas em frequência fundamental. Fica exposto ainda na Equação 2.5 e Equação 2.6 um acoplamento entre o eixo *d* e eixo *q*. A Figura 2.9 ilustra o diagrama de blocos que sintetiza tais equações.

No controle da malha interna, as correntes através do reator de fase do VSC são comparadas com valores de referência fornecidos pelos controladores externos. Desta forma, um controlador é utilizado para transformar o erro de corrente em erro de tensão. Este erro de tensão é subtraído da tensão do conversor, criando uma referência de tensão, a qual deve ser compatível com os valores nominais do conversor.

Neste sentido, quando o erro é nulo, a tensão do conversor apresenta o valor desejado. A Figura 2.10 ilustra o diagrama de blocos da malha de controle interna do controle vetorial dos sistemas VSC-HVDC.

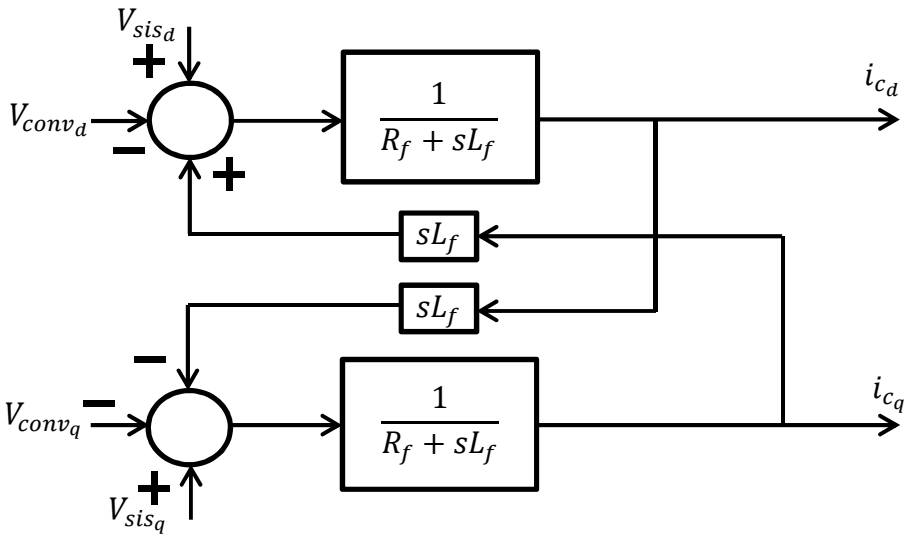

Figura 2.9 – Diagrama de blocos representativo da queda de tensão no reator do VSC.

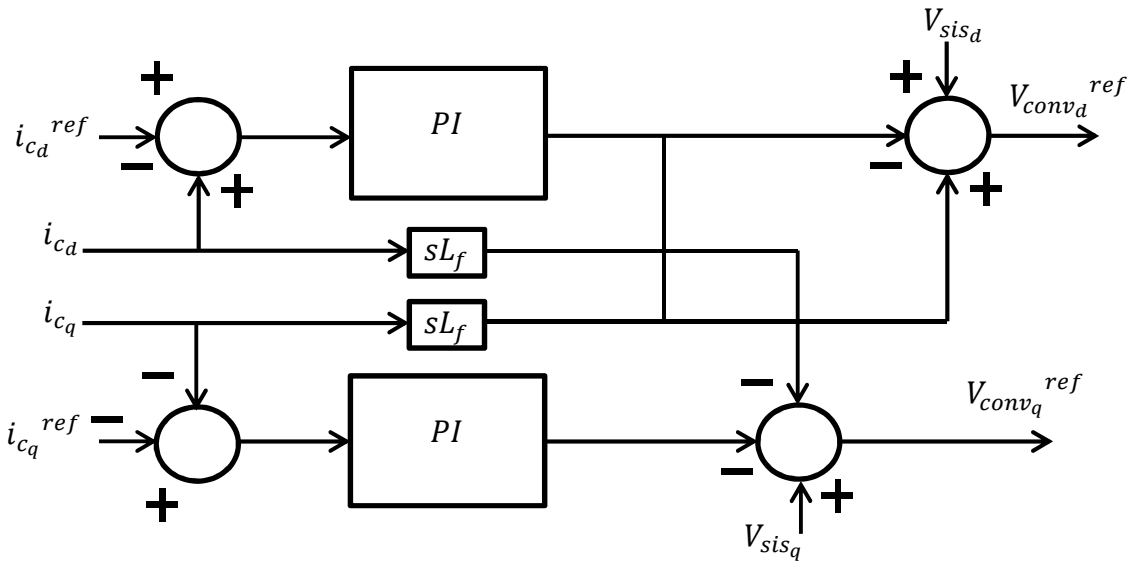

Figura 2.10 – Malha de controle interna.

A malha de controle externa deve fornecer os valores de $i_{c_d}{}^{ref}$ e $i_{c_q}{}^{ref}$, de modo que a malha de controle interna gere uma tensão de referência que faça com que a grandeza a ser controlada pela malha de controle externa atinja seu valor de referência.

A seguir serão apresentadas as principais grandezas que podem ser controladas por meio da malha de controle externa dos sistemas VSC-HVDC.

Controle da Frequência

O controle da frequência é essencial quando o VSC-HVDC é a única fonte de potência do sistema, ou seja, ao alimentar uma carga isolada. De forma similar, quando o VSC-HVDC está conectado a um sistema de potência ativo (que contém geração), ele ainda pode contribuir para o controle de frequência retirando ou fornecendo potência ativa para do mesmo, contudo, o valor da frequência será determinado pela característica carga-geração do sistema [6].

Controle da tensão CA

A tensão CA de saída do conversor é controlada pela variação da magnitude da tensão de frequência fundamental do mesmo, de modo a variar a tensão CC dos capacitores ou variando o índice de modulação do conversor [6]. Para alimentar cargas isoladas, é fundamental que o VSC opere controlando a tensão CA de saída.

Controle da potência ativa

É realizado ao controlar o ângulo de fase do componente de frequência fundamental. Salienta-se que a transferência de potência ativa através do *link* CC requer a simultânea coordenação entre os dois extremos do *link*, ou seja, a potência ativa de entrada deve ser igual à de saída acrescida das perdas. Se houver qualquer diferença, a tensão CC no *link* pode variar significativamente. Para operação satisfatória, um conversor deve ficar responsável por controlar a tensão CC do *link* e o outro a potência ativa. Tal controle ainda contribui no amortecimento de oscilações eletromecânicas e pode aumentar as margens de estabilidade do sistema elétrico de potência.

Controle da potência reativa

A potência reativa é controlada pela magnitude da tensão CA de saída do conversor. O uso dessa função pode aumentar a eficiência do sistema de transmissão, melhorar o fator de potência do sistema elétrico CA ao qual o VSC está conectado, minimizando, portanto, investimentos em banco de capacitores e compensadores síncronos para regular o fator de potência do sistema ou melhorar o perfil de tensão [6].

Uma das principais vantagens dos sistemas VSC-HVDC sobre os sistemas HVDC tradicionais é que os conversores VSC permitem o controle independente do fluxo de potência

ativa e reativa no sistema [2], [6], [7], [23]. Neste sentido, na sequência é demonstrado por meio de equações esta afirmação e ilustrado um diagrama de blocos da malha de controle externa de sistemas VSC-HVDC.

Os valores instantâneos de potência ativa e potência reativa de um sistema trifásico no domínio de fase podem ser calculados, respectivamente, por meio da Equação 2.7 e Equação 2.8 [25].

$$p_{ac} = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \tag{2.7}$$

$$q_{ac} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (v_{ab} \cdot i_a + v_{bc} \cdot i_b + v_{ca} \cdot i_c) \tag{2.8}$$

em que p_{ac} é a potência ativa trifásica, q_{ac} é a potência reativa trifásica, v_a, v_b e v_c são as tensões nas fases *a*, *b*, e *c*, respectivamente, i_a, i_b e i_c são as correntes das fases *a*, *b*, e *c*, respectivamente e v_{ab}, v_{bc} e v_{ca} são as tensões de linha do sistema. Neste sentido, utilizando a Transformada de Park que preserva a magnitude das grandezas de fase, a potência ativa e potência reativa podem ser calculadas no domínio *dq*, tal como sintetizado na Equação 2.9 e na Equação 2.10 [25].

$$p_{ac} = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \tag{2.9}$$

$$q_{ac} = \frac{3}{2} \cdot (v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q) \tag{2.10}$$

Sendo v_d e v_q as tensões no eixo *d* e *q*, respectivamente; e i_d e i_q as correntes do eixo *d* e *q*, respectivamente. Fazendo o eixo *d* em fase com a fase *a* da tensão do sistema CA (V_{sis}), a componente de v_q será nula [25]. Desta forma, a potência ativa e a potência reativa podem ser escritas tal como apresenta a Equação 2.11 e Equação 2.12.

$$p_{ac} = \frac{3}{2} \cdot v_d \cdot i_d \tag{2.11}$$

$$q_{ac} = -\frac{3}{2} \cdot v_d \cdot i_q \tag{2.12}$$

A partir da Equação 2.11 e Equação 2.12 é possível concluir que a potência ativa e potência reativa podem ser controladas independentemente, ao controlar i_d e i_q respectivamente. As referências de corrente no domínio *dq*, as quais são calculadas através da potência ativa e potência reativa, precisam ser saturadas antes de entrar na malha de controle

interna, com intuito de fazer com que as correntes não extrapolem os valores nominais dos conversores [25]. Neste sentido, a Figura 2.11 ilustra o diagrama de blocos da malha de controle externa de conversores VSC, controlando a potência ativa e potência reativa e fornecendo as referências de corrente para a malha de controle interna.

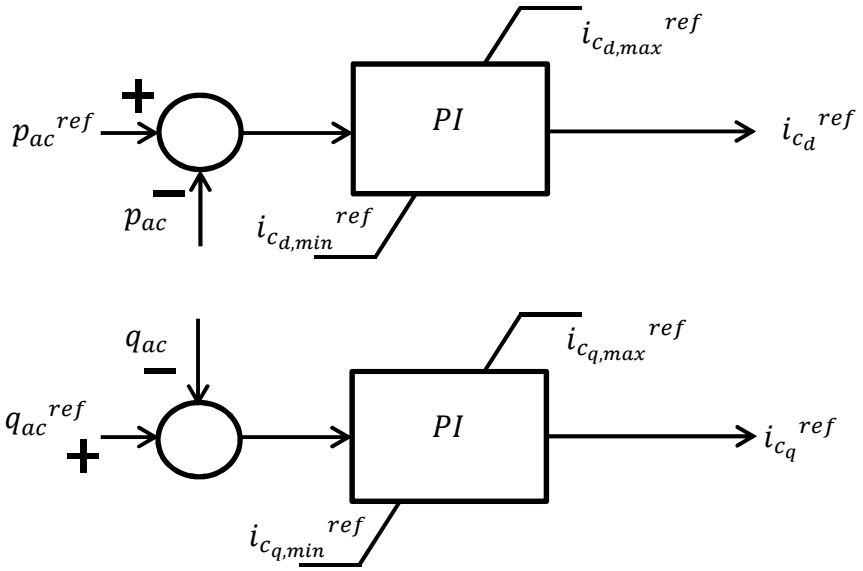

Figura 2.11 – Diagrama de blocos da malha de controle externa. Controle da potência ativa e potência reativa.

2.4 Proteção de linhas de sistemas HVDC

O principal objetivo do sistema de proteção de sistemas HVDC é prevenir, minimizar e evitar eventuais danos aos componentes individuais do sistema, causados por falhas ou sobrecargas. A escolha de um sistema de proteção apropriado garante que todas as faltas sejam detectadas de forma seletiva, rápida e coordenada [26].

Neste sentido, espera-se que o sistema de proteção seja confiável a ponto de não causar desligamentos desnecessários ou não deixar de atuar quando haja necessidade, devido à má operação de seus equipamentos constituintes. Portanto, uma forma de aumentar a confiabilidade das proteções de sistemas HVDC é implementá-las de maneira redundante [26]. Assim, o sistema é constituído por funções de proteção principais e funções de proteção de retaguarda (ou de *backup*), as quais devem utilizar medidas de diferentes dispositivos e serem alimentadas, se possível, por diferentes fontes de alimentação. Adicionalmente, as funções de proteção podem ser duplicadas com intuito de maximizar a confiabilidade do sistema como um todo.

Tradicionalmente, a proteção de sistemas HVDC é dividida por zonas de proteção, as quais devem ser completamente protegidas com seus apropriados tempos de detecção de falta. A Figura 2.12 ilustra um sistema VSC-HVDC de dois terminais com destaque para cada zona de proteção em específico.

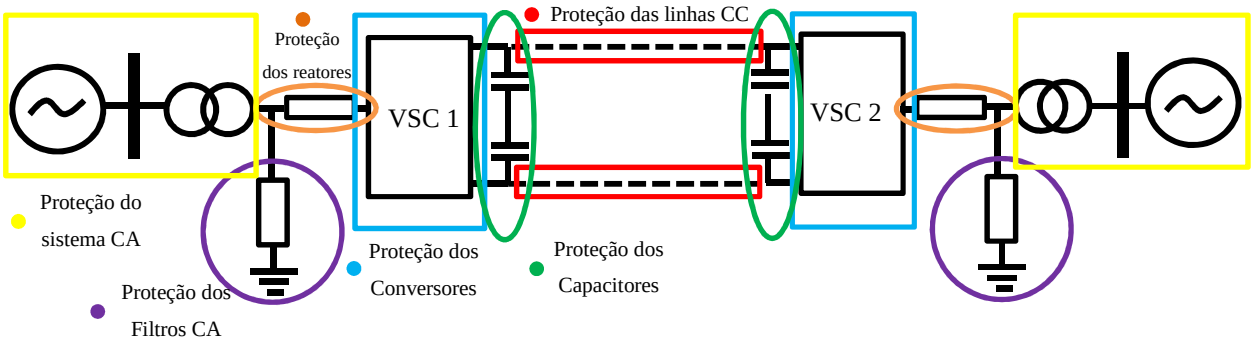

Figura 2.12 - Zonas de proteção de sistemas VSC-HVDC.

A seguir é apresentada sucintamente cada zona de proteção [26]:

- Proteção dos conversores: para detecção de falhas internas ao conversor, tais como queima de chaves e sobrecargas.
- Proteção dos filtros CA: detecta curtos-circuitos, sobrecorrentes e falhas nos elementos dos filtros.
- Proteção dos capacitores: detecta curtos-circuitos, sobrecargas e sobretensões sobre estes elementos.
- Proteção dos reatores: detecta principalmente curtos-circuitos e sobrecargas sobre tais elementos.
- Proteção do sistema CA: detecta curtos-circuitos, sobrecorrentes, sobretensões e demais eventos que podem comprometer a integridade dos elementos do sistema de potência. Destaca-se que estas proteções devem estar coordenadas com as proteções do sistema HVDC, respeitando o tempo de atuação das proteções à jusante.
- Proteção da linha CC ou dos cabos CC: detecta faltas a terra e curtos-circuitos entre as linhas, tão logo quanto possível. Salienta-se aqui que esta pesquisa de mestrado está inserida dentro desta zona de proteção em específico.

Tradicionalmente, a proteção de linhas HVDC é composta pela proteção de ondas viajantes como proteção principal e as proteções de subtensão e diferencial como proteções de

retaguarda [16]. A seguir é descrito sucintamente o princípio de funcionamento destas proteções.

2.4.1 *Proteção de linhas HVDC tradicionais*

Proteção de ondas viajantes

Quando uma falta ocorre na linha CC, a onda viajante de tensão e corrente através da linha de transmissão contém todas as informações necessárias para identificar a falta [27]. A proteção de onda viajante é designada para trabalhar como a principal função de proteção de linhas de sistemas CSC-HVDC, uma vez que detecta a variação da tensão na linha CC du_{cc}/dt e a variação na amplitude ΔU_{cc} ao mesmo tempo. Se esses dois parâmetros excederem os limites, a variação da amplitude da corrente Δi_{cc} é avaliada. Se este parâmetro também exceder seu limite, a proteção de onda viajante irá atuar.

A filosofia da proteção de ondas viajantes pode ser sintetizada com base na Equação 2.13, Equação 2.14 e Equação 2.15 [16].

$$\frac{du_{cc}}{dt} > 0{,}175\ p.u. \tag{2.13}$$

$$\Delta U_{cc} > 0{,}4\ p.u. \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} \Delta i_{cc} &> 0{,}4\ \ p.u. \text{ (no lado inversor)} \\ \Delta i_{cc} &> 0{,}15\ \ p.u. \text{ (no lado retificador)} \end{aligned} \tag{2.15}$$

Destaca-se que os ajustes foram sugeridos por [27] e estes valores podem sofrer alterações de acordo com as características intrínsecas e particulares do sistema. Desta forma, tais valores podem ser utilizados como uma estimativa inicial do estudo de coordenação que determinará os ajustes que serão, de fato, empregados.

A principal desvantagem desse método é que a variação da tensão du_{cc}/dt é dependente da impedância de falta, sendo que altas impedâncias podem resultar em pequenas variações na tensão e, portanto, não sensibilizar a função.

Proteção de Subtensão

A função de proteção de subtensão deve ser ajustada de modo que chaveamentos ou tensões transitórias não iniciadas devido às faltas na linha em CC não causem a atuação da proteção.

Este método não utiliza canais de telecomunicação e utilizando múltiplos níveis de ajustes, essa proteção se mostra adequada para proteção de retaguarda [15]. Em [16] é sugerido avaliar o nível de subtensão apenas se o estágio de variação de tensão du_{cc}/dt for violado. A Equação 2.16 e a Equação 2.17 ilustram os ajustes indicados por [16]. Entretanto, cabe ainda salientar que se for utilizado o estágio de derivada de tensão, faltas de alta impedância podem não sensibilizar esta função.

$$\frac{du_{cc}}{dt} > 0{,}175\ p.u. \tag{2.16}$$

$$|U_{cc}| < 0{,}25\ p.u. \tag{2.17}$$

Proteção Diferencial

A proteção diferencial de linhas em corrente contínua segue a mesma filosofia da proteção diferencial de sistemas em CA. Ou seja, as faltas são detectadas pela comparação do sinal de corrente de entrada com o sinal de saída da zona protegida, que neste caso é a linha em CC. Desta forma, se a corrente diferencial (diferença entre as correntes de entrada e saída da zona protegida) exceder um limite previamente ajustado por um tempo específico o sistema de proteção emite sinal de desligamento da linha.

Destaca-se que para utilizar as medidas das correntes no início ($I_{cc_{ret}}$) e no final da linha ($I_{cc_{inv}}$) é necessária a utilização de canais de telecomunicação.

A desvantagem deste método é que devido ao elevado comprimento das linhas, erros são introduzidos, principalmente, por variações de tensão que podem gerar uma fuga de corrente através da capacitância da linha [15]. O critério que indica condições faltosas por esta proteção, sugerido por [27], é apresentado na Equação 2.18.

$$\left| |I_{cc_{ret}}| - |I_{cc_{inv}}| \right| > 0{,}05\ p.u. \tag{2.18}$$

Como esta função de proteção pode ser significativamente afetada por transitórios não decorrentes de faltas na linha CC, ela precisa de um sinal de bloqueio para evitar operações incorretas e, por isso, o atraso de tempo (*delay*) adotado para a atuação da proteção é de, geralmente, 500 ms, quando aplicada para sistemas CSC-HVDC [27]. Por este motivo, a proteção diferencial é utilizada apenas como *backup* das funções de proteção de ondas viajantes e de subtensão.

2.4.2 Proteção de linhas de sistemas VSC-HVDC

A maioria dos trabalhos técnicos relacionados à proteção de linhas HVDC se referem à proteção de sistemas CSC-HVDC, tal como apresentado na Seção 2.4.1. Entretanto, devido às significativas diferenças entre sistemas VSC e sistemas CSC, os ajustes destas proteções podem não ser adequados para sistemas HVDC que utilizam conversores fonte de tensão. Neste sentido, são apresentadas nesta seção duas técnicas de proteção que foram propostas especificamente para sistemas VSC-HVDC.

Proteção de sobrecorrente com restrição de tensão

A proteção de sobrecorrente com restrição de tensão introduzida em [18] monitora a corrente na linha CC e a tensão sobre o capacitor do VSC. Caso o módulo da corrente exceder um ajuste pré-definido e permanecer violando tal condição por um intervalo de tempo pré-selecionado, a função de proteção acusará um sinal de desligamento da linha CC. Para aumentar a confiabilidade dessa função de proteção, é adicionado um estágio de restrição de tensão, em que a proteção só acusa que há falta na linha CC se a condição de sobrecorrente for violada e se o módulo da tensão na linha CC for menor do que, geralmente, 0,8 p.u..

Salienta-se aqui que o ajuste desta função é dependente do tamanho e parâmetros da linha em corrente contínua, bem como de outros parâmetros do sistema. No Capítulo 6 deste texto é apresentada a metodologia de ajuste desta e das demais funções de proteção selecionadas.

Proteção Direcional de Corrente

Esta função de proteção foi proposta inicialmente em [17], especificamente para sistemas VSC-HVDC, sendo baseada na variação da corrente nos dois extremos da linha CC. O método é simples, prático e apresenta vantagens por não depender do modelo matemático exato da linha, além de não sofrer interferência do efeito capacitivo distribuído ao longo da mesma, contudo, utiliza informações dos dois extremos da linha, necessitando de canais de comunicação. A seguir, é descrito o princípio de funcionamento deste método.

De acordo com o Teorema de Superposição, quando uma falta ocorre, o circuito pode ser dividido em duas partes: uma que representa o sistema em condições normais e a outra que representa o sistema durante a falta. Na Figura 2.13 é ilustrado o circuito equivalente do polo positivo de um sistema VSC-HVDC durante condições normais de operação. As

grandezas U_1, U_2, I_1, e I_2 são as tensões e correntes nas estações retificadoras e inversoras, respectivamente. Salienta-se que o sentido da corrente é adotado positivo para a corrente entrando na linha, tal como ilustrado na Figura 2.13, e a curva em vermelho ilustra o real sentido da corrente.

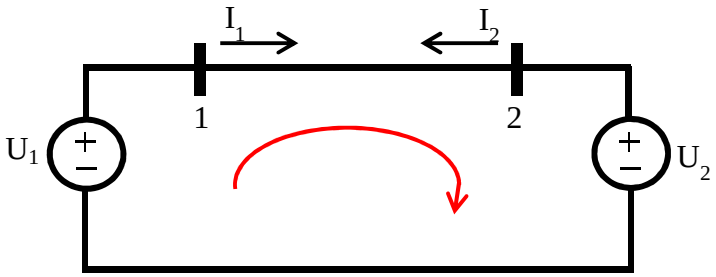

Figura 2.13 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante operação normal.

Na Figura 2.14, é ilustrado o circuito equivalente do polo positivo durante uma falta interna à linha em corrente contínua. Neste caso, R_1 e R_2 são as resistências equivalentes do sistema, vistas pela falta. U_f é a tensão contínua superposta no ponto de falta, I_f é a corrente de falta e R_f é a resistência de falta. ΔI_1 e ΔI_2 são as contribuições de corrente do conversor 1 e do conversor 2, respectivamente.

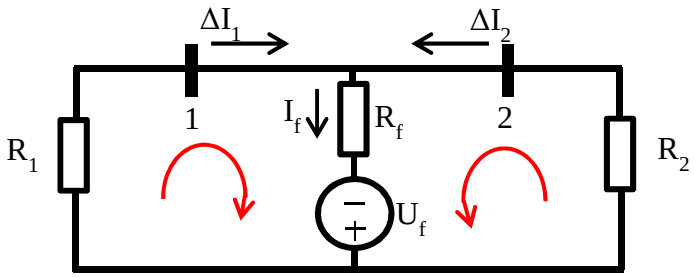

Figura 2.14 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta interna.

De maneira análoga, a Figura 2.15 ilustra o circuito equivalente durante uma falta externa, no lado CA do conversor 1.

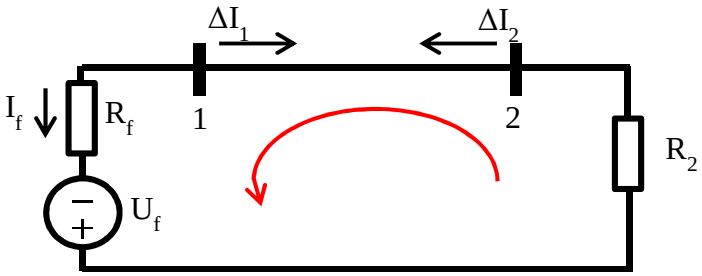

Figura 2.15 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta externa do lado 1.

A Figura 2.16 ilustra o diagrama equivalente para uma falta externa, no lado CA do conversor 2.

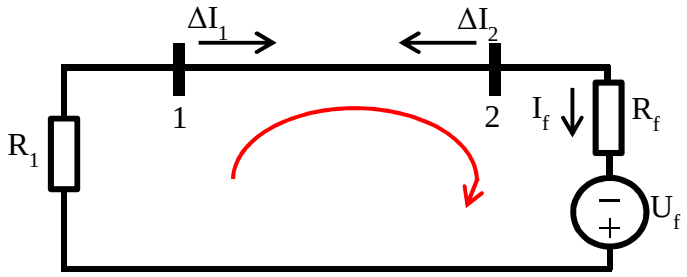

Figura 2.16 – Diagrama equivalente do polo positivo do VSC-HVDC durante falta externa do lado 2.

Durante operação normal do sistema VSC-HVDC, a tensão e a corrente permanecem constantes, e não há componente de falta no sistema. Neste caso exemplificado, a corrente flui do lado 1 para o lado 2, sendo $U_1 > U_2$ e $I_1=-I_2$. Quando uma falta ocorre na linha CC, as correntes I_1 e I_2 aumentam seus valores e apresentam uma variação no mesmo sentido (variação positiva), tal como representado pela Figura 2.14, ou seja, as correntes I_1 e I_2 se elevam nos mesmos sentidos indicados nesta figura. Entretanto, para faltas que ocorrem fora da linha CC as correntes apresentam variações no sentido oposto (variação negativa), tal como apresentado na Figura 2.15 e na Figura 2.16. Logo, a proteção atua somente se as variações de I_1 e I_2 forem positivas.

Neste contexto, a Tabela 2.1 sintetiza o comportamento da componente da corrente de falta das estações conversoras durante faltas internas e externas a linha CC.

No Capítulo 6 será apresentada uma metodologia de ajuste e a implementação desta função de proteção, a qual apresentou um desempenho satisfatório.

Tabela 2.1 - Características das componentes de corrente durante falta.

Características da Corrente de falta	**Sinal do componente da corrente de falta do lado 1**	**Sinal do componente da corrente de falta do lado 2**
Falta interna	+	+
Falta externa do lado 1	-	+
Falta externa do lado 2	+	-

2.5 Considerações finais sobre o capítulo

Foram introduzidos neste capítulo os principais conceitos acerca de sistemas VSC-HVDC, tais como o princípio de funcionamento, operação e controle. Do ponto de vista de controle, os sistemas VSC-HVDC são mais flexíveis e eficientes do que os sistemas CSC-

HVDC, ao permitirem o controle independente da potência ativa e potência reativa na linha, além de possibilitarem a conexão em sistemas fracos ou sem geração CA.

Adicionalmente foi apresentada uma sucinta revisão bibliográfica sobre proteção de linhas de sistemas HVDC, as quais serão posteriormente abordadas no Capítulo 6 e Capítulo 7. Este trabalho propõe a modelagem e análise das funções de proteção de ondas viajantes, diferencial, sobrecorrente com restrição de tensão e direcional de corrente.

3. Modelagem Computacional de Sistemas VSC-HVDC

As simulações computacionais são fundamentais para análises de sistemas de energia elétrica, uma vez que possibilitam representar eventos que não seriam possíveis de serem causados propositalmente em sistemas reais, de forma a obter, por exemplo, valores de magnitude de tensão e corrente de curto-circuito. Além disso, os eventos simulados permitem antever os impactos de prováveis perturbações, o que pode ser facilmente obtido por meio da modelagem apropriada da rede elétrica.

Modelos analíticos e computacionais representam os equipamentos e processos reais em ambientes computacionais, permitindo a realização de simulações. Como simulações computacionais são usadas extensivamente na área de sistemas de energia elétrica, é importante que os componentes do sistema elétrico apresentem modelos representativos e que sejam fiéis à realidade, já que quanto melhor é o modelo, mais confiáveis são os resultados das análises e simulações.

Neste contexto, este capítulo apresenta o *software* utilizado para as análises, a modelagem computacional do sistema elétrico em estudo, seguido por simulações de falta na linha em CC.

3.1 RSCAD/RTDS®

As simulações em malha fechada são extensivamente utilizadas para ensaiar equipamentos reais, como por exemplo, um relé comercial. As análises e simulações deliberadas a partir deste trabalho foram realizadas por meio do RSCAD, que é uma ferramenta computacional utilizada especificamente para simulação de sistemas elétricos, e representa o ambiente computacional e interface gráfica do simulador em tempo real, o RTDS®.

Neste trabalho todos os estudos foram realizados apenas em ambiente de simulação. A justificativa para a utilização de um simulador em tempo real decorre do fato de que o *software* RSCAD é confiável, com modelos de equipamentos de sistemas de energia elétrica

fidedignos aos comportamentos dos equipamentos reais. Ademais, nesta pesquisa de mestrado foram desenvolvidos diversos modelos e simulações que poderão ser utilizados futuramente para estudos que contemplem a utilização da malha fechada do simulador em questão.

A estrutura do RSCAD se divide em distintas hierarquias quando aplicado às funcionalidades do RTDS®. São apresentados na Figura 3.1 os principais ambientes do RSCAD que foram utilizados neste trabalho: o *Draft*, o *T-Line*, o *RunTime* e o *C-Builder*.

O *Draft* é o ambiente computacional utilizado para a modelagem do sistema elétrico, do controle e das proteções [22]. O *Draft* possui uma extensa biblioteca de componentes de sistemas de potência, como também elementos de controle, funções matemáticas, elementos de processamento de sinais e blocos responsáveis pela interface de sinais digitais e analógicos de entrada e saída.

Uma peculiaridade da modelagem de sistemas VSC-HVDC no RSCAD é que, usualmente, as ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos utilizam passos de integração de cerca de 50 microssegundos. Entretanto, tais passos de integração não são suficientemente pequenos para permitir uma correta e adequada simulação que representa as altas frequências geradas pelas comutações das chaves (IGBTs), assim como a modulação PWM. Neste sentido, para modelar e analisar sistemas VSC de maneira apropriada é necessário utilizar um ambiente no RSCAD, denominado *Small Time Step*, que apresenta um passo de integração em torno de 1,5 a 2,5 microssegundos [22]. Desta forma, as equações de todo circuito ou sistema que estiver dentro do ambiente *Small Time Step* são resolvidas utilizando este passo de integração menor, e de maneira análoga, o restante do sistema, que não necessita de passos de integração desta ordem, é resolvido no ambiente tradicional do RSCAD, o *Draft* ou *Large Time Step*.

O *T-Line* é um ambiente exclusivo para a modelagem de linhas de transmissão [22]. Em tal ambiente, o usuário pode inserir os parâmetros físicos da linha de transmissão, como por exemplo, a altura da torre, espaçamento e tipo dos condutores dentre outros, além de selecionar qual o modelo matemático da linha será utilizado nas simulações (Bergeron ou Dependente da Frequência). Após a modelagem da linha neste ambiente, será gerado um arquivo que deve ser carregado no *Draft*.

O *RunTime* é o ambiente destinado a controlar e visualizar as simulações do RTDS® [22]. Nesse ambiente são controlados os comandos de início e fim de simulações, comandos para abertura e fechamento de chaves e eventos no sistema elétrico modelado no *Draft*. No ambiente *RunTime* é possível escrever rotinas em linguagem *C* para executar tarefas bem determinadas, tais como inicializar a simulação, causar eventos no sistema (como curtos-

circuitos), coletar dados e salvar em relatórios e outras funções. As rotinas são úteis quando é necessário executar diversas simulações sequenciais, variando alguns parâmetros do sistema tal como a posição, tipo e resistência da falta [28].

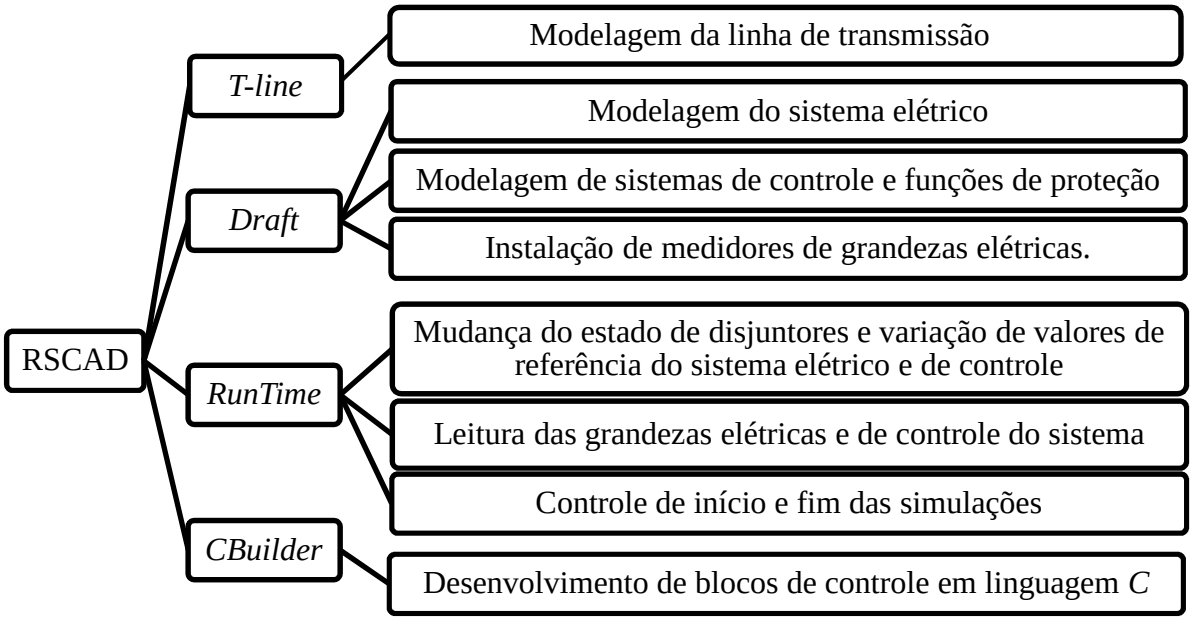

Figura 3.1 – Componentes do RSCAD no RTDS®. Adaptado de [28].

Por fim, o *C-Builder* permite a modelagem de componentes que não estão disponíveis na biblioteca do *Draft* [22]. Esses componentes podem ser elementos de sistemas de potência ou controle. A modelagem de um elemento de controle é realizada por meio de uma rotina escrita em linguagem *C*, que é executada em tempo real. O Capítulo 4 deste trabalho ilustra um exemplo da utilização da programação a partir do *C-Builder*, onde é desenvolvido um modelo que representa o comportamento de limitadores de corrente de falta baseados em materiais supercondutores.

3.2 Modelagem do Sistema VSC-HVDC

O diagrama unifilar do sistema de transmissão VSC-HVDC em estudo é apresentado na Figura 3.2. Os conversores implementados são de dois níveis do tipo monopolar simétrico com modulação PWM senoidal e controle vetorial, sendo que todas as análises e resultados reportados neste trabalho se referem a esta categoria de inversor em específico. Em tal condição, o VSC_1 controla os fluxos de potência ativa e reativa enquanto o VSC_2 controla a tensão na linha CC. Na condição inicial de regime permanente, o Sistema CA 1 envia 150

MW de potência ativa e 45 Mvar de potência reativa para o Sistema CA 2, através do sistema de transmissão em corrente contínua.

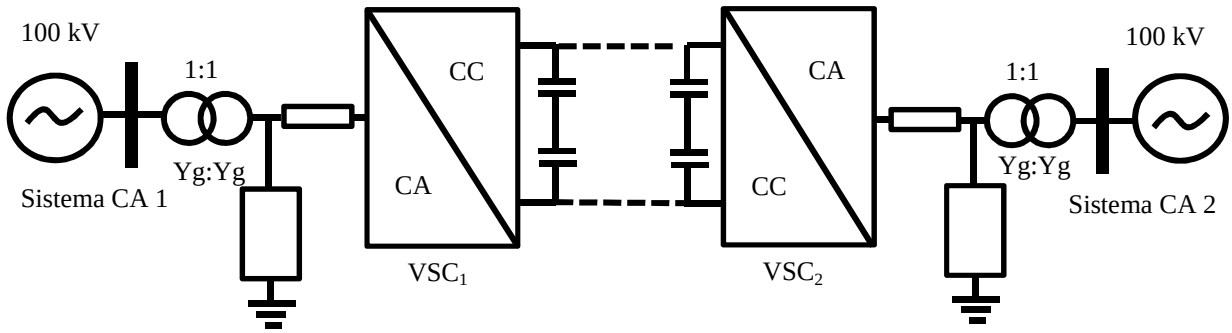

Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em estudo.

