

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS NUMÉRICOS DE PROTEÇÃO
PARA LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE**

LUIS FABIANO DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá,
como parte dos requisitos para a obtenção de título de
Mestre em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR :

PROF. PAULO MÁRCIO DA SILVEIRA, D.Sc.

ITAJUBÁ – MG

NOVEMBRO 2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

S237a

Santos, Luís Fabiano dos

Avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas
com compensação série / Luís Fabiano dos Santos. -- Itajubá,
(MG) : UNIFEI, 2006.

245 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Proteção de linhas. 2. Algoritmos numéricos. 3. Compen_
sação série. I. Silveira, Paulo Márcio da, orient. II. Universidade
Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.315(043)

DEDICATÓRIA

*À minha esposa
Karina Rossi Aguilera dos Santos*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo Márcio da Silveira pela oportunidade de desenvolver este trabalho e pelo apoio durante sua elaboração.

Ao professor Carlos Alberto Mohallem pela participação inicial na concepção das idéias que motivaram este trabalho.

Aos colegas de empresa Sture Lindahl, Janez Zakonjsek, Magnus Akke, Murari Saha da ABB Suécia pelos ensinamentos e pelos materiais cedidos, e que foram utilizados como consulta no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Ricardo Tenório do ONS pela implementação e simulações do TCSC em ambiente ATP/EMTP.

RESUMO

Este trabalho está focado na avaliação de algoritmos numéricos de proteção aplicados a linhas de transmissão que apresentem a compensação série. Em particular, procura analisar o comportamento de algoritmos de relés de distância e de diferencial de linha.

Inicialmente o trabalho descreve os principais tópicos relacionados aos algoritmos numéricos de proteção de linhas de transmissão, sendo feita inicialmente uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos desenvolvidos nesta área. Em seguida aborda de maneira especial a proteção de linhas que apresentem capacitores série, apresentando arranjos típicos destas instalações, a proteção dos capacitores série e os desafios que estes elementos impõem aos relés para proteção de linhas.

Em seguida trata diretamente de simulações e avaliações de alguns destes algoritmos na presença de capacitores série em linhas de transmissão. Para isso foram desenvolvidos programas computacionais em Matlab/Simulink que permitem tanto a simulação de transitórios eletromagnéticos quanto avaliar o comportamento de algoritmos de proteção perante diferentes tipos de falta.

A simulação das rotinas de um algoritmo de distância é baseada em duas diferentes técnicas: Filtro Discreto de Fourier de um ciclo e filtro baseado na Equação Diferencial. Para a simulação do algoritmo diferencial de linha foram consideradas também duas diferentes aproximações: algoritmo diferencial no plano cartesiano e algoritmo diferencial no plano alfa. Estes algoritmos, para efeito comparativo, são inicialmente analisados para linhas de transmissão sem a presença de capacitores série, sendo em seguida avaliados através da adição dos capacitores série ao mesmo modelo de sistema de potência utilizado para as simulações iniciais.

No final, são abordados temas para futuros desenvolvimentos, bem como sugestões para outros tipos de análises que podem contribuir para um entendimento ainda melhor das técnicas aqui apresentadas.

ABSTRACT

This work is focused on the analysis of numerical protection algorithms applied to transmission lines with series compensation. Particularly, the analysis tries to evaluate the behavior of distance and line differential protection relay algorithms.

Initially, the work describes the main topics related to the numerical algorithms for the protection of transmission lines, with some initial historical background revision of the main papers developed in this area of knowledge. After that, the work describes in a special way the line protection with series capacitors, presenting typical arrangements of such installations, the protection of the series capacitors and the challenges of such elements for the line protection relays.

Following we have simulations and evaluations of some of these algorithms in the presence of series capacitors for transmission lines. For such analysis, computational routines were developed in Matlab/Simulink, which allow either electromagnetic transient simulations as well as to evaluate the behavior of protection algorithms for different types of faults.

The simulation of the distance algorithm routines is based on two different techniques: the Discrete Fourier Filter for one cycle and the filter based on the differential equation model. For the simulation of the line differential algorithm two different approaches were considered as well: line differential algorithm in the Cartesian plan and line differential algorithm in the alpha plan. These algorithms, for comparison reasons, were initially evaluated for transmission lines without series capacitors installed, and after evaluated with the addition of the series capacitors to the same power system model used for the initial simulations.

In the end, future developments subjects are mentioned, as well as suggestions for other types of analysis that can contribute for the better understanding of the techniques here presented.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	III
ABSTRACT.....	IV
SUMÁRIO	V
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS	XVIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIX

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Organização da Monografia.....	3

Capítulo 2

Revisão da Literatura	6
2.1 Revisão da Literatura	6

Capítulo 3

Fundamentos dos Relés Microprocessados	13
3.1 Considerações Fundamentais.....	13
3.2 Processamento da Falta.....	14
3.2.1 Detecção de Falta.....	16
3.2.2 Classificação da Falta	16
3.2.3 Cálculo de Parâmetros	17
3.2.4 Lógica de Disparo	19
3.3 Processamento de Sinal.....	19
3.3.1 Amostragem.....	20
3.3.2 “Sample and Hold”	22
3.3.3 Multiplexadores	23
3.3.4 Conversores Analógicos/Digitais.....	23
3.3.5 Filtros Antialiasing.....	24

3.4	Algoritmos baseados na Forma de Onda	27
3.4.1	Algoritmo de Aproximação da Curva Senoidal.....	28
3.4.2	Algoritmo de Mann e Morrison	28
3.4.3	Algoritmos baseados na Análise de Fourier	29
3.4.3.1	Algoritmo baseado na Série de Fourier	30
3.4.3.2	Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo	31
3.4.3.3	Transformada Discreta de Fourier de ½ Ciclo.....	33
3.4.3.4	Filtros Trigonométricos	33
3.4.4	Algoritmos baseados no Método dos Mínimos Quadrados	34
3.4.5	Algoritmos baseados no Filtro de Kalman.....	39
3.5	Algoritmos baseados em Modelos dos Sistemas	39
3.5.1	Solução da Equação Diferencial através de Integração Direta	40
3.5.2	Solução da Equação Diferencial com Limites Seleccionados	44
3.5.3	Solução da Equação Diferencial por Amostras	44

Capítulo 4

O Capacitor Série	46
4.1 Considerações Gerais.....	46
4.2 Arranjos Físicos	47
4.3 Grau de Compensação	48
4.4 Localização dos Capacitores Série.....	50
4.5 Capacitor Série Controlado.....	52
4.6 Capacitor Série Controlado por Tiristor	53
4.6.1 Mitigação de SSR	54
4.6.2 Amortecimento de Oscilação de Potência	55
4.6.3 Estabilidade Pós Contigência.....	57
4.6.4 Controle de Fluxo de Potência.....	58
4.6.5 Controle de Tiristor.....	58
4.6.6 Brasil – Interconexão Norte Sul.....	60
4.7 Sobretensão no Capacitor Série	62
4.8 Proteção contra Sobretensão	65
4.8.1 Nível de proteção contra sobretensão	65
4.8.1.1 Spark Gaps	66

4.8.1.2 MOV – Metal Oxide Varistors	66
4.9 Influência na Impedância Efetiva	68
4.10 Linhas com Capacitor Série no seu Ponto Médio	72
4.11 Linhas com Seqüência de Capacitores Série	73
4.12 Linhas com Capacitores Série nos Extremos	73
4.13 Corrente de Falta Indutiva	74
4.14 Inversão de Tensão	75
4.15 Inversão de Corrente	76
4.16 Transitórios Subharmônicos	77
4.17 Transitórios de Alta Frequência	79

Capítulo 5

Implementação de Algoritmos de Proteção	81
5.1 Modelo Simplificado do Sistema de Potência	82
5.2 Algoritmo de Distância Baseado na Análise de Fourier	84
5.3 Algoritmo de Distância Baseado na Equação Diferencial	89
5.4 Algoritmo de Diferencial de Linha Baseado na Análise de Fourier	92

Capítulo 6

Sistema Não Compensado	97
6.1 Análise de Faltas em Sistema Não Compensado	97
6.1.1 Análise de Faltas Trifásicas	98
6.1.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha	98
6.1.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha	101
6.1.1.3 Faltas a 100% do trecho de linha	106
6.1.2 Análise de Faltas Monofásicas	111
6.1.2.1 Faltas a 50% do trecho da linha	111
6.1.2.2 Faltas a 100% do trecho da linha	116
6.2 Análise de Faltas em Sistema Não Compensado, com Saturação de TC	119
6.2.1 Análise de Faltas Trifásicas	120
6.2.1.1 Faltas a 50% do trecho da linha	120
6.2.1.2 Faltas a 100% do trecho da linha	125

Capítulo 7

Sistema com Compensação Série	128
7.1 Modelo Simplificado do Sistema de Potência	128
7.2 Análise de Faltas em Sistema com Compensação Série	130
7.2.1 Análise de Faltas Trifásicas	130
7.2.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha	130
7.2.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha	142
7.2.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha	147
7.2.1.3.1 Falta imediatamente anterior ao capacitor	148
7.2.1.3.2 Falta imediatamente posterior ao capacitor	148
7.2.2 Análise de Faltas Monofásicas.....	154
7.2.2.1 Faltas a 25% do trecho da linha	154
7.2.2.2 Faltas a 75% do trecho da linha	157
7.2.2.3 Faltas a 100% do trecho da linha	160
7.2.2.3.1 Falta imediatamente anterior ao capacitor	160
7.2.2.3.2 Falta imediatamente posterior ao capacitor	161
7.3 Análise de Faltas em Sistema Compensado, Potencial do Lado da Linha	165
7.3.1 Análise de Faltas Trifásicas	166
7.3.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha	166
7.3.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha	168
7.3.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha	169

Capítulo 8

Sistema com TCSC.....	172
8.1 Modelo Simplificado do Sistema de Potência	173
8.2 Análise de Faltas em Sistema com Capacitor Série Controlado por Tiristor	175
8.2.1 Análise de Faltas Trifásicas	175
8.2.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR desativado.....	175
8.2.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR desativado.....	179
8.2.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR desativado.....	182
8.2.1.4 Faltas na direção reversa, modo TSR desativado	185
8.2.1.5 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	188
8.2.1.6 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	191

8.2.1.7 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	193
8.2.1.8 Faltas na direção reversa, modo TSR ativado.....	196
8.2.2 Análise de Faltas Monofásicas.....	199
8.2.2.1 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	199
8.2.2.2 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	202
8.2.2.3 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR ativado.....	204
8.2.2.4 Faltas na direção reversa, modo TSR ativado.....	207

Capítulo 9

Conclusão.....	209
----------------	-----

Anexo 1

Adaptive Distance Protection for Series Compensated Transmission Lines, IEEE Latin America, 2004, São Paulo	215
---	-----

Anexo 2

Soluções de Aplicações de Sistemas de Proteção de Distância em Linhas com Compensação Série, VIII STPC, 2005, Rio de Janeiro	221
--	-----

Anexo 3

Evaluation of Numerical Distance Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines, IEEE Latin America, 2006, Caracas.....	227
--	-----

Anexo 4

Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines, IEEE Latin America, 2006, Caracas.....	233
--	-----

Referências

Bibliografia	239
--------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Diagrama simplificado de hardware de um relé numérico.....	22
Figura 3.2:	Tolerância na resposta em frequência de um filtro passa-baixa.....	25
Figura 3.3:	Filtro de Butterworth de 3 ^a . ordem, com FC = 180Hz	26
Figura 3.4:	Comparação de um sinal após filtragem de Butterworth	26
Figura 3.5:	Resposta em frequência do algoritmo DFT de ciclo completo	32
Figura 3.6:	Resposta em frequência do algoritmo de mínimos quadrados	38
Figura 3.7:	Convergência do algoritmo de mínimos quadrados	38
Figura 3.8:	Modelo simplificado de uma linha sob falta	41
Figura 4.1:	Diagrama do circuito principal.....	46
Figura 4.2:	Capacitor série dividido em 3 segmentos.....	48
Figura 4.3:	Influência do grau de compensação	50
Figura 4.4:	Localização dos capacitores série.....	51
Figura 4.5:	Evolução da compensação série controlável.....	52
Figura 4.6:	Ressonância subsíncrona	54
Figura 4.7:	Mitigação da ressonância subsíncrona	55
Figura 4.8:	Oscilação de potência em um sistema de 500kV	55
Figura 4.9:	Oscilação de potência amortecida pelo uso de TCSC.....	56
Figura 4.10:	Potência transferida	56
Figura 4.11:	TCSC para estabilidade pós-contigência.....	57
Figura 4.12:	Controle de fluxo de potência entre regiões	58
Figura 4.13:	Circuito e forma de onda em regime permanente de um TCSC	59
Figura 4.14:	Característica de reatância aparente de um TCSC	60
Figura 4.15:	Brasil – Interconexão Norte Sul	61
Figura 4.16:	Amortecimento de oscilação de potência através do TCSC.....	61
Figura 4.17:	Sistema para análise simplificada de faltas	62
Figura 4.18:	Corrente de falta ao longo da linha	63
Figura 4.19:	Tensão no capacitor para faltas ao longo da linha.....	64
Figura 4.20:	Proteção contra sobretensão para capacitores série.....	65
Figura 4.21:	Proteção contra sobretensão “Spark Gap”	66
Figura 4.22:	Relação entre corrente e tensão para um MOV.....	67

Figura 4.23: Capacitor série protegido por MOV – sobrecarga baixa.....	68
Figura 4.24: Capacitor série protegido por MOV – sobrecarga elevada	69
Figura 4.25: Resistência e reatância equivalentes de um MOV	69
Figura 4.26: Impedância equivalente do capacitor série protegido por MOV.....	70
Figura 4.27: Impedância equivalente para diferentes carregamentos	71
Figura 4.28: Impedância aparente de linhas de transmissão.....	72
Figura 4.29: Fasores em uma linha não compensada	74
Figura 4.30: Inversão de tensão no terminal R	75
Figura 4.31: Inversão de corrente no terminal R	77
Figura 4.32: Representação simplificada de linha com compensação série	78
Figura 4.33: Diagrama R-X com transitório subharmônico	79
Figura 5.1: Modelo simplificado de um sistema de potência	82
Figura 5.2: Comportamento das tensões e correntes	85
Figura 5.3: Comportamento das tensões de linha e fase, em RMS.....	85
Figura 5.4: Comportamento das correntes de linha e fase, em RMS.....	86
Figura 5.5: Trajetória das impedâncias no plano complexo	87
Figura 5.6: Trajetória das impedâncias com relé quadrilateral.....	88
Figura 5.7: Trajetória das impedâncias com relé quadrilateral, ampliação	88
Figura 5.8: Trajetória baseada na equação diferencial, sem filtro de mediana.....	89
Figura 5.9: Trajetória baseada na equação diferencial, sem filtro de mediana, zo ..	90
Figura 5.10: Trajetória baseada na equação diferencial, com filtro de mediana	91
Figura 5.11: Trajetória baseada na equação diferencial, com filtro de mediana, zo..	91
Figura 5.12: Comparação Fourier 1 ciclo e equação diferencial, fase.....	92
Figura 5.13: Correntes de falta medidas nos extremos da linha	93
Figura 5.14: Correntes diferenciais em cada fase do sistema	94
Figura 5.15: Correntes diferenciais no plano cartesiano.....	94
Figura 5.16: Correntes diferenciais no plano alfa	95
Figura 5.17: Correntes de falta medidas nos extremos da linha	95
Figura 5.18: Correntes diferenciais no plano cartesiano.....	96
Figura 5.19: Correntes diferenciais no plano alfa	96
Figura 6.1: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, exportação.....	98
Figura 6.2: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, importação	99
Figura 6.3: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$	100

Figura 6.4:	Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 10\Omega$	100
Figura 6.5:	Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 10\Omega$	101
Figura 6.6:	DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0$	102
Figura 6.7:	DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$	102
Figura 6.8:	Equação diferencial, 75%, $R_f = 0$	103
Figura 6.9:	Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$	103
Figura 6.10:	Diferencial plano cartesiano, 75%, $R_f = 0$	104
Figura 6.11:	Diferencial plano alfa, 75%, $R_f = 0$	105
Figura 6.12:	Diferencial plano cartesiano, 75%, $R_f = 10\Omega$	105
Figura 6.13:	Diferencial plano alfa, 75%, $R_f = 10\Omega$	106
Figura 6.14:	DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$	107
Figura 6.15:	DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 10\Omega$	107
Figura 6.16:	Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$	108
Figura 6.17:	Equação diferencial, 100%, $R_f = 10\Omega$	108
Figura 6.18:	Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$	109
Figura 6.19:	Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$	109
Figura 6.20:	Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 10\Omega$	110
Figura 6.21:	Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 10\Omega$	110
Figura 6.22:	DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, fase.....	112
Figura 6.23:	DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, neutro	112
Figura 6.24:	Equação diferencial, 50%, $R_f = 0\Omega$	113
Figura 6.25:	DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 10\Omega$	113
Figura 6.26:	Equação diferencial, 50%, $R_f = 10\Omega$	114
Figura 6.27:	Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$	114
Figura 6.28:	Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$	115
Figura 6.29:	Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 10\Omega$	115
Figura 6.30:	Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 10\Omega$	116
Figura 6.31:	DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$	116
Figura 6.32:	Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$	117
Figura 6.33:	DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 10\Omega$	117
Figura 6.34:	Equação diferencial, 100%, $R_f = 10\Omega$	118
Figura 6.35:	Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 10\Omega$	118

Figura 6.36: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 10\Omega$	119
Figura 6.37: Comparação de correntes secundárias fase A, com e sem saturação ..	120
Figura 6.38: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$	121
Figura 6.39: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, ampliação.....	121
Figura 6.40: Equação diferencial, 50%, $R_f = 0\Omega$	122
Figura 6.41: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 10\Omega$	122
Figura 6.42: Equação diferencial, 50%, $R_f = 10\Omega$	123
Figura 6.43: Correntes diferenciais com saturação dos TCs.....	123
Figura 6.44: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$	124
Figura 6.45: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$	124
Figura 6.46: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$	125
Figura 6.47: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$	126
Figura 6.48: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$	127
Figura 7.1: Modelo simplificado de sistema de potência	129
Figura 7.2: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV	130
Figura 7.3: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV	131
Figura 7.4: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV, ampliação.....	132
Figura 7.5: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV	133
Figura 7.6: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV, ampliação	133
Figura 7.7: Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV	134
Figura 7.8: Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV.....	134
Figura 7.9: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV	135
Figura 7.10: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV.....	135
Figura 7.11: Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV	136
Figura 7.12: Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV.....	136
Figura 7.13: Formas de onda de tensões e corrente, 25%, $R_f = 0\Omega$	137
Figura 7.14: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$	138
Figura 7.15: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, ampliação.....	138
Figura 7.16: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$	139
Figura 7.17: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, ampliação	139
Figura 7.18: Comportamento do MOV, 25%, $R_f = 0\Omega$	140
Figura 7.19: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$	140

Figura 7.20: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$	141
Figura 7.21: Comportamento do MOV, 25%, $R_f = 10\Omega$	141
Figura 7.22: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$	142
Figura 7.23: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$, ampliação.....	143
Figura 7.24: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$	143
Figura 7.25: Comportamento do MOV, 75%, $R_f = 0\Omega$	144
Figura 7.26: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$	144
Figura 7.27: Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$	145
Figura 7.28: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$	145
Figura 7.29: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$	146
Figura 7.30: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 10\Omega$	146
Figura 7.31: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 10\Omega$	147
Figura 7.32: Modelo simplificado de sistema de potência	148
Figura 7.33: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor	149
Figura 7.34: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor.....	149
Figura 7.35: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor	150
Figura 7.36: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor.....	150
Figura 7.37: Comportamento do MOV, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor	151
Figura 7.38: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor ..	151
Figura 7.39: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor.....	152
Figura 7.40: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor.	152
Figura 7.41: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor.....	153
Figura 7.42: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa	153
Figura 7.43: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa.....	154
Figura 7.44: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, loop de terra	155
Figura 7.45: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, loop de fase.....	155
Figura 7.46: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$	156
Figura 7.47: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$	156
Figura 7.48: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$	157
Figura 7.49: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$	157
Figura 7.50: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$, ampliação.....	158
Figura 7.51: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$	158

Figura 7.52: Comportamento do MOV, 75%, $R_f = 0\Omega$	159
Figura 7.53: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$	159
Figura 7.54: Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$	160
Figura 7.55: Modelo simplificado de sistema de potência.....	160
Figura 7.56: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor.....	161
Figura 7.57: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor.....	162
Figura 7.58: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	162
Figura 7.59 Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	163
Figura 7.60: Plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	163
Figura 7.61: Plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	164
Figura 7.62: Plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa.....	164
Figura 7.63: Plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa.....	165
Figura 7.64: Modelo simplificado de sistema de potência.....	166
Figura 7.65: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$	167
Figura 7.66: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$	167
Figura 7.67: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$	168
Figura 7.68: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$	168
Figura 7.69: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor.....	169
Figura 7.70: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor.....	170
Figura 7.71: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	170
Figura 7.72: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor.....	171
Figura 8.1: Modelo simplificado de sistema de potência.....	173
Figura 8.2: Modelo do Capacitor Série Controlado por Tiristor (TCSC).....	173
Figura 8.3: Formas de onda de tensões e corrente, 25%, TSROFF.....	176
Figura 8.4: DFT ciclo completo, 25%, TSROFF.....	176
Figura 8.5: Equação diferencial, 25%, TSROFF.....	177
Figura 8.6: Correntes trifásicas nos extremos da linha, 25%, TSROFF.....	177
Figura 8.7: Corrente da Fase C, 25%, TSROFF.....	178
Figura 8.8: Diferencial plano cartesiano, 25%, TSROFF.....	178
Figura 8.9: Diferencial plano alfa, 25%, TSROFF.....	179
Figura 8.10: Formas de onda de tensões e correntes, 75%, TSROFF.....	180
Figura 8.11: DFT ciclo completo, 75%, TSROFF.....	180

Figura 8.12: Equação diferencial, 75%, TSROFF	181
Figura 8.13: Diferencial plano cartesiano, 75%, TSROFF	181
Figura 8.14: Diferencial plano alfa, 75%, TSROFF	182
Figura 8.15: DFT ciclo completo, 100%, TSROFF.....	183
Figura 8.16: Equação diferencial, 100%, TSROFF	183
Figura 8.17: Diferencial plano cartesiano, 100%, TSROFF.....	184
Figura 8.18: Diferencial plano alfa, 100%, TSROFF	184
Figura 8.19: Formas de onda de tensões e correntes, Reversa, TSROFF	185
Figura 8.20: DFT ciclo completo, Reversa, TSROFF	186
Figura 8.21: Equação diferencial, Reversa, TSROFF.....	186
Figura 8.22: Diferencial plano cartesiano, Reversa, TSROFF	187
Figura 8.23: Diferencial plano alfa, Reversa, TSROFF.....	188
Figura 8.24: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, TSRON.....	188
Figura 8.25: DFT ciclo completo, 25%, TSRON	189
Figura 8.26: Equação diferencial, 25%, TSRON.....	189
Figura 8.27: Diferencial plano cartesiano, 25%, TSRON	190
Figura 8.28: Diferencial plano alfa, 25%, TSRON.....	190
Figura 8.29: DFT ciclo completo, 75%, TSRON	191
Figura 8.30: Equação diferencial, 75%, TSRON.....	192
Figura 8.31: Diferencial plano cartesiano, 75%, TSRON	192
Figura 8.32: Diferencial plano alfa, 75%, TSRON.....	193
Figura 8.33: DFT ciclo completo, 100%, TSRON	194
Figura 8.34: Equação diferencial, 100%, TSRON.....	194
Figura 8.35: Diferencial plano cartesiano, 100%, TSRON	195
Figura 8.36: Diferencial plano alfa, 100%, TSRON.....	195
Figura 8.37: Correntes da Fase C, 100%, TSRON	196
Figura 8.38: Formas de onda de tensões e corrente, Reversa, TSRON.....	196
Figura 8.39: DFT ciclo completo, Reversa, TSRON.....	197
Figura 8.40: Equação diferencial, Reversa, TSRON	197
Figura 8.41: Diferencial plano cartesiano, Reversa, TSRON	198
Figura 8.42: Diferencial plano alfa, Reversa, TSRON	198
Figura 8.43: Formas de onda de tensões e corrente, 25%,.....	199
Figura 8.44: DFT ciclo completo, 25%, loop de fase	200
Figura 8.45: DFT ciclo completo, 25%, loop de terra	200

Figura 8.46: Equação diferencial, 25%	201
Figura 8.47: Diferencial plano cartesiano, 25%	201
Figura 8.48: Diferencial plano alfa, 25%	202
Figura 8.49: DFT ciclo completo, 75%,	202
Figura 8.50: Equação diferencial, 75%	203
Figura 8.51: Diferencial plano cartesiano, 75%	203
Figura 8.52: Diferencial plano alfa, 75%	204
Figura 8.53: DFT ciclo completo, 100%,	205
Figura 8.54: Equação diferencial, 100%	205
Figura 8.55: Diferencial plano cartesiano, 100%	206
Figura 8.56: Diferencial plano alfa, 100%	206
Figura 8.57: DFT ciclo completo, Reversa	207
Figura 8.58: Equação diferencial, Reversa	207
Figura 8.59: Diferencial plano cartesiano, Reversa	208
Figura 8.60: Diferencial plano alfa, Reversa	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação de algoritmos baseados em modelos de sistema.....	45
Tabela 5.1: Dados do sistema de potência sem compensação série	83
Tabela 7.1: Dados do sistema de potência com compensação série	129
Tabela 8.1: Dados do sistema de potência com TCSC	175

LISTA DE ABREVIATURAS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
SCADA	Supervisory, Control and Data Acquisition
FACTS	Flexible AC Transmission System
SVC	Static Var Compensator
GPS	Global Positioning System
DFT	Discrete Fourier Transformer
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
MOV	Metal Oxide Varistor
SSR	Subsynchronous Resonance
RMS	Root Mean Square
EMTP	Electromagnetic Transient Program
ATP	Alternative Transient Program
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TSROFF	Thyristor Switched Reactor desativado
TSRON	Thyristor Switched Reactor ativado

POWER SYSTEM PROTECTION has been correctly described as both a science and an art. The calculation of short circuit currents and voltages, the performance of relays and transducers, the steady state and transient effects of faults and switching surges are all amenable to rigorous evaluation based on fundamental theory. The application of specific relays and their settings, however, represent compromises and a balance of risks that are in large measure dependent upon the experience, ingenuity, and possible clairvoyance of the relay engineer.

Prefácio do livro "Protective Relaying for Power Systems"

Introdução

O conceito de utilização de computadores digitais para aplicação em relés de proteção tem sua origem em aproximadamente 40 anos atrás. Mas a partir daí, um rápido desenvolvimento foi observado e atualmente sua aplicação é praticamente indispensável aos atuais esquemas de proteção e automação de subestações. Na verdade, nos dias atuais, os relés numéricos são preferencialmente utilizados tanto no que se refere aos critérios econômicos quanto aos critérios técnicos.

Dentre algumas das características que os relés de proteção numéricos apresentam, podem ser destacadas a auto-supervisão, que indica a capacidade de programação em se monitorar diversas partes do hardware e do software simultaneamente; a integração aos sistemas digitais, que permitiu uma grande evolução também aos sistemas supervisórios e de automação; a flexibilidade funcional e características adaptativas, que permitem aos modernos dispositivos de proteção numéricos serem condicionados a diferentes circunstâncias operacionais, e etc.

Dentro deste contexto, e dada a importância em se compreender de maneira adequada as funcionalidades desenvolvidas internamente pelos relés numéricos é que este trabalho teve sua motivação inicial. Em particular, as atividades iniciais ficaram restritas ao desenvolvimento de algoritmos que pudessem repetir, ou aproximar-se, das rotinas desempenhadas por um equipamento disponível comercialmente no mercado. O principal aspecto teórico do trabalho é portanto a comparação de alguns algoritmos numéricos perante condições de faltas diversas ao longo de um sistema de potência.

Posteriormente, com a evolução dos estudos e o aprimoramento dos programas partiu-se para uma tentativa em se avaliar o comportamento de alguns dos algoritmos estudados perante um sistema de potência que apresentasse a compensação série em uma linha de transmissão.

Para isso, além do aprofundamento de conhecimento necessário para se compreender o desempenho e funcionamento de um relé numérico, houve a necessidade de se entender melhor os fenômenos associados à aplicação de capacitores série ao sistema de potência. O trabalho aborda, desta forma, ambos os assuntos e procura retratar as características peculiares que os transitórios eletromagnéticos em tal sistema causam a um algoritmo de proteção.

Com relação à compensação série, a história das linhas compensadas foi iniciada cerca de 80 anos atrás. Já naquela época os engenheiros sentiram-se pressionados a prover o transporte de grande quantidade de energia em longas distâncias. Porém, problemas surgiram, como era de se esperar, no que se refere ao controle de potência reativa, uma vez que a tensão no terminal receptor passou a ficar fora dos limites aceitáveis durante as condições de máximo carregamento. Uma maneira encontrada para contornar este efeito foi inserir bancos de capacitores série. [1].

Desde então o uso da compensação série passou a crescer em porte e nas diferentes aplicações a que se destina, dentre elas a melhoria da capacidade de transporte de energia e a melhoria de estabilidade, entre outras. Seja qual for sua aplicação, o fato é que uma proteção de linha adequada deve ser provida a fim de que sejam identificadas corretamente as faltas ao longo da linha de transmissão compensada.

Adicionalmente, o emprego do capacitor série pode não estar restrito a apenas uma linha de transmissão em particular, mas pode estar aplicado a outras partes do sistema nas vizinhanças de uma determinada linha de transmissão. Novamente, a proteção de linha deve estar apta a operar corretamente também para esta condição.

A inserção dos capacitores série acarreta ainda fenômenos nos quais os dispositivos de proteção devem estar aptos a responder de forma adequada. Pode-se destacar, neste contexto, a possibilidade de inversão de tensão, inversão de corrente, frequências subharmônicas, etc.

Desta maneira, a avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas com compensação é de fundamental importância para uma melhor compreensão dos fenômenos e características marcantes que este tipo de aplicação apresenta.

1.1

Organização da Dissertação

A dissertação é fundamentalmente focada na análise de algoritmos numéricos de proteção. Assim, o principal interesse e assunto motivador é o desenvolvimento de rotinas matemáticas que possam corresponder aos programas disponíveis em relés de proteção atualmente empregados no sistema de potência.

Todavia, para a elaboração desta dissertação, tendo em vista que as rotinas desenvolvidas devem ser testadas em algum modelo de sistema, um estudo sobre a compensação série em sistemas de transmissão foi necessário, e é apresentado ao longo do trabalho. Notadamente, deve-se ressaltar que apesar da relevante importância e grande interesse que o estudo da compensação série pode trazer, e de sua abordagem aqui apresentada, ele é aqui tratado, de certa forma, como um assunto secundário, havendo assim um destaque maior para a análise do desempenho dos programas computacionais elaborados.

Os algoritmos desenvolvidos nesta dissertação foram baseados em artigos e literaturas técnicas, tanto os mais recentes quanto os mais históricos. Deve ser ressaltada, neste momento, a grande contribuição que os artigos considerados mais antigos trouxeram, permitindo uma melhor compreensão dos fundamentos e conceitos desta filosofia.

Inicialmente, no Capítulo 2, é feita uma revisão da literatura acerca dos algoritmos numéricos. Alguns dos principais artigos sobre a proteção numérica, bem como sobre o desenvolvimento de algoritmos de proteção, são destacados. Trata assim de balizar o conhecimento a respeito do tema, ressaltando os principais artigos e textos relativos a esta área do conhecimento. Adicionalmente, uma bibliografia é apresentada no final de trabalho como forma de melhorar ainda mais a consulta.

O Capítulo 3, por sua vez, inicia a abordagem dos algoritmos numéricos já de uma maneira mais aprofundada. Os fundamentos filosóficos e operacionais de um relé de proteção são apresentados inicialmente, sendo em seguida apresentados os conceitos envolvidos no processamento da falta, no processamento do sinal e dos algoritmos de proteção propriamente ditos. Os principais algoritmos de proteção

desenvolvidos em pesquisas acadêmicas e/ou por fabricantes são abordados neste item.

No Capítulo 4, são apresentados os diferentes arranjos e benefícios que o capacitor série apresenta ao sistema de potência, neste caso, em particular, destacando-se tanto os capacitores fixos quanto os mais modernos do tipo controláveis. Posteriormente são discutidos os problemas e desafios que estes mesmos capacitores série trazem aos relés de proteção com relação à sua impedância aparente. São apresentados ainda os dispositivos de proteção intrínseca que os capacitores série possuem, como forma principalmente de se pouparem por ocasião de sobretensões ocasionadas por correntes de falta passantes elevadas. Em particular, é apresentada a influência que estas proteções contra sobretensões possui na impedância efetiva que um relé de impedância irá medir.

Já no Capítulo 5 são apresentados os primeiros resultados de simulação, com inicial apresentação dos modelos adotados para estas simulações. São ilustradas as simulações de uma falta trifásica, sem resistência de falta, para os seguintes tipos de algoritmos de proteção de impedância: (a) algoritmo de Fourier de um ciclo; (b) algoritmo baseado no modelo de equação diferencial; e para os seguintes algoritmos de proteção diferencial de linha: (c) algoritmo diferencial no plano cartesiano; (d) algoritmo diferencial no plano alfa.

O Capítulo 6 aborda diversos tipos de simulações para os algoritmos acima citados, alterando-se, para isso, a posição da falta ao longo da linha, tipo da falta (trifásica e monofásica), resistência de falta e saturação dos transformadores de corrente. Neste capítulo são realizadas simulações para um sistema onde a linha de transmissão não apresenta compensação série, como forma de se comparar posteriormente os resultados a serem obtidos com a linha compensada.

Por sua vez, o Capítulo 7 apresenta os resultados de diversos tipos de simulações de falta para um sistema com linha compensada. Os capacitores são considerados como estando instalados nos extremos da linha e dois tipos de faltas são adicionalmente consideradas: (a) Falta imediatamente anterior ao capacitor e (b) Falta imediatamente posterior ao capacitor. No início do capítulo são apresentados alguns resultados quando da utilização de um capacitor série sem o dispositivo de

proteção contra sobretensão MOV (Varistor Óxido Metálico) para sua proteção intrínseca apenas para efeito comparativo com alguns resultados apresentados na literatura. Posteriormente a comparação é feita com os resultados obtidos acrescentando-se o dispositivo MOV ao modelo de simulação.

O Capítulo 8 traz uma contribuição relevante à análise de desempenho de algoritmos numéricos de proteção tendo em vista a implementação do modelo de capacitor série variável. Neste capítulo são apresentados os resultados dos algoritmos numéricos avaliados nos capítulos anteriores, porém agora na presença do TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor ou Capacitor Série Controlado por Tiristor).

Finalmente, o Capítulo 9 faz as considerações finais sobre o trabalho, apresentando a conclusão sobre os resultados obtidos, bem como norteando sugestões para futuros desenvolvimentos.

No final são ainda apresentados, em forma de apêndices, alguns artigos técnicos gerados a partir do desenvolvimento desta dissertação, bem como uma bibliografia utilizada como referência.

Revisão da Literatura

2.1

Revisão da Literatura

Os primeiros desenvolvimentos de artigos relacionados à proteção numérica surgiram no final da década de 60, e impulsionaram uma série de pensamentos sobre a aplicação dos computadores na proteção de sistemas elétricos. Inicialmente, alguns artigos abordavam o uso de um computador digital central para a realização das funções de proteção, e posteriormente outros artigos trataram de enfatizar o uso do processamento distribuído para tal performance. De uma forma ou de outra, todos os artigos certamente contribuíram para o desenvolvimento da tecnologia atualmente existente e uma abordagem sobre os mesmos é de substancial relevância.

A primeira referência que se tem notícia sobre os desenvolvimentos de artigos tratando dos algoritmos numéricos aplicados aos sistemas de proteção é publicada por P.G. McLaren em 1965, denominada “Sampling techniques applied to the derivation of impedance characteristics for use in power system protection”.

No entanto, talvez a principal publicação citada em muitas referências é o artigo de Rockefeller. Neste artigo [2], o autor estabelece as bases fundamentais do uso de programas de computador para realizar as diferentes funções de um relé de proteção em uma subestação. Já neste momento, são abordados aspectos importantes tais como conversão de valores analógicos para digitais, lógica de detecção de faltas, cálculo da impedância da falta, uso da função diferencial para transformadores e barras, detecção de saturação de transformadores de corrente, e que são pontos de discussão até os dias atuais. Este trabalho, no entanto, apesar da riqueza de detalhes e informações era apenas uma tese, não tendo ainda uma aplicação prática naquela ocasião.

Nesta mesma época, um método [3] proposto por Slemon, Robertson e Ramamoorthy baseava-se na possibilidade do cálculo das componentes fundamentais da corrente e da tensão através da técnica de Fourier. De posse destas componentes fundamentais era possível calcular a amplitude e o ângulo da impedância vista pelo relé. Este método, no entanto, ainda esbarrava no fato do processamento disponível na época ainda ser bastante limitado.

Como característica básica este tipo de algoritmo, abordado por muitos outros autores, apresenta a determinação numérica da distância pelo cálculo da impedância baseada em quantidades senoidais de regime permanente. Outros autores, conforme será observado no levantamento bibliográfico que segue, direcionaram a atenção diretamente em algoritmos que consideram os parâmetros da linha, através do modelo de linha representado pela sua equação diferencial.

Adicionalmente ao trabalho abordado por Ramamoorthy, Mann e Morrison já vinham desenvolvendo em paralelo alguns estudos semelhantes, sendo que Mann já havia publicado um artigo sobre o cálculo computacional em tempo real da impedância de uma linha monofásica sob falta em 1968.

Posteriormente, os mesmos autores publicaram em 1971 um outro artigo [4] com a mesma abordagem. Neste artigo, em particular, os autores sugerem a utilização de um algoritmo de proteção que é baseado na predição dos valores de pico das formas de onda senoidais da corrente e tensão, e que utiliza os valores amostrais e suas derivadas para o cálculo da impedância. No entanto, uma análise mais criteriosa deste algoritmo, através da resposta em frequência, ilustra o risco das suposições a que ele se baseia, ou seja, pequena janela de dados (três amostras), existência de corrente de curto circuito perfeitamente senoidal e eliminação prévia da componente aperiódica. Esta última é identificada pelos próprios autores como uma grande fonte de erros no algoritmo proposto, e os mesmos sugerem o uso de uma impedância mímica para minimizar os efeitos da componente DC no algoritmo.

Em 1972, Rockefeller novamente apresenta dois outros artigos [5] que relatam um projeto de parceria entre a Pacific Gas e a Electric Westinghouse. Este projeto avalia a performance de um sistema de hardware e software experimental, denominado Prodar 70, e que funciona como um terminal de proteção de uma linha

de transmissão. O primeiro artigo trata da descrição de tal sistema, apresentando todo o detalhamento dos aspectos de hardware e software, sendo o algoritmo baseado no desenvolvimento matemático de Mann e Morrison para o cálculo das impedâncias. O segundo artigo, por sua vez, trata de apresentar os resultados experimentais.

Em 1975, Ranjbar e Cory publicam outro importante artigo [6] que trata da precisão dos métodos digitais para a proteção de linhas de transmissão de alta tensão durante as condições de transitório da falta, bem como apresenta um novo e melhorado método para o cálculo dos valores da resistência e indutância da linha, particularmente dando atenção aos harmônicos e ruídos presentes nos sinais de corrente e tensão. Este artigo é uma das primeiras referências sobre o cálculo de impedâncias baseado em modelos do sistema, ou seja, o cálculo da impedância é baseado na solução numérica da equação diferencial que representa a linha de transmissão, sendo este um conceito diferente do apresentado pelo trabalho de Ramamoorthy.

Uma outra importante contribuição, novamente relacionada aos aspectos práticos dos algoritmos numéricos, é dada em um trabalho [7] desenvolvido conjuntamente entre a General Electric Company e a Philadelphia Electric Company. Este trabalho, submetido ao IEEE em 1976 e posteriormente reimpresso em 1979 pelo mesmo órgão, apresenta a investigação em laboratório de um sistema digital para a proteção de linhas de transmissão.

O artigo gerado por este trabalho mostra os resultados obtidos ao se conectar um computador e seu sistema de aquisição de dados a um modelo de linha de transmissão, escala de uma linha de 500kV, para simulação dos algoritmos digitais de proteção. De modo particular, apresentou-se a habilidade deste sistema digital em oferecer proteção contra faltas numa linha de transmissão. Novamente o modelo adotado no cálculo da impedância é baseado na solução da equação diferencial.

Na seqüência, os mesmos autores publicam outro trabalho [8] com os resultados obtidos em campo para um projeto de pesquisa da aplicação de técnicas digitais em sistemas de proteção de linha, e que foi instalado pelo período de um ano em uma linha de 116km e 500kV. Os autores mencionam neste trabalho que o sistema digital utilizava lógica de disparo por comparação direcional, e que este

esquema efetuou bloqueio correto para defeitos externos e efetuou disparo correto para defeitos internos. Adicionalmente os autores abordam um outro importante assunto deste contexto, que trata da performance dos dispositivos digitais no ambiente de subestações.

O primeiro artigo que se tem notícia a tratar dos algoritmos numéricos para a proteção de sistemas elétricos utilizando o conceito de componentes simétricas foi publicado em 1977 [9]. Neste artigo os autores retratam como aplicar o estudo das componentes simétricas ao desenvolvimento de algoritmos computacionais para o cálculo da distância de faltas em linhas de transmissão.

O algoritmo proposto permite calcular a distância até uma falta utilizando-se apenas de uma única equação para todos os dez tipos diferentes de falta, ou seja, três tipos de falta fase-fase, três tipos de falta fase-terra, três tipos de falta fase-fase-terra e a falta trifásica, o que segundo os autores poderia levar a uma grande simplificação e potencialmente uma computação muito mais rápida. Uma outra vantagem destacada pelos autores é que este método de cálculo da impedância não necessita da classificação ou mesmo da detecção da falta. Assim, os cálculos são contínuos e recursivos.

Em 1979 Smolinski apresenta mais um artigo [10] que trata de algoritmos numéricos baseados em modelos do sistema. Neste caso em particular, o artigo mostra uma abordagem na qual a capacitância em derivação do modelo de linha é considerada no desenvolvimento do algoritmo. Assim, segundo o autor, não seria necessária a pré-filtragem das componentes transitórias de alta frequência que surgem quando se despreza a capacitância em derivação da linha, uma vez que o modelo as considera.

No entanto, o algoritmo desenvolvido requer aproximadamente seis vezes mais cálculos computacionais do que os anteriores, ou seja, considerar a capacitância em derivação da linha melhora o modelo, e permite a não utilização de filtros passa baixa, porém o preço a ser pago pelo algoritmo ao não utilizar este filtro nos sinais de entrada é o aumento da carga computacional.

Em [11] os autores procuram descrever como as diferentes técnicas utilizadas para os algoritmos digitais no cálculo da distância da falta, bem como dos filtros digitais usados na pré-filtragem dos sinais de corrente e tensão, podem influenciar na trajetória da impedância aparente no plano R-X. Desta forma, procuram determinar um método de investigação dos efeitos de vários algoritmos e filtros digitais na característica de operação dos relés, na tentativa de se obter a combinação ótima de tais algoritmos.

Este trabalho tem continuidade através da publicação de um outro artigo [12], que descreve um método para procurar a melhor combinação dos relés de distância digitais e dos algoritmos de filtragem digital para a proteção de linhas de transmissão.

Os autores concluem que a melhor combinação consiste em um algoritmo de filtragem do tipo passa baixa recursivo de 3ª ordem e um algoritmo de relé de distância baseado na solução da equação diferencial que representa o modelo da linha de transmissão, tendo em vista o fato de que a melhor combinação seria aquela em que a trajetória da impedância aparente fosse a que mais se aproximasse de uma linha direta entre o ponto de impedância da condição de pré falta até o ponto de impedância da condição de falta. Este fato, porém, por si não pode ser considerado como objeto de escolha do melhor algoritmo, segundo a contestação de outros autores.

Os japoneses também deixaram sua contribuição ao desenvolvimento de artigos que fazem referência à proteção numérica. Em um desses artigos [13], os autores apresentam o desenvolvimento de um algoritmo para a proteção de linhas baseado no método da equação diferencial com solução integral interpolada.

Em particular, o artigo descreve um algoritmo composto de um elemento de medição, um elemento direcional, um elemento de sobrecorrente, um elemento de subtensão e um elemento de detecção de corrente de excitação de transformador. No entanto, outros autores questionaram a performance deste algoritmo, tendo em vista que o tempo de atuação do algoritmo apresentado no artigo foi de aproximadamente 40ms para alguns casos, sendo este tempo considerado elevado para a técnica utilizada.

Em um outro trabalho [14], os autores descrevem a possibilidade da medição precisa do fasor de tensão em uma rede compensada que sofre um grande distúrbio. Em particular, o cálculo do fasor de tensão é baseado em um filtro digital no qual a frequência fundamental é estimada através de um algoritmo de mínimos quadrados. A preocupação neste caso em específico não está diretamente relacionada com a proteção das linhas de transmissão propriamente ditas, mas no desenvolvimento de Esquemas Especiais de Proteção para uma grande área de um sistema de potência.

Uma das grandes contribuições ao desenvolvimento dos algoritmos de proteção numérica foi o também desenvolvimento das ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Neste contexto, alguns autores abordam a simulação dos algoritmos de proteção com dados provenientes de tais ferramentas, sendo os dados utilizados em outros programas onde o algoritmo de proteção é desenvolvido, Matlab, por exemplo, ou no próprio programa de simulação de transitório, desde que o mesmo permita tal recurso de programação.

Em um desses trabalhos [15], o autor demonstra a possibilidade do uso educacional da ferramenta de simulação de transitório eletromagnético, em particular do EMTP, para o estudo do algoritmo de um relé de distância. Neste artigo o autor menciona o desenvolvimento de três diferentes algoritmos, baseados em Fourier de Ciclo Completo, Fourier de Meio Ciclo e função de Walsh respectivamente, na própria ferramenta de simulação de transitório eletromagnético, acrescentando-se a estes algoritmos um filtro passa baixa “anti-aliasing” e um filtro para remover o offset DC.

Posteriormente, uma das aplicações de proteção de linhas de transmissão que mais exigem do engenheiro de proteção também ocupou seu espaço na proteção numérica: a proteção de linhas compensadas. Adicionalmente a todos os requisitos e cuidados que a proteção de linhas compensadas exige em seu estudo, devem ainda ser ressaltados todos os detalhes desta proteção realizada com microprocessadores.

Um dos artigos [16] a tratar deste assunto destaca o uso da medição de impedância baseada na equação diferencial para linhas com compensação série, incorporando a representação do Varistor Óxido Metálico (MOV) no modelo de loop de falta para proporcionar a medição correta da distância da falta. Adicionalmente, o

método apresentado neste trabalho utiliza dois diferentes modelos para os loops de falta, um para faltas posicionadas antes do capacitor série e outro para faltas posicionadas após o capacitor série.

Fundamentos dos Relés Microprocessados

3.1

Considerações Fundamentais

Para a proteção de linhas de transmissão uma função de medição bastante conhecida e que possibilita determinar o caráter de uma falta é a impedância que se enxerga para dentro da linha. Neste contexto, é comum se considerar que o cálculo da impedância envolva quantidades senoidais de regime permanente. Este fato é compreensível, tendo em vista que a impedância também representa um parâmetro do circuito para um sistema com frequência constante. Do ponto de vista de um relé, são exatamente os parâmetros do circuito as quantidades desejadas para se determinar o caráter de uma falta.

Para os relés digitais a determinação numérica da distância pelo cálculo da impedância pode ser derivada baseada em quantidades senoidais de regime permanente, conforme apresentado por diversos autores e trabalhos publicados nesta área de pesquisa. Entretanto, outros autores preferem direcionar suas atenções diretamente aos parâmetros do circuito [17]. Para a maioria das aplicações, uma linha de transmissão pode ser representada como um ramo série de elementos resistivos e indutivos. Da teoria de circuitos, a descrição fundamental de tal ramo é dada através de sua equação diferencial, ou seja,

$$v = Ri + L \frac{di}{dt}$$

(3.1)

Esta relação atende tanto o regime permanente quanto às condições transitórias e é exatamente o período transitório após a ocorrência de uma falta que serve de interesse para os propósitos dos relés de proteção.

O contraste existente entre a aproximação por equação diferencial e a aproximação por impedância em regime permanente se resume em suas próprias presunções. O conceito por impedância exige que as correntes e tensões devam ter formas de onda senoidais de regime permanente. Todavia, durante condições de falta esta exigência não é cumprida e algum tipo de filtragem deve ser empregado a fim de que se determine a componente fundamental da forma de onda.

Por outro lado, a aproximação por equação diferencial implica em exigências relacionadas ao circuito em consideração. Seja, por exemplo, assumir por simplicidade o circuito série com os parâmetros R e L. Para este circuito, tanto as características de corrente e tensão, quanto a componente DC ou os efeitos harmônicos estão implicitamente considerados.

Deve ser ressaltado, no entanto, que linhas de transmissão verdadeiras desviam-se da aproximação de circuito série do tipo R e L devido ao efeito capacitivo em derivação. Este efeito introduz transitórios de alta frequência, mas que podem frequentemente ser atenuados pela aplicação de filtragem apropriada. Para a aproximação que utiliza a equação diferencial um filtro passa-baixa é suficiente para realizar esta atenuação, ao passo que para a aproximação por impedância um filtro passa-banda é necessário.

3.2

Processamento da Falta

O algoritmo fundamental utilizado para o cálculo dos valores de R e L juntamente com as exigências impostas pelo relé para a proteção de uma linha de transmissão impõem diversas restrições que afetam um programa de computador. Por exemplo, o algoritmo de cálculo solicita muitos procedimentos de multiplicação e de

divisão, os quais por sua vez são operações que podem apresentar grande consumo de tempo computacional.

