UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA POLITÉCNICA

Daniel Gutiérrez Rojas

**Localização de faltas em linhas de
transmissão com compensação série
usando pattern search**

São Paulo
2016

Daniel Gutiérrez Rojas

**Localização de faltas em linhas de
transmissão com compensação série
usando pattern search**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2016

Daniel Gutiérrez Rojas

**Localização de faltas em linhas de
transmissão com compensação série
usando pattern search**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Giovanni Manassero Junior

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de Novembro de 2016

Assinatura do autor: Daniel Gutiérrez R.

Assinatura do orientador: João Manoel Jr

Catálogo-na-publicação

Gutiérrez Rojas, Daniel

Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série usando pattern search / D. Gutiérrez Rojas -- versão corr. -- São Paulo, 2016. 90 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Algoritmos 3. Heurísticas 4. Sistemas elétricos de potência I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

*Este trabajo está dedicado a aquellos que,
encuentran en la ciencia un camino más transparente y directo
hacia la poesía.*

Agradecimentos

À minha mãe Angela pela paciência e apoio constante através dos anos.

Ao professor Giovanni Manassero Junior pelo apoio e estímulo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e professores do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência que ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

Ao povo Brasileiro pela acolhida amável e as pessoas que fizeram do meu caminho um lugar mais fácil de percorrer.

Aos meus amigos Felipe e Allyson pelas experiências inesquecíveis.

À Marília por fazer da minha percepção do tempo mais douradora.

*“By all means let’s be open-minded,
but not so open-minded that our brains drop out.”
(Richard Dawkins)*

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e a implementação, em uma rotina computacional, de um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série baseado em método heurístico. O algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho é capaz de identificar o ponto de ocorrência da falta utilizando informações sobre os parâmetros da linha de transmissão, os sinais de tensões e correntes registrados nos terminais dessa linha, bem como as características das unidades de compensação série empregadas. O algoritmo desenvolvido no âmbito desta pesquisa foi codificado no ambiente Matrix Laboratory (MATLAB), bem como o método heurístico escolhido (*pattern search*) e a sua validação foi conduzida a partir de simulações computacionais utilizando modelos de rede implementados no Alternate Transient Program (ATP).

Palavras-chave: Localização, faltas, linhas de transmissão, algoritmos, pattern search.

Abstract

This work aims to describe the development and implementation in a computational routine, an algorithm to locate faults in series-compensated transmission lines based on an heuristic method. The fault location algorithm proposed in this work is capable of identifying the fault point using information about the parameters of the transmission line, voltages and currents signals recorded at the line terminals, as well as the characteristics of the series compensation units. The optimization method used for objective functions was pattern search. The algorithm developed during this research was coded using MATLAB, as well as the heuristic method chosen (*pattern search*) and its validation was based on computer simulations using network models implemented in ATP.

Keywords: Fault-location, transmission-lines, algorithms, pattern search.

Lista de ilustrações

Figura 1	Esquema de proteção do capacitor série	25
Figura 2	Unidades de compensação série numa subestação	27
Figura 3	Modelo de linha simples sem compensação série	30
Figura 4	Modelo de linha simples com compensação série	31
Figura 5	Potência de transferência da linha de transmissão	32
Figura 6	Potência reativa da compensação série	32
Figura 7	Limite de estabilidade de tensão e potência de transferência de uma linha de transmissão em função da compensação série	33
Figura 8	Critério das áreas para determinar estabilidade transitória de um sis- tema como da Figura 4	34
Figura 9	Característica da proteção Metal Oxide Varistor (MOV)	36
Figura 10	Compensadores série controlados	37
Figura 11	Classificação da localização de faltas em linhas de transmissão	39
Figura 12	Diagrama geral do sistema elétrico usado neste trabalho	42
Figura 13	Modelo de quadripolos para linha de transmissão	42
Figura 14	Simulação da SC para várias condições de operação	44
Figura 15	Impedância característica da SC	44
Figura 16	Modelo dos diversos curto-circuitos	46
Figura 17	Sincronização dos sinais através de GPS	47
Figura 18	Sistema de transmissão de circuito simples	48
Figura 19	Diagrama do algoritmo de localização com SC nos terminais da linha.	49
Figura 20	Localização de faltas com SC no meio da linha	51
Figura 21	Procedimento de contração do Pattern Search (PS)	52
Figura 22	Procedimento de expansão do PS	52
Figura 23	Sistema de simulação	55
Figura 24	Torre do sistema de transmissão	56

Figura 25	Resultados do processo de otimização - ΔV_F	58
Figura 26	Correntes de linha no terminal local (circuito 2)	59
Figura 27	Diagrama do sistema de estudo com TCSC	76
Figura 28	Fonte: (JOVCIC; PILLAI, 2005) (Adaptado)	76
Figura 29	Resultado da simulação do TCSC	77
Figura 30	Fonte: (JOVCIC; PILLAI, 2005) (Adaptado)	77
Figura 31	Modelo do sistema implementado em ATPDraw	89
Figura 32	Fonte: Autor	89

Lista de tabelas

Tabela 1	Coeficientes das funções	57
Tabela 2	Erro em metros para falta monofásica	60
Tabela 3	Erro em metros para falta dupla-fase	61
Tabela 4	Erro em metros para falta dupla-fase-terra	62
Tabela 5	Erro em metros para falta trifásica	63
Tabela 6	Resultados da localização de falta	64
Tabela 7	Resultados da localização de falta - erros nos parâmetros da linha . . .	64
Tabela 8	Resultados da localização de falta - erros na estimação do fasor	65
Tabela 9	Resultados da localização de falta - erros nos tempos de sincronização .	66

Lista de siglas

ATP Alternate Transient Program

CA corrente alternada

CS Compensação Série

COMTRADE Common Format for Transient Data

FACTS Flexible AC Transmission Systems

GCSC GTO Thyristor Controlled Series Capacitor

GPS Global Positioning System

IED Intelligent Electronic Devices

MATLAB Matrix Laboratory

MOV Metal Oxide Varistor

PS Pattern Search

RSS Ressonância Subsíncrona

SSSC Static Synchronous Series Compensator

TCSC Thyristor Controlled Series Capacitor

TCR Thyristor Controlled Reactor

TSSC Thyristor Switched Series Capacitor

Sumário

1	Considerações iniciais	23
1.1	Introdução	23
1.2	Sistemas de transmissão com compensação série	24
1.3	Objetivos	25
1.4	Apresentação do trabalho	26
2	Revisão da literatura	27
2.1	Compensação série	27
2.1.1	Aplicação da compensação série fixa	28
2.1.2	Proteção da compensação série fixa	35
2.1.3	Thyristor Controlled Series Capacitor	37
2.1.4	GTO Thyristor Controlled Series Capacitor	38
2.1.5	Thyristor Switched Series Capacitor	38
2.1.6	The Static Synchronous Series Compensator	38
2.2	Métodos de localização de faltas	39
3	Metodologia proposta para localização de faltas	41
3.1	Introdução	41
3.2	Modelamento dos componentes do sistema	41
3.2.1	Linha de transmissão	42
3.2.2	Compensador série MOV-SC	44
3.2.3	Curto-circuito	45
3.3	Algoritmo de localização	46
3.3.1	Processamento dos registros de oscilografia	47
3.3.2	Localização da falta	48
3.3.3	Método heurístico <i>pattern search</i>	52
3.4	Localização de faltas para linhas de transmissão com compensação série controlada	54

4	Simulações da metodologia proposta e resultados	55
4.1	Descrição do sistema	55
4.2	Descrição dos casos de simulação	56
4.3	Resultados	57
4.3.1	Coeficientes de ajuste de curva	57
4.3.2	Comportamento da função de otimização	57
4.3.3	Simulação de um dos casos monofásicos	58
4.3.4	Resultados de erros das simulações	58
4.3.5	Análise estatística	63
4.3.6	Análise de sensibilidade	64
	Conclusão	67
	Referências	69
	Anexos	73
ANEXO A	Localização de faltas em linhas de transmissão com uso de dispositivos Flexible AC Transmission Systems (FACTS)	75
A.1	Introdução	75
ANEXO B	Simulação do sistema de transmissão no ATP	79
B.1	Arquivo de entrada do ATP <.ATP>	79
B.2	Modelo implementado no ATPDraw	89

Considerações iniciais

1.1 Introdução

O crescimento no consumo de energia elétrica decorrente da industrialização da sociedade e do surgimento de novos produtos e serviços têm imposto condições de operação aos sistemas elétricos existentes que não haviam sido previstas quando da sua especificação e projeto. Além disso, o aumento no consumo tem exigido novas soluções para as ampliações nesses sistemas elétricos, de modo a acomodar hábitos de consumo que se modificam com o tempo e a disponibilidade de fontes de energia elétrica não usuais. Uma alternativa para ampliar a capacidade de transporte dos sistemas elétricos existentes é a instalação de unidades de Compensação Série (CS) nas linhas de transmissão já construídas, no entanto, essa alternativa traz consigo novos desafios para os sistemas de proteção usualmente empregados.

No Brasil, as duas primeiras instalações de linhas de transmissão com compensação série foram feitas no ano de 1989, para o transporte da energia da usina hidroelétrica de Itaipu no sistema de 765 [kV], e no ano de 1999 com a interligação do sistema Norte-Sul.

Em virtude desses novos desafios, que resultaram no aumento da complexidade dos sistemas elétricos, a rápida e precisa localização de faltas nas linhas de transmissão dos sistemas interligados torna-se muito importante para garantir a estabilidade desses sistemas e reduzir os tempos de interrupção do fornecimento. Além disso, o número de linhas de transmissão com compensação série tende a aumentar ao longo dos anos. Sendo assim, assegurar alta precisão da localização de faltas nas linhas de transmissão com compensação série é de vital importância.

Hoje, a ampliação do uso da tecnologia digital tem aberto oportunidades para a criação de novos algoritmos de localização de faltas, que podem ser aplicados para diferentes cenários, com configurações de linhas de transmissão não usuais. As concessionárias devem dispor de sistemas de localização de faltas que permitam identificar o ponto de ocorrência, minimizando os tempos de interrupção da rede e os tempos de deslocamentos das equipes de manutenção.

Uma localização eficiente de faltas nas linhas de transmissão com compensação série representa alguns benefícios para as concessionárias e para os consumidores. Estes benefícios são listados a seguir (NOVOSEL et al., 1997):

- ❑ Aumento da estabilidade e confiabilidade do sistema de transmissão;
- ❑ Redução dos tempos de interrupção do fornecimento de energia;
- ❑ Redução dos custos operativos da rede.

1.2 Sistemas de transmissão com compensação série

A técnica de compensação série é utilizada para diminuir a reatância série da linha de transmissão, à frequência da rede, e permitir uma maior transferência de potência. A instalação de capacitores em série com a linha de transmissão produz potência reativa que é capaz de compensar parte da sua reatância série e, como resultado, tem-se os seguintes benefícios:

- ❑ Aumento da capacidade de transmissão de potência;
- ❑ Aumento de estabilidade do sistema;
- ❑ Diminuição da queda de tensão entre os terminais da linha;
- ❑ Melhoria da divisão de carga nas linhas paralelas.

A aplicação desse tipo de tecnologia ocorre de forma bastante particular, em virtude do número reduzido de instalações, quando comparado com o número total de linhas de transmissão convencionais. Por essa razão existem diferentes esquemas propostos pelos fabricantes desse tipo de solução (p. ex. ABB, GE e SIEMENS), que concentram seu trabalho de pesquisa para a melhoria da relação entre eficiência, principalmente com relação ao desempenho em condições anormais de operação, e custo das unidades.

Com o objetivo de obter completa vantagem da instalação dos capacitores, é necessário entender o impacto da compensação série nas proteções elétricas para projetar esquemas apropriados (FRONTIN et al., 2013). Os fabricantes têm desenvolvido diferentes soluções que são capazes de minimizar os estragos decorrentes de sobretensões produzidas durante os eventos de curto-circuito. Inicialmente, os elementos de proteção eram compostos por *spark gaps*, também denominados centelhadores. Esses elementos possuem resposta não linear e conduzem corrente quando submetidos a tensões superiores às suas especificações. Alguns arranjos com centelhadores foram propostos, em especial os arranjos “simples” e “duplo”. Além dos centelhadores as unidades de compensação série também contavam com relés de proteção capazes de acionar disjuntores para as remover de serviço completamente.

Esses trabalhos de pesquisa acarretaram avanço importante nas ultimas duas décadas. Conforme mencionado, anteriormente só se usavam centelhadores para a proteção contra sobretensões, mas desde os últimos anos os avanços tecnológicos trouxeram os MOV para o cenário em questão, aumentando o número de alternativas para minimizar esse problema. A Figura 1 apresenta o esquema de proteção típico usado neste trabalho. Este esquema é composto por um MOV, um *gap*, um disjuntor e um circuito de amortecimento.

Figura 1: Esquema de proteção do capacitor série

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a implementação de uma ferramenta computacional em MATLAB que permita localizar faltas em linhas de transmissão de circuito simples e duplo com compensação série instalada em ambos os terminais da linha de transmissão, ou no meio dela.

Essa ferramenta é composta por diversos algoritmos que utilizam os fasores de pré e pós-falta das tensões e correntes calculados através de registros efetuados por oscilógrafos instalados nos terminais das linhas de transmissão (ou Intelligent Electronic Devices (IED)). Além disso, esses algoritmos têm acesso a uma base de dados com os parâmetros das linhas de transmissão, dados dos equivalentes de rede nas subestações, dados da compensação série e topologia do sistema.

Além do desenvolvimento da ferramenta computacional para localização de faltas, este trabalho contribui com a implementação no ATP de modelos detalhados de linhas de transmissão com compensação série, bem como suas proteções contra sobretensões. Além desses modelos, foi implementado em MATLAB um sistema de transmissão com o emprego de Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) para análise do seu comportamento dinâmico frente a situações de falta.