Os sistemas CA são modelados por fontes de tensão trifásicas ideais em série com reatâncias para limitar a corrente de curto-circuito, proveniente de cada sistema. Neste sentido, o Sistema CA 1 é constituído por uma fonte de tensão trifásica em 60 Hz de 100 kV em série com uma reatância igual a j0,2 Ω. O Sistema CA 2 é caracterizado por uma fonte de tensão trifásica em 60 Hz de 100 kV, em série com uma reatância igual a j0,4 Ω.

Os transformadores são constituídos por bancos de três transformadores monofásicos conectados em *estrela-aterrado – estrela-aterrado*, com relação de transformação unitária. Neste modelo dos transformadores é considerada apenas a reatância de dispersão, que é igual a j0,05 p.u., desprezando as perdas no núcleo e as perdas por *Efeito Joule* nos enrolamentos.

Os filtros CA são filtros passa alta do tipo amortecido, com frequência de corte igual a 1980 Hz e um fator de qualidade igual a 10. Os filtros são constituídos por um capacitor em série com um circuito RL paralelo e servem para filtrarem harmônicos relacionados à frequência de chaveamento (que neste caso é igual a 1980 Hz) e seus múltiplos.

A linha de transmissão foi modelada considerando o modelo matemático dependente da frequência no domínio de fase. De acordo com [29] quando é necessário realizar um estudo de transitórios com maior precisão, o modelo dependente da frequência deve ser adotado. Os parâmetros elétricos da linha são calculados a partir da sua geometria, dos dados dos condutores e da resistividade do solo. A resistência R (em Ω/km) e a indutância L (em H/km) são dependentes da frequência, e podem ser calculadas a partir dos dados intrínsecos dos condutores, de sua disposição e das características do retorno pelo solo. A capacitância C (em F/km) por sua vez, é praticamente constante em relação à frequência e depende exclusivamente da geometria da linha [29].

A Figura 3.3 apresenta a parte do diagrama multifilar do sistema elétrico modelado no RSCAD no ambiente *Draft*.

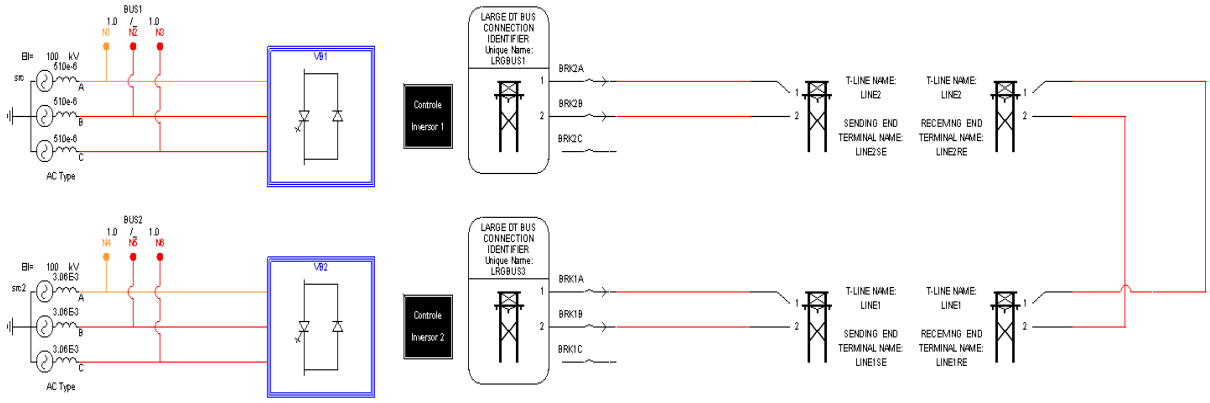

Figura 3.3 – Diagrama multifilar do sistema elétrico em estudo (ambiente *Draft* do RSCAD).

Os parâmetros necessários para a modelagem do sistema, tais como os dados das linhas, transformadores, filtros, estações conversoras e reatores estão apresentados no Apêndice A. De forma complementar, a Figura 3.4 apresenta a parcela do sistema que está modelada dentro do ambiente *Small Time Step*.

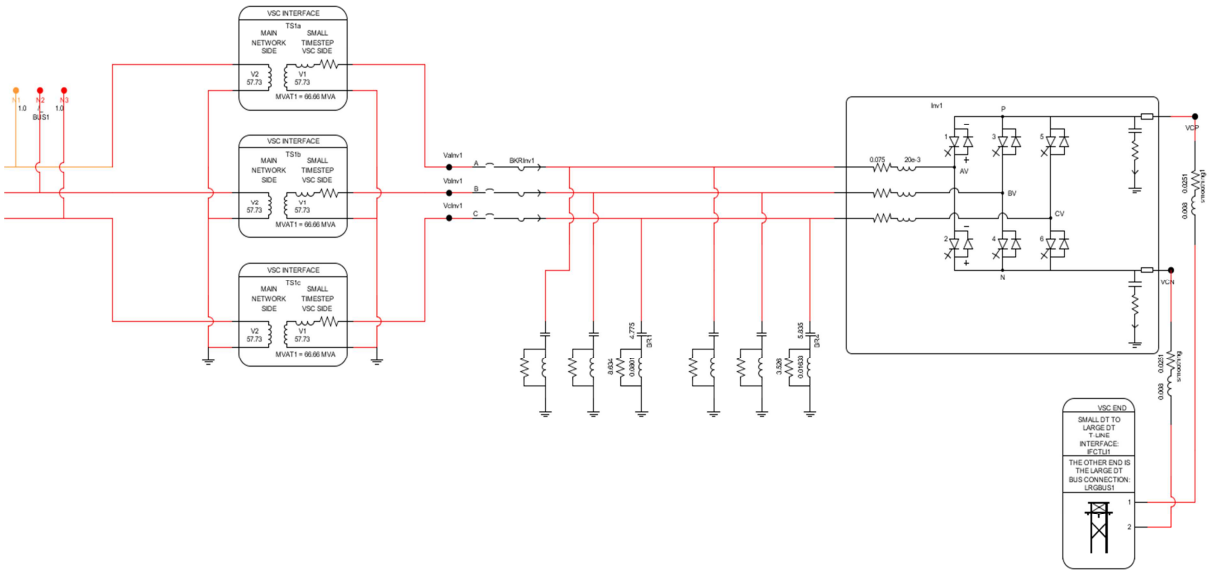

Figura 3.4 – Diagrama multifilar do sistema elétrico em estudo no *Small Time Step – Draft*.

É possível realizar a interface entre os ambientes *Large Time Step* e o *Small Time Step* através de transformadores (*VSC Interface*) ou através de linhas (*T-line Interface*). No sistema em estudo, o banco de transformadores monofásicos realiza a interface dos ambientes e após a conversão da tensão e corrente (lado direito da estação conversora da Figura 3.4) uma linha de tamanho desprezível realiza a conversão de volta ao ambiente convencional, onde é modelada a linha de transmissão em corrente contínua, tal como apresenta a Figura 3.3. É relevante salientar que no ambiente *Small Time Step* apenas os elementos essenciais são modelados, uma vez que o esforço computacional é mais acentuado neste ambiente.

Controle do VSC$_1$

A Figura 3.5 ilustra o diagrama esquemático do controle do VSC$_1$. O sistema de controle implementado neste trabalho foi baseado no trabalho de [24]. Neste conversor, são controlados os fluxos de potência ativa e de potência reativa na linha CC. As malhas de controle externas, após compararem os fluxos de potência medidos (p_{ac} e q_{ac}) com os respectivos valores de referência ($p_{ac}{}^{ref}$ e $q_{ac}{}^{ref}$) geram os valores das referências das malhas de controle interno, as correntes de eixo direto ($i_{c_d}{}^{ref}$) e eixo de quadratura ($i_{c_q}{}^{ref}$).

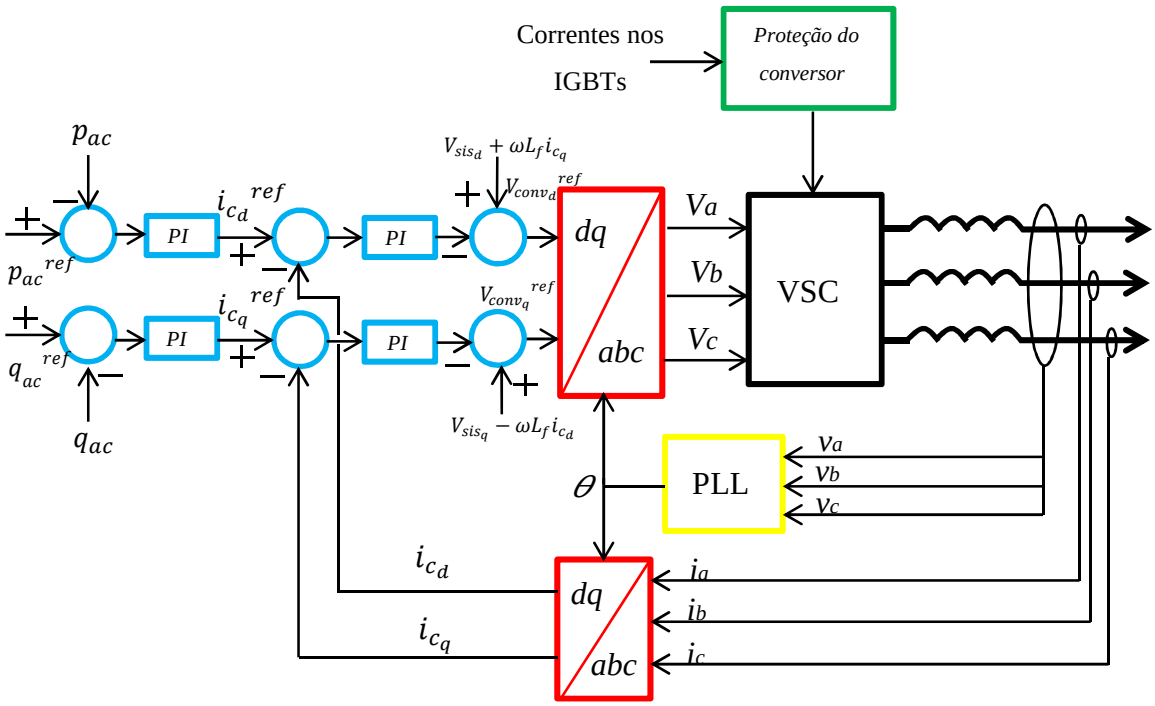

Figura 3.5 – Diagrama esquemático do controle do VSC$_1$.

A Figura 3.6 ilustra o controle do VSC$_1$ implementado no RSCAD. Os principais blocos do sistema estão destacados através dos retângulos coloridos, os quais representam as parcelas correspondentes do controle, de mesma coloração, apresentadas na Figura 3.5.

A seguir, é descrito sucintamente o princípio de funcionamento destes blocos em destaque. O retângulo vermelho destaca os blocos que contêm os filtros dos sinais de tensão e corrente CA na entrada do inversor, assim como o bloco que transforma as grandezas do domínio de fase (*abc*) para o domínio *dq0*. Os filtros são necessários para eliminarem os harmônicos de alta frequência, gerados pelo padrão de chaveamento do conversor, que ainda persistem no sinal.

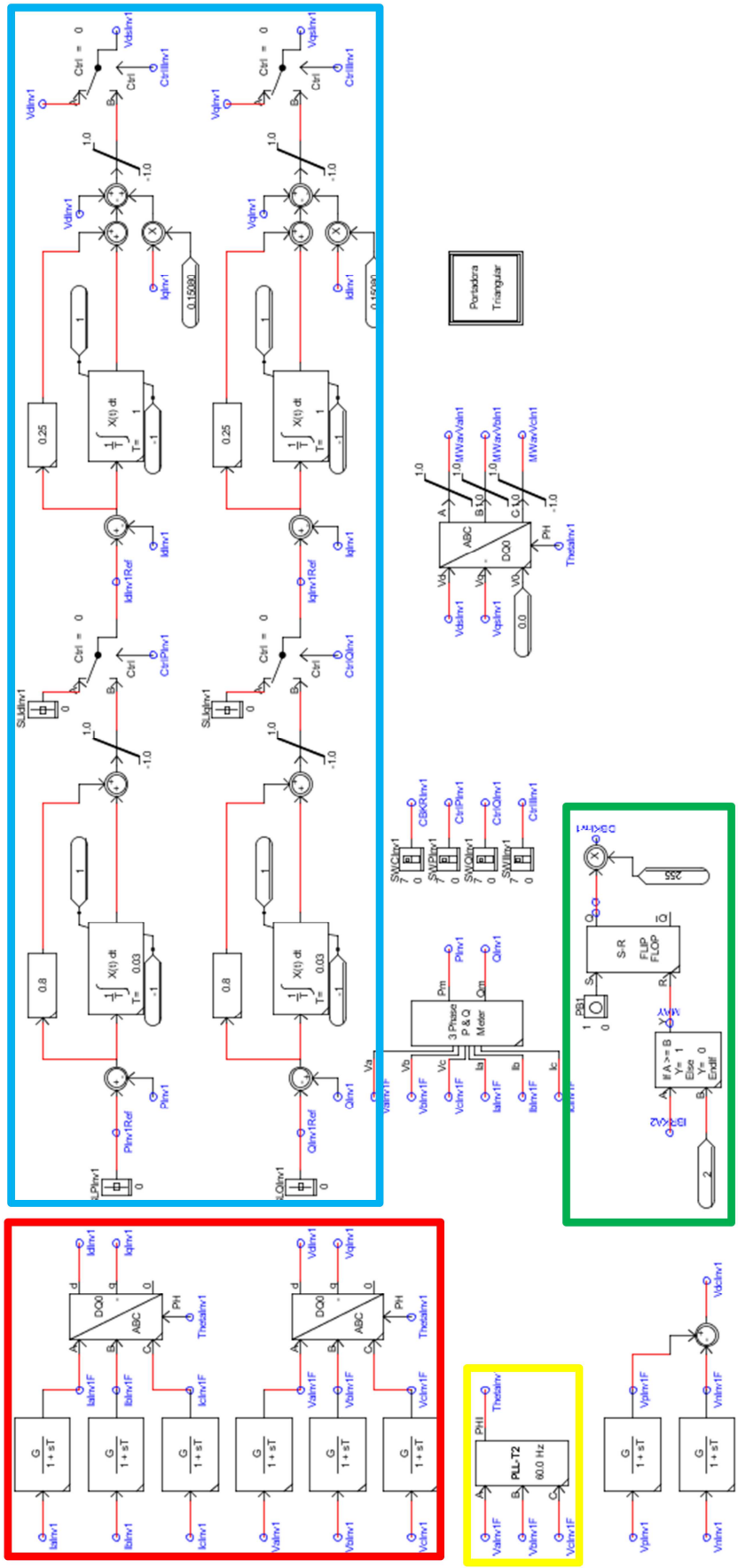

Figura 3.6 – Controle do VSC_1 implementado no RSCAD.

O retângulo amarelo salienta o bloco PLL, o qual fornece o sincronismo para os blocos de transformação de fase para *dq0*. A Figura 3.7 apresenta o diagrama de blocos do circuito de sincronismo utilizado, o p-PLL. Tal método é baseado na teoria de potência instantânea [30], sendo usualmente utilizado para sincronismos e controle de equipamentos conectados aos sistemas de potência. A partir da Figura 3.7, pode ser notado que o erro entre o sinal de potência ativa de referência (p_{ref}) e o sinal de potência ativa medido (p') alimenta um controlador proporcional-integral (PI) cuja saída é a frequência angular detectada no sistema (**ω**). A frequência angular estimada é integrada para calcular o valor do ângulo θ, o qual é necessário para a realização do sincronismo.

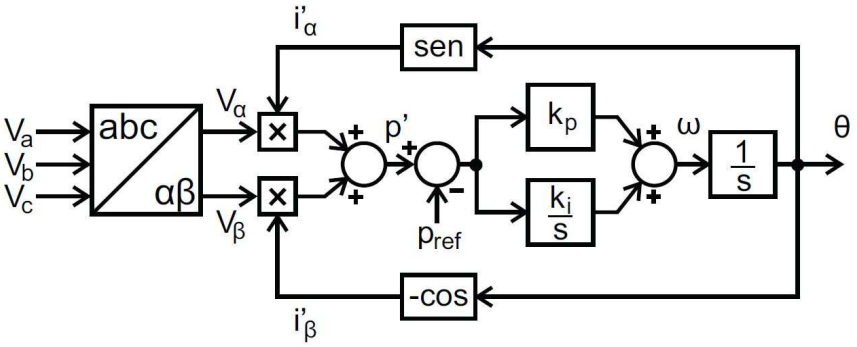

Figura 3.7– Diagrama de blocos do p-PLL. Adaptado de [30].

Os blocos inscritos dentro do retângulo azul apresentam o controle do sistema propriamente dito. Esta região contém dois controladores proporcionais integrais em cascata, os quais vão fornecer os valores de tensão em coordenadas *dq0*, que após serem transformados novamente para o domínio de fase serão modulados através do PWM para atuarem nos IGBTs dos conversores. Salienta-se que a entrada desta região são as potências ativas e reativas requeridas, uma vez que este conversor VSC_1 é o que controla os fluxos de potência através do *link* CC.

Por sua vez, na Figura 3.6 o retângulo verde destaca o sistema de proteção dos conversores. Tal bloco tem a função de desligar o controle dos conversores, ou seja, enviar um sinal de desligamento para os IGBTs, caso a corrente que circula por estes dispositivos superar o valor ajustado, que neste caso é igual a 2 p.u. (1,8 kA neste caso) [6]. Destaca-se aqui a importância deste bloco durante condições de falta na linha CC. Nestas situações, a corrente de falta pode chegar a mais de 10 vezes o valor da corrente nominal do conversor, e se esse sistema de proteção não desligar prontamente os IGBTs, estes dispositivos poderão se danificar permanentemente em um curto intervalo de tempo [6].

O controle do VSC_2, por sua vez, é similar ao controle do VSC_1. A diferença entre os dois controles consiste apenas na malha de controle externa, em que o VSC_2 controla a tensão CC e o fluxo de potência reativa, enquanto o VSC_1 controla os fluxos de potência ativa e reativa.

Desta forma, o controle implementado para o VSC_2 é equivalente ao controle apresentado na Figura 3.6, com a diferença para a malha de controle externa superior, onde para este conversor, o primeiro somador do sistema compara a tensão na linha CC com a tensão CC de referência, ao invés da potência ativa na linha com a potência ativa de referência, tal com apresentado nesta figura.

Validação do Controle Implementado

Com objetivo de demonstrar o funcionamento do controle implementado para o sistema VSC-HVDC da Figura 3.2, a Figura 3.8 ilustra o comportamento do intercâmbio da potência ativa e reativa para um degrau na referência de potência ativa do VSC_1. Destaca-se aqui que, inicialmente, o VSC_1 entrega 1 p.u. de potência ativa, e o evento simulado consiste em um degrau de 0,2 p.u. na referência de potência ativa.

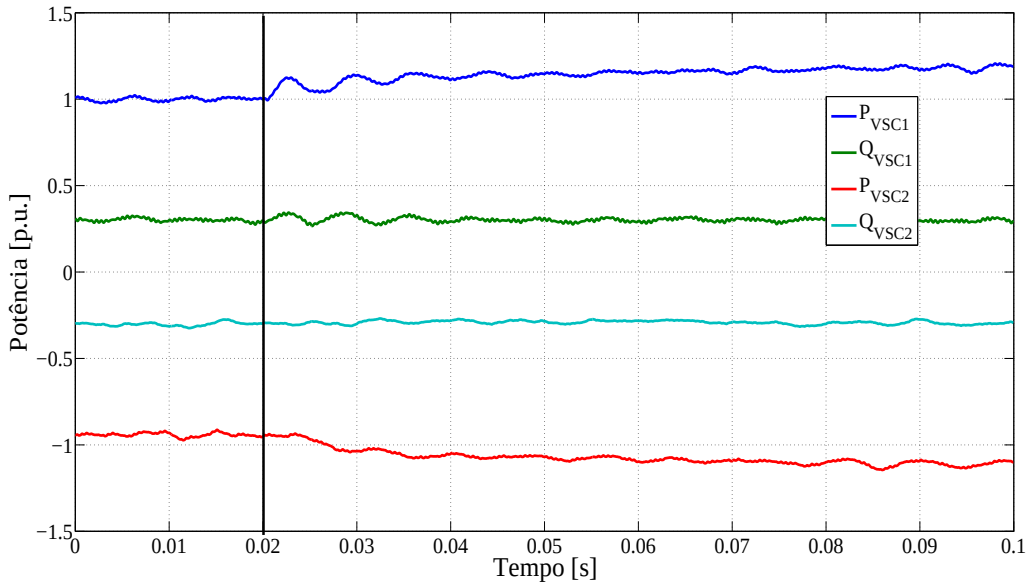

Figura 3.8 – Comportamento do fluxo de potência na linha CC para degrau na referência da potência ativa do VSC1.

O degrau de potência ativa foi aplicado em 0,02 segundos, tal como indicado pela reta vertical da Figura 3.8. Como este sistema apresenta apenas dois terminais, o VSC_2 recebe o aumento de potência ativa (P_{VSC2}) enviado pelo VSC_1 (P_{VSC1}), decrescido das perdas na

transmissão. Salienta-se que mesmo ao aumentar em 20% o intercâmbio de potência ativa na linha, as potências reativas Q_{VSC1} e Q_{VSC2} não sofreram significativas alterações, uma vez que o controle do sistema é implementado com acoplamento desprezível.

Em menos de 50 ms o sistema passou a operar satisfatoriamente com o valor da referência de potência selecionado, o que corrobora a eficácia do controle implementado.

3.3 Faltas na linha em CC de sistemas VSC-HVDC

Sob a ótica de controle de sistemas, os conversores do tipo fonte de tensão são uma alternativa mais atraente do que as tecnologias convencionais de HVDC, pois seu controle, apesar de complexo, é mais flexível, veloz e independente [2], [6]. Entretanto, durante condições de falta CC nos sistemas VSC-HVDC, os IGBT perdem a capacidade de controle e os diodos em antiparalelo alimentam a falta, tal como retificadores não controlados. Como consequência, os capacitores da linha CC passam a descarregar energia para a falta e a tensão na linha não faltosa aumenta seu valor.

As linhas de transmissão em corrente contínua usualmente apresentam comprimentos elevados, o que aumenta a probabilidade da ocorrência de falhas. Estudos recentes apontam que mais de 50% das falhas em sistemas HVDC ocorrem nas linhas [16], [31]. Tais ocorrências comprometem a operação segura e confiável do sistema associado.

As falhas nos cabos, apesar de menos comuns do que nas linhas aéreas, ocorrem ainda mais frequentemente quando comparadas com outras partes do sistema. As razões mais comuns são a deterioração e o rompimento do isolamento, o que pode acontecer por várias causas, sejam elas: danos físicos, estresse ambiental, estresse elétrico e o próprio envelhecimento do cabo [31].

Neste contexto, com intuito de demonstrar o impacto de falhas na linha CC, a Figura 3.9 ilustra o comportamento da corrente de saída do VSC_1 (ver Figura 3.2) no polo positivo durante faltas que envolvem o polo positivo a terra. Foram consideradas três posições de faltas distintas.

Na Figura 3.9, a curva em azul (I_{p1}) ilustra a contribuição do polo positivo do VSC_1 para a falta aplicada nos terminais do VSC_1, no lado CC. De maneira análoga, a curva em verde (I_{p2}) ilustra a contribuição da corrente do polo positivo do VSC_1 para a falta aplicada em 50% da linha a partir do VSC_1, e a curva em vermelho (I_{p3}) ilustra o mesmo caso para a falta aplicada em 100% da linha (próxima ao VSC_2). Destaca-se que as faltas foram simuladas com impedância de falta igual a zero, por representar o caso de falta mais crítica ao sistema.

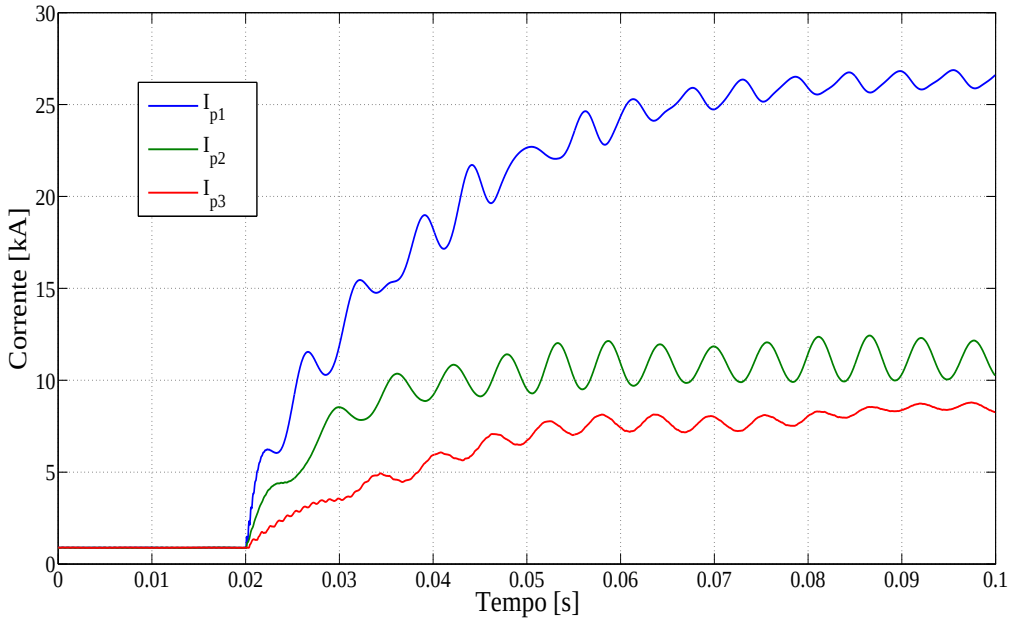

Figura 3.9 – Corrente no polo positivo do VSC_1 para falta polo-terra terra a 0% (curva em azul), a 50% (curva em verde) e a 100% (curva em vermelho) do comprimento da linha a partir de VSC_1.

Pode ser notado a partir da Figura 3.9 que quanto mais longe a falta ocorre do VSC_1, menor é a sua contribuição de corrente de curto-circuito. Entretanto, mesmo para uma falta a 100 km de distância do VSC_1 (curva em vermelho), a contribuição deste conversor para a falta é de aproximadamente 8 kA, valor cerca de 9 vezes maior do que a corrente nominal da estação conversora. Adicionalmente, para a falta aplicada no início da linha (curva em azul), a corrente no polo positivo atinge mais de 25 kA, cerca de 28 vezes a corrente nominal da estação conversora.

A Figura 3.10 ilustra o comportamento das tensões na linha CC, referidas sobre os capacitores do VSC_1, para duas faltas que envolvem o polo positivo e a terra. Neste sentido, V_{n1} é a tensão do polo negativo e V_{p1} é a tensão do polo positivo, para a falta aplicada a 0 % da linha, vista pelo VSC_1. De maneira similar, V_{n2} e V_{p2} ilustram a tensão do polo negativo e a tensão do polo positivo, respectivamente, para a falta aplicada a 50% da linha.

Verifica-se a partir da Figura 3.10 o deslocamento no eixo vertical causado por faltas a terra no polo positivo. Para faltas que envolvem o polo negativo a terra, o comportamento é similar, mas com deslocamento no sentido contrário ao ilustrado na Figura 3.10. Ou seja, para faltas que envolvem o polo negativo a terra, a tensão no polo negativo seria próxima de zero, enquanto a do polo positivo tenderia a atingir o dobro de seu valor.

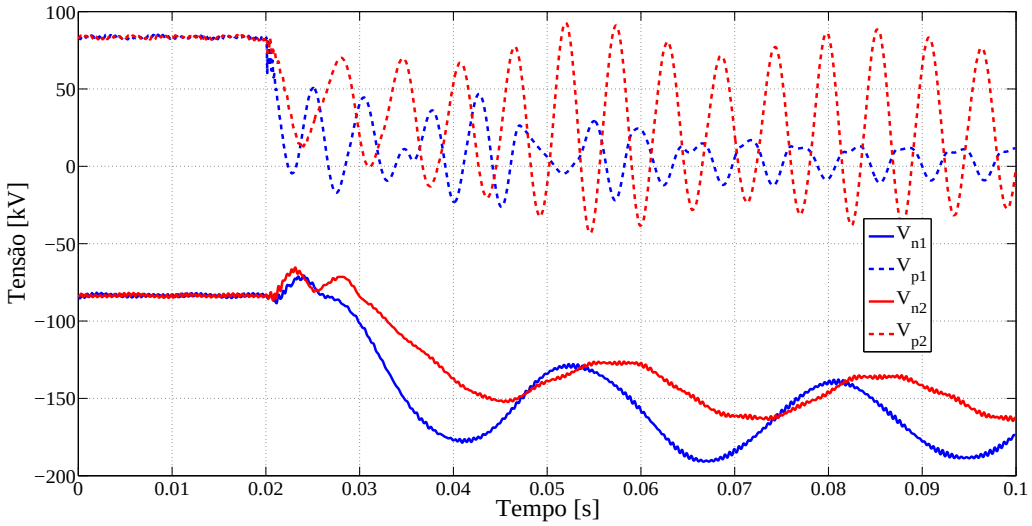

Figura 3.10 – Comportamento das tensões na linha CC para faltas polo-terra a 0% (curvas em vermelho) e 50% (curvas em azul) do comprimento da linha a partir de VSC_1.

A Figura 3.11 ilustra o comportamento das correntes no polo positivo e negativo de saída do VSC_1 durante faltas polo-polo. Na Figura 3.11, as curvas em azul ilustram a contribuição do VSC_1, para a falta aplicada a 0% da linha, no polo positivo (I_{p1}) e no polo negativo (I_{n1}).

De maneira análoga, as curvas em verde (I_{p2}) e (I_{n2}) ilustram a contribuição da corrente para a falta aplicada em 50 % da linha, e as curva em vermelho (I_{p3}) e (I_{n3}) ilustram o mesmo caso para a falta aplicada em 100 % da linha. Destaca-se novamente que as faltas foram simuladas com impedância de falta igual a zero, por representar o caso de falta mais crítica.

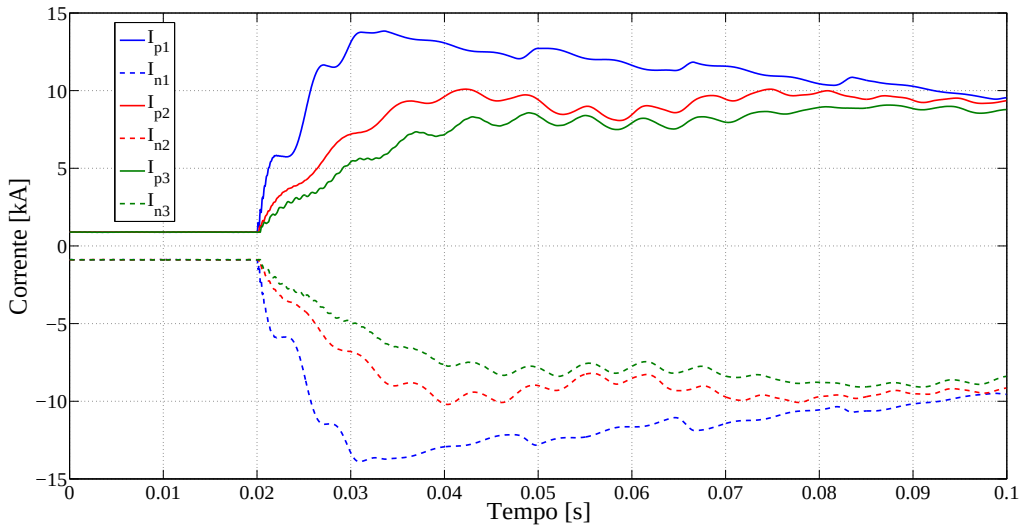

Figura 3.11 – Comportamento das correntes de saída do VSC_1 para faltas polo-polo a 0% (curvas em azul) e 50% (curvas em vermelho) e 100% (curvas em verde) do comprimento da linha a partir de VSC_1.

Neste caso, a corrente de saída do VSC_1 atinge mais de 13 kA para a falta aplicada no início da linha (curva em azul) e mais de 7 kA para a falta aplicada a 100 km de tal estação conversora (curva em vermelho). Como a falta conecta os dois polos, a corrente que circula pelo polo positivo é a mesma que passa no polo negativo.

A Figura 3.12 ilustra o comportamento da tensão na linha CC, referida sobre os capacitores do VSC_1, para uma falta franca entre os polos negativo e positivo a 50% da linha. Para esta categoria de falta, as tensões na linha tendem a atingir o mesmo valor, uma vez que o curto-circuito envolve diretamente os dois polos.

Os resultados das simulações de falta desta seção ilustraram os severos impactos causados por faltas na linha em corrente contínua de sistemas VSC-HVDC. Diante deste cenário, torna-se imprescindível a realização de estudos com intuito de proteger o sistema para estas condições. Portanto, é neste contexto que esta pesquisa de mestrado está inserida.

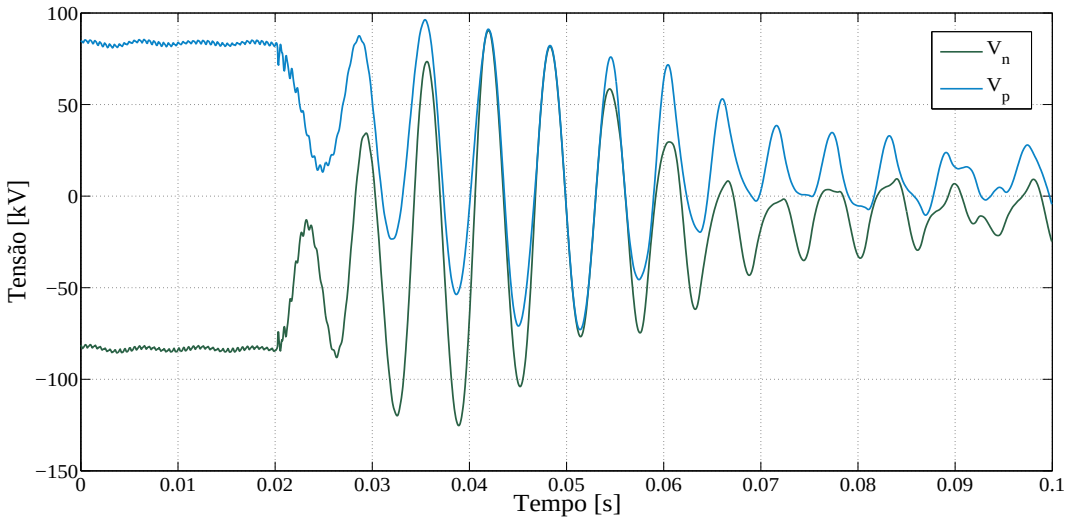

Figura 3.12 – Comportamento das tensões na linha CC para uma falta polo-polo a 50% da linha a partir de VSC1.

3.4 Considerações finais sobre o capítulo

Foram introduzidos neste capítulo os principais ambientes do RSCAD, *software* no qual foram desenvolvidos os estudos deste trabalho. Adicionalmente foi apresentado o sistema elétrico em estudo e realizadas simulações de falta no sistema. Os resultados obtidos atestam a fragilidade de sistemas VSC-HVDC diante de faltas na linha em corrente contínua. Por este motivo, grande parcela das aplicações de sistemas HVDC que utilizam conversores

fonte de tensão empregam cabos subterrâneos, onde a incidência de faltas do lado CC é reduzida. Entretanto, seja com linhas aéreas ou com cabos subterrâneos, é imprescindível que o sistema de proteção das linhas CC opere de maneira confiável, rápida e seletiva, com intuito de minimizar e isolar os impactos resultantes de faltas no lado em corrente contínua. No Capítulo 4 deste texto, é apresentada uma abordagem alternativa para minimizar os impactos das faltas do lado CC: os limitadores de corrente de falta.

4. Limitadores de Corrente de Falta

Os níveis de corrente de curto-circuito nos sistemas de energia elétrica têm apresentado um crescimento significativo nas últimas décadas, fato que está atrelado, principalmente ao constante aumento da demanda por energia. Entretanto, tais níveis podem gerar esforços eletromecânicos e térmicos que, durante a ocorrência de faltas, ultrapassam os limites de suportabilidade dos dispositivos de proteção e dos equipamentos ligados ao sistema elétrico de modo geral [19]. Vale destacar que altas correntes de curto-circuito, se não eliminadas de maneira rápida e eficaz, podem danificar equipamentos necessários para operação de sistemas de energia elétrica, e desta forma, uma parcela do sistema pode ficar sem energia, até que tal equipamento seja substituído.