A fim de que sejam evitados atrasos na decisão de atuação de um relé de proteção, ou mesmo liberando o processamento para outras funcionalidades, tipicamente os algoritmos não realizam estes cálculos continuamente. Ao invés disso são usualmente concebidos para tomarem a decisão de realizar estes cálculos apenas quando necessário. Esta decisão introduziu um novo conceito citado por muitos autores, no qual um procedimento de detecção de falta, abordado no item 3.2.1, é necessário para dar início aos cálculos.

Por outro lado, surge uma grande limitação na organização do programa, que deve realizar a tarefa de detectar a falta e tomar a decisão de disparo em um tempo bastante limitado. Em particular, o maior tempo computacional é gasto na determinação dos valores de R e L, e o tempo necessário para calcular estes valores para todos os tipos de falta possíveis representa um sério problema na obtenção de uma operação de alta velocidade. Adicionalmente, os valores de R e L encontrados para as fases não faltosas podem resultar em confusão na interpretação dos resultados.

Por este motivo, alguns autores no início do desenvolvimento dos algoritmos numéricos aplicados em proteção, mencionam o desenvolvimento e a execução de uma rotina de detecção e identificação do tipo de falta, a ser mais bem elucidada no item 3.2.2. Após esta seleção, apenas um cálculo de R e L é realizado para que se determine a localização da falta.

Este conceito evoluiu posteriormente para rotinas mais completas, uma vez que durante condições de faltas evolutivas, ou mesmo durante as denominadas “cross country faults”, as quais são faltas monofásicas que ocorrem simultaneamente em diferentes pontos e fases do sistema e de maneira simultânea, a detecção de diferentes tipos de falta torna-se necessária durante todo o tempo de execução do algoritmo.

3.2.1 Detecção de Falta

Uma rotina computacional que executa um procedimento de detecção de falta tem por finalidade determinar em qual estado o sistema se encontra. No regime normal, permanente, sem estado de falta, todas as tensões e correntes são quantidades senoidais que variam lentamente.

Assim, um método que pode ser utilizado para a detecção de um distúrbio ou falta no sistema é comparar o atual conjunto de dados disponíveis com o correspondente conjunto de dados de um ciclo anterior. Se os dois conjuntos de dados forem idênticos, dentro de certos limites, significa que não existe distúrbio e que um novo conjunto de dados pode ser salvo para comparação com o próximo ciclo. Porém, se o conjunto de dados entre os dois ciclos consecutivos difere entre si, uma falta é indicada e um processamento desta falta será necessário.

3.2.2 Classificação da Falta

Uma outra rotina computacional desenvolvida e de grande importância para a aplicação em relés de proteção microprocessados é a rotina que determina o tipo da falta, de maneira que as correntes e tensões apropriadas são selecionadas para o cálculo da falta.

Para esta finalidade, diversos algoritmos foram desenvolvidos por muitos autores, cada qual apresentando suas vantagens e desvantagens. Entre as técnicas mais comuns para este tipo de algoritmo de classificação de faltas podem ser citadas as componentes de Clarke, redes neurais, lógicas nebulosas, etc.

Adicionalmente, o programa pode utilizar a corrente de falta no neutro para distinguir entre faltas nas fases ou no neutro, e em seguida identificar qual ou quais fases estão envolvidas no defeito.

3.2.3 Cálculo de Parâmetros

O programa que determina os parâmetros do circuito é tipicamente baseado em um conjunto específico de valores de correntes e tensões. Em particular, os valores obtidos de R e L após a execução de tal programa são comumente os valores da resistência e reatância de seqüência positiva da linha de transmissão.

Grande esforço intelectual foi despendido nas últimas décadas sobre os conceitos dos relés de distância digitais e diversos algoritmos diferentes foram desenvolvidos. A maioria destes algoritmos pode ser classificada em 4 grupos [18], a saber:

- a. Algoritmos no domínio do tempo modelam a linha de transmissão através de um conjunto de equações diferenciais lineares de primeira ordem. Estes algoritmos numericamente resolvem a equação diferencial que representa a linha de transmissão.
- b. Algoritmos que assumem que as formas de onda apresentadas ao relé são puramente senoidais. A partir de valores de amostras de corrente e tensão os componentes real e reativo (R e X) da impedância aparente são calculados.
- c. A modelagem de forma de onda assume que a forma de onda da falta é composta por uma componente exponencial d.c., a componente fundamental e harmônicas superiores selecionadas. Os coeficientes do modelo são então estimados através da técnica dos mínimos quadrados.
- d. Algoritmos que usam a análise de Fourier para determinar as partes real e imaginária da componente fundamental e conseqüentemente calcular a impedância aparente.

Para todos eles a resistência aparente da linha, R, e a reatância, X, assim calculadas aparecem como uma trajetória para o transitório da impedância aparente da linha quando plotadas em um sistema de coordenadas R-X. O início da trajetória é dado pela impedância aparente da linha para o ponto de pré falta e o final da trajetória dado pela impedância aparente da linha para o ponto de falta. A natureza desta trajetória é substancialmente influenciada tanto pelo algoritmo digital do relé de distância quanto pelo filtro digital escolhidos.

Os algoritmos de proteção podem ainda ser reagrupados em um outro tipo de classificação também bastante conhecida [19], [20], [21], divididos agora em três categorias, a saber:

- a. Algoritmos baseados na forma de onda dos sinais de corrente e tensão
- b. Algoritmos baseados em modelos dos sistemas
- c. Algoritmos baseados nas informações (transitórios) geradas pela falta

Os algoritmos baseados na forma de onda dos sinais de corrente e tensão são bastante conhecidos e têm sido pesquisados desde o surgimento das primeiras técnicas de cálculo numérico associado à proteção de sistemas elétricos. Exemplos destes algoritmos são os filtros de Fourier, filtros trigonométricos (seno e cosseno), filtros baseados na técnica dos mínimos quadrados, filtros de Kalman, etc. Estes filtros são abordados de maneira mais detalhada no item 3.4 deste trabalho.

Por sua vez, os algoritmos baseados em modelos de sistemas apresentam a característica de não trabalharem diretamente na estimação de fasores, mas sim em resolver de forma numérica a equação diferencial que representa o modelo da linha de transmissão. Exemplo de tal algoritmo é o algoritmo baseado na equação diferencial, apresentado com maiores detalhes no item 3.5 deste trabalho.

Finalmente, os algoritmos baseados nas informações, ou transitórios de alta frequência, geradas pela falta classificam-se em um outro grupo de algoritmos numéricos disponíveis. Tais transitórios aparecem pelo fato de que qualquer distúrbio elétrico ocorrendo na rede irá se propagar como ondas viajantes pela linha de transmissão [22]. Exemplos são os algoritmos baseados em ondas viajantes, ou ondas trafegantes.

Pode-se ainda mencionar, neste contexto, os mais recentes desenvolvimentos em algoritmos de proteção numérica, a saber: algoritmos baseados em redes neurais, baseados em phaselets, baseados em wavelets, etc. Estes algoritmos, bem como os algoritmos baseados em ondas trafegantes, no entanto, não fazem parte do escopo deste trabalho, e serão, portanto, omitidos das considerações apresentadas aqui.

3.2.4 Lógica de Disparo

Após o cálculo dos parâmetros do circuito para um determinado defeito, identificado pelas rotinas anteriores, uma outra rotina trata de comparar se os valores resultantes estão dentro dos limites impostos pelos ajustes definidos pelo usuário do equipamento de proteção.

Esta comparação é tipicamente realizada a cada passo da janela de dados, ou seja, amostra por amostra, e a cada vez que o algoritmo identifica que os valores resultantes de R e L estão dentro dos limites estipulados, ou seja, da característica de impedância, um contador é incrementado. Quando o contador atinge um valor limite estipulado ao algoritmo, a rotina habilita um sinal de disparo da função de proteção, que é direcionado para a abertura do disjuntor da linha de transmissão.

De forma semelhante, a cada vez que a rotina indica que os valores resultantes estão fora da característica de impedância, o contador é decrementado, dando maior confiabilidade ao algoritmo para os casos em que a trajetória de impedância atinja os limites definidos pela característica, mas que o distúrbio não seja propriamente uma falta a ser processada pelas rotinas de disparo.

3.3

Processamento de Sinal

Em um relé de proteção convencional as características de operação são completamente definidas pela concepção do hardware. Este é o caso dos relés eletromecânicos, cujo comportamento é ditado pelos transformadores que modificam os sinais de entrada e pela unidade cilíndrica de indução. Por outro lado, os dispositivos de proteção modernos apresentam um hardware muito mais flexível, e o que torna sua função específica é o software que digere as amostras digitalizadas das correntes e tensões [19].

Dentro deste contexto, uma análise das principais características matemáticas que tornam possível a utilização dos dispositivos microprocessados na aplicação da proteção de sistemas elétricos torna-se necessária. Adicionalmente a este tratamento matemático realizado pelos processadores de sinais digitais, é importante ainda destacar os aspectos relativos ao tratamento dos sinais analógicos provenientes dos transformadores de corrente e de potencial.

Nos itens que seguem, esta abordagem é realizada de forma simples, porém de maneira não menos importante. Apesar do maior foco nos algoritmos de proteção propriamente ditos, deve-se mencionar que a amostragem dos sinais analógicos, sua conversão em sinais digitais e a necessidade de filtragem desses sinais são de extrema relevância para o comportamento apropriado das funções de proteção que estão implementadas nos processadores dos dispositivos numéricos.

Em outras palavras, além de todo o ferramental matemático que deve ser aplicável na tomada de decisão do algoritmo numérico, faz-se necessário todo um tratamento dos sinais analógicos antes que os mesmos sejam disponibilizados na forma digital. Por exemplo, com múltiplos relés eletromecânicos operando concomitantemente, a coincidência de tempos não é um problema. No entanto, um microprocessador pode literalmente manusear apenas uma tarefa por vez. Adicionalmente, multiplexadores podem amostrar apenas uma quantidade por vez, e desta forma tensões e correntes não são coincidentes no tempo [23].

Desta forma, um procedimento de filtragem dos sinais, bem como de amostragem e conversão para valores digitais deve ser apropriadamente considerado no desenvolvimento do hardware de um relé de proteção numérico. Estes aspectos são melhores elucidados nos itens que seguem.

3.3.1 Amostragem

O processo de amostragem dos sinais analógicos é parte essencial da proteção baseada em microprocessadores, de maneira que estes sinais sejam apropriadamente

convertidos em sinais digitais que podem ser manuseados pelo hardware, através de cálculos e tomadas de decisões [20].

A maioria das aplicações em relés de proteção trabalha com uma taxa de amostragem fixa e múltipla da frequência nominal do sistema de potência, sendo utilizados para isso os conversores analógicos/digitais. Ressalta-se que existe certa dificuldade em se manter a precisão de medição para corrente de carga e ao mesmo tempo não se ter saturação para valores elevados de corrente de falta dependendo do tipo de conversor utilizado.

Tipicamente, as rotinas dos algoritmos numéricos trabalham com taxas de amostragem que variam entre 8 e 32 amostras por ciclo, dependendo do desenvolvimento de cada fabricante e das funcionalidades implementada nos relés. Esta escolha, em geral, está associada a capacidade de processamento e ao cumprimento do critério de Nyquist, este último relacionado com os fenômenos de *antialiasing* a ser abordado posteriormente.

O tamanho da janela de amostragem, por sua vez, exerce ainda grande influência na precisão dos valores a serem obtidos nos cálculos dos algoritmos. Janelas de dados com maiores comprimentos apresentam resultados mais precisos, ao custo de um maior tempo de processamento, uma vez que toda a janela de dados deve ser processada para que apenas dados pós-falta sejam considerados na tomada de decisão do algoritmo de proteção. Por outro lado, uma janela de amostragem mais curta irá acarretar uma menor precisão dos resultados obtidos, pois tende a diminuir a capacidade de seletividade em frequência do algoritmo.

Para permitir a amostragem de uma quantidade fixada ao invés de uma quantidade que varia rapidamente um circuito de “sample and hold” é geralmente utilizado em relés numéricos, adicionando-se a isso os multiplexadores, os quais permitem que todas as quantidades de entrada sejam amostradas uma por vez.

Desta forma, os aspectos de hardware são fundamentais na concepção de um dispositivo de proteção e devem ser cuidadosamente considerados no desenvolvimento de produtos para esta finalidade. O fluxo de informações ao longo dos circuitos internos dos relés, o tratamento das grandezas medidas e sua conseqüente transformação em valores digitais é tão importante quanto o próprio

algoritmo de proteção, uma vez que os dados não tratados de maneira adequada podem influenciar no resultado final dos cálculos realizados já no processador do relé. A Figura 3.1 apresenta um diagrama simplificado que representa a estrutura interna de um dispositivo numérico de proteção.

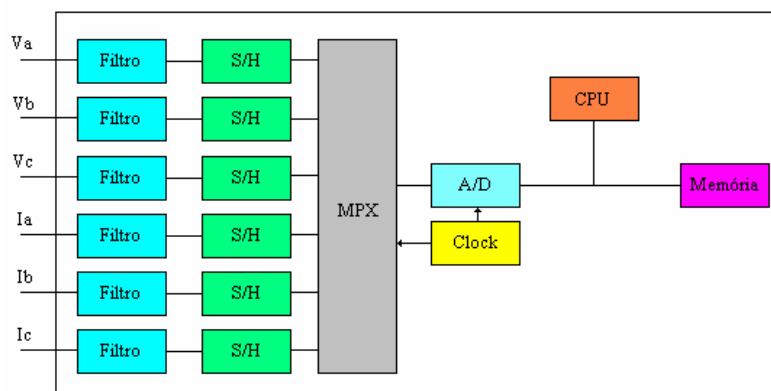


Figura 3.1: Diagrama simplificado de hardware de um relé numérico

3.3.2 “Sample and Hold”

Os dispositivos numéricos de proteção trabalham com múltiplas entradas de corrente e tensão, tipicamente três sinais de corrente I_a , I_b e I_c , e três sinais de tensão V_a , V_b e V_c . Seria conveniente que estes sinais fossem amostrados simultaneamente, a fim de que os cálculos pudessem ser realizados numa mesma base de tempo. Para isso, seria então necessário o emprego de diversos conversores A/D operando simultaneamente, um para cada fase de corrente e tensão, sendo então estes sinais levados até a CPU para seu processamento. No entanto, esta solução é economicamente inviável, tendo em vista os elevados custos destes conversores.

Como alternativa para a solução deste problema, pode-se pensar no uso de vários dispositivos conhecidos como “sample and hold”, empregados em conjunto com outro dispositivo denominado multiplexador. Neste caso, os dispositivos “sample and hold” serão responsáveis pela amostragem e armazenamento dos

valores capturados, até que o dispositivo multiplexador faça a leitura do respectivo sinal desejado.

3.3.3 Multiplexadores

Uma vez que os relés tipicamente apresentam diversas entradas analógicas, diversas conversões devem ser realizadas em cada instante de amostragem. Assim, é desejável (embora não essencial) que todas as amostras de sinais sejam simultâneas, o que significa que ou a conversão e transmissão para o processador de cada amostra são bastante rápidas, ou todos os sinais devem ser amostrados e mantidos no mesmo instante para o processamento através de um ciclo de conversão - transmissão relativamente lento para cada amostra, o que por sua vez é conhecido por sistema de entrada analógico multiplexado [21].

Assim, o multiplexador tem por finalidade executar a seleção de um sinal de um certo número de canais analógicos de entrada, permitindo a transmissão destes sinais de maneira simultânea.

3.3.4 Conversores Analógicos/Digitais

O conversor analógico para digital converte um nível de tensão analógica para a sua representação digital. A principal característica de um conversor A/D é seu comprimento de palavra (word length) expresso em bits. Esta característica afeta diretamente a habilidade do conversor A/D em representar o sinal analógico com uma suficientemente detalhada representação digital [21].

Para cada instante definido por um relógio interno, é executada uma conversão dos sinais analógicos de entrada para a forma digital através do conversor analógico/digital [21].

3.3.5 Filtros Antialiasing

Devido às limitações práticas das taxas de amostragem em relés numéricos, uma grandeza que varie ao longo do tempo, tais como correntes e tensões A.C., será percebida pelos relés de maneira consideravelmente diferente de sua forma de onda contínua atual [23]. As componentes de alta frequência não apenas podem ter sua identificação incorreta, mas também podem apresentar-se como componentes de baixa frequência, e uma vez que esse erro é introduzido ao processo não pode ser reconstituído ou removido.

O fenômeno no qual uma componente de alta frequência presente em uma forma de onda se manifesta como sendo uma componente de baixa frequência é conhecido como “*Aliasing*”, e para que não ocorra devem ser tomadas medidas tais como a pré-filtragem das componentes de frequência que poderão ocasionar esta perturbação.

O elemento que realiza esta função é chamado de Filtro *Antialiasing*, e trata-se na verdade de um filtro do tipo passa baixa que irá rejeitar valores elevados de frequência. Este filtro deve obedecer ao Critério de Nyquist, o qual estabelece que para se evitar o erro de *aliasing* frequências acima de metade da frequência de amostragem devem ser removidas.

Os filtros *antialiasing* podem ser passivos, consistindo apenas de resistores e capacitores exclusivamente, ou ativos, utilizando amplificadores operacionais [21]. De qualquer forma, a função de transferência de um filtro é determinada através de considerações acerca do formato da característica de corte e da resposta transitória do filtro.

Em geral, quanto mais precisa a frequência de corte de um filtro, maior o tempo de atraso de resposta do mesmo. Tipicamente, um filtro de segunda ou terceira ordem de Butterworth, Chebyshev, ou Bessel é empregado em aplicações de filtragem dos canais analógicos de relés microprocessados. A Figura 3.2 apresenta os principais parâmetros a serem considerados na concepção de um filtro de passa baixa.

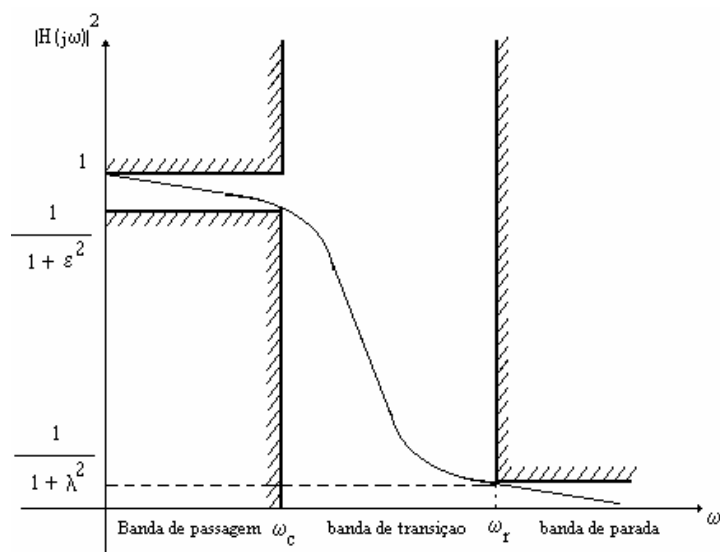


Figura 3.2: Tolerância na resposta em frequência de um filtro passa-baixa

As especificações de tal filtro são dadas por:

$$1 \geq |H(j\omega)|^2 > \frac{1}{1 + \epsilon^2} \quad \text{para } |\omega| < \omega_c \quad (3.2)$$

$$|H(j\omega)|^2 < \frac{1}{1 + \lambda^2} \quad \text{para } |\omega| > \omega_r \quad (3.3)$$

onde ω_c é a frequência de corte, ω_r é a frequência de rejeição λ e ϵ são os parâmetros de concepção que selecionam a atenuação do filtro em duas frequências críticas.

Uma vez definida a faixa de trabalho do filtro, através da especificação dos parâmetros acima definidos, o comportamento do filtro pode ser verificado através da plotagem de suas respectivas curvas de respostas em função da frequência. Como exemplo, seja considerar um Filtro de Butterworth de 3ª ordem, com frequência de corte ajustada em 180Hz. A Figura 3.3 ilustra a resposta em frequência deste filtro.

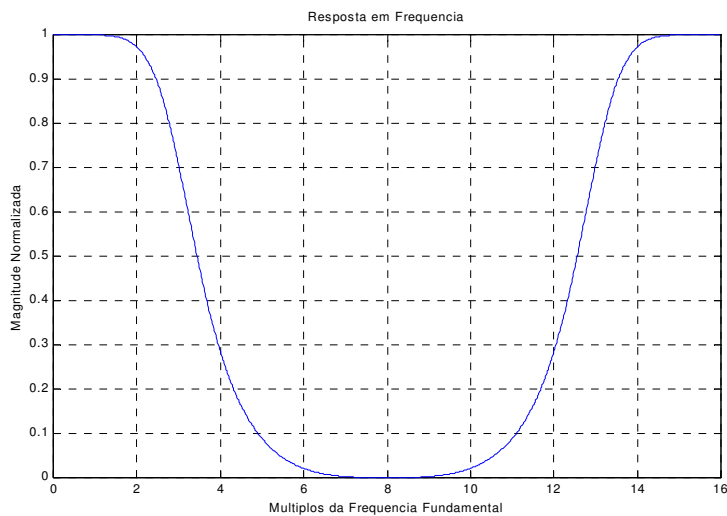


Figura 3.3: Filtro de Butterworth de 3^a ordem, com FC = 180Hz.

Seja agora considerar um sinal senoidal acrescentado de valores harmônicos para ilustrar a performance do filtro de Butterworth. Neste caso, o sinal senoidal fundamental será acrescentado da 3^a harmônica com mesmo ângulo de fase. O filtro de Butterworth de 3^a ordem e frequência de corte ajustada em 180Hz irá eliminar a componente de harmônica acrescentada ao sinal original, mas apresentará um ligeiro atraso de tempo de saída, que pode ser observado pela Figura 3.4.

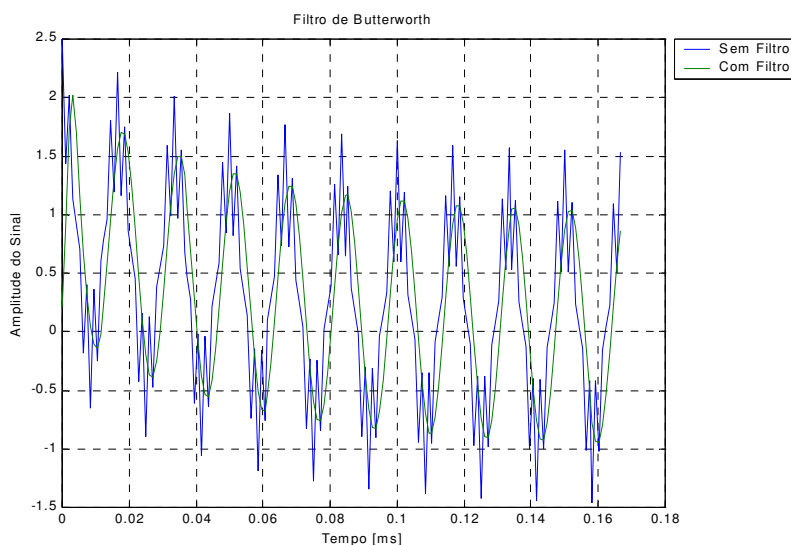


Figura 3.4: Comparação de um sinal após filtragem de Butterworth

3.4

Algoritmos baseados na Forma de Onda

Os algoritmos numéricos de medição de fasores têm o objetivo de estimar o fasor de um determinado componente de frequência de um sinal periódico amostrado [25]. Estes algoritmos são por vezes chamados de filtros numéricos, devido a sua característica de seletividade em frequência.

Desde o início da pesquisa da aplicação de microprocessadores aos sistemas de proteção, diversos algoritmos foram desenvolvidos com o propósito único de calcular as grandezas que poderiam ser utilizadas na tomada de decisão de um eventual disparo ou mesmo de restrição para uma determinada condição.

Por exemplo, no caso de um relé de distância, o interesse imediato é no valor da impedância que o relé está calculando, através da derivação dos valores de corrente e tensão fornecidas ao mesmo. Já no caso de um relé para a proteção de transformador o interesse está nos valores de corrente no lado primário e no lado secundário do transformador, a fim de que o próprio algoritmo possa calcular a diferença entre elas e tomar ou não a decisão de disparo. Adicionalmente para um transformador, o algoritmo calcula ainda componentes harmônicas, tipicamente 2^a harmônica, a ser utilizada como critério de restrição durante a energização do transformador, e 5^a harmônica, a ser utilizada como critério de restrição, ou mesmo disparo, no caso de sobreexcitação do transformador.

Assim, uma vez destacada a importância e peculiaridade para as quais cada algoritmo deve estar preparado, uma breve descrição de alguns deles é feita a seguir. Maior destaque será dado aos algoritmos baseados na transformada de Fourier e ao algoritmo baseado no método da equação diferencial, tendo em vista que os mesmos serão objetos de um estudo mais aprofundado durante as simulações realizadas e apresentadas no decorrer deste trabalho.

3.4.1 Algoritmo de Aproximação da Curva Senoidal

Este algoritmo foi um dos primeiros a ser desenvolvido no início das pesquisas e em particular parte do princípio de que o sinal de entrada, ou seja, as ondas de tensão e corrente, é do tipo senoidal puro com frequência igual a nominal do sistema, utilizando-se de transformações trigonométricas para calcular as características desejadas deste sinal de entrada. Os valores eficazes da corrente e tensão podem então ser estimados através das seguintes expressões:

$$v = \frac{\sqrt{v_k^2 + v_{k+1}^2 - 2 \cdot v_k \cdot v_{k+1} \cdot \cos \omega \Delta T}}{\text{sen } \omega \Delta T} \quad (3.4)$$

$$i = \frac{\sqrt{i_k^2 + i_{k+1}^2 - 2 \cdot i_k \cdot i_{k+1} \cdot \cos \omega \Delta T}}{\text{sen } \omega \Delta T} \quad (3.5)$$

Este algoritmo apresenta limitações de aplicação prática, uma vez que um sinal senoidal puro é difícil de ser encontrado em um sistema de potência real.

3.4.2 Algoritmo de Mann e Morrison

Este algoritmo de proteção é baseado na predição dos valores de pico das formas de onda senoidais da corrente e tensão, e utiliza os valores amostrais e suas derivadas para o cálculo da impedância.

Uma análise mais criteriosa deste algoritmo, através da resposta em frequência, ilustra o risco das suposições a que ele se baseia, ou seja, pequena janela de dados (três amostras), existência de corrente de curto circuito perfeitamente senoidal e eliminação prévia da componente aperiódica. Como vantagem, no entanto,

apresenta um rápido processamento pelo fato de trabalhar com uma janela de dados de apenas três amostras.

As expressões matemáticas que permitem sua implementação são apresentadas a seguir:

$$I_p^2 = [i_{k-1}(t)]^2 + \left[\frac{i_{k-1}'(t)}{\omega_o} \right]^2 \quad (3.6)$$

e

$$i_{k-1}' = \frac{i_k - i_{k-2}}{2T} \quad (3.7)$$

A derivada utilizada neste algoritmo tem por característica deteriorar a relação sinal / ruído, tornando o algoritmo muito sensível a harmônicos superiores que aumentam ainda mais os erros.

Uma vertente deste algoritmo, e que faz uso da primeira e segunda derivadas, foi desenvolvida e implementada no primeiro relé que usou um computador digital para a proteção de linhas de transmissão, denominado Prodar 70, e desenvolvido pela Electric Westinghouse em conjunto com a Pacific Gas [5].

3.4.3 Algoritmos Baseados na Análise de Fourier

Os algoritmos baseados na análise de Fourier são certamente os mais empregados no desenvolvimento prático de relés de proteção. São usados não apenas para as rotinas de medição dos relés de distância para a proteção de linhas, mas também na aplicação de relés de sobrecorrente, proteção de transformadores, etc.

Um algoritmo baseado na análise de Fourier possui implementação de certa forma simples, e ainda apresenta grande eficiência na filtragem e na rejeição dos componentes harmônicas. No entanto, é sensível aos componentes não harmônicos e quando utilizado com janela de dados com um ciclo necessita de pelo menos um ciclo da fundamental para atingir o regime.

A seguir são apresentados os principais modelos de algoritmos de Fourier estudados desde a sua introdução.

3.4.3.1 Algoritmo baseado na Série de Fourier

Ramamoorthy foi o primeiro de muitos a propor que a tensão ou corrente desejada fosse extraída de transitórios de falta através da correlação de um ciclo de amostras de dados com amostras armazenadas da referência das ondas de seno e cosseno [19]. No entanto, os sinais de tensão e corrente são periódicos, logo a componente exponencial de falta é uma fonte de erro [22]. De forma matemática, tem-se:

$$X(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\omega_0 t - \phi_n) \quad (3.8)$$

sendo:

$$a_n = C_n \cdot \cos \phi_n \quad e \quad b_n = -C_n \cdot \sen \phi_n \quad (3.9)$$

Assim,

$$C_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad e \quad \phi_n = \text{tg}^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (3.10)$$

A componente fundamental do sinal pode ser extraída de:

$$\frac{a_c}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos(\omega_0 t) \cdot dt \quad (3.11)$$

$$\frac{b_c}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sen(\omega_0 t) \cdot dt \quad (3.12)$$

$$\frac{C}{2} = \frac{1}{2}(a_c - jb_s) \quad (3.13)$$

Para a estimação dos parâmetros seno e cosseno do componente fundamental da série de Fourier as integrais são aproximadas pelo método trapezoidal, através das seguintes equações:

$$Y_c = \frac{1}{N} \left[y_{k-N} + y_k + 2 \sum_{n=1}^{N-1} y_{k-N+n} \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \right] \quad (3.14)$$

$$Y_s = \frac{1}{N} \left[2 \sum_{n=1}^{N-1} y_{k-N+n} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \right] \quad (3.15)$$

sendo y_k uma amostra do sinal e N o número de amostras da janela de dados, Y_s e Y_c os coeficientes seno e cosseno da série de Fourier. Finalmente, o fasor que representa o sinal é dado pela amplitude ou módulo A e pelo ângulo de fase ϕ dados por:

$$A = \sqrt{Y_c^2 + Y_s^2} \quad \text{e} \quad \phi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Y_s}{Y_c}\right) \quad (3.16)$$

3.4.3.2 Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo

Este é talvez o filtro numérico mais conhecido e mais implementado por fabricantes ou desenvolvimentos acadêmicos. A técnica desenvolvida pela transformada discreta de Fourier, também conhecida por DFT (Discrete Fourier Transformer) possibilita a determinação do conteúdo espectral de um sinal periódico.

Em um algoritmo de Fourier de ciclo completo, ou seja, com uma janela retangular de comprimento igual a um ciclo da componente fundamental, que utiliza

N amostras por ciclo, $[(N/2)-1]$ harmônicos podem ser extraídos. Os componentes fasoriais podem ser dados pelas seguintes expressões:

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3.17)$$

O algoritmo de Fourier de ciclo completo apresenta boa resposta transitória e rejeição de harmônicos. Entretanto, é sensível aos componentes não harmônicos e leva pelo menos um ciclo da fundamental para atingir o regime.

A Figura 3.5 apresenta a resposta em frequência de um filtro numérico baseado na transformada discreta de Fourier de ciclo completo.

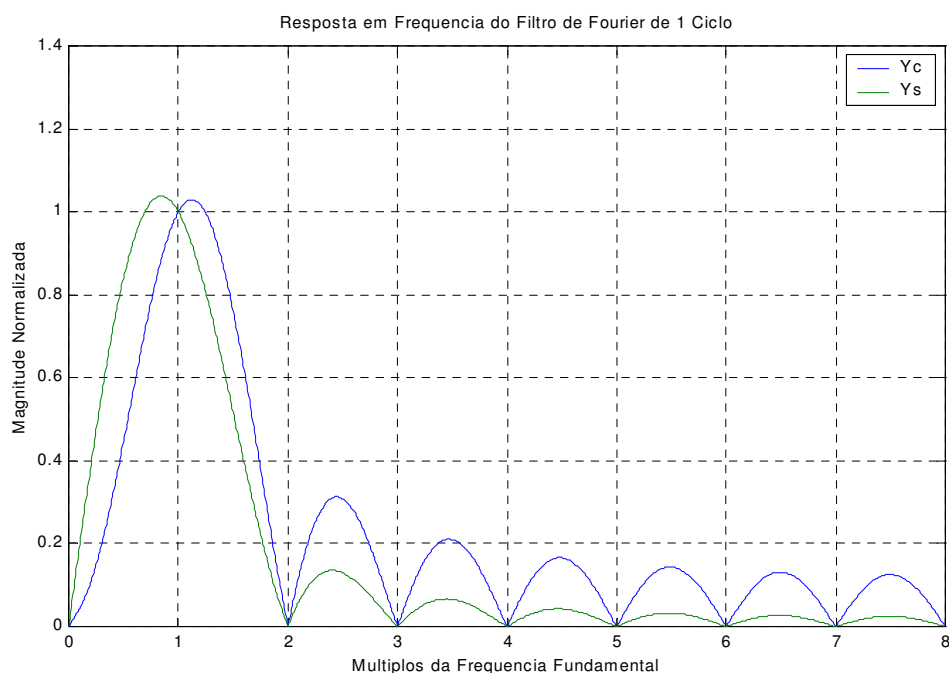


Figura 3.5: Resposta em frequência do algoritmo DFT de ciclo completo

Observa-se que a análise de Fourier neste caso apresenta uma filtragem drástica dos dados de entrada, e uma saída suave e precisa na rejeição dos harmônicos. A resposta em frequência mostra o valor de pico para a frequência do

sistema, e que se anula para a componente DC e para os demais harmônicos. Os harmônicos elevados e acima do segundo harmônico são todos bem atenuados. Os pequenos valores de pico que aparecem entre as harmônicas são referidos como sendo dispersão e são resultado da janela de dados finita.

3.4.3.3 Transformada Discreta de Fourier de ½ ciclo

Como forma de diminuir o tamanho da janela de dados do algoritmo de Fourier de ciclo completo e desta forma aumentar sua rapidez de convergência foi desenvolvido a DFT de ½ ciclo. Esta técnica, no entanto, possui o inconveniente de perder a habilidade de rejeitar a componente DC, bem como de não rejeitar as harmônicas de ordem par. Vale ressaltar, no entanto, que a componente DC pode ser eliminada por filtragem analógica ou digital adicional, tornando o algoritmo de certa forma simples e vantajoso. As seguintes expressões definem este filtro:

$$Y_c = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} y_{(n-\frac{N}{2}+k)} \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3.18)$$

$$Y_s = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} y_{(n-\frac{N}{2}+k)} \operatorname{sen}\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3.19)$$

3.4.3.4 Filtros Trigonômétricos

Um desenvolvimento bastante parecido com o filtro de Fourier de ciclo completo é a utilização dos chamados filtros trigonométricos, ou os denominados Filtro Seno e Filtro Cosseno. O filtro cosseno é um algoritmo de ciclo inteiro que utiliza dois filtros compostos pelos mesmos coeficientes, dados pelo cosseno dos

ângulos amostrados. O filtro seno é análogo ao filtro cosseno, exceto pelo fato de que seus coeficientes são dados pelo seno dos ângulos amostrados [25].

A obtenção da componente em quadratura do filtro cosseno é feita através de um deslocamento em fase de um quarto de ciclo, equivalente a 90° , na aplicação dos coeficientes. Desta forma,

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left((k - N/4) \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3.20)$$

Apesar da aparente semelhança do filtro cosseno com o filtro de Fourier, o filtro cosseno mostra-se menos sensível aos componentes de baixa frequência. Apresenta uma convergência mais rápida, porém é mais sensível a frequências inter-harmônicas. Por sua vez, o filtro seno apresenta um comportamento oposto ao do filtro cosseno, ou seja, possui maior sensibilidade aos sub-harmônicos, mas atenua melhor as inter-harmônicas.

Uma outra possibilidade é o desenvolvimento de um filtro híbrido [26], isto é, utilizando as propriedades dos filtros seno e cosseno é possível construir um outro filtro que se beneficie das vantagens dos dois filtros anteriores. O filtro seno é então utilizado para estimar os fasores de tensão, uma vez que possui baixa sensibilidade as altas frequências, e o filtro cosseno é utilizado para estimar os fasores de corrente, pois apresenta melhor resposta para baixas frequências.

3.4.4 Algoritmos Baseados no Método dos Mínimos Quadrados

O método dos erros mínimos quadrados (*Least Mean Square – LMS*) vem sendo extensamente utilizado na engenharia, principalmente em problemas relacionados à estimação de parâmetros e identificação de sistemas. Trata-se de algoritmos que se baseiam no ajuste de uma função analítica pré-definida qualquer $\hat{y}(t)$ aos sinais de entrada $y(t)$.

O método consiste na minimização do quadrado deste erro a cada conjunto de N amostras, denominado janela de dados. Estas amostras são tomadas em instantes discretos consecutivos t_{k-N+1} a t_k .

Existem diversas maneiras de se derivar o algoritmo dos erros mínimos quadrados. Na proteção de distância tem-se normalmente interesse no cálculo da componente de primeiro harmônico das grandezas de entrada do relé - em geral, tensão e corrente - de forma a se determinar o valor da impedância “vista” por ele.

Este filtro foi originariamente proposto Luckey em 1975 e posteriormente, em 1979, por Sachdev & Baribeau, onde ele foi consolidado na aplicação em tarefas de proteção de linhas de transmissão.

Este método de solução para filtro numérico a ser aplicado em relés numéricos de proteção procura levar em consideração alguns componentes harmônicos e um componente exponencial de constante de tempo conhecida, ou seja, a resolução do problema considera a hipótese de que o sinal de falta conterà determinadas freqüências e a componente exponencial representada por alguns termos da série de Taylor. Neste caso, o resultado obtido será tão mais preciso quanto mais precisa for esta hipótese. Uma possível hipótese para representar este problema é equação dada abaixo:

$$x(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \theta_2) + A_3 \cos(3\omega_0 t + \theta_3) + A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.21)$$

Esta equação pode ser modificada e novamente escrita, de forma que seus coeficientes serão obtidos através de um procedimento numérico.

$$x(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \theta_2) + A_3 \cos(3\omega_0 t + \theta_3) + A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.22)$$

Expandindo os termos em cosseno, vem:

$$\begin{aligned}
 x(t) = & A_1 \{ \cos \omega_0 t \cdot \cos \theta_1 - \text{sen} \omega_0 t \cdot \text{sen} \theta_1 \} + A_2 \{ \cos 2\omega_0 t \cdot \cos \theta_2 - \text{sen} 2\omega_0 t \cdot \text{sen} \theta_2 \} + \dots \\
 & \dots + A_3 \{ \cos 3\omega_0 t \cdot \cos \theta_3 - \text{sen} 3\omega_0 t \cdot \text{sen} \theta_3 \} + A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

Reagrupando os termos, e para um dado instante de tempo t , tem-se:

$$\begin{aligned}
 x(t) = & A_1 \cos \theta_1 \cos \omega_0 t - A_1 \text{sen} \theta_1 \text{sen} \omega_0 t + A_2 \cos \theta_2 \cos 2\omega_0 t - A_2 \text{sen} \theta_2 \text{sen} 2\omega_0 t + \dots \\
 & \dots + A_3 \cos \theta_3 \cos 3\omega_0 t - A_3 \text{sen} \theta_3 \text{sen} 3\omega_0 t + A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

Portanto,

$$x(t) = Y_1 \cos \omega_0 t - Y_2 \text{sen} \omega_0 t + Y_3 \cos 2\omega_0 t - Y_4 \text{sen} 2\omega_0 t + Y_5 \cos 3\omega_0 t - Y_6 \text{sen} 3\omega_0 t + Y_7 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ou de outra forma,

$$x(t) = Y_1 a_{11} + Y_2 a_{12} + Y_3 a_{13} + Y_4 a_{14} + Y_5 a_{15} + Y_6 a_{16} + Y_7 a_{17} \quad (3.25)$$

onde:

$$\begin{array}{ll}
 Y_1 = A_1 \cos \theta_1 & a_{11} = \cos \omega_0 t \\
 Y_2 = A_1 \text{sen} \theta_1 & a_{12} = \text{sen} \omega_0 t \\
 Y_3 = A_2 \cos \theta_2 & a_{13} = \cos 2\omega_0 t \\
 Y_4 = A_2 \text{sen} \theta_2 & a_{14} = \text{sen} 2\omega_0 t \\
 Y_5 = A_3 \cos \theta_3 & a_{15} = \cos 3\omega_0 t \\
 Y_6 = A_3 \text{sen} \theta_3 & a_{16} = \text{sen} 3\omega_0 t \\
 Y_7 = A_0 & a_{17} = e^{-t/\tau}
 \end{array}$$

Analogamente, a expressão (2) acima pode ser escrita para outros instantes de tempo t , ou amostras consecutivas de uma forma de onda, espaçadas de um intervalo de tempo Δt .

Colocando na forma matricial, a seguinte expressão pode ser obtida:

$$[A].[Y] = [X] \quad (3.26)$$

Se a matriz A for da forma quadrada a solução para o problema será dada por:

$$[Y] = [A]^{-1}[X] \quad (3.27)$$

Porém, quando se utilizam mais amostras do que o número de incógnitas pode-se trabalhar com a solução que minimiza o quadrado dos erros, ou seja,

$$[B] = ([A]^T.[A])^{-1}.[A]^T \quad (3.28)$$

Portanto,

$$[Y] = [B].[X] \quad [7 \times 1] = [7 \times m].[m \times 1] \quad (3.29)$$

Desta forma, os valores que formam a componente fundamental poderão ser encontrados por:

$$Y_1 = b_{11}.X_1 + b_{12}.X_2 + b_{13}.X_3 + b_{14}.X_4 + b_{15}.X_5 + b_{16}.X_6 + b_{17}.X_7$$

$$Y_2 = b_{21}.X_1 + b_{22}.X_2 + b_{23}.X_3 + b_{24}.X_4 + b_{25}.X_5 + b_{26}.X_6 + b_{27}.X_7$$

E finalmente, o valor do módulo para a componente fundamental será:

$$Y_{\text{fund}} = \sqrt{Y_1^2 + Y_2^2} \quad (3.30)$$

A Figura 3.6 apresenta a resposta em frequência deste filtro e a Figura 3.7 apresenta o comportamento dinâmico de convergência para uma janela de dados de 16 amostras por ciclo para um sinal composto da fundamental adicionada de 20% de segundo harmônico e zero de terceiro harmônico.

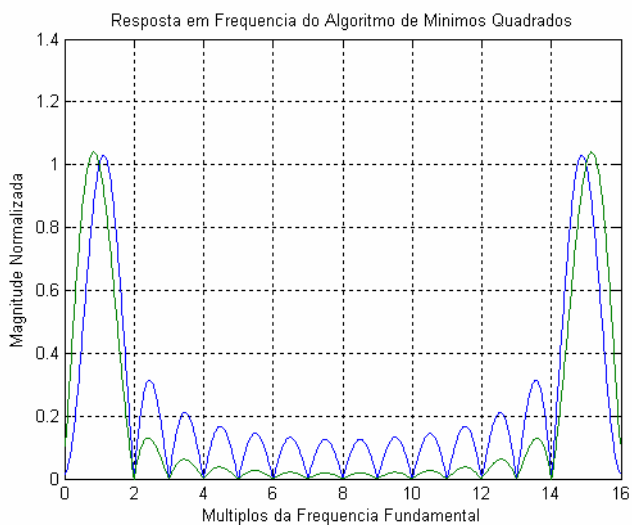


Figura 3.6: Resposta em frequência do algoritmo de mínimos quadrados

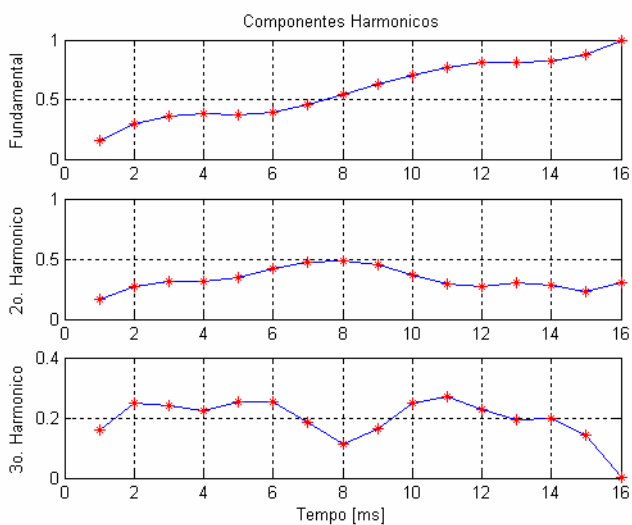


Figura 3.7: Convergência do algoritmo de mínimos quadrados

3.4.5 Algoritmos Baseados no Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um estimador recursivo de estados, baseado em mínimos quadrados, que funciona a base de um processo de predição e correção. A partir do conhecimento dos valores passados e da estatística do sinal, realiza predição do próximo estado [25]. Trata-se de um filtro recursivo cujas saídas dependem das entradas presentes bem como de todas as entradas anteriores. Além disso, são filtros que dependendo do modelo selecionado para representar o sinal irão apresentar coeficientes de ganho variantes no tempo, diferentemente dos filtros digitais recursivos que possuem coeficientes constantes.

A aplicação dos filtros de Kalman aos sistemas de potência e em particular aos relés numéricos de distância parte de uma base importante que consiste em considerar os componentes de frequência diferentes da frequência fundamental (harmônicos, ondas viajantes, erros, etc) como sinais de ruído [22].

3.5

Algoritmos baseados em Modelos dos Sistemas

Os algoritmos baseados na forma de onda de correntes e tensões, e descritos até o presente momento, são baseados na descrição das formas de onda e são essencialmente algoritmos de relés de impedância. Estes algoritmos procuram estimar as componentes de frequência fundamental de correntes e tensões para poder computar a impedância até a falta. Os algoritmos de equação diferencial, por outro lado, são baseados em modelos de sistemas ao invés de modelos de sinal, mas ainda podem ser considerados como estimadores de parâmetros [21].

Nesta abordagem a estimativa dos parâmetros da linha é feita através da solução da equação diferencial que representa a linha de transmissão, levando em conta os valores de $i(t)$ e $v(t)$, conforme a expressão dada a seguir. Deve-se observar

que tanto a corrente quanto a tensão podem ser medidas, mas não se pode medir os valores da derivada da corrente.

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.31)$$

Desta forma, os algoritmos baseados na solução da equação diferencial podem ser classificados em dois grupos, e que se identificam pelo método utilizado para a eliminação da medição da derivada da corrente. Estes dois grupos podem reconhecidos como:

- Eliminação da derivada via integração
- Aproximação da derivada usando amostras

A eliminação da derivada via integração é geralmente realizada através de dois tipos distintos de aproximação: a integração direta ou a integração com função ponderada. A aproximação da derivada usando amostras é realizada através da representação da equação na forma discreta.

Como forma de melhor elucidar estas técnicas, algumas delas são apresentadas a seguir e posteriormente uma visão mais geral destes algoritmos é apresentada em forma de tabela.

3.5.1 Solução da Equação Diferencial através de Integração Direta

Seja inicialmente adotar como um modelo de uma linha sob falta o circuito apresentado pela Figura 3.8, que representa um circuito série do tipo R-L.

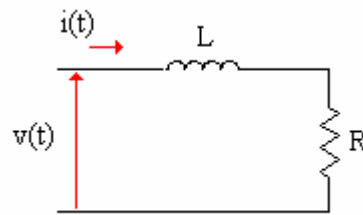


Figura 3.8: Modelo simplificado de uma linha sob falta.

A tensão terminal pode ser expressa como função da corrente no circuito R-L, ou seja,

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.32)$$

Tendo em vista que as derivadas das quantidades medidas são difíceis de serem obtidas, McInnes e Morrison desenvolveram uma técnica melhorada através de integração em dois intervalos consecutivos, de t_0 a t_1 e de t_1 a t_2 .

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t)dt = R \int_{t_0}^{t_1} i(t)dt + L[i(t_1) - i(t_0)] \quad (3.33)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} v(t)dt = R \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt + L[i(t_2) - i(t_1)] \quad (3.34)$$

Estas integrais devem ser aproximadas através dos valores de amostras. Sendo as amostras igualmente espaçadas em um intervalo Δt e aplicando a regra trapezoidal para as integrais, vem:

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t)dt = \frac{\Delta t}{2} [v(t_1) + v(t_0)] = \frac{\Delta t}{2} [v_1 + v_0] \quad (3.35)$$

Desta forma, as expressões integrais podem ser reescritas para as amostra k , $k+1$ e $k+2$.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}(i_{k+1} + i_k) & (i_{k+1} - i_k) \\ \frac{\Delta t}{2}(i_{k+2} + i_{k+1}) & (i_{k+2} - i_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2}(v_{k+1} + v_k) \\ \frac{\Delta t}{2}(v_{k+2} + v_{k+1}) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Estas três amostras consecutivas de corrente e tensão são suficientes para computar os valores estimados de R e L como:

$$R = \left[\frac{(v_{k+1} + v_k)(i_{k+2} - i_{k+1}) - (v_{k+2} + v_{k+1})(i_{k+1} - i_k)}{(i_{k+1} + i_k)(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1})(i_{k+1} - i_k)} \right] \quad (3.37)$$

$$L = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{(i_{k+1} + i_k)(v_{k+2} + v_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1})(v_{k+1} + v_k)}{(i_{k+1} + i_k)(i_{k+2} - i_{k+1}) - (i_{k+2} + i_{k+1})(i_{k+1} - i_k)} \right] \quad (3.38)$$

As expressões acima reportam que a computação total envolvida é representada pelo processamento de seis amostras, sendo três amostras de corrente e três amostras de tensão. Porém, esta janela de dados curta significa que o algoritmo não é tão seletivo quanto algoritmos de janelas de dados longas. Um problema adicional está no conceito da resposta em frequência destes algoritmos, pois uma vez que $v(t)$ e $i(t)$ satisfaçam a equação diferencial, não importando quais frequências estão presentes nestes sinais, os valores de R e L calculados estarão corretos.