1.4 Apresentação do trabalho

Este trabalho está apresentado em 6 capítulos. O capítulo de *Considerações Iniciais* apresenta a introdução e os objetivos do trabalho proposto. O segundo capítulo, denominado *Revisão da Literatura*, apresenta as publicações principais referentes ao tema e uma discussão sobre o problema da localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série. No capítulo de *Metodologia Proposta para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Compensação Série* é mostrado o desenvolvimento dos algoritmos que compõem a metodologia para a localização de faltas descrita neste trabalho e a apresentação dos modelos utilizados no equacionamento desses algoritmos. No quarto capítulo, denominado *Simulações da Metodologia Proposta*, são descritas as simulações efetuadas e no quinto capítulo, denominado *Resultados*, são apresentados os resultados obtidos para as simulações e uma análise da resposta dos algoritmos frente às simulações efetuadas. Finalmente, no capítulo de *Conclusões* são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

Revisão da literatura

2.1 Compensação série

A compensação série é uma tecnologia já estabelecida nos sistemas de transmissão de corrente alternada (CA) com objetivo principal de reduzir a reatância série da linha e aumentar a transferência de potência entre dois pontos distantes. Nas primeiras instalações, a compensação série fixa foi a mais utilizada e com a introdução dos FACTS outros esquemas de compensação série foram propostos sucessivamente. Esses esquemas possibilitam a variação do nível de compensação série por meio de dispositivos de eletrônica de potência e algoritmos de controle trazendo maiores benefícios aos sistemas elétricos, em virtude da melhoria das suas margens de estabilidade.

Na Figura 2 é mostrada uma instalação típica de compensação série com os respectivos elementos de proteção que estão descritos na Subseção 2.1.2.

Figura 2: Unidades de compensação série numa subestação

Fonte: (GENERAL ELECTRIC, 2016) (Adaptado)

Nesta seção é apresentada a aplicação da compensação série fixa para linhas de transmissão, formulação, efeitos sobre o sistema de transmissão e os diferentes esquemas de

compensação série em relação ao desenvolvimento da tecnologia dos FACTS.

2.1.1 Aplicação da compensação série fixa

Como descrito no Capítulo 1, a compensação série traz benefícios para o sistema de transmissão, frutos da redução da reatância série da linha, porém pode trazer alguns impactos negativos, que podem ser mitigados. A *General Electric Company* foi a primeira empresa que construiu e instalou um sistema de transmissão com compensação série. Essa instalação ocorreu em 1928, na subestação de Ballston Spa em Nova Iorque (GENERAL ELECTRIC, 2016), e tinha o objetivo de aumentar o limite de passagem de potência ativa nas linhas de transmissão para evitar a construção de um novo corredor de transmissão (obs.: atualmente, a construção de novos corredores pode ter um maior impedimento devido a critérios ambientais mais rigorosos).

Embora os benefícios da instalação de unidades de compensação série sejam evidentes, essa instalação e as instalações subsequentes indicaram a necessidade de considerações adicionais de projeto, já que efeitos decorrentes da sua instalação (p. ex. ressonância subsíncrona) são introduzidos nos sistemas elétricos e podem danificar os elementos da compensação e/ou outros equipamentos. Nesse contexto, os fatores que precisam uma avaliação cuidadosa são (MATHUR; VARMA, 2002):

- ❑ Tensão nos terminais do banco dos capacitores (isolamento);
- ❑ Correntes de falta nos terminais do banco dos capacitores;
- ❑ Posição dos reatores *shunt* em relação aos capacitores série (sobretensões de ressonância);
- ❑ Quantidade de bancos de capacitores e localização ao longo da linha (perfil de tensão).

2.1.1.1 Desvantagens da compensação série

Existem alguns problemas para a rede elétrica decorrentes do uso de unidades de compensação série (BAINS; ZADEH, 2015, 2015; CHUDASAMA; KULKARNI, 2011; NOVOSEL et al., 1997). Dentre eles pode-se destacar:

- ❑ Ressonância Subsíncrona (RSS) (CLARK, 2012): consiste na ressonância que ocorre entre a capacitância série instalada na linha de transmissão e a indutância do(s) gerador(es) síncrono(s) instalados na barra. Esse fenômeno possui frequência inferior à frequência da rede, que depende do nível de compensação e da indutância da(s) máquina(s) e pode trazer danos mecânicos a essas;

- Proteção da linha de transmissão: a compensação série pode induzir as funções de proteção ao erro por subalcance ou sobrealcance (na função de proteção de distância);
 - Sobrealcance nos relés de distância: quando o capacitor série está em serviço, a impedância da linha vista pelo relé é menor e assim a linha de transmissão parece mais curta; e
 - Subalcance nos relés de distância: quando o capacitor série está fora de serviço, a impedância da linha de transmissão vista pelo relé é maior e assim a linha de transmissão parece mais longa.
- Localização de faltas: o uso de elementos não lineares como o MOV na proteção de sobretensão das unidades torna mais difícil a tarefa de localização de faltas porque insere um circuito não-linear na barra onde são instalados os transformadores de potencial, o *bay* onde são instalados os transformadores de corrente e o ponto de falta.

No item a seguir é apresentada a formulação da compensação série, bem como os comentários sobre os seus benefícios para o sistema elétrico, conforme descrito na Seção 1.2 para os sistema de transmissão são descritos com maior detalhe a seguir.

2.1.1.2 Formulação da compensação série

A impedância de uma linha de transmissão possui um efeito predominantemente indutivo. A ideia básica da compensação série é diminuir esse efeito da reatância desde o terminal local para o terminal remoto. A Equação 1 apresenta a relação característica de transferência de potência para uma linha.

$$P = \frac{V_L V_R}{X_e} \sin \delta \quad (1)$$

Onde:

P : Potência de transferência da linha de transmissão.

V_L : Valor eficaz da tensão no terminal local.

V_R : Valor eficaz da tensão no terminal remoto.

X_e : Reatância série da linha de transmissão.

δ : Defasagem entre os fasores das tensões no terminal local e remoto.

A reatância série do sistema de transmissão X_e incluindo a compensação série é dada como a diferença entre a reatância série da linha de transmissão X_l e a reatância capacitiva da compensação série X_c :

$$X_e = X_l - X_c \quad (2)$$

$$X_e = (1 - k)X_l \quad (3)$$

Onde k é o grau da compensação série e está definido como:

$$k = \frac{X_c}{X_l} \longrightarrow 0 \leq k < 1 \quad (4)$$

Considerando um modelo simples de linha de transmissão sem compensação série (Figura 3) e com compensação série (Figura 4) composto de dois segmentos iguais (desprezando a resistência da linha), a tensão total sobre a reatância da linha $\Delta \dot{V}_{X_\ell} = 2 \cdot \Delta \dot{V}_{\frac{X_\ell}{2}}$ do diagrama fasorial da Figura 3 aumenta quando a compensação série é inserida no modelo, como mostrado no diagrama fasorial da Figura 4.

Figura 3: Modelo de linha simples sem compensação série

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000, p. 210) (Adaptado)

Do diagrama fasorial da Figura 4 e assumindo $V_L = V_R = V$ obtêm-se o valor eficaz da corrente e tensão no meio do trecho da linha compensada:

$$I = \frac{2V}{(1 - k)X_l} \sin \frac{\delta}{2} \quad (5)$$

Figura 4: Modelo de linha simples com compensação série

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000, p. 210) (Adaptado)

$$V_m = V \cos \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

Usando Equações 5 e 6, obtêm-se as relações de potência de transferência da linha de transmissão e a potência reativa da compensação série ilustrada em Figura 5 e Figura 6.

$$P = V_m I = \frac{V^2}{(1-k)X_l} \sin \delta \quad (7)$$

$$Q_c = I^2 X_c = \frac{2kV^2}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (8)$$

A potência de transferência e a potência reativa da compensação série variam rapidamente para diferentes valores de k como se observa nas Figuras 5 e 6 e ambas variam de forma similar com o ângulo δ .

Duas explicações físicas para o efeito que a compensação série traz no sistema podem ser feitas: a primeira se refere à redução da reatância do sistema de transmissão X_e , que consiste no cancelamento de parte da reatância série da linha X_l pela reatância da compensação série, como se a linha de transmissão fosse encurtada; a segunda explicação é útil para o entendimento geral dos controladores de fluxo de potência, isto é, o aumento de corrente na linha com o consequente aumento da potência de transferência produz aumento da tensão a que a reatância série da linha está submetida. Com o uso da compensação série este efeito é alcançado, visto que o capacitor impõe uma tensão contrária à tensão da reatância série da linha, produzindo um aumento na tensão a que a reatância da linha está submetida $\Delta \dot{V}_{X_l}$ como mostrado na Figura 4.

Figura 5: Potência de transferência da linha de transmissão

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000, p. 210) (Adaptado)

Figura 6: Potência reativa da compensação série

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000, p. 210) (Adaptado)

2.1.1.3 Melhora na estabilidade de tensão

Uma consequência da diminuição da reatância série da linha por parte da compensação série é a minimização da variação de tensão no terminal remoto. A Figura 7 corresponde à tensão normalizada V_R , versus a potência de transferência da linha P , com fator de potência unitário para graus de compensação k diferentes. As tendências da potência ao infinito das curvas para cada k da Figura 7 representam a instabilidade de tensão, quer dizer que quando aumenta o fator k a curva de potência vs. tensão tem um aumento para a direita produzindo uma margem maior de estabilidade de tensão. O limite de estabilidade de tensão é aumentado pela diminuição da reatância característica da linha e portanto, fornecendo uma fonte de tensão mais robusta no terminal local.

Figura 7: Limite de estabilidade de tensão e potência de transferência de uma linha de transmissão em função da compensação série

2.1.1.4 Melhora na estabilidade transitória

O sistema da Figura 3 possui um gerador síncrono capaz de transmitir potência P_m quando seu ângulo de carga é δ_1 , conforme ilustrado na Figura 8a. A linha de transmissão desse sistema é submetida a um evento de curto-circuito que resulta na aceleração do gerador, em virtude da diferença entre a potência mecânica entregue ao eixo e a potência elétrica solicitada pelo sistema. A proteção da linha de transmissão atua, retirando-a de serviço no instante em que o ângulo de carga do gerador é δ_2 e, quando isso ocorre, a potência elétrica solicitada pelo sistema se torna superior à potência mecânica entregue pelo gerador. Isso resulta em desaleceração do equipamento e o equilíbrio é atingido quando o ângulo de carga é δ_3 e, para esse caso, a margem de estabilidade é δ_{cr} (áreas A_1 , A_2 e A_3 , respectivamente).

Para o sistema da Figura 4 ocorre o mesmo, isto é, o gerador síncrono é capaz de transmitir potência P_m quando seu ângulo de carga é δ_{L1} , conforme ilustrado na Figura 8b. A linha de transmissão desse sistema, que possui compensação série, é submetida a um evento de curto-circuito que resulta na aceleração do gerador, em virtude da diferença entre a potência mecânica entregue ao eixo e a potência elétrica solicitada pelo sistema. A proteção da linha de transmissão atua, retirando-a de serviço no instante em que o ângulo de carga do gerador é δ_{L2} e, quando isso ocorre, a potência elétrica solicitada pelo sistema se torna superior à potência mecânica entregue pelo gerador. Isso resulta em desaleceração do equipamento e o equilíbrio é atingido quando o ângulo de carga é δ_{L3} e, para esse caso, a margem de estabilidade é δ_{Lcr} (áreas A_{L1} , A_{L2} e A_{L3} , respectivamente).

Comparando a Figura 8b com a Figura 8a pode-se notar que existe um incremento na área da margem de estabilidade transitória no caso do sistema que possui a linha de transmissão com compensação série (A_{L3} é maior do que A_3). Esse incremento de área é proporcional ao grau de compensação usado e chega num valor ótimo para $k = 1$ (cancelamento total da impedância reativa da linha). Porém, para sistemas reais o k não supera 0,75 em decorrência de diversos problemas que incluem balanço de cargas entre corredores paralelos, controle do fluxo de potência e altas correntes de falta. É comum encontrar sistemas com k menor do que 0,30 para evitar RSS.

Figura 8: Critério das áreas para determinar estabilidade transitória de um sistema como da Figura 4

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000, p. 213) (Adaptado)

2.1.1.5 Amortecimento da oscilação de potência

A variação da compensação série é usada para amortecer oscilações resultantes da aceleração e desaceleração das máquinas do sistema. Quando a máquina que oscila acelera e o ângulo δ aumenta ($d\delta/dt > 0$), a potência transferida deve ser incrementada com ajuda do capacitor série para compensar o excesso de potência mecânica de entrada. Analogamente, quando a máquina desacelera e o ângulo δ diminui ($d\delta/dt < 0$), a potência de transferência deve diminuir para equilibrar a potência mecânica de entrada. Com um compensador série fixo, o balanço é feito comutando o capacitor para os valores máximo e mínimo.

2.1.2 Proteção da compensação série fixa

As linhas de transmissão estão sujeitas a desligamentos devidos a sobretensões no sistema produzidas por diferentes razões, tais como: descargas atmosféricas, manobras, etc. Sendo assim, tanto a linha de transmissão como as unidades de CS devem conter um sistema de proteção adequado para não danificar os equipamentos.

As primeiras unidades de CS usavam *spark gaps* como proteção contra sobretensões. Porém, hoje em dia a proteção contra sobretensões é realizada pelo MOV como mostrado na Figura 1. A proteção por meio do MOV fornece alguns benefícios como (GOLDSWORTHY, 1987): reinserção instantânea; níveis menores de proteção do capacitor; maior confiabilidade e menor manutenção.

Tipicamente, esse tipo de arranjo consiste no MOV conectado em paralelo com o capacitor, de modo a manter a tensão sobre este no seu nível de proteção enquanto conduz parte da corrente do sistema. Durante faltas no sistema de potência, as correntes do sistema podem ser suficientemente altas para elevar a temperatura desse elemento e, portanto, utiliza-se o *spark gap* para evitar este problema, reduzindo as falhas no MOV.