Neste sentido, uma alternativa atraente é buscar o desenvolvimento de dispositivos que, na ocorrência de faltas, limitem a corrente de curto-circuito, até que a proteção atue para isolar a falta. Portanto, motivados pela busca por melhorias na qualidade da produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, aumentaram-se significativamente as pesquisas sobre dispositivos limitadores de corrente de falta (LCF) que são dispositivos capazes de reduzir os níveis de correntes de curto-circuito [20].

Basicamente, um LCF consiste em uma impedância, preferencialmente variável e conectada, geralmente, em série com um disjuntor. Em uma situação de falta, o valor dessa impedância aumenta e faz com que a magnitude da corrente diminua para um nível em que o disjuntor possa atuar de maneira segura. Ou seja, os LCF limitam os níveis de correntes de falta a patamares mais gerenciáveis, o que possibilita o aumento da transmissão de potência em sistemas elétricos sem a troca dos equipamentos presentes em tais sistemas. Desta forma, os equipamentos existentes ainda são capazes de lidar com tais correntes e fornecer proteção adequada ao sistema. Adicionalmente, as aplicações de LCF em sistemas de potência não só limitam a magnitude da corrente de falta como também melhoram as margens de estabilidade do sistema [32].

A Figura 4.1 ilustra um exemplo didático da influência de um LCF na resposta de um sistema elétrico CA na presença de um curto-circuito.

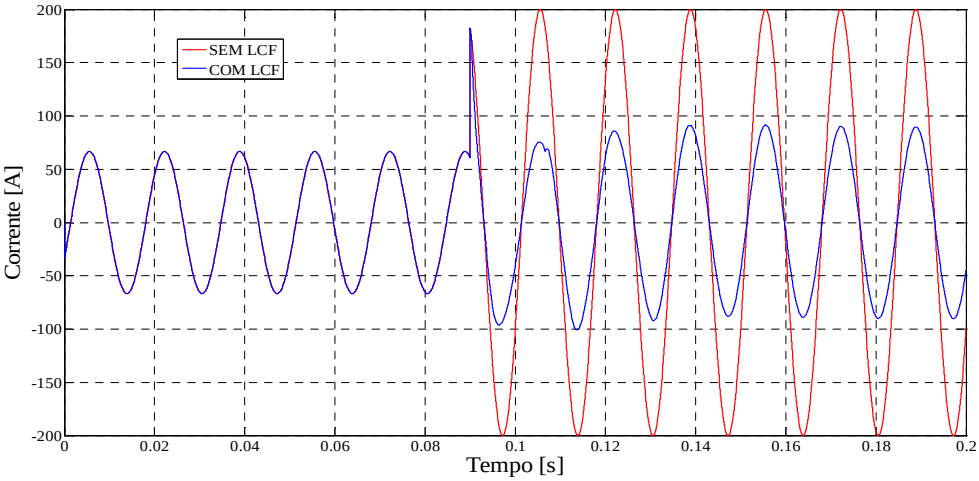

Figura 4.1 – Influência de um LCF na corrente de curto-circuito.

Fica evidente a partir da Figura 4.1 que, por reduzir a corrente de falta, o impacto sobre os dispositivos sujeitos a tal corrente é minimizado.

De modo geral, os limitadores de corrente de falta podem ser divididos, principalmente, em três categorias: do tipo passivo, estado sólido e baseado em materiais supercondutores. A seguir cada categoria é descrita sucintamente.

4.1 Categorias de Limitadores de Corrente de Falta

4.1.1 LCF Passivo

Os LCF passivos consistem em elementos passivos que são conectados permanentemente no circuito a ser protegido e não é necessário um sinal externo para controla-los. A corrente de falta é reduzida somente pela impedância deste elemento passivo. Esta é a versão mais simples de um LCF, a mais barata e a que exige menos manutenção. Por estas razões, esta técnica foi a primeira a ser empregada para limitar correntes de falta e vem ainda sendo utilizada [32].

Embora os limitadores passivos tenham características interessantes, eles apresentam um desempenho pior se comparados aos outros tipos de limitadores. A maior desvantagem desta técnica é a queda de tensão produzida pelo elemento passivo em operação normal, além da ineficiente e contínua dissipação de potência.

No âmbito de LCF passivos, para sistemas VSC-HVDC os indutores em série com a linha em CC, denominados no Capítulo 2 como reatores de alisamento, também podem operar como limitadores de corrente de falta. Estes limitadores de corrente de falta indutivos (LCFI) são interessantes em aplicações para sistemas de corrente contínua porque provocam pouco

impacto no sistema em regime permanente. Entretanto, durante condições faltosas, os LCFI apresentam a característica de atrasar o incremento da corrente, fator que pode ser benéfico para o sistema de proteção, uma vez que a corrente de falta leva mais tempo para atingir patamares não gerenciáveis.

Neste sentido, o trabalho de [21] demonstrou a eficácia em aumentar a indutância dos reatores de alisamento do sistema, para que estes atuem de fato como LCFI. Foi demonstrado que à medida que se aumenta a indutância do LCFI, o crescimento da corrente é menos acentuado, de forma que o sistema de proteção possa ter mais tempo para eliminar a falta, antes que a mesma cause danos aos equipamentos do sistema. Portanto, nos capítulos sequentes, esta classe de limitador será abordada. Destaca-se que ao utilizar um indutor maior, o mesmo, consequentemente, apresentará mais perdas em regime permanente, além de deixar o controle do sistema VSC-HVDC mais lento.

4.1.2 LCF de estado sólido

Os limitadores de estado sólido (do inglês: *Solid State Fault Current Limiter* – SSFCL) são baseados em semicondutores de estado sólido sendo utilizados como chaves eletrônicas que alteram a configuração do sistema na ocorrência de uma falta. Os principais semicondutores empregados para esta finalidade são tiristores, SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), GTO, IGBT ou IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*).

Estas chaves apresentam características benéficas ao sistema, pois proporcionam uma proteção mais rápida do que interruptores mecânicos, e, por conseguinte, o tempo de operação é muito curto, devido aos dispositivos de controle.

Uma das principais vantagens do SSFCL é que, devido à alta velocidade de comutação das chaves, a recuperação após a falha é praticamente imediata e, adicionalmente, tais chaves são capazes de suportar múltiplas operações em caso de reincidências de falhas. Entretanto, há a necessidade de um sistema de controle/proteção para operar estas chaves. Desta forma, uma eventual falha neste sistema pode comprometer a integridade do circuito protegido como um todo [32].

4.1.3 LCF Supercondutor

Os materiais supercondutores apresentam um rápido incremento de impedância quando a corrente, a temperatura ou o campo magnético excedem valores maiores do que seus respectivos valores críticos. Durante condições normais de operação (corrente, temperatura e campo magnético inferiores aos seus valores críticos) a impedância dos materiais

supercondutores é próxima de zero, entretanto, quando a corrente que circula pelo supercondutor ultrapassa seu valor crítico, geralmente devido às faltas à jusante do dispositivo, o material deixa o estado supercondutor e aumenta rapidamente sua impedância, permanecendo no estado condutor e limitando os níveis de curto-circuito [33]. Finalmente, quando a corrente reduzir novamente, e os valores de temperatura e campo magnético por consequência também reduzirem, o material irá resfriar e entrará de novo no estado supercondutor. Salienta-se que é necessário certo período de tempo, que varia de segundos até minutos, para que o supercondutor se resfrie novamente [32].

Cabe ainda ressaltar que o material supercondutor é imerso em um material criogênico, geralmente em nitrogênio líquido, e é importante que o mesmo esteja bem protegido do meio exterior para não haver a troca de calor, de modo que fatores externos não influenciem o estado supercondutor do material. A Figura 4.2 apresenta de maneira ilustrativa um material supercondutor sob resfriamento [34].

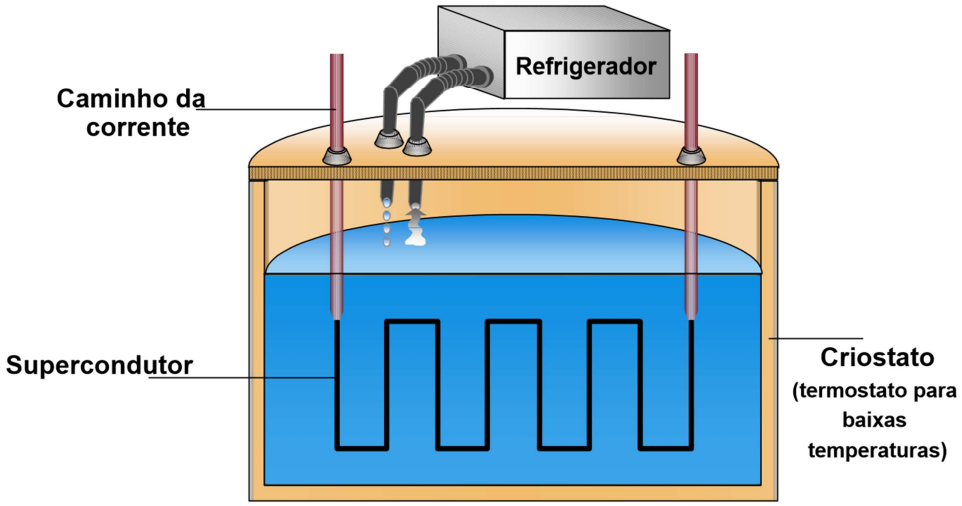

Figura 4.2 – Diagrama ilustrativo de um LCFS. (Adaptado de: [34]).

De modo geral, os materiais supercondutores podem ser classificados em dois grupos:

- Materiais supercondutores de baixa temperatura, os quais devem estar submetidos a temperaturas inferiores a 4 K para estarem no estado supercondutor. Geralmente são resfriados com hélio líquido.
- Materiais supercondutores de alta temperatura (HTS – *High Temperature Superconductor*), os quais devem estar submetidos a temperaturas inferiores a 77 K para estarem no estado supercondutor. Geralmente são resfriados com nitrogênio líquido.

Com o aumento das pesquisas em materiais supercondutores de alta temperatura os seus custos vêm decrescendo significativamente, viabilizando a sua aplicação como limitadores de corrente de falta [35]. Por outro lado, a supercondutividade é sensível a campos magnéticos em movimento. Por esta razão, as aplicações de supercondutores em sistemas em CA são mais difíceis de serem implementadas do que para sistemas em CC [19]. Este fato representa uma característica relevante para aplicações de supercondutores em sistemas HVDC.

Basicamente existem duas categorias de LCFS, os do tipo resistivo e os do tipo indutivo. Os LCFS resistivos apresentam baixa resistência quando se encontram no estado supercondutor. Porém, quando ocorre uma falta a jusante deste dispositivo, o dispositivo perde seu estado de supercondutor e aumenta consideravelmente sua resistência, limitando então a corrente de falta [33]. Nas próximas seções será descrito em detalhes o comportamento físico deste material.

Os LCFS indutivos são semelhantes a transformadores convencionais. O que os diferenciam entre si, é o fato de possuírem o enrolamento secundário construído a partir de materiais supercondutores. Nesta configuração, os dois enrolamentos são acoplados magneticamente com o circuito a ser protegido. A corrente do circuito, que circula pelo enrolamento primário, induz um campo magnético, que durante condições de operação normal é impedido pelo material supercondutor de circular pelo núcleo de ferro do dispositivo. Entretanto, na ocorrência de uma falta, o enrolamento secundário perde a característica supercondutora, então a impedância total do dispositivo aumenta, limitando a corrente de curto-circuito [33].

LCF em sistemas de energia elétrica

Para que um LCF seja considerado eficiente, ele deve possuir as seguintes características [20], [32]:

- Oferecer impedância desprezível durante a operação normal;
- Oferecer alta impedância durante condições de falta;
- Dissipar pouca potência;
- Limitar, com rapidez e eficácia, a corrente nas condições de curto-circuito;
- Apresentar alta confiabilidade durante longos períodos;
- Apresentar baixo peso, baixo volume e baixo custo;

- Não alterar o fator de potência dos circuitos; e
- Apresentar um curto tempo de recuperação após a ocorrência de curtos-circuitos.

Neste sentido, os LCFs baseados em materiais supercondutores (LCFS) são os que mais se aproximam das características desejadas. Estes dispositivos, além da segurança intrínseca e da capacidade de auto-restauração, apresentam influência desprezível durante a operação normal e reduzem efetivamente as correntes de curto-circuito (bem antes do primeiro pico de corrente), fatores que são fundamentais no aspecto da qualidade e fornecimento de energia elétrica [19], [36], [32].

Devido à confiabilidade e à rápida velocidade de transição de estado, os dispositivos LCFS permitem que o sistema de proteção atue somente se a falta persistir por um longo tempo, o que implica na diminuição de desligamentos ocasionados por faltas temporárias. Desta forma, os LCFS melhoram significativamente a qualidade do fornecimento de energia elétrica na ocorrência de faltas, uma vez que reduzem substancialmente o número de vezes em que o sistema é efetivamente desconectado.

Dentre os tipos de LCFS existentes, os resistivos representam a maioria dos projetos já instalados no mundo devido a sua simplicidade, baixo volume e peso [19], [36], e por isso, é esta classe de material que será investigada neste trabalho.

4.2 Modelagem de LCFS resistivos

Para a realização de simulações que retratem fielmente o comportamento de sistemas VSC-HVDC com limitadores de corrente de falta baseados em materiais supercondutores é necessário conhecer as características destes materiais em situações específicas. A mais importante propriedade física acerca do comportamento dos LCFS é a relação do campo elétrico pela densidade de corrente, também conhecida por *Característica E-J de materiais supercondutores de alta temperatura*, a qual, resumidamente, relaciona o campo elétrico (E) em função da densidade de corrente (J) no material.

Foi desenvolvido neste trabalho um modelo no RSCAD de um material supercondutor resistivo de alta temperatura, utilizando a ferramenta *C-Builder*, a qual permite a modelagem detalhada do material supercondutor em linguagem similar à linguagem de programação *C*. O valor da corrente na linha em CC é o sinal de entrada do modelo e o sinal de saída controla uma resistência variável. O modelo implementado neste trabalho é baseado no modelo matemático apresentado em [37]-[38], o qual é brevemente descrito a seguir.

O material adotado neste trabalho é o $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ (usualmente conhecido como Bi2223), devido à robustez e ao eficiente desempenho quando aplicado em sistemas de energia elétrica [19]. Neste sentido, a relação entre campo elétrico e densidade de corrente do material pode ser subdividida em três diferentes equações físicas, as quais representam o estado supercondutor, o estado de transição e o estado condutor. Na Equação 4.1 é sumarizado o comportamento para cada estado.

$$E = \begin{cases} 0 & T < T_c \; e \; J \leq J_c - \text{"}Estado\ supercondutor\text{"} \\ E_c \cdot \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n(T)} & T < T_c \; e \; J > J_c - \text{"}Estado\ de\ transição\text{"} \\ \rho(T_c) \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right) \cdot J & T \geq T_c - \text{"}Estado\ condutor\text{"} \end{cases} \tag{4.1}$$

em que E_c e J_c são o campo elétrico crítico e densidade de corrente crítica, respectivamente, ρ é a resistividade específica do material e T_c é a temperatura crítica do material supercondutor. De acordo com resultados experimentais para materiais do tipo Bi2223, o expoente n pode variar entre uma faixa de 10 a 20 [39].

Considerando a hipótese da condição adiabática, o calor dissipado no supercondutor não será transferido para o nitrogênio líquido, então o processo de resfriamento pode ser negligenciado [39]. Portanto, a expressão para o crescimento da temperatura em função do tempo é apresentado a partir da Equação 4.2.

$$T = T_0 + \frac{1}{C} \int E(J,T) \cdot J(t) dt \tag{4.2}$$

em que T_0 é a temperatura do nitrogênio líquido e C é a capacidade calorífica por volume. A relação entre a resistência do supercondutor em função do campo elétrico e densidade de corrente pode ser escrita de maneira aproximada por meio da Equação 4.3 [38].

$$R = \frac{E}{J} \cdot \frac{L}{A} \tag{4.3}$$

em que L e A são o comprimento efetivo e a área efetiva da seção transversal do supercondutor, respectivamente. Destaca-se que os parâmetros L e A não correspondem às reais dimensões físicas do LCFS. Estes são exclusivamente parâmetros relacionados ao modelo desenvolvido.

O fluxograma apresentado na Figura 4.3 sintetiza o processo de modelagem e implementação do material supercondutor.

No modelo desenvolvido, a resistência variável consiste no elemento *VARRES* do RSCAD. Neste elemento, o valor da resistência é controlado através de um sinal de controle externo e, para tanto, foi criado um bloco no *C-Builder* denominado *LCFSR*, no qual foi desenvolvido o algoritmo apresentado pelo fluxograma da Figura 4.3.

No bloco *LCFSR*, é lida a corrente na linha (I), executados os cálculos que representam o comportamento físico dos materiais supercondutores, e a saída é o valor (R) que controla o valor da resistência do elemento *VARRES*. Adicionalmente, é calculado o valor da temperatura a cada passo de integração da simulação, para que tal grandeza possa ser monitorada no ambiente de tempo real do programa. Cabe reforçar que o elemento *VARRES* é conectado em série com a linha CC, para atuar, de fato, como limitador de corrente de falta.

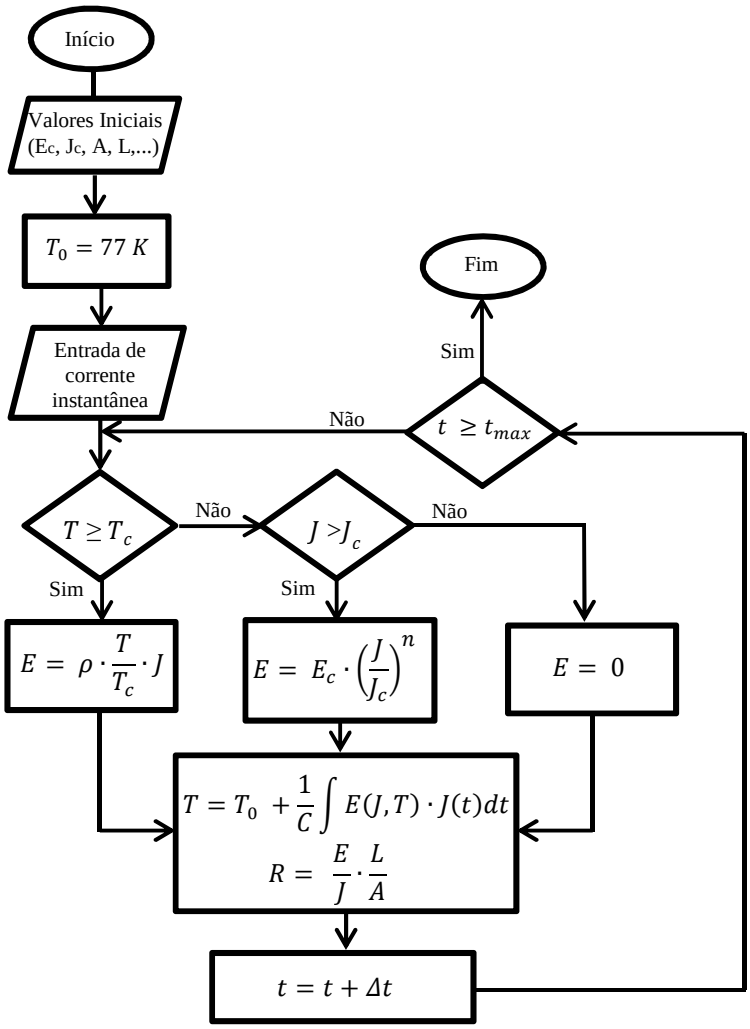

Figura 4.3 – Fluxograma de operação do modelo do LCFSR.

Na Figura 4.4 é ilustrado o modelo representativo do dispositivo supercondutor implementado no *C-Builder* do RSCAD.

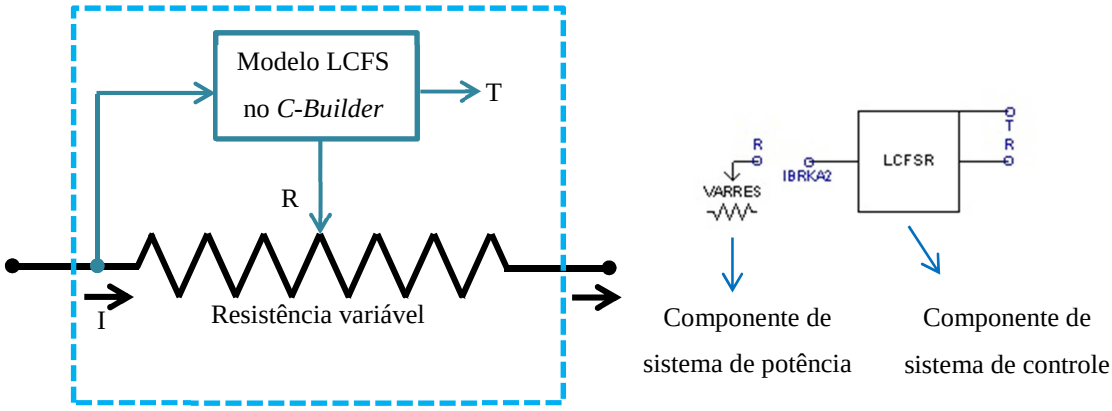

Figura 4.4 - Diagrama representativo do modelo implementado no *C-Builder*/RSCAD.

A Figura 4.5 apresenta a interface de entrada dos dados iniciais do bloco *LCFSR*. O usuário deve inserir previamente todas as constantes pertinentes ao material em questão. Destaca-se que os LCFS do tipo resistivo apresentam comportamento equivalente, portanto, é possível simular mais de um material apenas substituindo as constantes necessárias. Ou seja, o bloco desenvolvido permite que o usuário tenha liberdade de analisar diferentes materiais e com diferentes tamanhos de maneira eficiente.

LCFSR.def

CONFIGURATION | Parâmetros do LCF

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
ro	Resistividade do material	1E-5	[ohm.m]		
Ec	Campo elétrico crítico	0.0001	[V/m]		
n	Expoente n ou alfa	10			
Jc	Densidade de corrente crítica	10E7	[A/m²]		
T0	Temperatura do nitrogênio liquido	77	[K]		
Tc	Temperatura crítica do HTS	87	[K]		
L	Comprimento do material supercondutor	37.5	[m]		
A	Área da seção transversal do supercondutor	1.5e-5	[m²]		
C	Capacidade calorífica por volume do material	1E5			

Update | Cancel | Cancel All

Figura 4.5 – Parâmetros de entrada do modelo do LCFSR desenvolvido.

Para prevenir o aquecimento excessivo do material supercondutor e evitar que o tempo necessário para seu resfriamento seja longo, geralmente é inserido um resistor *shunt* em paralelo com o material supercondutor [33]. Nestes casos, durante condições normais de

operação, a corrente passa através do material supercondutor, que pode ser considerado como um caminho de impedância nula.

Durante faltas, o LCFS perde a característica de supercondutividade, e, se projetado de maneira a ter uma alta resistência durante o estado limitador, a corrente de falta passa pela resistência *shunt*, limitando, portanto, a corrente. A Figura 4.6 ilustra um diagrama de um LCFS com resistência em paralelo.

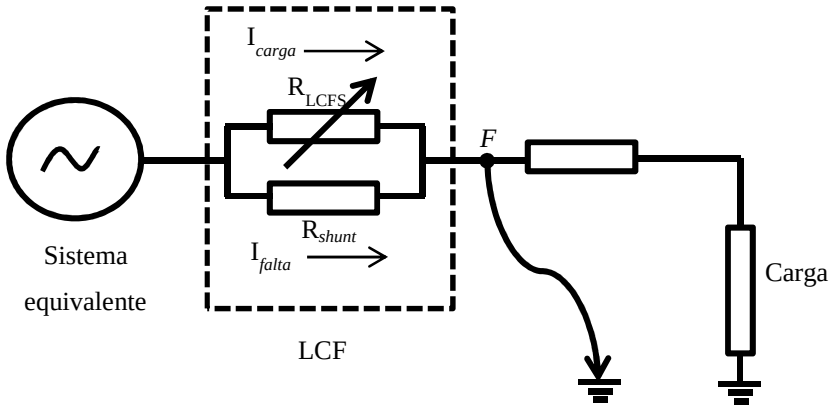

Figura 4.6 – Diagrama equivalente de um sistema com LCFS com resistência em paralelo.

4.3 Considerações finais sobre o capítulo

Limitadores de corrente de falta limitam os níveis de correntes de curto-circuito a patamares mais gerenciáveis, o que possibilita o aumento da transmissão de potência em sistemas elétricos sem a substituição dos equipamentos presentes em tais sistemas. Desta forma, os equipamentos existentes ainda são capazes de lidar com tais correntes e fornecer proteção adequada e segura ao sistema.

Neste trabalho, é proposta a utilização de limitadores de corrente de falta supercondutores do tipo resistivo para limitar e minimizar os impactos de faltas na linha de corrente contínua de sistemas VSC-HVDC. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de LCFS na ferramenta de simulação de sistemas elétricos utilizada no trabalho, o RSCAD. Neste contexto, no Capítulo 5 é testado e avaliado este modelo desenvolvido, tal como apresentada uma metodologia para determinar a resistência efetiva do material supercondutor a ser aplicado no sistema em estudo.

5. Análise de Limitadores de Corrente de Falta aplicados em Sistemas VSC-HVDC

Este capítulo apresenta as simulações de falta nos sistemas VSC-HVDC com LCF instalados em série com as linhas CC. Para tanto foi desenvolvida uma metodologia com intuito de determinar o quanto o LCFS aplicado no sistema em estudo deve limitar a corrente de falta. Esta análise é apresentada na sequência.

5.1 Metodologia de projeto efetivo do LCFS

Na ocorrência de uma falta na linha CC em um sistema VSC-HVDC os IGBT perdem a capacidade de controle e são desligados em um curto tempo, e a corrente de falha não é interrompida, uma vez que os diodos em anti-paralelo alimentam a falta como uma ponte retificadora não controlada [2], [6]. Ao mesmo tempo, os capacitores se descarregam, contribuindo para a elevação da corrente de falta. Desta forma, o conversor não é capaz de extinguir a elevada corrente de curto-circuito, ou seja, tal corrente é limitada somente pela impedância do sistema elétrico, causando altas correntes que podem danificar os dispositivos semicondutores e os elementos conectados ao sistema de modo geral.

Diante deste cenário, a utilização de LCFS pode ser uma alternativa viável para limitar os impactos de faltas nas linhas CC, contudo, o sistema de proteção ainda deverá ser capaz de identificar a condição faltosa e emitir sinal de desligamento da linha. Os trabalhos de [20], [32] e [36] discutem os benefícios da utilização de LCFS no comportamento da corrente de falta durante faltas na linha CC de sistemas VSC-HVDC.

Entretanto, estes trabalhos não apresentam a metodologia adotada para a escolha da resistência efetiva que o material supercondutor impõe no sistema na ocorrência de faltas na linha.

Neste contexto, esta seção se dedica a apresentar uma metodologia para determinar o valor da resistência efetiva do material (quando este se encontra no estado condutor),

coordenada com os limites de suportabilidade dos equipamentos conectados em série com o sistema. De maneira geral, a corrente durante faltas não deve exceder o limite de suportabilidade de nenhum equipamento conectado no sistema, portanto, o projeto do LCFS deve ser coordenado com o equipamento que apresentar o menor limite. Ou seja, o LCFS escolhido deve ser tal que limite a máxima corrente de falta a um patamar inferior ao limite máximo que o disjuntor CC possa operar de maneira segura e que não danifique nenhum equipamento no sistema. De acordo com [40] os máximos níveis de corrente que podem ser interrompidos por disjuntores CC são de aproximadamente 9 kA, considerando os disjuntores CC híbridos. Em [40] é apresentado ainda que estão sendo desenvolvidos disjuntores CC com limites de até 16 kA. Entretanto, destaca-se que quanto maior a capacidade do disjuntor em interromper as correntes de falta, maior será o custo de tal equipamento. Os diodos, por sua vez, apresentam um limite de suportabilidade de 2 p.u. de corrente por aproximadamente 10 ms [6].

Para determinar qual deve ser a resistência que o LCFS deve impor no sistema durante condições de faltas na linha CC, é necessário obter uma relação matemática entre a corrente de curto-circuito e a resistência do limitador.

Com intuito de obter tal expressão, inicialmente, foi realizada uma simulação de um curto-circuito polo-terra, no início da linha CC do sistema elétrico da Figura 3.1, representando a situação de falta que provoca a maior corrente de curto-circuito no sistema. Destaca-se que nesta condição os IGBT são desligados pela proteção de sobrecorrente do conversor. A Figura 5.1 ilustra as correntes nas três fases do lado CA do VSC_1 para esta falta.

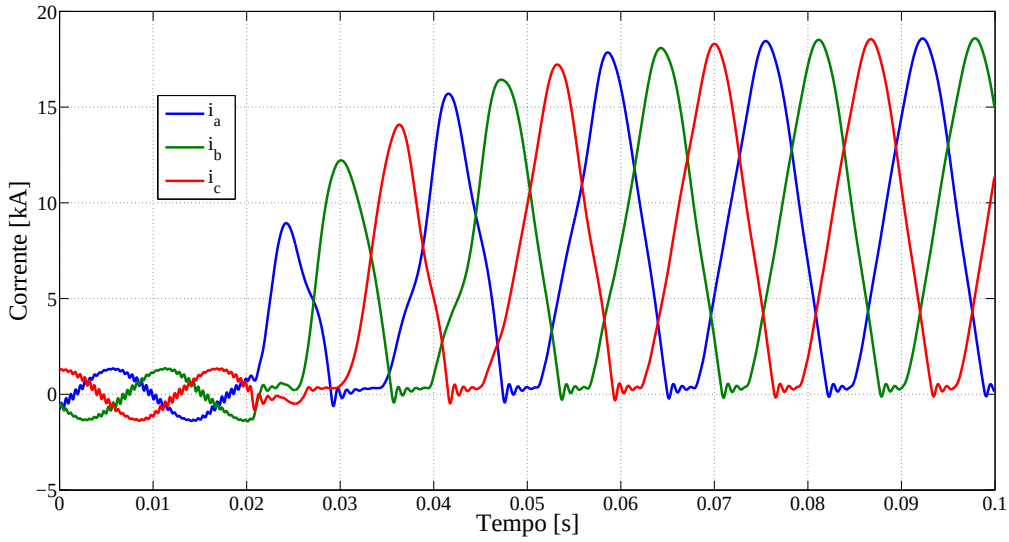

Figura 5.1 – Correntes no lado CA para curto-circuito polo-terra no início da linha CC.

É observado a partir da Figura 5.1 o deslocamento vertical das correntes para cima, o que origina uma assimetria da forma de onda da corrente em relação ao eixo das ordenadas. Nesta condição, os diodos das chaves 1, 3 e 5 da Figura 2.2 estão sempre polarizados durante a falta, e toda corrente de curto-circuito do lado CA do VSC_1 passa através do polo sob falta, que neste caso é o positivo. A Figura 5.2 ilustra a corrente nas seis chaves do VSC_1. Antes da falta, as correntes passam através dos IGBT. Após a falta, apenas os diodos das chaves 1, 3 e 5 conduzem toda corrente proveniente do sistema CA.

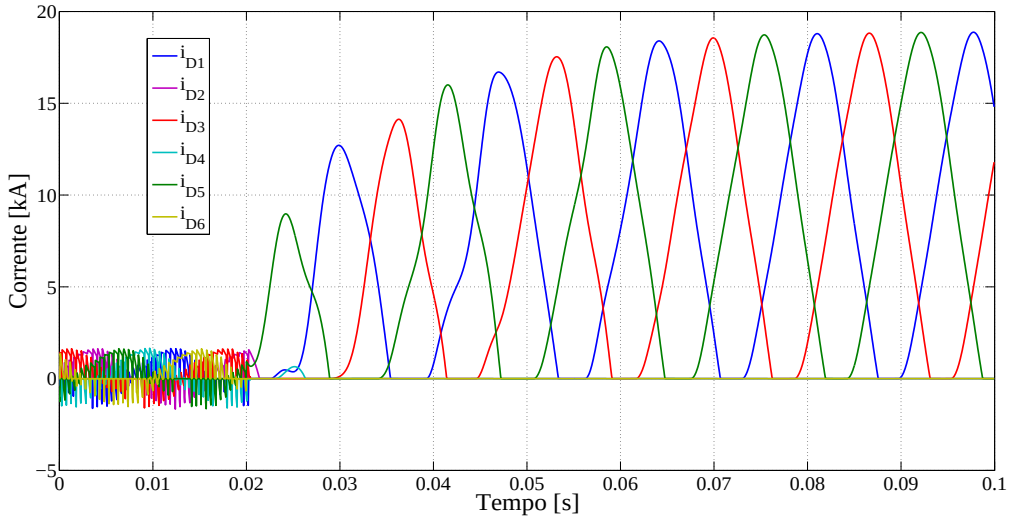

Figura 5.2 – Correntes nos diodos para curto-circuito polo-terra no início da linha CC.

Neste sentido, o circuito equivalente para esta falta em específico pode ser ilustrado por meio da Figura 5.3. O sistema em CA equivalente é representado por uma fonte de tensão CC em série com uma resistência (R_{eq}), a qual é igual ao valor absoluto da impedância do sistema CA dividida por três, uma vez que durante a falta, a corrente das três fases circula na linha CC.

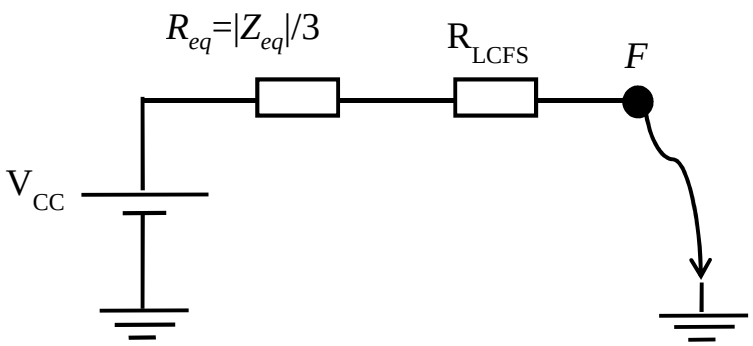

Figura 5.3 – Diagrama equivalente de um curto-circuito polo-terra no início da linha.

em que V_{cc} é a tensão CC do sistema antes da falta, Z_{eq} é igual a soma da impedância de conexão com o sistema em corrente alternada, da impedância do transformador de conexão e da impedância do reator do VSC. I_f é a corrente de curto-circuito polo-terra.

A partir de uma análise de malhas do sistema ilustrado na Figura 5.2, obtém-se a Equação 5.1.

$$V_{cc} = |Zeq| \cdot \frac{I_f}{3} + R_{LCFS} \cdot I_f \tag{5.1}$$

em que R_{LCF} é a resistência imposta pelo LCFS após a ocorrência da falta. Desta forma, pode-se obter uma relação entre R_{LCFS} e a corrente de curto-circuito máxima, a qual é sintetizada na Equação 5.2.

$$R_{LCFS} = \frac{V_{cc}}{I_f} - \frac{|Zeq|}{3} \tag{5.2}$$

A partir da Equação 5.2, basta adotar um valor de I_f máximo, escolhido de acordo com os limites de suportabilidade dos equipamentos conectados no sistema, e utilizar a Equação 5.2 para determinar qual valor de resistência que limita a corrente em tal patamar.

Este trabalho propõe que o LCFS limite a corrente de falta a valores da ordem de 2 kA a 2,5 kA, com intuito de proteger os diodos e permitir que o disjuntor CC possa interromper qualquer falta na linha de transmissão, de modo a maximizar a confiabilidade do sistema de proteção como um todo.

Destaca-se ainda que o LCFS deve ser projetado fisicamente para que sua corrente crítica (máxima corrente em que o LCFS permanece no estado supercondutor) seja inferior ao parâmetro I_f. Cabe ainda ressaltar que a resistência efetiva do LCFS será sempre maior do que o valor mínimo calculado, uma vez que ela é proporcional à razão T/T_c tal como apresentado na Equação 3.3, a qual, por sua vez, sempre será maior do que a unidade, quando o LCFS se encontra no estado condutor.

A Tabela 5.1 ilustra a síntese dos resultados da metodologia, no qual foram obtidos, inicialmente, quatro diferentes LCFS. Adotando diferentes valores de corrente máxima, foram calculadas, a partir da Equação 5.2, quais deveriam ser as resistências mínimas dos LCFS, a fim de limitar a máxima corrente de falta no patamar selecionado. A corrente crítica do LCFS foi determinada de maneira empírica, por meio de simulações de curto-circuito. Entretanto, salienta-se que a mesma deve ser inferior à máxima corrente de falta desejada, e ainda deve ser levado em consideração que o LCFS apenas deixará o estado supercondutor após a

corrente que passa por ele superar a corrente crítica utilizada no projeto do mesmo. Os parâmetros e constantes de cada LCFS estão ilustrados no Apêndice A.