No entanto, este tipo de algoritmo possui a vantagem de reconhecer a componente DC como uma componente válida da corrente de falta, sendo parte da solução da equação diferencial, ao invés de tratá-la e processá-la como um transitório não esperado. Este modelo é válido para linhas que não são extremamente longas, e que permitem a capacitância em derivação ser desprezada. Para linhas longas o efeito da capacitância em derivação introduz algum erro, mas não corrompe os resultados excessivamente, em geral. Modelos de algoritmos que incluem a capacitância em derivação foram desenvolvidos, mas ao custo de um severo aumento no processamento computacional.

Deve ser notado ainda nas equações (3.37) e (3.38) que os denominadores não são constantes e variam ao longo do tempo, com mínimo local em pontos onde tanto a corrente quanto sua derivada assumem valores pequenos. Para um sinal de corrente puramente senoidal, a corrente e sua derivada são pequenas simultaneamente, porém ao ser incluída a componente DC existe a possibilidade de que ambas sejam pequenas durante um curto intervalo de tempo.

Durante os intervalos em que o denominador é pequeno, podem ocorrer erros no denominador causados por fenômenos do sistema e que não satisfazem a equação diferencial, como por exemplo, os efeitos dos elementos em derivação de uma linha de transmissão são amplificados. Desta forma, as estimativas obtidas por esta técnica podem tornar-se muito pobres, indicando a necessidade de um pós-processamento das estimativas produzidas por este algoritmo quando uma janela curta (três amostras) é utilizada [20].

Para solucionar este problema, duas diferentes propostas foram sugeridas. Inicialmente, um esquema de contador foi implementado ao algoritmo. Assim, caso a amostra de impedância medida pelo algoritmo atingisse a zona de impedância o contador era incrementado, e caso a amostra caísse fora da zona de impedância o contador era decrementado. Estabelecendo um limite de contagem de, por exemplo, seis amostras, o algoritmo poderia enviar um sinal de disparo em cerca de metade de um ciclo para uma janela de dados de 16 amostras.

Posteriormente, uma segunda proposta indicou o uso de um filtro de mediana [27]. A operação de mediana organiza os valores de entrada de acordo com suas

amplitudes e seleciona o valor do meio como a saída, eliminando ruídos isolados e preservando as características essenciais dos dados de entrada.

3.5.2 Solução da Equação Diferencial com Limites Selecionados

Esta proposta de Ranjbar e Cory trata os dados de entrada como um conjunto solução da equação diferencial para o modelo R e L série da linha de transmissão. Os parâmetros R e L são calculados pelas equações abaixo através da seleção de limites de integração escolhidos para eliminar harmônicos de baixa ordem específicos, bem como seus múltiplos. Por exemplo, para eliminar os harmônicos K, M e N os autores indicam:

$$L\left(\sum \int di\right) + R\left(\sum \int idt\right) = \sum \int vdt \quad (3.39)$$

onde,

$$\sum \int vdt = \int_0^{\frac{2\pi}{K}} vdt + \int_{\frac{\pi}{M}}^{\frac{2\pi}{K} + \frac{\pi}{M}} vdt + \int_{\frac{\pi}{N}}^{\frac{2\pi}{K} + \frac{\pi}{N}} vdt + \int_{\frac{\pi}{M} + \frac{\pi}{N}}^{\frac{2\pi}{K} + \frac{\pi}{M} + \frac{\pi}{N}} vdt \quad (3.40)$$

As quantidades para a corrente são calculadas de forma semelhante.

3.5.3 Solução da Equação Diferencial por Amostras

Este método, proposto por Smolinski, entre outros, apresenta a solução para os parâmetros R e L através diferenciação numérica em dois períodos de tempo sucessivos, e a solução simultânea das equações lineares resultantes.

Se forem tomadas amostras das formas de onda de corrente e tensão da linha em incrementos de tempo uniformes $h = \Delta t$ e as derivadas substituídas por suas diferenças finitas (centrais) para cada duas amostras sucessivas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_k & \frac{i_{k+1} - i_{k-1}}{2h} \\ i_{k+1} & \frac{i_{k+2} - i_k}{2h} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \\ V_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

A solução desta equação resulta nos valores de R e L da linha de transmissão.

Os algoritmos apresentados por diversos autores podem ser classificados em forma de tabela, conforme apresentado pela Tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1: Classificação de algoritmos baseados em modelos de sistema

Algoritmo	Eliminação do termo di/dt				
	Amostras			Integração	
	Para trás	Para frente	Médio	Direto	Ponderada
Smolinski			X		
Bornard, Bastide	X	X			
Breingan, et al.				X	
McInnes, Morrison				X	
Poncelet			X	X	
Ranjbar, Cory					X

O Capacitor Série

4.1

Considerações Gerais

O capacitor série é basicamente constituído de pequenos elementos capacitivos conectados em série e paralelo para formar um banco maior de alta capacitância e elevado valor de corrente e tensão nominal. [28]

De uma forma geral, em uma linha de transmissão existe apenas um capacitor série instalado ao longo de seu trecho, entretanto existe a possibilidade de que a compensação seja feita de forma distribuída, através da instalação de mais unidades capacitivas em diferentes segmentos da linha.

Obviamente, o capacitor série não é composto apenas pelo banco de capacitores de forma isolada. Para o correto funcionamento, a compensação série exige controle, proteção e supervisão [29] para permitir que ela atue de maneira integrada a qualquer sistema de potência.

Assim, o circuito principal de um capacitor série moderno apresenta elementos complementares, apresentados na Figura 4.1, onde podem ser visualizados o varistor tipo ZnO, ou MOV (Metal Oxide Varistor), o “Spark Gap” e um disjuntor.

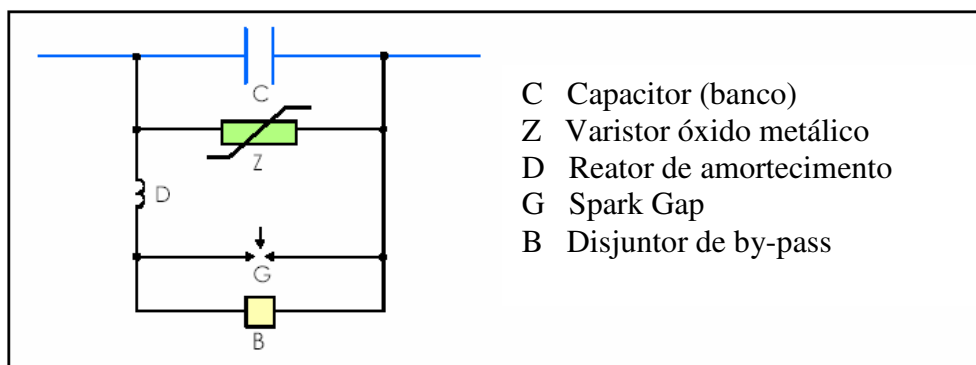


Figura 4.1: Diagrama do circuito principal

O MOV tem a finalidade de limitar a tensão através do capacitor em níveis seguros de operação, principalmente durante curto circuitos na linha que resultem em um elevado valor de corrente passante pelo capacitor.

O “Spark Gap” é utilizado em muitos casos como uma proteção de retaguarda, permitindo um “by-pass” do capacitor série em situações onde o varistor não é suficiente para absorver o excesso de corrente durante uma seqüência de falta.

Finalmente um disjuntor é incorporado ao esquema para permitir a colocação ou isolamento do capacitor série conforme necessário, sendo também utilizado no auxílio da extinção de corrente do “spark gap”, ou para isolar o varistor para faltas próximas ao capacitor.

4.2

Arranjos Físicos

A compensação série pode ser realizada pela aplicação de uma ou mais unidades de capacitores série, que assim podem estar divididos em dois ou três grupos, conforme a Figura 4.2, onde cada segmento possui sua própria proteção contra sobretensão, chave de “bypass” e proteção do sistema.

Este esquema pode ser uma vantagem em relação a um conjunto apenas de banco de capacitores, pois o fato de um dos bancos estar sob falta ou defeito não compromete a performance e operação dos demais. Adicionalmente, o arranjo da subestação pode permitir que durante a manutenção de um dos conjuntos os demais permaneçam em operação.

Capacitor Série (uma fase)

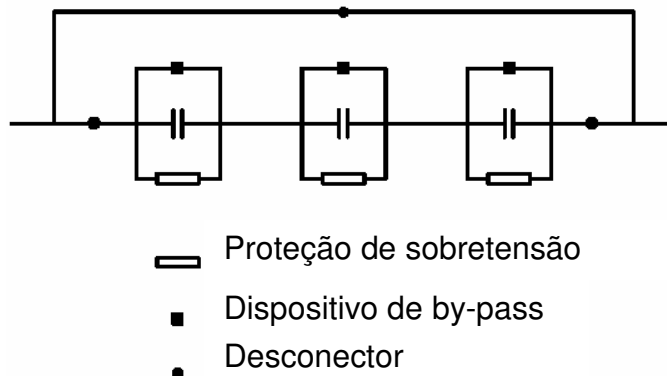


Figura 4.2: Capacitor série dividido em 3 segmentos

4.3

Grau de Compensação

Uma forma de descrever a reatância do capacitor, ou seja, seu tamanho, e relacioná-la à reatância da linha não compensada é através da definição do grau de compensação [28].

Pode-se definir o *grau de compensação* k como sendo:

$$k = \frac{X_C}{X_L} = \frac{X_L - X_L + X_C}{X_L} = 1 - \frac{X_L - X_C}{X_L} \quad (4.1)$$

onde X_C [ohm] é o valor da reatância do capacitor série e X_L [ohm] é o valor de reatância total da linha definida pela equação (4.2).

$$X_L = 1 \cdot x_1 \quad (4.2)$$

onde l [km] é o comprimento da linha de transmissão e x_1 [ohm/km] é a reatância de seqüência positiva por unidade de comprimento da linha não compensada. É comum ainda expressar o grau de compensação em percentual $k\%$ [%].

$$k\% = 100 \cdot k \quad (4.3)$$

Para o caso de linhas muito longas, a equação (4.2) pode não exprimir a melhor estimativa da reatância da linha e pode ser necessário utilizar a reatância corrigida para a linha longa, ou seja:

$$k_l = 1 - \frac{X_{lc}}{X_{lu}} \quad (4.4)$$

onde X_{lc} [ohm] é a reatância corrigida da linha longa compensada e X_{lu} [ohm] é a reatância corrigida da linha longa não compensada. Em geral, o grau de compensação varia entre 20 e 70%. [28]

O impacto da compensação série na capacidade de transmissão pode ser ilustrado conforme a Figura 4.3. A quantidade k reflete o grau de compensação do capacitor série, igual a relação entre a reatância capacitiva do capacitor série X_c e a reatância indutiva da linha de transmissão X_L , sendo ψ é a diferença angular entre as duas tensões de final de linha.

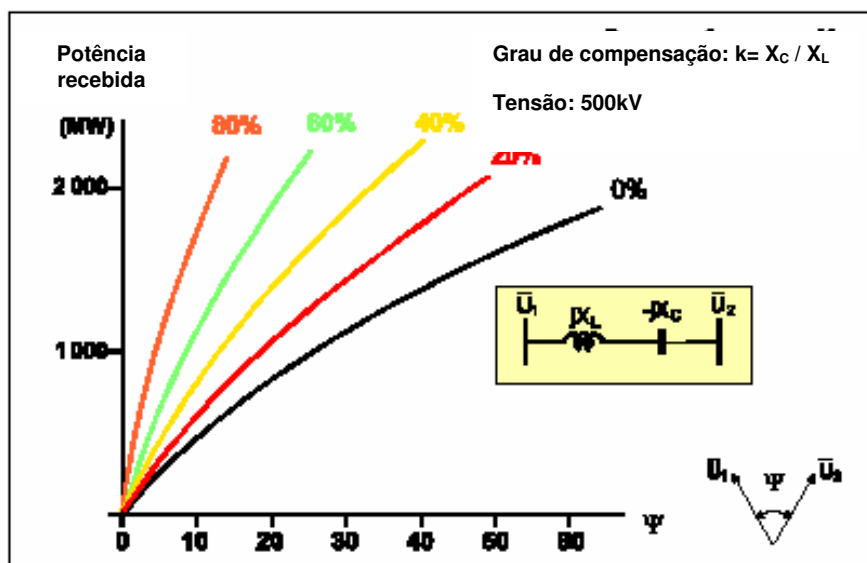


Figura 4.3: Influência do grau de compensação

Para uma diferença angular fixa, a capacidade de transmissão de potência ativa da linha aumenta conforme o grau de compensação aumenta. De forma análoga, para uma quantidade fixa de potência transmitida pela linha, a diferença angular diminui conforme k aumenta, o que representa uma medida do aumento de estabilidade dinâmica do sistema de transmissão.

Se o capacitor série é instalado para trazer um aumento da capacidade de transmissão ou um aumento da estabilidade dinâmica em um nível fixo de potência, é puramente uma questão de aplicação em cada caso em particular. [29]

4.4

Localização dos Capacitores Série

As primeiras instalações de capacitores série eram realizadas com um único banco de capacitores instalado próximo ao meio da linha, principalmente pela simplificação nos esquemas de proteção da linha quando o grau de compensação era menor que 0.5, ou seja, $k < 0.4$. A Figura 4.4a ilustra este caso.

No entanto, algumas vezes o planejamento do sistema requeria um grau de compensação maior e para evitar problemas com os sistemas de proteção o esquema era concebido de forma a dividir a compensação em dois conjuntos de capacitores série, com um grau de compensação $k < 0.3$ e instalados em $1/3$ e $2/3$ do trecho de linha, conforme a Figura 4.4b.

As instalações modernas de capacitores série, por sua vez, utilizam o capacitor instalado próximo a um final de linha, ou ainda um capacitor em cada final de linha, conforme ilustra a Figura 4.4c. No caso de haver fluxo de potência reativa em apenas uma direção pode ser uma vantagem a instalação do banco de capacitores próximo ao final de recepção de energia, como forma de conseguir uma tensão mais elevada neste barramento. [28]

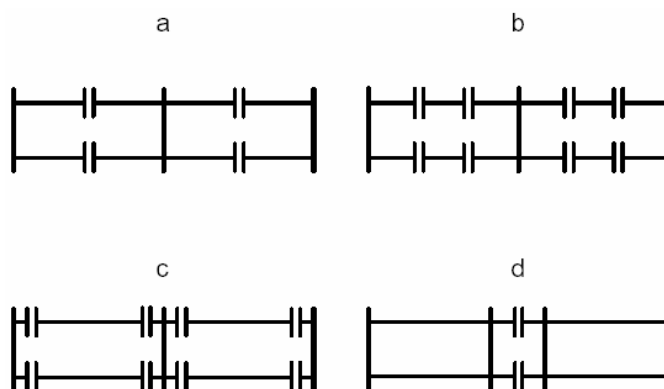


Figura 4.4: Localização dos capacitores série

Do ponto de vista do sistema de proteção da linha é uma vantagem o esquema que contempla a instalação do banco série no meio da linha com um grau de compensação menor que 50%, $k < 0.5$, uma vez que isto permite uma menor ocorrência de inversões de corrente e tensão durante faltas no sistema. Também, a instalação do capacitor série no meio da linha permite um melhor perfil de tensão quando comparado à instalação nos extremos.

A escolha do ponto de instalação do banco de capacitor série depende, contudo, de outros critérios tais como: máxima corrente de falta, custo da instalação e seu desenvolvimento, perfil de tensão, necessidades operacionais, custos de

construção, manutenção, etc. Esta consideração irá ainda afetar o custo da proteção contra sobretensão do próprio banco de capacitores, pois bancos próximos às subestações irão necessitar de proteção contra sobretensões mais robustas.

4.5

Capacitor Série Controlado

Apesar de bastante útil, o capacitor série convencional apresenta certa limitação em sua aplicação, tendo em vista sua pouca flexibilidade operacional no que se refere aos seus valores nominais fixos. Introduzindo controle ao grau de compensação, benefícios adicionais podem ser obtidos.

Nos primeiros desenvolvimentos de controle dos capacitores série, disjuntores mecânicos eram utilizados para o chaveamento entre diversos segmentos do capacitor, conforme a necessidade. Este tipo de controle atende de maneira considerável as aplicações para controle de fluxo de potência, porém é ineficiente para aplicações que exigem uma resposta dinâmica mais elevada. [29]

A evolução do controle da compensação série é mostrada na Figura 4.5. Neste ponto, é apresentando a tecnologia com controle a tiristor, que permitiu um forte desenvolvimento no conceito da compensação série.

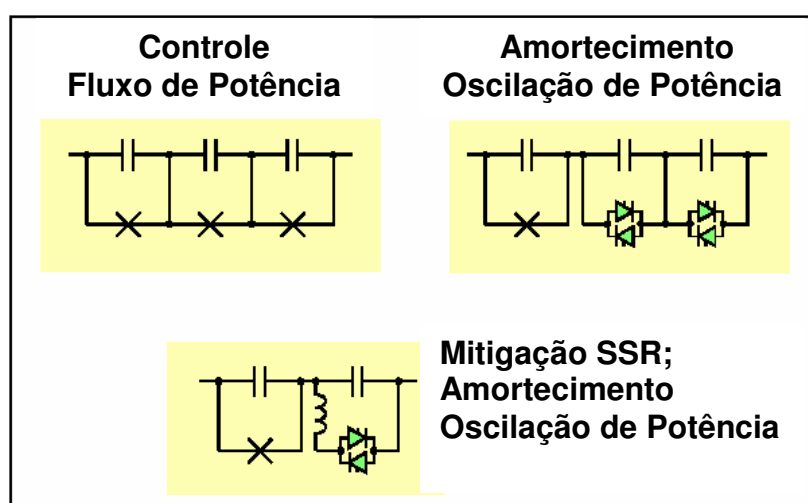


Figura 4.5: Evolução da compensação série controlável

4.6

Capacitor Série Controlado por Tiristor

Os capacitores série têm sido utilizados com sucesso durante muitos anos em sistemas elétricos. Com a compensação série é possível aumentar a capacidade de transferência de sistemas de transmissão de energia a um custo favorável e em um curto intervalo de tempo se comparado à construção de novas linhas.

Em particular, isto se deve à capacidade inerente dos capacitores série em:

- ❑ Aumentar a estabilidade dinâmica dos sistemas de transmissão.
- ❑ Aumentar a regulação de tensão e o balanço de potência reativa.
- ❑ Melhoria da distribuição de carga entre linhas paralelas.

Com o advento do controle a tiristor, o conceito de compensação série foi ampliado e sua utilidade aumentada ainda mais. O TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) introduz um número de novos benefícios na aplicação de capacitores série.

- ❑ Mitigação de riscos de ressonância subsíncrona.
- ❑ Amortecimento de oscilações de potência ativa.
- ❑ Melhoria de estabilidade pós-contingência.
- ❑ Controle de fluxo de potência dinâmico.

Também, os benefícios da compensação série controlada a tiristor não se restringem apenas às instalações novas que se iniciam. É totalmente possível e prática a melhoria de capacitores série já existentes, tornando-os controláveis a tiristor, aumentando ainda mais sua utilidade dentro de uma rede no qual este dispositivo já estava engajado.

4.6.1 Mitigação de SSR

O fenômeno de ressonância subsíncrona sempre foi um motivo de preocupação em situações onde pudesse existir a aplicação de compensação série. Com o advento da tecnologia controlada a tiristor, tal preocupação não mais existe e a compensação série pode ser empregada para se tirar seu máximo proveito.

Conforme [30], o risco de ressonância subsíncrona costuma estar relacionado à utilização da compensação série em linhas de transmissão alimentadas por geração térmica, particularmente para casos de alto grau de compensação, para os quais análises mostraram que frequências de ressonância série complementares de linhas compensadas coincidiam com alguma frequência de vibração torsional pobremente amortecida do eixo do turbo gerador, e que poderiam induzir aumentos de estresses mecânicos nos eixos.

Os TCSC's agem de forma a eliminar este risco para estas frequências de ressonância coincidentes, fazendo com que a compensação série se comporte de maneira indutiva na faixa de frequência subsíncrona. Este comportamento indutivo do TCSC é possível pela utilização de um indutor controlado por tiristor em paralelo com o capacitor série. A Figura 4.6 ilustra a ressonância subsíncrona no qual a vibração torsional é mantida devido ao comportamento ressonante do sistema elétrico, enquanto que na Figura 4.7 com o TCSC as vibrações torsionais são eliminadas devido ao não comportamento ressonante.

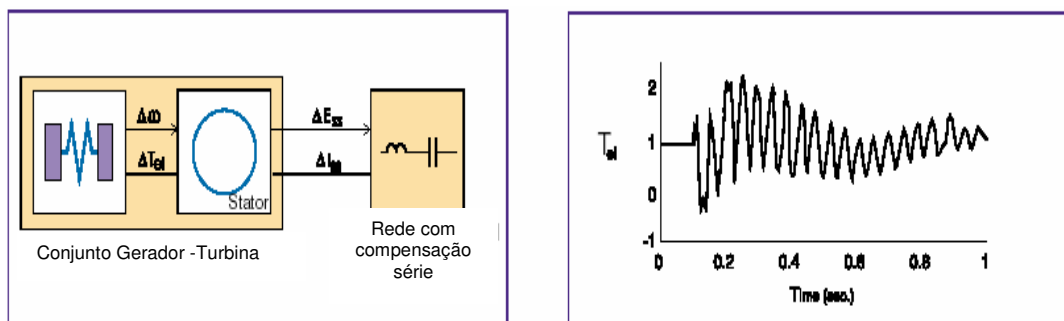


Figura 4.6: Ressonância subsíncrona

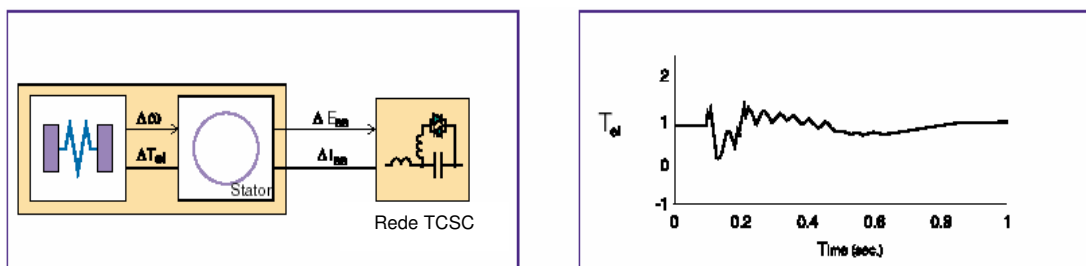


Figura 4.7: Mitigação da ressonância subsíncrona

4.6.2 Amortecimento de Oscilações de Potência

Oscilações de potência ativa em sistemas de transmissão podem surgir em corredores entre áreas de geração como resultado de um pobre amortecimento da interconexão, particularmente durante transferência de potências elevadas.

Tais oscilações podem ser movidas por um número diverso de razões, tais como faltas nas linhas de transmissão ou uma mudança repentina da geração. A Figura 4.8 apresenta um exemplo de oscilação de potência em um sistema de 500kV devido a um curto circuito, enquanto que a Figura 4.9 apresenta o resultado com o uso do TCSC.

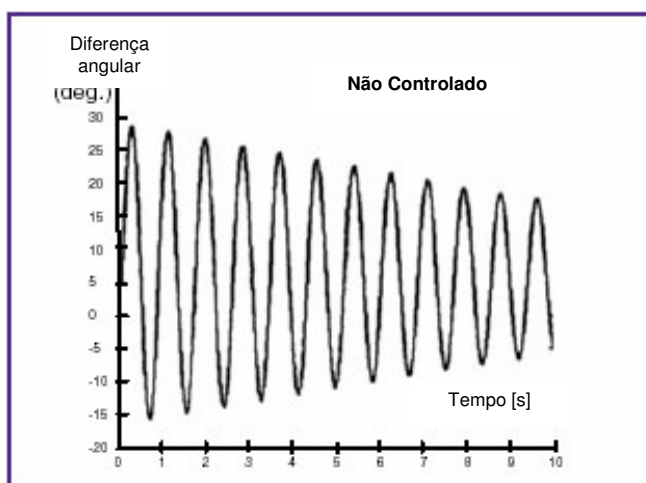


Figura 4.8: Oscilação de potência em um sistema de 500kV

A presença de oscilações de potência ativa age como um fator limitante da capacidade de transmissão de potência de interconexões entre áreas ou regiões. É sempre possível encontrar meios de diminuir este efeito, como por exemplo, a construção de linhas de transmissão adicionais, o que, no entanto exige investimentos elevados e um tempo de implantação alto. O TCSC é uma alternativa atrativa a ser considerada nestes casos, tendo em vista a relação custo benefício para sua função de amortecedor de oscilações de potência, insensível à sua localização no sistema e sem interar com oscilações locais, conforme sugerido pela Figura 4.10.

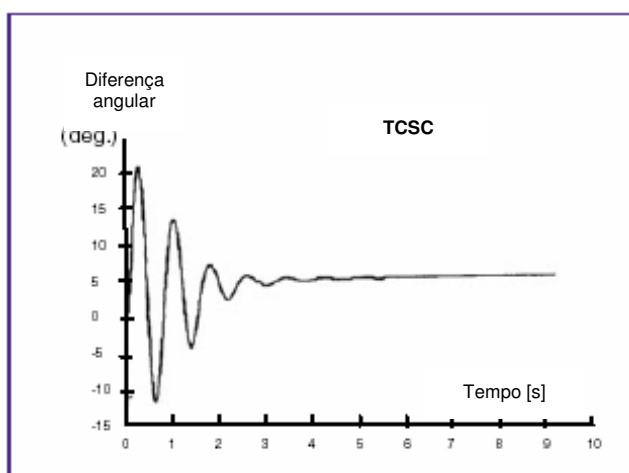


Figura 4.9: Oscilação de potência amortecida pelo uso de TCSC

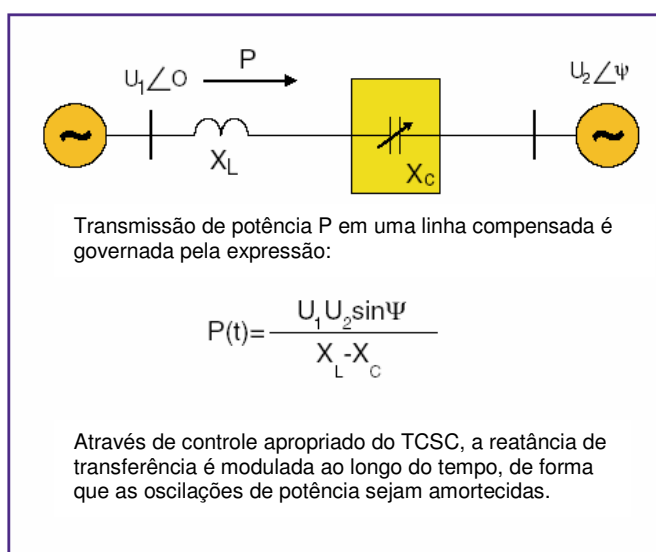


Figura 4.10: Potência transferida

4.6.3 Estabilidade Pós Contingência

Um importante benefício do TCSC é sua habilidade para a rápida mudança de seu grau de compensação, tornando-o muito útil como ferramenta para a melhora do comportamento pós-contingência do sistema, Figura 4.11. Assim o grau de compensação de um capacitor série pode ser aumentado temporariamente logo após uma contingência do sistema, contribuindo para a estabilidade dinâmica da rede (tensão e ângulo) quando é necessário.

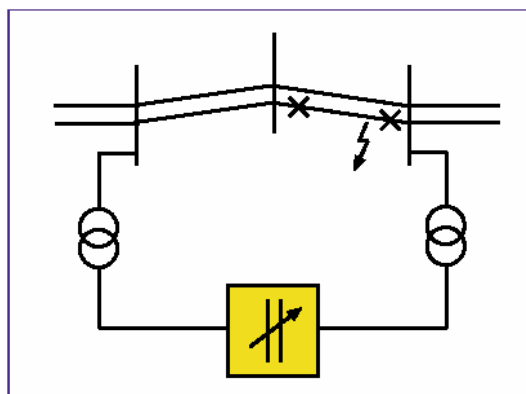


Figura 4.11: TCSC para estabilidade pós-contingência

Por exemplo, em muitas aplicações é desejável que um determinado circuito conduza uma quantidade maior de energia tendo em vista um desligamento de um outro circuito após um disparo da proteção.

Ainda neste caso, pode-se imaginar que a compensação série não é necessária durante condições normais de operação, uma vez que poderia influenciar de um modo geral nas perdas do sistema. O TCSC irá se encaixar perfeitamente para esta condição operacional, pois poderá atender as duas exigências de maneira satisfatória.

4.6.4 Controle de Fluxo de Potência

Em sistemas de potência interligados, Figura 4.12, a transferência efetiva de potência de uma região para outra pode tomar rotas não desejadas, dependendo das impedâncias das linhas de transmissão que conectam estas regiões.

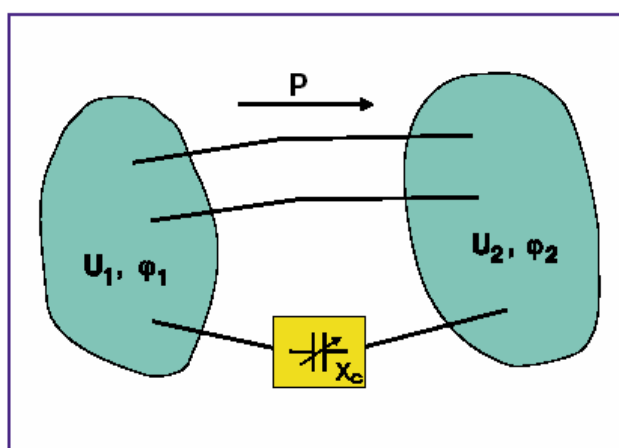


Figura 4.12: Controle de fluxo de potência entre regiões

A compensação série controlada é uma maneira prática de otimizar o fluxo de potência entre regiões com variações de carga e de topologia, tornando possível o controle com as seguintes finalidades:

- Minimização de perdas no sistema
- Eliminação de sobrecargas em linhas
- Otimização de distribuição de cargas em linhas paralelas
- Direcionamento de fluxo de potência para cargas sob contrato

4.6.5 Controle do Tiristor

Em um TCSC, o banco de capacitor ou de forma alternativa uma seção do banco é fornecida com um indutor controlado a tiristor em paralelo, no qual circulam

pulsos de corrente que são adicionados em fase à corrente de linha de forma a aumentar a tensão capacitiva a um nível acima do que seria obtido pela corrente de linha apenas.

Cada tiristor é disparado uma vez por ciclo e tem um intervalo de condução que é menor do que metade de um ciclo da frequência fundamental. A válvula de tiristor é integrada no esquema de proteção contra sobretensão do capacitor, substituindo o “spark gap” e permitindo uma redução do varistor de proteção em paralelo, conforme ilustrado pela Figura 4.13.

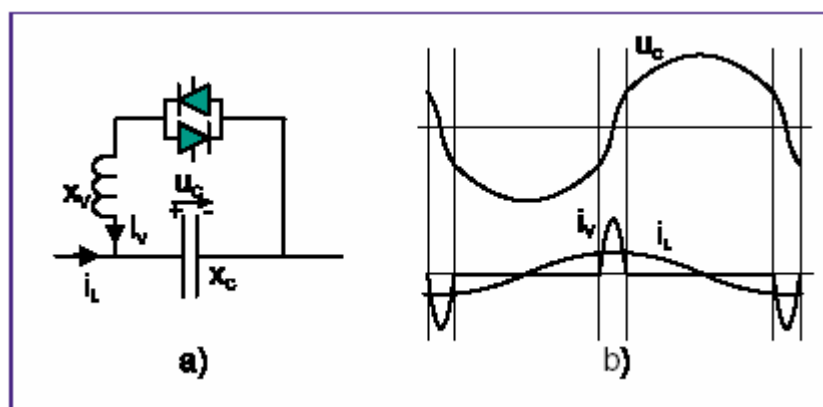


Figura 4.13: Circuito e forma de onda em regime permanente de um TCSC

Controlando a tensão adicional de forma a ser proporcional a corrente de linha, o TCSC será visto pelo sistema de transmissão como tendo uma reatância virtualmente maior do que a reatância física do capacitor. A Figura 4.11 ilustra esta situação.

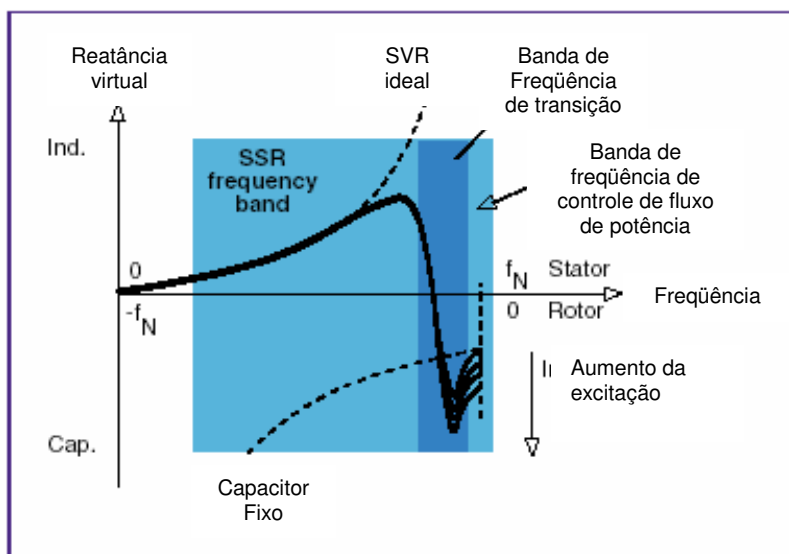


Figura 4.14: Característica da reatância aparente de um TCSC

4.6.6 Brasil – Interconexão Norte Sul

Um exemplo atual de interconexão AC de sistemas de potência separados dentro de um mesmo país está no próprio Brasil, Figura 4.15. Existem dois sistemas principais no país e que se encontravam inicialmente não interconectados: O Sistema Nordeste e o Sistema Sudeste-Sul.

Estes sistemas transmitem principalmente energia proveniente de geração hidroelétrica, sendo responsáveis por praticamente 95% da energia elétrica total gerada por esta nação. Após a possibilidade de interconexão destes dois sistemas ter sido estudada, foi decidida a construção do corredor de transmissão. Tanto esquemas AC quanto DC foram considerados no estudo sendo o sistema AC o escolhido.

Assim, desde 1999 a Eletronorte tem operado um TCSC e cinco capacitores série fixos, com cerca de 1100 Mvar de potência dos capacitores instalados. Inicialmente um circuito compacto em 500kV (a ser duplicado) com mais de 1000km de extensão foi concebido, sendo este circuito implementado com compensação série em diversos pontos ao longo de seu trecho. O TCSC foi instalado na Subestação Imperatriz, sendo o primeiro desta categoria a ser instalado na América Latina com a finalidade de amortecer oscilações de potência interárea de baixas frequências entre

os sistemas de potência em ambos os lados da interconexão. Estas oscilações de 0,2Hz poderiam constituir um perigo para a estabilidade do sistema de potência.

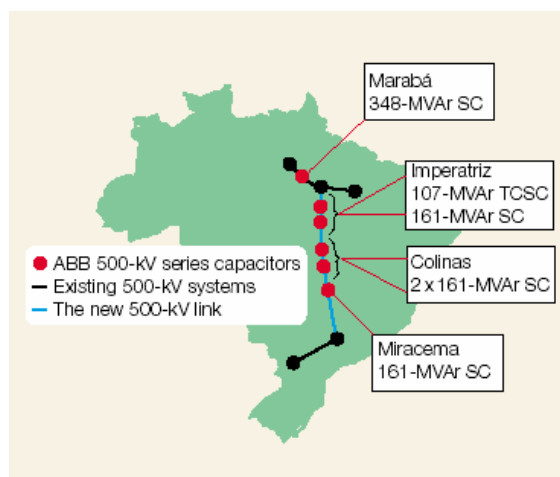


Figura 4.15: Brasil – Interconexão Norte Sul

Para efeito de amortecimento de oscilação de potência, o esquema com TCSC introduz uma componente de modulação da reatância efetiva do corredor de transmissão. Através de um controle apropriado, esta modulação da reatância reage contra as oscilações de transferência de potência ativa, de maneira a amortecê-la, de acordo com a Figura 4.16.

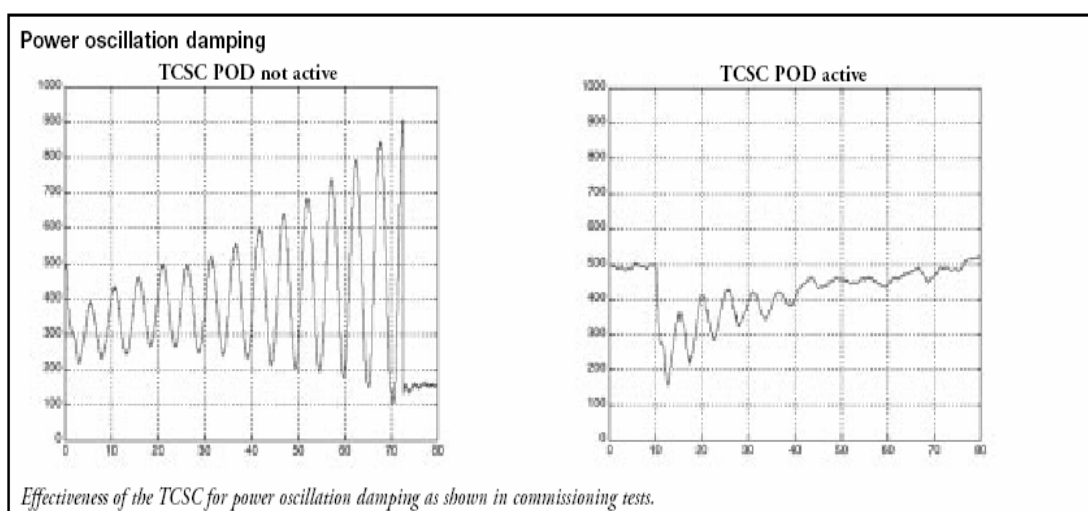


Figura 4.16: Amortecimento de oscilação de potência através do TCSC

4.7

Sobretensão no Capacitor Série

As linhas de transmissão apresentam por natureza uma característica inerentemente indutiva, ou seja, não havendo capacitores série, uma rede de transmissão apresenta todos os seus loops de faltas com comportamento indutivo, o que significa que durante condições de falta a corrente irá sempre estar atrasada da tensão. [28]

Por outro lado, em um sistema com compensação série alguns loops de falta podem se tornar capacitivos, dependendo dos parâmetros da linha de transmissão, da localização do capacitor, do grau de compensação, do tipo de falta e da localização da falta.

Seja, por exemplo, a análise simplificada de falta do sistema representado pela Figura 4.17. Para este caso, tem-se uma linha não compensada e uma linha compensada, em 500 kV. Assume-se ainda que o comprimento da linha seja de 500 km e que a reatância da linha é de 150 Ohms. Assume-se ainda que as reatâncias da fonte são 45 Ohms, as resistências das fontes são de 9 Ohms. Finalmente, assume-se que o grau de compensação é de $k = 0.6$ e que a corrente nominal da linha e do capacitor é de 2500 A.

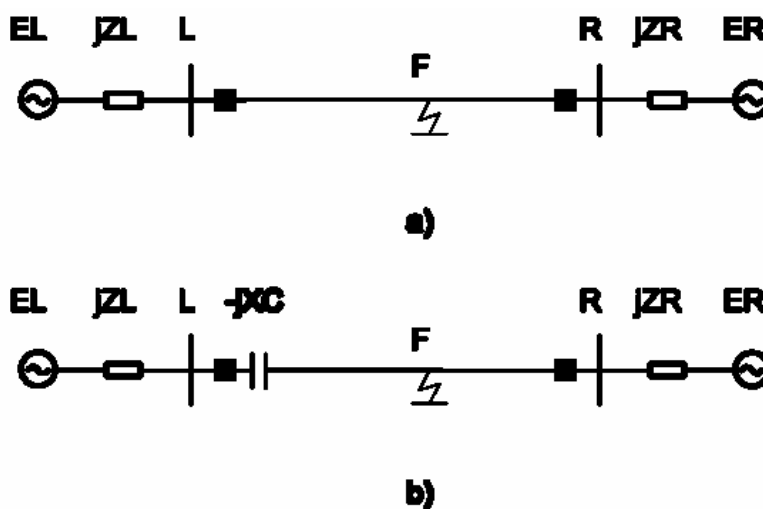


Figura 4.17: Sistema para análise simplificada de faltas

Apesar da necessidade de análise para faltas entre fases e para a terra, a análise que segue é feita de forma simplificada para faltas trifásicas. Observa-se pela Figura 4.18 que para linhas não compensadas o valor da corrente de falta decresce conforme a distância até o ponto de falta aumenta em relação à fonte do lado esquerdo.

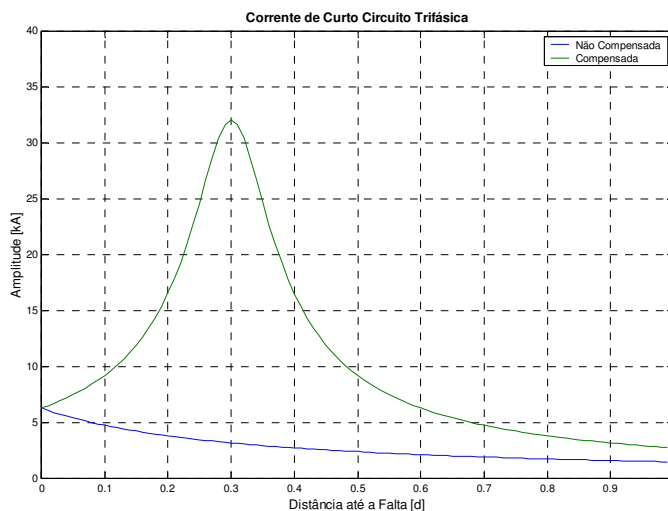


Figura 4.18: Corrente de falta ao longo da linha

Por outro lado, para linhas compensadas, observa-se ainda da Figura 4.18 que o valor da corrente de falta aumenta desde o trecho inicial da linha até o ponto $d = 0.3$, passando então a diminuir a partir deste ponto.

Extendendo esta análise para as tensões, pode-se observar que o capacitor irá ser submetido a um elevado nível de tensão, pois elevados valores de corrente de falta causam elevados valores de tensão através do capacitor, como mostra a Figura 4.19, onde é apresentada a tensão V_c / V_{cn} .

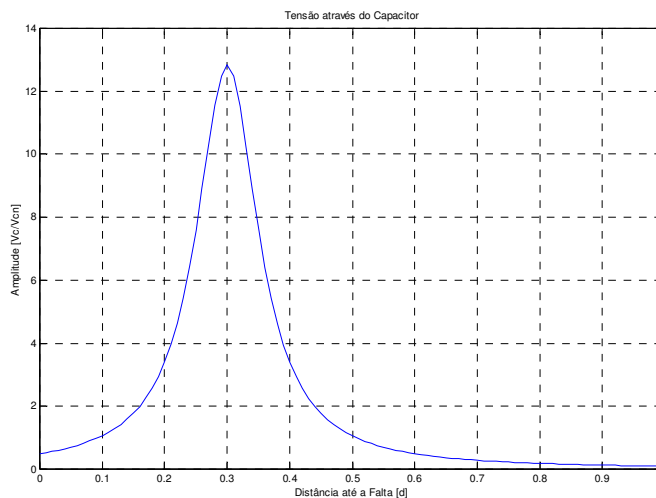


Figura 4.19: Tensão no capacitor para faltas ao longo da linha

Aqui, a tensão V_{cn} é a tensão nominal do capacitor série, dada por $X_c \cdot I_n$. Pode ser observado que a tensão máxima através do capacitor é da ordem de 13 (treze) vezes sua tensão nominal. Na prática, torna-se inviável a construção de um capacitor série que suporte tal nível de isolamento para defeitos ao longo da linha.

Pelo o exposto acima, conclui-se que o capacitor série deverá ser dimensionado para o grau de compensação desejado, atendendo o nível de tensão e de correntes de curto circuito sem que seu custo de instalação seja onerado em virtude de sua capacidade de suportar os elevados níveis de tensão a que será submetido.

Assim, o raciocínio seguinte será o de implementar dispositivos de proteção para o próprio capacitor, como forma de reduzir seu dimensionamento quanto à isolamento.

4.8

Proteção contra Sobretensão

Conforme exposto anteriormente, uma falta em uma linha de transmissão com compensação série pode causar sobretensões através dos capacitores série, tendo em vista que a corrente de falta pode atingir valores muito maiores do que a corrente nominal do capacitor.

Foi também abordado que a construção de capacitores série capazes de suportar estes elevados valores de tensão é economicamente inviável. Isto resulta na necessidade de concepção de dispositivos aptos a proteger o capacitor série.

Inicialmente, mecanismos denominados “Spark Gaps” foram implementados como forma de reduzir a sobretensão sobre os capacitores. Entretanto, na atualidade, varistores óxido metálicos, ou MOV, são utilizados com esta finalidade. A Figura 4.20 mostra a distribuição destes dispositivos, e demonstra que aproximadamente 60% da capacidade instalada de capacitores série é protegida por MOV's.

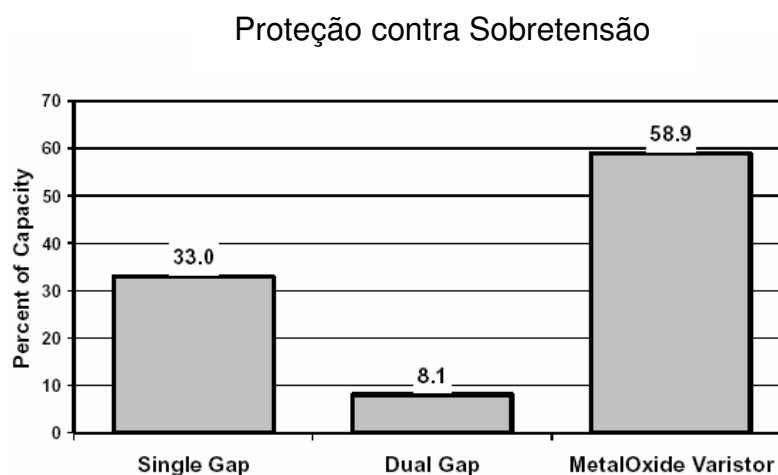


Figura 4.20: Proteção contra sobretensão para capacitores série

4.8.1 Nível de Proteção contra Sobretensão

4.8.1.1 Spark Gaps

O nível de tensão para a proteção contra sobretensão V_p é definido como a máxima tensão instantânea permitida através do capacitor. Para este caso, um “Spark Gap”, ilustrado na Figura 4.21, irá disparar quando a tensão através do “gap” atingir o valor de V_p .

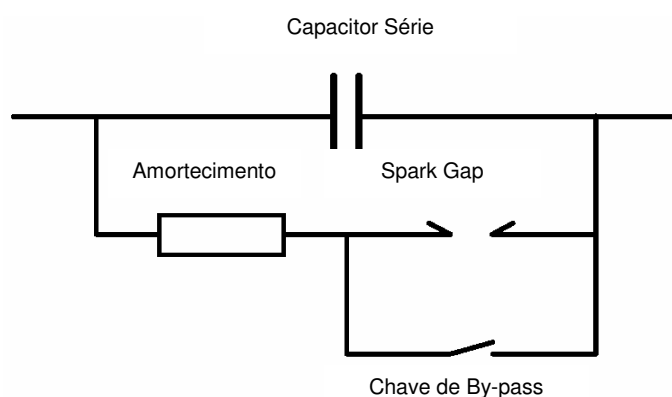


Figura 4.21: Proteção contra sobretensão “Spark Gap”

O ajuste do Spark Gap é coordenado para naturalmente disparar e efetivamente curto circuitar o capacitor série para sobretensões acima do valor de curta duração do capacitor série. A proteção e o sistema de controle devem re-inserir o capacitor série quando a falta tiver sido eliminada.

4.8.1.2 MOV – Metal Oxide Varistors

Por sua vez, o nível de tensão para proteção utilizando um MOV é a máxima tensão através do MOV para uma corrente instantânea específica através do varistor, sendo geralmente mensurada como a máxima corrente de falta especificada. O nível de proteção k_p , é normalmente expresso em “por unidade” PU, do valor de pico da tensão do capacitor, isto é:

$$V_p = \sqrt{2} \cdot I_n \cdot X_n \cdot k_p \quad (4.5)$$

onde,

I_n = corrente RMS contínua nominal do capacitor série

X_n = reatância nominal do capacitor série

k_p = em geral varia entre 2 e 3 pu.

O MOV é na verdade um resistor não linear constituído principalmente por óxido de zinco, além de outras pequenas partes de metais óxidos. Sua característica é tal que seu comportamento é de alta resistência para condição normal de tensão, o que significa que apenas corrente de dispersão circula através de seus terminais quando a tensão está próxima de seu valor nominal de operação. A Figura 4.22 ilustra um comportamento típico de um MOV.

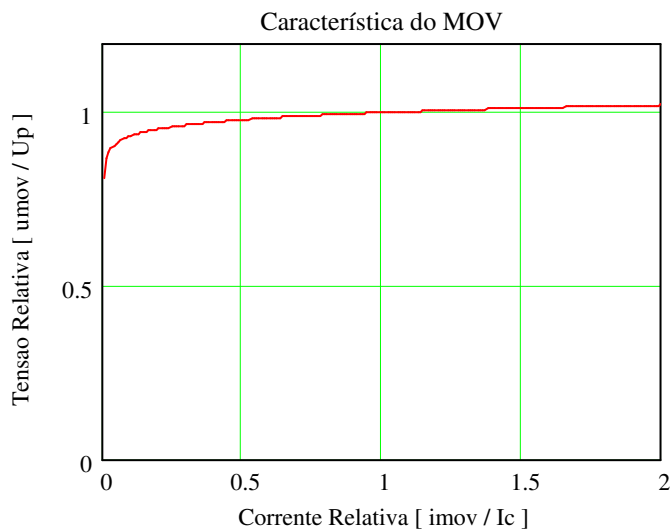


Figura 4.22: Relação entre corrente e tensão para um MOV

Esta característica apresentada pelo MOV permite que o mesmo seja empregado na proteção contra sobretensão de diversos dispositivos, especialmente os capacitores série durante distúrbios ao longo do sistema.