A proteção por meio do MOV é capaz de manter a tensão sobre o capacitor devido à sua característica não linear. A Figura 9 ilustra tal comportamento e a relação entre a tensão de pico de proteção do capacitor e o nível de corrente de proteção é dado por:

$$V_{pk} = \sqrt{2}I_{pr}X_c \quad (9)$$

Onde:

V_{pk} : Tensão de pico de proteção do capacitor.

I_{pr} : Nível de proteção de corrente.

O nível de proteção de corrente é múltiplo da corrente nominal do capacitor (geralmente 2.0 a 2.5) e a relação entre as tensões pico V sobre da proteção MOV e as correntes

de pico I é mostrada na Equação 10.

$$I = \frac{V^\beta}{K} \quad (10)$$

Onde:

β : Constante que varia entre 30 e 50.

K : Constante calculada ($\log_{10} K = \log_{10} V_{pk} - \frac{\log_{10} I_{max}}{\beta}$).

I_{max} : Corrente de pico de falta máxima.

Figura 9: Característica da proteção MOV

Fonte: Autor

2.1.2.1 Uso dos FACTS na compensação série

Desafios para os sistemas de transmissão existentes, tais como redução das margens de segurança e manutenção e/ou ampliação da qualidade de energia elétrica, têm surgido com o aumento da demanda por energia elétrica, com a redução na disponibilidade de novos corredores de transmissão e pouco planejamento de longo prazo. Muito embora a compensação série fixa possa resolver parte desses problemas, a compensação série controlada permite lidar com as desvantagens impostas pela primeira (RSS, controle de fluxo de potência, etc.) (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Embora o incremento da compensação série fixa permita diminuir as perdas da linha de transmissão, as perdas totais do sistema aumentam devido a maiores perdas na compensação série (MALISZEWSKI et al., 1990). Em casos de contingências, uma linha compensada pode exceder os limites de capacidade de carga trazendo efeitos não desejáveis como aumento nas perdas. A compensação série controlada ajuda a superar esses desafios e melhorar o desempenho das linhas de transmissão no sistema elétrico.

Em continuação, serão apresentados alguns esquemas de compensação série controlados, os princípios de funcionamento e as vantagens que trazem para o sistema elétrico em relação à compensação série fixa. Os esquemas mais comuns são mostrados na Figura 10.

Figura 10: Compensadores série controlados

Fonte: (HINGORANI; GYUGYI, 2000) (Adaptado)

2.1.3 Thyristor Controlled Series Capacitor

O esquema básico do TCSC mostrado na Figura 10a foi proposto por (DOBSA, J.; MAUCHLE, P.; PFYL, W.; SADEK, K., 1986) e consiste na conexão de um capacitor série em derivação com um Thyristor Controlled Reactor (TCR) o qual é uma reatância conetada em série como com uma válvula bidirecional de tiristores que permite controle da potência reativa por variação da corrente que atravessa o reator através das válvulas de tiristores. Em uma linha de transmissão prática, vários esquemas de TCSC são conectados em série para obter a tensão e as características de operação desejadas.

Os uso primário do TCSC é melhorar a estabilidade angular do sistema de potência e mitigar a RSS por meio da regulação da potência real e maximização do torque de sincronização transitório entre sistemas interligados. Porém, o capacitor série inserido também afeta a distribuição de potência reativa dos sistemas interligados (SHANKAR; THOTTUNGAL; PRIYA, 2015).

2.1.4 GTO Thyristor Controlled Series Capacitor

O objetivo do esquema mostrado na Figura 10b é de controlar a tensão nos terminais do capacitor por uma entrada de corrente de linha. Quando a válvula do GTO está fechada, a tensão no capacitor é zero e quando está aberta, a tensão no capacitor é máxima. Para o controle da tensão no capacitor, o fechamento e a abertura das válvulas são feitos para cada meio ciclo, em sincronismo com a frequência do sistema.

O grau de compensação dessa alternativa pode ser ajustado em cada ciclo, o que permite uma regulação rápida e uma melhora do sistema de operação. Sua desvantagem é a geração de harmônicas na rede e, portanto, sistemas de filtragem bem implementados são necessários (KARADY et al., 1993).

O esquema de compensação de GTO Thyristor Controlled Series Capacitor (GCSC) possui grande interesse teórico, porém a tecnologia dos tiristores GTO deve ser melhor desenvolvida para sistemas de alta e extra-alta tensão (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

2.1.5 Thyristor Switched Series Capacitor

O esquema básico do TSSC é mostrado na Figura 10c. O esquema é composto por alguns capacitores série em derivação com uma válvula de tiristores bidirecionais conectados em paralelo. Este esquema é similar à estrutura do esquema do GCSC, mas a operação é diferente devido às restrições de comutação impostas pelas válvulas de tiristores convencionais.

O princípio de operação do TSSC é direto, sendo o grau da compensação série controlado por passos crescentes ou decrescentes, dependendo do número de capacitores série inseridos no sistema. Um capacitor do esquema é inserido fechando a válvula dos tiristores e retirado do sistema abrindo a correspondente válvula (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

2.1.6 The Static Synchronous Series Compensator

O SSSC foi um esquema de compensação inicialmente proposto por (GYUGYI, 1989). O conceito foi originalmente pensado tanto para compensação série como em derivação, assim como controle de ângulo de transmissão.

O SSSC injeta um sinal de tensão em série com o sistema de transmissão, com magnitude e fase controladas. Esse equipamento é composto por um inversor cujo lado alimentado por um capacitor de armazenamento. A tensão injetada por ele pode estar em quadratura com a corrente da linha de transmissão, emulando o comportamento de um indutor ou capacitor série (KUMAR; GHOSH, 1999). Os benefícios do uso do SSSC são listados em (GYUGYI; SCHAUDER; SEN, 1997) e uma aplicação para controle de fluxo de potência numa linha de transmissão é dada em (SEN, 1998).

2.2 Métodos de localização de faltas

Nas últimas décadas muitos algoritmos de localização de faltas foram implementados (IZYKOWSKI et al., 2011) e esses podem ser classificados em duas categorias como mostrado na Figura 11:

Figura 11: Classificação da localização de faltas em linhas de transmissão

Fonte: (ANDRADE; LEÃO, 2012) (Adaptado)

Neste trabalho é feita só uma breve descrição dos algoritmos de localização baseados em impedância os quais estão divididos em duas subcategorias:

- ❑ Algoritmos que empregam os sinais das tensões e correntes registrados em apenas um dos terminais das linhas de transmissão (TAKAGI et al., 1982): esses algoritmos não possuem requisitos de comunicação para transmitir informações do terminal local ao terminal remoto e são empregados na maioria dos sistemas de localização de faltas comerciais implementados nos IED, devido à sua simplicidade e a seu baixo custo (GE MULTILIN, 2011; ABB INC., 2003; SIEMENS, 2011). Normalmente, esses algoritmos são menos precisos pois dependem do conhecimento do sistema de transmissão (p. ex. dados do equivalente de Thévenin do terminal remoto); e
- ❑ Algoritmos que empregam os sinais das tensões e correntes medidos nos dois terminais das linhas de transmissão (SACHDEV; AGARWAL, 1988; JOHNS; JAMALI, 1990; GIRGIS; HART; PETERSON, 1992; KEZUNOVIĆ; MRKIĆ; PERUNIČIĆ, 1994): normalmente esses algoritmos são mais sofisticados que aqueles empregados nos IED, e são capazes de compensar os erros da modelagem da linha e as condições do sistema com as informações nos dois terminais. Esses algoritmos podem utilizar técnicas de amostragem sincronizadas e/ou sincronização via rotina de *software* (JOHNS; JAMALI, 1990), (KEZUNOVIĆ; MRKIĆ; PERUNIČIĆ, 1994).

Vale ressaltar que, em relação aos algoritmos de localização de faltas, o fenômeno da RSS afeta os métodos que usam fasores para determinar o ponto de ocorrência da falta. Afortunadamente, é possível encontrar métodos que removem o efeito da ressonância subsíncrona, tal como os métodos propostos em (BAINS; ZADEH, 2015).

Metodologia proposta para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série

3.1 Introdução

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série fixa, de acordo com os requisitos descritos na Seção 1.2.

Esta metodologia utiliza os fasores de pre e pós-falta de correntes e tensões, calculados por meio dos registros oscilográficos feitos pelos IED instalados nos terminais local e remoto da linha de transmissão. Os fasores e as informações sobre os parâmetros elétricos dos condutores, a geometria das torres do sistema e informações sobre a compensação série, tais como nível de tensão e energia suportados pelo MOV são usados para efetuar os cálculos do ponto de ocorrência da falta. A localização da falta será vista com mais detalhe na Seção 3.3.

O sistema elétrico de transmissão usado neste trabalho é composto por uma linha de transmissão de circuito duplo com quatro compensadores série, cada um nos terminais local e remoto das linhas em paralelo como mostrado na Figura 12. Os compensadores série estão compostos por capacitores série, MOV, *gap* e disjuntor (Figura 1) que corresponde ao esquema de proteção de capacitores série mais comum hoje em dia.

3.2 Modelamento dos componentes do sistema

O algoritmo de localização apresentado neste trabalho é baseado no cálculo elétrico, em componentes de fase, do curto-circuito, portanto, é necessário usar modelos matemáticos precisos para a linha de transmissão, para a compensação série e para os diversos tipos

Figura 12: Diagrama geral do sistema elétrico usado neste trabalho

de curto-circuito, com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados.

3.2.1 Linha de transmissão

Uma linha de transmissão simples de comprimento x pode ser representada pelo modelo de quadripolos de transmissão (BOWMAN; MCNAMEE, 1964), como mostrado na Figura 13.

Figura 13: Modelo de quadripolos para linha de transmissão

Fonte: (MANASSERO, 2006, p. 33) (Adaptado)

A relação entre as tensões e correntes nos terminais local e remoto dessa linha de transmissão depende dos parâmetros do quadripolo que a define (MANASSERO, 2006).

A matriz $T(x)$ do quadripolo de transmissão, ilustrada na Figura 13 que relaciona tensões e correntes em ambos terminais, é composta pelos termos $[A_{(x)}]$, $[B_{(x)}]$, $[C_{(x)}]$ e $[D_{(x)}]$, conforme apresentado na Equação 11.

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]^L \\ [\dot{I}_{abc}]^L \end{bmatrix} = [T(x)] \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]^R \\ [\dot{I}_{abc}]^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]^R \\ [\dot{I}_{abc}]^R \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

$[\dot{V}_{abc}]^L, [\dot{V}_{abc}]^R$: Fasores de tensão nos terminais local e remoto.

$[\dot{I}_{abc}]^L, [\dot{I}_{abc}]^R$: Fasores de corrente nos terminais local e remoto.

As relações entre as tensões e correntes nos terminais remoto e local da linha de transmissão de comprimento x depende do inverso da matriz $T(x)$, como mostrado na Equação 12.

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]^R \\ [\dot{I}_{abc}]^R \end{bmatrix} = [T(x)]^{-1} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]^L \\ [\dot{I}_{abc}]^L \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sendo:

$$[T(x)]^{-1} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & [B_{(x)}] \\ [C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & -[B_{(x)}] \\ -[C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \quad (13)$$

Os parâmetros do quadripolo de transmissão, em componentes de fase, podem ser obtidos através das Equações 14 a 17, como é mostrado em detalhes na referência (BOWMAN; MCNAMEE, 1964).

$$[A_{(x)}] = [y_{abc}]^{-1} \times [M] \times \{[\cosh(\gamma_j x)]\} \times [M]^{-1} \times [y_{abc}] \quad (14)$$

$$[B_{(x)}] = [y_{abc}]^{-1} \times [M] \times \{\gamma_j [\sinh(\gamma_j x)]\} \times [M]^{-1} \quad (15)$$

$$[C_{(x)}] = [M] \times \left[\frac{\sinh(\gamma_j x)}{(\gamma_j x)} \right] \times [M]^{-1} \times [y_{abc}] \quad (16)$$

$$[D_{(x)}] = [M] \times \{[\cosh(\gamma_j x)]\} \times [M]^{-1} \quad (17)$$

Onde:

$[y_{abc}]$: Matriz de admitâncias da linha.

$[M]$: Matriz de autovetores da matriz $[P]$ ($[P] = [y_{abc}] \times [z_{abc}]$).

$\{\square\}$: Notação para matriz diagonal.

Vale ressaltar que, o desenvolvimento dos quadripolos para linhas de transmissão, apresentado neste item foi conduzido considerando-se apenas linhas de transmissão com circuito simples. Como o foco deste trabalho é linhas de transmissão com circuito duplo, o desenvolvimento é similar, uma vez que as matrizes de impedância e admitâncias devem ser calculadas considerando o acoplamento entre os circuitos. O tamanho das matrizes de impedância e admitância de uma linha de circuito simples é 3×3 e para circuito duplo é de 6×6 . A metodologia para localização de faltas proposta neste trabalho considera das Equações 11 a 17. Este modelo considera capacitâncias da linha e as assimetrias existentes entre as fases. Para linhas de circuito duplo este modelo também considera o acoplamento entre circuitos.

3.2.2 Compensador série MOV-SC

De acordo com (GOLDSWORTHY, 1987), é possível modelar a compensação série da Figura 1 como uma impedância equivalente. Embora o MOV seja um elemento altamente não linear, a corrente resultante que passa através do compensador é senoidal para todas as condições de operação. Este comportamento é devido à indutância do sistema, que determina a corrente de falta.

Figura 14: Simulação da SC para várias condições de operação

Fonte: Autor

Com o propósito de estimar a impedância equivalente, é possível usar o método proposto em (GOLDSWORTHY, 1987). Este método consiste na simulação da compensação série mostrada na Figura 14 para várias condições de operação obtendo-se a curva ilustrada na Figura 15.

Figura 15: Impedância característica da SC

Fonte: Autor

A curva da Figura 15 apresenta a relação entre o módulo da corrente que passa através da unidade de compensação e o módulo da tensão sobre esta. Métodos de ajuste de curvas são usados para determinar as expressões matemáticas para a resistência e reatância equivalentes. A resistência é estimada usando uma função exponencial, apresentada na Equação 18 e a reatância é estimada usando uma função polinomial, apresentada na Equação 19.