Tabela 5.1 – Síntese dos resultados da metodologia.

	Corrente Máxima [kA]	Corrente Crítica [kA]	Resistência mínima do LCFS no estado condutor [Ω]
$LCFS_1$	2	1	45
$LCFS_2$	2,25	1,8	40
$LCFS_3$	2	1,4	45
$LCFS_4$	2,25	1	40

5.2 Simulações de falta considerando os LCFS propostos

Com intuito de validar a metodologia proposta e avaliar o impacto de LCFS diante faltas na linha CC, foram simuladas faltas polo-terra ao longo da linha de transmissão em CC. As faltas foram aplicadas desprezando o efeito da resistência de falta, caracterizando as condições de faltas mais agravantes ao sistema. A Figura 5.4 apresenta onde foram instalados os LCFS.

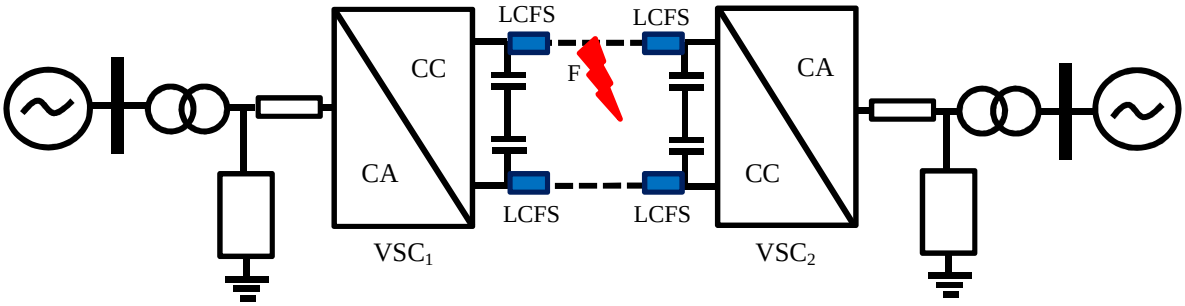

Figura 5.4 – Sistema VSC-HVDC com LCFS.

Neste contexto, a Figura 5.5 ilustra o máximo valor da corrente no polo positivo após os quatro LCFS limitarem a corrente (após os LCFS saírem do estado supercondutor e entrarem no estado limitador, que no geral demora menos de 3 ms) para faltas que envolvem este polo a terra. Pode ser observado a partir da Figura 5.5 que, para todas as faltas simuladas, a corrente durante a falta é inferior aos limites máximos estipulados, que são apresentados na Tabela 5.1.

Entretanto, pode ser observada uma sobre limitação, principalmente nos casos que o sistema opera com o $LCFS_1$ e com o $LCFS_4$. Ou seja, nestes casos, os limitadores foram projetados para impedir que a corrente ultrapassasse 2 kA e 2,25 kA, respectivamente, porém, eles impediram que a corrente ultrapassasse 1,2 kA, o que pode prejudicar a identificação da falta pelo esquema de proteção das linhas.

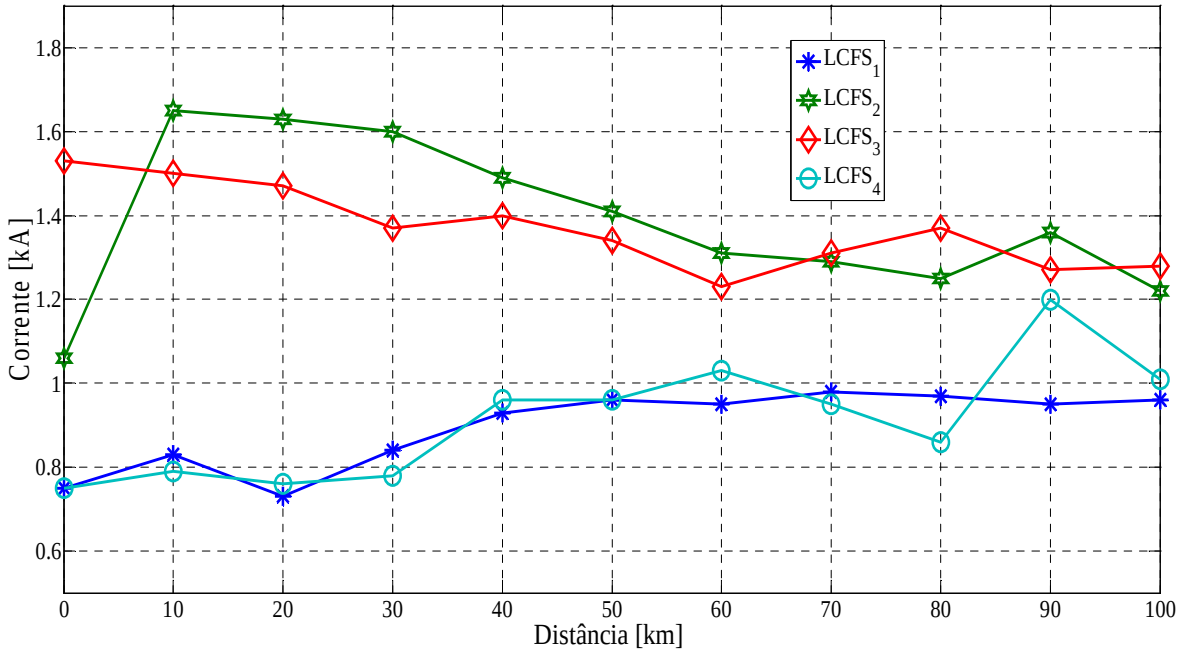

Figura 5.5 – Máximos valores de corrente no polo positivo após a limitação dos LCFS.

Esta limitação de corrente superior ao esperado é relacionada ao incremento da temperatura do material durante a falta. Pode ser observado ainda da Figura 5.5 que uma falta mais distante pode apresentar uma corrente de falta maior do que uma falta mais próxima. Isto ocorre, pois, para as faltas mais próximas, a temperatura do material pode se elevar rapidamente, fazendo com que o mesmo apresente uma resistência maior para faltas mais próximas do que nos casos em que as faltas são mais distantes.

A fim de exemplificação, a Figura 5.6 ilustra a corrente no polo positivo, quando o sistema opera com o $LCFS_1$ em série com a linha, para três faltas polo-terra, sendo aplicadas a 0 km, 30 km e 50 km de distância da estação retificadora (VSC_1), respectivamente.

Pode ser observado que a corrente no polo é limitada mais rapidamente (a limitação ocorre quando o comportamento da corrente deixa de ser crescente) quanto mais próxima é da estação retificadora (do local de instalação do LCFS). Entretanto, após a limitação, a corrente no polo positivo apresentou um maior valor para a falta mais distante (curva em vermelho).

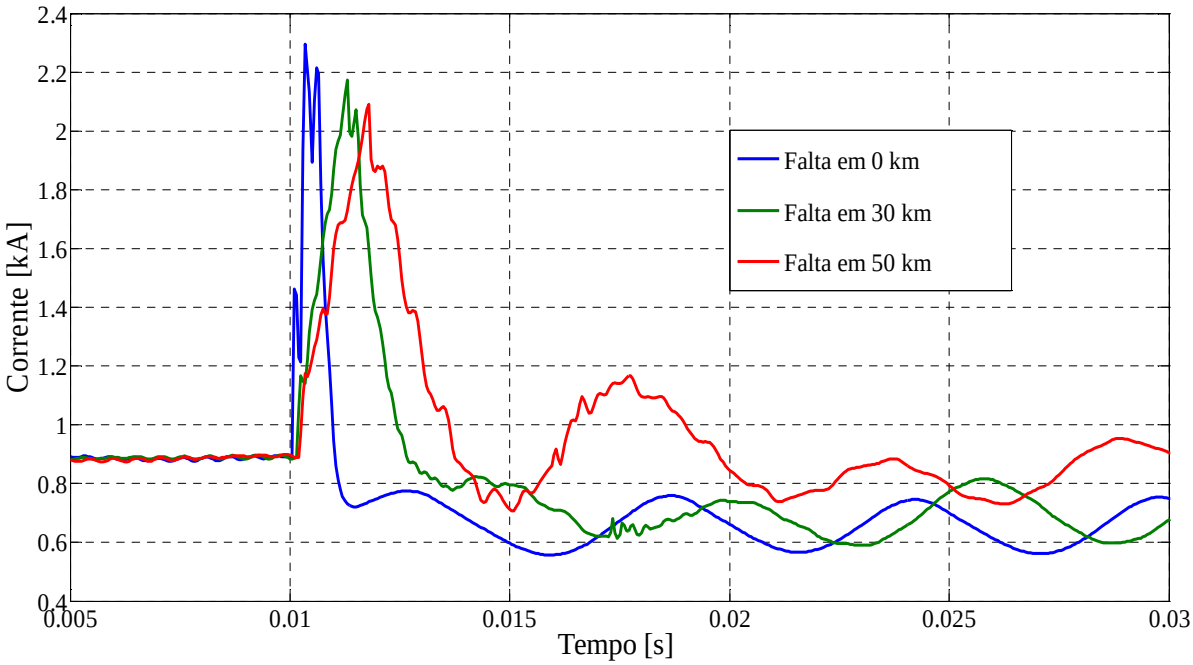

Figura 5.6 – Correntes no polo positivo para três faltas polo-terra distantes do VSC1.

Neste sentido, a Figura 5.7 ilustra o comportamento da temperatura do material supercondutor para estas três faltas analisadas. É constatado que a temperatura apresenta um crescimento acentuado após a aplicação da falta, que ocorreu em 0,01 segundo. Para a falta em 0 km, a temperatura do material atinge aproximadamente 215 K; para a falta em 30 km, a temperatura atinge 192 K; e para a falta a 50 km a temperatura atinge 154 K.

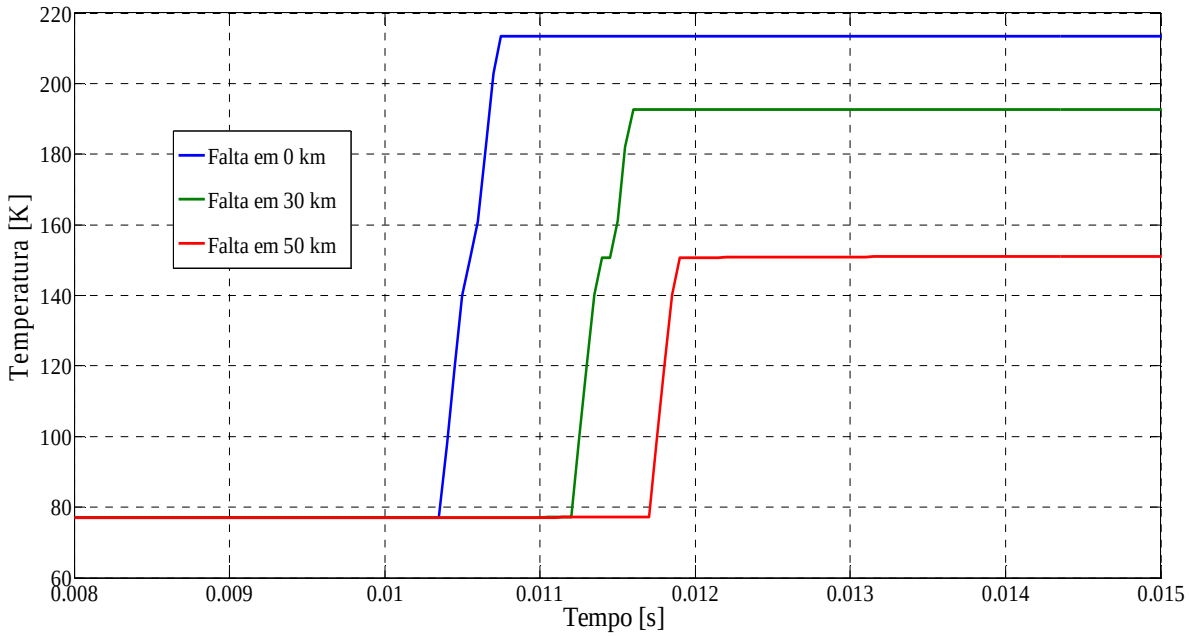

Figura 5.7 – Temperatura do LCFS1 para três faltas polo-terra distantes do VSC1.

Neste contexto, a Figura 5.8 ilustra o comportamento resistivo do material durante as faltas avaliadas. Também pode ser constatado nesta figura que o LCFS é mais rápido para a falta a 0 km e impõe a maior resistência no sistema para esta falta.

Cabe ressaltar que o $LCFS_1$ foi projetado de modo a apresentar uma resistência mínima igual a 45 Ω. Entretanto, com o aumento da temperatura provocado pela corrente de falta, este limitador atinge 110 Ω para a falta a 0 km; 100 Ω para a falta a 30 km e aproximadamente 80 Ω para a falta a 50 km. Os valores atingidos tanto pela temperatura como pela resistência do material são descritos pelo comportamento físico do material, através da *Característica E-J de materiais supercondutores*, apresentada no Capítulo 4.

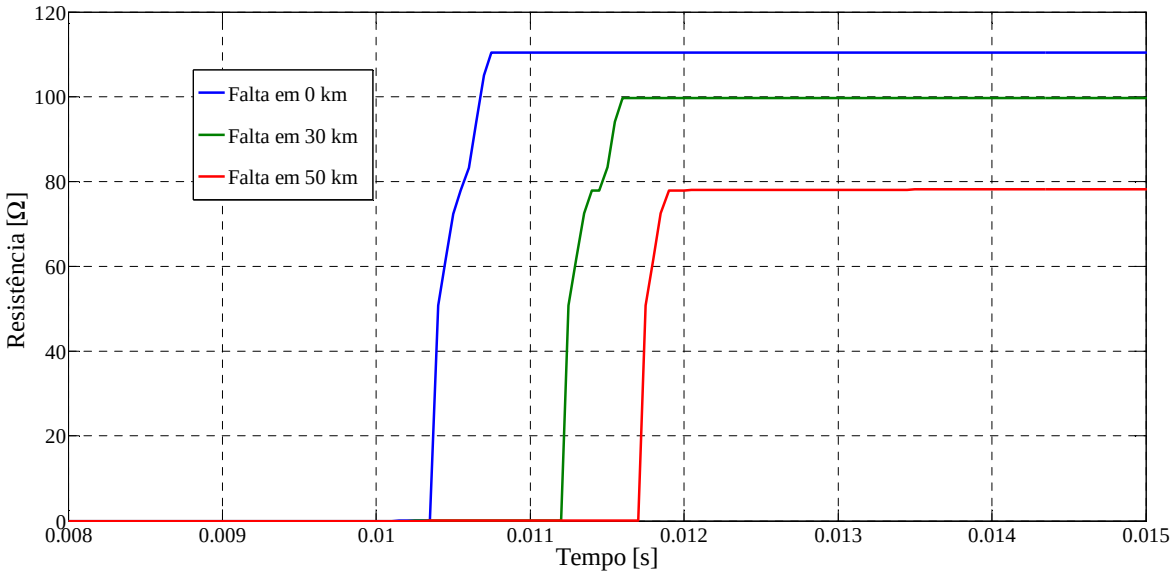

Figura 5.8 – Comportamento resistivo do LCFS1 para as três faltas analisadas.

Uma alternativa para que LCFS não limitem tanto a corrente de falta ao ponto de que o esquema de proteção possa não identificar uma condição faltosa, é a utilização de um resistor *shunt* em paralelo com o material supercondutor. Neste caso, o material supercondutor deve ser projetado de modo a apresentar uma alta resistência, para que durante a falta, a resistência do limitador como um todo será praticamente a do resistor *shunt*. Desta forma, o LCFS não apresenta variadas resistências para diferentes faltas na linha de transmissão.

Neste sentido, é proposto neste trabalho que o material supercondutor apresente uma resistência mínima igual a 10 vezes a resistência do resistor *shunt*, de modo que a resistência equivalente deste paralelo seja aproximadamente a resistência do resistor *shunt*. O resistor *shunt*, por sua vez, pode ser dimensionado ainda pela Equação 5.2.

Para uma máxima corrente de falta igual a 2,5 kA, de acordo com a Equação 5.2, é necessária uma resistência em série com o circuito igual a 35 Ω. Desta forma, adotando um

resistor *shunt* com este valor, foi projetado um LCFS que apresentasse uma resistência mínima igual a 350 Ω, com uma corrente crítica adotada igual a 1 kA. Assim, A Figura 5.9 ilustra o comportamento da corrente no polo positivo durante três faltas aplicadas ao longo da linha de transmissão.

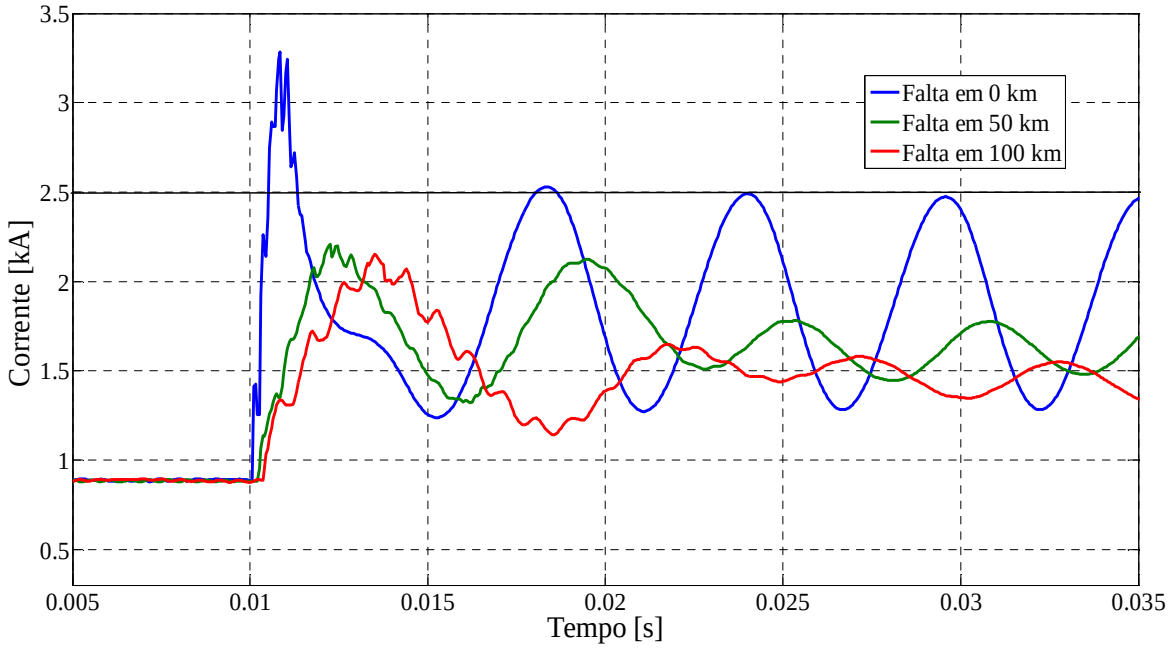

Figura 5.9 – Correntes no polo positivo para três faltas polo-terra distantes do VSC1, considerando o resistor shunt em paralelo com o LCFS.

Pode ser observado a partir da Figura 5.9 que o máximo valor da corrente durante a falta, após o LCFS deixar o estado supercondutor é igual a aproximadamente 2,5 kA, para a falta a 0 km da estação retificadora (curva em azul), o que atesta a eficácia da metodologia proposta. As outras faltas, consequentemente apresentam uma menor corrente durante a falta, pois o limitador não varia a resistência que impõe no circuito, devido ao resistor *shunt*. Desta forma, além do resistor *shunt* proteger o material supercondutor, ele permite um controle mais preciso do nível de corrente de falta, uma vez que a influência da temperatura do material não impacta de maneira significativa nesta condição. Como o efeito da temperatura aumenta a resistência do LCFS, e este é projetado de maneira a apresentar uma resistência mínima da ordem de 10 vezes maior que a resistência do resistor *shunt*, o equivalente entre o LCFS e o resistor *shunt* será aproximadamente igual ao valor da resistência do elemento *shunt*, mesmo para casos em que a temperatura influencie significativamente no comportamento resistivo do LCFS. Entretanto, esta aplicação, por necessitar de um LCFS maior e ainda de um resistor *shunt*, pode ser mais cara.

5.3 Análise do comportamento dinâmico do sistema com LCFS

Esta subseção busca ilustrar o impacto dos LCFS no comportamento dinâmico de sistemas VSC-HVDC durante faltas na linha de transmissão em CC.

Neste sentido, a Figura 5.10 ilustra o comportamento da corrente no polo positivo para uma falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Nesta situação, cinco distintos cenários são avaliados. A curva em preto representa a resposta do sistema operando sem LCFS em série com a linha, e as demais curvas representam o comportamento da corrente considerando os quatro LCFS, inicialmente descritos no capítulo, por meio da Tabela 5.1.

Fica evidenciado a partir da Figura 5.10 que, na ausência dos LCFS, a corrente no polo positivo ultrapassa mais de 9 kA (que é um limiar típico de suportabilidade de disjuntores CC [16]) em aproximadamente 10 ms. Ou seja, para esta condição de falta, os disjuntores CC podem não conseguir realizar a abertura da linha, comprometendo a integridade dos elementos conectados ao sistema de modo geral.

Por outro lado, é exposta na Figura 5.10 a eficácia da limitação da corrente quando se utilizam os LCFS propostos. Nos quatros casos analisados, a maior corrente no polo positivo foi inferior a 4 kA, para o $LCFS_2$ e $LCFS_3$. Para o $LCFS_1$ e para o $LCFS_4$ a corrente não atingiu o patamar de 2,2 kA.

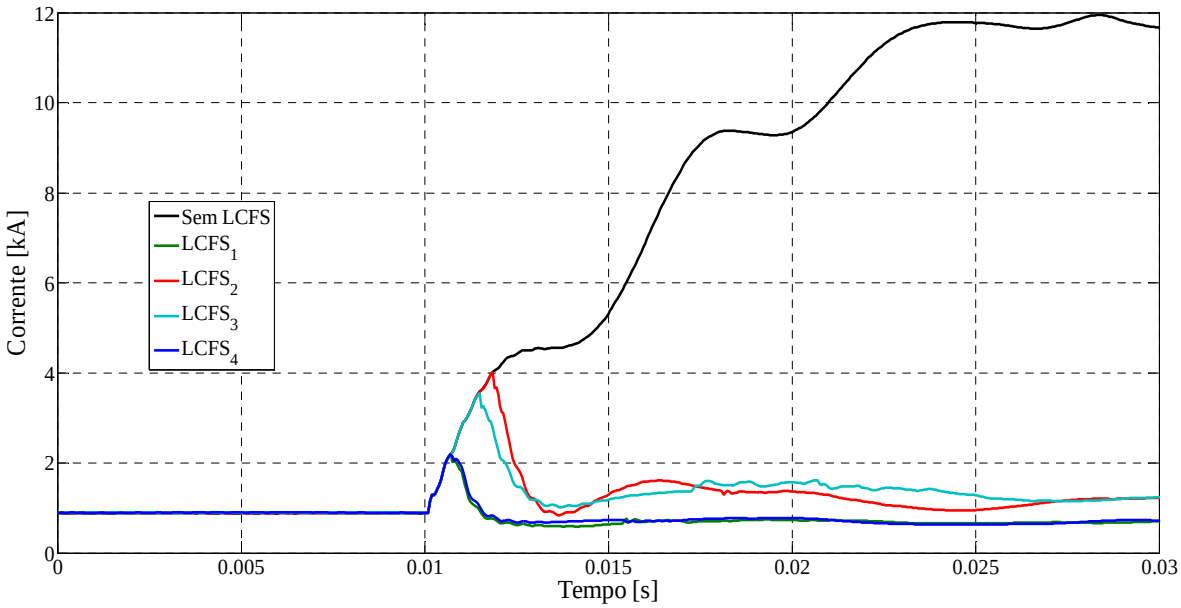

Figura 5.10 - Corrente no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos LCFS.

De maneira complementar, a Figura 5.11 ilustra as tensões no polo positivo do sistema para a mesma falta analisada, considerando os cinco cenários previamente citados. Fica evidenciado nesta figura o impacto positivo dos LCFS no comportamento da tensão, uma vez que as oscilações da tensão são substancialmente minimizadas nos cenários que apresentam os LCFS.

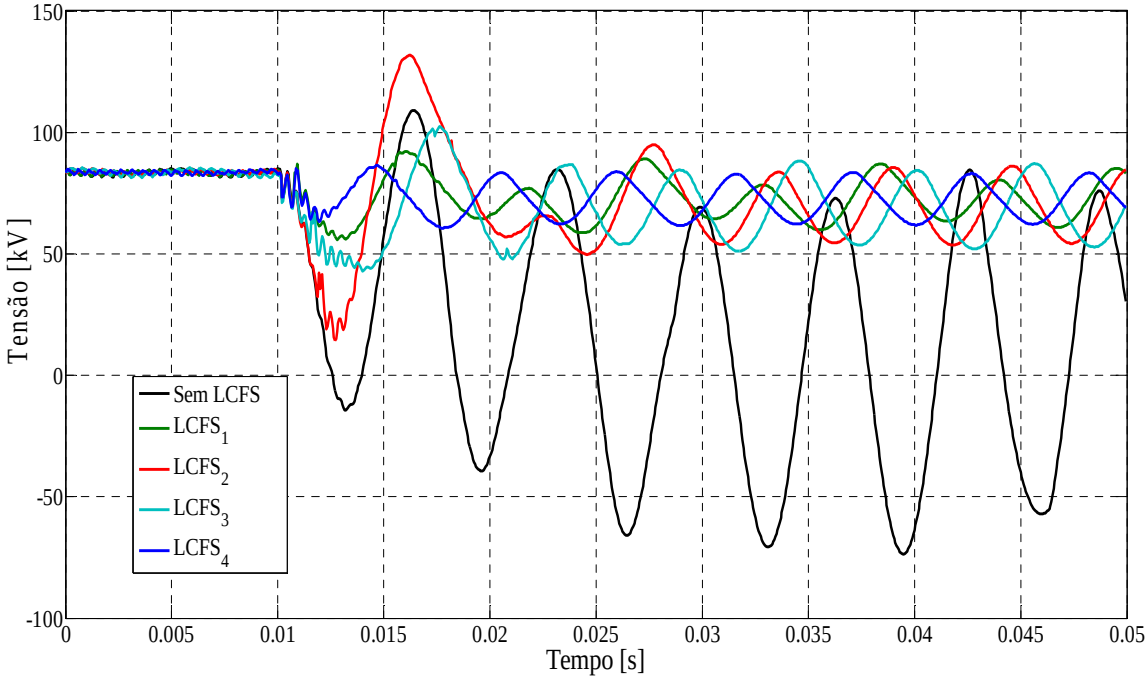

Figura 5.11 - Tensão no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos LCFS.

5.4 Análise do comportamento dinâmico do sistema com LCFI

Esta subseção busca ilustrar o impacto dos LCFI no comportamento dinâmico de sistemas VSC-HVDC durante faltas na linha de transmissão em CC. Este trabalho não visa determinar uma metodologia para determinar a dimensão deste tipo de limitador que é mais adequada para um sistema em específico, portanto, será apenas discutido o impacto do aumento da indutância de LCFI nos sistemas VSC-HVDC.

Cabe ressaltar que na configuração original, o sistema apresenta um indutor de 8 mH em série com a linha em CC (reator de alisamento). Desta forma, este trabalho visa aumentar o tamanho de tal reator até os valores utilizados por [21], de modo a analisar os impactos deste incremento sob o sistema.

A Figura 5.12 ilustra o comportamento da corrente no polo positivo para uma falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora.

Pode ser observado que na medida em que se aumenta o valor da indutância do LCFI, a corrente cresce mais lentamente. Neste sentido, para um mesmo instante de tempo após a ocorrência da falta, a corrente será menor quanto maior for a indutância do limitador (devido à característica dos indutores em atrasar a corrente). Para um LCFI igual a 100 mH, por exemplo, a corrente é inferior a 5 kA após 10 ms da aplicação da falta, no passo que a mesma é superior a 9 kA considerando LCFI igual a 8 mH.

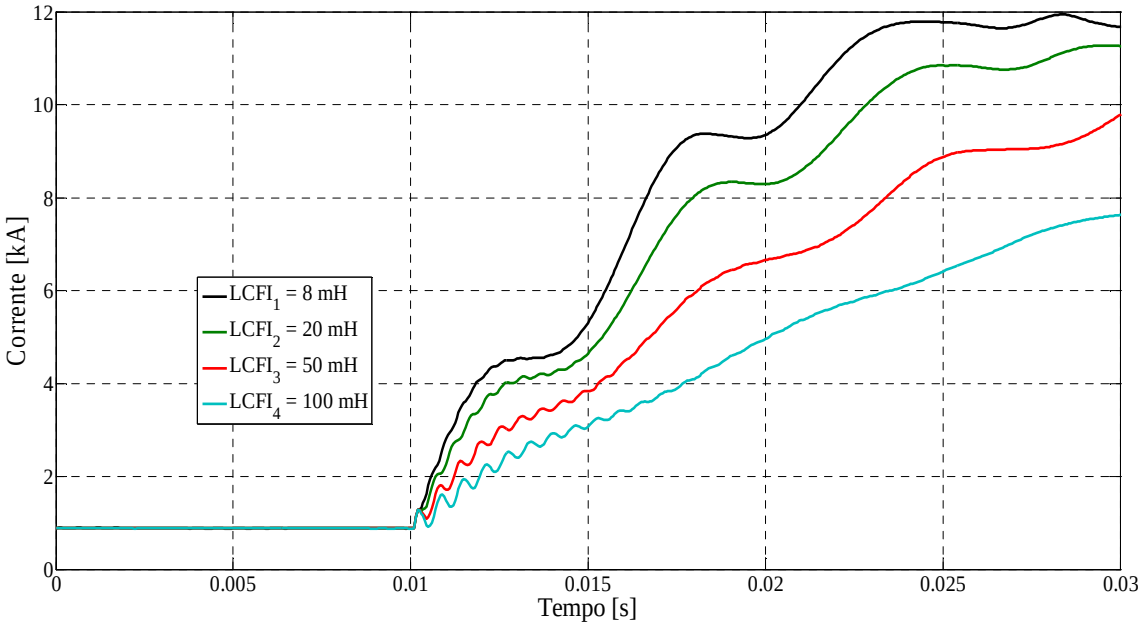

Figura 5.12 - Corrente no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos limitadores indutivos.

Desta maneira, a utilização de um maior LCFI permite que o sistema de proteção tenha mais tempo para eliminar a condição faltosa, uma vez que a violação dos limites dos equipamentos demoraria mais tempo para acontecer, o que aumenta a segurança do sistema como um todo.

De acordo com o tempo médio do sistema de proteção em eliminar uma condição faltosa, pode ser escolhido determinado LCFI. Se o tempo médio for elevado, é apropriada a utilização de um LCFI maior, tendo em vista que a corrente atingiria um patamar mais gerenciável, comparado quando o sistema opera com um LCFI de menor indutância. Por exemplo, considerando um limite máximo permitido de corrente de falta igual a 9 kA e adotando um tempo máximo para a eliminação desta falta fosse igual a 15 ms, a utilização do $LCFI_3$ seria adequada, e não haveria a necessidade da utilização de um LCFI maior, como é o caso do $LCFI_4$. Entretanto, como será apresentada no Capítulo 7, a utilização de um LCFI maior pode resultar em um atraso na detecção das faltas, fator que também deve ser levado em conta para a determinação do LCFI que será de fato aplicado no sistema.

De maneira complementar, a Figura 5.13 ilustra as tensões no polo positivo do sistema para a mesma falta analisada, considerando os quatro valores de limitadores indutivos utilizados.

Pode ser observado que o aumento do limitador também implica em um atraso na taxa de variação da tensão, entretanto, tal efeito é menos acentuado e não leva a um amortecimento das oscilações de tensão, as quais excursionam consideravelmente para os quatro casos analisados.

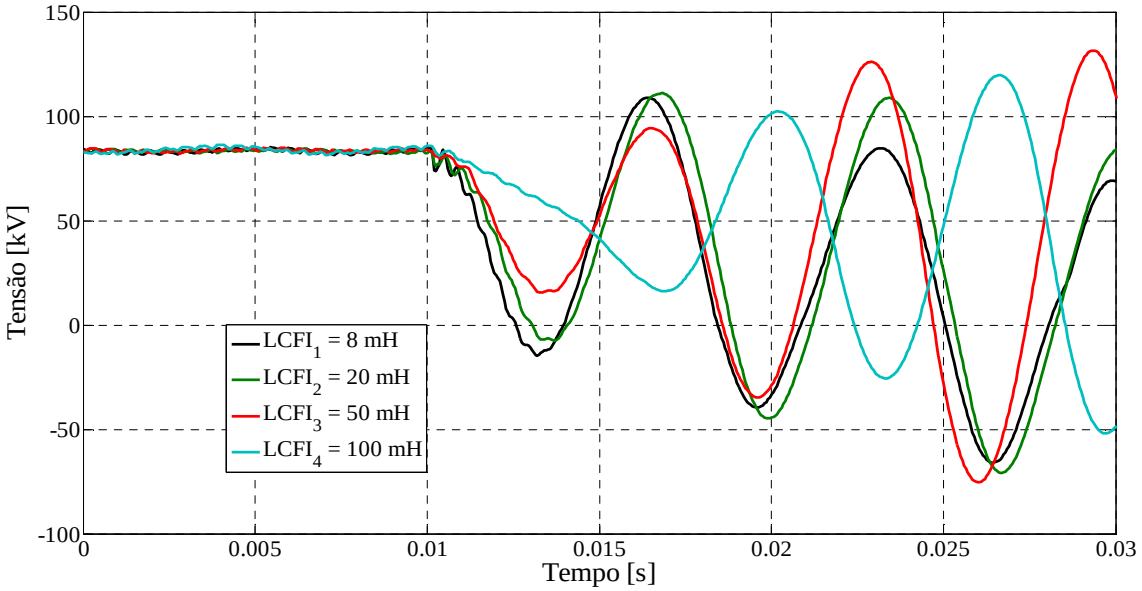

Figura 5.13 - Tensão no polo positivo para falta polo-polo com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 20 km da estação retificadora. Influência dos limitadores indutivos.

5.5 Comparação entre o impacto dos LCF no comportamento dinâmico do sistema

Esta seção busca ilustrar uma comparação dos impactos dos diferentes LCF utilizados no trabalho no comportamento do sistema VSC-HVDC em estudo diante uma condição de falta na linha em CC. Neste contexto, a Figura 5.14 ilustra o comportamento da corrente no polo positivo do sistema, durante a ocorrência de uma falta polo-terra a 10 km de distância do VSC_1 com resistência de falta igual a 0,01 Ω, considerando quatro distintos cenários.

A curva em preto ilustra o comportamento da corrente de falta para o sistema normal, ou seja, sem os limitadores. Cabe ressaltar que nesta condição, o sistema apresenta um reator de alisamento de 8 mH em série com a linha. Neste caso, a corrente de falta supera 7 kA em aproximadamente 10 ms. A curva em verde ilustra a reposta do sistema quando este apresenta

um LCFI de 100 mH em série com a linha. Nesta condição, o crescimento da corrente é atrasado, sendo que a corrente atinge menos de 5 kA após 10 ms de aplicação da falta.

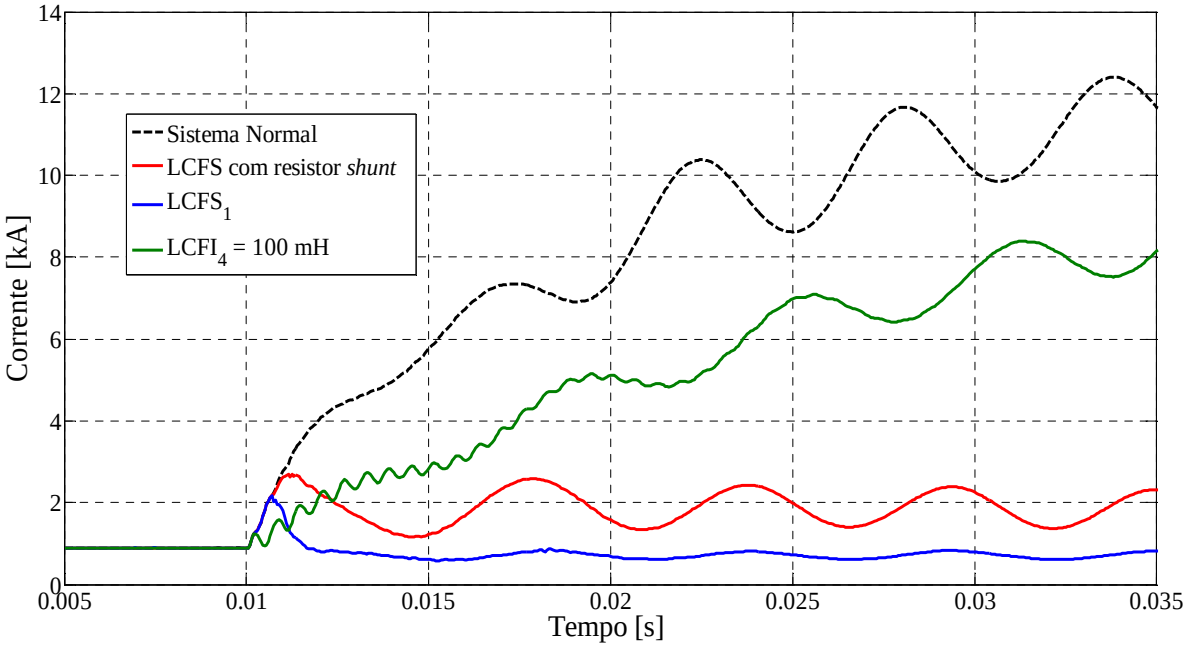

Figura 5.14 - Corrente no polo positivo para falta polo-terra com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 10 km da estação retificadora. Comparação entre os LCF.