4.9

Influência na Impedância Efetiva

A utilização de capacitores série protegidos contra sobretensão através de MOV criou uma grande necessidade de modelamento destes dispositivos, principalmente pelo fato de que durante o instante em que o MOV conduz o capacitor série não pode ser considerado como estando completamente em operação, ou completamente fora de operação.

Na verdade, o MOV drena apenas uma parte da corrente do capacitor em cada meio ciclo, durante o momento em que a tensão sobre o capacitor excede seu nível de tensão de proteção. Isto resulta em um grau de compensação reduzido à medida em que a sobrecorrente no capacitor aumenta, tornando-o menos efetivo. A Figura 4.23 ilustra uma situação de baixo carregamento, enquanto que a Figura 4.24 apresenta uma situação de carregamento elevado.

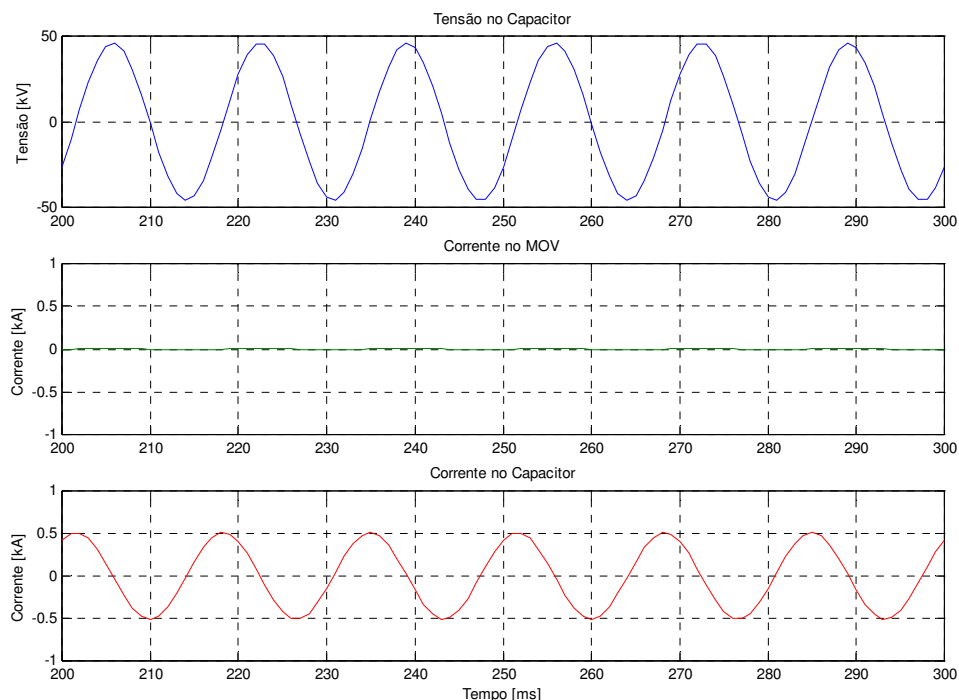


Figura 4.23: Capacitor série protegido por MOV – sobrecarga baixa

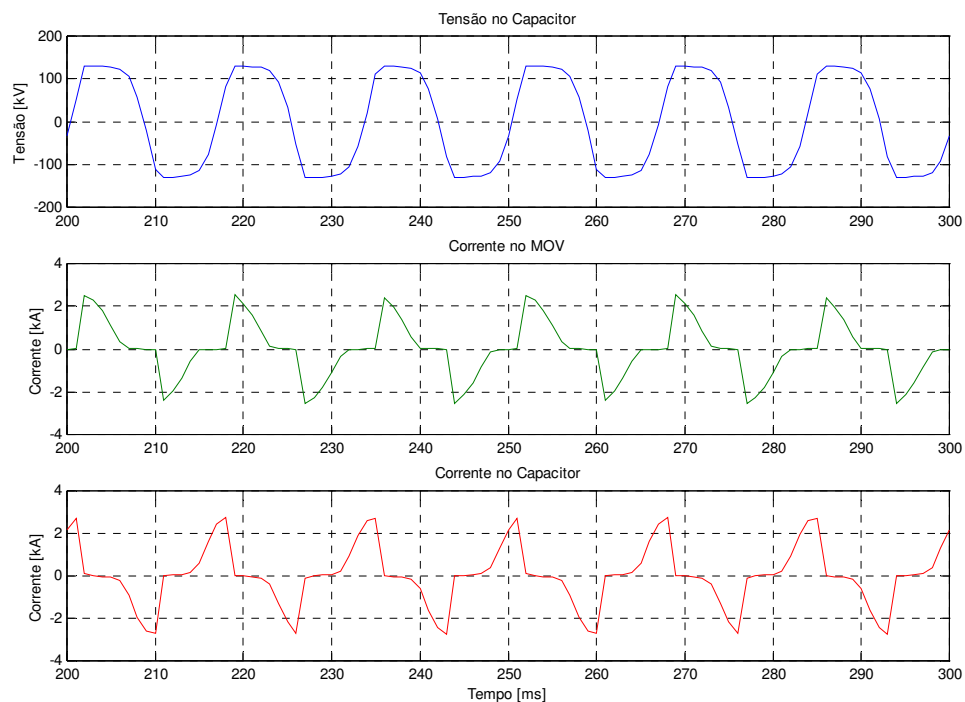


Figura 4.24: Capacitor série protegido por MOV – sobrecarga elevada

Por sua vez, Goldsworthy desenvolveu expressões analíticas para a impedância efetiva de um capacitor série protegido pelo MOV, sendo no entanto as aproximações por Fourier e Goldsworthy bastante similares. A Figura 4.25 apresenta os comportamentos da resistência e reatância de um MOV para diferentes cargas.

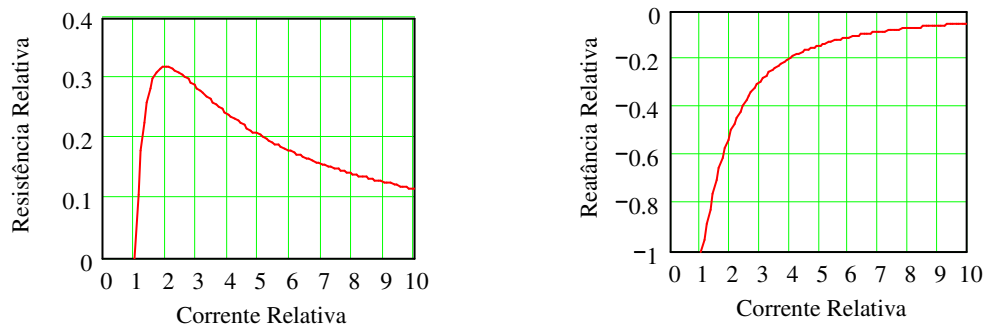


Figura 4.25: Resistência e reatância equivalentes de um MOV

Todavia, a conclusão mais importante deste desenvolvimento matemático é a de que é possível calcular a impedância efetiva do capacitor série protegido pelo MOV através da medição de corrente no ponto de medição do relé de proteção. A Figura 4.26 apresenta o comportamento da impedância equivalente do MOV.

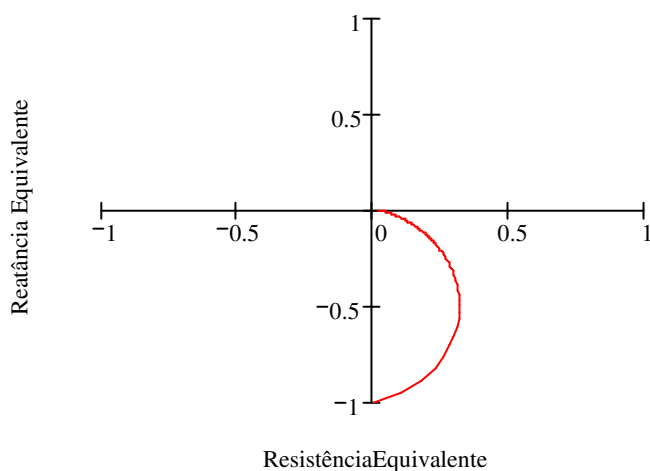
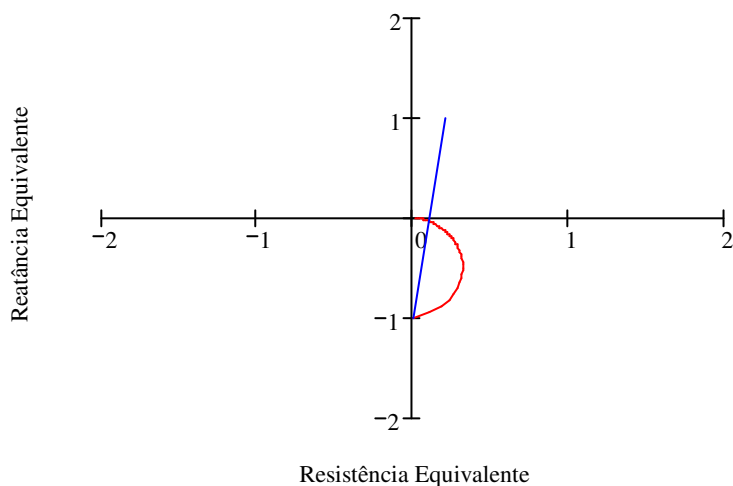
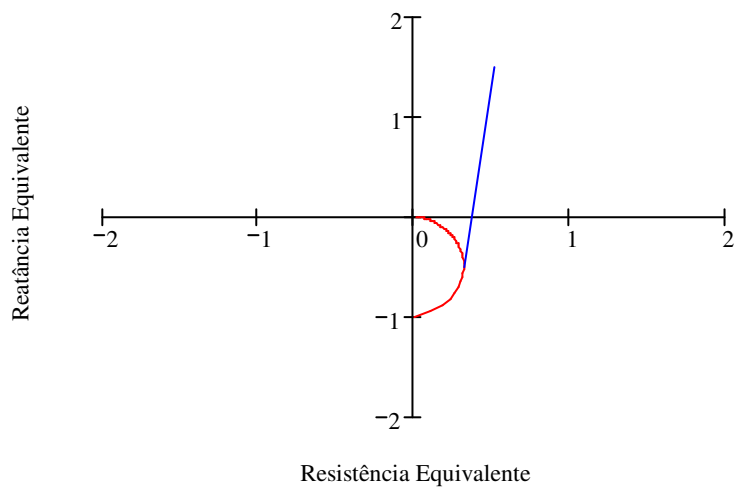


Figura 4.26: Impedância equivalente do capacitor série protegido por MOV

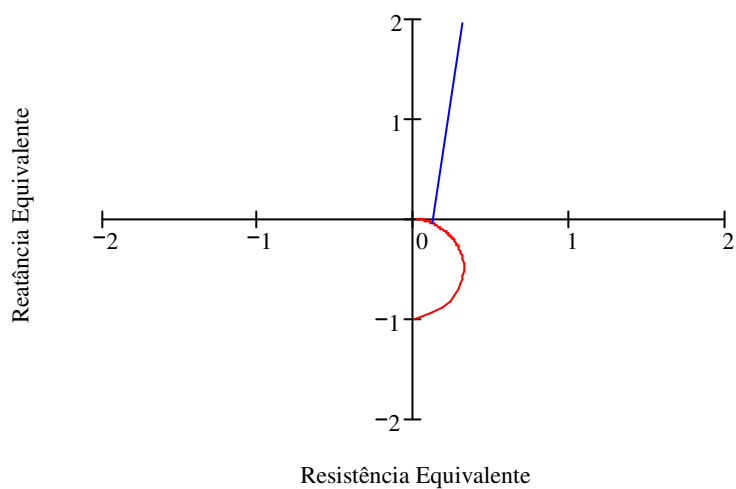
A Figura 4.27 sobrepõe a impedância da linha à impedância do MOV para diferentes carregamentos.



a) $I/I_{pr} = 1$



b) $I/I_{pr} = 2$



c) $I/I_{pr} = 10$

Figura 4.27: Impedância equivalente para diferentes carregamentos

4.10

Linhas com Capacitor Série no seu Ponto Médio

A Figura 4.28b mostra a impedância aparente da linha de transmissão com capacitores série instalados no ponto da metade de seu comprimento. O grau de compensação é considerado de 40%. Assume-se que a distância elétrica desde o ponto local até o capacitor série é de $X_1 / 2$. Observa-se que a impedância aparente é descontínua no ponto onde se localiza o capacitor, mudando de um valor de impedância para outro bastante rapidamente. Desta forma, faltas que ocorrem em pontos além do capacitor aparecem como sendo mais próximas.

Pelo exposto acima, segue-se que tipicamente o ajuste da unidade de subalcançe, ou seja, de Zona 1 de uma proteção de distância aplicada a uma linha com este tipo de compensação, deve ser reduzido para $(0.8 \text{ a } 0.9) \times 0.6 \times X_1$ como forma de se evitar o sobrealcançe desta unidade.

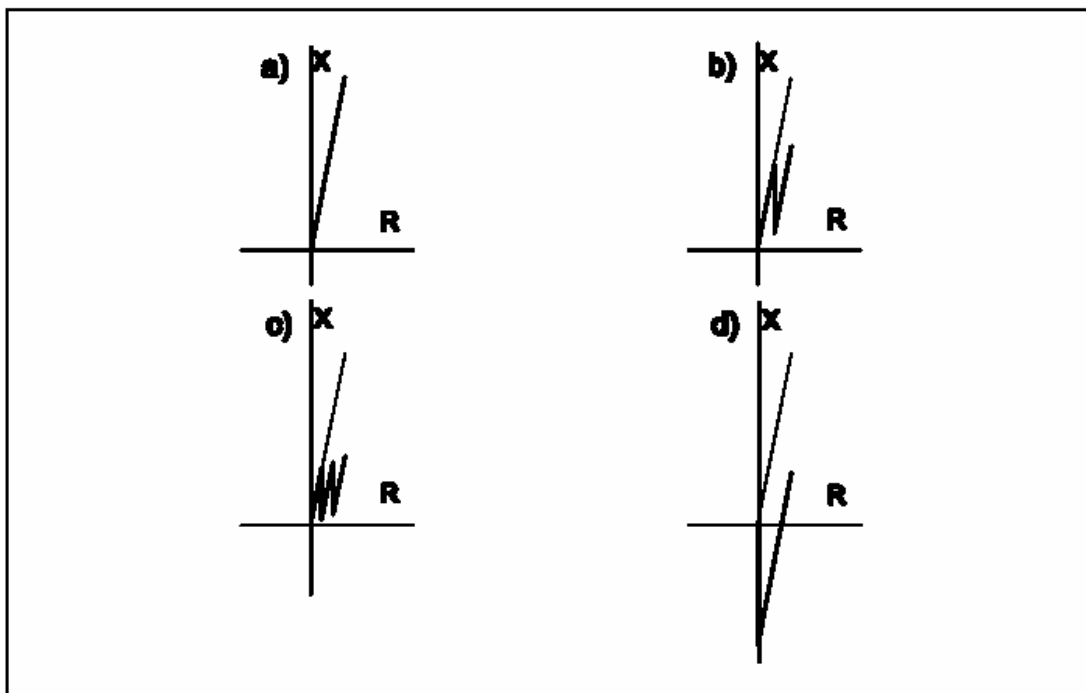


Figura 4.28: Impedância aparente de linhas de transmissão

4.11

Linhas com Seqüência de Capacitores Série

A Figura 4.28c mostra a impedância aparente de uma linha de transmissão com dois capacitores série, sendo o grau de compensação total de 60%, com os dois capacitores considerados de mesmo porte, isto é, cada um com grau de compensação de 30%. Assume-se ainda que a distância elétrica entre o ponto local e o primeiro capacitor é de $X_1 / 3$ e que o segundo capacitor está a uma distância $X_1 / 3$ até o final de linha R.

A impedância aparente será agora descontínua em ambas as localidades de instalação dos capacitores. O ajuste da unidade de subalcance, ou seja, de Zona 1 de uma proteção de distância aplicada a uma linha com este tipo de compensação, deve ser reduzido para $(0.8 \text{ a } 0.9) \times 0.4 \times X_1$ como forma de se evitar o sobrealcance desta unidade.

4.12

Linhas com Capacitores Série nos Extremos

A Figura 4.28d mostra a impedância aparente de uma linha de transmissão com capacitor série instalado em seu extremo, podendo ser tanto no ponto local, quanto no ponto remoto, quanto em ambas as localidades. Assume-se que o grau de compensação é de 60% para um capacitor instalado apenas na localidade L. Neste caso, faltas que ocorrerem na direção à frente da linha de transmissão poderão aparecer como sendo faltas reversas para o relé de distância.

4.13

Corrente de Falta Indutiva

Os sistemas de transmissão são predominantemente indutivos e para faltas em derivação internas à linha de transmissão a corrente de falta que flui do terminal local em direção a linha protegida estará atrasada da tensão da fonte, conforme ilustrado pela Figura 4.29.

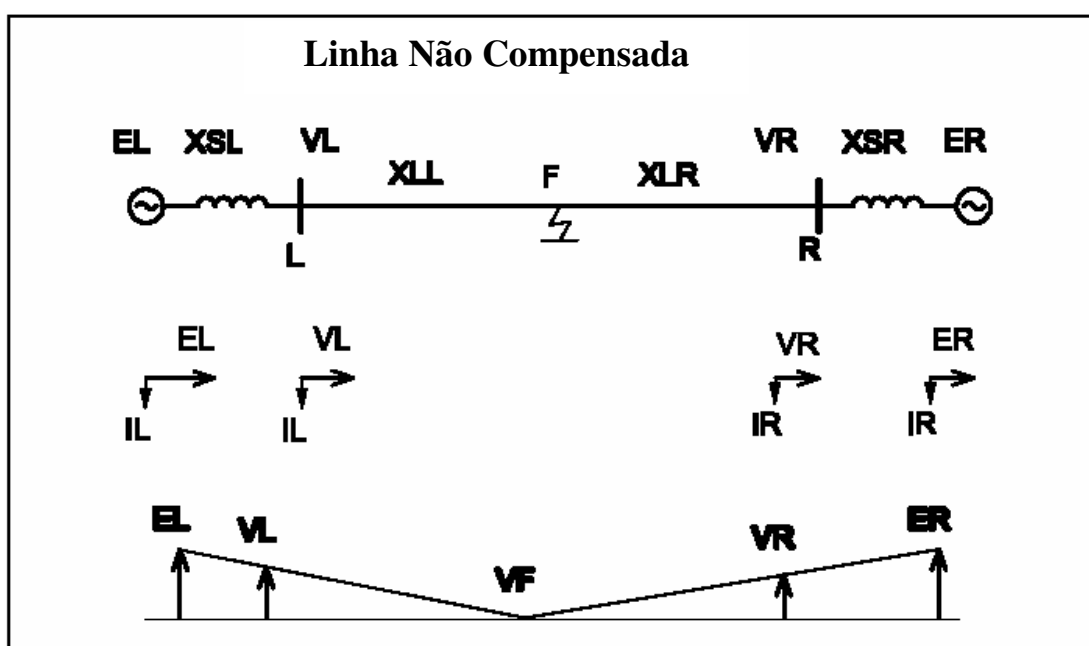


Figura 4.29: Fasores em uma linha não compensada

Este tipo de comportamento é assumido pelos relés de distância, que irão então computar a impedância de falta ao longo da linha de transmissão. A introdução de capacitores série, especialmente em pontos próximos aos extremos da linha, pode acarretar na mudança deste comportamento básico dos sistemas indutivos para alguns tipos de falta ao longo da linha, podendo ocorrer as chamadas (1) inversão de tensão e (2) inversão de corrente, que afetam tanto a dependabilidade quanto a segurança dos sistemas de proteção convencionais.

4.14

Inversão de Tensão

O fenômeno de inversão de tensão pode ser verificado através da Figura 4.30, que apresenta um diagrama unifilar semelhante ao apresentado pela Figura 4.29, mas com o sistema agora apresentando capacitor série para efeito de comparação. A reatância do capacitor série apresenta valor X_C , e a equação 4.6 representa a situação em que a condição de inversão de tensão irá ocorrer.

$$X_{LR} < X_C < X_{SR} + X_{LR} \quad (4.6)$$

Ainda na Figura 4.30 pode-se verificar os diagramas fasoriais que ilustram a relação entre correntes e tensões. Uma vez que a impedância desde a fonte em L e R até o ponto de falta é do tipo indutiva, a corrente de falta estará atrasada das fontes de tensão E_L e E_R .

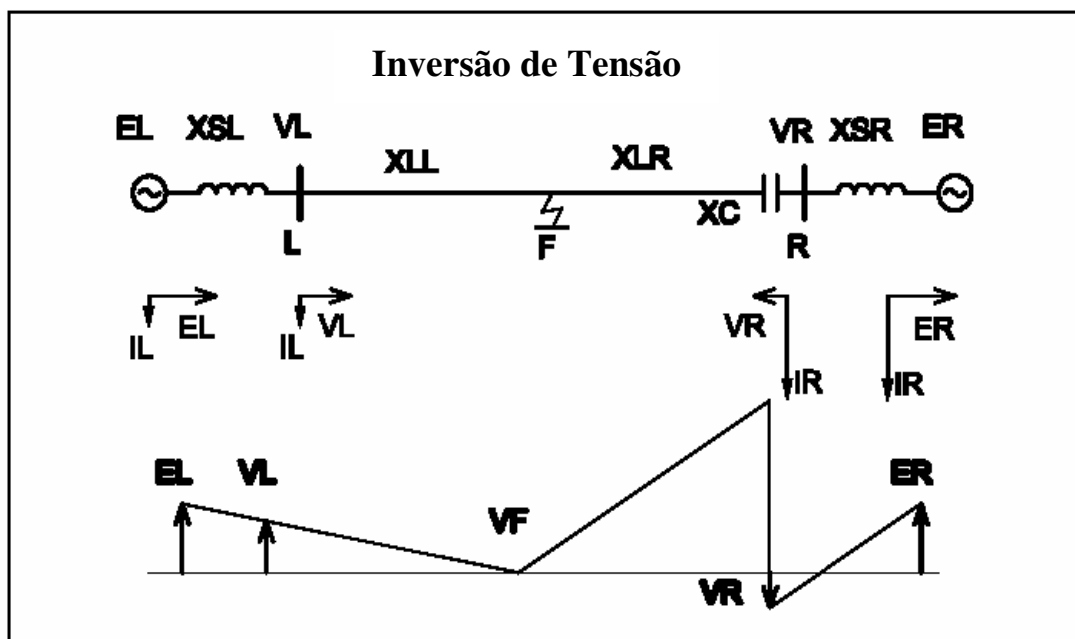


Figura 4.30: Inversão de tensão no terminal R

A reatância desde o terminal R até o ponto de falta é no entanto capacitiva e desta forma a tensão no terminal R está atrasada em relação a corrente de falta. Isto pode ser melhor observado através da comparação da tensão V_R entre as Figuras 4.29 e 4.30. A corrente de falta desde o terminal L permanece com comportamento semelhante ao sistema não compensado.

4.15

Inversão de Corrente

O fenômeno de inversão de corrente ocorre quando a corrente de falta que flui em direção a linha para uma condição de falta interna é do tipo capacitiva. Isto pode ocorrer quando a impedância desde a fonte até a falta é do tipo capacitiva, o que pode ser verificado através da equação 4.7 e da Figura 4.31.

$$X_C > X_{SR} + X_{LR} \quad (4.7)$$

No terminal L, a corrente de falta que flui em direção a linha é do tipo indutiva. No terminal R, uma corrente de falta do tipo capacitiva flui da rede em direção a linha. Isto significa que as correntes em ambos os terminais opostos de linha aparentam estar em oposição de fase, o que caracteriza uma falta externa para uma linha indutiva. Isto significa que elementos baseados em comparação de fases podem falhar em sua operação.

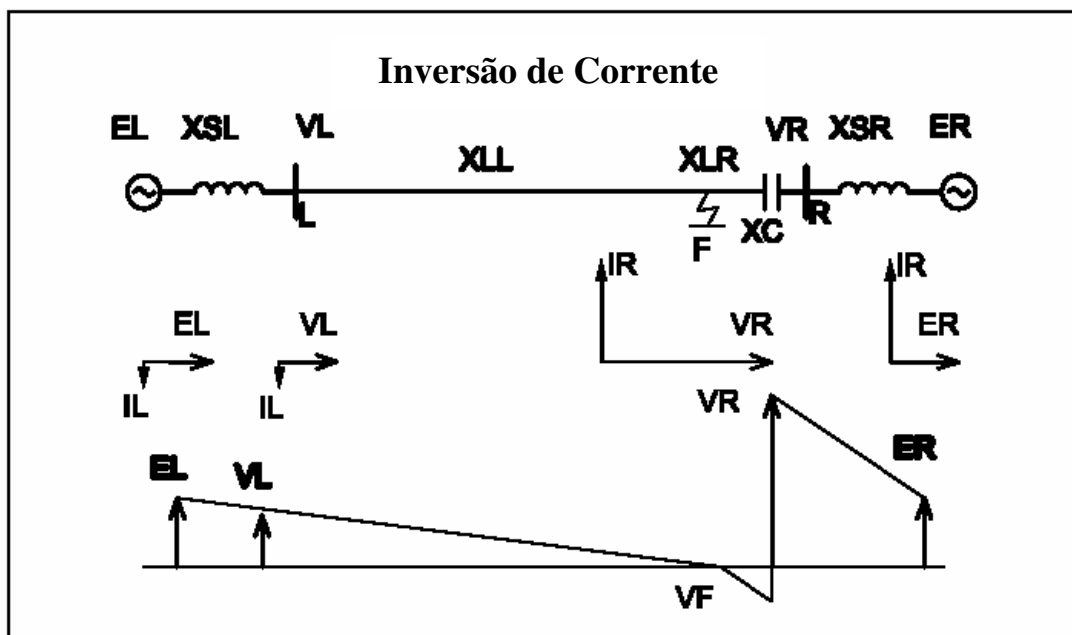


Figura 4.31: Inversão de corrente no terminal R

Apesar de algumas concessionárias encontrarem este tipo de comportamento, a inversão de corrente é um fenômeno um tanto quanto raro de ocorrer. É possível evitar a inversão de corrente instalando os capacitores longe de fontes indutivas fortes.

4.16

Transitórios Subharmônicos

A instalação dos capacitores série em linhas de transmissão, pode ocasionar fenômenos relacionados a transitórios de frequência natural causados pelo acoplamento entre a reatância indutiva da linha e a reatância capacitiva do banco de capacitores série.

Em particular, transitórios subharmônicos poderão ocorrer devido a faltas na linha ou chaveamento dos capacitores, e poderão acarretar em problemas com a

proteção, que pode sobrealcançar, ou problemas com a geração, que pode apresentar problemas de ressonância subsíncrona.

A chave apresentada na Figura 4.32 representa uma condição de curto circuito na linha de transmissão, representada de maneira monofásica e simplificada. A chave é fechada em $t = 0$, e significa um curto circuito na fase A para terra no barramento remoto.

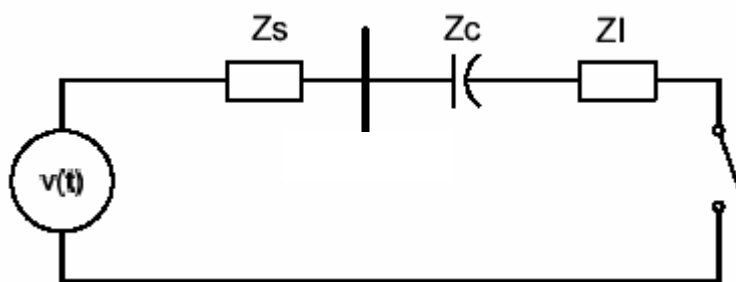


Figura 4.32: Representação simplificada de linha com compensação série

Como consequência dos transitórios subharmônicos, durante uma falta, a impedância medida pelo relé pode apresentar um comportamento do tipo espiral, conforme apresentado pela Figura 4.33. Vale ressaltar que para esta análise não será considerado o efeito do “bypass” do capacitor, ou seja, o capacitor é considerado como tendo um valor de reatância fixo.

Um filtro digital não recursivo de ciclo completo, a ser detalhado posteriormente, é aplicado nas formas de onda de tensão e corrente resultantes deste chaveamento, e o transitório de impedância apresentado na Figura 4.33. Nota-se imediatamente que após a falta ser aplicada a característica espiral é ampla e passa através da característica de impedância permanente (característica MHO). Na medida em que o transitório evolui a espiral diminui, convergindo para o ponto de falta.

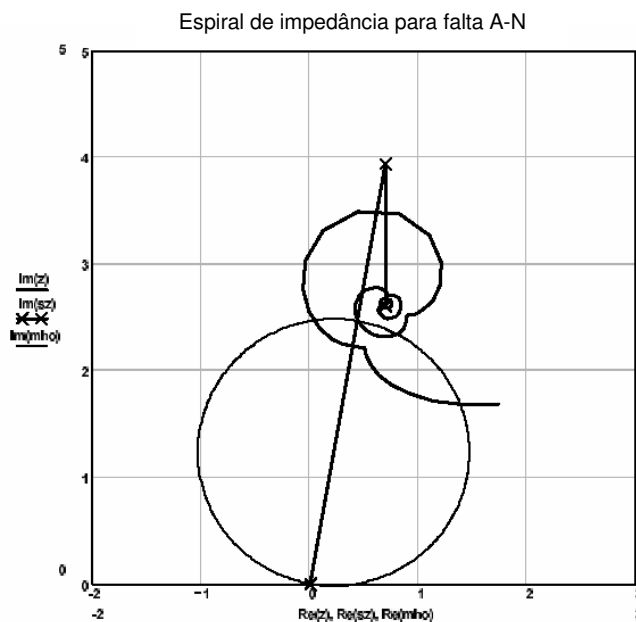


Figura 4.33: Diagrama R-X com transitório subharmônico

Apesar do ajuste de Zona 1 ter sido feito considerando-se as reatâncias indutivas e capacitivas, o efeito transitório pode ocasionar disparo indevido.

A adição dos dispositivos do tipo MOV pode causar o aparecimento de formas de onda não senoidais devido a não linearidade deste elemento. Como consequência, o MOV irá alterar a natureza dos transitórios de baixa frequência, mas não irá eliminá-los completamente.

4.17

Transitórios de Alta Frequência

Todos os capacitores série apresentam algum tipo de proteção contra sobretensão, como forma de prevenir estragos devido a possíveis valores elevados de corrente de curto circuito passante. Este tipo de proteção pode ser desde um simples elemento de “air gap” gatilhado até um MOV (Metal Oxide Varistor).

No entanto, a operação do gatilho dos “air gaps” pode ocasionar transitórios de alta frequência. Tendo em vista que estes transitórios são de alta frequência, eles podem ser efetivamente eliminados pela combinação da filtragem antialiasing analógica e a filtragem digital do algoritmo dos relés de proteção.

Implementação de Algoritmos de Proteção

Como forma de verificar os conceitos apresentados no que se refere aos algoritmos de proteção numérica foram desenvolvidos programas computacionais que permitem simular e analisar o comportamento de tais algoritmos. Para isso, foi utilizada a ferramenta Matlab para a implementação das rotinas de medição e cálculo dos fasores das correntes, tensões e impedâncias quando aplicáveis.

Inicialmente foram implementadas as rotinas do algoritmo baseado na análise de Fourier para a medição da impedância durante faltas que possam ocorrer em linhas de transmissão, como forma de simular a medição de um relé de distância. Nesta rotina são realizadas as medições de corrente e tensão fornecidas através de simulação de transitórios eletromagnéticos para um modelo simplificado de sistema de potência, representado através de duas fontes conectadas por meio de uma linha de transmissão, Figura 5.1. A medição de correntes e tensões trifásicas em um final de linha permite que o algoritmo, em seguida, calcule a impedância medida.

Posteriormente, uma rotina semelhante foi implementada também para a medição da impedância para faltas em uma linha de transmissão, porém utilizando-se neste caso o algoritmo baseado em modelo do sistema, ou seja, através da solução da equação diferencial que representa a linha de transmissão.

Finalmente, foram implementadas rotinas para a simulação de relés diferenciais de linha a serem aplicados ao mesmo modelo simplificado do sistema de potência. Neste caso, em particular, ao invés da medição de corrente e tensão trifásicas em um final de linha, que são as grandezas utilizadas pelo relé de distância, foram medidas e comparadas as correntes trifásicas de ambos os finais de linha. De posse destas correntes o algoritmo calcula a corrente diferencial e de restrição. São utilizados dois planos diferentes para a visualização das correntes, o primeiro representando a corrente diferencial e de restrição em um plano cartesiano e o

segundo representando as correntes em ambos os finais de linha através de um plano complexo denominado plano alfa.

5.1

Modelo Simplificado do Sistema de Potência

O sistema de potência modelado, e apresentado na Figura 5.1, é constituído de uma linha de transmissão, representada por uma impedância Z_L , que interliga duas fontes, denominadas Fonte A e Fonte B. A linha de transmissão foi modelada a parâmetros distribuídos para uma linha típica de 440kV do sistema de transmissão do Estado de São Paulo, através da *Rotina Line Constants do ATP* e as fontes geradoras através de uma fonte de tensão atrás de uma impedância constante.

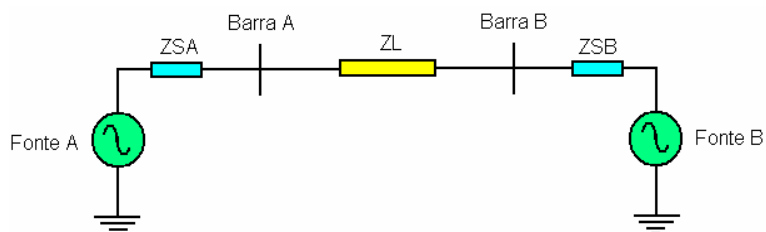


Figura 5.1: Modelo simplificado de um sistema de potência

Para a simulação dos algoritmos de distância em linha não compensada, tanto através da técnica de Fourier quanto pelo método da equação diferencial, o comprimento da linha foi estipulado em 100km, conforme a Tabela 5.1. Para os algoritmos de diferencial de linha o comprimento da linha, e portanto sua impedância, foi reduzido para 50km. Para as simulações dos algoritmos na linha compensada, seu comprimento foi estipulado em 200km.

Tabela 5.1: Dados do sistema de potência sem compensação série

		Resistência Ohm/km	Indutância mH/km	Capacitância μF/km
Fonte A (440kV \angle0)	Zero	1.6669	48.5847	-
	Positiva	0.7600	48.7492	-
Fonte B (440kV \angle-20)	Zero	1.6669	48.5847	-
	Positiva	0.7600	48.7492	-
Linha de Transmissão	Zero	2.91546e-1	2.4	8.8252e-3
	Positiva	2.36174e-2	0.8769	13.312e-3

Após definidos os valores de tensão, em módulo e ângulo, e da impedância de cada componente do sistema de potência, o mesmo foi modelado para as simulações de transitórios eletromagnéticos. Dois programas computacionais foram utilizados para esta finalidade: (1) ATP/ATPDRAW e (2) Matlab/Simulink.

Os resultados obtidos para algumas simulações foram idênticos e escolheu-se o Matlab/Simulink como ferramenta a ser padronizada para a maioria das simulações, tendo em vista que este ambiente facilitava a integração com os algoritmos de proteção também desenvolvidos em Matlab/Simulink, exceção feita às simulações que envolveram o TCSC, modelado em ATP/EMTP. Opcionalmente, os algoritmos de proteção foram testados para algumas faltas simuladas através do ATP/ATPDRAW, mas não são apresentados neste trabalho.

Ainda para este sistema foram simuladas diversas condições de falta ao longo da linha de transmissão. Foram consideradas faltas a 25, 75 e 100% do trecho de linha a partir da Barra A para a verificação dos algoritmos de distância e faltas a 50 e 100% do trecho de linha para os algoritmos de diferencial de linha, tanto para faltas trifásicas quanto monofásicas. Adicionalmente, o valor da resistência de falta R_f utilizado é de zero, 10, 50 Ω , mas apenas os resultados para resistência zero e 10 Ω são aqui apresentados. Estas condições permitem verificar a influência destes valores na medição de impedância para os algoritmos de distância e verificar o critério de falta interna ou externa para o algoritmo diferencial.

As primeiras simulações reportam os resultados obtidos para faltas trifásicas, considerando-se inicialmente o valor de resistência de falta igual a zero. A seqüência de simulações é feita na ordem de algoritmo de Fourier, algoritmo de equação diferencial e algoritmo diferencial de linha. Posteriormente uma análise comparativa

entre os diferentes algoritmos é realizada para diferentes tipos de faltas e valores de resistência de falta.

5.2

Algoritmo de Distância Baseado na Análise de Fourier

Este algoritmo foi implementado utilizando-se os conceitos apresentados no item 3.4.3.2 do Capítulo 3. A partir de dados e resultados obtidos de simulação de transitórios eletromagnéticos o programa calcula o valor RMS das correntes e tensões, bem como da impedância resultante para a frequência fundamental. Em seguida, através de visualização gráfica, pode-se comparar os resultados obtidos com as zonas de ajuste de um relé de distância.

Inicialmente o algoritmo realiza a leitura dos canais analógicos de tensão e corrente provenientes da simulação de transitório eletromagnético, onde a taxa de amostragem é elevada para que haja boa representação dos fenômenos transitórios da falta. Após esta leitura das grandezas elétricas, o algoritmo realiza uma filtragem passa baixa como forma de eliminar os componentes de frequência elevada e assim eliminar o efeito Aliasing. Um filtro de Butterworth de 3ª ordem, com frequência de corte em 180Hz foi implementado para esta finalidade.

Com os valores analógicos de corrente e tensão devidamente filtrados, os mesmos são re-amostrados como forma de diminuir a taxa de amostras para um nível suportável pelo algoritmo numérico de proteção, neste caso 16 amostras por ciclo ou 960Hz. Em seguida, os valores das amostras estão prontos para serem processados pelo algoritmo de proteção.

O algoritmo desenvolvido neste módulo utiliza a técnica de Fourier para o cálculo da impedância de falta durante um transitório em uma linha de transmissão. Para isso, um algoritmo com janela de dados de um ciclo e baseado na Transformada Discreta de Fourier foi implementado em Matlab. A Figura 5.2 apresenta o

comportamento das tensões e correntes, respectivamente, para uma falta a uma distância de 25% desde o ponto de instalação do relé de proteção.

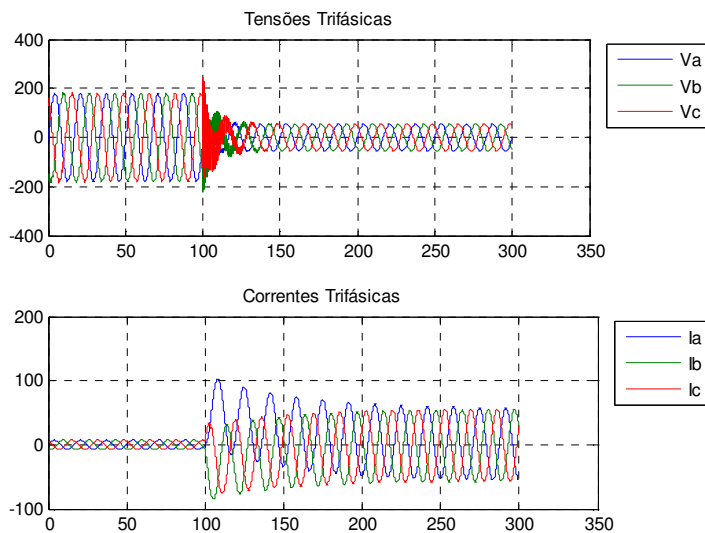


Figura 5.2: Comportamento das tensões e correntes

A Figura 5.3 apresenta os valores em RMS para as tensões de fase e de linha para as formas de onda apresentadas na Figura 5.2, enquanto que a Figura 5.4 apresenta os valores em RMS para as correntes.

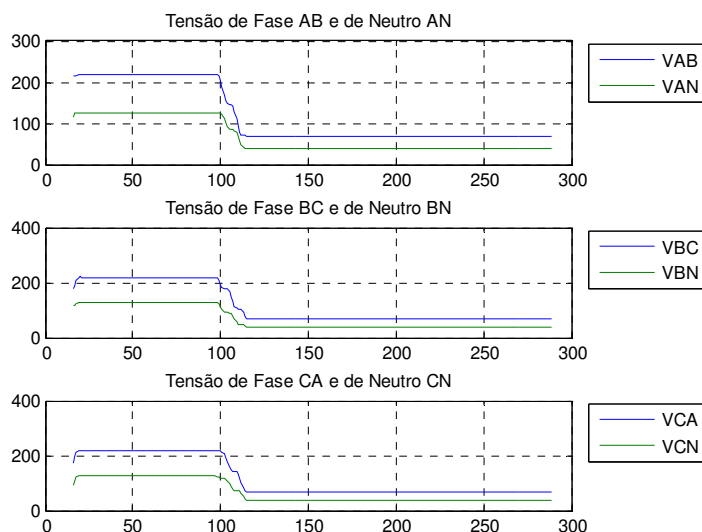


Figura 5.3: Comportamento das tensões de linha e fase, em RMS

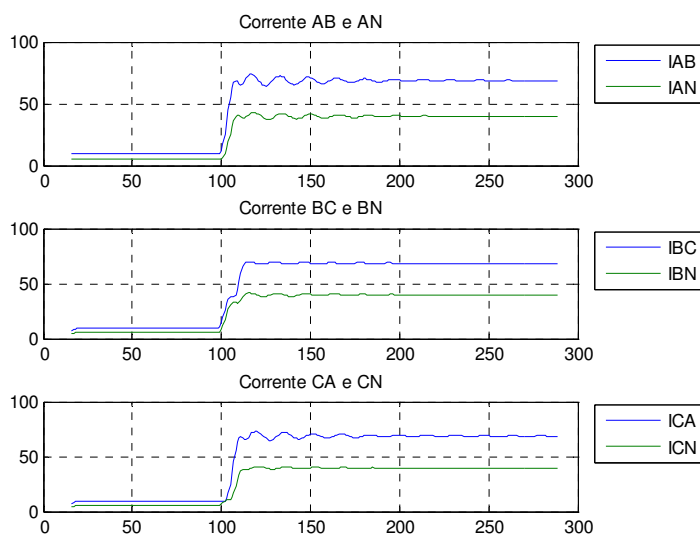


Figura 5.4: Comportamento das correntes de linha e fase, em RMS

Em particular, na Figura 5.4 pode-se observar a influência da componente exponencial da corrente de falta na convergência do valor RMS, ou seja, o valor de corrente oscila durante os primeiros ciclos da falta, enquanto a janela de dados faz a varredura dos valores que contêm a componente DC. Esta influência, como pode ser vista, é diferente para cada fase, uma vez que a falta aparece simultaneamente nas três fases e estas fases estão defasadas entre si no tempo.

Uma das características importantes do desenvolvimento de algoritmos numéricos associados à proteção de linhas de transmissão é a observação do comportamento da trajetória das impedâncias, para os diferentes loops de medição, no plano complexo.

Neste plano podem ser observados como os pontos de impedância se movem desde a condição de carga até o ponto de falta em regime permanente, passando pelo período transitório. Pode-se, neste caso, avaliar como a trajetória converge para o ponto de falta e qual a influência que esta trajetória pode ter na atuação das diferentes características de impedância, ou zonas de proteção, do relé de distância.

A Figura 5.5 apresenta a trajetória de impedância para os loops de fase e de neutro, desde o ponto relativo à condição de carga, até o ponto relativo à condição de falta em regime permanente para uma condição de curto trifásico, sem resistência de

falta. Pode ser observado que os diferentes loops de medição apresentam diferentes trajetórias. Em particular, observa-se ainda que o cálculo da impedância utilizando a técnica baseada na transformada discreta de Fourier apresenta uma trajetória bastante suave no plano complexo.

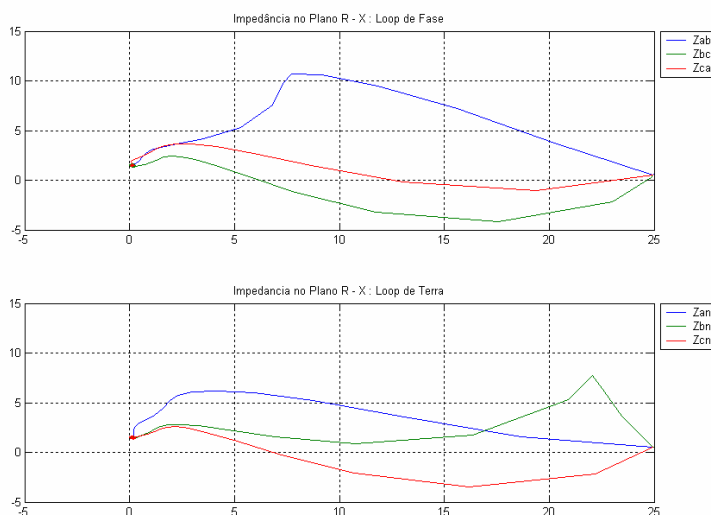


Figura 5.5: Trajetória das impedâncias no plano complexo

A Figura 5.6, adicionalmente, apresenta as trajetórias de impedância no plano complexo para os loops de fase apenas, porém já com as zonas de impedâncias referentes a um relé de distância. Em particular, é considerado neste exemplo um relé de distância com característica quadrilateral com apenas duas zonas ajustadas na direção direta ou para frente.

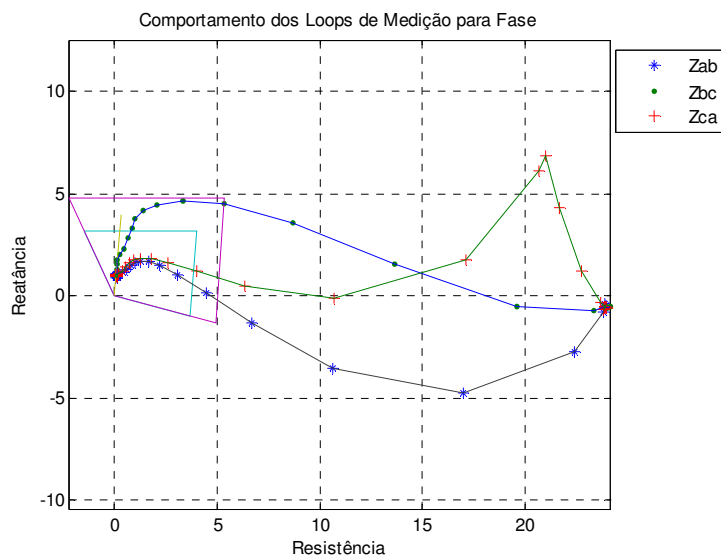


Figura 5.6: Trajetória das impedâncias com relé quadrilateral

A Figura 5.7 por sua vez apresenta uma ampliação da Figura 5.6 para melhor visualização.

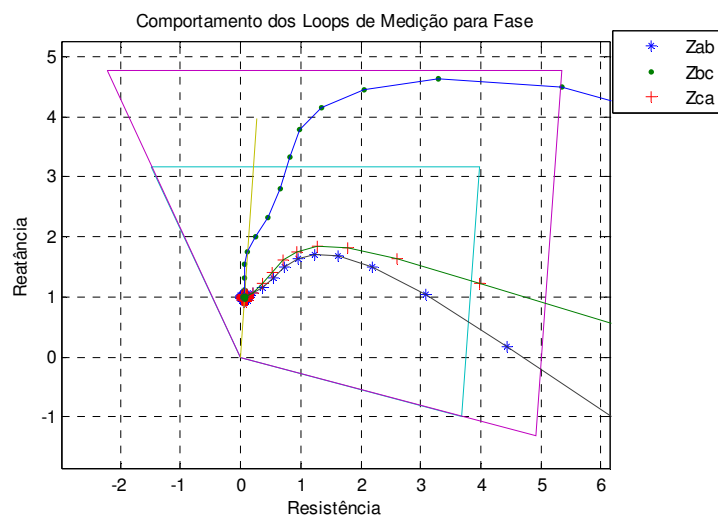


Figura 5.7: Trajetória das impedâncias com relé quadrilateral, ampliação

5.3

Algoritmo de Distância Baseado na Equação Diferencial

Neste caso foram inicialmente considerados dois tipos de implementação para os cálculos de impedância. No primeiro, o algoritmo foi preparado para calcular o valor da impedância empregando o método de equação diferencial, apresentado no Capítulo 3, através do uso direto das equações demonstradas. No segundo, uma filtragem adicional é realizada nos resultados obtidos pela técnica anterior, através de um filtro de mediana.

A Figura 5.8 mostra o resultado do algoritmo baseado em equação diferencial para a mesma falta utilizada no algoritmo baseado na técnica de Fourier.

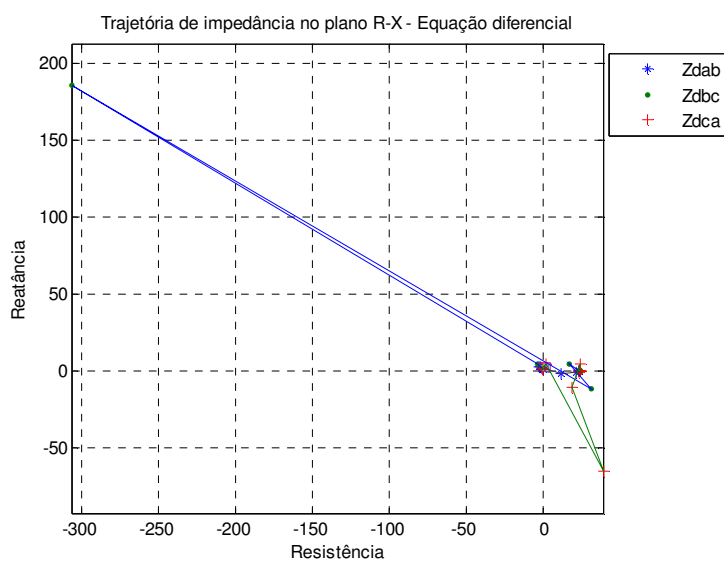


Figura 5.8: Trajetória baseada na equação diferencial, sem filtro de mediana

A Figura 5.9 por sua vez apresenta uma ampliação da figura anterior.