O numerador da função polinomial é um polinômio de grau 2 e o denominador é um polinômio de grau 3.

$$R_{eq} = X_{SC}\{k_1 e^{k_2 i_{pu}} + k_3 e^{k_4 i_{pu}}\} \quad (18)$$

$$X_{eq} = X_{SC} \frac{n_1 i_{pu}^2 + n_2 i_{pu} + n_3}{i_{pu}^3 + d_1 i_{pu}^2 + d_2 i_{pu} + d_3} \quad (19)$$

Onde:

$i_{pu} = |\dot{I}|/I_{pr}$: Corrente por unidade do sistema.

$\dot{I}$: Fasor da corrente mostrada na Figura 1.

$k_1 a k_4$: Coeficientes de ajuste exponencial.

$n_1 a k_3$: Coeficientes de ajuste polinomial do numerador.

$d_1 a k_3$: Coeficientes de ajuste polinomial do denominador.

3.2.3 Curto-circuito

Os curtos-circuitos têm natureza predominantemente resistiva. Portanto, é possível modelar os diferentes tipos de curto-circuitos através de resistências posicionadas de forma conveniente de acordo com as fases envolvidas e o ponto de ocorrência da falta (MANASSERO, 2006). A Equação 20 mostra a representação matricial para o curto-circuito.

$$[\dot{I}_{abc}]^F = [Y_{abc}]^{falta} \times [\dot{V}_{abc}]^F \quad (20)$$

Para o curto-circuito monofásico (AN) mostrado na Figura 16a, a matriz de admitâncias da falta é dada pela Equação 21.

$$[Y_{abc}]^{falta} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{Fa}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Para o curto-circuito dupla-fase (BC) mostrado na Figura 16b, a matriz de admitâncias da falta é dada pela Equação 22.

$$[Y_{abc}]^{falta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Fbc}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fbc}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Figura 16: Modelo dos diversos curto-circuitos

Fonte: (MANASSERO, 2006, p. 42) (Adaptado)

Para o curto-circuito dupla-fase-terra (BCN) mostrado na Figura 16c, a matriz de admitâncias da falta é dada pela Equação 23.

$$[Y_{abc}]^{falta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{Fb}} + \frac{1}{R_{Fbc}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fc}} + \frac{1}{R_{Fbc}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Para o curto-circuito trifásico mostrado na Figura 16d, a matriz de admitâncias da falta é dada pela Equação 24.

$$[Y_{abc}]^{falta} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{Fa}} + \frac{1}{R_{Fab}} + \frac{1}{R_{Fca}} & -\frac{1}{R_{Fab}} & -\frac{1}{R_{Fca}} \\ -\frac{1}{R_{Fab}} & \frac{1}{R_{Fab}} + \frac{1}{R_{Fbc}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} \\ -\frac{1}{R_{Fca}} & -\frac{1}{R_{Fbc}} & \frac{1}{R_{Fc}} + \frac{1}{R_{Fca}} + \frac{1}{R_{Fbc}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Para os curtos-circuitos que envolvem outras fases diferentes das apresentadas, o desenvolvimento é análogo àquele feito neste item.

3.3 Algoritmo de localização

Como mencionado anteriormente na Seção 1.3, o algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho pode localizar faltas em linhas de transmissão de circuito simples e duplo com compensação série instalada nos terminais ou no meio da linha. Medições de

tensões e correntes são disponíveis nos terminais local e remoto, assim como os parâmetros elétricos da linha e topologia do sistema de transmissão.

O desenvolvimento do algoritmo proposto neste trabalho é tratado com maior detalhe nos itens a seguir.

3.3.1 Processamento dos registros de oscilografia

Na metodologia usada neste trabalho para localização de faltas, utiliza registros efetuados nos IED dos terminais local e remoto da linha de transmissão. Esses registros também podem ser efetuados em relés de proteção geralmente empregados nas linhas de transmissão.

Tipicamente esses registros são armazenados em formato Common Format for Transient Data (COMTRADE), que contém informações dos sinais de tensões e correntes de pré e pós-falta.

Uma vez que os sinais de interesse (tensões e correntes) são obtidos a partir dos IED (ou relés de proteção), a sincronização entre os sinais dos terminais da linha de transmissão deve ser feita. No trabalho, presume-se que isso tenha sido efetuado por meio do uso de receptores Global Positioning System (GPS) os quais permitem a sincronização de bases em tempo real em locais distantes entre si, com exatidão da ordem de $1 [\mu s]$ como mostrado na Figura 17. Outra forma de efetuar a sincronização dos sinais é feita através de métodos algébricos que utilizam cálculos mais complexos, demandando um tempo computacional maior.

Além do cálculo dos fasores e da sincronização o processamento dos registros de oscilografia é responsável pela classificação da falta e determinação das fases envolvidas.

Figura 17: Sincronização dos sinais através de GPS

Fonte: Autor

3.3.2 Localização da falta

3.3.2.1 Localização de faltas para linhas de transmissão de circuitos simples compensadas nos terminais

Considere que a linha de transmissão ilustrada na Figura 18 pode ser representada pelo sistema elétrico mostrado na Figura 19. O ponto de ocorrência da falta é localizado a uma distância x do terminal L , não conhecida, e a impedância de falta é $[\bar{Z}_{abc}]_F$.

Figura 18: Sistema de transmissão de circuito simples

De acordo com (BOWMAN; MCNAMEE, 1964), é possível estimar os fasores de tensão e corrente pós-falta no ponto da falta usando os fasores de tensão e corrente pós-falta nos terminais da linha como nas Equações 25 e 26.

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{LF} \\ [\dot{I}_{abc}]_{LF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(x)}] & -[B_{(x)}] \\ -[C_{(x)}] & [D_{(x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{L,SC} \\ [\dot{I}_{abc}]_L \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{RF} \\ [\dot{I}_{abc}]_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(l-x)}] & -[B_{(l-x)}] \\ -[C_{(l-x)}] & [D_{(l-x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{R,SC} \\ [\dot{I}_{abc}]_R \end{bmatrix} \quad (26)$$

com

$$[\dot{V}_{abc}]_{L,SC} = [\dot{V}_{abc}]_L - [\bar{Z}_{eq}]_{L,SC} \times [\dot{I}_{abc}]_L \quad (27)$$

$$[\dot{V}_{abc}]_{R,SC} = [\dot{V}_{abc}]_R - [\bar{Z}_{eq}]_{R,SC} \times [\dot{I}_{abc}]_R \quad (28)$$

Onde:

$[\bar{Z}_{abc}]_{L,SC}$: Impedância equivalentes da CS no terminal local.

$[\bar{Z}_{abc}]_{R,SC}$: Impedância equivalentes da CS no terminal remoto.

Figura 19: Diagrama do algoritmo de localização com SC nos terminais da linha.

Fonte: (MANASSERO; SANTO; ROJAS, 2016, p. 4) (Adaptado)

Para estimar o ponto de ocorrência da falta, é necessário comparar os fasores de tensão pós-falta no ponto de ocorrência pelo lado do terminal local, calculado pela Equação 25, e pelo lado do terminal remoto, calculado pela Equação 29, como na expressão a seguir:

$$[\Delta \dot{V}_{abc}]_F = [\dot{V}_{abc}]_L - [\dot{V}_{abc}]_R \approx 0 \quad (29)$$

Reescrevendo a Equação 29 é possível obter para o caso monofásico a Equação 26, como:

$$[\Delta \dot{V}_{abc}]_F = [A_{(x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_{L,SC} - [B_{(x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_L - [A_{(l-x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_{R,SC} + [B_{(l-x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_R \quad (30)$$

As diferenças de tensão descritas na Equação 30 deveria ser idealmente zero no ponto da falta. Portanto, o algoritmo proposto usa a ferramenta de otimização PS para encontrar a distância que minimiza a Equação 30. Vale ressaltar que essa diferença não depende da resistência de falta nem das impedâncias das fontes, porém, depende do tipo de falta. Considerando faltas monofásicas, é possível reescrever a Equação 30 como:

$$\Delta V_{p,F} = |\dot{V}_{p,LF} - \dot{V}_{p,RF}| \quad (31)$$

onde p refere-se a an , bn ou cn . Considerando faltas bifásicas ou bifásica-terra, é possível reescrever a Equação 30 como:

$$\Delta V_{p1p2,F} = |\dot{V}_{p1,LF} - \dot{V}_{p2,LF} - \dot{V}_{p1,RF} + \dot{V}_{p2,RF}| \quad (32)$$

onde p_1 refere-se a a , b ou c e p_2 refere-se a b , c ou a , respectivamente. Finalmente, considerando faltas trifásicas, é possível reescrever a Equação 30 como:

$$\Delta V_{abc,F} = \frac{1}{3} |\dot{V}_{an,LF} + \alpha \dot{V}_{bn,LF} + \alpha^2 \dot{V}_{cn,LF} - \dot{V}_{an,RF} - \alpha \dot{V}_{bn,RF} - \alpha^2 \dot{V}_{cn,RF}| \quad (33)$$

Onde:

$$\alpha = 120^\circ.$$

3.3.2.2 Exemplo de localização de uma falta monofásica

Para efetuar uma correta localização do ponto de ocorrência da falta, uma vez que uma falta é detetada no sistema o algoritmo implementado executa os seguintes passos baseado na Figura 19:

1. Obtenção dos sinais de tensão e correntes nos terminais da linha;
2. Sincronização e cálculo dos fasores $([\dot{V}_{abc}]_L, [\dot{V}_{abc}]_R, [\dot{I}_{abc}]_L, [\dot{I}_{abc}]_R)$;
3. Classificação do tipo de falta para ajuste do equacionamento;
4. Cálculo das impedâncias equivalente em ambos terminais $[\bar{Z}_{eq}]_{L,SC}$ e $[\bar{Z}_{eq}]_{R,SC}$;
5. Cálculo das tensões $[\dot{V}_{abc}]_{L,SC}$ e $[\dot{V}_{abc}]_{R,SC}$;
6. Cálculo das tensões $[\dot{V}_{abc}]_{FL}$ e $[\dot{V}_{abc}]_{FR}$;
7. Montagem da função objetivo (Equação 30); e
8. Otimização da função objetivo e obtenção do ponto de ocorrência da falta x .

3.3.2.3 Localização de faltas para linhas de transmissão de circuitos simples compensadas no meio

O algoritmo de localização proposto neste trabalho também é capaz de localizar faltas em linhas de transmissão com CS no meio da linha. Para realizar a localização, o algoritmo divide a linha de transmissão em duas seções, analisando ambas. Se a falta é localizada entre o terminal local e a unidade de CS, como mostrado na Figura 20, é possível determinar o ponto de ocorrência da falta usando o mesmo procedimento descrito na Subsubseção 3.3.2.1 e Subsubseção 3.3.2.2. O algoritmo determina os fasores de tensões e correntes na compensação série como:

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{R'} \\ [\dot{I}_{abc}]_{R'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(\frac{l}{2})}] & -[B_{(\frac{l}{2})}] \\ -[C_{(\frac{l}{2})}] & [D_{(\frac{l}{2})}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_R \\ [\dot{I}_{abc}]_R \end{bmatrix} \quad (34)$$

Então, é possível determinar os fasores de tensão no terminal remoto da seção analisada como:

$$[\dot{V}_{abc}]_R'' = [\dot{V}_{abc}]_{R'} - [\bar{Z}_{eq}]_{SC} \times [\dot{I}_{abc}]_{R'} \quad (35)$$

Figura 20: Localização de faltas com SC no meio da linha

Fonte: (MANASSERO; SANTO; ROJAS, 2016, p. 5) (Adaptado)

Os fasores de tensão e corrente no ponto da falta, desde o terminal remoto da seção analisada, são calculados como:

$$\begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{RF''} \\ [\dot{I}_{abc}]_{RF''} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{(\frac{l}{2}-x)}] & -[B_{(\frac{l}{2}-x)}] \\ -[C_{(\frac{l}{2}-x)}] & [D_{(\frac{l}{2}-x)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\dot{V}_{abc}]_{R''} \\ [\dot{I}_{abc}]_{R'} \end{bmatrix} \quad (36)$$

e a Equação 30 pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} [\Delta \dot{V}_{abc}]_F &= [A_{(x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_L - [B_{(x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_L - \\ &\quad [A_{(\frac{l}{2}-x)}] \times [\dot{V}_{abc}]_{R''} + [B_{(\frac{l}{2}-x)}] \times [\dot{I}_{abc}]_R \end{aligned} \quad (37)$$

O algoritmo proposto usa a mesma ferramenta de otimização para encontrar a distância da falta, como nas Equações 31 a 33.

3.3.2.4 Localização de faltas para linhas de transmissão de circuito duplo compensadas

Os parâmetros descritos na Equação 17 também podem ser usados para representar linhas de transmissão de circuito duplo. Neste caso, as equações consideram acoplamento eletromagnético entre as seis fases (matrizes $[z_{abc}]$ and $[y_{abc}]$ são de dimensões 6×6). Portanto, é possível reescrever as equações apresentadas nos Itens 3.3.2.1 e 3.3.2.3 e proceder com a localização da falta.

3.3.3 Método heurístico *pattern search*

O método heurístico usado para resolver as Equações 31-33 é o *Pattern Search* (HOOKE; JEEVES, 1961). É um método determinístico baseado em busca direta, portanto é mais rápido quando comparado com outros métodos determinísticos.