A curva em vermelho ilustra a resposta do sistema considerando o LCFS com o resistor *shunt* de 35 Ω em série com a linha. Neste caso, a corrente de falta fica limitada em torno de 2 kA. Em contrapartida, a curva azul reporta que a corrente durante a falta permanece inferior à corrente nominal do sistema, quando se utiliza o $LCFS_1$ em série com a linha, devido ao aumento da temperatura e consequentemente da resistência imposta por tal limitador no sistema durante a falta.

De maneira complementar, a Figura 5.15 ilustra a tensão no polo positivo do sistema VSC-HVDC em estudo diante da mesma situação de falta, considerando os quatro cenários previamente citados.

Pode ser observado a partir da Figura 5.15 que ao utilizar o $LCFI_4$, a oscilação de tensão é maximizada nesta condição, desta forma, o sistema de proteção precisa atuar antes que ocorra uma sobretensão que possa ser prejudicial aos elementos conectados no sistema. Neste caso, se o esquema de proteção não extinguisse a condição faltosa, a tensão no polo positivo poderia atingir mais de 120 kV.

Entretanto, ao se utilizar os LCF supercondutores, as oscilações de tensão são minimizadas, uma vez que são amortecidas devido ao comportamento resistivo destes limitadores. É observado que ao utilizar o $LCFS_1$ a tensão é ainda mais amortecida durante a

falta, uma vez que este limitador impõe uma resistência maior do que para o caso em que o sistema opera com o LCFS com resistor *shunt* em série com a linha. Entretanto, ao utilizar o $LCFS_1$, toda a corrente passa através do material supercondutor, o qual pode dissipar uma quantidade elevada de potência durante condições faltosas que pode danificar permanentemente o material.

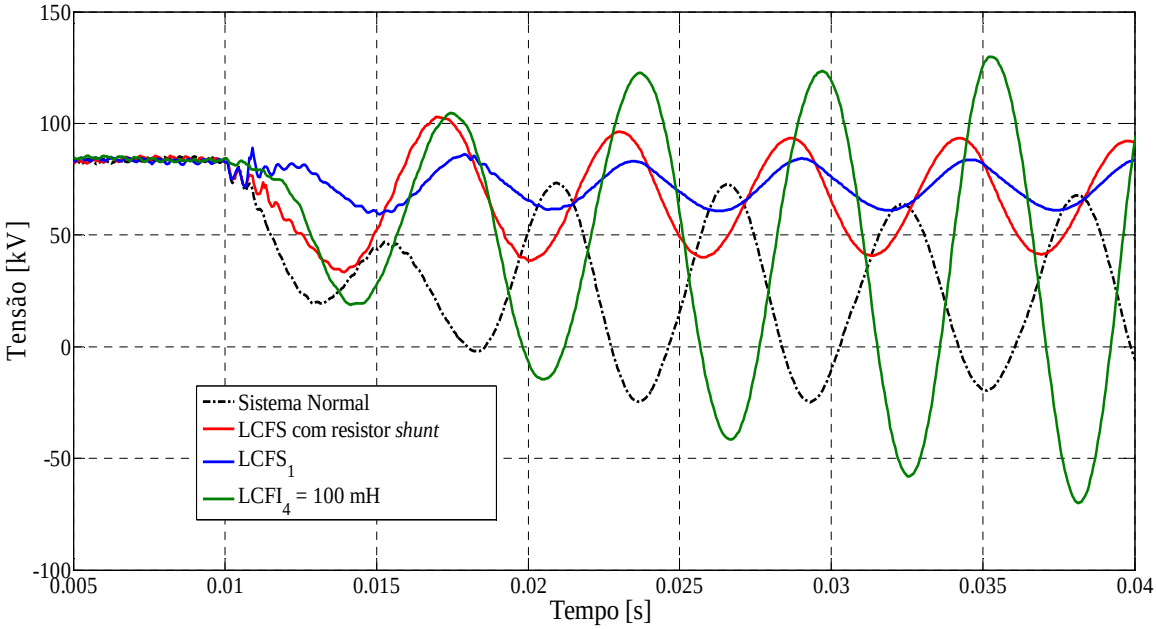

Figura 5.15 - Tensão no polo positivo para falta polo-terra com resistência de falta igual a 0,01 Ω, aplicada a 10 km da estação retificadora. Comparação entre os LCF.

De modo geral, a utilização de LCF supercondutores, além de limitar de maneira rápida a corrente durante a falta para patamares mais gerenciáveis, também é benéfica no comportamento da tensão, e ao adicionar o elemento *shunt* em paralelo com o material supercondutor, a potência é dissipada em maior parte pelo resistor *shunt*, protegendo o material supercondutor.

5.6 Considerações finais sobre o capítulo

Este capítulo apresentou a metodologia desenvolvida no trabalho para determinar a resistência efetiva imposta pelos LCFS durante a ocorrência de faltas na linha em corrente contínua. Tal metodologia apresentou-se como uma ferramenta simples e eficaz, uma vez que sua utilização permite limitar a máxima corrente de falta a um patamar previamente selecionado. Adicionalmente, foi ilustrado o impacto dos LCFS sobre a resposta do sistema diante faltas na linha CC. Os resultados atestam os benefícios da utilização de LCFS em

minimizar as correntes de curto-circuito, fator que pode ser crucial para a operação segura do sistema.

Foi ilustrado que adicionar um resistor *shunt* em paralelo com o material supercondutor permite um controle mais preciso do nível da corrente de falta, além de proteger o material supercondutor, o qual não ficará exposto a valores elevados de corrente de falta, os quais podem danificar o material.

Destaca-se ainda que, com a utilização de LCFS, os quais reduzem substancialmente os níveis de curto-circuito, é possível que o sistema opere com equipamentos de menores capacidades de sobrecarga, os quais são, consequentemente, mais baratos. Desta forma, a escolha de qual LCFS utilizar não deve ser baseada somente em resultados técnicos, mas deve ser realizada uma análise técnico-econômica com intuito de escolher qual a melhor solução do ponto de vista global.

Foi ilustrado também neste capítulo o impacto de LCFI no comportamento de sistemas VSC-HVDC. Tais limitadores, diferentemente dos LCFS, não limitam a corrente de falta um patamar mais gerenciável, entretanto, ao atrasarem o incremento da corrente de falta, este limitadores permitem que o sistema de proteção tenha mais tempo para eliminar uma condição faltosa, o que aumenta a segurança do sistema. Deve ser destacado também que estes limitadores são mais baratos que os LCFS, fato que pode ser crucial para a escolha deste dispositivo.

6. Modelagem e Ajuste das Funções de Proteção

A maioria dos trabalhos técnicos relacionados à proteção de linhas HVDC se referem à proteção de sistemas CSC-HVDC [27], [41] e [42]. Devido às significativas diferenças entre sistemas VSC e CSC, os ajustes das proteções das linhas CC aplicados a sistemas CSC-HVDC podem não ser adequados para sistemas VSC-HVDC. Neste contexto, será apresentada neste capítulo a modelagem e ajustes das funções de proteção selecionadas, tal como a proposição de um novo esquema de proteção, baseado na condutância aparente mensurada no início da linha. As funções de proteção analisadas são:

- Função de proteção direcional de corrente;
- Função de proteção diferencial;
- Função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão;
- Função de proteção de ondas viajantes; e
- Função de proteção de condutância.

6.1 Modelagem da função de proteção direcional de corrente

Este método de proteção também pode ser analisado por uma ótica alternativa ao princípio da superposição, que foi apresentado no Capítulo 2. Desprezando o efeito capacitivo da linha, todo aumento de corrente de saída da estação retificadora (I_1) é equivalente à diminuição da corrente de saída da estação inversora (I_2) - considerando a convenção que o sinal da corrente é positivo para correntes que entram na linha. Ou seja, se a estação retificadora aumentar o envio de corrente para a estação inversora, esta necessariamente deve receber este incremento de corrente. Caso essa afirmação não seja verdadeira, é porque há um caminho alternativo para a corrente no meio da linha, o que caracteriza uma condição de falta.

Desta forma, os sinais da variação da corrente durante faltas nos dois extremos da linha podem ser utilizados para identificar faltas internas ou externas às linhas de corrente contínua de sistemas VSC-HVDC. Entretanto, é necessário extrair a informação do componente da corrente de falta durante o defeito. Isto pode ser feito tendo em vista que a

corrente total é igual à soma da corrente em condições normais (condição pré-falta) e do componente de corrente de falta. A Equação 6.1 ilustra como é realizada a extração do componente da corrente de falta.

$$\Delta i(t) = i(t) - i(t_0) \tag{6.1}$$

em que $i(t)$ é a corrente no tempo, $i(t_0)$ é a corrente durante condição de operação normal (condição pré-falta) e $\Delta i(t)$ é o componente da corrente de falta. Desta forma, a proteção atua se os dois critérios da Equação 6.2 forem satisfeitos.

$$\begin{cases} \Delta i_1(t) > Ajuste\ 1 \\ \Delta i_2(t) > Ajuste\ 2 \end{cases} \tag{6.2}$$

sendo Δi_1 e Δi_2 os componentes da corrente de falta do lado 1 (estação retificadora) e do lado 2 (estação inversora) respectivamente. Teoricamente, os ajustes poderiam ser iguais a zero, entretanto, para aumentar a confiabilidade do método, eles devem ser adotados como valores que permitirão que o sistema de proteção não atue de maneira incorreta para nenhum evento externo.

O trabalho de [17], que originalmente propôs este método, obtém os valores dos componentes da corrente de falta Δi_1 e Δi_2 por meio de uma formulação baseada na variação da carga elétrica pela linha de transmissão durante a falta. Entretanto, neste trabalho será proposta uma abordagem alternativa, a qual é mais simples e não deteriora a qualidade dos resultados. Esta nova abordagem é explicada em seguida.

A Figura 6.1 apresenta o fluxograma esquemático da metodologia proposta. Inicialmente são inseridos como dados de entrada os valores dos parâmetros *Ajuste 1* e *Ajuste 2* (os quais serão determinados na sequência). Os valores do componente de falta do lado 1 e do lado 2 (Δi_1 e Δi_2) são calculados como segue.

Considera-se inicialmente que o sistema está em regime permanente. Neste caso, $i(t_0) = i(t)$, e, portanto $\Delta i(t) = 0$. O valor de $i(t_0)$ é adotado como o valor de $i(t)$ medido 120 ms atrás. Entretanto, a cada passo de integração do programa é realizada a diferença entre a corrente no tempo $i(t)$ com a corrente de regime permanente $i(t_0)$. Ou seja, o valor de $i(t)$ é comparado com o seu valor de 120 ms atrás.

É importante frisar que o valor de $i(t_0)$ é atualizado constantemente porque a corrente na linha pode variar devido a fatores que não caracterizam uma falta na linha, como por exemplo, uma sobrecarga ou faltas no lado em CA. O atraso de tempo de 120 ms foi

determinado de forma empírica, através de simulações de curto-circuito, em que foi verificado que este atraso é suficiente para que o esquema de proteção possa apresentar um comportamento satisfatório.

Desta forma, são calculados os valores de $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ e tais valores são comparados com os respectivos critérios de ajustes. Se os dois valores forem superiores aos seus ajustes é então emitido o sinal de desligamento da linha.

Na ocorrência de uma falta, o algoritmo processa amostras de falta $i(t)$ e compara com os valores da corrente pré-falta $i(t_0)$, os quais são valores de regime permanente. Como a detecção do algoritmo é instantânea (após a violação dos ajustes) é emitido o sinal de *trip* antes que o valor de $i(t_0)$ contenha as amostras do sinal sob falta.

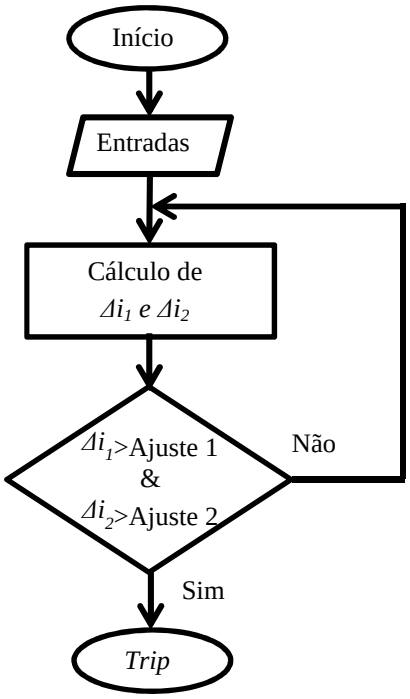

Figura 6.1 – Fluxograma da proteção direcional de corrente.

Com intuito de demonstrar graficamente a filosofia de atuação desta função de proteção, a Figura 6.2 apresenta a potencialidade do método, diante de uma falta polo-terra franca no meio da linha, do sistema elétrico da Figura 3.2. Nesta condição, a corrente de saída do VSC_2 muda de sentido e começa a alimentar a falta, tal como a corrente do VSC_1.

São destacados na Figura 6.2 os valores de $\Delta i_1(t)$, $\Delta i_2(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_1(t_0)$ e $i_2(t_0)$ para um instante de tempo em específico. Pode ser observado a partir de tal figura que a variação da corrente é positiva nos dois extremos da linha. Neste caso, apenas para fins ilustrativos, o valor da corrente em regime permanente $i(t_0)$ é adotado como o valor da

corrente no tempo $i(t)$ a 10 ms atrás. Nas simulações e análises das proteções, o valor do atraso de tempo utilizado para o calculo dos valores em regime permanente é de 120 ms.

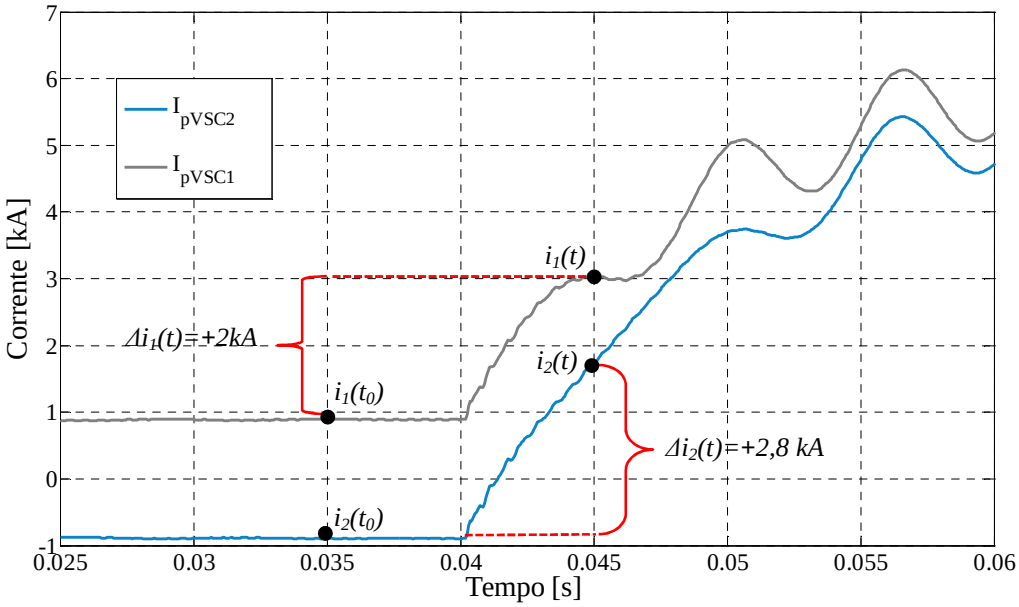

Figura 6.2 – Exemplificação da filosofia da função de proteção direcional de corrente para falta interna polo-terra.

De maneira análoga, na Figura 6.3 é apresentada a corrente no polo positivo de saída do VSC_1 (I_{pVSC1}) e a corrente de saída no polo positivo do VSC_2 (I_{pVSC2}), diante uma falta trifásica no lado CA do VSC_2.

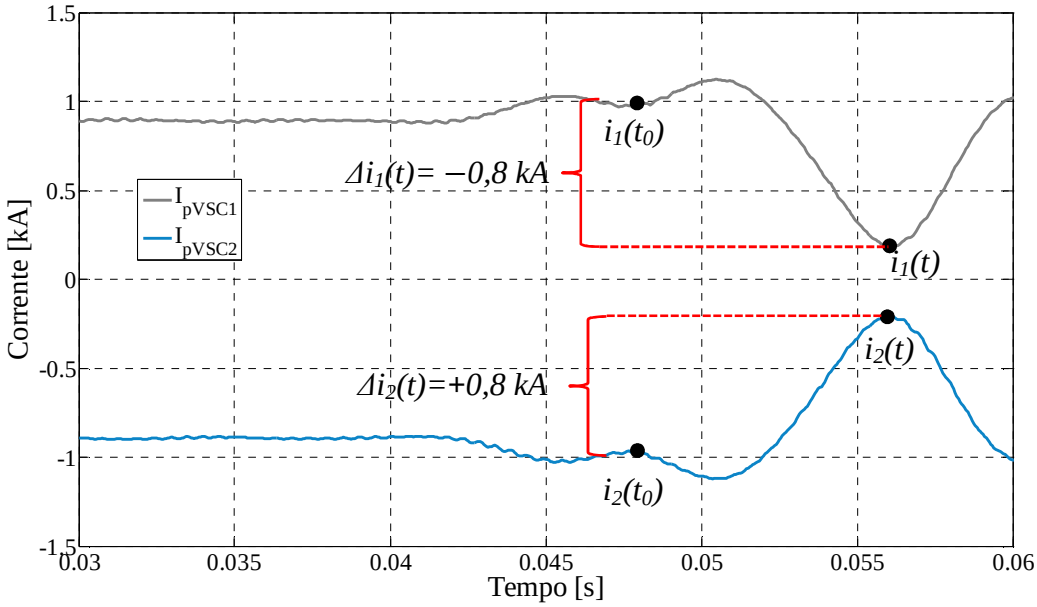

Figura 6.3 – Exemplificação da filosofia da função de proteção direcional de corrente para falta externa à jusante do VSC_2.

É evidenciado que as correntes neste caso apresentam o mesmo comportamento, uma vez que em tal condição, não há um caminho para a corrente no meio da linha. Observa-se ainda que o valor de $\Delta i_1(t)$ é negativo, para o instante de tempo especificado, e o valor de $\Delta i_2(t)$, para o mesmo instante, é positivo, o que de acordo com a lógica da proteção apresentada na Tabela 2.1, não caracteriza uma condição de falta interna à linha CC. Caso a falta fosse aplicada no lado em CA do VSC_1, o comportamento das grandezas intrínsecas ao sistema de proteção seria similar ao apresentado na Figura 6.3, sendo que $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ teriam sinais contrários.

Neste contexto, a Figura 6.4 apresenta esta função de proteção implementada no ambiente *Draft* do RSCAD. Os sinais de entrada da proteção são as correntes de saída do polo positivo do VSC_1 e VSC_2 (salienta-se que o sistema de proteção deve ser replicado também para o polo negativo). São realizadas comparações entre as correntes instantâneas (IBRKA e IBRKA2) com as correntes em condição normais (IBRKA_a e IBRKA2_a). Caso as duas diferenças forem maiores que os ajustes previamente selecionados, o valor da variável *trip1* passa de nível lógico baixo (zero) para nível lógico alto (um). O elemento *flip-flop* na saída da proteção é necessário apenas para manter o nível lógico alto do sinal de *trip* após que a proteção acuse a falta pela primeira vez.

Com intuito de tornar os esquemas de proteção que utilizam canais de comunicação mais realistas, é necessário estimar o atraso relacionado ao tempo de propagação do sinal de um extremo da linha para o outro. Assumindo que o sinal é propagado em fios de cobres, a velocidade da propagação é igual a $2{,}25 \cdot 10^8$ m/s [25]. Neste contexto, para uma linha de transmissão de 100 km, o atraso introduzido pela propagação do sinal é igual a 0,44 ms, sem levar em consideração o tamanho do pacote de dados em bits e a taxa de bits da linha (bit/s).

No caso de comunicação sem fio (*wireless*), os sinais trafegam com velocidade próxima a da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s) [25], fazendo com que o atraso introduzido para o sinal viajar 100 km seja próximo a 0,34 ms. Desta forma, adotando um caráter conservador, o atraso de tempo relacionado ao canal de comunicação adotado neste trabalho é igual a 0,5 ms.

Este atraso do canal de comunicação é representado pelo bloco *delay* o qual é configurado para atrasar a diferença entre a corrente instantânea (IBRKA) e a corrente em regime permanente (IBRKA_a) em 0,5 ms. Destaca-se que este atraso é inserido apenas na parcela da função de proteção que se encontra no outro extremo da linha. Na parcela local, não é necessária a adição deste atraso de tempo.

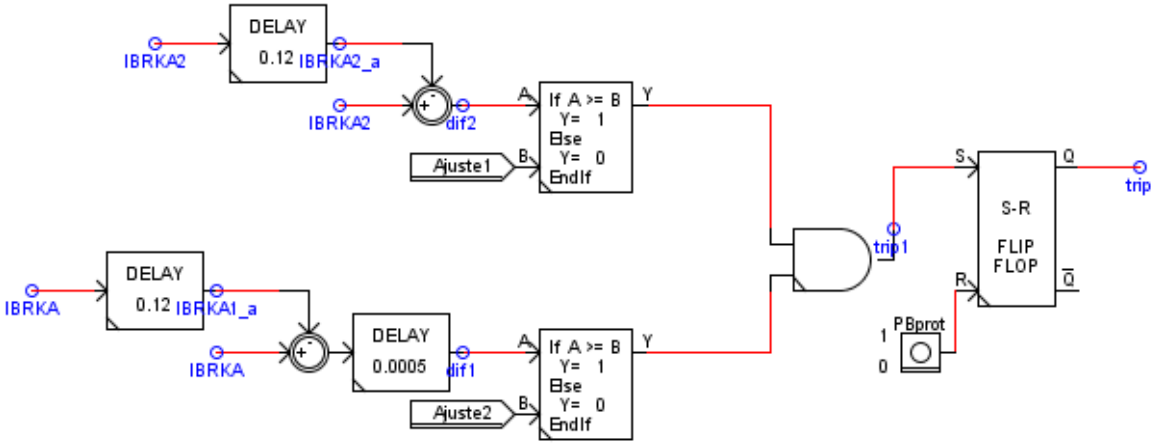

Figura 6.4 – Função de proteção direcional de corrente implementada no RSCAD.

6.2 Modelagem da função de proteção diferencial

Em condições normais de operação, as correntes na linha em CC mensuradas na saída da estação retificadora e na saída da estação inversora serão praticamente iguais, a menos de uma pequena diferença considerada devido ao efeito capacitivo da linha. Neste contexto, durante um defeito na linha CC pode ser observada uma diferença significativa destas correntes, indicando a ocorrência da falta.

A função de proteção diferencial é amplamente empregada em sistemas elétricos de potência, sendo aplicada à proteção de geradores, barramentos, transformadores e linhas de transmissão [43].

Uma peculiaridade para a aplicação da proteção diferencial para a proteção de linhas de transmissão é a necessidade de um canal de comunicação confiável e veloz, haja vista a distância física entre os terminais. No caso de linhas em CA é necessária a utilização de medidas fasoriais sincronizadas. Para linhas CC, tal requisito é menos agravante, uma vez que é necessária a obtenção apenas do módulo e sentido da corrente nos dois extremos. Cabe ainda ressaltar que para linhas de transmissão de comprimentos elevados, a utilização deste esquema pode não ser adequada devido ao atraso do canal de comunicação [43].

A Figura 6.5 ilustra a função de proteção diferencial implementada no RSCAD. Destacam-se nesta figura os blocos *delay*, necessários para representar o atraso inerente ao canal de comunicação.

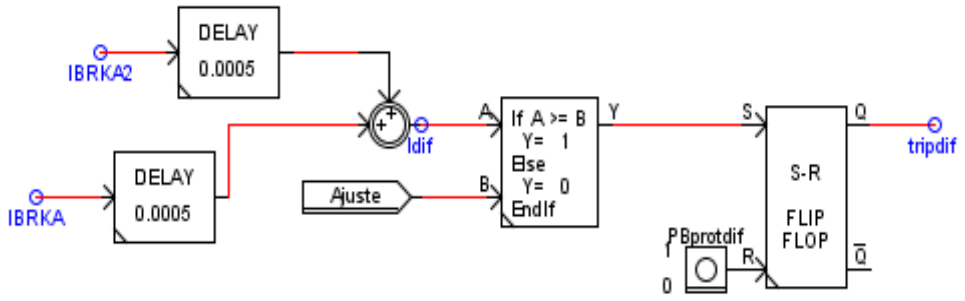

Figura 6.5 – Função de proteção diferencial implementada no RSCAD.

Pode ser observado na Figura 6.5 que a comparação entre os dois sinais é realizada através de uma soma e não uma diferença. Isto ocorre porque o sentido da corrente adotado como positivo é quando a corrente entra na linha de transmissão. Assim, em regime permanente, uma corrente apresenta valor positivo e a outra apresenta valor negativo e esta soma é próxima a zero.

Se o resultado da comparação entre as correntes nos dois extremos da linha (Idif) for maior do que o ajuste previamente selecionado, a função de proteção emite sinal de desligamento da linha.

6.3 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão

Tradicionalmente, a função de sobrecorrente é empregada em praticamente em todos os segmentos dos sistemas de energia elétrica. A utilização de esquemas de proteção baseados tão somente no incremento de corrente pode inviabilizar a coordenação do sistema de proteção como um todo, entretanto, com inclusão da característica direcional nestes esquemas, tal problema pode ser minimizado.

O trabalho de [18] ilustra que a proteção de sobrecorrente com restrição de tensão pode ser um esquema veloz e eficiente para a proteção de linhas de transmissão em CC baseadas em conversores fonte de tensão.

Neste contexto, a Figura 6.6 ilustra esta função de proteção implementada no RSCAD. Caso a corrente na linha (IBRKA2) for maior que seu respectivo ajuste e, ao mesmo tempo, a tensão no polo positivo (VCP) for menor do que seu ajuste, a função de proteção emite o sinal de desligamento da linha.

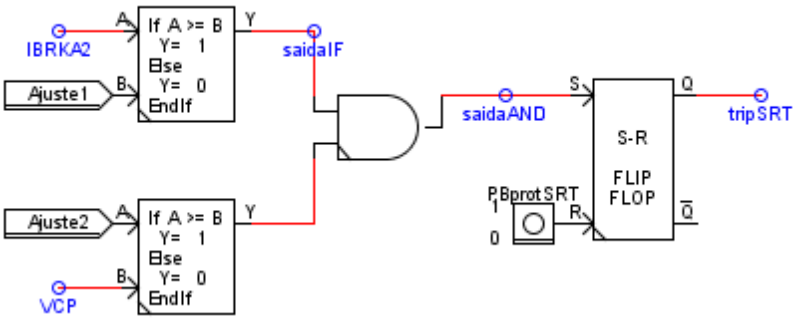

Figura 6.6 – Função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão implementada no RSCAD

.

6.4 Modelagem da função de proteção de ondas viajantes

O conceito de ondas viajantes em linhas de transmissão pode ser descrito por meio de equações diferenciais, as quais reportam o comportamento da tensão e da corrente na linha se deslocando com uma velocidade constante devido a um evento transitório [43]. Neste contexto, a teoria de ondas viajantes é utilizada para a detecção e localização de faltas em linhas de transmissão, e pode ser implementada de diferentes maneiras [16], [42].

Neste trabalho foi implementado o esquema de proteção baseado na teoria de ondas viajantes tal como proposto em [16]. A Figura 6.7 apresenta a função de proteção implementada no RSCAD, a qual sintetiza as equações apresentadas na Seção 2.4.1.

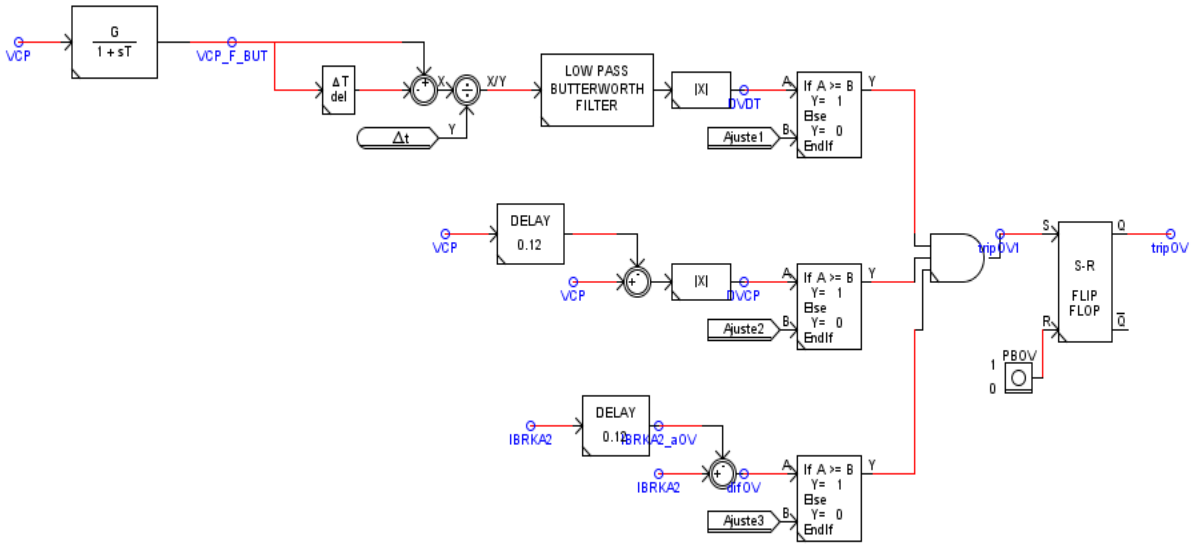

Figura 6.7 – Função de proteção de ondas viajantes implementada no RSCAD.

Neste esquema, é avaliado se a derivada da tensão (DVDT), a variação da tensão (DVCP) e a variação da corrente (difOV) são maiores que seus respectivos ajustes. Se as três

condições forem satisfeitas simultaneamente, a função de proteção de ondas viajantes emite sinal de desligamento da linha.

A variação da tensão (DVCP) e variação da corrente (difOV) podem ser calculadas através da diferença entre tensão e corrente instantânea com tensão e corrente em regime permanente, respectivamente. Estes cálculos foram implementados da mesma maneira como o apresentado na função de proteção direcional de corrente, em que a grandeza em regime permanente é considerada com a grandeza instantânea com um atraso de tempo igual a 120 ms.

6.5 Modelagem da função de proteção de condutância

De modo geral, faltas na linha CC de sistemas VSC-HVDC originam um afundamento na tensão na linha sob falta e um significativo incremento da corrente na linha [25]. Neste contexto, grande parte dos métodos de detecção de faltas na linha CC destes sistemas utilizam as informações da queda de tensão e aumento da corrente, seja por valores absolutos, como no caso da proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, seja por meio de variações, como no caso da proteção direcional de corrente e a proteção de ondas viajantes.

Com o objetivo de aumentar a velocidade da detecção de faltas nas linhas CC de sistemas VSC-HVDC, propõe-se neste trabalho uma nova função da proteção que utiliza as informações de tensão e corrente para determinar um novo índice a ser utilizado pelo esquema de proteção.

Como durante faltas na linha CC é observado um aumento da corrente, este índice deve ser tão maior quanto maior for tal incremento da corrente. De maneira complementar, como é observado um afundamento da tensão durante faltas, este índice deve ser tão maior quanto maior for o afundamento da tensão manisfestado no polo sob falta.

Neste contexto, a Equação 6.3 ilustra a filosofia da função de proteção proposta neste trabalho, que mostra a divisão da corrente na linha em CC em p.u. pela tensão na linha em CC em p.u. (V_{cc}), de modo a maximizar o valor do índice para que o esquema detecte faltas na linha CC de maneira mais veloz do que se a função utilizasse as informações de corrente e tensão de maneira independente.

$$\frac{I_{cc}}{I_{nom}} \cdot \frac{V_{nom}}{V_{cc}} > \text{Ajuste} \tag{6.3}$$

em que I_{cc} é a corrente na linha CC, V_{cc} é a tensão na linha CC e I_{nom} e V_{nom} são a corrente e a tensão nominal do lado CC do sistema VSC-HVDC, respectivamente.

A Figura 6.8 mostra a função de proteção proposta implementada no RSCAD. De fato, esta proteção utiliza as mesmas grandezas que a proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, entretanto, como o parâmetro a ser comparado na filosofia desta função é a multiplicação da corrente pelo inverso da tensão, espera-se que esta proteção apresente um tempo de detecção mais veloz do que aquela.

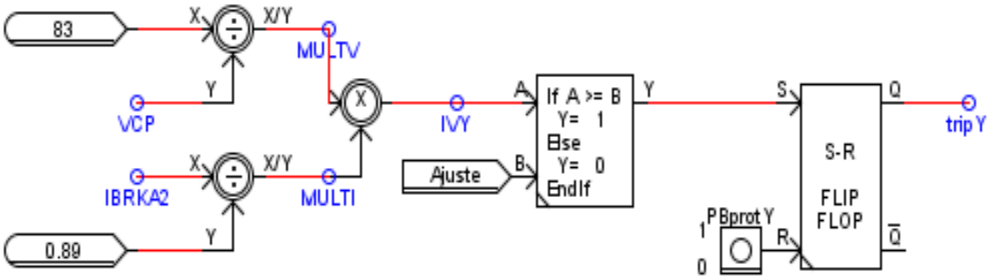

Figura 6.8 – Função de proteção de condutância implementada no RSCAD.

6.6 Metodologia de ajuste das funções de proteção

Tradicionalmente, todo sistema de proteção deve ser projetado de forma a atender propriedades básicas de confiabilidade, seletividade, velocidade e sensibilidade [43].

A seletividade consiste de o dispositivo de proteção mais próximo do defeito desconectar a parte defeituosa do sistema. Nesse intuito, o sistema de proteção deverá ser capaz de distinguir se a ocorrência é interna ou externa à sua zona de proteção.

Por sua vez, a velocidade pode ser definida como o tempo mínimo de operação para o dispositivo de proteção atuar, a fim de reduzir ou eliminar as perturbações do sistema. A confiabilidade é a propriedade do elemento de proteção de atender com segurança e exatidão as funções que lhe foram atribuídas. Por fim, a sensibilidade é a qualidade que o dispositivo deve possuir para reconhecer com precisão a faixa de valores indicados para a sua operação ou não operação [43], [44].

Neste sentido, para que o sistema de proteção tenha o comportamento desejado, é majoritário que ele seja configurado com ajustes apropriados. O dimensionamento correto dos ajustes bem como do sistema de proteção como um todo implica no seguinte conjunto de benefícios [44]:

- Redução de danos aos materiais e equipamentos, diretamente associados à redução de custos de manutenção e gastos com transportes e mão de obra;

- Aumento da capacidade de realizar manobra, reduções do número de desligamentos e do tempo de interrupção, que, sob o contexto geral do desempenho dos sistemas de energia elétrica, corresponde ao aumento da sua segurança operativa.
- Concomitante aumento de renda, por simultânea redução da perda de faturamento durante interrupções, maior qualidade de energia, e redução de multas; e
- Melhoria da imagem social da empresa.

Nesta seção, propõe-se uma metodologia de ajuste adequada para as funções de proteção em estudo, de modo que o desempenho do sistema de proteção atenda as suas propriedades básicas supracitadas. Em outras palavras, os ajustes escolhidos devem ser tais que permitam que as funções de proteção identifiquem as faltas dentro da zona protegida (que neste trabalho é a linha em CC), independente do tipo ou característica da falta, em tempo hábil, além de não permitir que as proteções atuem para faltas externas a zona protegida.