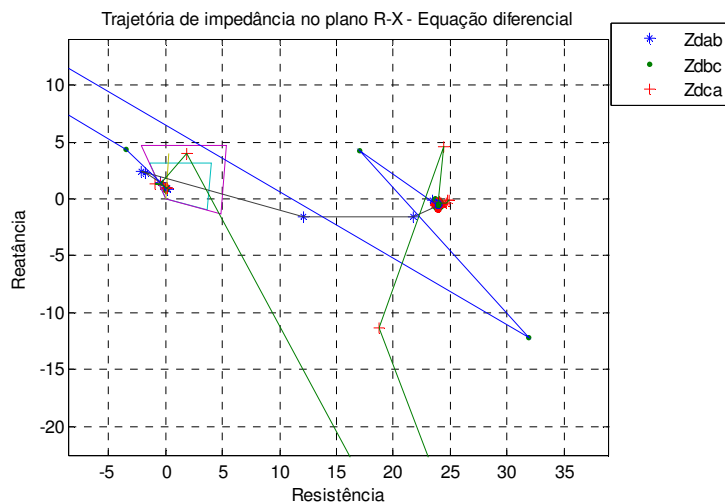


Figura 5.9: Trajetória baseada na equação diferencial, sem filtro de mediana, ampliação

Observa-se que o filtro baseado em equação diferencial apresenta uma rápida convergência para o valor de impedância de falta, uma vez que sua janela de dados é de apenas três amostras.

Por outro lado, a trajetória de impedância é bastante dispersa durante o período transitório de falta, quando a janela de dados possui valores tanto de pré-falta quanto de pós-falta. Para algumas simulações foram observadas grandes variações de valores de impedância durante este período.

Uma melhoria do filtro baseado na equação diferencial é filtrar novamente os dados de resultados através de um filtro de mediana [27], eliminando desta forma valores que divergem muito em relação aos demais calculados. A Figura 5.10 mostra os resultados obtidos após o filtro de mediana ser aplicado aos valores de impedância apresentados na Figura 5.9.

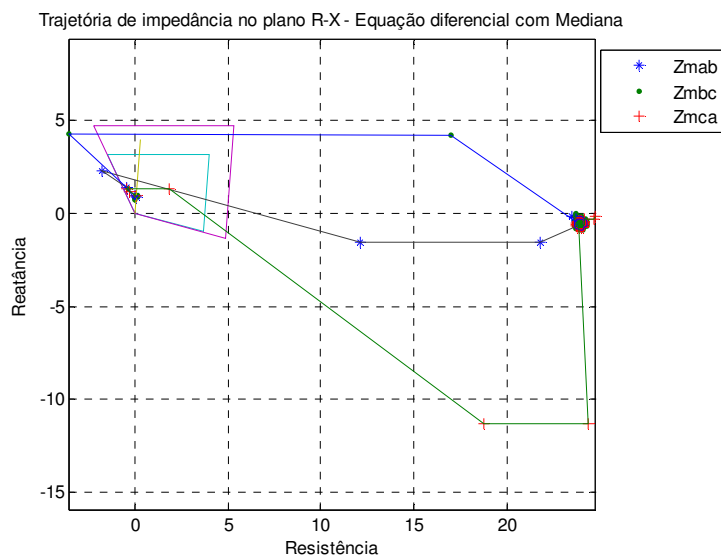


Figura 5.10: Trajetória baseada na equação diferencial, com filtro de mediana

A Figura 5.11 por sua vez apresenta uma ampliação da Figura 5.10 para melhor visualização.

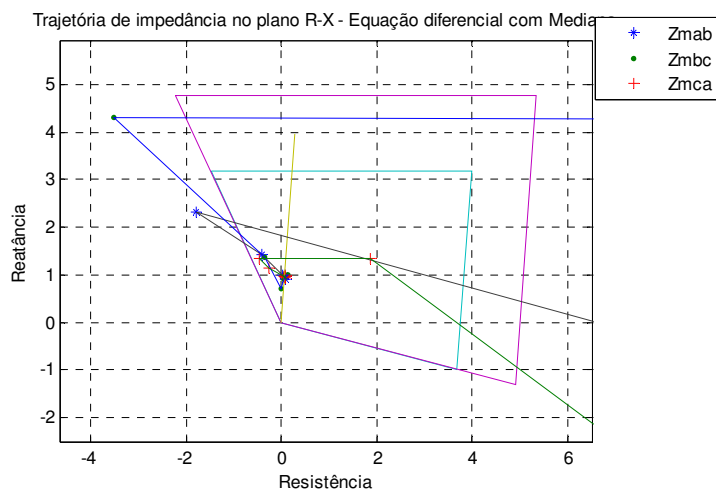


Figura 5.11: Trajetória baseada na equação diferencial, com filtro de mediana, ampliação

Como forma de comparar os resultados obtidos pelos algoritmos baseados na análise de Fourier e equação diferencial pode ser observada a Figura 5.12, onde são

apresentadas as impedâncias RMS de fase. Neste caso, observa-se o tempo de convergência dos valores de impedância desde o momento de pré-falta até o momento de pós-falta para os dois algoritmos.

Conforme mencionado anteriormente, o filtro baseado na análise de Fourier apresenta uma janela dados de 16 amostras, que coincide com o número de amostras por ciclo, ou seja, este algoritmo demora um ciclo para apresentar convergência. Por sua vez, o algoritmo baseado na equação diferencial apresenta janela de dados de apenas 3 amostras, o que significa uma diferença de quase um ciclo, se comparado ao algoritmo de Fourier de ciclo completo.

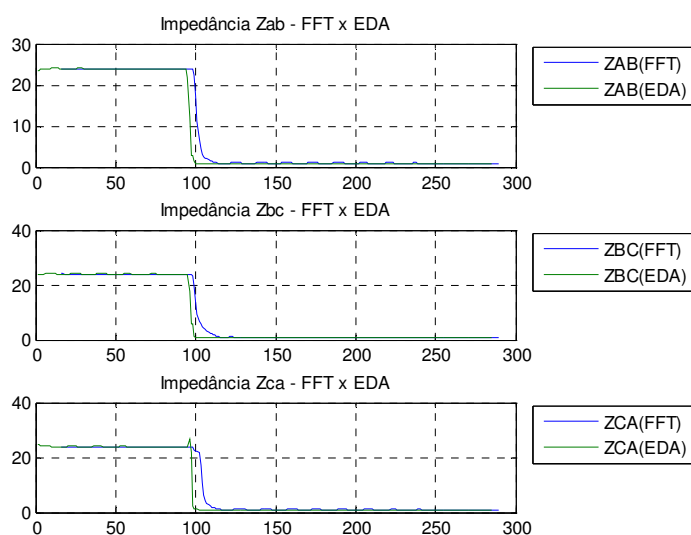


Figura 5.12: Comparação Fourier 1 ciclo e equação diferencial, fase

5.4

Algoritmo de Diferencial de Linha Baseado na Análise de Fourier

A proteção diferencial é o esquema preferido entre os engenheiros de proteção, pois pode ser aplicada em diversas situações, desde motores de média tensão, geradores, barramentos, transformadores até linhas de transmissão. No desenvolvimento deste trabalho, um algoritmo para proteção diferencial de linhas de

transmissão foi concebido para efeito de comparação com os algoritmos de proteção de distância.

Este algoritmo de proteção diferencial é aplicado de maneira simplificada, pois não leva em consideração os tempos de atraso de comunicação que uma aplicação prática impõe ao esquema. O algoritmo parte do princípio de que o tempo de comunicação é zero, ou seja, as correntes entre os extremos de linha são comparadas diretamente para o cálculo das correntes diferenciais e de restrição.

Para o cálculo das correntes em cada extremo de linha e das conseqüentes correntes diferencial e de restrição, a técnica baseada na transformada discreta de Fourier de ciclo completo foi utilizada. Dois planos diferentes são utilizados para a verificação do comportamento das correntes: (1) plano cartesiano de corrente diferencial e de corrente de restrição; (2) plano complexo da razão entre as correntes de ambos os extremos, também denominado plano alfa.

Para algoritmos diferenciais é de extrema importância a observabilidade de seu comportamento tanto para faltas internas à sua zona de proteção, quando deve operar, quanto para faltas externas, quando não deve operar. Estas condições são verificadas a seguir através de simulações para as duas circunstâncias. Assim, para uma falta trifásica sem resistência e localizada a 50% do trecho inicial de linha tem-se o seguinte comportamento de corrente de falta, Figura 5.13.

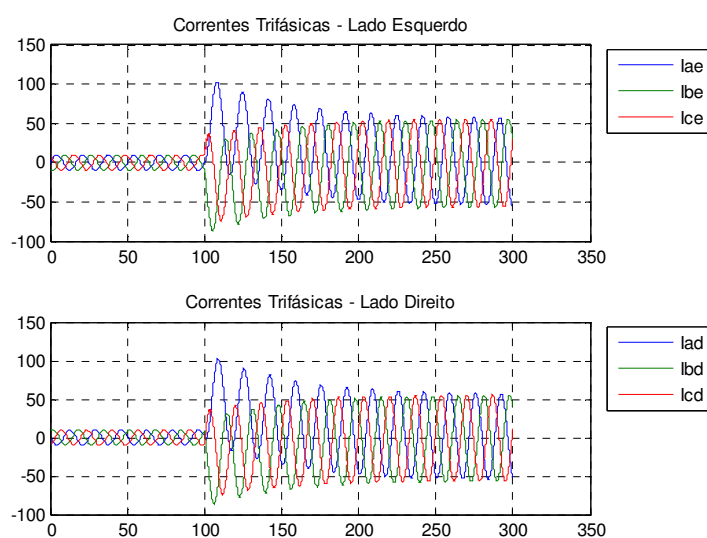


Figura 5.13: Correntes de falta medidas nos extremos de linha

A Figura 5.14 apresenta o comportamento das correntes para cada fase em valores RMS para a falta apresentada na figura anterior.

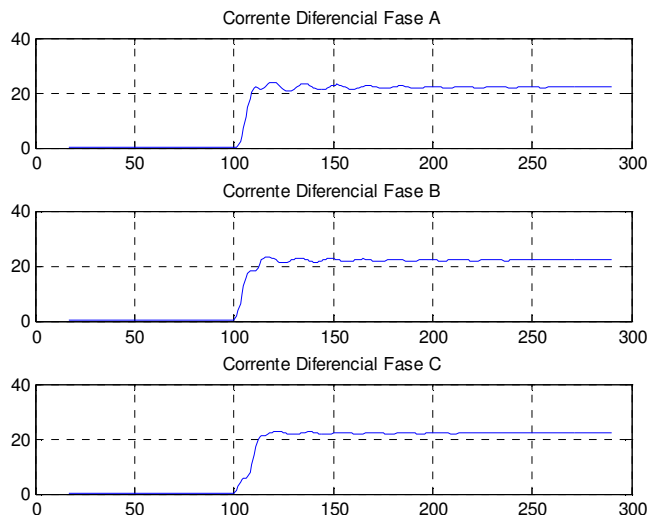


Figura 5.14: Correntes diferenciais em cada fase do sistema

O comportamento do elemento diferencial no plano cartesiano pode ser observado através da Figura 5.15, onde pode ser observado o comportamento das amostras de corrente desde o ponto pré-falta até a região de operação.

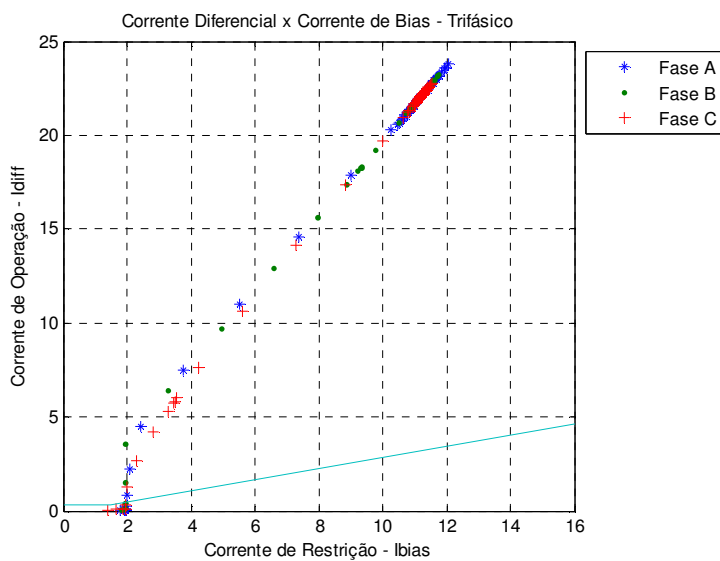


Figura 5.15: Correntes diferenciais no plano cartesiano

Por sua vez a Figura 5.16 apresenta o resultado do elemento diferencial no plano alfa para a falta anterior. Pode ser observada nesta figura a trajetória das amostras desde o ponto pré-falta, ou seja, condição de carga, até a região de operação do elemento diferencial.

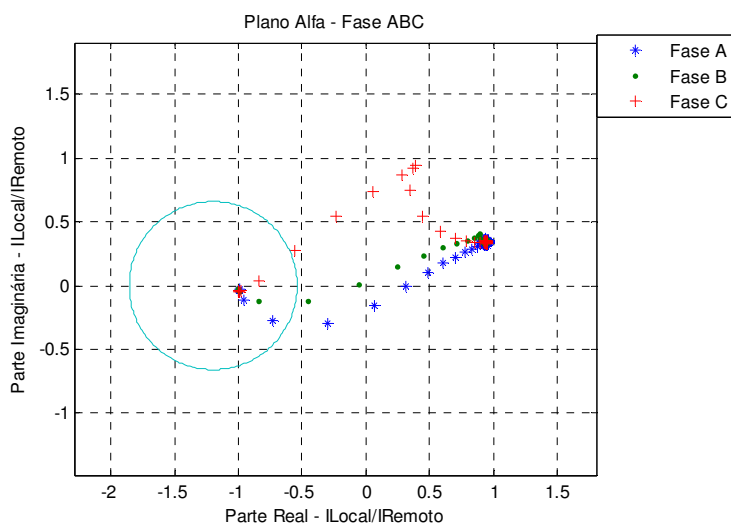


Figura 5.16: Correntes diferenciais no plano alfa

A seguir é apresentado o comportamento do algoritmo diferencial de linha para uma falta monofásica externa, ou seja, fora da zona do elemento diferencial.

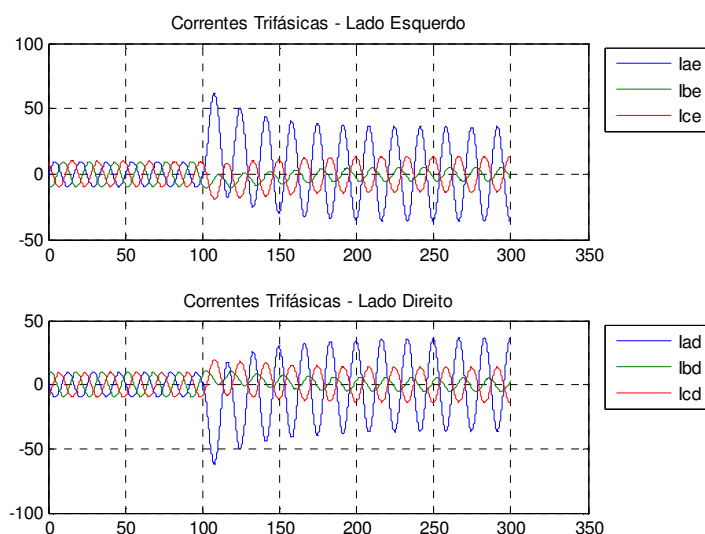


Figura 5.17: Correntes de falta medidas nos extremos de linha

Observa-se através da Figura 5.18 que as amostras permanecem na região de restrição do plano cartesiano, mantendo a estabilidade para a falta externa.

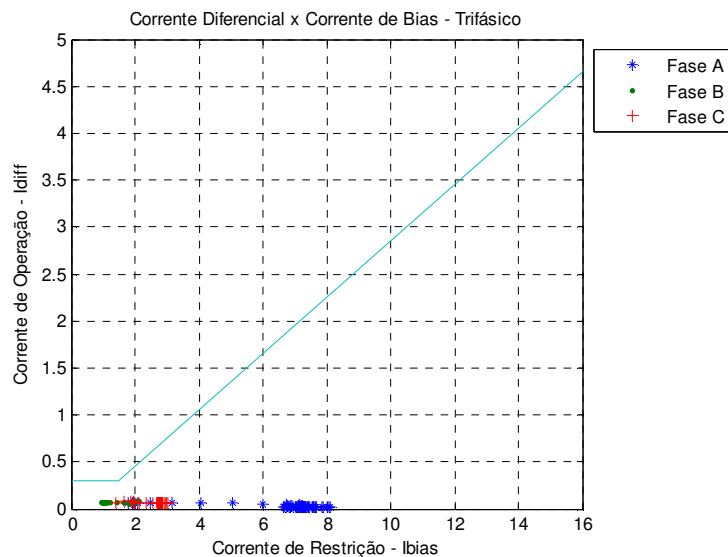


Figura 5.18: Correntes diferenciais no plano cartesiano

Para a mesma falta externa pode-se também observar a estabilidade do sistema de proteção para a medição através do plano alfa. Em particular, as amostras devem permanecer próximas ao ponto $(-1,0)$, que é o ponto de equilíbrio para o algoritmo implementado com representação no plano alfa.

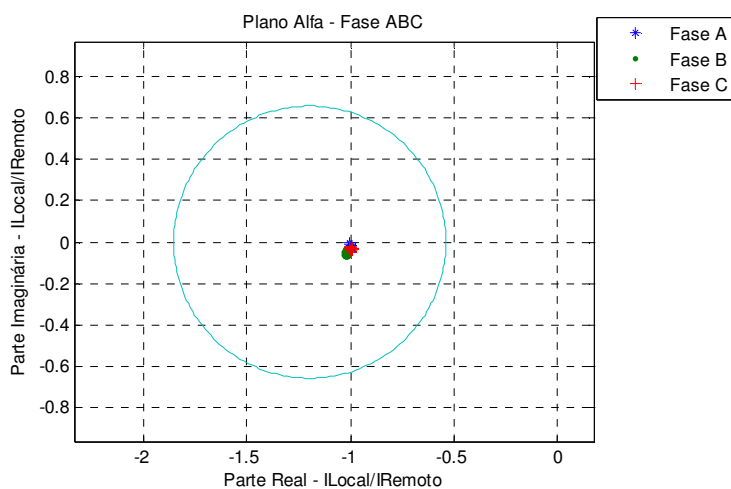


Figura 5.19: Correntes diferenciais no plano alfa

Sistema Não Compensado

O Capítulo 5 apresentou os algoritmos de proteção para linhas de transmissão, tanto no que se refere ao conceito da proteção de distância, quanto ao conceito da proteção diferencial. Neste caso, em particular, foram simuladas faltas em uma linha de transmissão sem que fosse considerada nenhuma resistência de falta.

Neste capítulo, algumas outras condições de defeito são consideradas e analisadas pelos mesmos algoritmos de proteção apresentados anteriormente. São analisadas algumas faltas com valores resistivos diferentes de zero, tanto trifásicas quanto monofásicas com o intuito de se verificar como estes parâmetros podem influenciar na medição de impedância no algoritmo de um relé de distância e se existe alguma influência na medição de corrente diferencial, como por exemplo, na tomada de decisão do algoritmo para o critério de falta interna ou externa.

Adicionalmente, um item relacionado à saturação dos transformadores de corrente é apresentado no final deste capítulo, e simulações de faltas com saturação dos TCs serão também avaliadas nos algoritmos.

6.1

Análise de Faltas em Sistema Não Compensado

Neste capítulo são verificados os comportamentos dos algoritmos de proteção numérica para um sistema não compensado, ou seja, sem que a linha de transmissão apresente capacitor série. Trata-se, portanto, de um sistema de transmissão mais comumente encontrado. Serão avaliados diferentes tipos de falta para este sistema, e todas estas faltas serão examinadas para os diferentes algoritmos de proteção.

6.1.1 Análise de Falhas Trifásicas

6.1.1.1 Falhas a 25% do trecho da linha

Seja inicialmente analisar a condição de falta trifásica para diferentes localizações ao longo da linha de transmissão. A condição de falta a 25% do trecho inicial de linha já foi contemplada no capítulo anterior, porém a resistência de falta foi desprezada. No entanto, os algoritmos de medição são analisados a seguir quando existe a resistência de falta. As resistências de falta são consideradas em valores primários.

A Figura 6.1 apresenta o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo. Pode ser observado, através desta figura, que o valor de reatância apresenta um valor um pouco menor do que o esperado devido a a não homogeneidade do sistema, ou seja, à contribuição de corrente de falta proveniente do terminal remoto e sua influência sobre a resistência de falta, sendo este fenômeno conhecido como efeito semáforo.

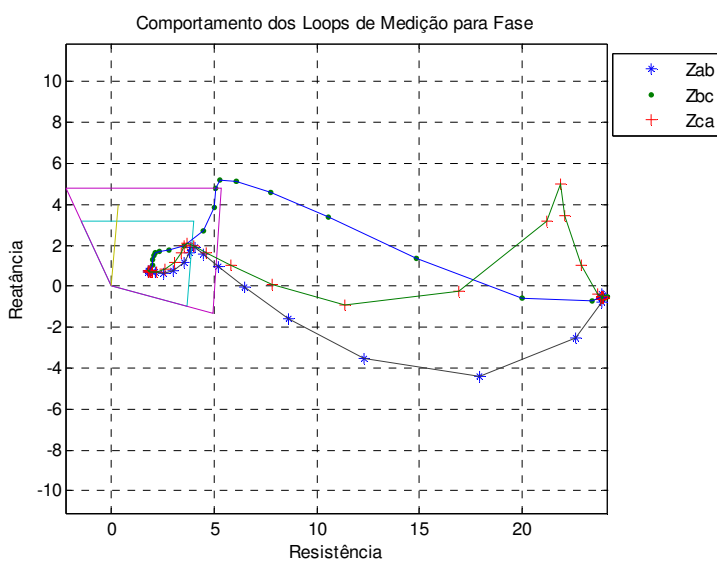


Figura 6.1: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, exportação

Em contrapartida, ao ser invertido o sentido do fluxo de potência, observa-se na Figura 6.2 que o valor final de reatância é um pouco maior do que o esperado.

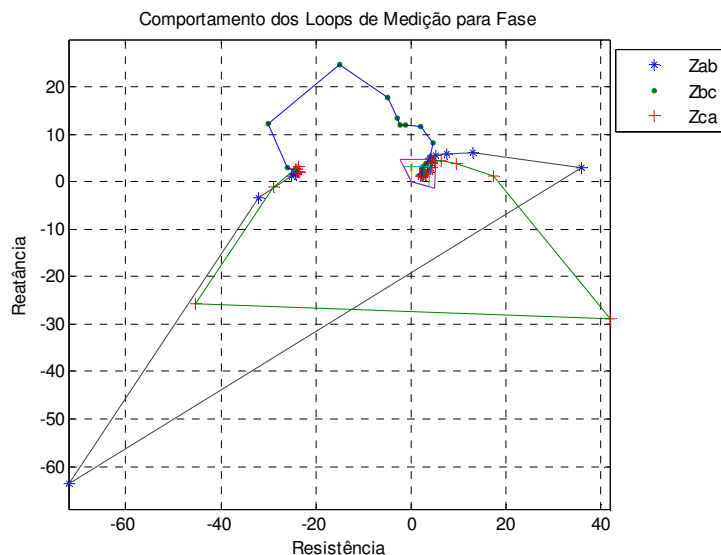


Figura 6.2: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, importação

Observa-se que para a simulação com resistência de falta igual a zero, apresentada no capítulo anterior nas Figuras 5.7 e 5.11, o algoritmo de equação diferencial apresenta melhor convergência, ou seja, ele absorve melhor o efeito da componente exponencial. Comparativamente, o algoritmo de Fourier de ciclo completo apresenta uma espiral bastante ampla para o valor próximo ao ponto de convergência. Porém, na medida em que o valor da resistência de falta é aumentado o efeito da componente exponencial passa a diminuir.

Para o algoritmo de impedância baseado na equação diferencial da linha de transmissão, o resultado pode ser observado através da Figura 6.3. Observa-se que o valor de impedância rapidamente caminha para o valor final de convergência, e o elemento de impedância identifica a falta dentro da Zona 1, mesmo para a falta com resistência diferente de zero.

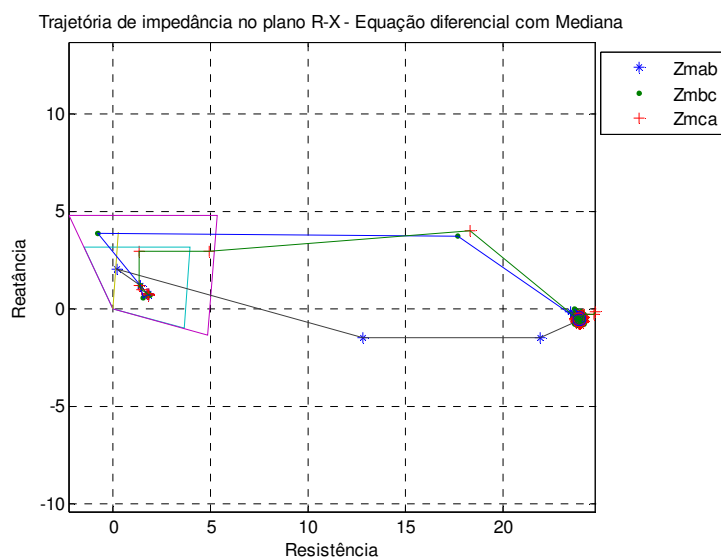


Figura 6.3: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam os resultados dos elementos diferenciais de linha para a falta a 25% do trecho de linha. Observa-se que estes elementos, tanto no plano cartesiano quanto no plano alfa, não demonstram dificuldade na detecção da falta, operando de maneira satisfatória para este tipo de falta.

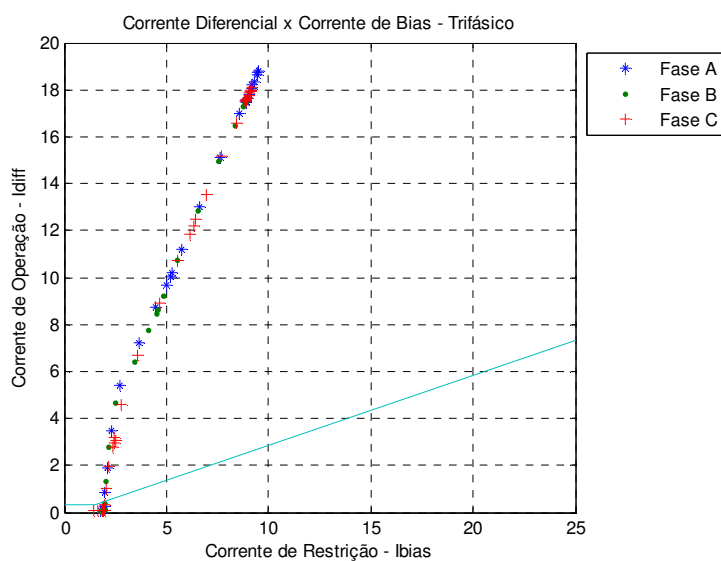


Figura 6.4: Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 10\Omega$

O elemento diferencial baseado no plano alfa também identifica corretamente a falta como sendo interna e não apresenta dificuldade em operar, conforme pode ser observado pela Figura 6.5.

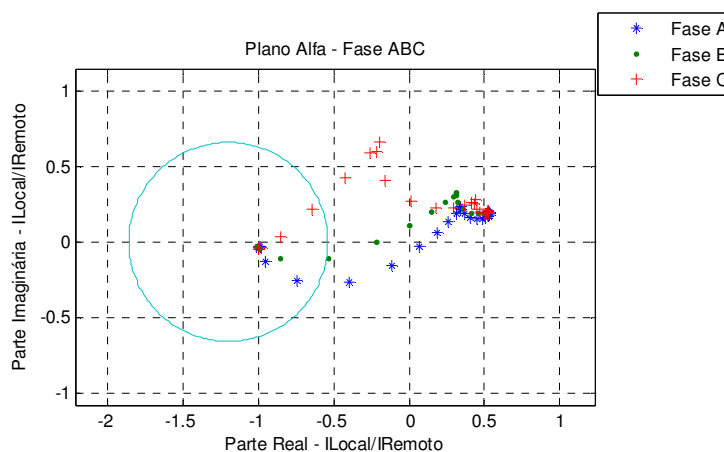


Figura 6.5: Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 10\Omega$

6.1.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha

A seguir, os testes anteriores são repetidos para uma localização de falta a 75% do trecho da linha, ou seja, numa região já próxima ao limite de ajuste da zona 1 do elemento de distância. Para efeito comparativo, o teste é realizado também com resistência de falta igual a zero a fim de se observar a alteração na espiral para o ponto de convergência da impedância final de falta.

A componente exponencial da corrente de falta aumenta a espiral em torno do ponto de impedância final, conforme a Figura 6.6. Observa-se que esta oscilação em torno do ponto final pode causar certa indefinição de operação, tendo em vista que algumas amostras são posicionadas fora de região definida pela Zona 1. De outra forma, pode-se pensar em uma falta que ocorra imediatamente fora do limite de alcance da zona, em 90% do trecho da linha por exemplo, e que o elemento de

distância venha a operar incorretamente, uma vez que algumas amostras podem ser posicionadas dentro da região definida pela Zona 1.

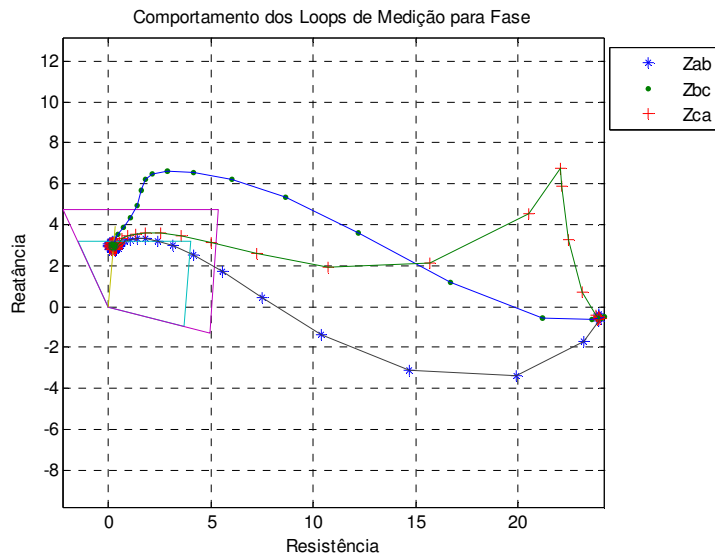


Figura 6.6: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0$

Na Figura 6.7 pode-se observar que o aumento do valor de resistência de falta diminui o efeito espiral, uma vez que se altera a relação X/R do sistema medida pelo algoritmo.

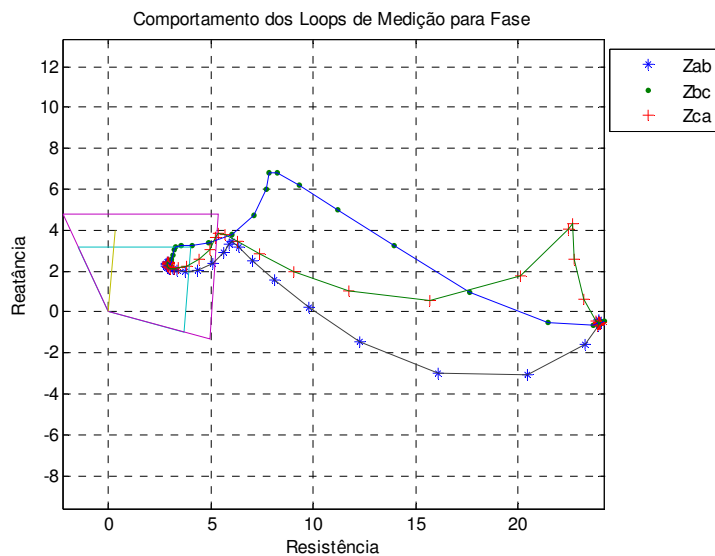


Figura 6.7: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$

No entanto, a espiral praticamente não existe para o algoritmo de distância baseado em equação diferencial, uma vez que a componente exponencial é parte da solução deste modelo, Figura 6.8.

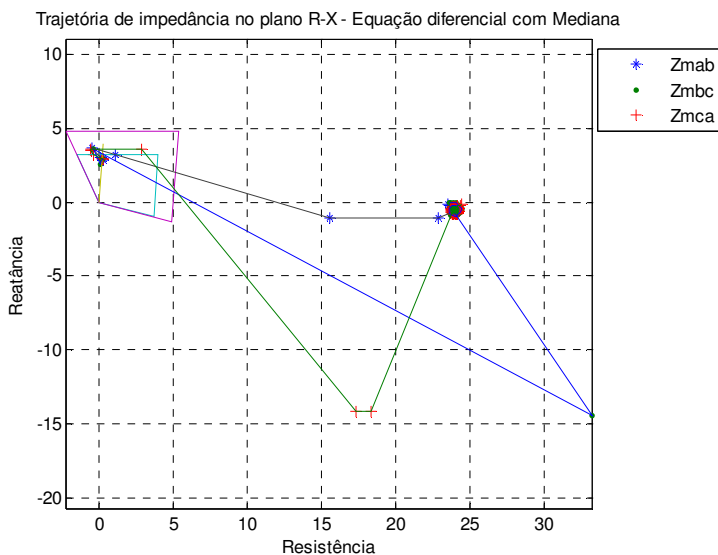


Figura 6.8: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0$

A Figura 6.9 apresenta o resultado do algoritmo baseado em equação diferencial, porém com aumento da resistência de falta.

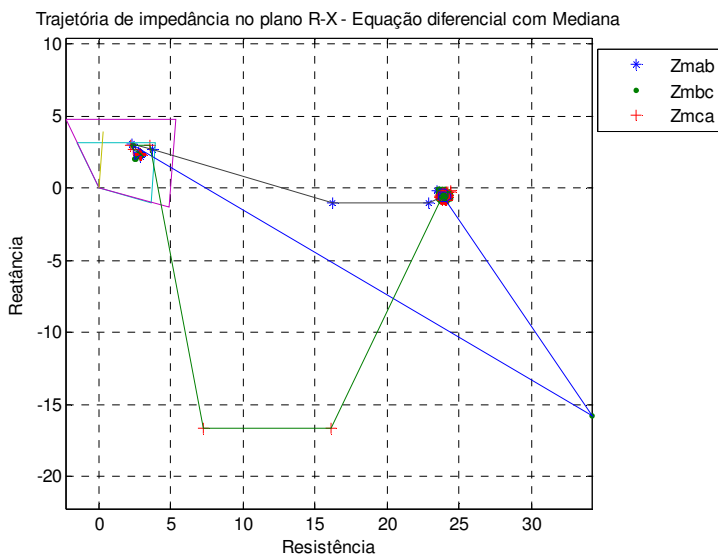


Figura 6.9: Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$

O principal problema observado nas simulações de faltas a 25 e 75% do trecho de linha foi o resultado obtido com o aumento excessivo da resistência de falta. Para faltas com valores de resistência igual a 50Ω tanto os algoritmos de Fourier quanto de equação diferencial não conseguiram interpretar a falta como sendo interna à Zona 1.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam, por sua vez, os resultados dos elementos diferenciais de linha, no plano cartesiano e plano alfa, para a falta em 75% do trecho de linha com resistência de falta igual a zero. Ambos os algoritmos não apresentam dificuldade em identificar corretamente a falta como sendo interna, apresentando operação adequada para a falta em análise.

Assim, pôde ser comprovado um melhor desempenho dos elementos diferenciais de linha para a proteção de linhas de transmissão, fato este já mencionado em diversas literaturas voltadas a aplicação dos sistemas de proteção. A proteção de distância mostra-se bastante sensível à presença de resistência de falta, enquanto que a proteção diferencial de linha mantém um comportamento satisfatório para valores resistivos bastante elevados.

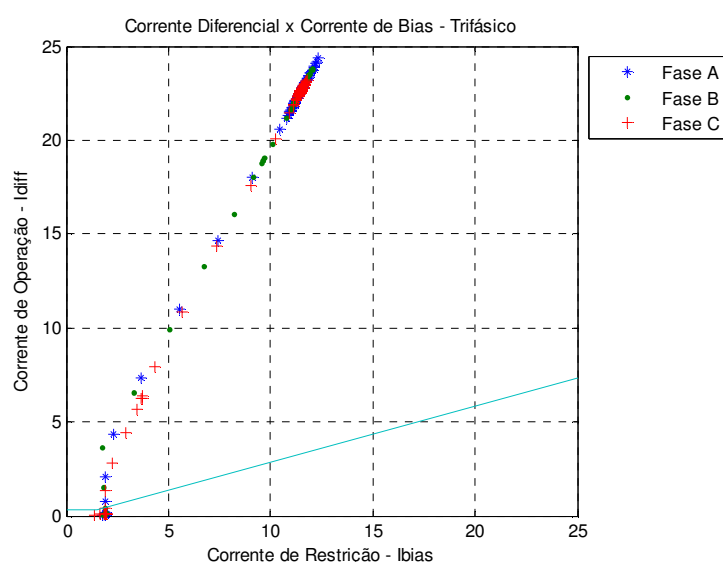


Figura 6.10: Diferencial plano cartesiano, 75%, $R_f = 0$

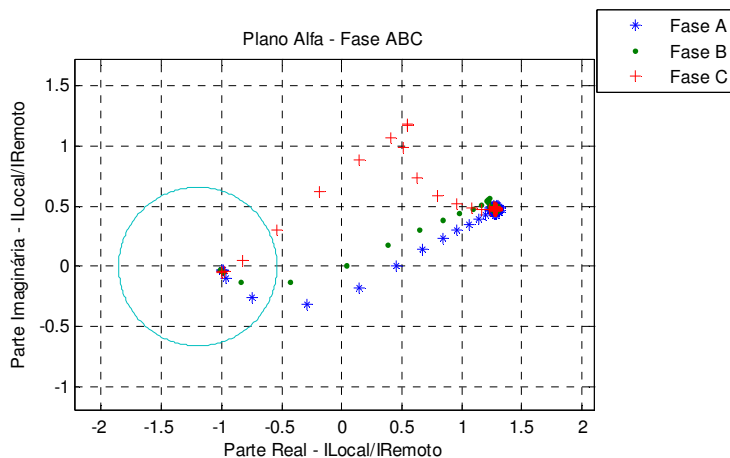


Figura 6.11: Diferencial plano alfa, 75%, $R_f = 0$

Pode ser observado, através das Figuras 6.12 e 6.13, que os algoritmos diferenciais não encontram dificuldade na detecção de faltas também para a falta com valor de resistência de falta diferente de zero. Apesar de não apresentadas neste trabalho faltas com valores resistivos maiores foram testadas e os algoritmos mantiveram o bom desempenho.

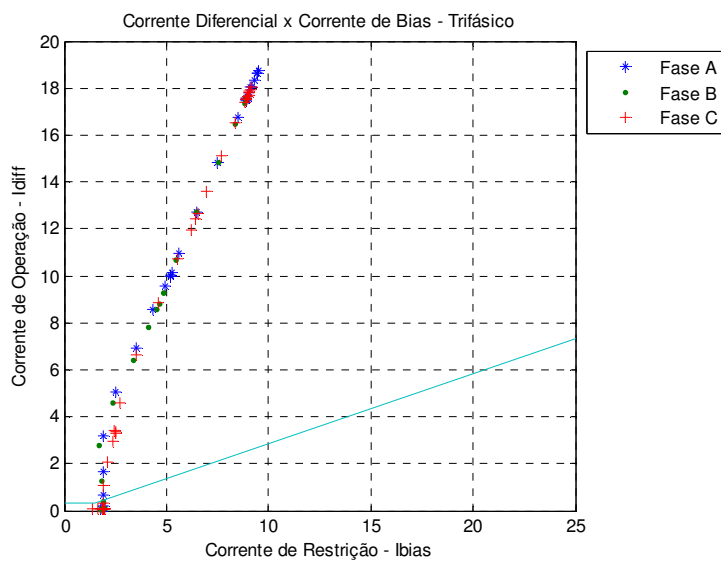


Figura 6.12: Diferencial plano cartesiano, 75%, $R_f = 10\Omega$

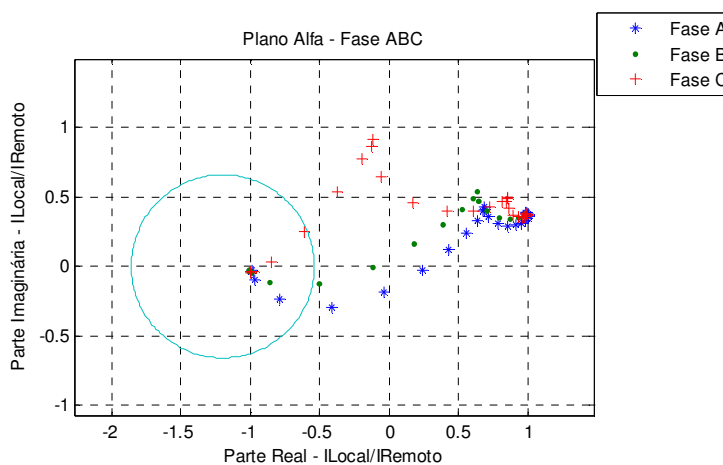


Figura 6.13: Diferencial plano alfa, 75%, $R_f = 10\Omega$

6.1.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha

Seja em seguida analisar o comportamento da trajetória de impedância para faltas que ocorrem a 100% do comprimento da linha. O objetivo destes testes é avaliar se a impedância transitória que caminha desde o ponto de carga até o ponto de falta irá de alguma forma alcançar os limites impostos pela Zona 1 da característica de impedância do relé, e adicionalmente verificar o comportamento dos elementos diferenciais para faltas externas à zona diferencial.

As faltas serão novamente impostas também com valores de resistência diferentes de zero como forma de se avaliar se este parâmetro poderá influenciar no sobrealcance da zona 1. A expectativa inicial é a de que o relé apresente medição apenas para zona 2 para faltas a 100% do trecho da linha. Os resultados são apresentados a seguir.

Observa-se pela Figura 6.14 que a trajetória de impedância durante o período transitório não atinge a zona 1, apesar do movimento espiral acentuado. No entanto, para uma falta a 90% do trecho, cuja figura é aqui omitida, observou-se o posicionamento de algumas amostras na região definida pela Zona 1, o que pode levar a uma operação incorreta do elemento de distância.

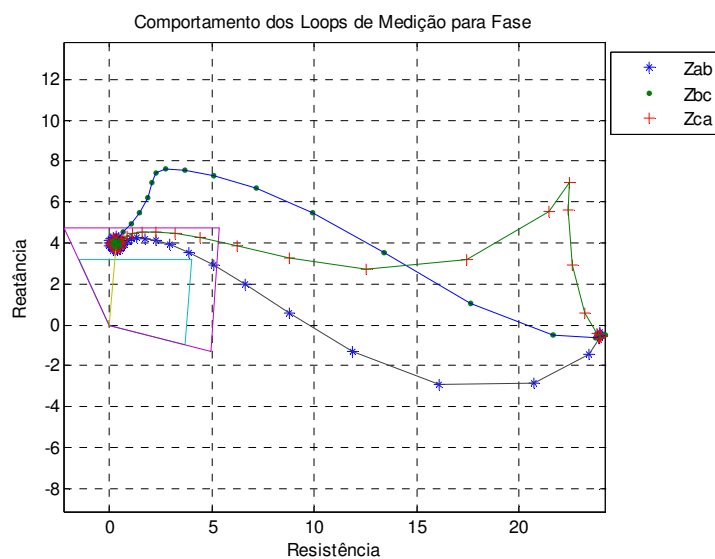


Figura 6.14: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$

Por outro lado, observa-se através da Figura 6.15 que uma falta resistiva com 10Ω poderá apresentar sobrealcançe da zona 1 devido ao efeito das não homogeneidades do sistema, anteriormente discutido. Este problema deve ser considerado nos ajustes e no algoritmo de impedância dos fabricantes.

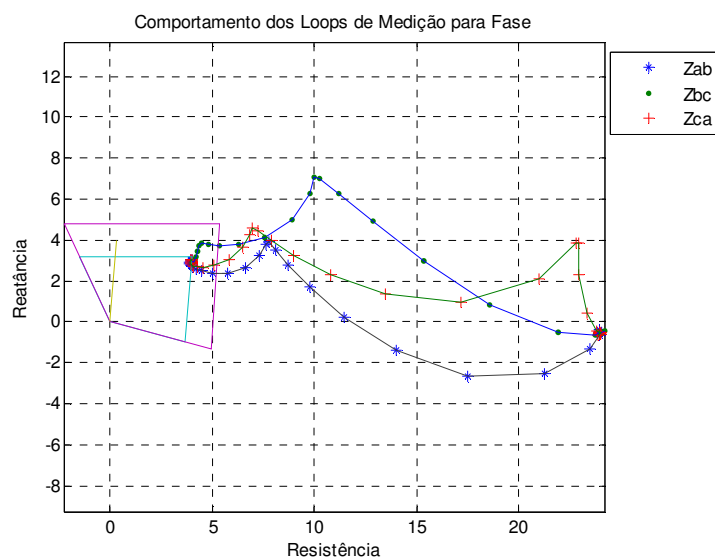


Figura 6.15: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 10\Omega$

Para o algoritmo de distância baseado em Equação Diferencial observa-se novamente, Figuras 6.16 e 6.17, que o movimento espiral praticamente não existe, havendo excelente convergência para o valor final de impedância de falta.

O problema de sobrealcançe para a zona 1 também ocorre neste caso para a falta com valor resistivo de 10Ω , sendo este fenômeno independente da técnica numérica utilizada para o cálculo da impedância aparente.

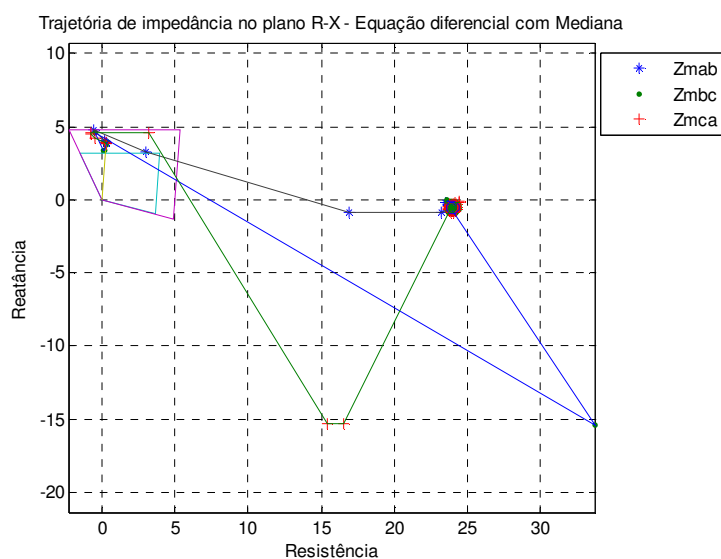


Figura 6.16: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$

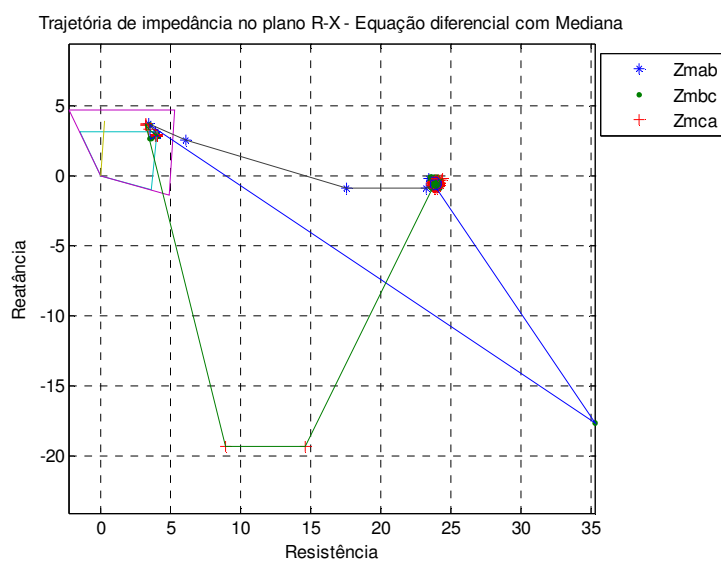


Figura 6.17: Equação diferencial, 100%, $R_f = 10\Omega$

As faltas no ponto 100% do trecho de linha foram examinadas também para os algoritmos diferenciais, conforme as Figuras 6.18 a 6.21, apenas para a condição de falta externa. Novamente foram simuladas faltas com resistência igual a zero e 10Ω , sendo observada a boa estabilidade dos algoritmos. Os algoritmos diferenciais novamente apresentaram bom desempenho, não operando para esta condição de falta, conforme o esperado.