O PS executa a busca pelo mínimo da função objetivo avaliando determinadas combinações de variáveis de entrada por meio de um laço em torno de uma combinação central. O processo inicia com o usuário selecionando valores arbitrários para as variáveis de entrada e o PS considera esses valores como a combinação central, depois cria um número de combinações em torno da central, com o propósito de construir uma malha de tamanho predefinido

Figura 21: Procedimento de contração do PS

Fonte: Autor

Figura 22: Procedimento de expansão do PS

Fonte: Autor

A Figura 21 ilustra uma malha que está se contraindo e a Figura 22 mostra uma malha que está se expandindo. Os processos contração e expansão dependem do valor da função objetivo em todos os elementos da malha, isto é, se houver sucesso na busca do mínimo local diferente do inicial (combinação central) a combinação responsável por esse mínimo torna-se a nova combinação central (Figura 21). O processo se repete, mas a malha original é expandida para evitar cair num mínimo local. Caso contrário, isto é, há fracasso na busca do mínimo local diferente do inicial, este permanece como a combinação central. O processo se repete mas a malha original é contraída para encontrar o mínimo da função objetivo.

O processo é iterativo e termina só quando o mínimo é encontrado dada uma precisão predefinida.

3.3.3.1 Algoritmo completo do *pattern search*

O algoritmo do *pattern search* requer 4 entradas além da função objetivo que está sendo otimizada.

- ❑ Um ponto de partida $x^{(0)}$;
- ❑ Fator de aceleração a ;
- ❑ Vetor de perturbação inicial P ; e
- ❑ Vetor de tolerância da perturbação T .

O algoritmo completo tem 3 partes fundamentais: Inicialização, rotina iniciar/reiniciar e rotina *pattern*.

Na parte da inicialização, são escolhidos aleatoriamente o ponto de partida $x^{(0)}$, a , P e T .

A rotina iniciar/reiniciar é efetuada da seguinte forma:

- ❑ Uma exploração entorno do $x^{(0)}$ tem que ser feita para encontrar um ponto melhor $x^{(1)}$ que tenha um valor de função objetivo melhor
- ❑ Se todas as explorações fracassam ($x^{(1)}$ pior do que $x^{(0)}$), então P é diminuído pela metade
- ❑ Se $x^{(1)}$ é melhor do que $x^{(0)}$, o valor de P volta no seu valor original e o processo continua.

Na rotina *pattern* alguns passos são seguidos da forma:

- ❑ Cálculo de $x^{(2)}$ a partir de $x^{(0)}$ passando por $x^{(1)}$.
- ❑ Obtenção do $x^{(2)}$ final a partir da exploração entorno desse ponto.
- ❑ Se $f(x^{(2)})$ é pior do que $f(x^{(1)})$, os pontos são atualizados $x^{(1)} \rightarrow x^{(0)}$ sendo $x^{(1)}$ é melhor ponto até agora e ir para a rotina iniciar/reiniciar.
- ❑ Se $f(x^{(2)})$ é melhor do que $f(x^{(1)})$, os pontos são atualizados $x^{(1)} \rightarrow x^{(0)}$ e $x^{(2)} \rightarrow x^{(1)}$ e voltar para a rotina *pattern*.

Finalmente o valor final de $x^{(2)}$ será o valor que minimiza a função objetivo.

3.4 Localização de faltas para linhas de transmissão com compensação série controlada

A localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série controlada depende do nível de compensação a que o sistema de transmissão está sujeito, bem como na velocidade do seu controle. O Anexo A apresenta uma análise do comportamento desse tipo de compensação, bem como a simulação de um sistema. Observou-se que a resposta do controlador desse sistema simulado é bastante lenta (da ordem de 200 a 300 [ms]), quando comparada com os tempos envolvidos nos eventos de curto-circuito (da ordem de 50 a 100 [ms]) e, portanto, não influi significativamente na precisão da resposta do algoritmo.

Simulações da metodologia proposta e resultados

Esse capítulo apresenta a descrição do sistema usado para as simulações feitas assim como a descrição dos casos de simulação do método de localização de faltas proposto no trabalho e os resultados obtidos dessas simulações.

Figura 23: Sistema de simulação

Fonte: Autor

4.1 Descrição do sistema

O sistema usado para avaliar o algoritmo proposto é composto de uma linha de transmissão de circuito duplo com tensão nominal de 440 [kV] e 220 [km] de comprimento. Ambos circuitos possuem dois capacitores série protegidos por MOV instalados nos seus respectivos terminais compensando cada um o equivalente a 12.5% da reatância série da linha, resultando em uma capacitância de 245.46 [μF] e uma compensação total de 50% da linha de transmissão de circuito duplo.

O valor de energia (máxima ou admissível) do MOV é de 60 [MJ] com nível de tensão de proteção V_{pk} de 99340 [V], nível de corrente de proteção I_{pr} de 6500 [A] e β de 40. O sistema é ilustrado na Figura 23.

Considerando cada fase composta de quatro condutores 636 [MCM] *Grosbreak*, e dois cabos guarda *Alumoweld* 16 [M]. A torre do sistema de transmissão é mostrada na Figura 24 e a resistividade do solo é 400 [Ω m].

Os níveis de curto-circuito trifásico e monofásico no terminal local são: $S_{3\phi}^L = 23409 \angle 87.04^\circ$ [MVA] e $S_{1\phi}^L = 5793.7 \angle 84.05^\circ$ [MVA]; e no terminal remoto são: $S_{3\phi}^R = 20802 \angle 87.57^\circ$ [MVA] e $S_{1\phi}^R = 6815.6 \angle 86.83^\circ$ [MVA].

Figura 24: Torre do sistema de transmissão

Fonte: Autor

4.2 Descrição dos casos de simulação

O algoritmo de localização foi avaliado usando dados obtidos a partir do *software* ATP. No total foram 480 casos de simulação variando as seguintes condições:

- ❑ Distância da falta — quilômetro 20 a 200 em passos de 20 [km];
- ❑ Tipo de falta — monofásica (LG), bifásica (LL), bifásica-terra (LLG) e trifásica;
- ❑ Valores de resistência de falta — 0, 1, 5, 10, 50 e 100[Ω]; e

- Instante de ocorrência da falta — 83.3 e 87.5 [ms] (para avaliação da influência do ângulo de inserção da falta).

4.3 Resultados

Essa seção apresenta os resultados do ajuste de curva, o comportamento da ferramenta de otimização considerando os casos de simulação descritos na Seção 4.2 e os resultados do algoritmo considerando o caso da Seção 4.1. Além disso, é apresentada uma análise estatística para todos os casos de simulação, bem como a análise de sensibilidade considerando as influências dos parâmetros da linha de transmissão, da estimação dos fasores e da sincronização entre os terminais. Vale ressaltar que nenhuma ferramenta para remoção da RSS foi usada para obter os resultados neste trabalho, nem qualquer ferramenta para remoção da componente exponencial amortecida dos sinais de corrente.

4.3.1 Coeficientes de ajuste de curva

Para proceder com o método de ajuste de curva descrito na Subseção 3.2.2 foi necessário obter o comportamento da compensação série nas simulações do ATP para varias condições operativas. O procedimento consistiu na simulação da CS ilustrada na Figura 14, conectada a uma fonte de tensão ideal e controlada (cujos valores poderiam variar de 0 [V] a V_{pk}).

A partir da relação entre a corrente que passa pela CS e a saída, foi possível construir as curvas mostradas na Figura 15. O processo de ajuste de curva foi implementado usando a ferramenta de *curve fitting* do MATLAB, os resultados das simulações e os coeficientes encontrados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes das funções

Coeficientes da função exponencial					
k_1	k_2	k_3	k_4		
0.4943	-0.1733	-7.296	-3.177		
Coeficientes da função polinomial					
n_1	n_2	n_3	d_1	d_2	d_3
0.2238	3.633	-2.524	1.757	-1.509	0.1319

4.3.2 Comportamento da função de otimização

Figura 25 apresenta o comportamento da Equação 31 para faltas no circuito 2 do sistema de transmissão ilustrado na Figura 23, que estão localizadas a 60 [km] do terminal local. São faltas monofásicas e a resistência de falta varia de 0 a 50Ω . Pode-se perceber que os resultados da equação apresentam uma característica v e o ponto de mínimo é

localizado perto dos 60 [km] para todos os casos, o que significa que a impedância de falta não interfere com o desempenho do algoritmo proposto.

Figura 25: Resultados do processo de otimização - ΔV_F

Fonte: (MANASSERO; SANTO; ROJAS, 2016, p. 5) (Adaptado)

4.3.3 Simulação de um dos casos monofásicos

Esta seção apresenta a avaliação de um dos casos de simulação feitos. Esse caso corresponde a uma falta no circuito 2 do sistema de transmissão ilustrado na Figura 23, que está localizado a 60 [km] do terminal local. É uma falta monofásica e a resistência de falta é nula. Figura 26 ilustra as correntes no terminal local do circuito 2.

De acordo com a Figura 26, pode-se perceber que a falta ocorreu aos 83 [ms] aproximadamente, e que é uma falta monofásica. O algoritmo proposto localizou a falta numa distância de 59.04 [km] do terminal local, o que significa um erro de aproximadamente 1 [km] para esse caso de simulação.

4.3.4 Resultados de erros das simulações

As Tabelas 2, 3, 4 e 5, mostram a totalidade de resultados obtidos para as simulações com as respectivas variações feitas. Vale ressaltar que, nos resultados impressos nessas tabelas não foi usado nenhum filtro para a exponencial amortecida nem para ressonância subsíncrona.

Figura 26: Correntes de linha no terminal local (circuito 2)

Fonte: Autor

Nessas tabelas é mostrado o erro em metros, resultado da magnitude da diferença entre a localização real da falta e a localização feita pelo algoritmo desenvolvido como mostrado na Equação 38.

$$erro = |D_{real} - D_{algoritmo}| \quad (38)$$

Onde:

D_{real} : Distância real da falta.

$D_{algoritmo}$: Distância calculada pelo algoritmo.

Cada tabela contém os resultados para um tipo de falta e é organizada de forma que as colunas estão divididas pelo valor de resistência de falta e as linhas pela distância real da falta, com cada instante de inserção da falta.

Nas tabelas de erros apresentadas a seguir, nenhuma ferramenta de remoção da RSS nem da exponencial amortecida foi usada.

Da Tabela 2, se observa que não existe tendência nem nas filas nem nas colunas da tabela. Só é possível falar que os erros maiores em média são obtidos para um valor de resistência de falta de 100 $[\Omega]$.

Da Tabela 3, também não é possível determinar uma tendência dentro dos resultados da tabela sendo totalmente aleatórios.

Tabela 2: Erro em metros para falta monofásica

Distância [km]	Instante [ms]	Resistência [Ω]					
		0	1	5	10	50	100
20	5/60	1095,96	1094,69	1095,97	925,56	806,46	2086,89
	5.25/60	782,63	732,03	504,40	167,59	793,18	2067,37
40	5/60	952,87	962,24	922,08	788,37	495,39	1739,87
	5.25/60	1102,25	1089,11	1014,44	868,15	491,25	1726,60
60	5/60	964,16	944,57	874,10	792,34	240,32	1443,81
	5.25/60	1088,60	1064,59	965,02	837,29	237,35	1434,71
80	5/60	1110,73	1088,18	996,64	881,34	45,64	1204,88
	5.25/60	1106,80	1082,59	986,99	868,33	45,86	1199,05
100	5/60	1189,55	1167,85	1079,74	968,63	78,96	1032,61
	5.25/60	1185,76	1163,15	1073,08	960,37	78,63	1027,33
120	5/60	1190,03	1168,44	1082,72	976,53	128,26	932,21
	5.25/60	1190,29	1169,32	1084,34	977,39	129,04	926,86
140	5/60	1102,22	1082,36	1002,75	902,27	96,80	909,19
	5.25/60	1106,04	1085,74	1006,60	906,95	97,61	904,31
160	5/60	984,94	959,33	839,90	702,69	18,97	966,79
	5.25/60	775,37	764,10	709,70	669,52	21,32	964,81
180	5/60	793,84	757,54	601,93	456,02	224,85	1110,96
	5.25/60	382,69	371,08	302,38	216,87	230,83	1112,19
200	5/60	188,93	158,29	147,05	378,23	519,75	1340,83
	5.25/60	189,60	185,85	95,65	43,26	531,35	1347,71

Tabela 3: Erro em metros para falta dupla-fase

Distância [km]	Instante [ms]	Resistência [Ω]					
		0	1	5	10	50	100
20	5/60	146,48	145,91	289,05	581,71	1696,90	34,92
	5.25/60	800,59	856,56	885,34	791,70	647,51	83,04
40	5/60	13,42	18,76	139,96	267,17	616,85	57,27
	5.25/60	265,43	365,80	749,51	912,49	488,66	14,46
60	5/60	257,18	270,22	257,04	137,15	269,34	142,14
	5.25/60	85,30	101,31	182,61	305,25	159,56	109,44
80	5/60	179,01	177,43	200,11	279,12	57,52	220,23
	5.25/60	262,24	224,77	58,52	55,37	65,81	200,52
100	5/60	49,04	42,99	44,51	49,68	143,86	292,49
	5.25/60	332,15	341,40	268,22	173,79	147,42	286,15
120	5/60	139,87	137,26	127,12	123,43	214,83	360,45
	5.25/60	165,85	140,07	59,47	13,02	226,55	366,79
140	5/60	269,20	277,32	296,90	291,69	285,08	424,50
	5.25/60	429,10	426,31	331,43	162,44	304,49	444,86
160	5/60	377,04	372,11	384,26	471,66	354,43	486,71
	5.25/60	74,85	10,17	177,78	240,96	382,65	521,67
180	5/60	210,28	225,40	261,00	214,93	547,26	550,21
	5.25/60	9,25	23,64	75,32	444,47	492,34	595,35
200	5/60	24,38	17,22	9,87	18,58	330,49	616,29
	5.25/60	96,53	349,19	1122,05	1222,70	851,32	665,86