Até este capítulo, todas as simulações de falta na linha CC apresentadas neste trabalho foram realizadas com a impedância de falta (ou resistência de falta) igual a zero, por representar o caso de falta mais crítico ao sistema. Nestas situações, a corrente de curto-circuito é sempre maior do que para faltas que envolvem uma resistência de falta, e, consequentemente, tais faltas são detectadas mais facilmente pelos esquemas de proteção.

Entretanto, a resistência de falta não é conhecida a priori. Para o desenvolvimento de simulações de faltas que retratem fielmente o comportamento do sistema durante curtos-circuitos é necessário conhecer valores apropriados de tal parâmetro. Destaca-se que a resistência de falta é um dos principais fatores que pode contribuir para a não identificação e não localização de faltas em sistema de energia elétrica.

No caso de faltas entre fases, as resistências são geralmente pequenas, em geral menores do que 0,5 Ω. Em faltas que envolvem a conexão a terra, tais valores podem ser superiores a 10 Ω. Em alguns casos, podem se tornar muito elevadas, como casos relacionados a árvores em contato com cabos (da ordem de 50 Ω a 100 Ω), ou para condutores caídos em terrenos de elevada resistividade ou mesmo em queimadas (da ordem de 15 Ω a 40 Ω) [43].

Neste contexto, os ajustes adotados devem sensíveis de modo a permitir que o sistema de proteção identifique faltas de alta impedância, mas não tão sensíveis ou não seletivos a ponto de permitir que a proteção atue para faltas externas ou para outros eventos que não caracterizem faltas na linha em CC. Desta forma, a metodologia desenvolvida neste trabalho para determinar os ajustes das funções de proteção pode ser sintetizada no fluxograma da

Figura 6.9, o qual é explicado na sequência. Basicamente, a metodologia é segmentada em dois testes. O Teste 1 busca avaliar a sensibilidade do sistema de proteção, sendo que são aplicadas faltas de alta impedância ao longo da linha de transmissão e verificado se as funções de proteção identificam estas condições faltosas. Se estas faltas forem identificadas, consequentemente, as faltas mais severas as quais apresentam resistências de falta menores também serão identificadas. Neste contexto, este trabalho considera como faltas de alta impedância as faltas polo-terra com resistência de falta igual a 80 Ω e faltas polo-polo com resistência de falta igual a 20 Ω.

O Teste 2 avalia a seletividade do sistema de proteção, em que são simulados eventos externos à linha de transmissão, mas que impactam nas grandezas vistas pelas funções de proteção. Neste teste, são simulados curtos-circuitos no lado CA do sistema e aplicados degraus nas referências dos controles dos conversores. O intuito deste teste é avaliar se mesmo diante de eventos externos e severos, o sistema de proteção da linha em CC não acuse que a falta é interna a sua zona de proteção. Especificamente, este trabalho propõe as análises de curtos-circuitos trifásicos e monofásicos francos no lado em CA e degraus de 0,2 p.u. na referência de tensão e 0,3 p.u. nas referências de potência ativa e reativa dos controladores como eventos externos.

O ajuste escolhido deve ser o menor que satisfaça os dois testes, ou seja, que identifique todas as faltas simuladas no Teste 1 e que não atue para nenhuma condição simulada no Teste 2. Desta forma, estes ajustes selecionados são os que atuam de forma mais rápida para as faltas na linha em CC e que são seletivos para não atuar para eventos externos, o que aumenta a confiabilidade do sistema de proteção como um todo.

Para os casos em que nenhum ajuste satisfaça os dois testes simultaneamente, o ajuste adotado será o mais sensível que satisfaça o Teste 2. Ou seja, será adotado o ajuste mais sensível que não atue para nenhum dos eventos externos simulados. Nestes casos, a função de proteção não tem a capacidade de proteger 100 % da linha em CC para faltas de alta impedância, o que implica na necessidade da utilização de mais de uma função de proteção ou de um esquema complementar de proteção. Cabe salientar o Teste 2 fornece o mínimo ajuste que não atua para nenhum evento externo simulado. Neste sentido, obedecendo este teste, é garantida a seletividade dos ajustes empregados.

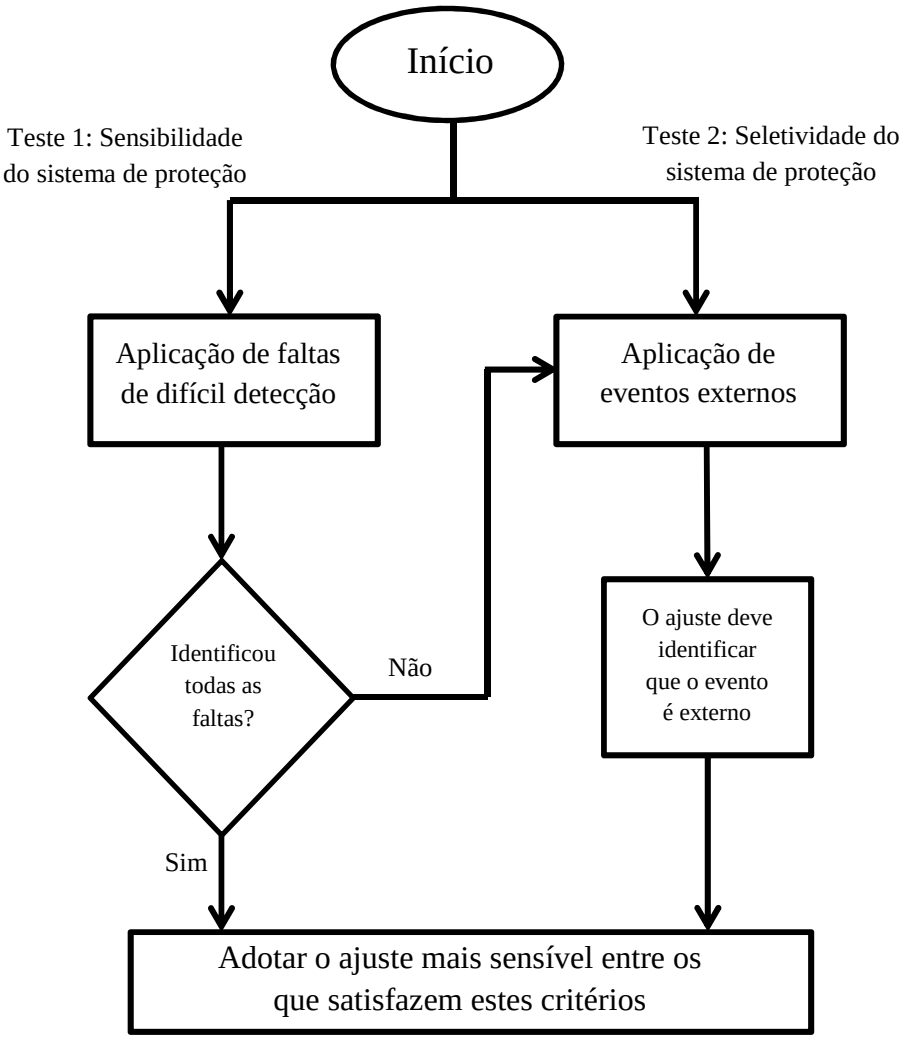

Figura 6.9 – Metodologia de ajuste das funções de proteção de linhas de sistemas VSC-HVDC.

A seguir é exemplificada detalhadamente a utilização da metodologia de ajuste proposta para a função de proteção direcional de corrente.

Para ajustar a função de proteção do VSC_1, é aplicada uma falta de alta impedância no outro extremo da linha, representado pela falta em F3 na Figura 6.10. De modo análogo, para ajustar a parcela da função de proteção do VSC_2 é aplicada uma falta de alta impedância também no extremo oposto, representado pela falta em F1.

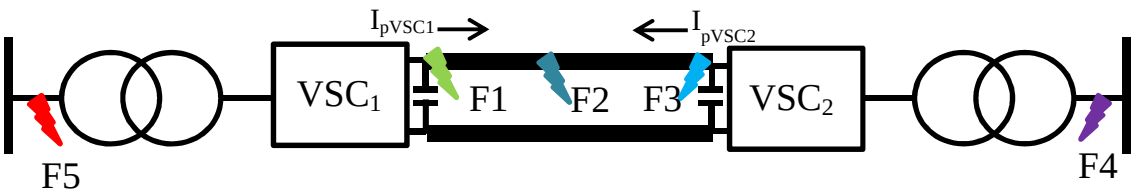

Figura 6.10 – Localização das faltas para testes da metodologia de ajuste.

Em ambos os casos, são amostrados os valores de $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ para estas faltas, as quais são consideradas faltas de difícil detecção (Teste 1). Destaca-se que a impedância de falta utilizada neste caso foi igual a 80 Ω. Para valores superiores a 80 Ω, o incremento de corrente durante a falta é reduzido a um nível em que a corrente de saída das estações conversoras durante condições faltosas se aproxima da própria corrente de carga (pré-perturbação), por isso não foram utilizados valores maiores que 80 Ω para estabelecer os ajustes empregados.

As faltas F4 e F5 são faltas trifásicas e monofásicas francas, aplicadas no lado CA do sistema para testar se a proteção é seletiva o suficiente para distinguir faltas internas e externas (Teste 2). Como as faltas trifásicas francas são as mais severas ao sistema, se a função de proteção das linhas CC conseguir identificar que essas faltas são externas à sua respectiva zona de proteção, as demais faltas externas, que são menos severas, consequentemente não serão interpretadas de maneira errônea.

Neste contexto, a Figura 6.11 ilustra a resposta do sistema diante a situação de falta F3, com intuito de estabelecer o ajuste da parcela da proteção do lado do VSC_1. O gráfico superior da Figura 6.11 apresenta as correntes de saída no polo positivo do VSC_1 (I_{pVSC1}) e do VSC_2 (I_{pVSC2}). É notável que diante de tal falta, I_{pVSC1} apresenta baixo incremento, pois esta falta foi aplicada no extremo oposto da linha e com uma resistência de falta alta (80 Ω). De maneira complementar, esta falta impacta mais em I_{pVSC2}, uma vez que esta estação conversora está próxima ao local de ocorrência da falta.

O gráfico inferior da Figura 6.11 ilustra os valores de $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ calculados pelo algoritmo de proteção implementado. Como a falta é aplicada em 0,02 segundos, antes de tal instante de tempo, os valores de $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ são próximos de zero, e após a ocorrência da falta, que é interna à zona de proteção, ambas as grandezas apresentam um comportamento crescente.

É observado a partir da Figura 6.11 que o máximo valor atingido por $\Delta i_1(t)$ é igual a 0,22 kA. Ou seja, se o ajuste desta função fosse igual a 0,3 kA por exemplo, para esta falta, a proteção não conseguiria identificar tal situação. Neste contexto, adota-se que o valor do parâmetro *Ajuste 1* é igual a 0,2 kA. Como a falta aplicada (F3) é uma condição de fronteira, isto é, trata-se da falta mais distante possível do VSC_1 dentro da sua zona de proteção e com alta resistência de falta, espera-se que todas as demais faltas dentro da linha sejam detectadas corretamente pela parte do algoritmo de proteção instalado no VSC_1. Contudo, ainda é necessária a realização de uma análise similar para determinar o *Ajuste 2*, uma vez que o sistema em estudo não é simétrico.

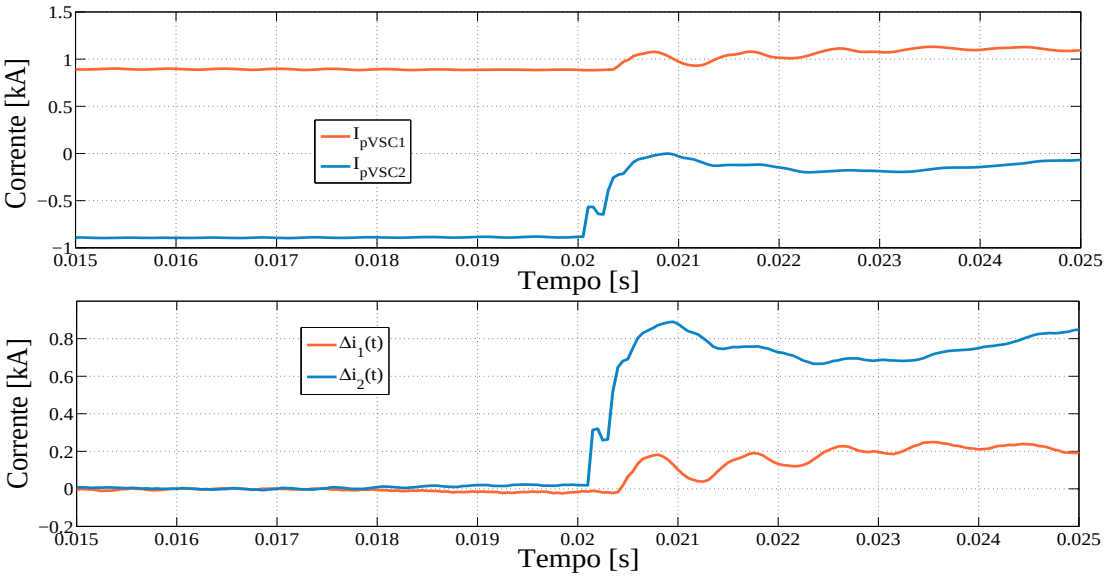

Figura 6.11 – Metodologia para ajuste da função de proteção do VSC_1. Falta aplicada em F3.

A Figura 6.12 ilustra o comportamento das grandezas $\Delta i_1(t), \Delta i_2(t)$, I_{pVSC1} e I_{pVSC2} para a condição de falta F1. Neste caso em específico, o valor de I_{pVSC2} apresenta um crescimento lento, devido à distância entre o VSC_2 e a falta, além da alta impedância de falta (80 Ω). Contudo, ainda assim o valor de $\Delta i_2(t)$ apresenta uma variação positiva, o que corrobora com a eficácia do algoritmo de proteção implementado.

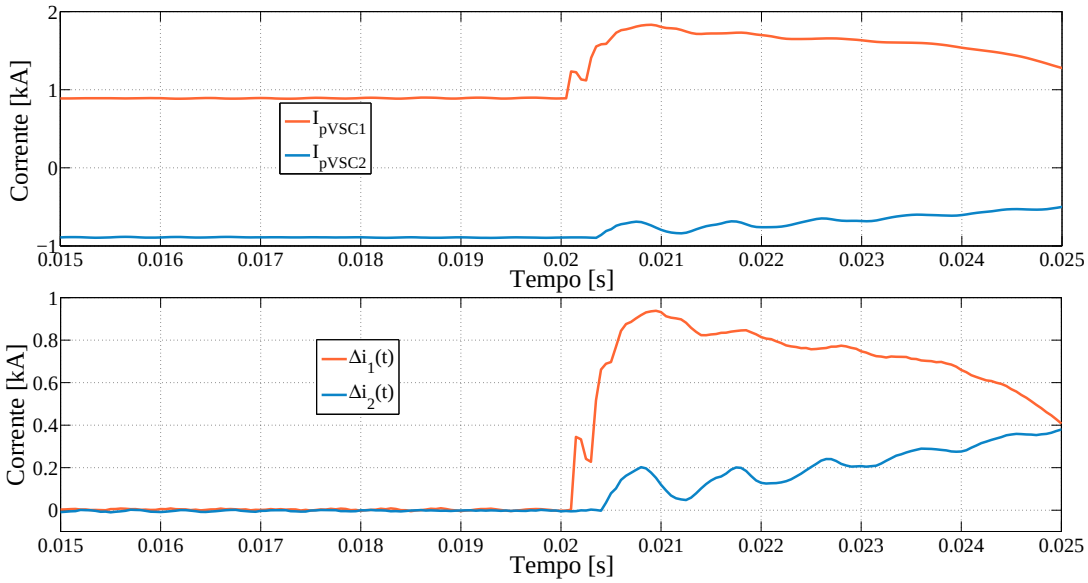

Figura 6.12 – Metodologia para ajuste da função de proteção do VSC_2. Falta aplicada em F1.

Pode ser observado que o valor atingido por $\Delta i_2(t)$ apresenta um crescimento sustentado, atingindo mais de 0,4 kA. Neste contexto, adota-se que o valor do parâmetro *Ajuste 2* é igual a 0,3 kA. Observa-se ainda que o valor de $\Delta i_1(t)$ supera o valor do *Ajuste 1* e o sistema de proteção como um todo identificaria esta falta que também representa uma

condição de fronteira. Desta forma, a Expressão 6.3 sintetiza os ajustes definidos para este caso.

$$\begin{aligned} \textit{Ajuste 1} &= 0{,}2 \text{ kA} \\ \textit{Ajuste 2} &= 0{,}3 \text{ kA} \end{aligned} \tag{6.3}$$

De maneira complementar, com o intuito de avaliar a eficácia dos ajustes propostos assim como do esquema de proteção em estudo, foram aplicadas as faltas trifásicas e monofásicas, representadas por F4 e F5, mostradas na Figura 6.10.

A Figura 6.13 apresenta o comportamento das correntes na linha (I_{pVSC1} e I_{pVSC2}), assim como o comportamento das variações das correntes (($\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$), para uma falta trifásica franca em F4.

Pode ser observado a partir da Figura 6.13 que os valores de $\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$ apresentam um comportamento simétrico em relação ao eixo das abcissas. Ou seja, quando o valor de $\Delta i_1(t)$ é positivo, o valor de $\Delta i_2(t)$ assume o mesmo valor em magnitude, mas com sinal negativo. Esta característica em particular, que é comum para todas as faltas externas e para as alterações nas referências dos controladores, permite que o sistema de proteção seja seletivo o suficiente para não atuar para eventos que não caracterizem faltas na linha CC.

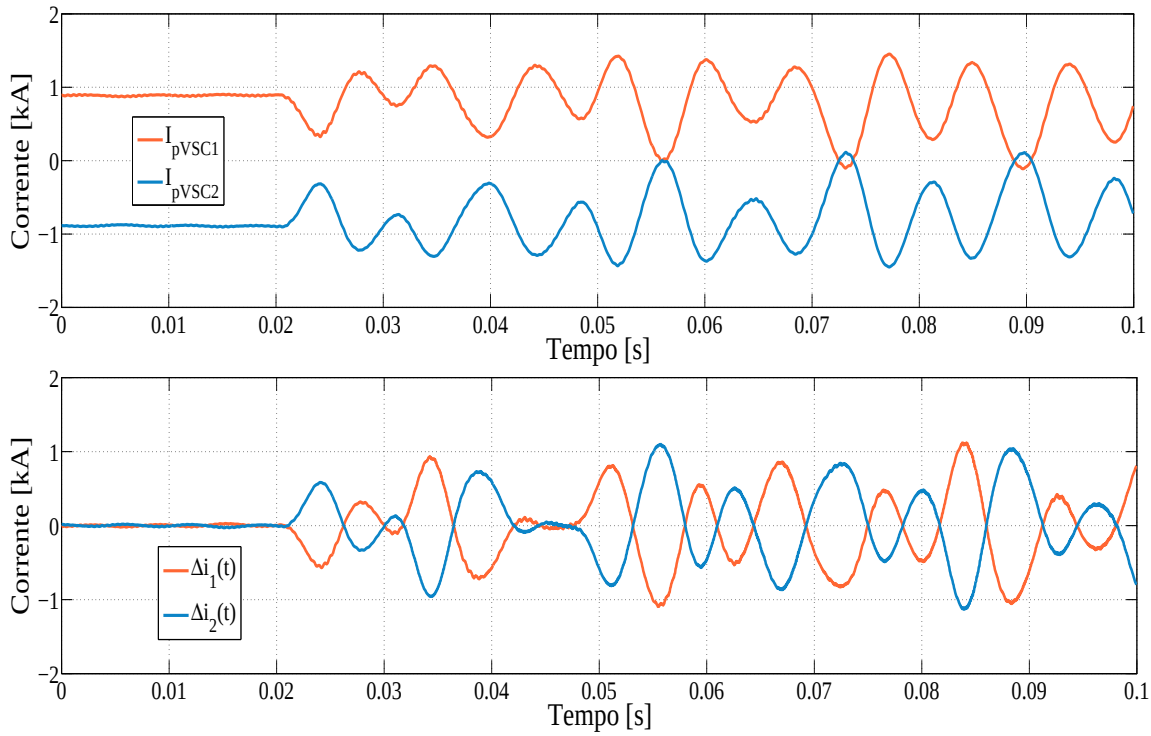

Figura 6.13 – Resposta do sistema diante da falta em F4.

A Figura 6.14 apresenta o comportamento das correntes na linha (I_{pVSC1} e I_{pVSC2}), assim como o das variações das correntes ($\Delta i_1(t)$ e $\Delta i_2(t)$), para uma falta trifásica franca em

F5. De maneira análoga, pode ser constatado a partir do gráfico inferior da Figura 6.14 que quando o valor de $\Delta i_1(t)$ é positivo, o valor de $\Delta i_2(t)$ assume o mesmo valor em magnitude, mas com sinal negativo.

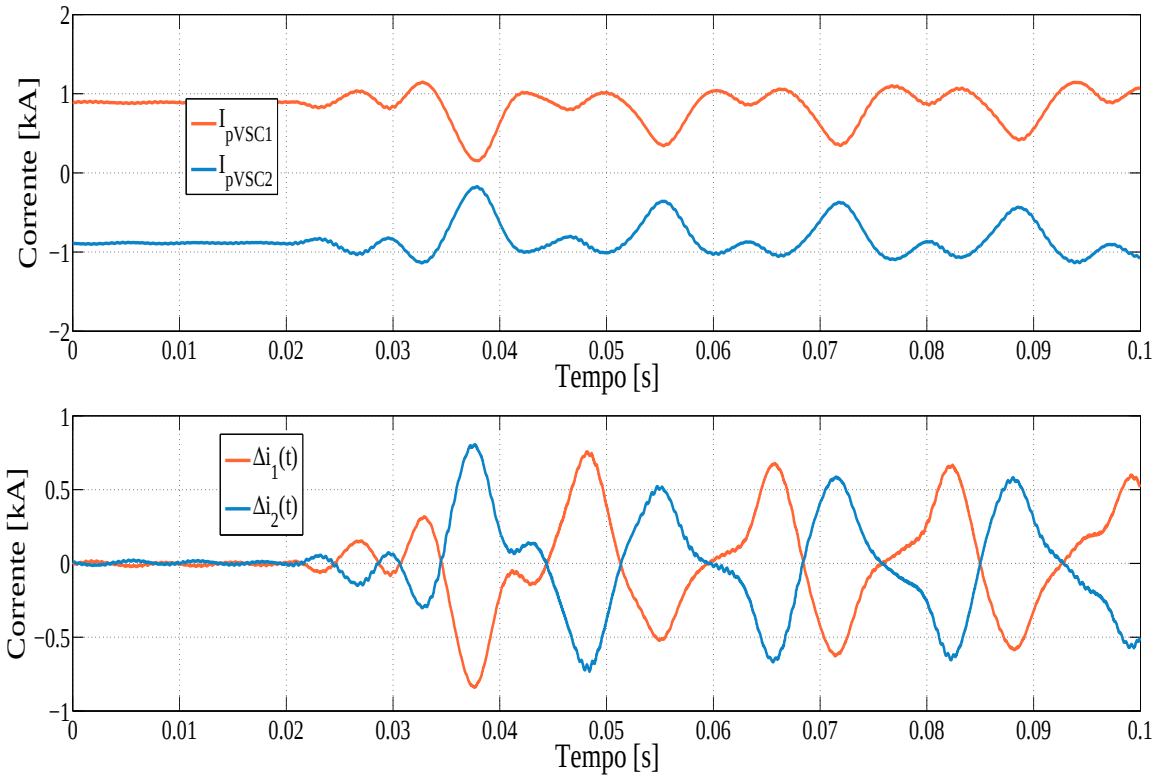

Figura 6.14 – Resposta do sistema diante da falta em F5.

A Figura 6.13 e Figura 6.14 atestam ainda que os sistemas VSC-HVDC não sofrem significativos impactos de faltas do lado CA, uma vez que mesmo para faltas trifásicas francas e próximas das estações conversoras, as correntes nas linhas não apresentam um crescimento acentuado. Ademais, para tais situações, os IGBT não precisam ser desligados, uma vez que o limite de sobrecarga das estações conversoras não é atingido (neste trabalho considerado como 2 p.u. ou 1800 A).

As mesmas análises foram replicadas para as demais funções de proteção, com intuito de estabelecer os ajustes de todas as funções. A Tabela 6.1 ilustra a síntese dos resultados da metodologia de ajuste. Pode ser observado a partir desta tabela, que as funções de proteção direcional de corrente e diferencial puderam ser ajustadas de forma a garantir a proteção de 100 % da linha, uma vez que os ajustes adotados são menores dos que os valores atingidos pelas faltas de alta impedância aplicadas ao longo da linha CC.

As demais proteções não garantem a proteção de 100 % da linha, quando se consideram faltas de alta impedância. Neste sentido, os ajustes foram estabelecidos de modo

que as proteções não atuassem para eventos externos. Nestes casos, as funções de proteção protegem apenas uma fração da linha para faltas de alta impedância.

Entretanto, cabe ressaltar, que para faltas polo-terra com impedâncias de falta inferiores a 40 Ω e polo-polo com impedâncias de falta inferiores a 20 Ω, que são um conjunto de resistências de falta mais realistas, todas as funções de proteção garantem a proteção de 100 % da linha em CC.

Na Tabela 6.1, as colunas referentes a F1, F2 e F3 representam os máximos valores apresentados pelas grandezas das funções de proteções para faltas de alta impedância. A coluna de F4 representa os máximos valores atingidos pelas grandezas para faltas externas do lado CA do VSC_2. O degrau aplicado em P_{ref} foi igual a ± 0,3 p.u. e o degrau aplicado em V_{ref} foi igual a ± 0,2 p.u., e nesta tabela estão apresentados os máximos valores atingidos pelas grandezas.

Como a função de proteção de ondas viajantes é baseada em três critérios, e só atua se os três forem violados simultaneamente, há uma gama acentuada de possíveis ajustes para esta função. Neste trabalho, foi adotado um conjunto de ajustes que permite que a proteção não atue para nenhum evento externo, entretanto, como será demonstrado no próximo capítulo, esta função não garante a proteção de 100 % da linha para faltas de alta impedância.

Tabela 6.1 – Síntese dos resultados para ajuste das funções de proteção.

Função de Proteçao	**Grandezas**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**Degrau em P_{ref}**	**Degrau em V_{ref}**	**Ajustes adotados**
Direcional de corrente	Δi_1 [kA]	0,45	0,66	0,7	0,75	-0,14	0,09	0,2
	Δi_2 [kA]	0,89	0,46	0,33	-0,75	0,14	-0,09	0,3
Diferencial	I_{dif} [kA]	1,05	0,98	0,98	0,14	0,01	0,01	0,3
Sobrecorrente com restrição de tensão	I [kA]	1,79	1,36	1,10	1,15	1,03	1,02	1,3
	V [kV]	69	75,5	79,6	70	86	77	74,7
Condutância	*G* [p.u.]	2,23	1,61	1,24	1,45	1,15	1,17	1,6
Ondas Viajantes	*dv/dt* [kV/ms]	60	15	9	75	29	22	12
	ΔV [kV]	6	8	3,4	0,75	5	5,6	7
	Δi_1 [kA]	0,58	0,4	0,21	0,15	0,2	0,11	0,4

Para a Função de Proteção de Condutância, por exemplo, a aplicação de uma falta externa e severa, F4, pode fazer com que a grandeza referente a este esquema de proteção

atinja 1,45 p.u.. Em contrapartida, uma falta interna de alta impedância, F3, faz com que a mesma grandeza atinja 1,24 p.u., ou seja, um valor menor do que para a falta externa F4. Neste sentido, o ajuste adotado é igual a 1,6 p.u., de modo que a proteção não atue para nenhum evento externo simulado. A escolha deste ajuste, consequentemente, faz com que a proteção não atue para a falta interna F3, por exemplo. A mesma conclusão pode ser estendida para as funções de ondas viajantes e de sobrecorrente, uma vez que os ajustes adotados não sensíveis o suficiente para que estas funções identifiquem qualquer falta de alta impedância na linha em CC. Contudo, a escolha destes ajustes faz com que as funções de proteção sejam seletivas de modo a não atuarem para nenhum evento externo.

6.8 Considerações finais sobre o capítulo

Foram apresentadas neste capítulo a modelagem e ajuste de cinco funções de proteção das linhas CC de sistemas VSC-HVDC. As funções de proteção foram modeladas no RSCAD, através dos blocos matemáticos e lógicos disponíveis no ambiente *Draft*. Destaca-se o modelo apresentado para a função de proteção de condutância, a qual é proposta por este trabalho.

Adicionalmente, foi apresentada uma metodologia para a determinação dos ajustes das funções de proteção, a qual é baseada em dois testes, o teste de sensibilidade das funções de proteção e o teste de seletividade das funções de proteção. O primeiro teste tem o intuito de verificar se a função de proteção com o seu respectivo ajuste consegue identificar faltas de difícil detecção na linha em CC, que são as faltas de alta impedância. O segundo teste, por sua vez, busca avaliar se a função de proteção com o seu respectivo ajuste é seletiva o suficiente para não atuar para eventos externos, de modo a garantir a confiabilidade do esquema de proteção como um todo.

Será apresentado no próximo capítulo que as funções baseadas apenas em medidas locais não têm a capacidade de proteger 100 % da linha em CC para faltas de alta impedância. Neste sentido, a utilização de esquemas complementares de proteção, tais como os esquemas de teleproteção são fundamentais para garantir a proteção da linha para estas condições faltosas.

7. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados das simulações que retratam o comportamento das funções de proteção diante de centenas de simulações de faltas na linha em CC. Foi analisada a influência da resistência de falta, do local onde é aplicada a falta e dos limitadores de corrente de falta no tempo de atuação e desempenho das cinco funções de proteção em estudo.

Uma vez que o sistema é equilibrado, as respostas do sistema para faltas que envolvem o polo negativo à terra podem ser consideradas como um espelho das faltas que envolvem o polo positivo à terra. Portanto, nas subseções seguintes, serão ilustradas apenas análises e simulações de faltas polo-polo e faltas que envolvem o polo positivo à terra.

7.1 Influência da resistência de falta no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas

Esta subseção pretende ilustrar o comportamento das funções de proteção para faltas ao longo da linha em CC, considerando distintos valores de resistência de falta. Como para faltas que envolvem um polo à terra há a possibilidade da ocorrência de faltas com valores mais elevados de resistência de falta, este é o tipo de falta envolvida nestas análises.

A Figura 7.1 ilustra o tempo de atuação da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra aplicadas a cada 10 km da linha de transmissão e com resistências de falta iguais a 0 Ω, 10 Ω, 40 Ω e 80 Ω. Pode ser observado a partir da Figura 7.1 que este esquema de proteção identificou todas as faltas analisadas, mesmo para altas resistências de falta (80 Ω), uma vez que esta função de proteção satisfez o Teste 1, apresentado no Capítulo 6.

Como este esquema de proteção utiliza canais de comunicação, as faltas que resultaram nos maiores tempo de atuação da proteção foram às aplicadas nos extremos da linha (0 km e 100 km) e com alta resistência de falta, uma vez que os impactos nas grandezas elétricas de um lado da linha são menores para faltas no outro extremo. Ou seja, como este esquema utiliza informações dos dois extremos da linha, uma falta a 0 km do VSC_1 pode demorar a ser identificada por necessitar das medidas provenientes da parcela do esquema de proteção conectada próxima ao VSC_2, a qual se encontra a 100 km do VSC_1.

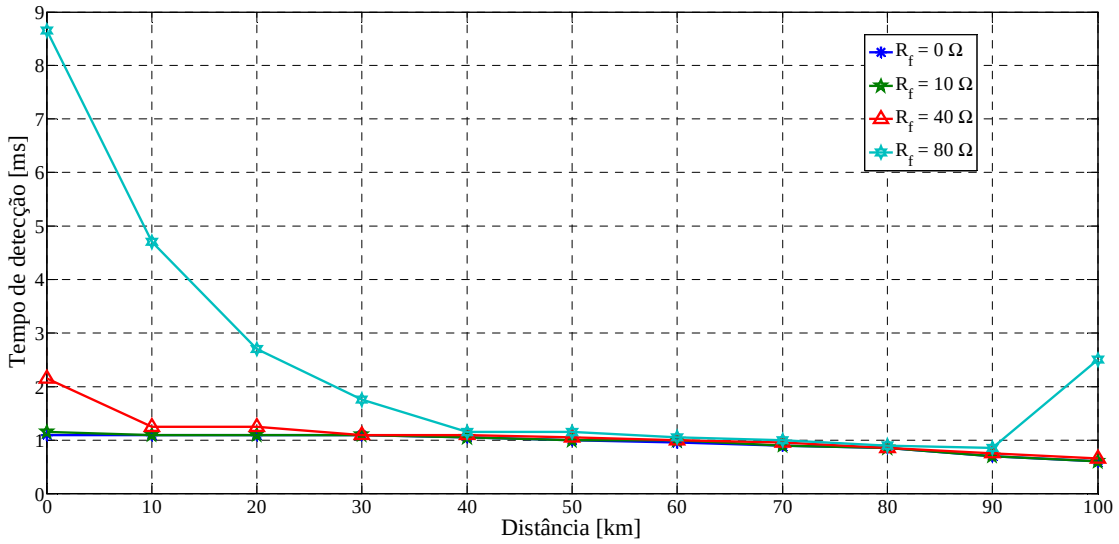

Figura 7.1 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.2 ilustra o tempo de atuação da função de proteção diferencial para o mesmo conjunto de teste previamente realizado. Pode ser observado a partir desta figura que a proteção diferencial não foi afetada de maneira significativa em relação ao aumento da resistência de falta, sendo que tal esquema identificou todas as faltas simuladas em menos de 1 ms.

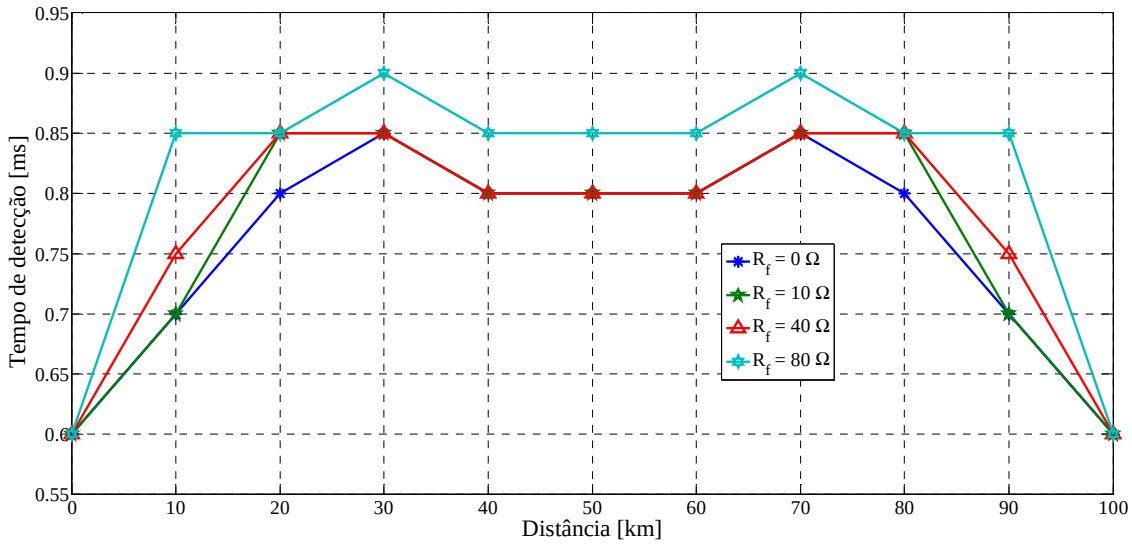

Figura 7.2 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.3 ilustra o tempo de atuação da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para o mesmo conjunto de teste previamente realizado. Pode ser observado que para faltas de alta impedância, esta função de proteção não é adequada para proteger

100 % da linha, uma vez que as grandezas elétricas deste esquema de proteção não superam seus respectivos ajustes. Para faltas com resistência de falta igual a 80 Ω, este esquema de proteção não consegue identificar a falta caso a mesma aconteça a mais de 40 km de onde tal esquema está localizado. Neste sentido, fica evidenciada a necessidade da utilização de mais esquemas de proteção complementares, de modo a garantir 100 % de proteção da linha em CC.

De maneira complementar, este esquema se mostrou eficiente para faltas de baixas impedâncias. Para as piores condições faltosas (resistência de falta igual a 0 Ω), este esquema apresenta 100 % de acerto, atuando em menos de 2 ms para qualquer falta simulada ao longo da linha. Destaca-se ainda que para faltas aplicadas próximas (menos de 20 km) de um inversor, este esquema detecta a falta em menos de 0,6 ms, o que é fundamental para o sucesso da eliminação da falta, haja visto os elevados valores atingidos pela corrente no polo sob falta nestes cenários.