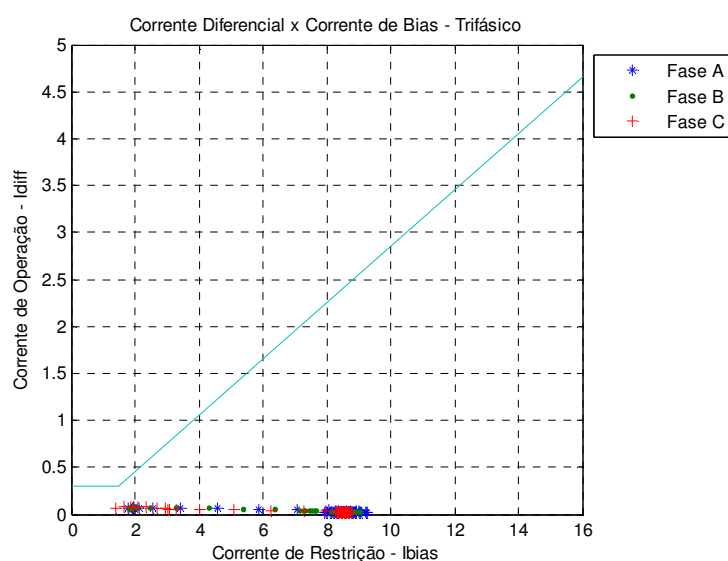


Figura 6.18: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$

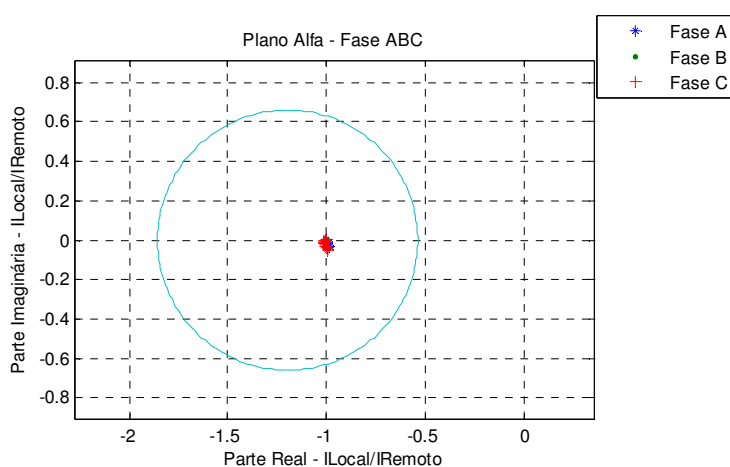


Figura 6.19: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor de resistência de falta, o algoritmo no plano cartesiano apresenta o seguinte resultado:

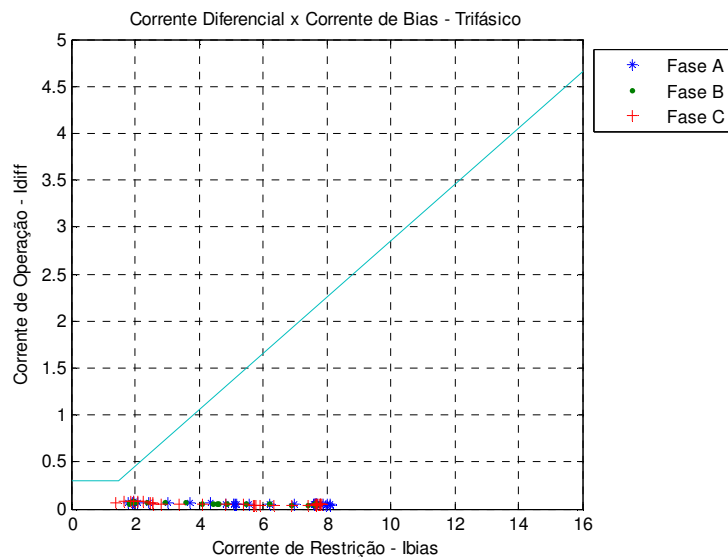


Figura 6.20: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 10\Omega$

O resultado do algoritmo no plano alfa também demonstra estabilidade.

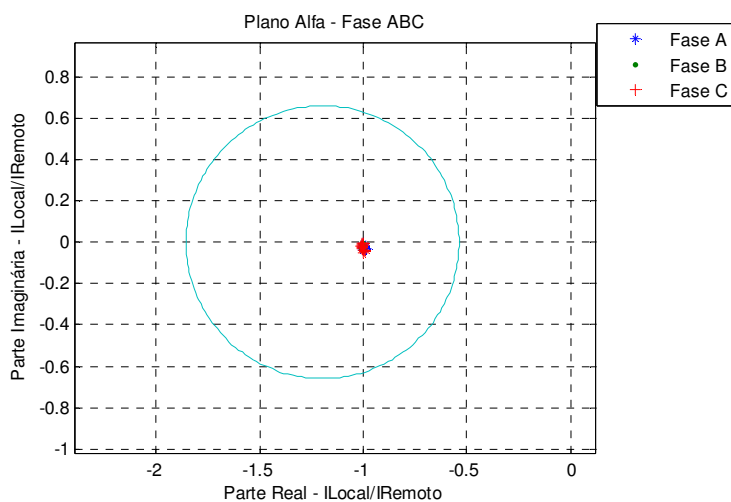


Figura 6.21: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 10\Omega$

6.1.2 Análise de Faltas Monofásicas

Para as faltas monofásicas serão consideradas duas posições de faltas ao longo da linha de transmissão: (a) Faltas a 50% do trecho da linha, (b) Faltas a 100% do trecho da linha. Serão considerados os mesmos valores de resistência dos itens anteriores, ou seja, zero, 10Ω .

6.1.2.1 Faltas a 50% do trecho da linha

Seja inicialmente analisar a condição de falta monofásica a ser feita na fase A, a 50% do trecho de linha, do sistema de potência apresentado na Figura 5.1. Para esta condição pode ser verificado inicialmente o comportamento das impedâncias medidas nos loops de fase, ou seja, as impedâncias Z_{ab} , Z_{bc} e Z_{ca} . Procura-se, desta forma, avaliar o comportamento dos loops de fase para uma falta fase-terra. Em alguns casos pode-se observar que para uma falta monofásica existe a possibilidade do relé de distância indicar partida, ou mesmo atuação, dos loops de fase.

A Figura 6.22 mostra o transitório que os loops Z_{ab} e Z_{ca} , e que envolvem a Fase A, apresentam no plano de impedâncias. Observa-se que para uma falta monofásica da Fase A para terra, o loop de medição de fase Z_{ca} atinge as zonas de medição, mais especificamente a Zona 2, o que pode influenciar as indicações de partida e/ou disparo em um caso real de aplicação.

A Figura 6.23 a seguir apresenta os loops de medição de neutro para a falta monofásica na Fase A. Observa-se que apenas o loop de medição Z_{an} converge para a região de medição da Zona 1, localizando corretamente a falta em 50% do trecho da linha.

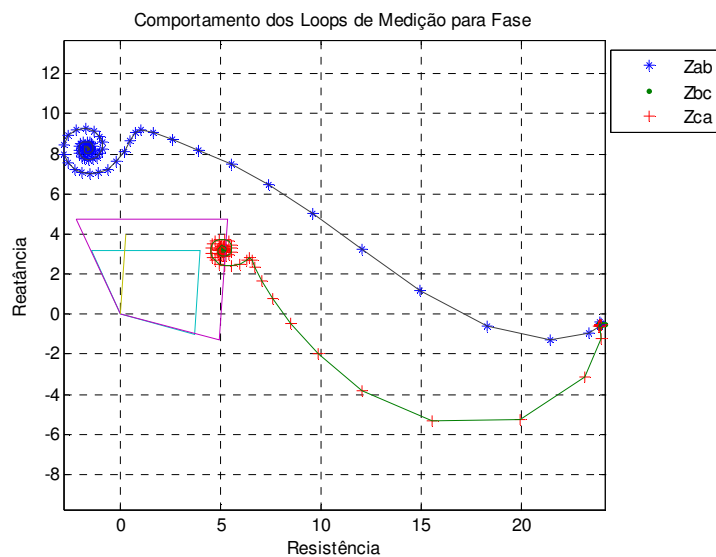


Figura 6.22: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, fase

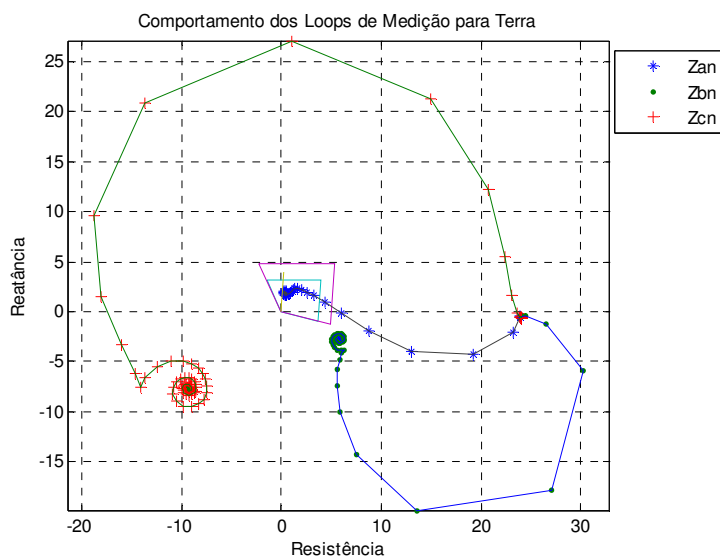


Figura 6.23: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, neutro

A seguir é apresentado o comportamento do algoritmo de medição baseado no método da equação diferencial e sua convergência até o ponto de falta, Figura 6.24.

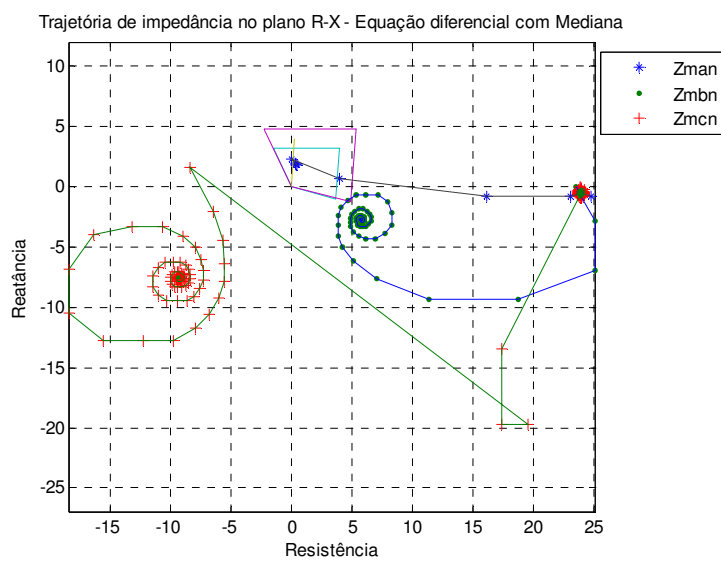


Figura 6.24: Equação diferencial, 50%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor de resistência de falta para 10Ω , o seguinte resultado é obtido para o algoritmo de Fourier de ciclo completo, Figura 6.25.

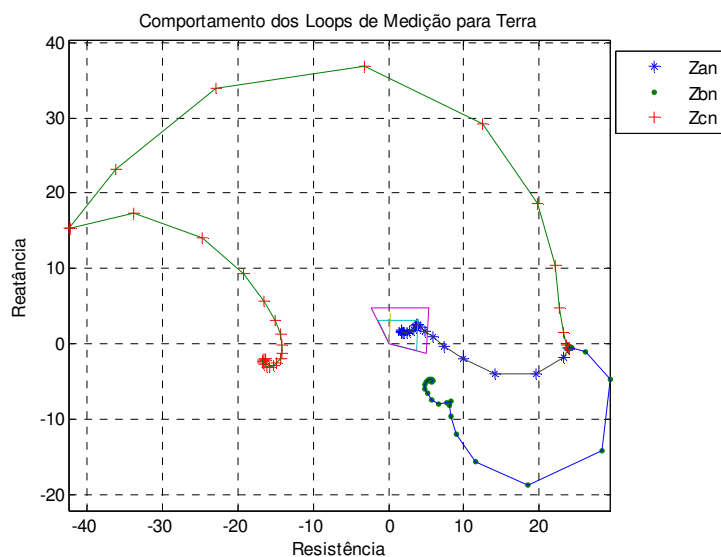


Figura 6.25: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 10\Omega$

A Figura 6.26 apresenta o resultado para o algoritmo de equação diferencial.

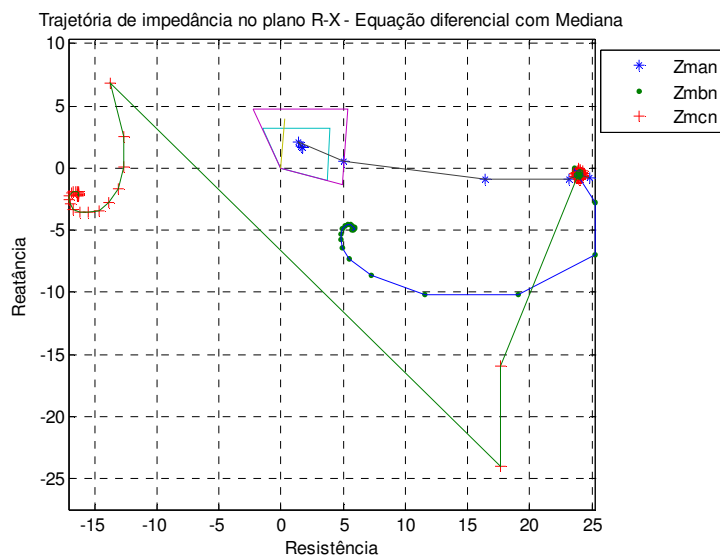


Figura 6.26: Equação diferencial, 50%, $R_f = 10\Omega$

Para faltas monofásicas, o algoritmo de relé diferencial de linha discrimina corretamente a fase sob falta, conforme pode ser observado pelas figuras que seguem, não havendo problema de indicação e/ou disparo indevido de outras fases. Os algoritmos diferenciais são considerados intrinsecamente segregados por fase, conforme pode ser observado pelas Figuras 6.27 e 6.28.

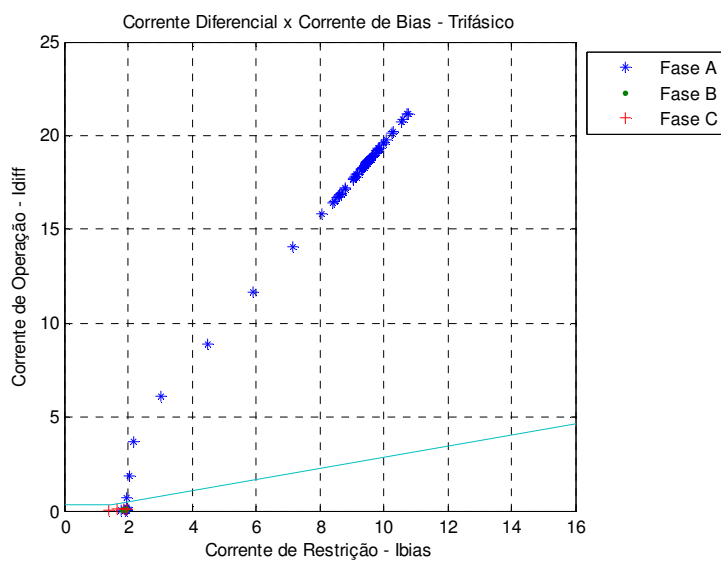


Figura 6.27: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$

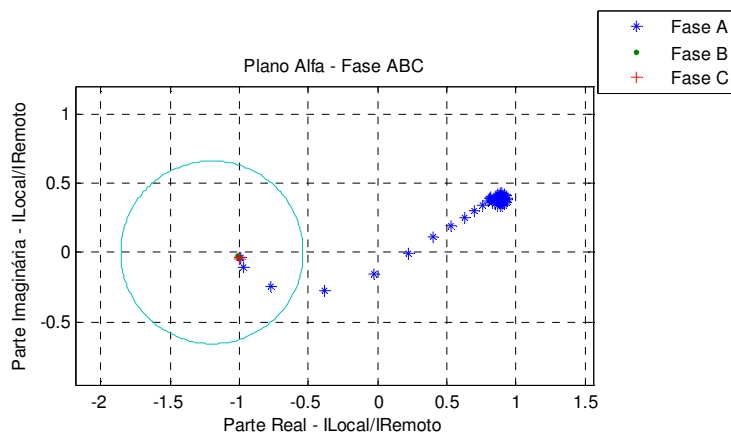


Figura 6.28: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência para 10Ω não são identificados problemas de detecção de faltas para os algoritmos diferenciais de linha. As Figuras 6.29 e 6.30 apresentam os resultados destas simulações. Simulações com valores de resistência de falta em 50Ω foram realizadas e comprovaram o bom desempenho dos elementos diferenciais, porém são aqui omitidas suas figuras.

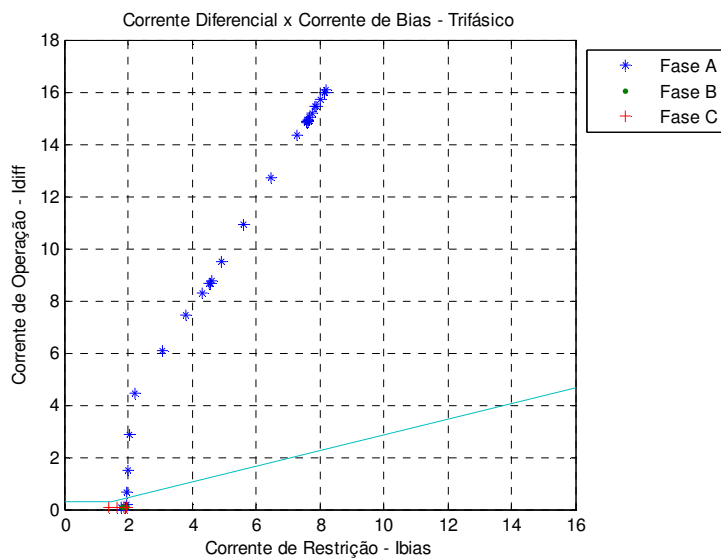


Figura 6.29: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 10\Omega$

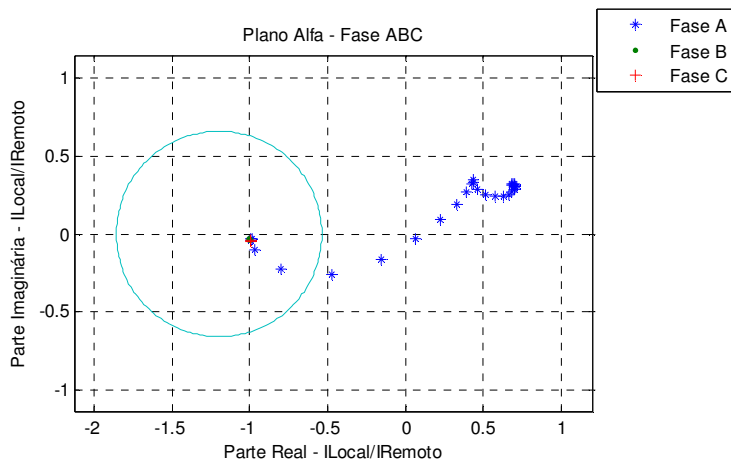


Figura 6.30: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 10\Omega$

6.1.2.2 Faltas a 100% do trecho da linha

As faltas monofásicas são avaliadas também para o ponto a 100% do trecho da linha. A Figura 6.31 apresenta o resultado do algoritmo de Fourier de ciclo completo para uma falta Fase A para terra sem resistência de falta.

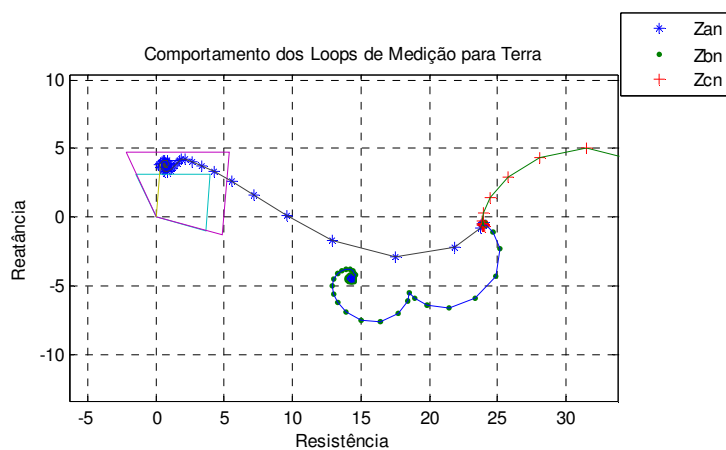


Figura 6.31: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$

A Figura 6.32 apresenta o resultado da falta anterior para o algoritmo de distância baseado no modelo de equação diferencial.

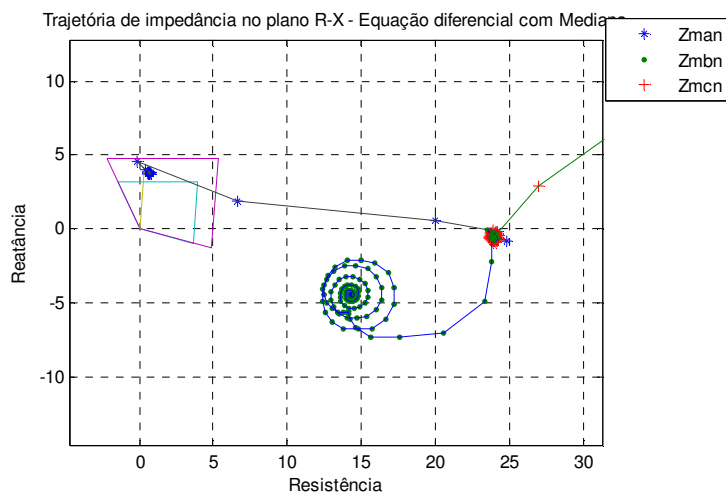


Figura 6.32: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência para 10Ω , tem-se para ambos os algoritmos os resultados apresentados pela Figura 6.33 e 6.34.

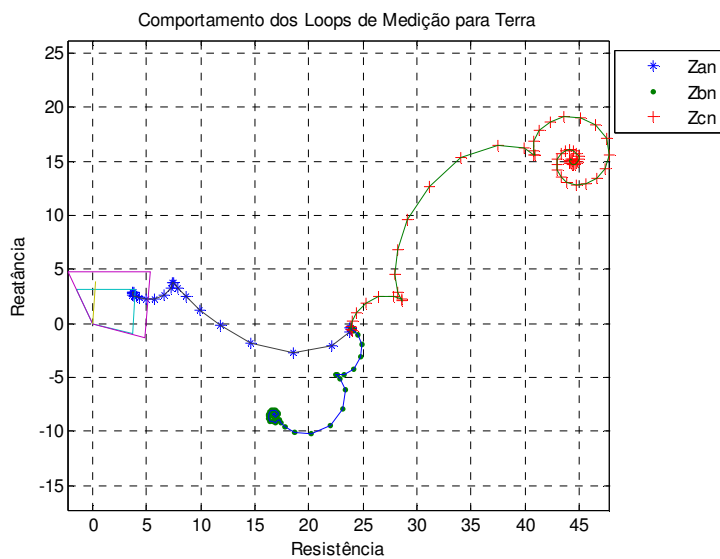


Figura 6.33: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 10\Omega$

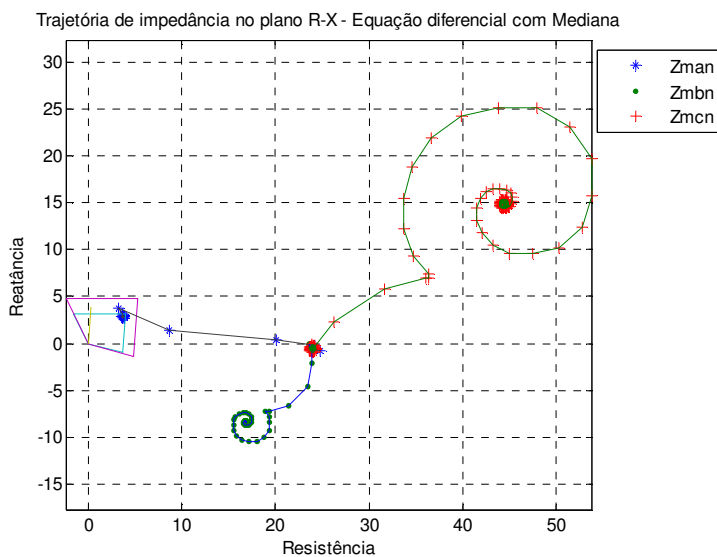


Figura 6.34: Equação diferencial, 100%, $R_f = 10\Omega$

Novamente observa-se que para uma falta aplicada a 100% do trecho de linha, ou seja, no final da linha, o alcance reativo é bastante influenciado pelo valor resistivo da falta.

Para faltas monofásicas, o algoritmo de relé diferencial de linha novamente discrimina de forma correta a fase sob falta, conforme pode ser observado pelas Figuras 6.35 e 6.36, sendo apresentados apenas os resultados para $R_f = 10\Omega$.

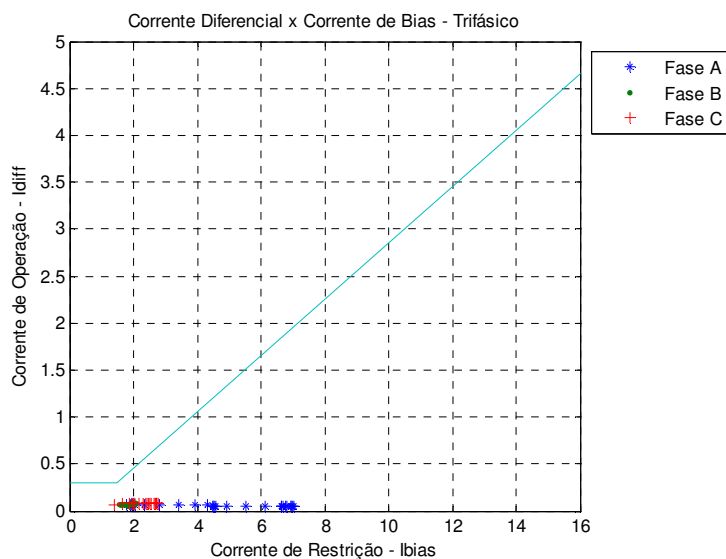


Figura 6.35: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 10\Omega$

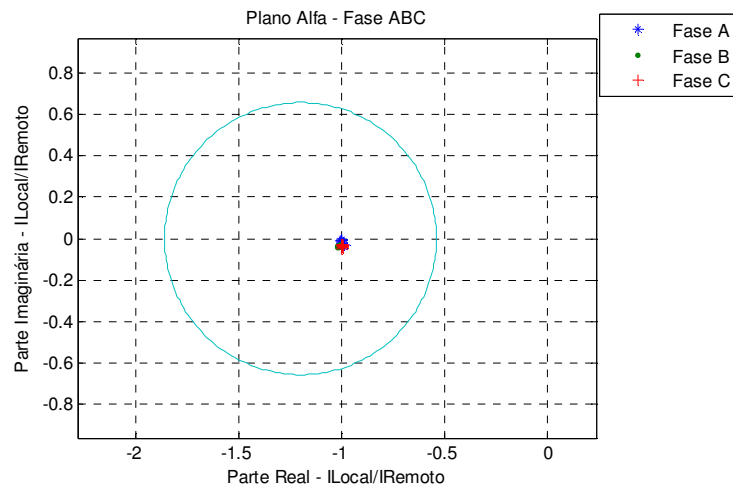


Figura 6.36: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 10\Omega$

6.2

Análise de Faltas em Sistema Não Compensado, com Saturação de TC

Neste item é verificado o comportamento dos algoritmos de medição, tanto de impedância quanto diferencial de linha, para situações no qual os transformadores de corrente apresentem saturação durante as condições de falta. Para isso, um modelo de transformador de corrente apresentado pelo Matlab/Simulink foi utilizado levando-se em consideração o circuito magnético saturável, e ajustado para a relação de transformação apropriada.

A comparação das correntes secundárias sem saturação e com saturação para a Fase A, para um falta a 50% do trecho de linha, pode ser vista através da Figura 6.37 a seguir:

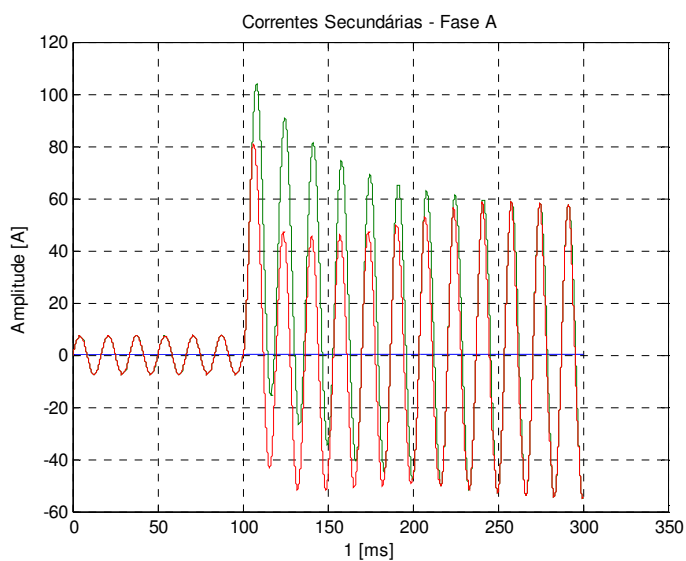


Figura 6.37: Comparação de correntes secundárias fase A, com e sem saturação

Para as simulações que seguem o comportamento dos TPs (Transformadores de Potencial) é considerado ideal.

Adicionalmente, apenas faltas trifásicas são analisadas.

6.2.1 Análise de Faltas Trifásicas

6.2.1.1 Faltas a 50% do trecho da linha

Para uma falta trifásica localizada a 50% do trecho de linha, com saturação dos transformadores de corrente, observa-se que existe uma maior variação transitória da medição da impedância aparente, havendo grande dificuldade para a convergência ao valor final de impedância. As faltas são inicialmente simuladas com resistência de falta igual a zero e posteriormente com resistência de falta igual a 10Ω .

A Figura 6.38 apresenta o resultado do comportamento do algoritmo de Fourier de ciclo completo para uma falta trifásica com saturação do transformador de corrente.

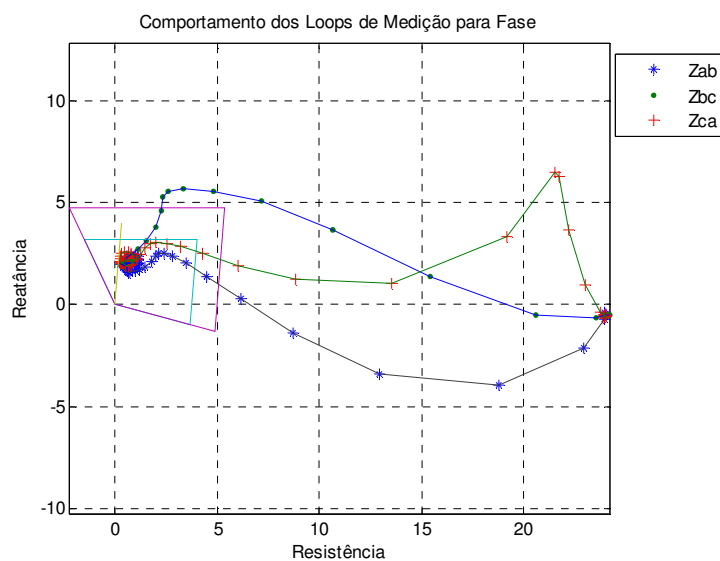


Figura 6.38: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$

Para uma melhor visualização a figura anterior é ampliada e mostrada a seguir, com destaque para o ponto próximo ao valor de convergência.

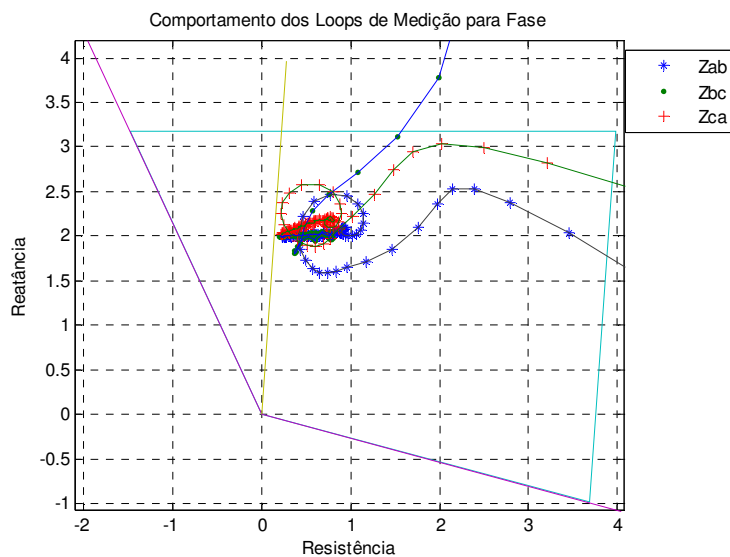


Figura 6.39: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 0\Omega$, ampliação

O algoritmo baseado em equação diferencial também apresenta dificuldade na medição do valor de impedância para a condição de saturação dos TCs, Figura 6.40.

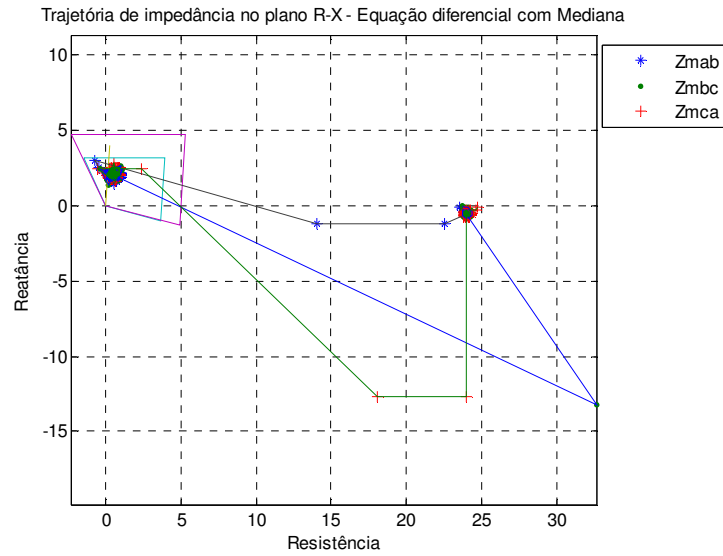


Figura 6.40: Equação diferencial, 50%, $R_f = 0\Omega$

Observa-se que o aumento da resistência de falta diminui a influência do transitório de falta para o transformador de corrente com saturação, uma vez que altera a relação X/R do sistema, e conseqüentemente a constante de tempo da componente DC, conforme Figura 6.41.

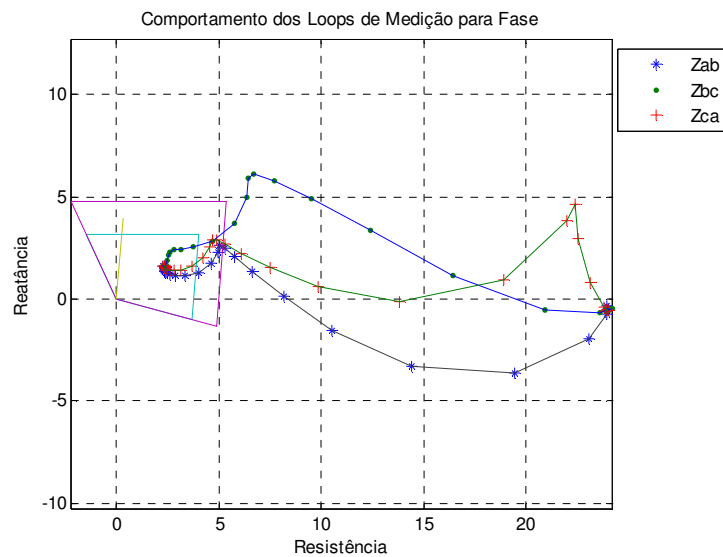


Figura 6.41: DFT ciclo completo, 50%, $R_f = 10\Omega$

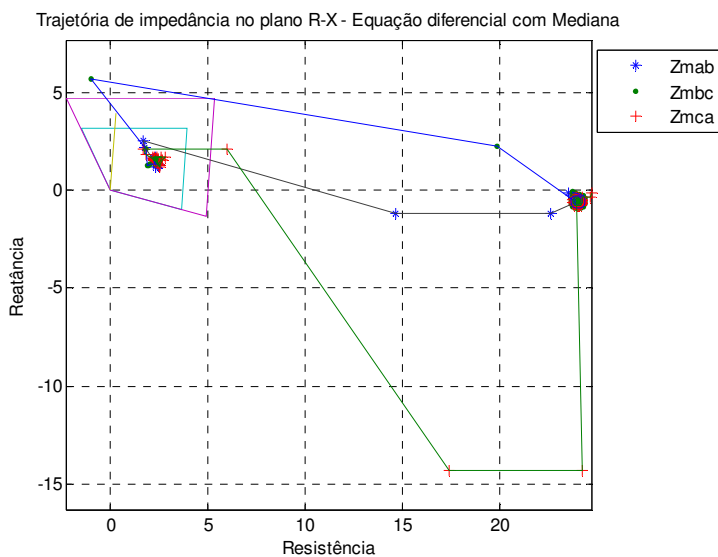


Figura 6.42: Equação diferencial, 50%, $R_f = 10\Omega$

Seja a seguir analisar a influência do algoritmo de proteção diferencial de linha também para a condição de saturação dos TCs durante as faltas. A Figura 6.43 a seguir apresenta o comportamento das correntes diferenciais e o efeito da saturação.

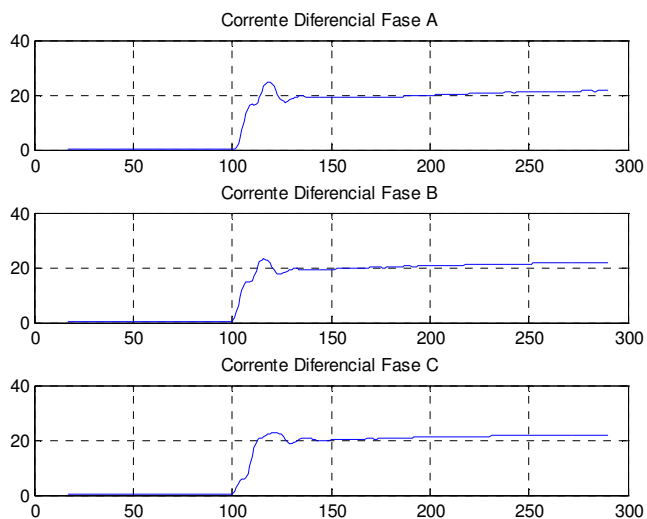


Figura 6.43: Correntes diferenciais com saturação dos TCs

Apesar da saturação dos transformadores de corrente o elemento diferencial opera corretamente, de acordo com a Figura 6.44, que apresenta as amostras de corrente no plano cartesiano.

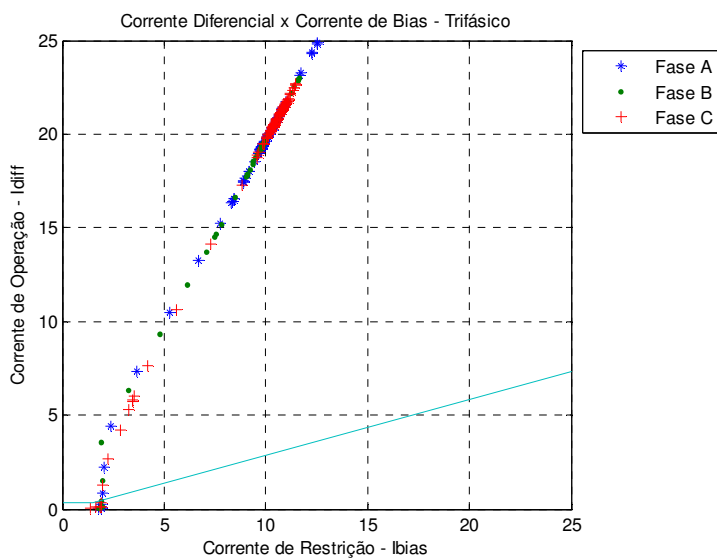


Figura 6.44: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$

O mesmo ocorre para o algoritmo diferencial representado no plano alfa e mostrado na Figura 6.45.

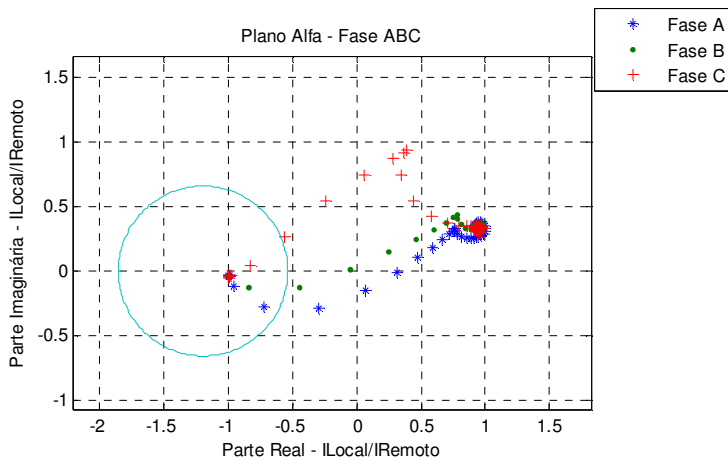


Figura 6.45: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$

6.2.1.2 Faltas a 100% do trecho da linha

A Figura 6.46 abaixo apresenta o resultado da trajetória de impedância para uma falta trifásica localizada no final da linha, para a qual apenas a Zona 2 deve atuar. Observa-se que o efeito da saturação aproxima a trajetória da impedância da Zona 1, o que pode causar uma atuação indevida do elemento de distância.

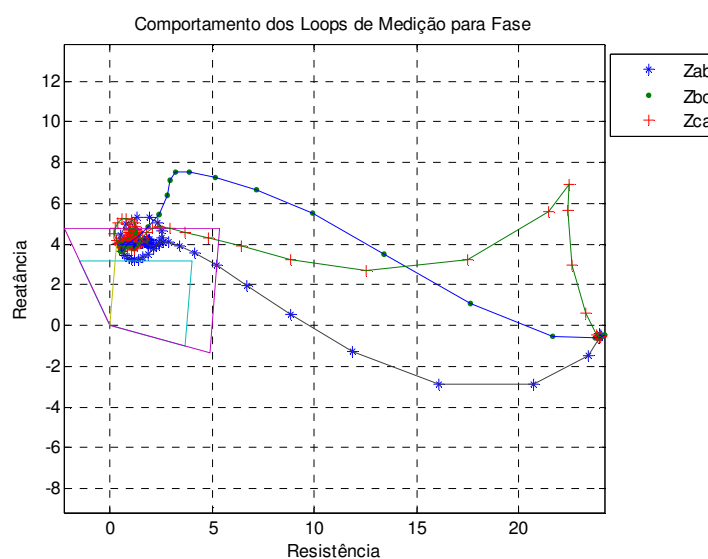


Figura 6.46: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$

Este problema pode ocorrer com mais facilidade, por exemplo, para uma falta trifásica a 90% do trecho de linha, levando-se em consideração o efeito da saturação dos TCs. Desta forma, a trajetória de impedância pode atingir a zona de atuação relativa ao alcance de Zona 1.

A seguir é apresentado o comportamento da trajetória de impedância para uma falta trifásica no final da linha utilizando-se o algoritmo de equação diferencial para o cálculo da impedância aparente. Observa-se, neste caso, que algumas amostras atingem a Zona 1, o que poderia causar disparo indevido.

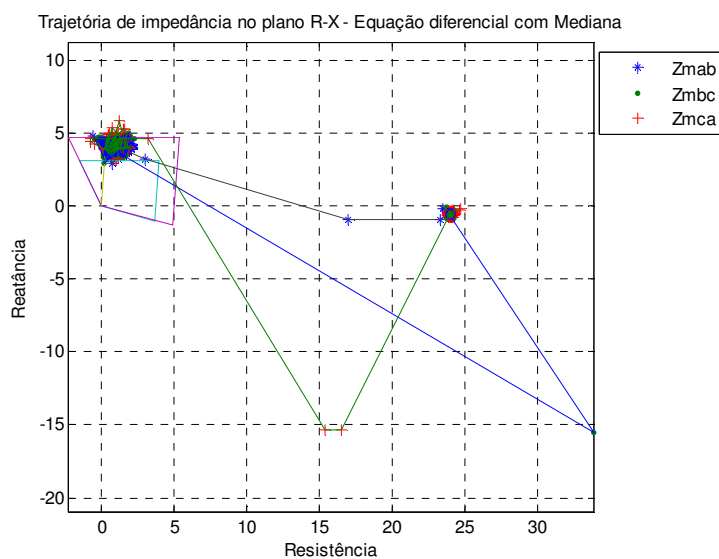


Figura 6.47: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$

Simulações utilizando valores resistivos diferentes de zero diminuiram o efeito da saturação dos TCs, melhorando a convergência do valor de impedância. No entanto, o efeito semáforo volta a ter efeito com o aumento de R_f .

Para os algoritmos diferenciais de linha duas situações de importância podem ser destacadas no que se refere ao fenômeno de saturação dos TCs durante faltas externas. Na primeira, pode-se pensar que os TCs apresentam saturação idêntica para uma falta externa, o que na prática iria resultar em correntes diferenciais iguais a zero. No entanto, espera-se que durante condições de faltas externas severas os TCs apresentem saturações diferentes, resultando em correntes diferenciais diferentes de zero.

Uma outra condição a ser considerada é a de que os TCs apresentem características magnéticas diferentes entre si. Na prática, porém, procura-se utilizar TCs com características as mais próximas possíveis quando da aplicação da proteção diferencial. A Figura 6.48 a seguir apresenta o resultado da simulação de uma falta externa, a 100% do trecho da linha, com os TCs do lado direito da linha de transmissão apresentando características da curva de saturação diferentes das características dos TCs do lado esquerdo da linha.

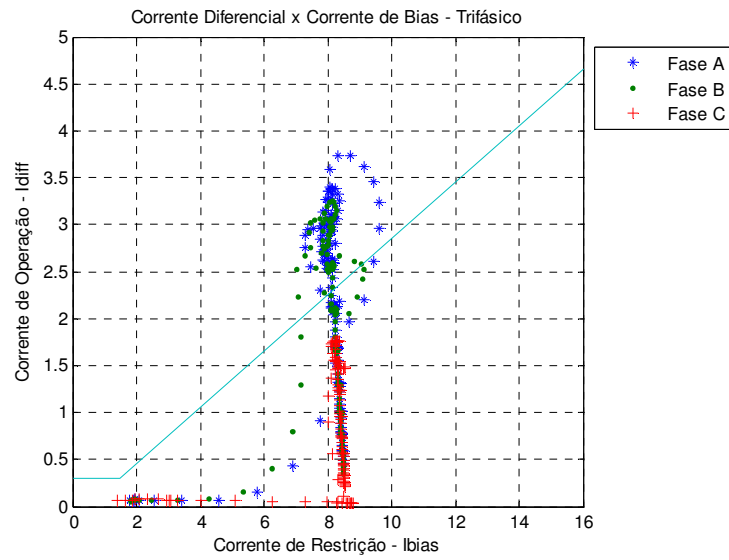


Figura 6.48: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$

Observa-se que para este caso o elemento de proteção diferencial irá operar indevidamente para a falta externa.

Sistema com Compensação Série

No capítulo anterior foram analisadas faltas em um sistema elétrico típico, sem o uso da compensação série e de suas vantagens operacionais. No entanto, aqui os mesmos defeitos simulados anteriormente são repetidos para um sistema que apresenta capacitores série instalados ao longo de uma linha de transmissão.

Em particular, será considerado apenas um tipo de instalação de capacitor, aquele no qual o valor capacitivo total é dividido em dois conjuntos iguais e instalados nos extremos da linha de transmissão. Não será, portanto, considerado o esquema de instalação do banco de capacitores no meio da linha.

Todavia, dois tipos de instalação são considerados no que se refere ao arranjo ou conexão dos transformadores de potencial. No primeiro, os transformadores de potencial são instalados na barra, e no segundo os transformadores de potencial são instalados na linha.

7.1

Modelo Simplificado do Sistema de Potência

O sistema de potência modelado, e apresentado na Figura 7.1, é constituído de uma linha de transmissão, representada por uma impedância Z_L , que interliga duas fontes, denominadas Fonte A e Fonte B. A linha de transmissão foi modelada a parâmetros distribuídos e as fontes geradoras através de uma fonte de tensão atrás de uma impedância constante.

São acrescentados a este modelo simplificado dois conjuntos de capacitores série nos extremos finais de linha. O grau de compensação adotado para este sistema será de 60%, ou seja, 30% em um final de linha e os outros 30% no outro final de

linha. O potencial informado ao relé é inicialmente tomado no lado da barra. Uma análise do potencial tomado no lado da linha é feita posteriormente no item 7.3.

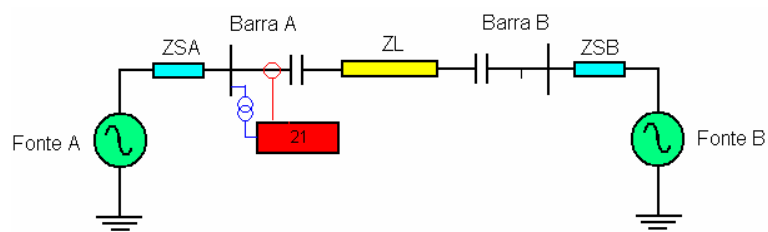


Figura 7.1: Modelo simplificado de sistema de potência

A Tabela 7.1 apresenta os dados do sistema de potência simulado. Para as simulações realizadas neste capítulo, ou seja, com compensação série, a linha de transmissão apresenta um comprimento de 200km. Os seguintes parâmetros do sistema foram utilizados nas simulações:

Tabela 7.1: Dados do sistema de potência com compensação série

		Resistência Ohm/km	Indutância mH/km	Capacitância $\mu\text{F}/\text{km}$
Fonte A (440kV $\angle 0$)	Zero	1.6669	48.5847	-
	Positiva	0.7600	48.7492	-
Fonte B (440kV $\angle -20$)	Zero	1.6669	48.5847	-
	Positiva	0.7600	48.7492	-
Linha de Transmissão	Zero	2.91546e-1	2.4	8.8252e-3
	Positiva	2.36174e-2	0.8769	13.312e-3
Capacitor série	Positiva	-	-	133.722

As primeiras simulações, cujos resultados são apresentados a seguir, foram realizadas com o capacitor série sem o dispositivo MOV. Posteriormente, este dispositivo é acrescentado ao modelo do sistema a fim de que sua influência seja também avaliada no comportamento das medições.