Tabela 4: Erro em metros para falta dupla-fase-terra

Distância [km]	Instante [ms]	Resistência [Ω]					
		0	1	5	10	50	100
20	5/60	8,59	8,07	147,78	285,38	1004,81	126,14
	5.25/60	681,61	755,58	884,09	916,36	727,48	173,90
40	5/60	102,78	81,12	18,45	158,06	485,05	14,81
	5.25/60	454,95	484,46	612,56	799,61	490,14	60,21
60	5/60	224,91	223,50	214,40	158,83	321,63	85,64
	5.25/60	178,86	202,35	251,03	352,45	228,34	50,40
80	5/60	253,52	238,81	249,89	289,42	25,94	178,08
	5.25/60	156,57	111,23	49,43	77,33	32,27	156,33
100	5/60	86,91	94,24	101,24	96,20	115,88	263,88
	5.25/60	307,49	305,54	251,77	143,54	118,22	256,69
120	5/60	134,71	132,61	116,48	106,69	199,91	345,19
	5.25/60	54,89	70,08	96,18	25,28	211,96	352,15
140	5/60	284,89	280,79	281,03	322,34	283,74	422,76
	5.25/60	248,68	256,72	216,45	103,67	304,61	445,11
160	5/60	341,07	353,10	383,75	389,92	363,38	499,13
	5.25/60	245,65	224,29	10,98	188,63	394,39	536,81
180	5/60	270,18	255,54	251,48	291,03	623,45	578,31
	5.25/60	234,23	315,99	509,20	648,40	539,33	626,23
200	5/60	81,21	100,12	53,03	51,69	387,81	661,11
	5.25/60	582,73	546,65	502,70	929,24	890,92	712,66

Tabela 5: Erro em metros para falta trifásica

Distância [km]	Instante [ms]	Resistência [Ω]					
		0	1	5	10	50	100
20	5/60	56,96	61,49	11,79	31,06	178,30	102,58
	5.25/60	30,65	37,49	54,25	52,36	135,52	100,44
40	5/60	13,28	61,31	147,35	130,63	83,50	102,14
	5.25/60	19,76	27,93	12,40	9,47	100,25	69,46
60	5/60	7,56	20,85	42,78	128,46	155,47	120,16
	5.25/60	23,20	26,15	17,01	1,79	74,10	94,92
80	5/60	9,22	22,83	70,60	94,85	61,14	131,26
	5.25/60	244,52	233,07	134,00	84,11	58,22	115,32
100	5/60	81,76	74,93	30,54	17,27	108,00	133,75
	5.25/60	187,64	208,41	233,59	210,44	110,20	126,34
120	5/60	52,28	43,88	38,91	79,91	97,29	129,03
	5.25/60	10,15	8,75	20,82	60,93	108,39	129,01
140	5/60	154,69	166,31	157,10	138,43	93,82	118,43
	5.25/60	20,66	17,53	33,11	49,29	103,79	128,12
160	5/60	144,41	140,82	118,11	111,38	104,02	104,15
	5.25/60	13,71	6,96	43,15	85,05	95,01	125,00
180	5/60	188,58	183,30	120,93	32,34	5,79	88,00
	5.25/60	117,11	135,95	179,28	182,23	189,18	115,86
200	5/60	65,40	50,25	8,56	52,04	67,54	69,65
	5.25/60	116,21	133,07	165,75	165,17	80,66	97,49

Na Tabela 4, os resultados são em media maiores quando a falta está localizada perto do terminal remoto mas geral não existe uma tendência definida dentro desses resultados.

Finalmente, na Tabela 5, só para o valor de resistência de 0 [Ω] é possível dizer que para o instante de ocorrência da falta de 5/60 [ms] é menor do que no instante 5.25/60 [ms] em quase todos os casos. Em geral esse resultados também não possuem uma tendência definida, sendo eles aleatórios.

4.3.5 Análise estatística

Essa seção apresenta os resultados estatísticos para todas as simulações considerando que não existe erros na estimação dos parâmetros da linha de transmissão, na estimação dos fasores, excetuando-se erros decorrentes da RSS e da presença da componente exponencial amortecida, e no tempo de sincronização entre os terminais da linha.

A Tabela 6 apresenta os erros de localização nas faltas para todos os casos de simulação. Para faltas fase-terra o erro médio é 817 [m], para faltas dupla-fase é 301 [m], para faltas dupla-fase-terra é 298 [m] e para faltas trifásicas é 90 [m]. As diferenças de erro para cada um dos tipos de falta decorrem das diferentes funções de otimização empregadas (i. e. a formulação da Equação 30 é personalizada para cada tipo de falta), bem como da magnitude da RSS e da componente exponencial amortecida, que interferem no cálculo

da impedância equivalente da CS. Porém, é importante ressaltar que o erro máximo é aproximadamente 2100 [m] que representa somente o 0.95% do comprimento total da linha de transmissão sendo notavelmente pequeno.

Tabela 6: Resultados da localização de falta

Tipo de falta	Erro [m]			Desvio padrão [m]
	Mínimo	Máximo	Média	
LG	19	2087	817	432
LL	9	1697	301	275
LLG	8	1005	298	229
LLL	2	245	90	59

4.3.6 Análise de sensibilidade

Essa seção apresenta a análise de sensibilidade do método proposto com relação a erros nos parâmetros da linha, nos valores dos fasores de tensões e correntes, bem como no tempo de sincronização entre os terminais.

4.3.6.1 Influência dos erros nos parâmetros das linhas

A precisão do algoritmo de localização de falta foi investigada diante de erros nos parâmetros da linha. Para proceder com a investigação, foram usados diferentes parâmetros de entrada para o algoritmo proposto daqueles usados nas simulações do ATP. Esses parâmetros foram calculados usando a configuração da torre da Figura 24, porém com os condutores posicionados dois metros acima e afastados em mais dois metros. Além disso foi utilizada uma resistividade de solo de 1000 [Ωm] ao invés de 400 [Ωm].

A Tabela 7 apresenta os erros para todas as simulações descritas. O algoritmo proposto apresenta erros menores de 2700 [m] para faltas fase-terra, menores de 1610 [m] para dupla-fase e dupla-fase-terra, e menores de 920 [m] para faltas trifásicas.

Tabela 7: Resultados da localização de falta - erros nos parâmetros da linha

Tipo de falta	Erro [m]			Desvio padrão [m]
	Mínimo	Máximo	Média	
LG	11	2685	878	607
LL	4	1608	414	347
LLG	11	1306	420	321
LLL	3	911	272	212

4.3.6.2 Influência dos erros nos fasores

Além da investigação na precisão no algoritmo de localização de faltas diante dos erros na estimação dos parâmetros da linha, também foi feita uma investigação da sua

precisão diante de erros na estimação dos fasores. O método consistiu em adicionar arbitrariamente a cada fasor $\dot{U}$ outra quantidade fasorial ($\dot{U}_{erro}$) com amplitude média de 0.5% e um desvio padrão de 0.25% do fasor original e uma fase aleatória entre -180° e $+180^\circ$, conforme descrito em (IEEE STD C37.118.1, 2011) e:

$$\dot{U}' = \dot{U} + \mathcal{N}(0.5, 0.0625) |\dot{U}| \{ \cos [\mathcal{N}(0, 1)2\pi] + j \sin [\mathcal{N}(0, 1)2\pi] \} \quad (39)$$

Onde:

$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$: Distribuição padrão de Gauss.

$\dot{U}'$: Quantidade fasorial modificada (tensões e correntes).

A Tabela 8 apresenta os erros para todas as simulações descritas. O algoritmo proposto apresenta erros menores de 3300 [m] para faltas fase-terra, menores de 1850 [m] para dupla-fase e dupla-fase-terra, e menores de 1100 [m] para faltas trifásicas.

Tabela 8: Resultados da localização de falta - erros na estimação do fasor

Tipo de falta	Erro [m]			Desvio padrão [m]
	Mínimo	Máximo	Média	
LG	5	3246	865	535
LL	5	1827	406	422
LLG	1	1850	453	412
LLL	5	1063	196	184

4.3.6.3 Influência dos erros no tempo de sincronização

Embora seja possível sincronizar ambas quantidades fasoriais em cada terminal da linha, como em (HUSSAIN; OSMAN, 2014), neste trabalho foi investigada a precisão do algoritmo de localização proposto, diante da influência do tempo de sincronização entre ambos terminais. O método consiste em multiplicar arbitrariamente as quantidades fasoriais no terminal remoto por um fasor de magnitude unitária e fase aleatória de uma distribuição normal com média de 0 amostras e desvio padrão de $1/2$ amostra (todas as simulações foram feitas usando um período de amostragem de 0.520 [ms], $n_s = 32$ amostras por ciclo de 60 [Hz]), como em:

$$\dot{U}' = \dot{U} + \left\{ \cos \left[\mathcal{N}(0.5, 0.25) \frac{2\pi}{n_s} \right] + j \sin \left[\mathcal{N}(0.5, 0.25) \frac{2\pi}{n_s} \right] \right\} \quad (40)$$

A Tabela 9 apresenta os erros para todas as simulações descritas. O algoritmo proposto apresenta erros menores de 3000 [m] para faltas fase-terra, menores de 1610 [m] para dupla-fase e dupla-fase-terra, e menores de 1900 [m] para faltas trifásicas.

Tabela 9: Resultados da localização de falta - erros nos tempos de sincronização

Tipo de falta	Erro [m]			Desvio padrão [m]
	Mínimo	Máximo	Média	
LG	0	2961	844	513
LL	1	1603	383	351
LLG	3	1364	368	329
LLL	0	1893	207	285

Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo de localização de faltas para linhas compensadas em série, capaz de localizar corretamente os pontos de ocorrência da falta usando medições de tensões e correntes fornecidas por IED instalados em ambos terminais da linha.

O algoritmo lida com qualquer topologia de linha de transmissão pois é baseado na solução trifásica do problema, e é independente da posição do compensador série. Além disso, não é afetado pela impedância de falta.

O algoritmo apresentou erros pequenos para as simulações feitas, mesmo na presença de erros forçados. Este comportamento evidencia o alto nível de precisão do algoritmo.

Na análise de sensibilidade notou-se que os erros forçados são em media menores a 1 $[km]$ para cada um dos casos e não tem uma repercussão significativa nos resultados com incremento de só umas centenas de metros em relação ao caso ideal. Para o caso ideal, os erros obtidos são uma acumulação de erros de cada uma das etapas de processamento de dados do algoritmo.

Sugere-se como tema para trabalhos futuros o estudo aprofundado dos novos esquemas de compensação que usam compensadores série controlados para avaliar o seu impacto nos sistemas de proteção convencionais e nos algoritmos de localização de faltas existentes.

Referências

- ABB INC. **REL 512 Line Protection and Breaker Control Terminal Instruction Booklet**. 2003. <https://library.e.abb.com/public/21ace4da7fabbe6485256f330061498c/IB40-512a%20%20%20%20REL512%20IB%20V1.0%20-%201.61.pdf>. Acessado em: 2016-09-15.
- AL-DABBAGH, M.; KAPUDUWAGE, S. K. Using instantaneous values for estimating fault locations on series compensated transmission lines. **Electric Power Systems Research**, 2005. Elsevier, v. 76, n. 1, p. 25–32, 2005.
- ANDRADE, L. D.; LEÃO, T. P. de. Impedance-based fault location analysis for transmission lines. In: **Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES**. Orlando, FL: IEEE Power & Energy Society, 2012. p. 1–6.
- BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Enhanced phasor estimation technique for fault location in series-compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2015. v. 30, n. 4, p. 2058–2060, 2015.
- BOWMAN, W.; MCNAMEE, J. Development of equivalent pi and t matrix circuits for long untransposed transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1964. IEEE, v. 83, n. 6, p. 625–632, 1964.
- CHUDASAMA, M. C.; KULKARNI, A. M. Dynamic phasor analysis of ssr mitigation schemes based on passive phase imbalance. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2011. IEEE, v. 26, n. 3, p. 1668–1676, 2011.
- CLARK, K. Overview of subsynchronous resonance related phenomena. In: **Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D), 2012 IEEE PES**. Orlando, FL: IEEE Power & Energy Society, 2012. p. 1–3.
- DASH, P.; SAMANTARAY, S.; PANDA, G. Fault classification and section identification of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine. **IEEE transactions on power delivery**, 2007. IEEE, v. 22, n. 1, p. 67–73, 2007.
- DASH, P.; SAMANTRAY, S. Phase selection and fault section identification in thyristor controlled series compensated line using discrete wavelet transform. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2004. Elsevier, v. 26, n. 9, p. 725–732, 2004.

- DEIHIMI, A.; SOLAT, A. Optimized echo state networks using a big bang–big crunch algorithm for distance protection of series-compensated transmission lines. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2014. Elsevier, v. 54, p. 408–424, 2014.
- DOBSA, J.; MAUCHLE, P.; PFYL, W.; SADEK, K. **Reactive power compensator with capacitor and capacitor discharge circuit**. January 1986. US Patent number 4567424. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US4567424>>.
- EL-ZONKOLY, A. M.; DESOUKI, H. Wavelet entropy based algorithm for fault detection and classification in facts compensated transmission line. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2011. Elsevier, v. 33, n. 8, p. 1368–1374, 2011.
- FRONTIN, S. O. et al. **Equipamentos de alta tensão–prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Goya Editora, 2013.
- GE MULTILIN. **DDFR Distributed Digital Fault Recorder Instruction Manual – V.3.0**. 2011. <https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/ddfr.htm>. Acessado em: 15/09/2016.
- GENERAL ELECTRIC. **Series Compensation Systems**. 2016. http://www.gegridsolutions.com/powerd/catalog/series_comp.htm. Acessado em: 2016-09-15.
- GIRGIS, A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. L. A new fault location technique for two-and three-terminal lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1992. IEEE, v. 7, n. 1, p. 98–107, 1992.
- GOLDSWORTHY, D. L. A linearized model for MOV-protected series capacitors. **IEEE Transactions on Power systems**, 1987. IEEE, v. 2, n. 4, p. 953–957, 1987.
- GYUGYI, L. Solid-state control of electric power in AC transmission systems. In: **International Symposium on Electrical Energy Conversion in Power Systems**. Capri, Itália: Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, 1989.
- GYUGYI, L.; SCHAUDER, C. D.; SEN, K. K. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines. **IEEE Transactions on power delivery**, 1997. IEEE, v. 12, n. 1, p. 406–417, 1997.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 2000. 432 p.
- HOOKE, R.; JEEVES, T. A. “Direct Search” solution of numerical and statistical problems. **Journal of the Association for Computing Machinery (ACM)**, 1961. v. 8, n. 2, p. 212–229, 1961.
- HUSSAIN, S.; OSMAN, A. Fault location on series and shunt compensated lines using unsynchronized measurements. **Electric Power Systems Research**, 2014. v. 116, p. 166–173, 2014.
- IEEE STD C37.118.1. **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)**. New York, 2011. 1-61 p.

IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE TASK FORCE. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1977. v. 96, n. 5, p. 1565–1572, September 1977. Dynamic System Performance Working Group – Power System Engineering Committee.

IZYKOWSKI, J. et al. Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011. IEEE, v. 26, n. 4, p. 2072–2080, 2011.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. **IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution**, 1990. v. 137, n. 6, p. 395–402, 1990.

JOVCIC, D.; PILLAI, G. Analytical modeling of TCSC dynamics. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. v. 20, n. 2, p. 1097–1104, 2005.

KARADY, G. G. et al. Continuously regulated series capacitor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1993. v. 8, n. 3, p. 1348–1355, 1993.

KEZUNOVIĆ, M.; MRKIĆ, J.; PERUNIČIĆ, B. An accurate fault location algorithm using synchronized sampling. **Electric Power Systems Research**, 1994. v. 29, n. 3, p. 161–169, 1994.

KUMAR, L. S.; GHOSH, A. Static synchronous series compensator — design, control and application. **Electric Power Systems Research**, 1999. v. 49, n. 2, p. 139–148, 1999.

MALISZEWSKI, R. et al. Power flow control in a highly integrated transmission network. **Anais do CIGRÉ**, 1990. p. 37–03, 1990.

MANASSERO, G. Jr. **Sistema para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Subestações Conectadas em Derivação**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.

MANASSERO, G. Jr.; SANTO, S. G. D.; ROJAS, D. G. Fault location in series-compensated transmission lines based on heuristic method. **Electric Power Systems Research**, 2016. v. 140, p. 950 – 957, 2016.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems**. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 2002. 518 p.

MILLER, T. J. E.; CONCORDIA, C. **Reactive power control in electric systems**. New York: Wiley-Interscience, 1982. 381 p.

NOVOSEL, D. et al. Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1996. v. 11, n. 4, p. 1728–1736, 1996.

_____. Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines. In: UNIVERSITY OF NOTTINGHAM AND INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS – POWER DIVISION. **Sixth International Conference on Developments in Power System Protection**. England, 1997. p. 18–23. Conf. Publ. No. 434.

- REYES-ARCHUNDIA, E.; MORENO-GOYTIA, E.; GUARDADO, J. An algorithm based on traveling waves for transmission line protection in a TCSC environment. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2014. v. 60, p. 367–377, 2014.
- SACHDEV, M.; AGARWAL, R. A technique for estimating transmission line fault locations from digital impedance relay measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1988. v. 3, n. 1, p. 121–129, 1988.
- SADEH, J.; ADINEHZADEH, A. Accurate fault location algorithm for transmission line in the presence of series connected FACTS devices. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2010. Elsevier, v. 32, n. 4, p. 323–328, 2010.
- SEN, K. K. SSSC-static synchronous series compensator: theory, modeling, and application. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1998. v. 13, n. 1, p. 241–246, 1998.
- SHANKAR, C. U.; THOTTUNGAL, R.; PRIYA, C. S. Enhancement of transient stability and dynamic power flow control using Thyristor Controlled Series Capacitor. In: IEEE. **Intelligent Systems and Control (ISCO), 2015 IEEE 9th International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1–6.
- SIEMENS. **SIMEAS R - Digital Fault Recorder with PowerQuality (PQ) or Phasor Measurement Unit (PMU)**. 2011. www.siemens.com/download?DLA03_6032. Acessado em: 2016-09-15.
- SONG, Y.-H.; JOHNS, A. **Flexible AC transmission systems (FACTS)**. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 610 p.
- TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1982. n. 8, p. 2892–2898, 1982.
- YU, C.-S. et al. A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2002. v. 17, n. 1, p. 33–46, 2002.

Anexos

Localização de faltas em linhas de transmissão com uso de dispositivos FACTS

A.1 Introdução

Nas últimas décadas, os compensadores série controlados tem-se tornado uma solução efetiva para vários problemas dos sistemas interligados. Esses dispositivos têm sido usados atualmente para várias aplicações e trazem os seguintes benefícios (MILLER; CONCORDIA, 1982; SONG; JOHNS, 1999):

- ☐ Incremento da capacidade de transferência de linhas de transmissão existentes;
- ☐ Melhora da condições de regime do sistema e os limites dinâmicos de estabilidade;
- ☐ Melhora no amortecimento dos diferentes tipos de oscilações;
- ☐ Melhora da estabilidade de tensão;
- ☐ Redução do problema da RSS; e
- ☐ Melhora das ligações de linhas de alta tensão em CC.

No entanto, poucos estudos tem sido feitos sobre o efeito dos compensadores série controlados, no desempenho da localização de faltas em linhas de transmissão (AL-DABBAGH; KAPUDUWAGE, 2005; NOVOSEL et al., 1996; YU et al., 2002; SADEH; ADINEHZADEH, 2010). A maioria das técnicas usam o modelamento da compensação série que introduz um erro pela falta de precisão no modelo e/ou na incerteza do modo de operação do compensador. O objetivo principal de (NOVOSEL et al., 1996) é desenvolver um método baseado em redes neurais artificiais e um método determinístico para estimar a tensão sob o arranjo do CS usando a corrente de linha.

Em 2004, (DASH; SAMANTRAY, 2004) propuseram um algoritmo capaz de detetar se a falta está localizada antes ou depois do TCSC levando em consideração as componentes mais altas do espectro de frequência. Em 2007, (DASH; SAMANTARAY; PANDA, 2007) usaram as harmônicas de terceira e quinta ordens produzidas pelo TCSC e uma técnica de *support vector machine* para localizar e classificar as faltas em linhas de transmissão com compensação série controlada. Em 2011, (EL-ZONKOLY; DESOUKI, 2011) usaram uma técnica chamada *wavelet entropy* aplicada às tensões e correntes medidas pelo IED para detectar faltas em linhas de transmissão com compensação série do tipo SSSC. Em (REYES-ARCHUNDIA; MORENO-GOYTIA; GUARDADO, 2014) é proposto um algoritmo baseado em ondas viajantes que detecta mudanças na magnitude e frequência dos sinais medidos em linhas de transmissão com compensação série do tipo TCSC. Finalmente em (DEIHIMI; SOLAT, 2014), foi proposto um algoritmo que usa um método de otimização chamado *big bang-big crunch* para localizar faltas em linhas de transmissão com compensação série do tipo TCSC sem a necessidade do conhecimento dos parâmetros do dispositivo de compensação.

Neste anexo é apresentada a simulação de um sistema de transmissão com compensação série controlada do tipo TCSC, com o objetivo de avaliar as constantes de tempo envolvidas e verificar a necessidade de se modelar esse tipo de compensação para algoritmos de localização de faltas.

Esse sistema foi feito em MATLAB a partir do modelo desenvolvido na referência (JOVCIC; PILLAI, 2005) e conta com uma linha de transmissão compensada por TCSC conectada a uma fonte de tensão em cada terminal. A Figura 28 ilustra o unifilar desse sistema, cuja linha de transmissão é representada por uma resistência e reatância concentradas, em concordância com os estudos de RSS descritos na referência (IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE TASK FORCE, 1977).

Figura 27: Diagrama do sistema de estudo com TCSC

Figura 28: Fonte: (JOVCIC; PILLAI, 2005) (Adaptado)

Cada fase da unidade do TCSC é composta por um capacitor série em paralelo com um reator controlado por tiristores. O TCSC é controlado com a variação do atraso de fase dos pulsos de disparo do tiristor e sincronizado através de um *phase locked loop* na forma de onda da corrente de linha. O controlador é do tipo PI com filtro de retroalimentação e compensador série.

A simulação desse sistema foi feita para se observar o comportamento dinâmico do TCSC. Sendo assim, a Figura 32 ilustra os resultados da simulação com os gráficos da potência de transferência conforme a variação do ângulo de disparo do tiristor.

O TCSC está em modo de controle capacitivo com impedância de referência em 128 $[\Omega]$. Para os primeiros 0.5 segundos, o TCSC está em curto e a potência de transferência é 110 [MW]. Em 0.5 segundos o TCSC começa a regular a impedância para 128 $[\Omega]$ o que gera um aumento de transferência de potência para 610 [MW]. O ângulo de disparo começa nos 90° para habilitar a menor perturbação de comutação na linha.

Figura 29: Resultado da simulação do TCSC

Figura 30: Fonte: (JOVCIC; PILLAI, 2005) (Adaptado)

Como se pode observar nessa figura a compensação série controlada do tipo TCSC possui tempo de resposta do controlador de cerca de 200 a 300 [ms], como mostrado na Figura 32 na janela de resposta do sistema. Isso significa que a impedância desse arranjo para um ciclo após a ocorrência de um curto-circuito, praticamente não se altera

e, portanto é possível usar o algoritmo proposto como se essa compensação série fosse do tipo fixa.

Simulação do sistema de transmissão no ATP

B.1 Arquivo de entrada do ATP <.ATP>

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  October, Wednesday 22, 2014
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C fault_type = 3
C phases_involved = 30
C x_falta = 20
C t_falta = 8.3333E-02
C r_falta = 0.001
ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY
$DUMMY, XYZ000
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
5.208E-6      .5      60.
      100      100      0      0      1      0      0      1      0
/MODELS
MODELS
INPUT
MM0001 {v(010L2A)}
MM0002 {v(020L2A)}
MM0003 {i(CRZ21A)}
MM0004 {v(010L2B)}
MM0005 {v(020L2B)}
MM0006 {i(CRZ21B)}
MM0007 {v(010L2C)}
MM0008 {v(020L2C)}
MM0009 {i(CRZ21C)}
MM0010 {v(010L1A)}
MM0011 {v(020L1A)}
MM0012 {i(CRZ11A)}
MM0013 {v(010L1B)}
MM0014 {v(020L1B)}
MM0015 {i(CRZ11B)}
MM0016 {v(010L1C)}
MM0017 {v(020L1C)}

```

```

MM0018 {i(CRZ11C)}
MM0019 {v(040L2A)}
MM0020 {v(050L2A)}
MM0021 {i(CRZ22A)}
MM0022 {v(040L2B)}
MM0023 {v(050L2B)}
MM0024 {i(CRZ22B)}
MM0025 {v(040L2C)}
MM0026 {v(050L2C)}
MM0027 {i(CRZ22C)}
MM0028 {v(040L1A)}
MM0029 {v(050L1A)}
MM0030 {i(CRZ12A)}
MM0031 {v(040L1B)}
MM0032 {v(050L1B)}
MM0033 {i(CRZ12B)}
MM0034 {v(040L1C)}
MM0035 {v(050L1C)}
MM0036 {i(CRZ12C)}

```

OUTPUT

```

GAP21A
GAP21B
GAP21C
GAP11A
GAP11B
GAP11C
GAP22A
GAP22B
GAP22C
GAP12A
GAP12B
GAP12C

```

MODEL FLASH_1

```

comment *****
*
*   Function: set or cancel the gap firing control signal
*
*   Inputs  : voltage and current across ZnO resistor
*
*   Output  : the firing signal to the electrical ZnO component
*
*
***** endcomment

```

```

INPUT  V1    -- Voltage on positive side of ZNO      [V]
        V2    -- Voltage of negative side of ZNO     [V]
        iczn  -- ZNO current                          [Amps]

DATA    Pset  -- power setting                        [Megajoules/msec]
        Eset  -- energy setting                       [Megajoules]
        fdel  -- firing delay                         [msec]
        fdur  -- firing duration                      [msec]

VAR     power -- power into ZnO resistor              [Watts]
        trip  -- gap firing control signal            [0 or 1]
        energy -- energy into ZnO resistor            [Joules]
        tfire -- time at which the gap was last fired [sec]
        vcap  -- voltage difference across series caps [Volts]

```

OUTPUT trip

```

HISTORY INTEGRAL(power) {DFLT:0}

INIT trip:=0
    tfire:=0
ENDINIT

EXEC
-----
vcap:=V1-V2
power:=vcap*iczn
energy:=INTEGRAL(power)
-----
IF trip>0                -- is already firing
AND t-tfire>fdur*1.e-3  -- has exceeded firing duration
THEN
    trip:=0              -- cancel the firing signal
    tfire:=0             -- null the firing time
ENDIF
-----
IF trip=0                -- is not signaling to fire
AND tfire=0              -- firing condition not yet detected
AND (    power >= Pset * 1.e9  -- power setting exceeded
      OR energy >= Eset * 1.e6 ) -- energy setting exceeded
THEN
    tfire:=t             -- set the firing detection time
ENDIF
-----
IF trip=0                -- is not signaling to fire
AND tfire>0              -- firing condition has been detected
AND t-tfire>fdel*1.e-3  -- firing delay exceeded
THEN
    trip:=1              -- set the firing signal
ENDIF
-----
ENDEXEC

ENDMODEL
USE FLASH_1 AS FLASH21A
INPUT
    V1:= MM0001
    V2:= MM0002
    iczn:= MM0003
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=       60.
    fdel:=     16.67
    fdur:=     1.E4
OUTPUT
    GAP21A:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH21B
INPUT
    V1:= MM0004
    V2:= MM0005
    iczn:= MM0006
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=       60.
    fdel:=     16.67

```