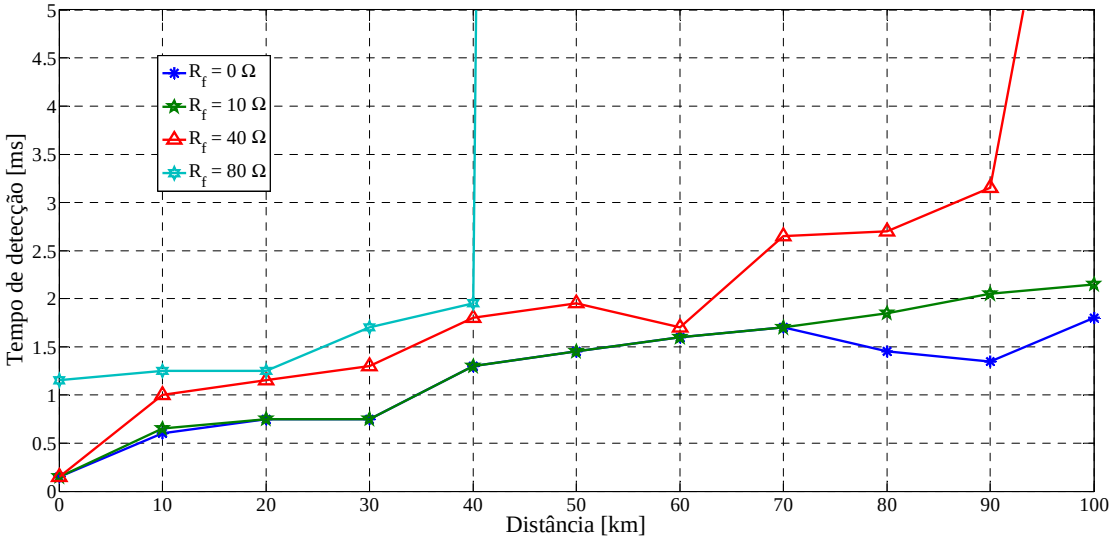

Figura 7.3 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.4 ilustra o tempo de atuação da função de proteção de ondas viajantes para este conjunto de testes. Pode ser observado o comportamento crescente do tempo de atuação da proteção em função do aumento da distância onde é aplicada a falta. Pode ser analisado ainda que para uma resistência de falta igual a 80 Ω este esquema de proteção protege somente os primeiros 50 km da linha, o que implica na necessidade da complementação do esquema de proteção com outras funções e dispositivos.

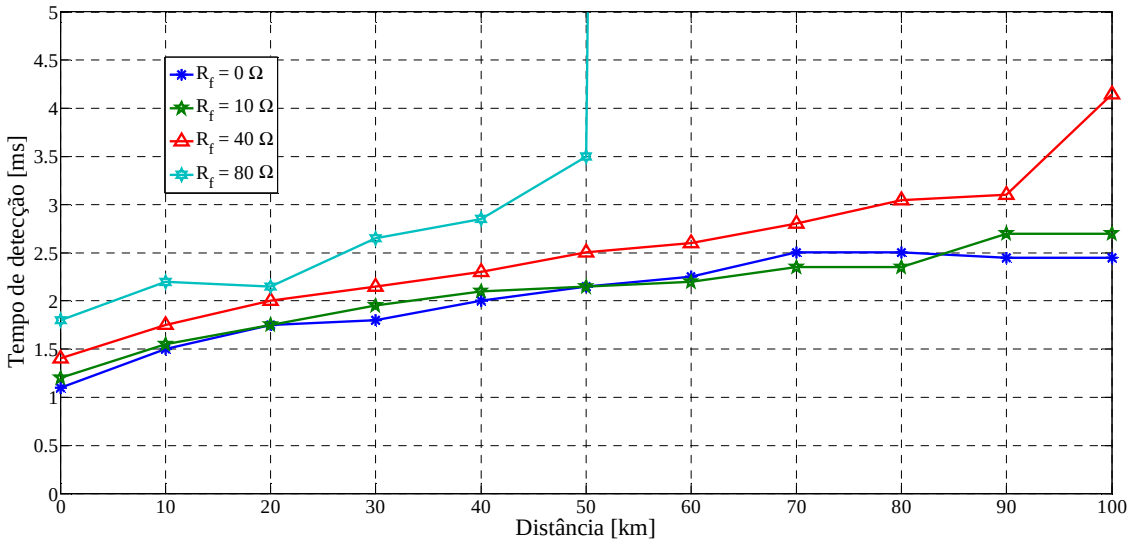

Figura 7.4 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.5 ilustra o tempo de atuação da função de proteção de condutância para o mesmo conjunto de teste previamente realizado. Pode ser observado o comportamento crescente do tempo de atuação da proteção em função do aumento da distância onde é aplicada a falta. Para as condições de faltas mais severas (faltas com baixa resistência de falta e aplicadas próxima ao inversor), este esquema foi o que apresentou o menor tempo de detecção da falta, o que pode implicar em maior segurança para os equipamentos conectados no sistema.

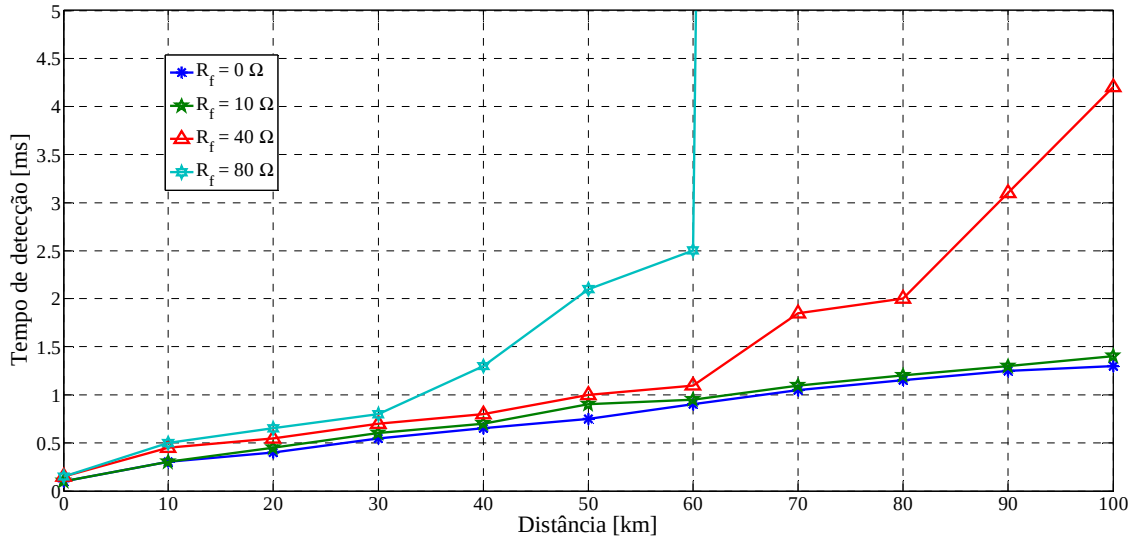

Figura 7.5 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra. Distância a partir do VSC_1.

Entretanto, este esquema se apresentou também ineficiente para faltas de alta impedância, não detectando curtos-circuitos a mais de 60 km com resistência de falta igual a 80 Ω.

7.2 Influência dos limitadores indutivos no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas

Esta subseção ilustra os impactos dos limitadores de corrente de falta indutivos no comportamento das funções de proteção analisadas. Salienta-se que os ajustes empregados não foram alterados em relação aos apresentados no Capítulo 6. Inicialmente serão apresentadas as simulações de faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω, aplicadas ao longo da linha de transmissão em CC.

A Figura 7.6 apresenta o tempo de detecção de faltas da função de proteção direcional de corrente considerando quatro LCFI, os quais são iguais a 8 mH, 20 mH, 50 mH e 100 mH. É evidenciado na Figura 7.6 que para este tipo de falta em específico, os LCFI não influenciam de maneira significativa o desempenho do esquema de proteção, não comprometendo em nenhum caso a identificação da falta.

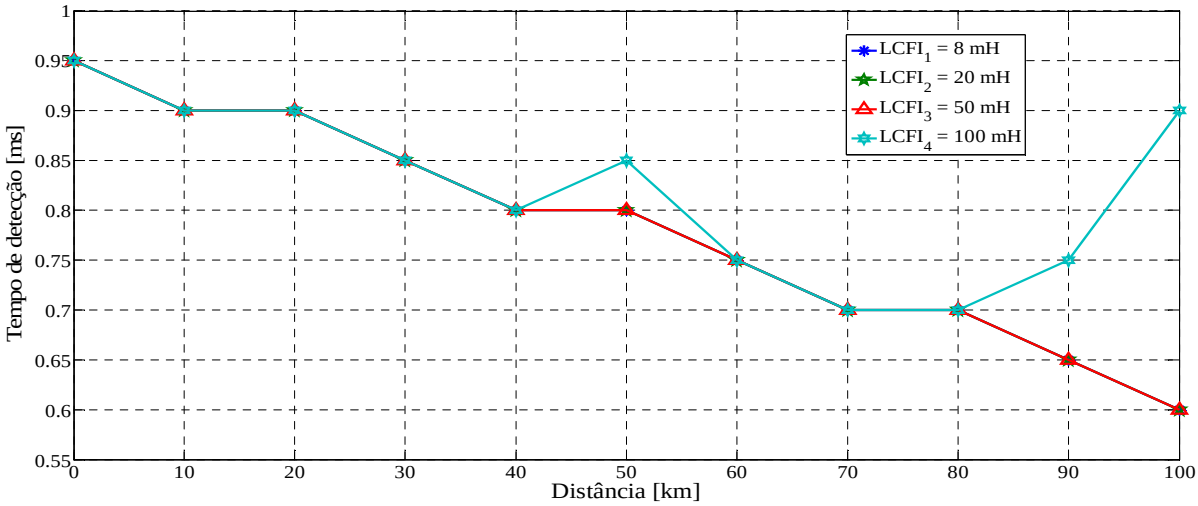

Figura 7.6 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.7 apresenta o tempo de detecção de faltas da função de proteção diferencial considerando os quatro LCFI já definidos e o mesmo tipo de falta. Pode ser observado que este esquema de proteção, para este tipo de falta, não é influenciado significativamente pelo aumento da indutância do LCFI.

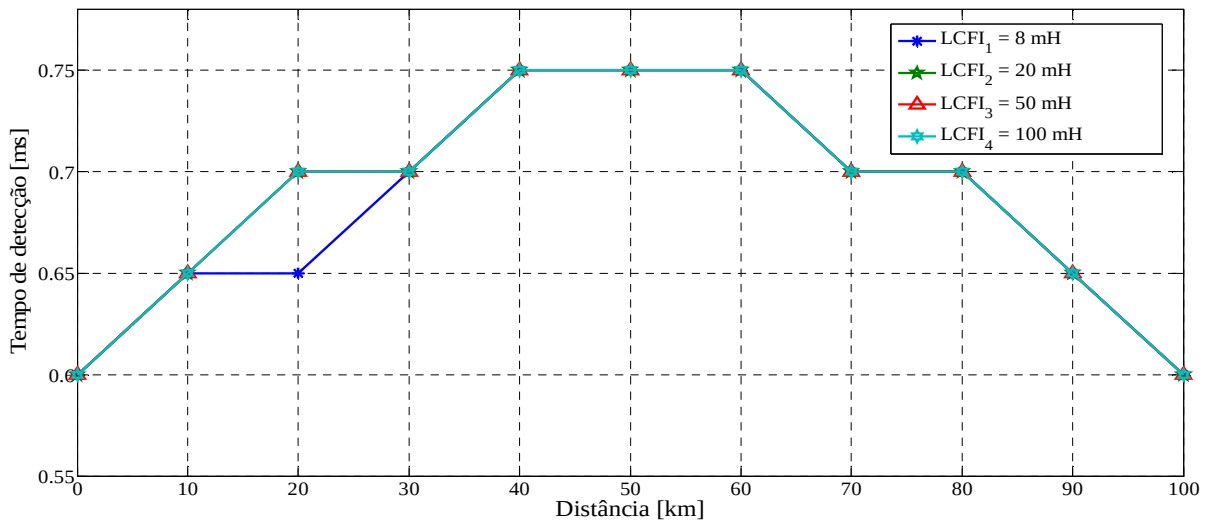

Figura 7.7 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.8 apresenta o tempo de detecção de faltas da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão considerando os quatro LCFI já definidos e o mesmo tipo de falta. Pode ser observado que este esquema de proteção apresenta um tempo de detecção maior à medida que se aumenta a indutância do LCFI, uma vez que o crescimento da corrente é atrasado em função do incremento desta indutância, entretanto, todas as faltas foram identificadas com menos de 2 ms, independente do LCFI utilizado.

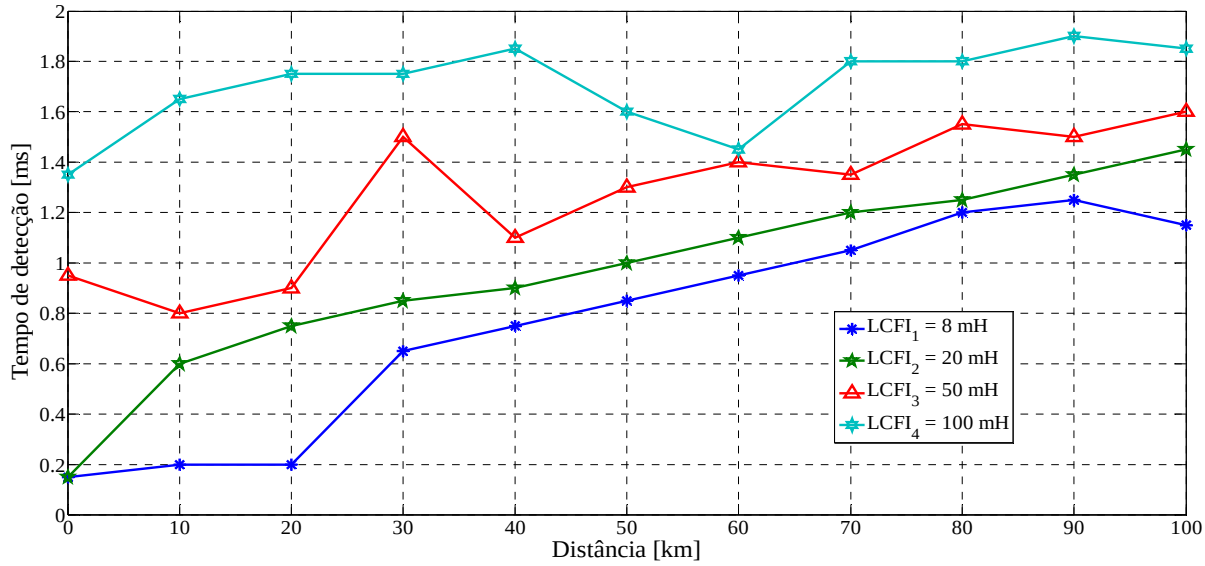

Figura 7.8 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.9 apresenta o tempo de detecção de faltas da função de proteção de ondas viajantes considerando os quatro LCFI já definidos e o mesmo tipo de falta. Tal como no esquema de sobrecorrente com restrição de tensão, o tempo de detecção de falta para este

esquema é maior quanto maior a indutância do LCFI, devido ao fato do limitador atrasar o aumento da corrente, e desta forma, os ajustes serão superados de maneira mais lenta para uma mesma falta, entretanto, não houve nenhum caso de não detecção.

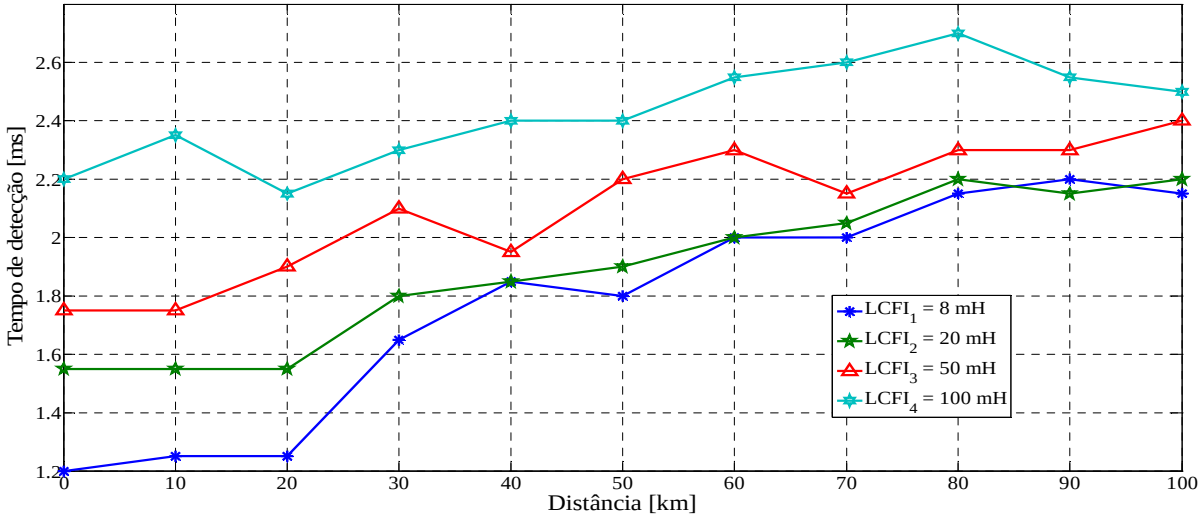

Figura 7.9 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.10 apresenta o tempo de detecção de faltas da função de proteção de condutância considerando os quatro LCFI já definidos e o mesmo tipo de falta. De forma análoga aos outros esquemas que apenas utilizam medidas locais, este esquema apresenta um tempo de detecção maior quanto maior a indutância do LCFI, entretanto, todas as faltas foram identificadas em menos de 1,5 ms, corroborando a eficácia do esquema de proteção e dos ajustes utilizados.

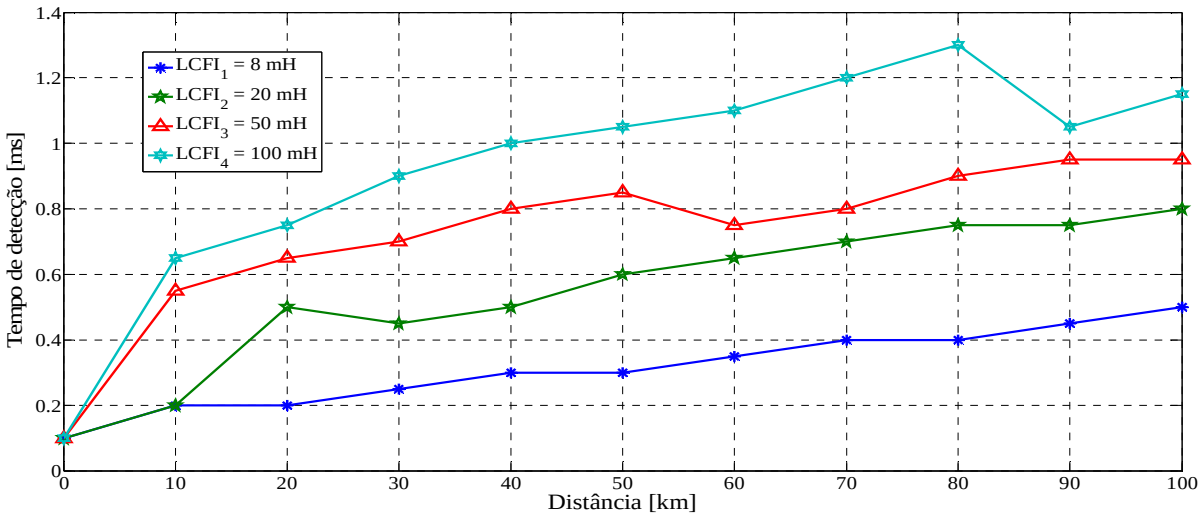

Figura 7.10 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.11 ilustra o tempo de detecção da falta para faltas que envolvem o polo positivo à terra, com resistência de falta igual a 40 Ω, considerando a função de proteção direcional de corrente. Pode ser observado a partir da Figura 7.11 que o tempo de detecção deste esquema de proteção não é significativamente afetado em função do aumento da indutância do LCFI. Nestes casos, todas as faltas simuladas foram detectadas em menos de 2,4 ms.

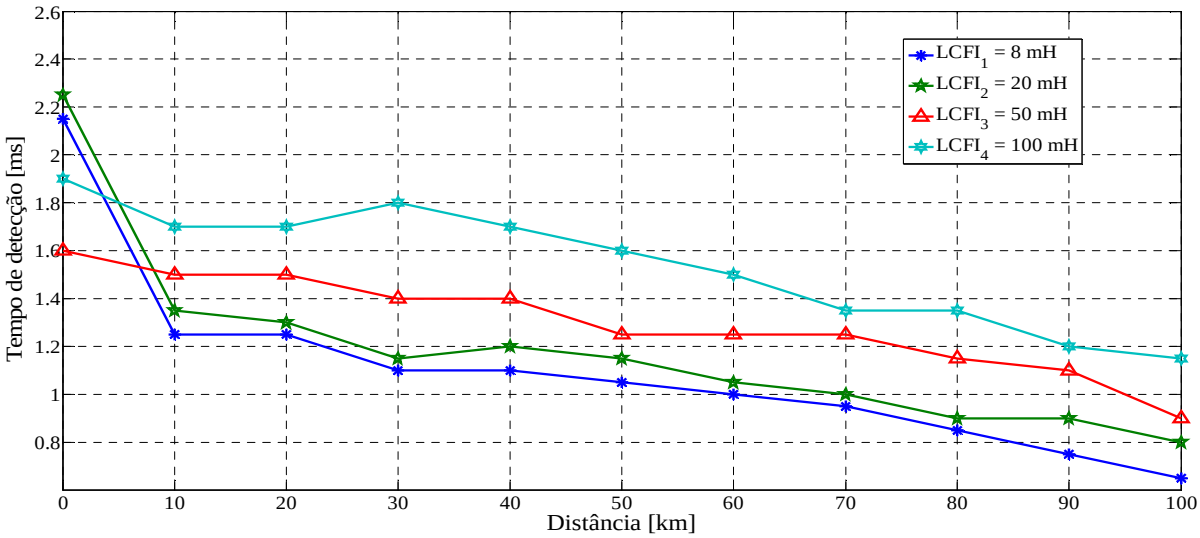

Figura 7.11 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1.

De maneira análoga, a Figura 7.12 ilustra o tempo de detecção da função de proteção diferencial para o mesmo conjunto de testes supracitado. Este esquema de proteção também não é afetado de maneira significativa em função dos diferentes LCFI utilizados.

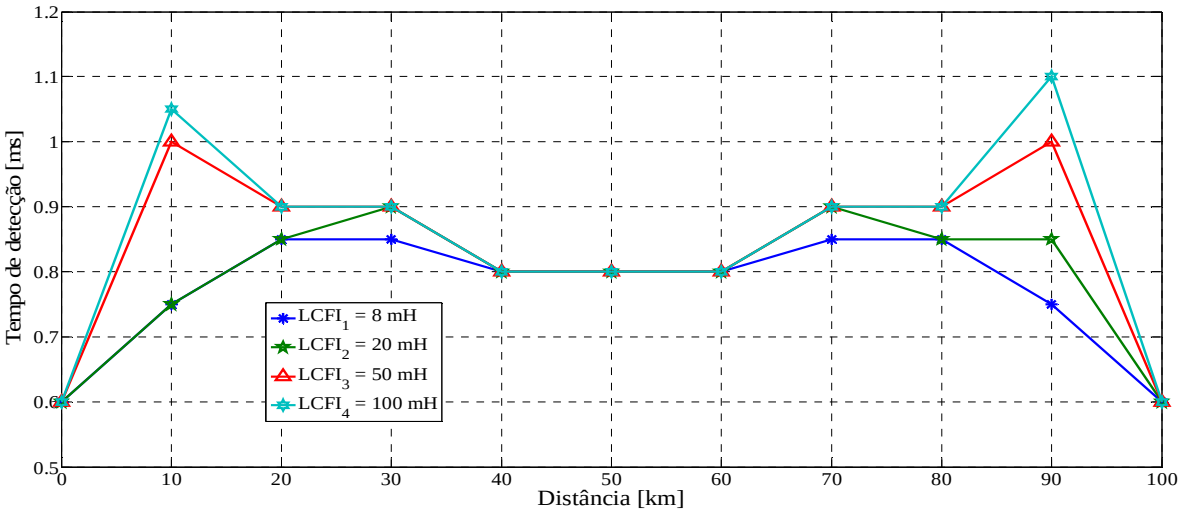

Figura 7.12 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.13, por sua vez, ilustra o tempo de detecção de falta para a função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, para este mesmo conjunto de testes. No caso em que o sistema opera com o $LCFI_1$, esta função garante a proteção de 100 % da linha em CC para este tipo de falta em específico. Entretanto, considerando o $LCFI_2$ e o $LCFI_3$, esta proteção não detecta as faltas nos últimos 20 km da linha em CC. Para o $LCFI_4$, o resultado é ainda mais agravante, uma vez que este esquema de proteção identifica faltas apenas nos 70 km iniciais da linha.

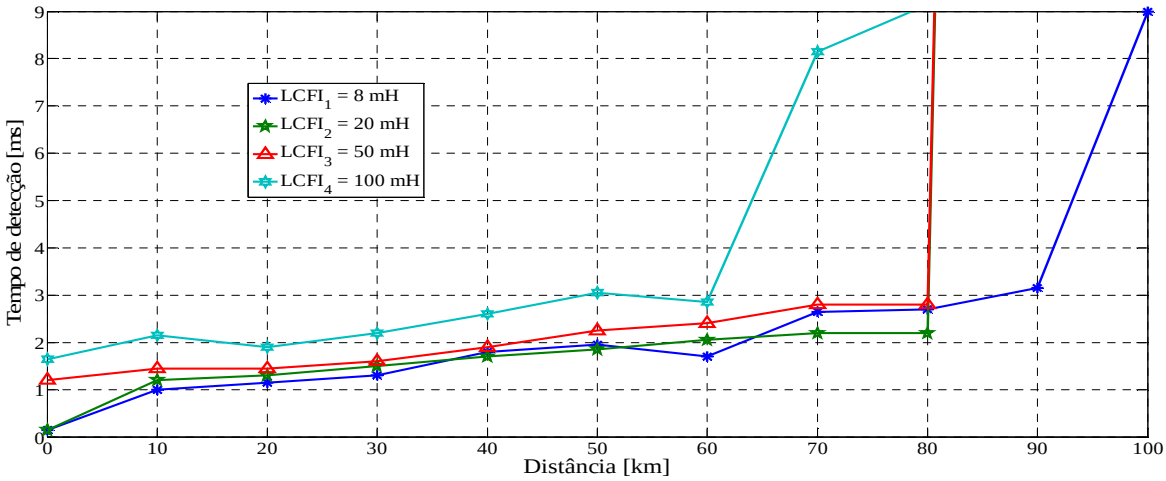

Figura 7.13 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC1.

A Figura 7.14, por sua vez, ilustra o tempo de detecção das faltas pela função de proteção de ondas viajantes. Para este esquema, o aumento da indutância dos LCFI não causou a falha na detecção de nenhuma falta simulada, devido ao fato de que tais limitadores impactam mais no comportamento da corrente do que no da tensão, grandeza principal na filosofia deste esquema de proteção.

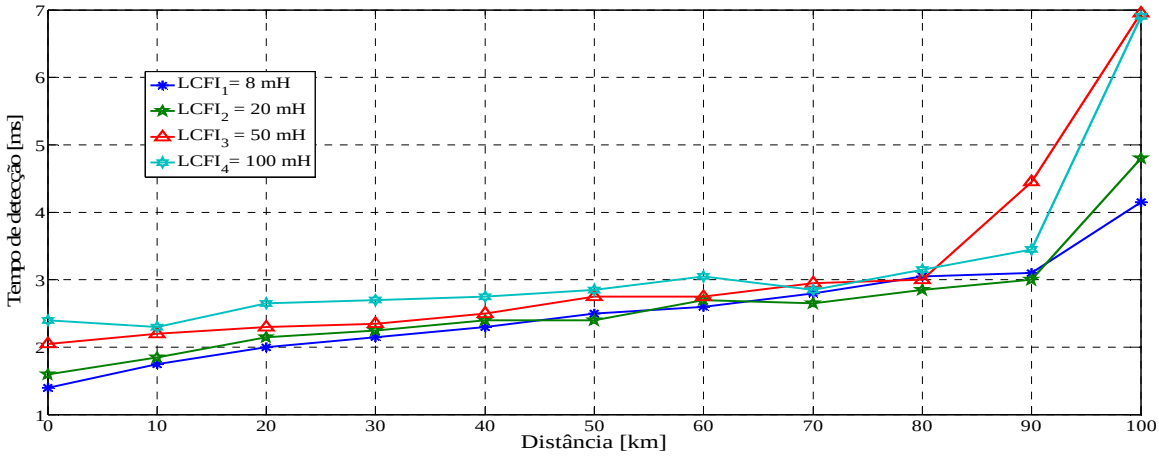

Figura 7.14 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.15 ilustra o tempo de detecção da função de proteção de condutância. O aumento da indutância do LCFI provoca um aumento no tempo médio de detecção da falta para este esquema de proteção, porém, todas as faltas foram detectadas em menos de 4,5 ms, o que atesta a eficácia desta função de proteção.

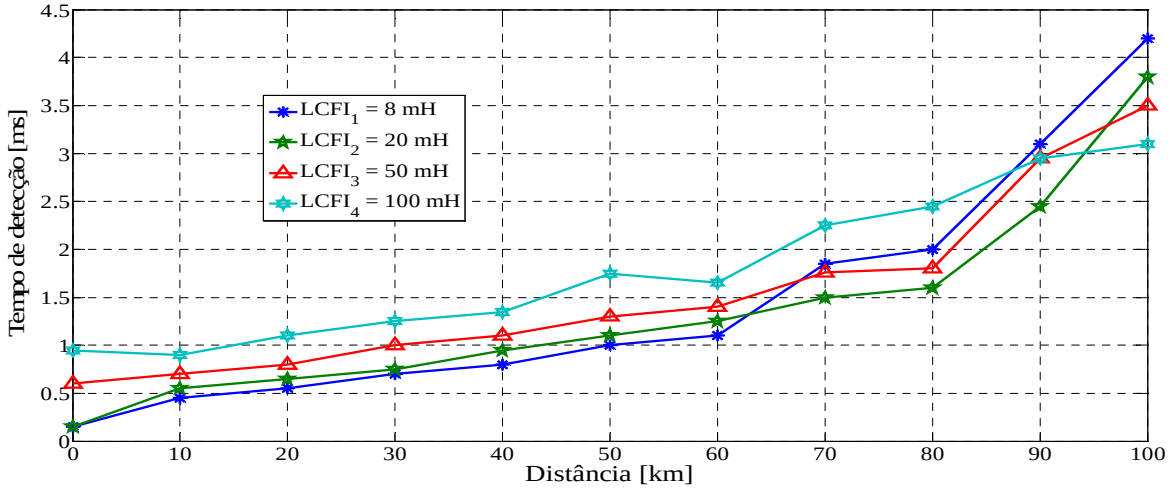

Figura 7.15 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1.

7.3 Influência dos limitadores de corrente de falta supercondutores no tempo de detecção de falta das funções de proteção avaliadas

Esta subseção ilustra o comportamento das funções de proteção analisadas quando o sistema VSC-HVDC opera com limitadores de corrente de falta supercondutores em série com a linha em CC. Será ilustrado graficamente o tempo de detecção de cada esquema para quatro distintos LCFS apresentados na Tabela 5.1, inicialmente sem a presença do resistor *shunt* em paralelo com os materiais supercondutores.

A Figura 7.16 ilustra o tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra com resistência de falta nula. Pode ser observado que para os três primeiros LCFS, a função de proteção identifica todas as faltas na linha em CC, entretanto, para o $LCFS_4$ o esquema de proteção deixa de identificar as faltas mais próximas da estação retificadora (primeiros 10 km). Isto ocorre neste caso, pois o $LCFS_4$ é o mais sensível dos quatro analisados, ou seja, a temperatura do supercondutor se eleva muito rapidamente, devido à elevada corrente, fazendo com que sua resistência também cresça rapidamente limitando a corrente de falta a um valor menor do que a de operação do sistema. Desta forma, a proteção não identifica a falta, uma vez que os ajustes desta função não são superados.

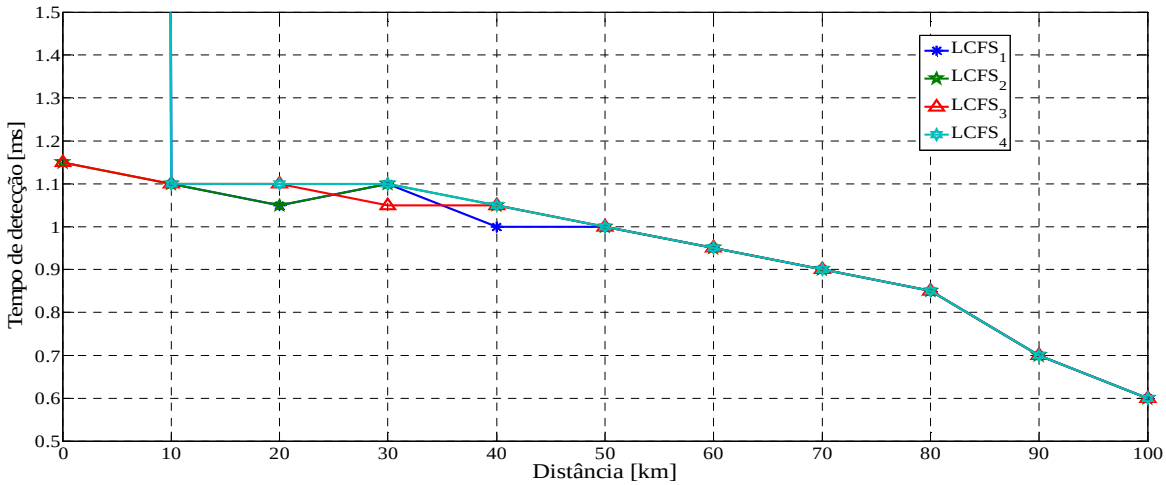

Figura 7.16 – Tempo de detecção da função de proteção direcional de corrente para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.17 ilustra o tempo de detecção da função de proteção diferencial, para faltas polo-terra com resistência de falta nula. Este esquema de proteção não foi afetado diante a presença dos LCFS uma vez que todas as faltas foram identificadas antes dos limitadores perderem o estado de supercondutividade e, de fato, limitar a corrente de falta.

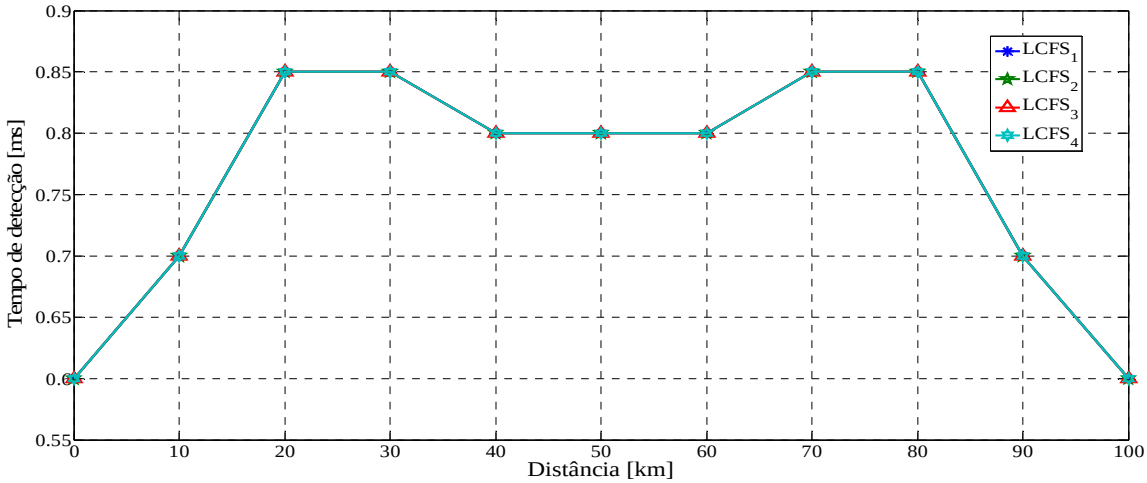

Figura 7.17 – Tempo de detecção da função de proteção diferencial para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1.

Entretanto, como a eliminação da condição faltosa não é instantânea, uma vez que depende diretamente do tempo de abertura do disjuntor utilizado, os LCFS podem minimizar significativamente a corrente de falta até a abertura total da linha. Esta característica pode ser fundamental para casos em que o disjuntor opere de maneira lenta ou que a corrente de falta atinja valores que possam danificar os dispositivos conectados no sistema de modo geral, tal como os diodos presentes nas estações conversoras.