7.2

Análise de Faltas em Sistema com Compensação Série

Serão inicialmente verificados os resultados dos algoritmos de impedância e de diferencial de linha para faltas trifásicas ao longo da linha de transmissão. Posteriormente, faltas monofásicas serão também consideradas. As faltas são inicialmente simuladas com valores de resistência igual a zero, sendo estes valores alterados posteriormente.

7.2.1 Análise de Faltas Trifásicas

7.2.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha

Seja inicialmente considerar uma falta trifásica localizada a 25% do trecho inicial de uma linha compensada, sem o dispositivo MOV. O comportamento das tensões e correntes trifásicas para este tipo de falta pode ser visto na Figura 7.2 a seguir. Observa-se que as tensões apresentam reversão durante os primeiros ciclos enquanto que as correntes oscilam.

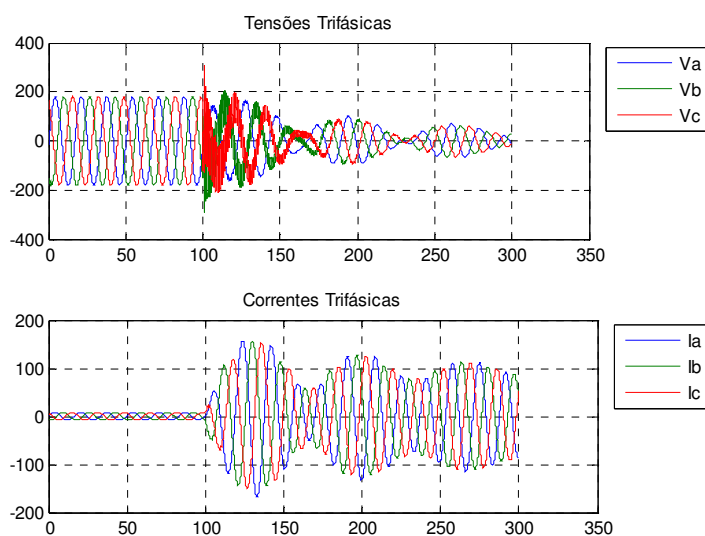


Figura 7.2: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV

Para este tipo de falta, a impedância final esperada é na verdade um valor de reatância negativa, uma vez que a impedância da linha até o ponto de falta é menor do que o valor da reatância capacitiva do banco de capacitores. Em outras palavras,

$$X_{Lf} = j66,12 \times 25\% = j16,5\Omega \quad \text{reatância da linha até o ponto de falta}$$

$$X_C = -j19,84\Omega \quad \text{reatância do capacitor no extremo de linha}$$

$$X_F = X_{Lf} + X_C = -j3,34\Omega \quad \text{reatância total até o ponto de falta}$$

Em valores secundários, temos:

$$X_F = X_{Lf} + X_C = -j3,34\Omega \times (\text{RTC/RTP}) = -j0,4\Omega$$

A Figura 7.3 apresenta o resultado da trajetória de impedância para esta falta.

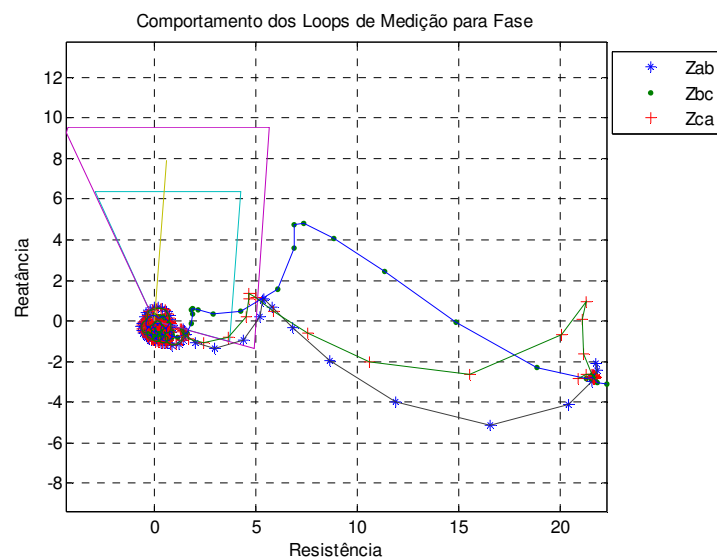


Figura 7.3: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV

O algoritmo de impedância calcula corretamente o valor final de impedância, porém observa-se que existe um transitório acentuado durante a convergência da impedância ao seu valor final.

Adicionalmente, observa-se que o algoritmo interpreta que a falta ocorreu de maneira reversa, ou seja, a falta que ocorreu a 25% do trecho da linha é considerada como sendo fora do trecho sob proteção, na direção reversa, tendo em vista o valor de reatância capacitiva proveniente do banco de capacitor série. Uma ampliação da Figura 7.3 é apresentada pela Figura 7.4 para melhor visualização do transitório.

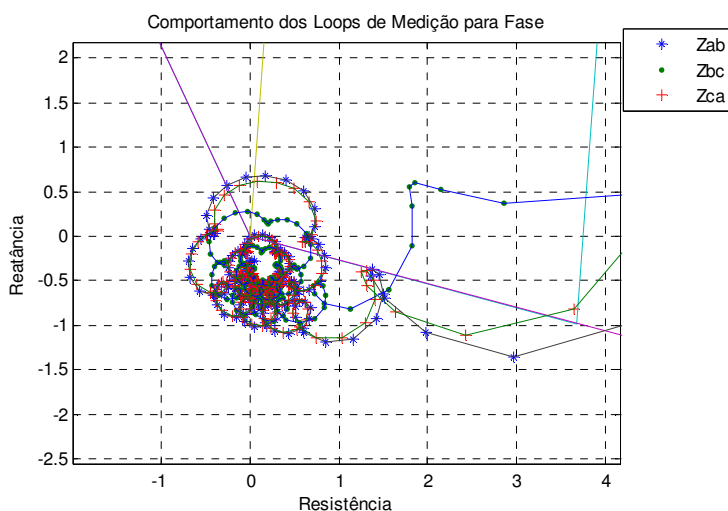


Figura 7.4: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV, ampliação

O algoritmo de impedância baseado no modelo de equação diferencial também apresenta dificuldade no cálculo do valor da impedância, uma vez que seu modelo não considera as capacitâncias em derivação e/ou em série da linha, conforme pode ser observado pela Figura 7.5 e sua ampliação apresentada na Figura 7.6.

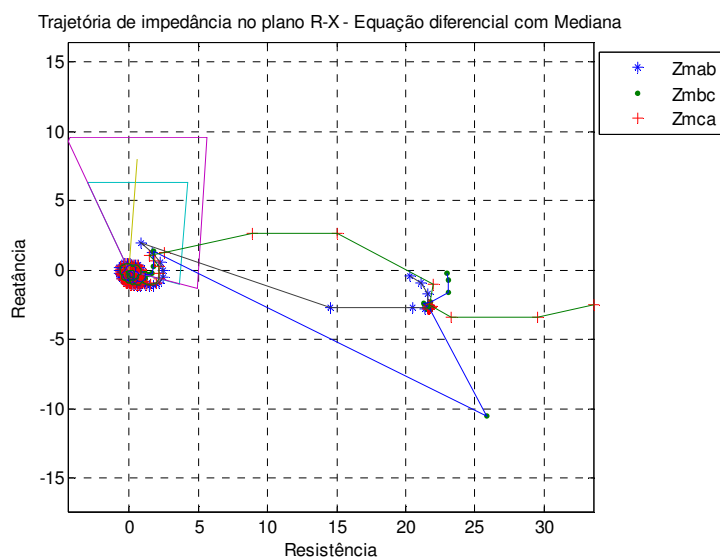


Figura 7.5: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV

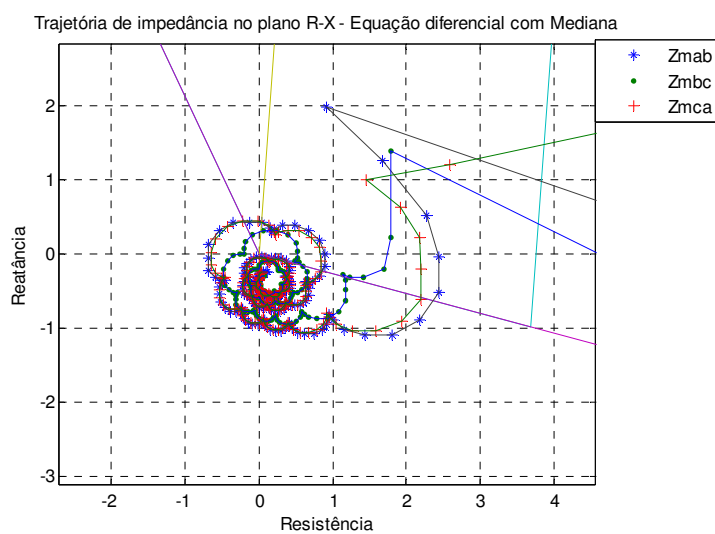


Figura 7.6: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV, ampliação

Para o algoritmo diferencial de linha, a oscilação de corrente devido à influência do capacitor série irá resultar também numa maior oscilação do valor da corrente diferencial, o que pode ser observado pelo comportamento das amostras de corrente do elemento diferencial no plano cartesiano, Figura 7.7.

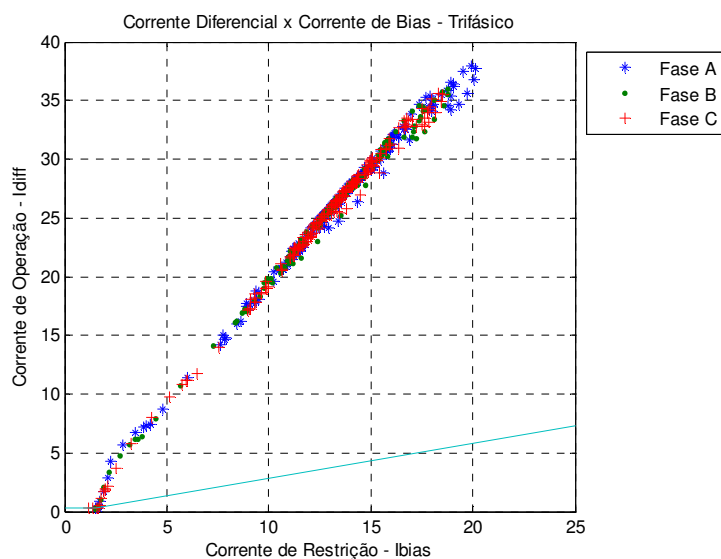


Figura 7.7: Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV

No entanto, o algoritmo não tem dificuldade em identificar a falta como sendo interna, e deverá atuar corretamente, principalmente pelo fato dos capacitores aumentarem o valor da corrente de curto circuito e conseqüentemente o valor da corrente diferencial. Resultado semelhante é visualizado na Figura 7.8 para o plano alfa.

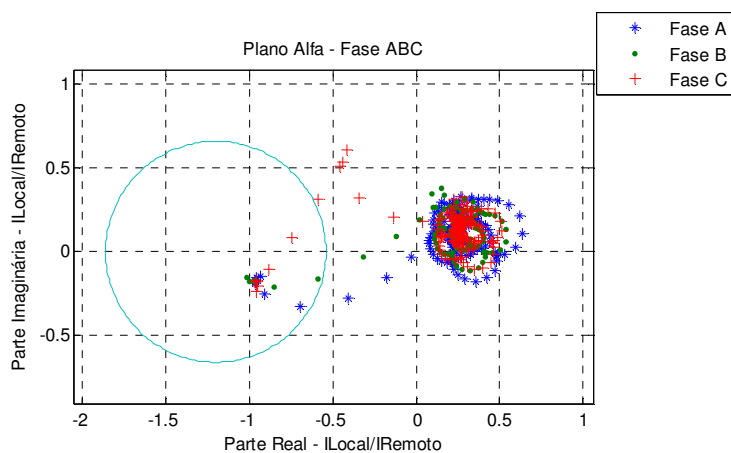


Figura 7.8: Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 0\Omega$, sem MOV

A Figura 7.9 apresenta o resultado da trajetória de impedância para a falta localizada a 25%, porém com um valor de $R_f = 10\Omega$, para o algoritmo de Fourier de ciclo completo. Observa-se que a convergência em torno do ponto final é menos acentuada, porém o algoritmo continua com dificuldade em identificar a falta como sendo interna, na direção para frente.

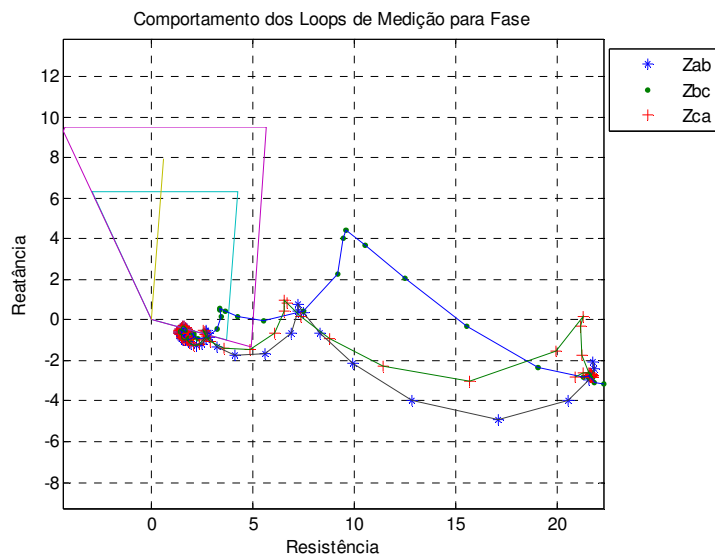


Figura 7.9: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV

Resultado semelhante é obtido para o algoritmo de equação diferencial.

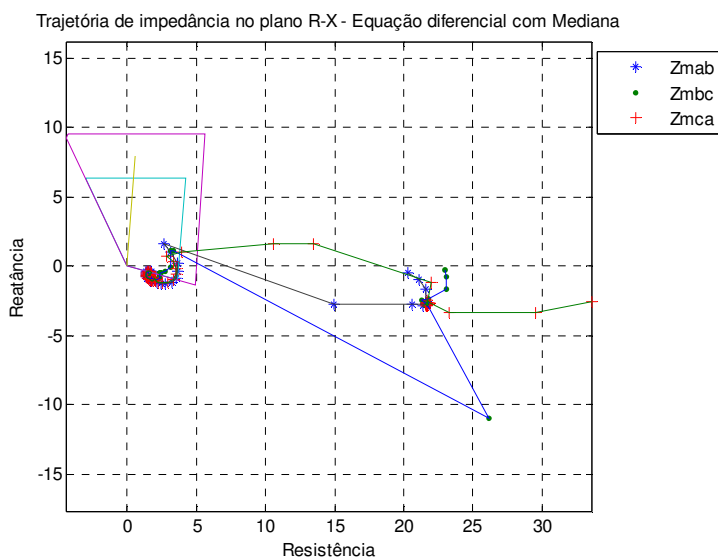


Figura 7.10: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV

Através das Figuras 7.11 e 7.12 observa-se que mesmo com a compensação série e o elevado valor resistivo de falta os algoritmos diferenciais de linha continuam a apresentar boa performance.

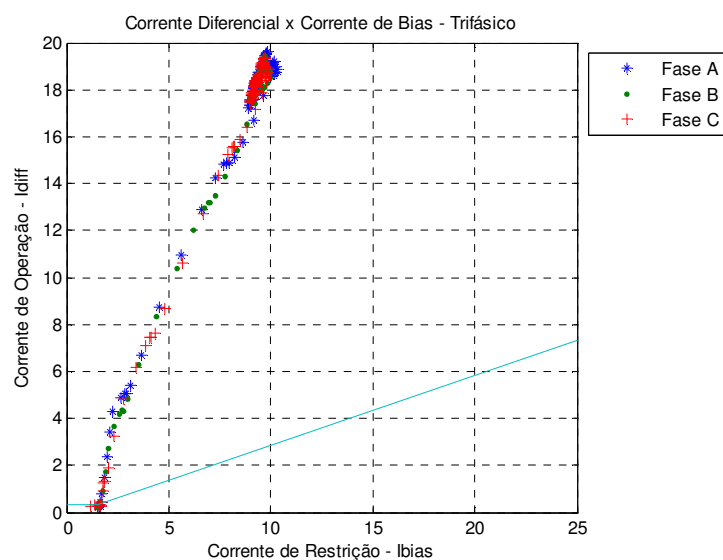


Figura 7.11: Diferencial plano cartesiano, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV

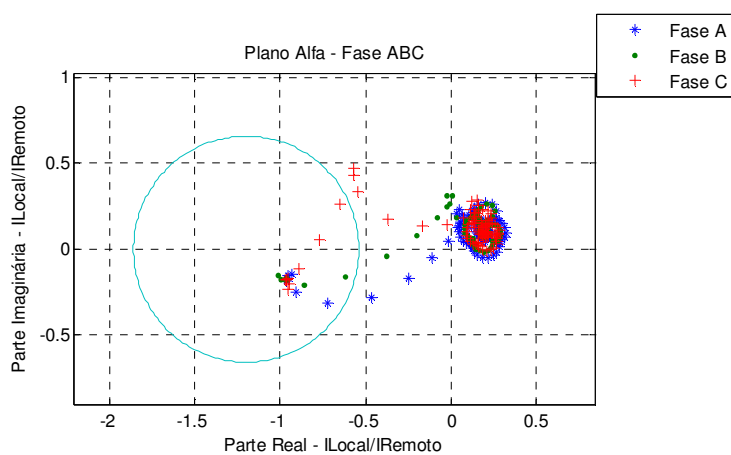


Figura 7.12: Diferencial plano alfa, 25%, $R_f = 10\Omega$, sem MOV

As faltas anteriores foram analisadas para o modelo do capacitor sem o MOV. A análise que segue é feita com um modelo melhorado, levando-se em consideração a influência da não linearidade do MOV na medição imposta aos algoritmos de proteção.

A presença do MOV no circuito do capacitor série diminui a oscilação de corrente e tensão após a ocorrência da falta, conforme pode ser observado pela comparação das Figuras 7.2 e 7.13, o que tem influência direta no cálculo da impedância, que também oscila menos no ponto de convergência da impedância de falta, Figuras 7.3 e 7.14.

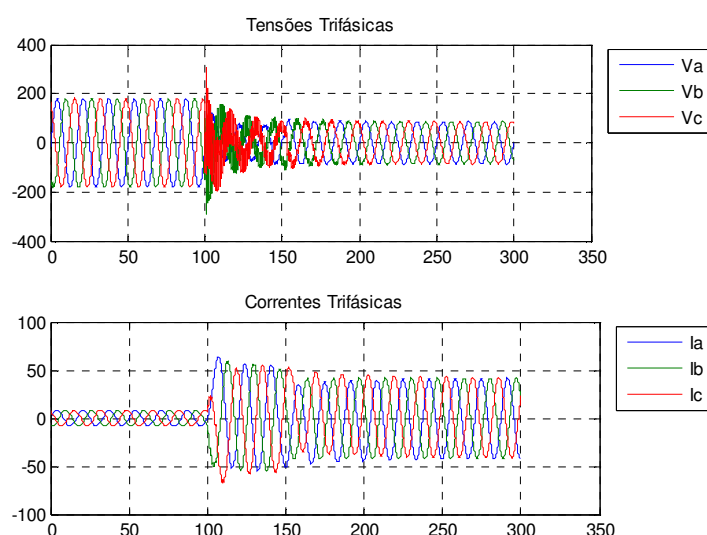


Figura 7.13: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, $R_f = 0\Omega$

Através das Figuras 7.14 e 7.15 pode ser observado que o aumento da tensão entre os terminais do capacitor ocasiona o disparo do Spark Gap. Durante o período em que circula a corrente de falta pelo capacitor existe a condução do dispositivo MOV, que absorve parte da sobretensão sobre o capacitor. Neste instante, o algoritmo numérico deve calcular a impedância equivalente da linha de transmissão com a influência do dispositivo MOV, conforme apresentado no item 4.9.

A energia integrada ao longo do curto intervalo de tempo em que a falta permanece ocasiona o disparo do Spark Gap, Figura 7.18, que então retira de operação tanto o capacitor série quanto o dispositivo MOV. Após o disparo deste

dispositivo, com a eliminação do capacitor série e do dispositivo MOV, a impedância final de falta é a impedância que seria obtida para uma falta em um sistema não compensado. Portanto, havendo o disparo do Spark Gap a impedância calculada deve convergir para um ponto sobre a linha de transmissão, localizando a falta em 25% do trecho da linha.

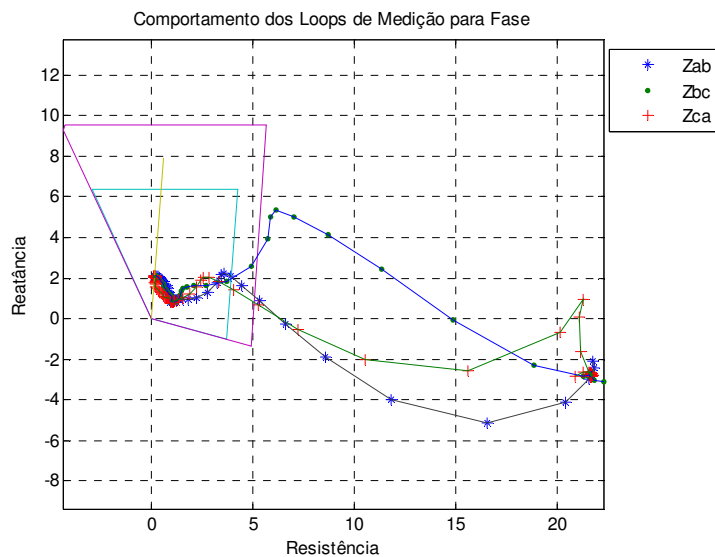


Figura 7.14: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$

A Figura 7.15 permite uma melhor visualização da Figura 7.14.

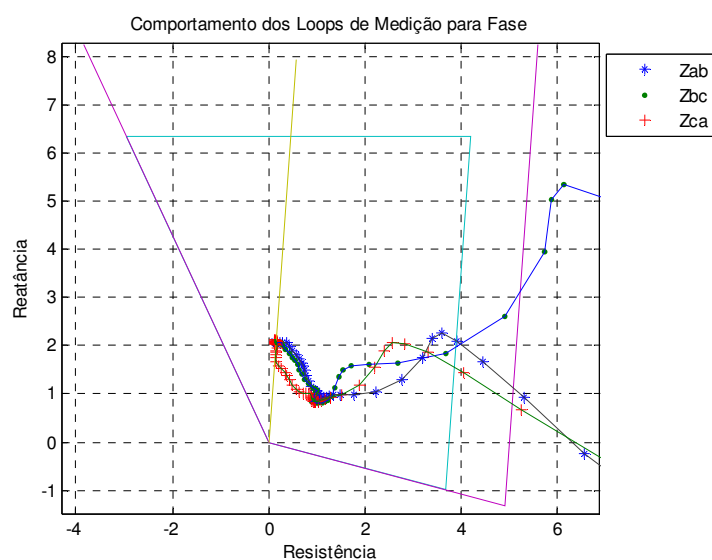


Figura 7.15: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, ampliação

Este fato ocorre, como esperado, também para o monitoramento através do algoritmo baseado em equação diferencial, uma vez que o acionamento do Spark Gap é intrínscio à proteção do banco de capacitor, Figura 7.16.

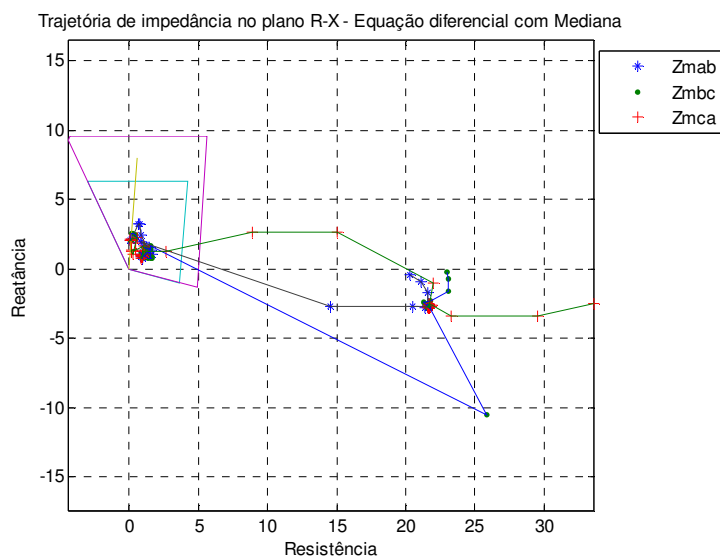


Figura 7.16: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$

Ampliando a figura anterior, tem-se a Figura 7.17.

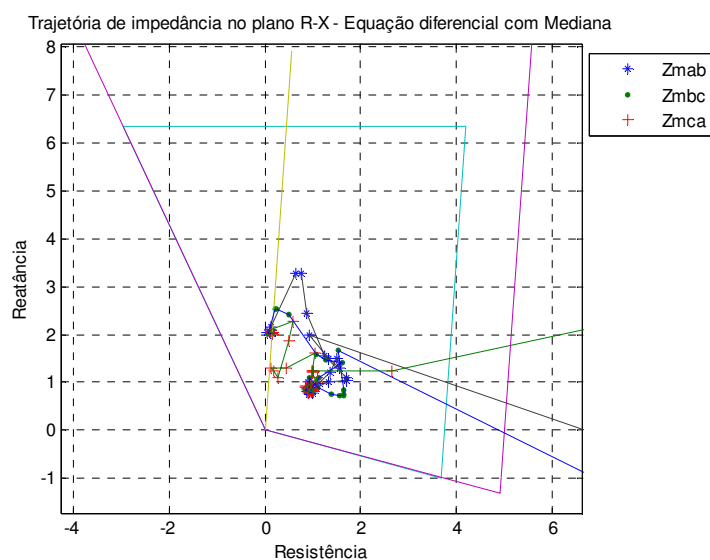


Figura 7.17: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$, ampliação

A Figura 7.18 permite visualizar o comportamento do MOV para a falta a 25% do trecho da linha sem resistência de falta. Observa-se que na ocorrência da falta a tensão sobre o capacitor, e conseqüentemente sobre o MOV, rapidamente se eleva causando a condução do MOV. No entanto, a energia sobre o MOV atinge seu limite de proteção e o Spark Gap dispara a fim de prover proteção ao circuito.

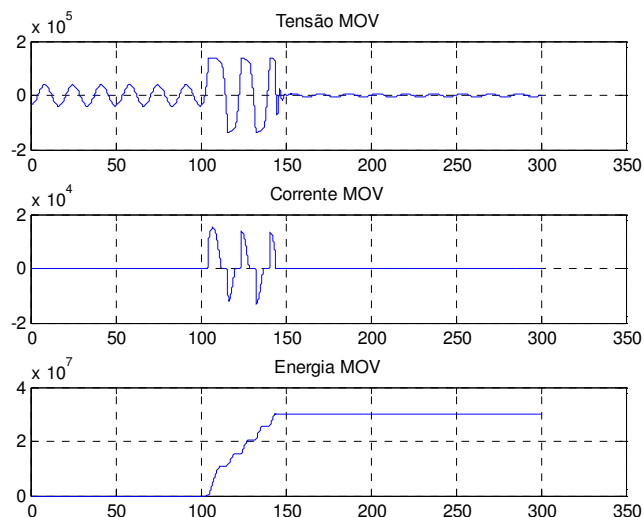


Figura 7.18: Comportamento do MOV, 25%, $R_f = 0\Omega$

Para a falta com resistência 10Ω um efeito equivalente pode ser observado.

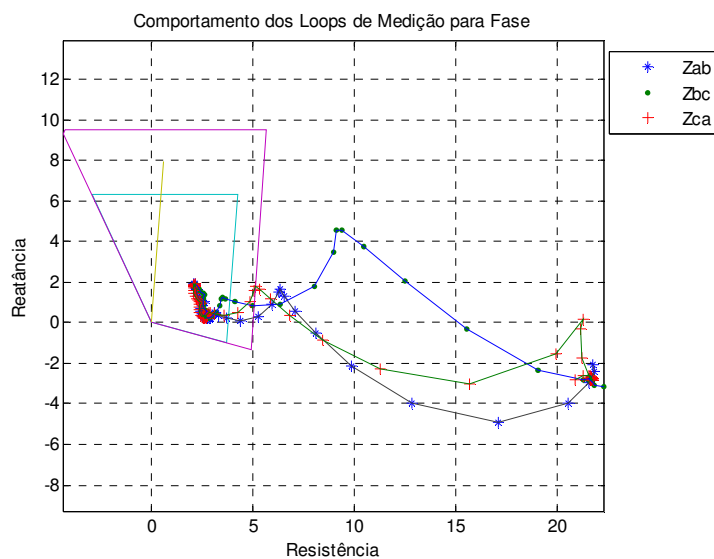


Figura 7.19: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$

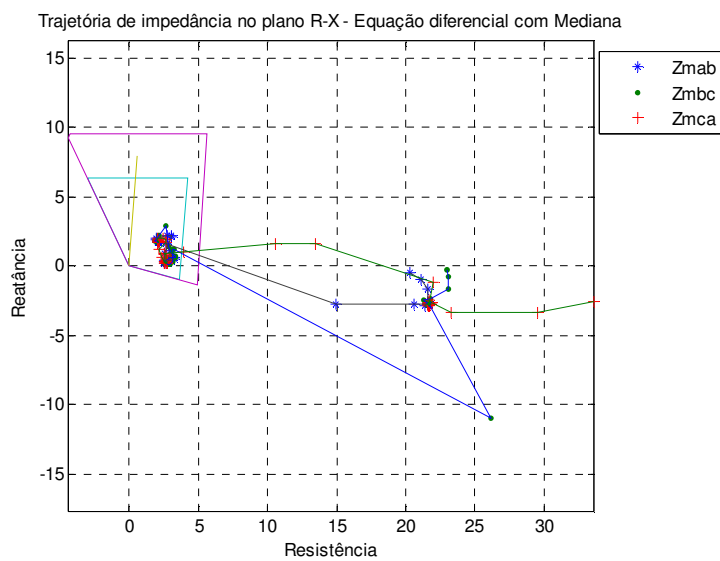


Figura 7.20: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$

A Figura 7.21 permite observar que a presença da resistência de falta altera o comportamento da sobretensão sobre o MOV, causando uma latência maior na atuação do Spark Gap.

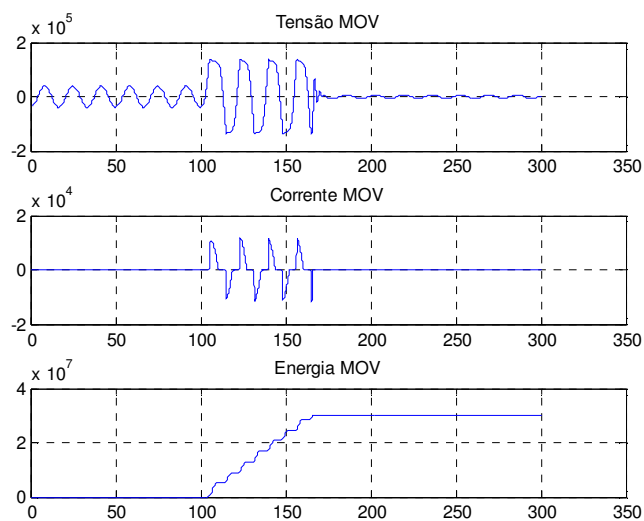


Figura 7.21: Comportamento do MOV, 25%, $R_f = 10\Omega$

7.2.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha

Na medida em que a falta se desloca para um ponto mais remoto em relação ao ponto de medição do relé o nível de corrente diminui e a influência do MOV e do Spark Gap é menos acentuada.

As Figuras 7.22 e 7.23 permitem observar que a impedância calculada para uma falta a 75% apresenta um comportamento bastante distinto em relação ao observado nas figuras que representam a falta em 25% do trecho de linha.

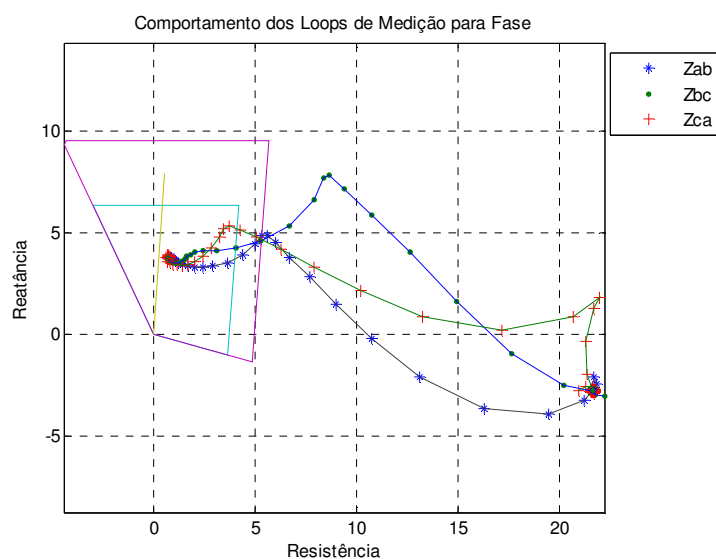


Figura 7.22: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$

A Figura 7.23, que é ampliada, mostra que a impedância final calculada pelo algoritmo numérico converge para um ponto próximo à metade do valor de impedância total da linha, porém com pequena influência do dispositivo MOV e sem o disparo do Spark Gap.

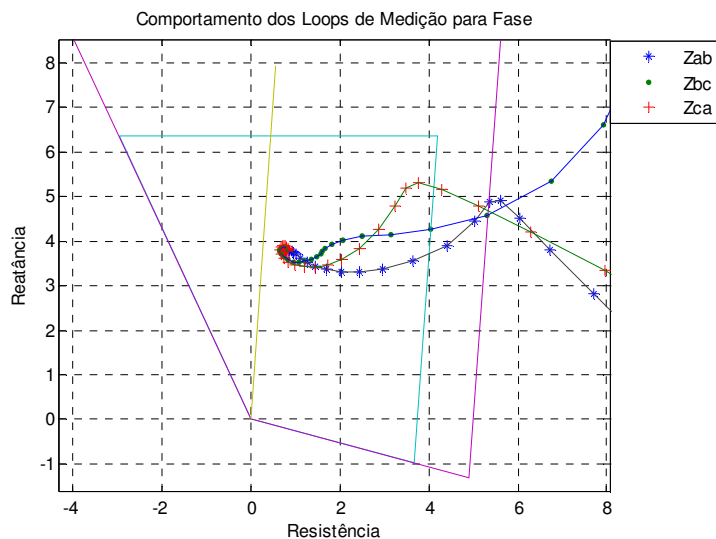


Figura 7.23: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$, ampliação

A Figura 7.24 apresenta o resultado para o algoritmo de equação diferencial, enquanto que a Figura 7.25 mostra que o dispositivo MOV conduz sem o disparo do Spark Gap.

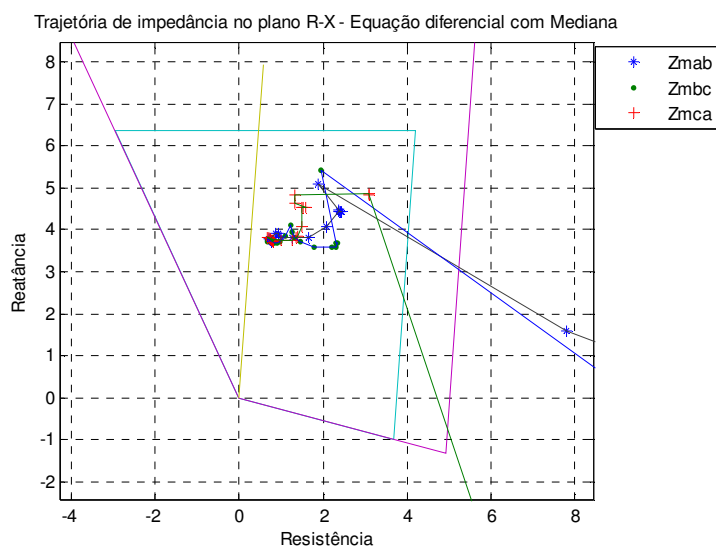


Figura 7.24: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$

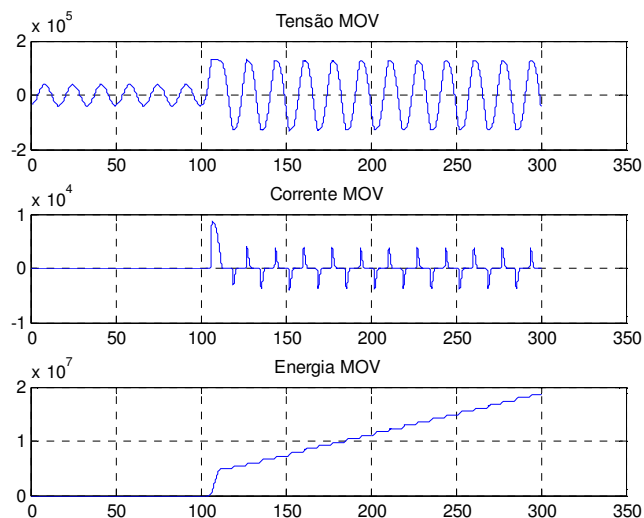


Figura 7.25: Comportamento do MOV, 75%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência de falta, tem-se os resultados apresentados pelas Figuras 7.26 e 7.27:

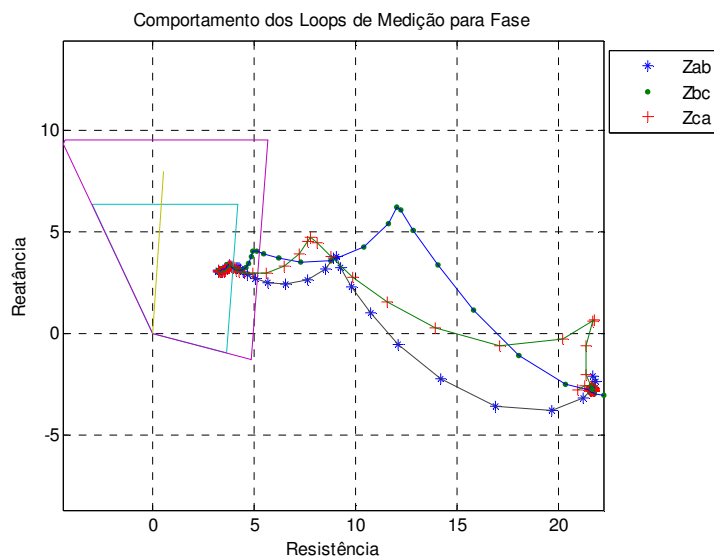


Figura 7.26: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$

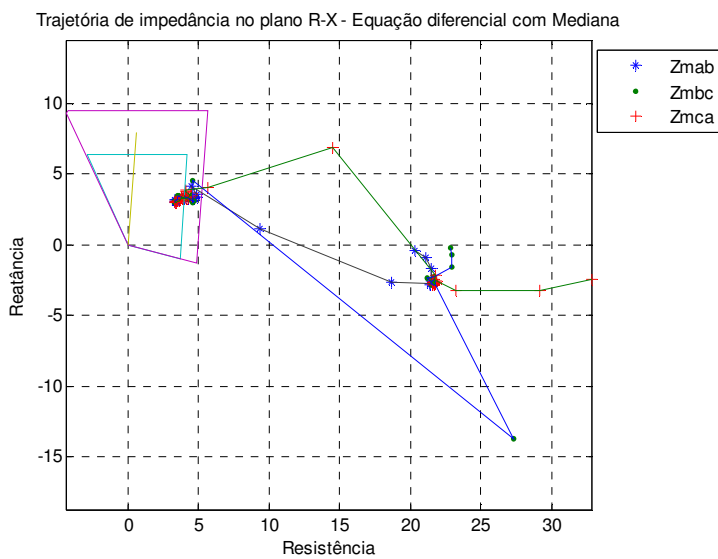


Figura 7.27: Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$

Para os algoritmos de proteção diferencial de linha é simulada a condição de falta a 50% do trecho de linha, conforme as Figuras 7.28 a 7.31.

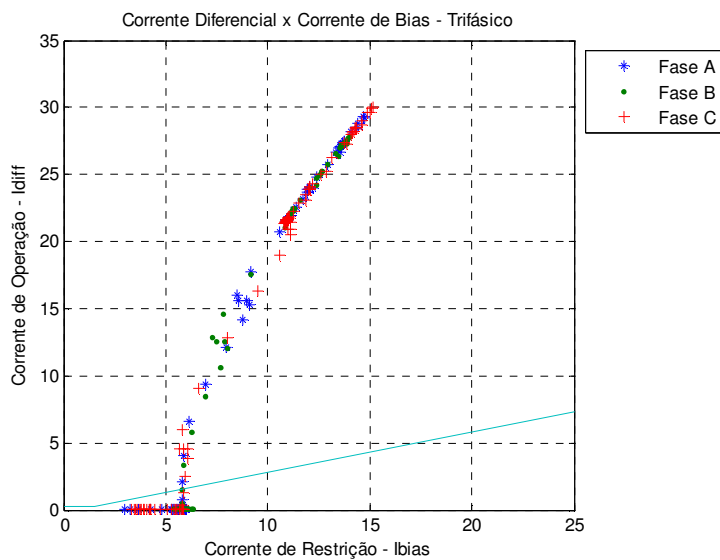


Figura 7.28: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 0\Omega$

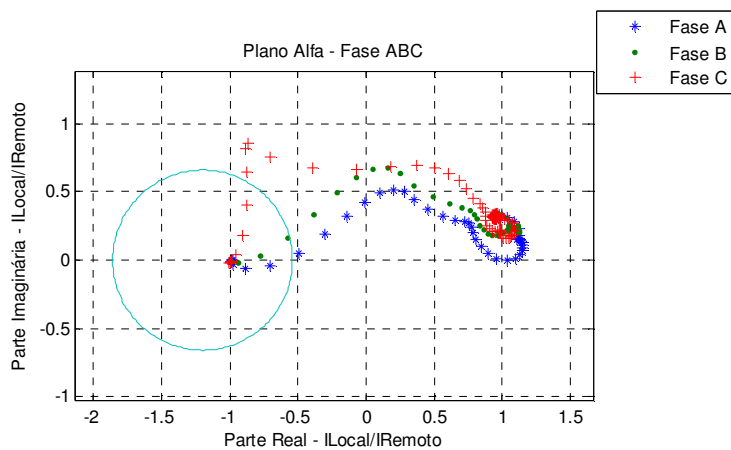


Figura 7.29: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência de falta, tem-se:

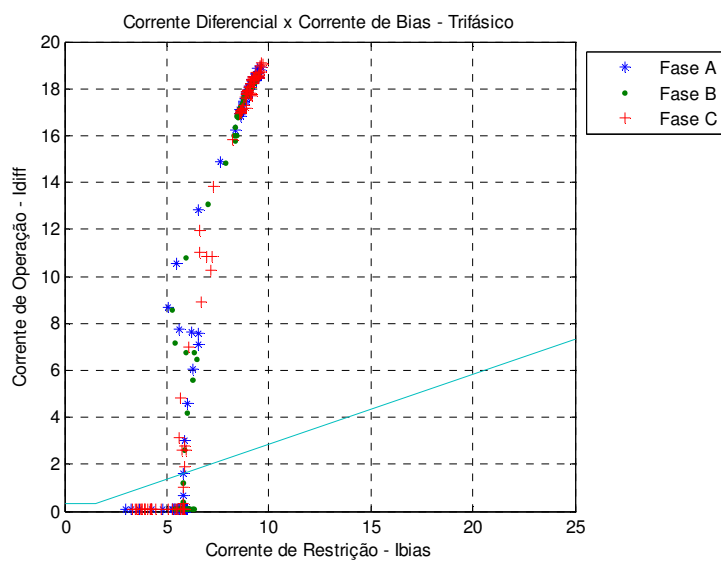


Figura 7.30: Diferencial plano cartesiano, 50%, $R_f = 10\Omega$

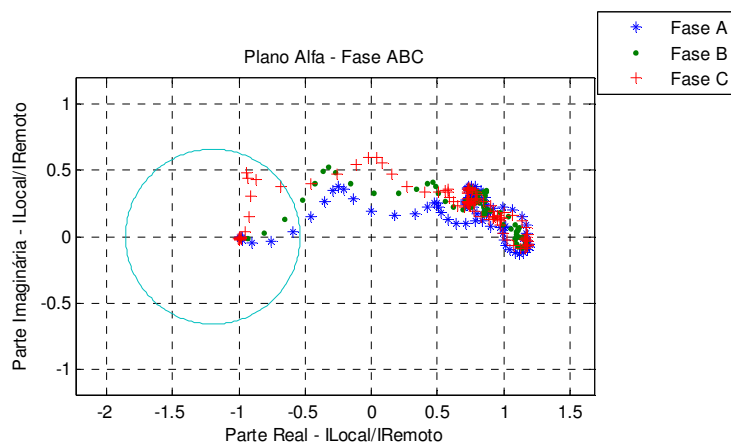


Figura 7.31: Diferencial plano alfa, 50%, $R_f = 10\Omega$

7.2.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha

Para este tipo de falta duas condições serão analisadas para o melhor entendimento da dinâmica do sistema e da influência que a posição da falta exerce sobre os algoritmos de proteção, principalmente para a função de impedância.

Em particular, serão avaliadas faltas que ocorrem a partir da Barra A em uma posição imediatamente anterior ao capacitor remoto, ou seja, o capacitor mais próximo à Barra B, e imediatamente posterior ao mesmo capacitor.

Para a falta imediatamente anterior ao capacitor o relé de distância que se encontra na Barra A não terá a capacitância do capacitor remoto inclusa em seu loop de medição, porém para a falta imediatamente posterior ao capacitor este capacitor passa a influenciar a medição do relé de distância. A Figura 7.32 ilustra os casos a serem simulados.

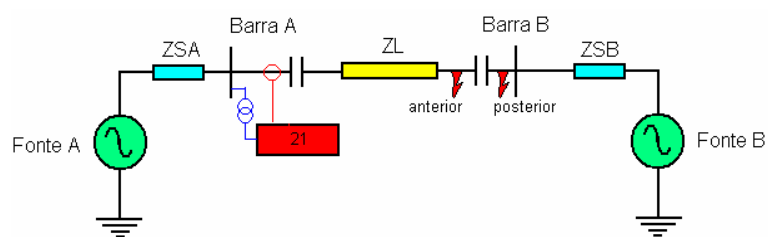


Figura 7.32: Modelo simplificado de sistema de potência

7.2.1.3.1 Falta imediatamente anterior ao capacitor

Neste tipo de falta, o relé de distância terá a sua frente toda a impedância da linha, adicionada ao valor do capacitor série instalado próximo ao próprio relé. Desta forma, o valor da impedância final é a soma destes dois valores, resultando que o valor final incide dentro da Zona 1. Como resultado, o ajuste de Zona 1 deve ser tipicamente reduzido para evitar este sobrealcance, Figuras 7.33 e 7.34.

7.2.1.3.2 Falta imediatamente posterior ao capacitor

O resultado é drasticamente alterado para faltas que ocorrem neste ponto, quando então a impedância medida pelo relé de distância passa a ser a impedância total da linha somada aos dois valores dos capacitores instalados nos extremos da linha. Assim, apesar da falta ser externa ao trecho de linha, o resultado final é praticamente menor que a metade do valor da impedância da linha, o que significa que o relé deverá atuar em Zona 1 se os ajustes não forem modificados apropriadamente, ou outros esquemas não forem tomados para se evitar este problema, Figuras 7.35 e 7.36.