```

    fdur:=      1.E4
OUTPUT
    GAP21B:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH21C
INPUT
    V1:= MM0007
    V2:= MM0008
    iczn:= MM0009
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=      60.
    fdel:=      16.67
    fdur:=      1.E4
OUTPUT
    GAP21C:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH11A
INPUT
    V1:= MM0010
    V2:= MM0011
    iczn:= MM0012
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=      60.
    fdel:=      16.67
    fdur:=      1.E4
OUTPUT
    GAP11A:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH11B
INPUT
    V1:= MM0013
    V2:= MM0014
    iczn:= MM0015
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=      60.
    fdel:=      16.67
    fdur:=      1.E4
OUTPUT
    GAP11B:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH11C
INPUT
    V1:= MM0016
    V2:= MM0017
    iczn:= MM0018
DATA
    Pset:=      1.0805
    Eset:=      60.
    fdel:=      16.67
    fdur:=      1.E4
OUTPUT
    GAP11C:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH22A
INPUT
    V1:= MM0019

```

```
V2:= MM0020
iczn:= MM0021
DATA
  Pset:=      1.0805
  Eset:=      60.
  fdel:=      16.67
  fdur:=      1.E4
OUTPUT
  GAP22A:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH22B
INPUT
  V1:= MM0022
  V2:= MM0023
  iczn:= MM0024
DATA
  Pset:=      1.0805
  Eset:=      60.
  fdel:=      16.67
  fdur:=      1.E4
OUTPUT
  GAP22B:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH22C
INPUT
  V1:= MM0025
  V2:= MM0026
  iczn:= MM0027
DATA
  Pset:=      1.0805
  Eset:=      60.
  fdel:=      16.67
  fdur:=      1.E4
OUTPUT
  GAP22C:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH12A
INPUT
  V1:= MM0028
  V2:= MM0029
  iczn:= MM0030
DATA
  Pset:=      1.0805
  Eset:=      60.
  fdel:=      16.67
  fdur:=      1.E4
OUTPUT
  GAP12A:=trip
ENDUSE
USE FLASH_1 AS FLASH12B
INPUT
  V1:= MM0031
  V2:= MM0032
  iczn:= MM0033
DATA
  Pset:=      1.0805
  Eset:=      60.
  fdel:=      16.67
  fdur:=      1.E4
```

OUTPUT

GAP12B:=trip

ENDUSE

USE FLASH_1 AS FLASH12C

INPUT

V1:= MM0034

V2:= MM0035

iczn:= MM0036

DATA

Pset:= 1.0805

Eset:= 60.

fdel:= 16.67

fdur:= 1.E4

OUTPUT

GAP12C:=trip

ENDUSE

RECORD

FLASH21A.vcap AS VCAP3A

FLASH21A.power AS PZN3A

FLASH21A.energy AS EZN3A

FLASH21A.trip AS GAP3A

FLASH11A.vcap AS VCAP1A

FLASH11A.power AS PZN1A

FLASH11A.energy AS EZN1A

FLASH11A.trip AS GAP1A

FLASH22A.vcap AS VCAP4A

FLASH22A.power AS PZN4A

FLASH22A.energy AS EZN4A

FLASH22A.trip AS GAP4A

FLASH12A.vcap AS VCAP2A

FLASH12A.power AS PZN2A

FLASH12A.energy AS EZN2A

FLASH12A.trip AS GAP2A

ENDMODELS

C	1	2	3	4	5	6	7	8
C	34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890							
/BRANCH								
C	< n1 >	< n2 >	<ref1>	<ref2>	< R	>	< L	>
C	Capacitor serie - L1 (15%)							
	010L1A020L1A			245.46				0
	010L1B020L1B			245.46				0
	010L1C020L1C			245.46				0
C	Capacitor serie - L2 (15%)							
	010L2A020L2A			245.46				0
	010L2B020L2B			245.46				0
	010L2C020L2C			245.46				0
C	Capacitor serie - R1 (15%)							
	040L1A050L1A			245.46				0
	040L1B050L1B			245.46				0
	040L1C050L1C			245.46				0
C	Capacitor serie - R2 (15%)							
	040L2A050L2A			245.46				0
	040L2B050L2B			245.46				0
	040L2C050L2C			245.46				0
C	Limitador de corrente para o MOV 11							
	CRZ11ACRM11A		.01					1
	CRZ11BCRM11B		.01					1
	CRZ11CCRM11C		.01					1
C	Limitador de corrente para o MOV 12							

CRZ12ACRM12A	.01			1
CRZ12BCRM12B	.01			1
CRZ12CCRM12C	.01			1
C Limitador de corrente para o MOV 21				
CRZ21ACRM21A	.01			1
CRZ21BCRM21B	.01			1
CRZ21CCRM21C	.01			1
C Limitador de corrente para o MOV 22				
CRZ22ACRM22A	.01			1
CRZ22BCRM22B	.01			1
CRZ22CCRM22C	.01			1
C Limitador de corrente para o GAP 11				
X0001A020L1A	1.4244	.0738		0
X0001B020L1B	1.4244	.0738		0
X0001C020L1C	1.4244	.0738		0
X0001A020L1A	200.			0
X0001B020L1B	200.			0
X0001C020L1C	200.			0
C Limitador de corrente para o GAP 12				
X0003A050L1A	1.4244	.0738		0
X0003B050L1B	1.4244	.0738		0
X0003C050L1C	1.4244	.0738		0
X0003A050L1A	200.			0
X0003B050L1B	200.			0
X0003C050L1C	200.			0
C Limitador de corrente para o GAP 21				
X0002A020L2A	1.4244	.0738		0
X0002B020L2B	1.4244	.0738		0
X0002C020L2C	1.4244	.0738		0
X0002A020L2A	200.			0
X0002B020L2B	200.			0
X0002C020L2C	200.			0
C Limitador de corrente para o GAP 22				
X0004A050L2A	1.4244	.0738		0
X0004B050L2B	1.4244	.0738		0
X0004C050L2C	1.4244	.0738		0
X0004A050L2A	200.			0
X0004B050L2B	200.			0
X0004C050L2C	200.			0
C MOV 11				
92CRM11A020L1A		5555.		0
	77122.		-1.	1
/BRANCH				
	1.0		40.	.80
	9999.			
92CRM11B020L1BCRM11A020L1A		5555.		0
92CRM11C020L1CCRM11A020L1A		5555.		0
C MOV 12				
92CRM12A050L1A		5555.		0
	77122.		-1.	1
/BRANCH				
	1.0		40.	.80
	9999.			
92CRM12B050L1BCRM12A050L1A		5555.		0
92CRM12C050L1CCRM12A050L1A		5555.		0
C MOV 21				
92CRM21A020L2A		5555.		0
	77122.		-1.	1
/BRANCH				

```

1.0 40. .80
9999.
92CRM21B020L2BCRM21A020L2A 5555. 0
92CRM21C020L2CCRM21A020L2A 5555. 0
C MOV 22
92CRM22A050L2A 5555. 0
77122. -1. 1
/BRANCH
1.0 40. .80
9999.
92CRM22B050L2BCRM22A050L2A 5555. 0
92CRM22C050L2CCRM22A050L2A 5555. 0
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C Resistencias de falta
C RA
RFA RN 0.001 1
C RB
RFB RN 0.001 1
C RC
RFC RN 0.001 1
C RN
RG 5. 0
C Matriz de Impedancia Equivalente-LOCAL
51SRC1A 0010A 1.488 14.321
52SRC1B 0010B .93282 3.5847 1.488 14.321
53SRC1C 0010C .93282 3.5847.93282 3.5847 1.488 14.321
C Matriz de Impedancia Equivalente-REMOTO
510050A SRC2A .76283 12.229
520050B SRC2B .25404 .24.76283 12.229
530050C SRC2C .25404 .24.25404 .24.76283 12.229
C Impedancias para resolver problemas de integracao da simulacao
030L2A 1.E6 0
030L2B 1.E6 0
030L2C 1.E6 0
010L1A020L1A 1.E6 0
010L1B020L1B 1.E6 0
010L1C020L1C 1.E6 0
010L2A020L2A 1.E6 0
010L2B020L2B 1.E6 0
010L2C020L2C 1.E6 0
040L2A050L2A 1.E6 0
040L2B050L2B 1.E6 0
040L2C050L2C 1.E6 0
040L1A050L1A 1.E6 0
040L1B050L1B 1.E6 0
040L1C050L1C 1.E6 0
C Linha de transmissao - Trecho LOCAL - FALTA (20-30)
$VINTAGE, 1
-1020L1A030L1A 6.56591E-01 9.16748E+02 1.88741E+05-2.00000E+01 1 6
-2020L1B030L1B 2.91745E-02 2.95600E+02 2.89587E+05-2.00000E+01 1 6
-3020L1C030L1C 2.27334E-02 3.00698E+02 2.93983E+05-2.00000E+01 1 6
-4020L2A030L2A 2.24607E-02 2.45013E+02 2.97241E+05-2.00000E+01 1 6
-5020L2B030L2B 2.20164E-02 2.13899E+02 2.97583E+05-2.00000E+01 1 6
-6020L2C030L2C 2.21111E-02 2.23791E+02 2.97727E+05-2.00000E+01 1 6
$VINTAGE, 0
0.37354948 0.51965520 -0.27063937 -0.52521940 -0.36768239 -0.27907161
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.30517859 -0.00086752 -0.36011236 -0.18634881 0.55772257 0.57964030
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000

```



```

0.51703657 -0.47953907 -0.54504442 0.43522258 -0.23185166 -0.29348962
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.37354948 0.51965520 0.27063937 0.52521940 0.36768239 -0.27907161
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.30517859 -0.00086752 0.36011236 0.18634881 -0.55772257 0.57964030
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.51703657 -0.47953907 0.54504442 -0.43522258 0.23185166 -0.29348962
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
C Linha de transmissao - Trecho FALTA - REMOTO (30-40)
$VINTAGE, 1
-1030L1A040L1A          6.56591E-01 9.16748E+02 1.88741E+05-2.00000E+02 1 6
-2030L1B040L1B          2.91745E-02 2.95600E+02 2.89587E+05-2.00000E+02 1 6
-3030L1C040L1C          2.27334E-02 3.00698E+02 2.93983E+05-2.00000E+02 1 6
-4030L2A040L2A          2.24607E-02 2.45013E+02 2.97241E+05-2.00000E+02 1 6
-5030L2B040L2B          2.20164E-02 2.13899E+02 2.97583E+05-2.00000E+02 1 6
-6030L2C040L2C          2.21111E-02 2.23791E+02 2.97727E+05-2.00000E+02 1 6
$VINTAGE, 0
0.37354948 0.51965520 -0.27063937 -0.52521940 -0.36768239 -0.27907161
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.30517859 -0.00086752 -0.36011236 -0.18634881 0.55772257 0.57964030
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.51703657 -0.47953907 -0.54504442 0.43522258 -0.23185166 -0.29348962
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.37354948 0.51965520 0.27063937 0.52521940 0.36768239 -0.27907161
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.30517859 -0.00086752 0.36011236 0.18634881 -0.55772257 0.57964030
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.51703657 -0.47953907 0.54504442 -0.43522258 0.23185166 -0.29348962
0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000 0.00000000
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C Chaves de medicao
0010A 010L1A          MEASURING          1
0010B 010L1B          MEASURING          1
0010C 010L1C          MEASURING          1
0010A 010L2A          MEASURING          1
0010B 010L2B          MEASURING          1
0010C 010L2C          MEASURING          1
0050A 050L1A          MEASURING          1
0050B 050L1B          MEASURING          1
0050C 050L1C          MEASURING          1
0050A 050L2A          MEASURING          1
0050B 050L2B          MEASURING          1
0050C 050L2C          MEASURING          1
C Chave em serie com o MOV 11
010L1ACRZ11A          -1.          10.          0
010L1BCRZ11B          -1.          10.          0
010L1CCRZ11C          -1.          10.          0
C Chave em serie com o MOV 12
040L1ACRZ12A          -1.          10.          0
040L1BCRZ12B          -1.          10.          0
040L1CCRZ12C          -1.          10.          0
C Chave em serie com o MOV 21
010L2ACRZ21A          -1.          10.          0
010L2BCRZ21B          -1.          10.          0
010L2CCRZ21C          -1.          10.          0
C Chave em serie com o MOV 22
040L2ACRZ22A          -1.          10.          0
040L2BCRZ22B          -1.          10.          0

```

```

040L2CCRZ22C      -1.      10.      0
C Chave que emula o GAP 11
13010L1AX0001A      CLOSED      GAP11A      0
13010L1BX0001B      GAP11B      0
13010L1CX0001C      GAP11C      0
C Chave que emula o GAP 12
13040L1AX0003A      CLOSED      GAP12A      0
13040L1BX0003B      GAP12B      0
13040L1CX0003C      GAP12C      0
C Chave que emula o GAP 21
13010L2AX0002A      CLOSED      GAP21A      0
13010L2BX0002B      GAP21B      0
13010L2CX0002C      GAP21C      0
C Chave que emula o GAP 22
13040L2AX0004A      CLOSED      GAP22A      0
13040L2BX0004B      GAP22B      0
13040L2CX0004C      GAP22C      0
C Chave que emula a falta
030L2ARFA      8.3333E-02      10.      0
030L2BRFB      8.3333E-02      10.      0
030L2CRFC      8.3333E-02      10.      0
RN      RG      10.      -1.      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
C VSRC2
14SRC2A      377221.42      60.      -1.      100.
14SRC2B      377221.42      60.      -120.      -1.      100.
14SRC2C      377221.42      60.      -240.      -1.      100.
C VSRC1
14SRC1A      359258.496      60.      -20.      -1.      100.
14SRC1B      359258.496      60.      -140.      -1.      100.
14SRC1C      359258.496      60.      -260.      -1.      100.
/OUTPUT
010L1A010L1B010L1C010L2A010L2B010L2C020L1A020L1B020L1C020L2A020L2B020L2C040L1A
040L1B040L1C040L2A040L2B040L2C050L1A050L1B050L1C050L2A050L2B050L2C030L2A030L2B
030L2C
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

B.2 Modelo implementado no ATPDraw

Figura 31: Modelo do sistema implementado em ATPDraw

Figura 32: Fonte: Autor