A Figura 7.18 ilustra o tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, para faltas polo-terra com resistência de falta nula. Em todos os casos, a função de proteção identificou corretamente todas as faltas aplicadas, com tempo máximo de detecção igual a 2 ms.

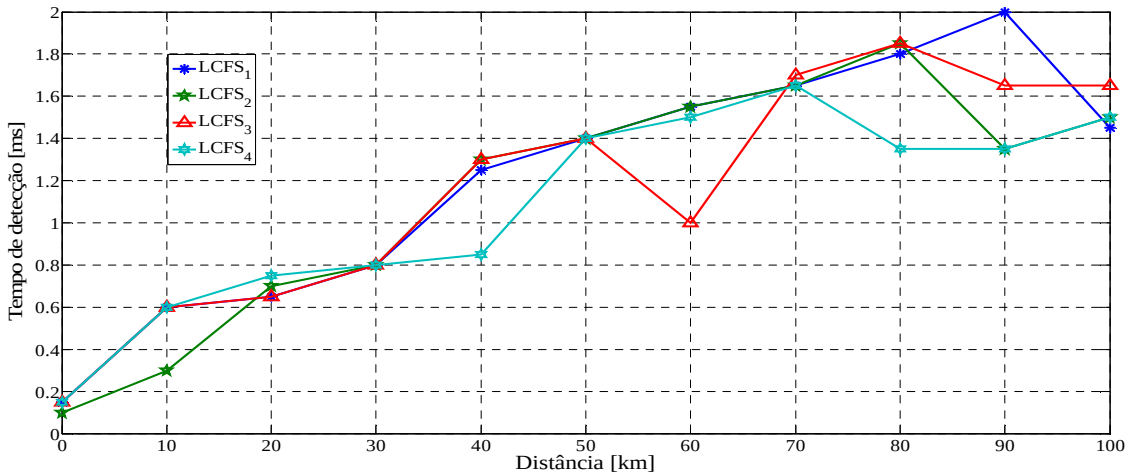

Figura 7.18 – Tempo de detecção da função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.19 ilustra o tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes, para faltas polo-terra com resistência de falta nula. Para os cenários com o $LCFS_2$ e $LCFS_3$, este esquema de proteção identificou todas as faltas em menos de 2,5 ms. Entretanto, o $LCFS_1$ e o $LCFS_4$ provocaram uma não detecção para as faltas que ocorrem nos primeiros 30 km da linha de transmissão. Isto ocorre porque estas faltas provocam um elevado incremento da corrente, que causa um aumento significativo da temperatura e consequentemente da resistência imposta por estes LCFS durante a falta, tal como apresentado no Capítulo 5. Desta forma, os ajustes desta função de proteção não são superados para estas faltas em específico.

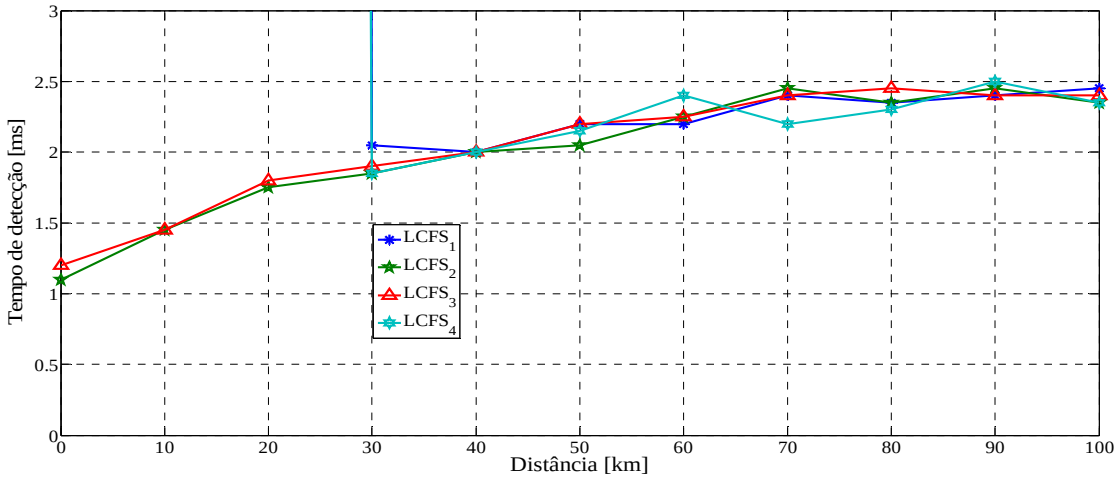

Figura 7.19 – Tempo de detecção da função de proteção de ondas viajantes para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.20 ilustra o tempo de detecção de faltas pela função de proteção de condutância. Pode ser observado em tal imagem que esta função de proteção é pouco afetada em função dos LCFS utilizados. Isto ocorre porque na maioria dos casos, a função de proteção identifica a falta antes dos LCFS perderem a característica da supercondutividade, tal como mencionado para a função de proteção diferencial.

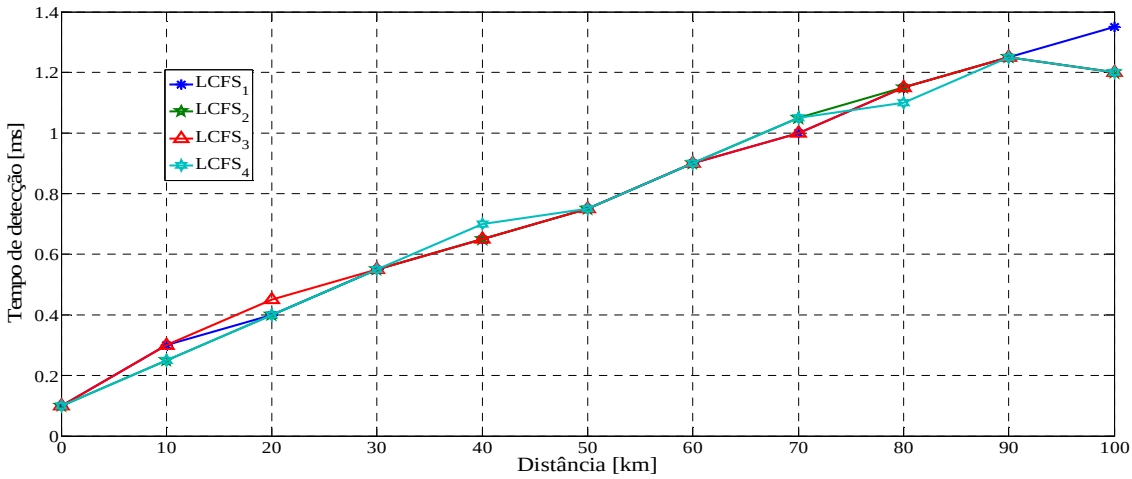

Figura 7.20 – Tempo de detecção da função de proteção de condutância para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A Figura 7.21 ilustra o tempo de detecção das cinco funções de proteção, para o caso em que o LCFS utilizado apresenta o resistor em paralelo com o material supercondutor. Neste caso, o resistor shunt utilizado é igual a 35 Ω e o LCFS é projetado de forma que a resistência que ele apresenta após sair do estado supercondutor seja muito maior que a resistência do resistor em paralelo (10 vezes maior). Desta forma, a maior parte da corrente durante a falta passa pelo resistor e não pelo material supercondutor de fato.

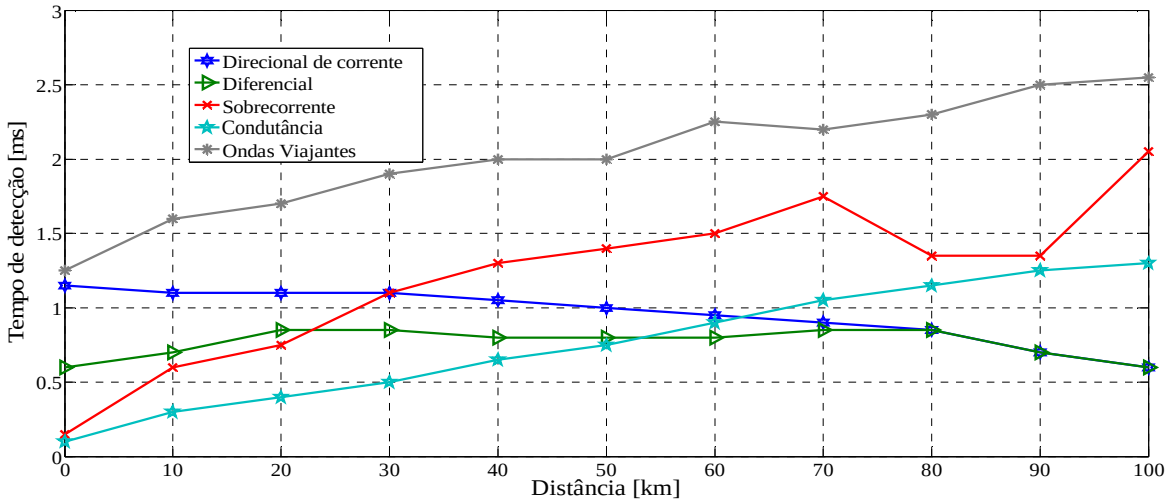

Figura 7.21 – Tempo de detecção das funções de proteção para faltas polo-terra com resistência de falta igual a 0 Ω com o LCFS com resistor shunt. Distância a partir do VSC_1.

É observado nesta condição que, a ação do LCFS, além de limitar a corrente de falta a patamares mais gerenciáveis, não deteriora a qualidade do sistema de proteção em identificar faltas, o que atesta a utilização de materiais supercondutores e do resitor *shunt* adicionado em paralelo com o material, tal como das funções de proteção utilizadas no trabalho.

7.4 Comparação entre as funções de proteções avaliadas

Esta subseção busca fazer uma comparação entre os esquemas de proteção analisados diante faltas na linha em CC na ausência de limitadores de corrente de falta.

A Figura 7.22 ilustra o tempo de detecção de faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω para os cinco esquemas de proteção analisados. Pode ser observado que todas as funções de proteção identificaram todas as condições faltosas. De modo complementar, a Tabela 7.1 ilustra o tempo médio de detecção das faltas dos cinco esquemas de proteção, para este tipo de falta em específico.

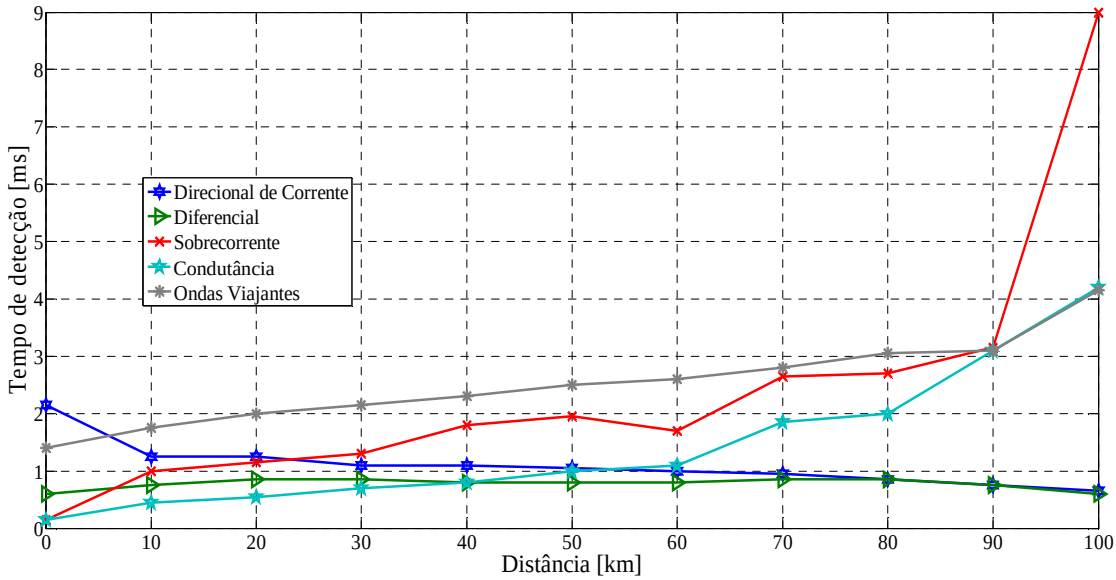

Figura 7.22 – Tempo de detecção das proteções para falta polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω. Distância a partir do VSC_1.

A função de proteção diferencial foi a que apresentou o menor tempo médio de detecção desta falta analisada, sendo igual a 0,78 ms. Entretanto, cabe ressaltar que este tempo está intrinsicamente relacionado ao atraso de tempo do canal de comunicação. Neste trabalho, o atraso do sistema de comunicação foi adotado como 0,5 ms. Para casos em que a linha de transmissão é maior ou que o sistema de comunicação seja mais lento, esta função de proteção pode apresentar tempos de detecção inadequados.

Salienta-se ainda que, para as faltas aplicadas nos 30 km iniciais da linha de transmissão, a proteção que apresentou o menor tempo de atuação foi a função de proteção de condutância. Esta é uma característica vantajosa deste esquema de proteção que foi proposto neste trabalho, uma vez que estas faltas são as que resultam nas maiores correntes de curto-circuito, por estarem localizadas no início da linha. Neste sentido, é benéfico para os equipamentos conectados no sistema que tais faltas sejam eliminadas no menor tempo possível.

Tabela 7.1 – Tempo médio de detecção de faltas polo-terra com resistência de falta igual a 40 Ω.

Função de Proteção	**Tempo médio de detecção [ms]**
Direcional de Corrente	1,1
Diferencial	0,78
Sobrecorrente com restrição de tensão	2,4
Condutância	1,4
Ondas Viajantes	2,5

A Figura 7.23 ilustra o tempo de detecção de faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω para os cinco esquemas de proteção analisados. Pode ser observado que todas as funções de proteção identificaram todas as condições faltosas. A Tabela 7.2 ilustra o tempo médio de detecção das faltas dos cinco esquemas de proteção.

Tabela 7.2– Tempo médio de detecção de faltas polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω.

Função de Proteção	**Tempo médio de detecção [ms]**
Direcional de Corrente	0,78
Diferencial	0,68
Sobrecorrente com restrição de tensão	0,76
Condutância	0,27
Ondas Viajantes	1,77

Para este tipo de falta em específico, a proteção de condutância apresentou o menor tempo médio de detecção das faltas, sendo este igual a 0,27 ms. Fica evidenciada a velocidade e eficiência deste esquema de proteção proposto, tal como foi atestado à eficiência dos outros esquemas de proteção implementados.

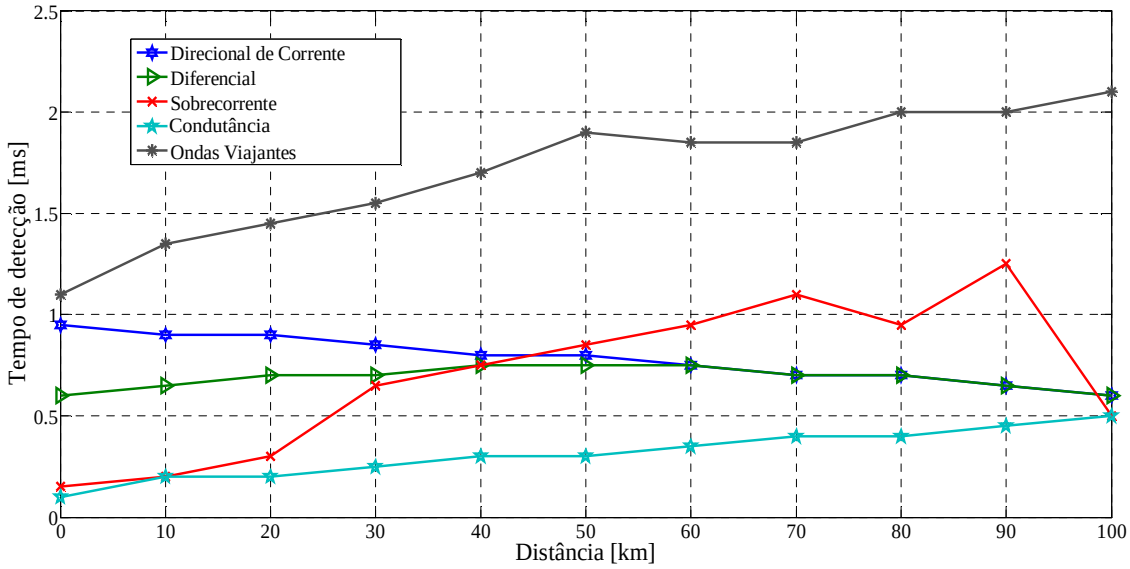

Figura 7.23 – Tempo de detecção das proteções para falta polo-polo com resistência de falta igual a 10 Ω. Distância a partir do VSC_1.

7.5 Considerações finais sobre o capítulo

Este capítulo apresentou o resultado de centenas de simulações que avaliaram o comportamento das cinco funções de proteção da linha de sistemas VSC-HVDC, diante curtos-circuitos na linha em CC. Foi apresentado o impacto da resistência de falta e dos limitadores de corrente de falta nas funções de proteção avaliadas. Foi constatado que para determinados curtos-circuitos, a utilização de limitadores de corrente de falta pode causar uma não detecção das faltas pelos esquemas de proteção. Adicionalmente, foi verificado que as funções de proteção baseadas apenas em medidas locais não protegem 100 % da linha para faltas de alta impedância.

A respeito dos LCFS, foi ilustrado que a utilização do resistor *shunt* não deteriorou a qualidade dos resultados das funções de proteção. Ao contrário do exposto, nos casos em que o LCFS não apresenta tal resistor, algumas faltas não foram detectadas, devido ao incremento excessivo da temperatura e consequentemente da resistência imposta pelo limitador no sistema.

De modo geral, foi verificado que não há a necessidade de reajustar as proteções em função da instalação de um LCFS em série com a linha, tendo em vista que o tempo de detecção de falta das funções de proteção, geralmente, é inferior ao tempo que os LCFS deixam o estado supercondutor. Entretanto, caso as proteções empregadas apresentassem um

tempo de detecção de falta maior, os ajustes precisariam ser estabelecidos considerando a influência dos LCFS no sistema.

Os LCFI, no geral, por atrasarem a corrente de falta, retardaram o tempo de detecção das faltas pelos esquemas de proteção que utilizam principalmente as informações de corrente em suas filosofias de proteção.

A função de proteção de condutância, que foi proposta neste trabalho, apresentou resultados atraentes, sendo a função de proteção mais veloz para as faltas mais severas (faltas de baixa resistência de falta e próximas a estação retificadora). Para estas faltas, é fundamental uma identificação veloz, uma vez que a corrente de falta nestes casos pode atingir patamares danosos ao sistema.

Adicionalmente, foi ilustrado que, para garantir a proteção de 100 % da linha em CC para uma gama acentuada de resistência de falta, é necessária a utilização de proteções que utilizam canais de comunicação, tais como a proteção diferencial e proteção direcional de corrente.

8. Conclusões

Sistemas VSC-HVDC podem ser utilizados para transmitir energia até cargas isoladas, reduzindo ou até mesmo eliminando a necessidade de geração local de energia. A eliminação de geração local pode reduzir problemas de espaço e manutenção dos equipamentos envolvidos no sistema de geração, além de que, muitas vezes, a geração local é composta por fontes de energia não renováveis, e a geração no continente seguida pela transmissão em corrente contínua pode minimizar impactos ambientais e diminuir os custos associados à geração. Adicionalmente, os sistemas VSC-HVDC permitem aplicações multiterminais de maneira eficiente, aplicações estas, que estão recebendo vigorosas atenções por parte dos pesquisadores e expressivos investimentos por parte de empresas, principalmente na Europa.

Esta pesquisa de mestrado está inserida dentro do contexto de proteção de linhas de transmissão de sistemas VSC-HVDC. Neste sentido, este trabalho propôs um esquema de proteção das linhas CC que opere em sinergia com limitadores de corrente de falta, uma vez que há grandes margens de contribuição técnica nesta área.

Foi apresentada neste trabalho, por meio de simulações no domínio do tempo, a fragilidade de sistemas VSC-HVDC diante faltas na linha CC, uma vez que a corrente na linha pode atingir patamares não gerenciáveis em um curto intervalo de tempo. Dito isto, a utilização de limitadores de corrente de falta pode ser uma estratégia a fim de minimizar os impactos de tais faltas. Neste contexto, foi desenvolvido um modelo de um LCFS do tipo resistivo, no RSCAD, o qual permite caracterizar de maneira satisfatória o comportamento do material supercondutor em ambiente de simulação de sistemas de energia elétrica. O modelo desenvolvido permite que o usuário analise diferentes materiais com diferentes dimensões de maneira eficiente, sem a necessidade da alteração do código implementado.

Os LCFS propostos neste trabalho se apresentaram como uma solução eficiente, sob a ótica de limitar a corrente de falta a patamares gerenciáveis pelos dispositivos de proteção e manobra instalados no sistema, entretanto, ainda assim há a necessidade do sistema de proteção eliminar uma condição faltosa que pode ser prejudicial aos equipamentos. Foram evidenciados os impactos dos LCFS no comportamento dinâmico dos sistemas VSC-HVDC. De maneira geral, os LCFS amortecem as oscilações de tensão durante as faltas e limitam os níveis de corrente de falta. Neste sentido, foi demonstrado que, nos casos em que o LCFS não apresenta um resistor em paralelo, ele pode atingir resistências que fazem com que a corrente

de falta seja menor do que a corrente nominal do sistema. Nestes casos, as funções de proteção podem não identificar a condição faltosa. Entretanto, ao adicionar um resistor *shunt* em paralelo com o material supercondutor, a corrente de falta passa em sua grande maioria pelo elemento *shunt*, o que minimiza danos ao material supercondutor e permite um controle mais preciso do nível de corrente de falta, uma vez que a resistência equivalente do limitador será aproximadamente o valor da resistência *shunt*.

Este trabalho também avaliou o impacto de LCFI no comportamento dinâmico de sistemas VSC-HVDC. Estes limitadores foram investigados uma vez que são substancialmente mais simples e mais baratos do que os LCFS. Foi demonstrado que, devido a características dos indutores em atrasar a corrente, quanto maior a indutância do LCFI mais tempo a corrente de falta leva para atingir um mesmo valor. Desta forma, caso seja verificado que o limite de um equipamento possa ser superado devido a uma falta na linha CC, a adição deste dispositivo faz com que esse limite demore mais tempo para ser superado, o que permite que o sistema de proteção tenha mais tempo para extinguir essa condição faltosa.

Além das análises dos impactos dos limitadores de corrente de falta em sistemas VSC-HVDC, este trabalho desenvolveu modelos de cinco funções de proteção no ambiente *Draft* do RSCAD, a saber: função de proteção direcional de corrente, função de proteção diferencial, função de proteção de sobrecorrente com restrição de tensão, função de proteção de ondas viajantes e função de proteção de condutância. As quatro primeiras funções são funções clássicas para a proteção das linhas de sistemas HVDC. A função de proteção de condutância, por sua vez, foi proposta neste trabalho e se mostrou como uma função de proteção simples, veloz e eficiente, sendo a função de proteção que apresentou os menores tempos de detecção de falta em comparação com as outras proteções, considerando as faltas mais severas.

Adicionalmente, este trabalho apresentou uma metodologia para ajustar as funções de proteção das linhas de sistemas VSC-HVDC, e apesar dela ser aplicada apenas no sistema utilizado no trabalho, ela pode ser estendida e utilizada em outros sistemas VSC-HVDC. A metodologia proposta consiste basicamente na avaliação de dois conjuntos de testes. O primeiro conjunto de testes, denominado Testes de Sensibilidade, busca avaliar se as funções de proteção com seus respectivos ajustes conseguem identificar faltas de difícil detecção na linha em CC. Idealmente, espera-se que as funções identifiquem todas as faltas na linha, independente da resistência de falta avaliada. O segundo conjunto de teste, denominado de Testes de Seletividade, busca avaliar se as funções de proteção são seletivas o suficiente para não atuarem para faltas ou eventos que não caracterizem faltas na linha em CC. Desta forma,

o melhor ajuste que pode ser adotado para uma função em específico é o que satisfaça os dois conjuntos de testes.

Foi demonstrado neste trabalho que para as proteções que apresentam apenas medidas locais, tais como a de sobrecorrente, ondas viajantes e condutância, não é possível encontrar um ajuste que satisfaça simultaneamente os dois testes sugeridos. Isto ocorre, pois, faltas de alta impedância distantes do local onde tais esquemas são instalados, são facilmente confundidas com eventos externos, tal como faltas no lado CA do sistema ou alterações nas referências dos controles. Desta forma, estas funções foram ajustadas de modo a não atuar para os eventos externos, ou seja, satisfazer o segundo conjunto de testes e, foi demonstrado, até que ponto estas funções protegem a linha de transmissão quando se consideram faltas de alta impedância. Entretanto, de modo geral, para faltas com resistência de falta menores e mais realistas, todas as funções apresentaram um comportamento satisfatório.

As funções de proteção direcional de corrente e diferencial puderam ser ajustadas de modo a satisfazer simultaneamente os dois testes previamente citados. Desta forma, ambas as funções garantem a proteção de 100 % da linha em CC mesmo para faltas de alta impedância. Assim, ficam expostos os benefícios da utilização de esquemas de comunicação para a proteção de linhas de transmissão em corrente contínua.

Foi avaliado o comportamento conjunto das funções de proteção implementadas com os LCFS e LCFI. Para os LCFS, foi demonstrado que com a utilização do resistor *shunt*, o limitador não provocou nenhuma não detecção das faltas simuladas, o que aumenta a segurança do sistema, uma vez que as faltas serão detectadas, mas a corrente de falta não atingirá patamares prejudiciais. Os LCFI, de modo geral, atrasam o tempo de detecção, mas foi constatado apenas deterioração no comportamento das funções com medidas locais e para altas resistências de falta ao se utilizar altos valores de indutância para este tipo de limitador.

Ademais, a partir das análises realizadas neste trabalho, torna-se necessária a realização de análises técnico-econômicas e ainda de dificuldades tecnológicas que precisam ser superadas para avaliar a viabilidade desta solução em um horizonte próximo. Destaca-se que as soluções técnicas apresentadas neste trabalho ainda podem ser modificadas ou combinadas com outras soluções, a fim de melhorar a eficiência e minimizar os custos do empreendimento como um todo.

Como continuidade da pesquisa é proposto:

- O estudo do impacto dos LCF supercondutores e LCF indutivos em outras topologias de conversores VSC;
- O estudo da coordenação das funções de proteção em sistemas VSC-HVDC

multiterminais, tal como o estudo do impacto dos LCF nestes sistemas;

- Implementação de funções de proteção que utilizam apenas medidas locais mais eficientes; e
- Estudo e implementação de técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão de sistemas VSC-HVDC.

Referências

[1] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010, p. 451.

[2] N. Flourentzou, S. Member, V. G. Agelidis, S. Member, and G. D. Demetriades, "VSC-Based HVDC Power Transmission Systems : An Overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 592–602, 2009.

[3] C. C. Viviescas, R. F. S. Dias, and M. Aredes, "Rede HVDC Multiterminal para Interligação de Parques-Eólicos , Sistemas Offshore e a Rede Elétrica," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, no. 1, Foz do Iguaçu, Pr, 2014.

[4] O. Heyman, "HVDC Light ® It's time to connect," Grid Systems HVDC - ABB, Ludvika, pp. 1–70, 2012.

[5] P. L. Francos, S. S. Verdugo, H. F. Alvarez, S. Guyomarch, and J. Loncle, "INELFE Europe's first integrated onshore HVDC interconnection," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, pp. 1–8, 2012.

[6] J. Arrillaga, N. Watson, and Y. Liu, *Flexible power transmission: The HVDC Options*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007, p. 377.

[7] V. K. Sood, *HVDC and FACTS controllers: applications of static converters in power systems*. Springer Science & Business Media, 2004.

[8] G. Asplund, K. Eriksson, and O. Tollerz, "Land and Sea Cable Interconnections with HVDC Light," *CEPSI 2000 - conference*, Manila, Philippines, pp. 260–267, 2000.

[9] T. F. Nestli, L. Stendius, M. J. Johansson, A. Abrahamsson, and P. C. Kjaer, "Powering Troll With New Technology," *ABB Review*, pp. 15–19, 2003.

[10] M. Hyttinen and K. Bentzen, "Operating Experiences With a Voltage Source Converter (Hvdc Light) on the Gas Platform Troll A," *Energex Organising committee*, Ludvika, Sweden, p. 6, 2006.

[11] T. B. R. Almeida, "Análise de um Sistema de Transmissão VSC HVDC Submarino para alimentaçao de unidades de produçao de petróleo offshore," Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

[12] Ren 21 Secretariat, *Renewabeles 2014 Global Status Report*. Paris, França, 2014, p. 216.

[13] T. M. Haileselassie, K. Uhlen, J. O. Tande, and O. Anaya-Lara, "Connection scheme for north sea offshore wind integration to UK and Norway: Power balancing and

transient stability analysis," *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, no. 1, Trondheim, 2011.

[14] FOSG, "Super Grid in Europe," 2015. [Online]. Available: http://www.friendsofthesupergrid.eu/. [Accessed: 10-Jan-2015].

[15] D. Naidoo and N. M. Ijumba, "HVDC line protection for the proposed future HVDC systems," *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, vol. 2, no. November, pp. 21–24, 2004.

[16] Y. Zhang, N. Tai, and B. Xu, "A travelling wave protection scheme for bipolar HVDC line," *APAP 2011 - Proc. 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot.*, vol. 3, pp. 1728–1731, 2011.

[17] G. Song, X. Cai, D. Li, S. Gao, and J. Suonan, "A novel pilot protection principle for VSC-HVDC cable lines based on fault component current," *2012 Power Eng. Autom. Conf.*, vol. 1, no. c, pp. 1–4, Sep. 2012.

[18] M. E. Baran, S. Member, N. R. Mahajan, and S. Member, "Overcurrent Protection on Voltage-Source-Converter- Based Multiterminal DC Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 406–412, 2007.

[19] P. Manohar and W. Ahmed, "Superconducting fault current limiter to mitigate the effect of DC line fault in VSC-HVDC system," *2012 Int. Conf. Power, Signals, Control. Comput.*, pp. 1–6, Jan. 2012.

[20] C. Peng, J. Wen, Y. Wang, J. Wu, and X. Chen, "Potential Use of Fault Current Limiter in VSC Based DC Transmission Systems," *2012 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–4, 2012.

[21] J. Sneath and A. D. Rajapakse, "Fault Detection and Interruption in an Earthed HVDC Grid using ROCOV and Hybrid DC Breakers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, pp. 1–11, 2014.

[22] R. Technologies, "Real Time Digital Simulator: Power System User Manual," 2006.

[23] V. K. Sood, *HVDC and FACTS Controllers*. New York: TFLeBOOK, 2004, p. 319.

[24] C. Bajracharya, "Control of VSC-HVDC for wind power,", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Electrical Power Engineering, 2008.

[25] K. Epameinondas, "Control and Protection of VSC-based Multi-terminal DC Networks," Master Thesis, Delft University of Technology, Department of Electrical Sustainable Energy, 2013.

[26] T. Karlsson, M. Hyttinen, L. Carlsson, and H. Bjorklund, "Control and Protection System for HVDC Applications from Siemens," tech. memo, *Dept. Of Electrical & Electronics*, Mangalore, pp. 1–23, 2010.

[27] H. Kunlun, C. Zexiang, and L. Yang, “Study on Protective Performance of HVDC Transmission Line Protection With Different Types of Line Fault,” *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, Weihai, Shandong, pp. 358–361, 2011.

[28] D. Motter, “Modelagem Computacional de Funçoes de Proteção Baseadas em Medidas de Frequência para Detecçao de Ilhamento de Geração Distribuída,” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica e Computacação, São Carlos, 2014.

[29] J. R. Marti, “Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations,” *IEEE Power Appar. Syst.*, vol. 101, no. I, pp. 147–157, 1982.

[30] M. S. Ismail Neto, “Estimação dos parâmetros de linhas de transmissao e transformadores utilizandos dados de PMU,” Monografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciência Exatas, Foz do Iguaçu, 2014.

[31] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O Reilly, “Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, pp. 3827–3837, 2012.

[32] D. M. Larruskain, I. Zamora, O. Abarrategui, P. Rafael, and M. Pitxitxi, “Fault Current Limiters for VSC-HVDC systems,” Tech. Report, *Univ. Basqu. Ctry. UPV/EHU*, pp. 1–6, 2009.

[33] M. Noe and M. Steurer, “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. R15–R29, 2007.

[34] A. M. Monteiro, “Um Estudo De Dispositivos Limitadores De Corrente De Curto-Circuito Com Ênfase No Ipc (Interphase Power Controller),” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

[35] W. Ahmed and S. J. G. Polytechnic, “DC Line Protection for VSC-HVDC System,” *IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst.*, 2012.

[36] P. Manohar and K. K. Dutta, “Effect of SCFCL on the performance of BTB-HVDC system,” *2011 1st Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2011*, pp. 288–293, 2011.

[37] L. Ye, K. Juengst, and a T. Model, “Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 839–842, 2004.

[38] S. Nemdili and S. Belkhiat, “Modeling and simulation of resistive superconducting fault-current limiters,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 25, pp. 2351–2356, 2012.

[39] A. Mohseni, S. Mohajer Yami, and A. A. Shayegani Akmal, “Modeling of matrix fault current limiter and its verification,” *2011 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2011*, pp. 474–478, 2011.

[40] M. Callavik, A. Blomberg, J. Häfner, and B. Jacobson, “Break-through!: ABB’s hybrid HVDC breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids,” *ABB Rev.*, pp. 7–13, 2013.

[41] J. Candelaria and J. D. Park, “VSC-HVDC system protection: A review of current methods,” *2011 IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2011*, pp. 1–7, 2011.

[42] Y. Zhang, N. Tai, and B. Xu, “Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1583–1591, 2012.

[43] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying Principles and Applications*, 3rd ed., vol. 67. Pensacola, Florida: CRC Press, 2006, pp. 1–664.

[44] P. M. Anderson, *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey: IEEE Press power engineering series, 1999, p. 1307.

Apêndice A

Este apêndice tem por objetivo ilustrar os principais parâmetros do sistema VSC-HVDC em estudo e os parâmetros dos LCFS utilizados nas simulações desenvolvidas no trabalho.

Parâmetros do sistema VSC-HVDC:

- P_{cc} = 150 MW, V_{cc} = 83 kV, I_{cc} = 890 A, V_{ca} = 100 kV.
- Linha CC: Tamanho = 100 km (Modelo Dependente da Frequência com 2 sub-condutores; raio do subcondutores = 1,04 cm; espaçamento entre os subcondutores = 50 cm; Distância horizontal X = 7,5 m; Altura da Torre = 35 m; Flecha no meio da linha = 10 m; Resistência CC por subcondutor = 0,03206 Ω/km; Resistividade do solo = 100 Ω.m).
- Capacitor do VSC, C = 70 μF.
- Reator de fase do VSC = 0,075 Ω + 20 mH.
- Reator de alisamento original = 8 mH.
- Frequência de chaveamento do PWM 1980 Hz.

Parâmetros do sistema CA:

- Transformadores com conexão Yg-Yg e Z_T= j0,05 p.u. (base de 100 MVA e 100 kV).
- Impedância de conexão com o sistema CA do lado retificador Z_{ACr}= j0,2 Ω
- Impedância de conexão com o sistema CA do lado retificador Z_{ACi}= j0,4 Ω

$LCFS_1$:

- T_o = 77 K, T_c= 87 K, J_c=10^8A/m², E_c=0,0001 V/m, n = 10, ρ=1.10^{-5} Ω.m, C = 0,1 M/m^{3,} L = 22,5 m, A = 5 μm².

$LCFS_2$:

- T_o = 77 K, T_c= 87 K, J_c=10^8A/m², E_c=0,0001 V/m, n = 10, ρ=1.10^{-5} Ω.m, C = 0,1 M/m^{3,} L = 45 m, A = 10 μm².

LCFS$_3$:

- T_o = 77 K, T_c= 87 K, J_c=10^8A/m², E_c=0,0001 V/m, n = 10, ρ=1.10^{-5} Ω.m, C = 1,8 M/$m^{3,}$ L = 31,5 m, A = 7 µm².

LCFS$_4$:

- T_o = 77 K, T_c= 87 K, J_c=10^8A/m², E_c=0,0001 V/m, n = 12, ρ=1.10^{-5} Ω.m, C = 1,8 M/$m^{3,}$ L = 20 m, A = 5 µm².

LCFS com resistor *shunt* de 35 Ω:

- T_o = 77 K, T_c= 87 K, J_c=10^8A/m², E_c=0,0001 V/m, n = 10, ρ=1.10^{-5} Ω.m, C = 0,1 M/$m^{3,}$ L = 175 m, A = 5 µm².