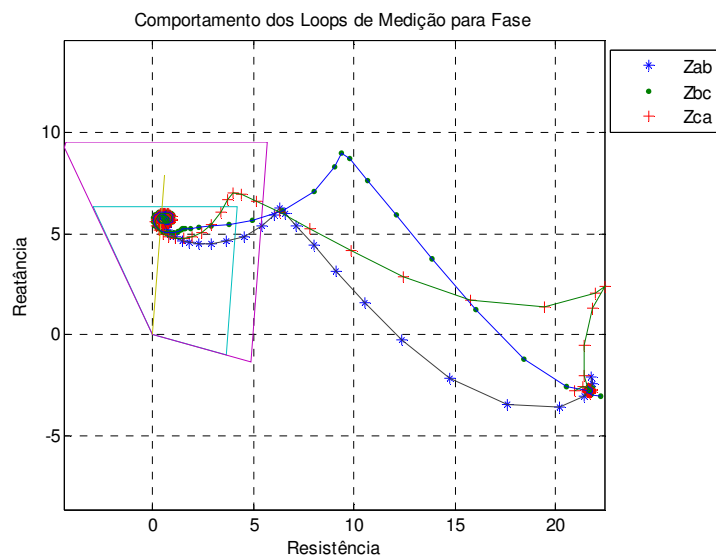


Figura 7.33: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor

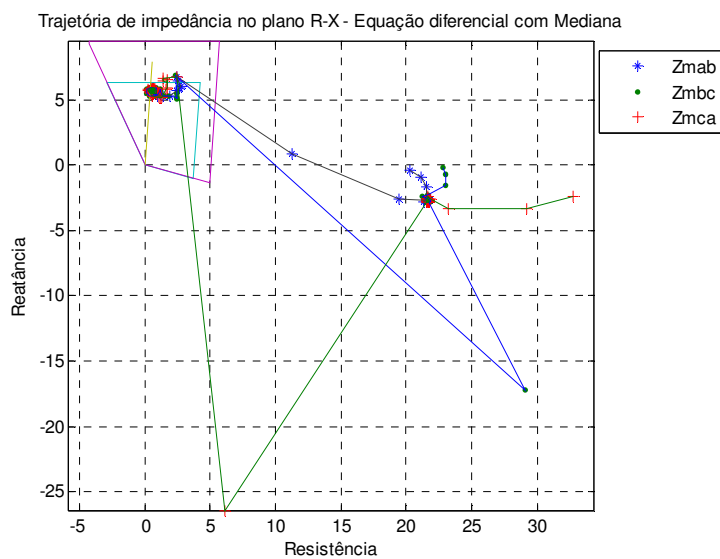


Figura 7.34: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor

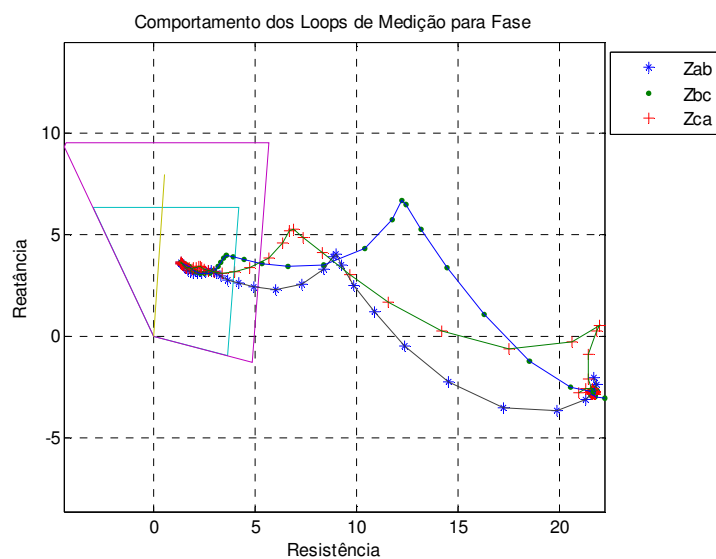


Figura 7.35: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor

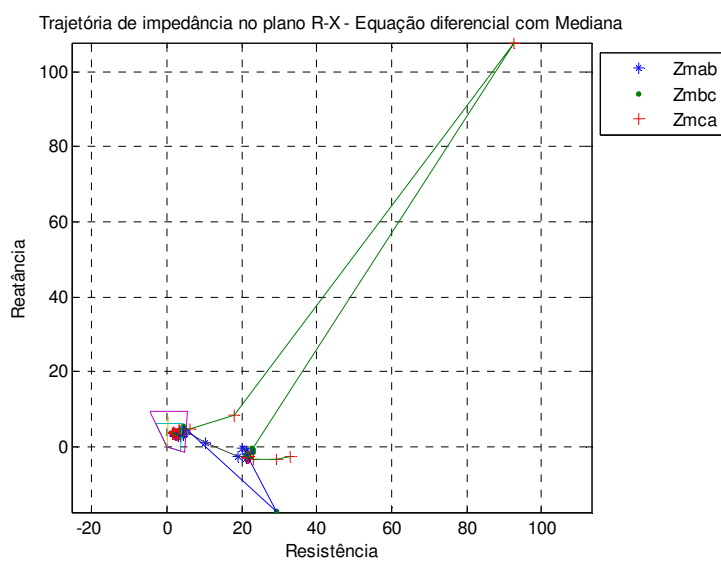


Figura 7.36: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor

Para uma falta imediatamente posterior ao capacitor série no terminal remoto há a atuação do MOV, conforme Figura 7.37, uma vez que o capacitor série remoto é incluso no circuito, e no loop de medição do relé, diminuindo a reatância indutiva total. No entanto, observa-se ainda, que esta falta não é suficiente para ocasionar o disparo do Spark Gap.

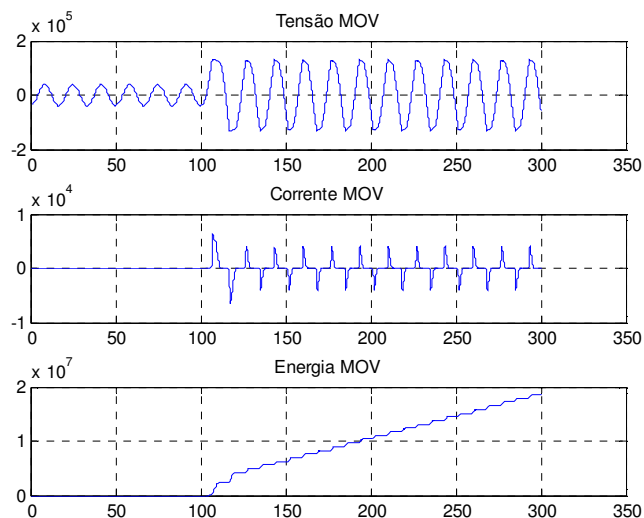


Figura 7.37: Comportamento do MOV, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor

A seguir é feita a análise do comportamento da proteção diferencial de linha para as mesmas condições de falta, ou seja, imediatamente anterior ao capacitor e imediatamente posterior ao capacitor, adicionando-se um caso de falta externa à zona de proteção diferencial para verificação da estabilidade do esquema de proteção.

As Figuras 7.38 e 7.39 apresentam os resultados para a falta antes do capacitor, na região interna de operação do elemento diferencial.

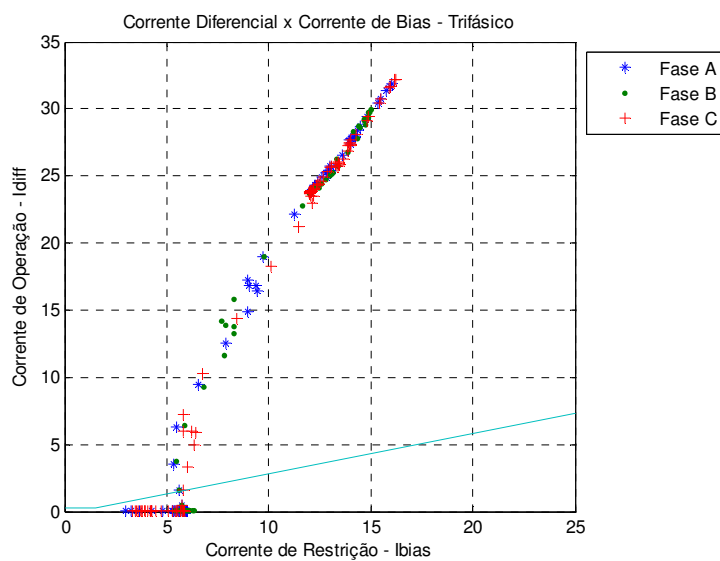


Figura 7.38: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor

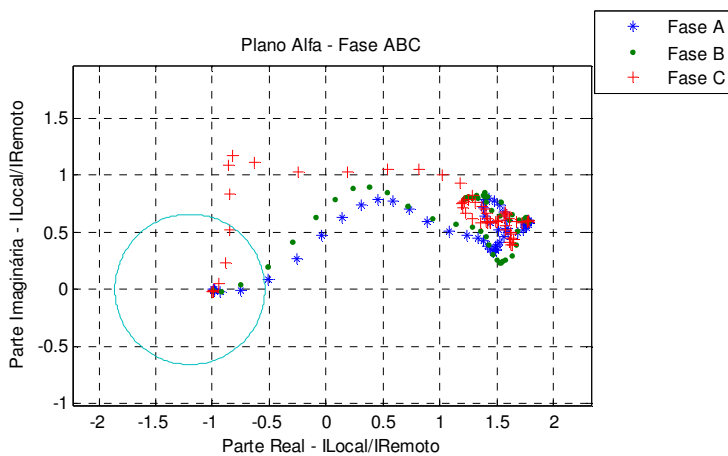


Figura 7.39: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, anterior ao capacitor

As Figuras 7.40 e 7.41 apresentam os resultados para a falta depois do capacitor, na região interna de operação do elemento diferencial.

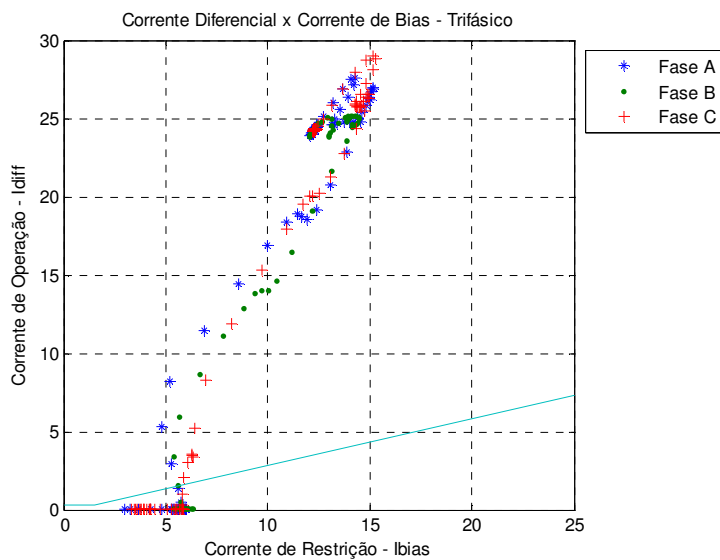


Figura 7.40: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor

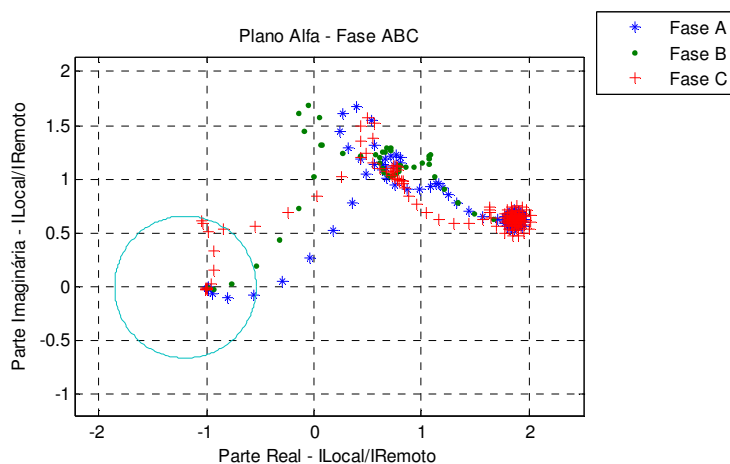


Figura 7.41: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, posterior ao capacitor

As Figuras 7.42 e 7.43 apresentam os resultados para a falta depois do capacitor, na região externa de operação do elemento diferencial. Pode ser observado que ambos os métodos demonstram a boa estabilidade do algoritmo diferencial

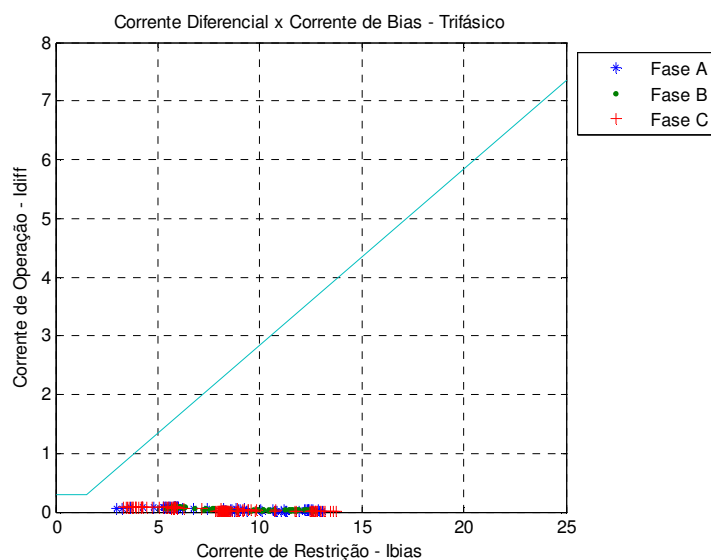


Figura 7.42: Diferencial plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa

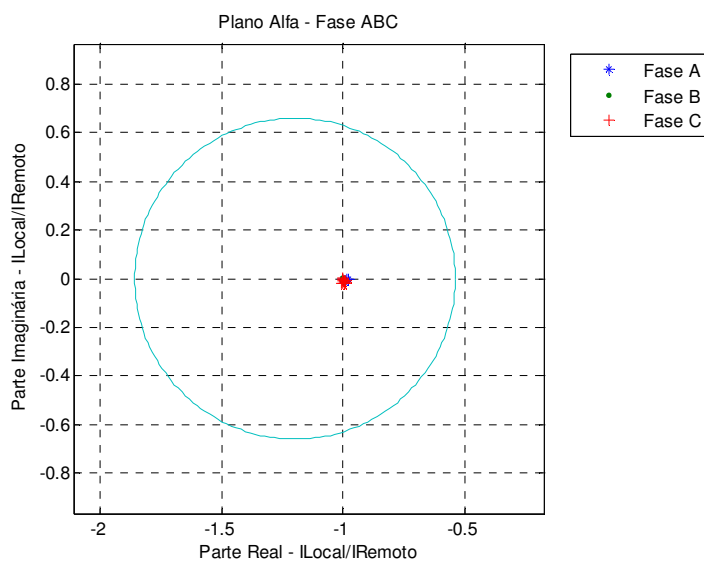


Figura 7.43: Diferencial plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa

7.2.2 Análise de Faltas Monofásicas

7.2.2.1 Faltas a 25% do trecho da linha

Novamente para este tipo de falta, ou seja, monofásica, torna-se interessante a avaliação dos loops tanto de terra quanto de fase, e se as medições destes loops irão invadir a região de impedância dos relés de distância. Observou-se para algumas faltas que os loops de fase invadem as zonas de impedância, podendo ocasionar tanto indicação quanto operação indevidas.

A Figura 7.44 evidencia o resultado obtido para o comportamento de loop de terra para a falta monofásica. Para a falta a 25% do trecho de linha nota-se novamente que a sobretensão ocasiona o disparo do Spark Gap e finalmente a impedância calculada pelo algoritmo converge para um valor de impedância relativo a uma linha não compensada.

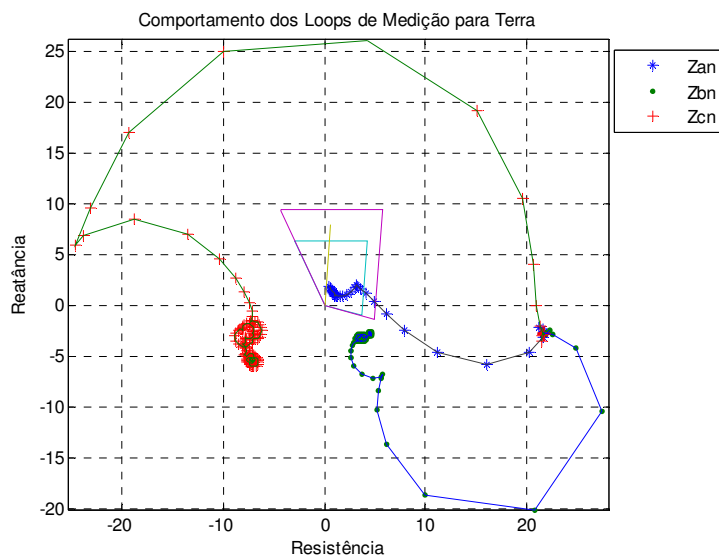


Figura 7.44: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, loop de terra

A Figura 7.45, por outro lado, ilustra um caso típico onde pode ser observado como o loop de medição de fase Zab invade a Zona 1 para uma falta monofásica. Observa-se ainda que esta medição deixa a região definida pela Zona 1 após a atuação do Spark Gap.

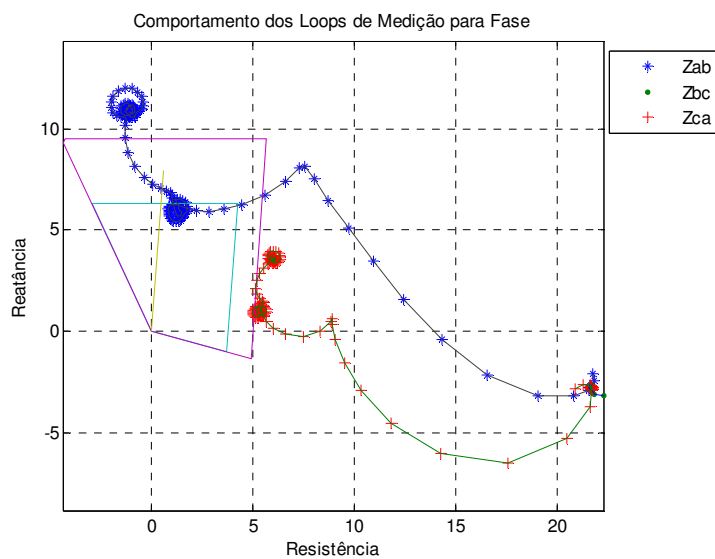


Figura 7.45: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$, loop de fase

Resultados semelhantes são obtidos para o algoritmo baseado no método de equação diferencial, sendo apresentado apenas o resultado para o loop de terra deste algoritmo, Figura 7.46.

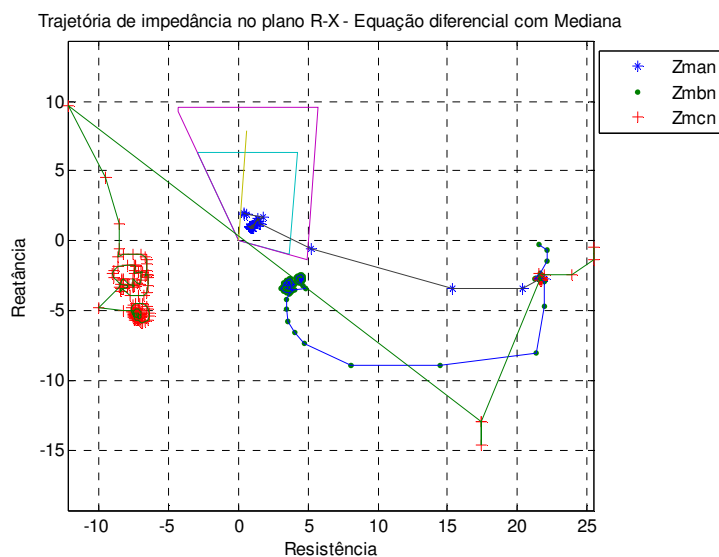


Figura 7.46: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência de falta, tem-se os seguintes comportamentos, Figuras 7.47 e 7.48, para os algoritmos de Fourier ciclo completo e equação diferencial:

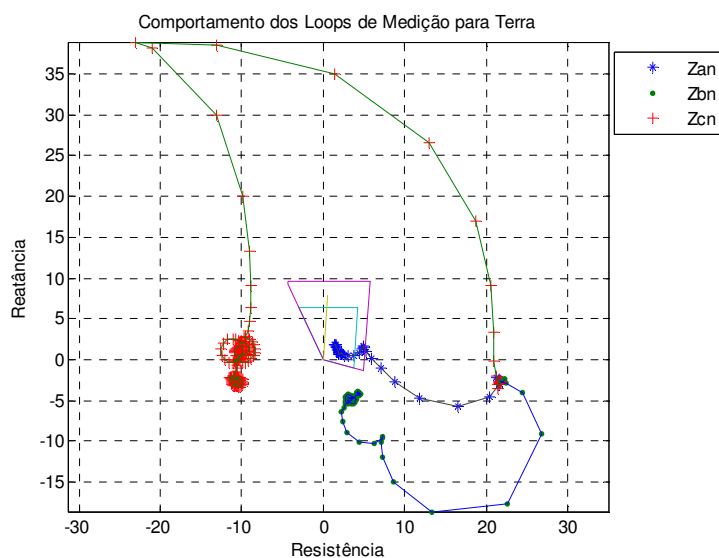


Figura 7.47: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 10\Omega$

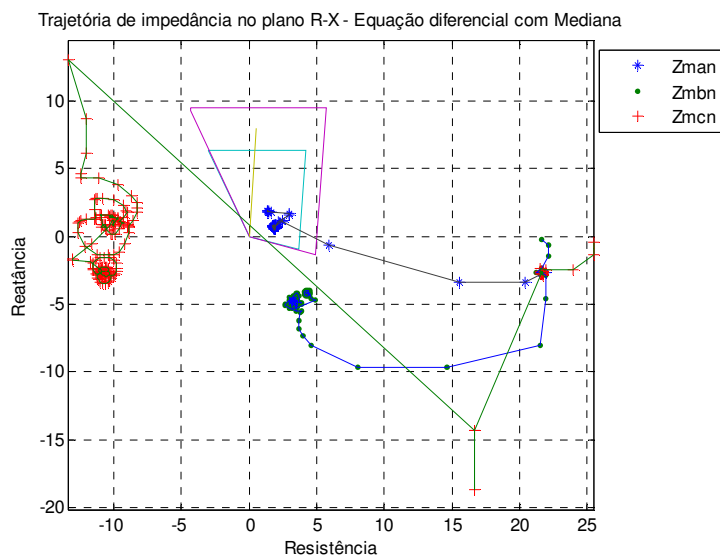


Figura 7.48: Equação diferencial, 25%, $R_f = 10\Omega$

7.2.2.2 Faltas a 75% do trecho da linha

As faltas a 75% do trecho de linha resultam em pouca sobretensão sobre o MOV, que praticamente não conduz, não havendo conseqüentemente também nenhuma atuação do Spark Gap, conforme Figuras 7.49, 7.50, 7.51 e 7.52.

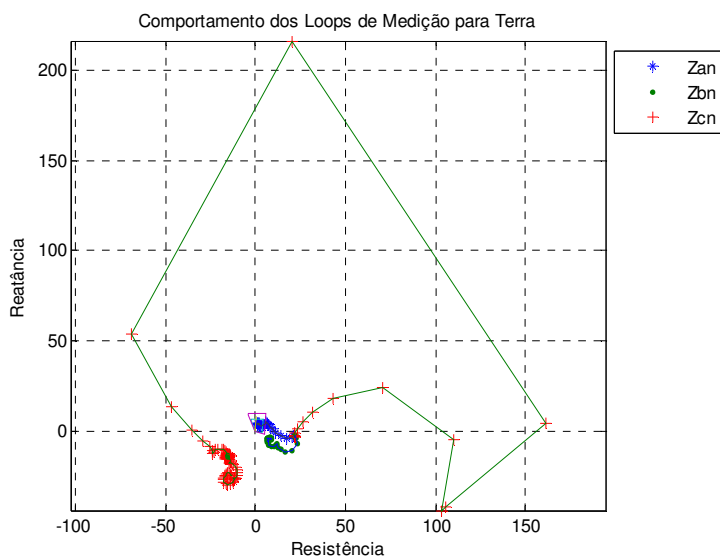


Figura 7.49: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$

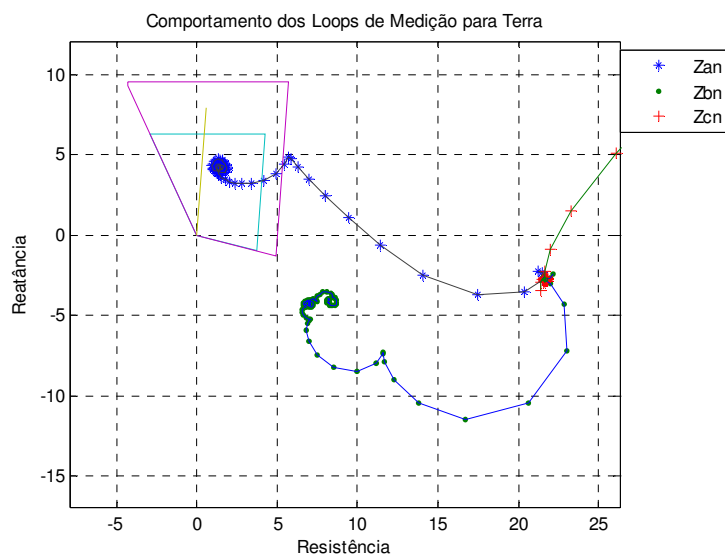


Figura 7.50: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$, ampliação

A Figura 7.51 apresenta o resultado para o algoritmo baseado em equação diferencial.

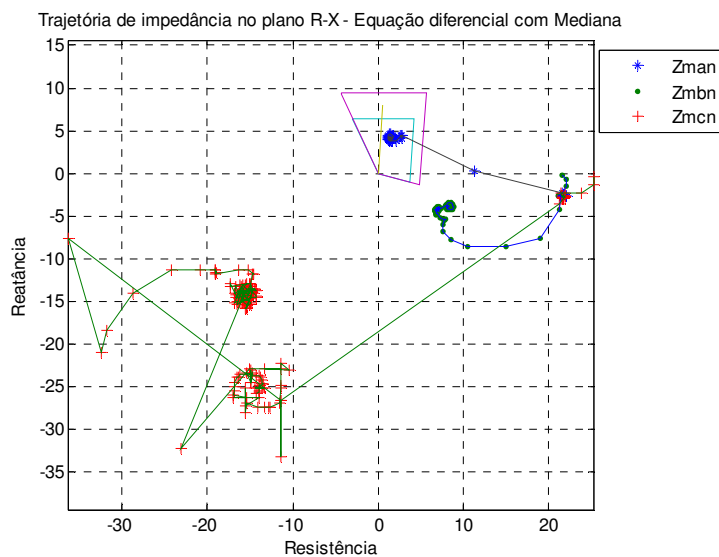


Figura 7.51: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$

A Figura 7.52, por sua vez, demonstra a não condução do MOV para esta falta.

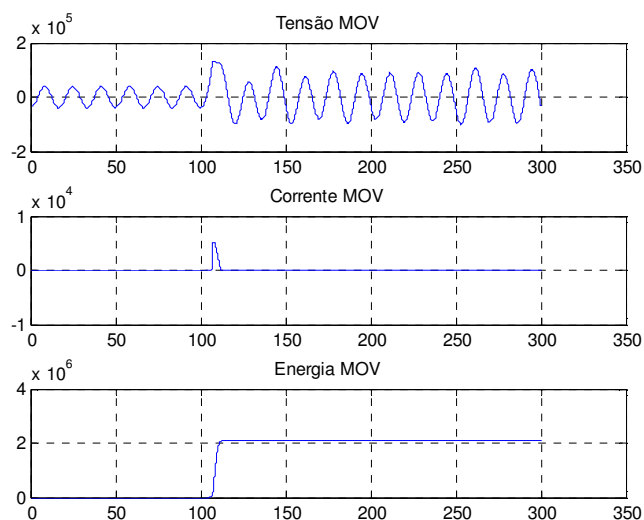


Figura 7.52: Comportamento do MOV, 75%, $R_f = 0\Omega$

Aumentando o valor da resistência de falta tem-se, para os algoritmos de Fourier de ciclo completo e equação diferencial, os seguintes resultados, Figuras 7.53 e 7.54:

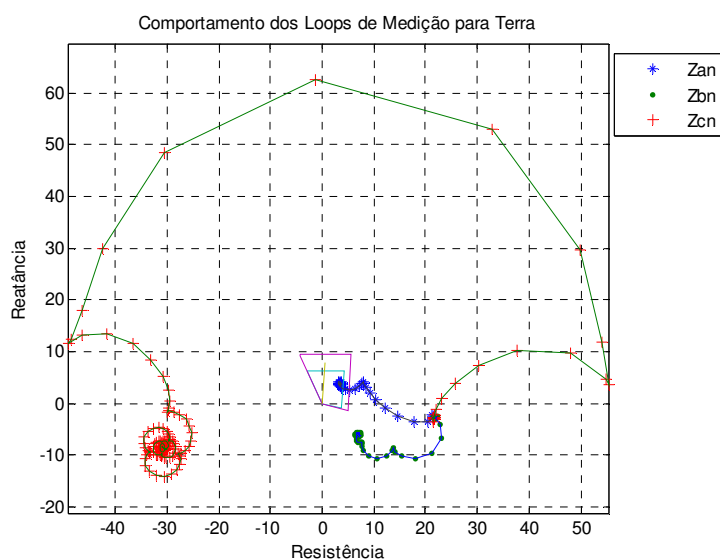


Figura 7.53: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 10\Omega$

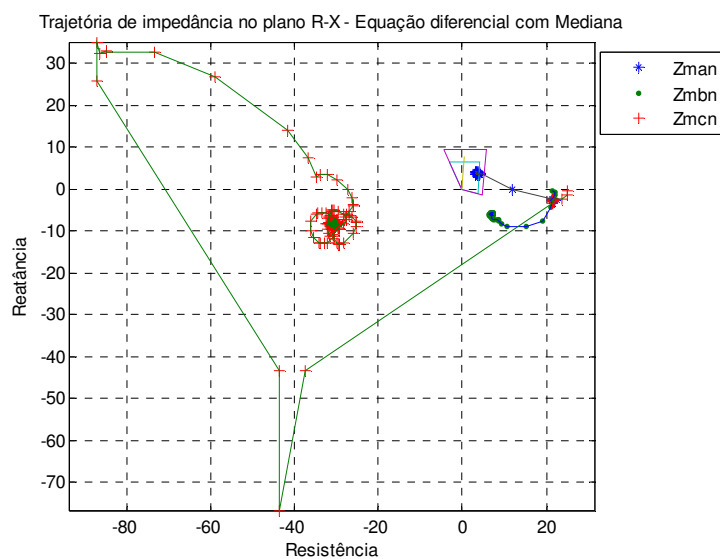


Figura 7.54: Equação diferencial, 75%, $R_f = 10\Omega$

7.2.2.3 Faltas a 100% do trecho da linha

Para este tipo de falta duas condições serão novamente analisadas, ou seja, faltas imediatamente anteriores e posteriores ao capacitor série no terminal remoto, conforme a Figura 7.55.

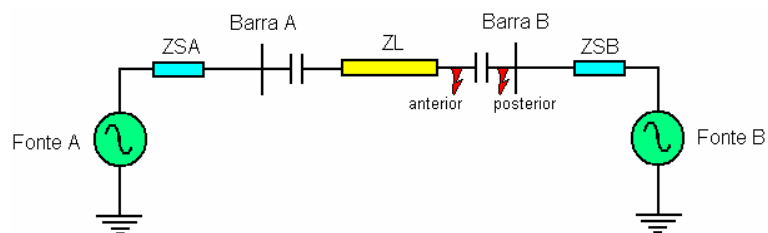


Figura 7.55: Modelo simplificado de sistema de potência

7.2.2.3.1 Falta imediatamente anterior ao capacitor

Para a falta monofásica, o relé de distância terá a sua frente toda a impedância da linha, adicionada ao valor do capacitor série instalado próximo ao próprio relé.

Desta forma, o valor da impedância final é a soma destes dois valores, resultando que o valor final incide dentro da Zona 1. Como resultado, o ajuste de Zona 1 deve ser tipicamente reduzido para evitar este sobrealcance.

7.2.2.3.2 Falta imediatamente posterior ao capacitor

O resultado é drasticamente alterado quando a falta ocorre neste ponto, quando então a impedância medida pelo relé de distância passa a ser a impedância total da linha somada aos dois valores dos capacitores instalados nos extremos da linha. Assim, apesar da falta ser externa ao trecho de linha, o resultado final é praticamente menor que a metade do valor da impedância da linha, o que significa que o relé deverá atuar em Zona 1 se os ajustes não forem modificados apropriadamente.

A Figura 7.56 ilustra inicialmente o comportamento da impedância para o algoritmo baseado na técnica de Fourier de ciclo completo para a falta imediatamente anterior ao capacitor.

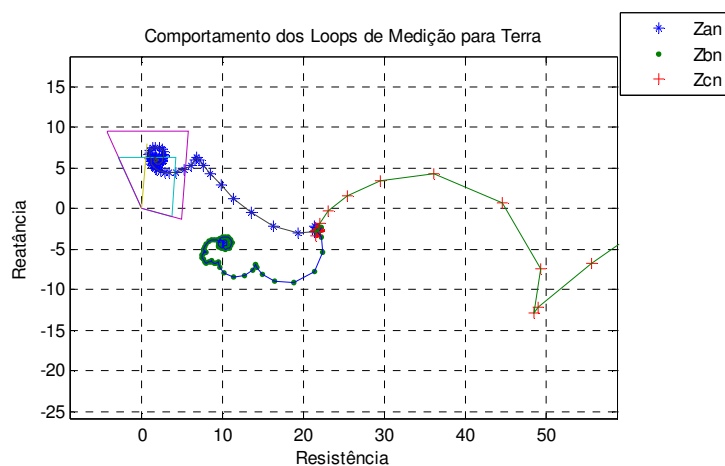


Figura 7.56: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor

A Figura 7.57 ilustra, por sua vez, o comportamento da impedância para o algoritmo de equação diferencial para a falta imediatamente anterior ao capacitor.

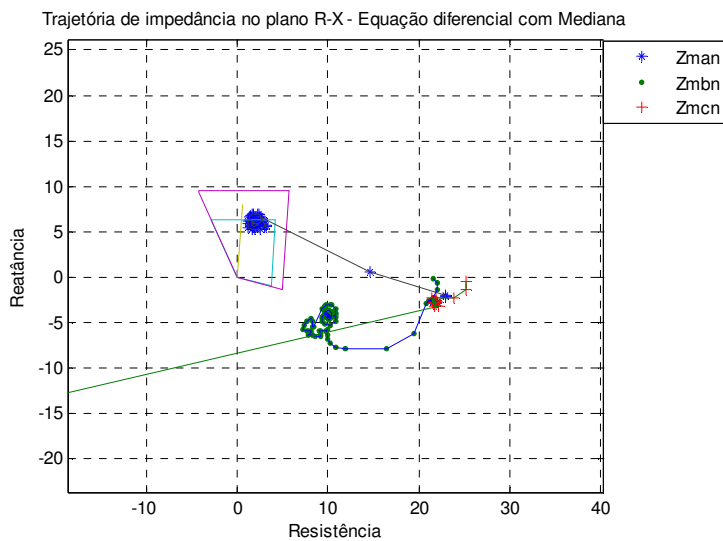


Figura 7.57: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor

Em seguida é verificado o comportamento da impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo para a falta imediatamente posterior ao capacitor, Figura 7.58.

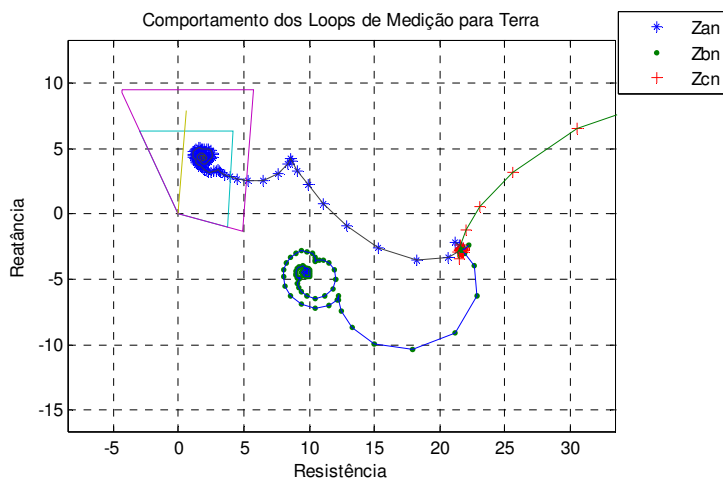


Figura 7.58: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

Enquanto que a Figura 7.59 ilustra o comportamento da impedância para o algoritmo de equação diferencial para a falta imediatamente posterior ao capacitor.

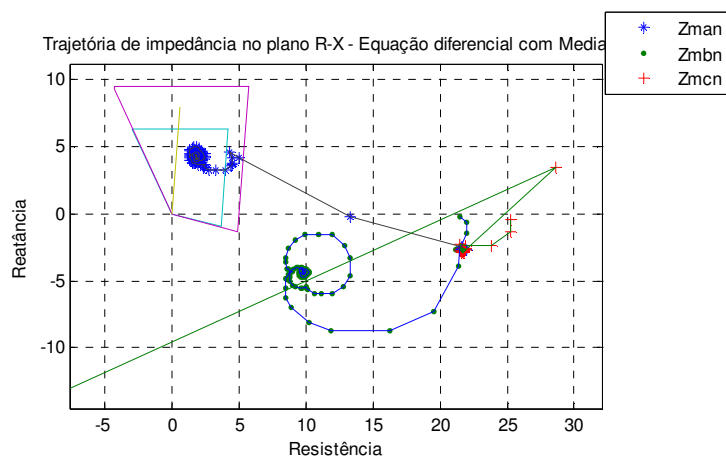


Figura 7.59: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

Para os algoritmos de proteção diferencial de linha serão avaliadas as condições de falta interna, posterior ao capacitor, e falta externa à zona de proteção. Para uma falta interna, porém posterior ao capacitor, o resultado no plano cartesiano pode ser verificado através da Figura 7.60, que comprova a correta operação do elemento diferencial.

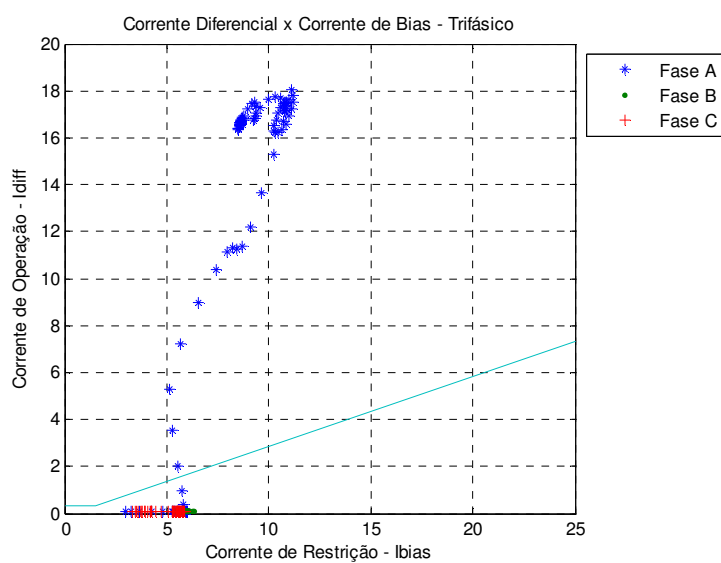


Figura 7.60: Plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

De maneira semelhante, pode-se observar através da Figura 7.61 que a representação no plano alfa da falta interna e posterior ao capacitor é identificada corretamente.

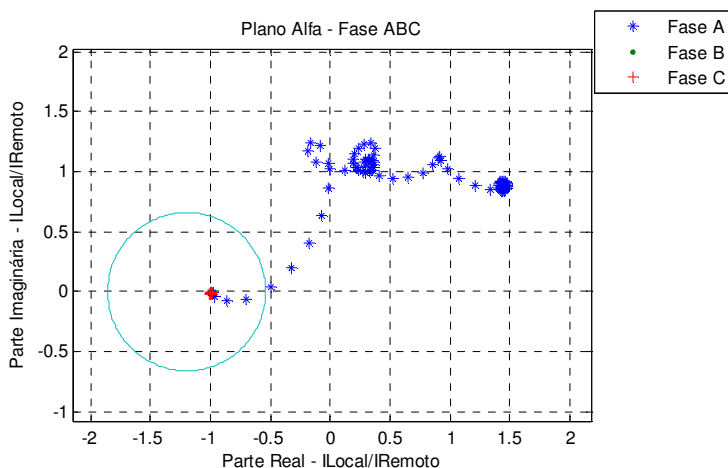


Figura 7.61: Plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

Por outro lado, uma falta imediatamente posterior ao capacitor, externa à zona de proteção, não deve atingir a região de operação do elemento diferencial. A Figura 7.62 demonstra, no plano cartesiano, a estabilidade para esta condição.

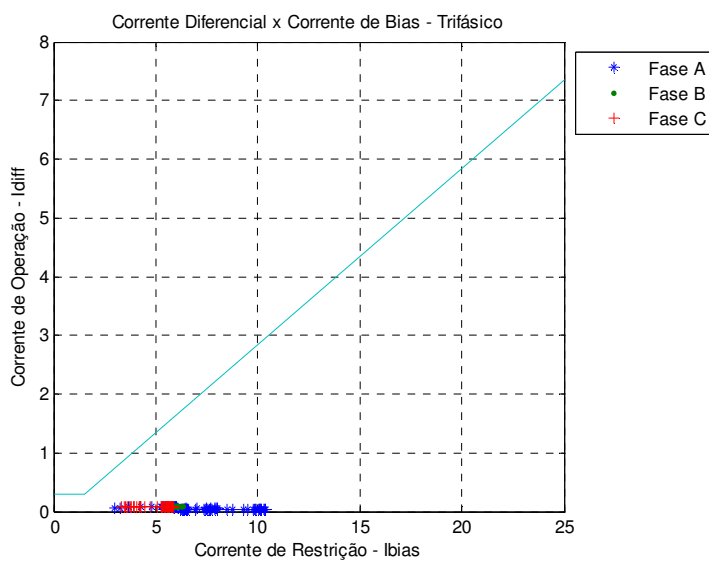


Figura 7.62: Plano cartesiano, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa

A Figura 7.63 demonstra a estabilidade para a falta externa na representação do elemento diferencial através do plano alfa.

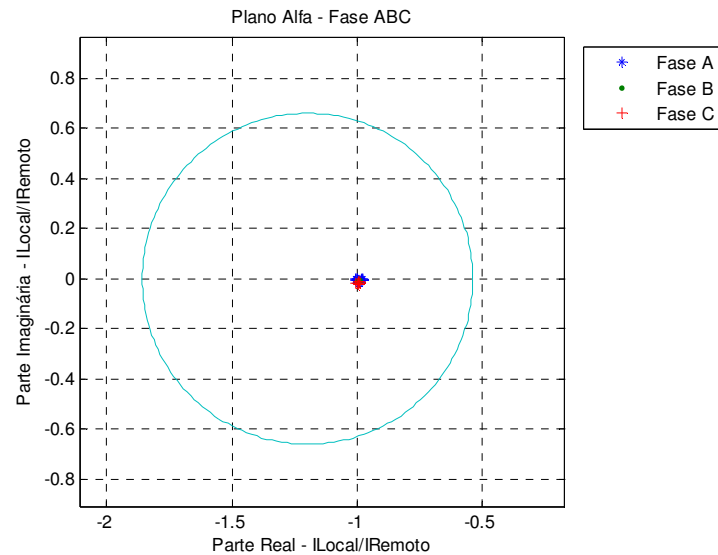


Figura 7.63: Plano alfa, 100%, $R_f = 0\Omega$, externa

Aumentando o valor da resistência o algoritmo diferencial ainda mostrou-se estável, porém são aqui omitidos seus resultados.

7.3

Análise de Faltas em Sistema Compensado, Potencial do Lado da Linha

Para as simulações anteriores os transformadores de potencial foram considerados como estando instalados no lado da barra. Na análise que segue algumas faltas, apenas trifásicas e sem resistência de falta, serão avaliadas para o potencial tomado no lado da linha, ou seja, após o capacitor série, conforme apresentado pela Figura 7.64.

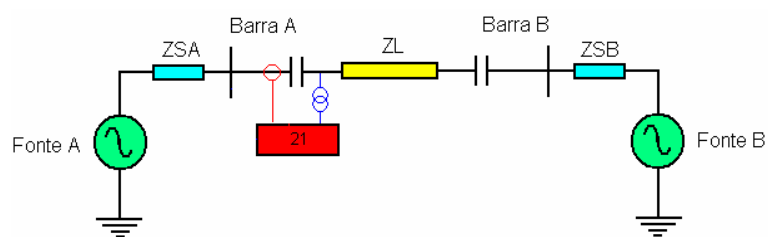


Figura 7.64: Modelo simplificado de sistema de potência

7.3.1 Análise de Falhas Trifásicas

7.3.1.1 Falhas a 25% do trecho da linha

Com o transformador de potencial instalado no lado da linha o elemento de impedância não absorve a influência da impedância equivalente do MOV. Neste caso, todo o transitório causado pela condução do MOV durante sua condução não é medido pelo algoritmo de proteção, que então recebe apenas a queda de tensão desde o ponto de instalação do transformador de potencial até o ponto de falta. Dentro deste mesmo raciocínio não aparece o efeito também causado pelo disparo do Spark Gap para o caso em que este venha a operar.

A Figura 7.65 mostra o comportamento da trajetória de impedância para uma falta a 25% do trecho de linha, cujo resultado pode ser comparado ao apresentado pela Figura 7.14, simulado para a condição de transformador de potencial no lado da barra.

Assim, pode ser observado que a localização da falta passa a ser correta novamente, e o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo se assemelha ao caso da linha não compensada, Figura 5.6.

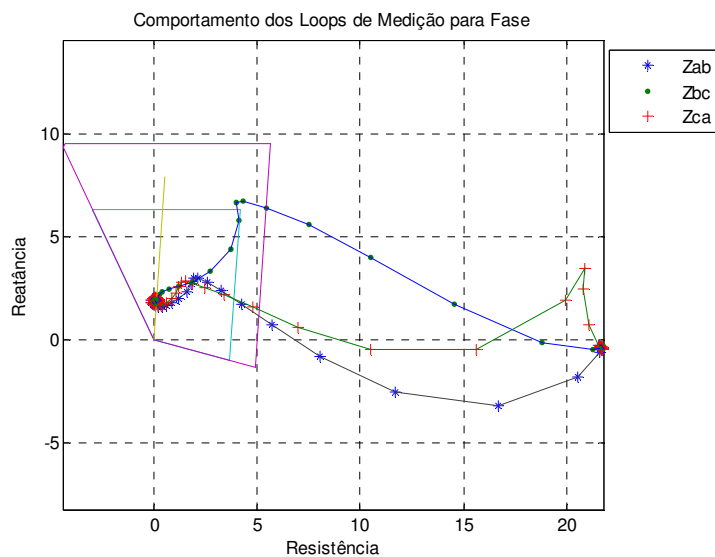


Figura 7.65: DFT ciclo completo, 25%, $R_f = 0\Omega$

De maneira semelhante pode ser observado através das Figuras 7.66 que a localização da falta passa a ser correta novamente, e o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de equação diferencial se assemelha ao caso da linha não compensada, Figura 5.10.

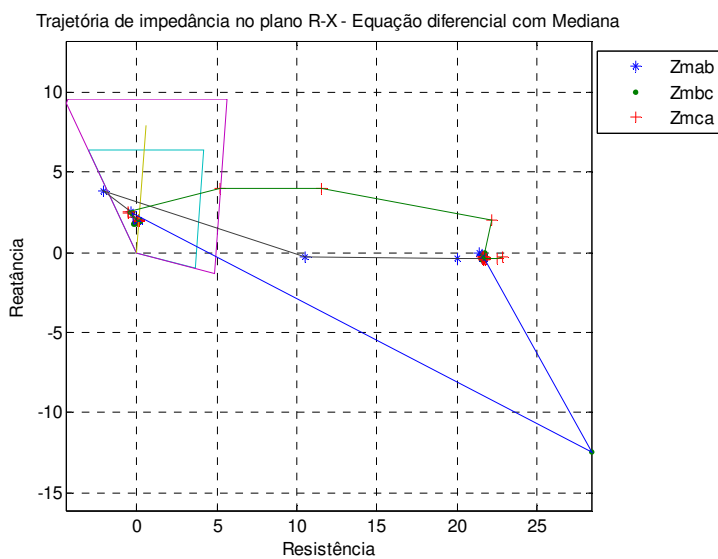


Figura 7.66: Equação diferencial, 25%, $R_f = 0\Omega$

7.3.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha

Para a falta localizada a 75% do trecho da linha observa-se novamente, através das Figuras 7.67 e 7.68, que a localização da falta é correta, havendo pequena oscilação no valor da convergência da impedância de falta devido ao efeito da componente exponencial, e não por influência da compensação série.

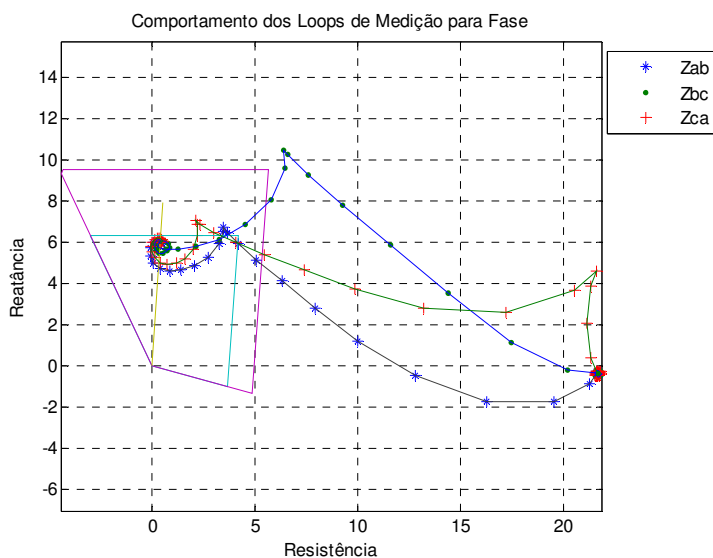


Figura 7.67: DFT ciclo completo, 75%, $R_f = 0\Omega$

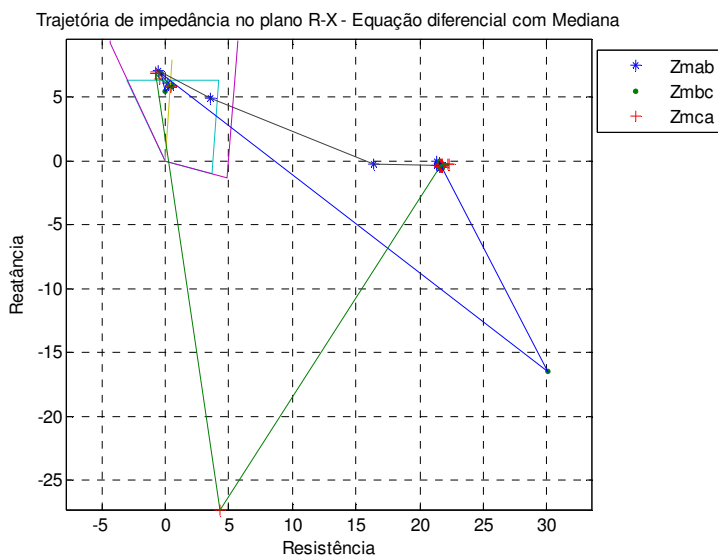


Figura 7.68: Equação diferencial, 75%, $R_f = 0\Omega$

Em particular, observa-se que o algoritmo de distância baseado no modelo de equação diferencial apresenta excelente comportamento para esta situação.

7.3.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha

Seja em seguida avaliar o comportamento destes algoritmos para uma falta que ocorre a 100% do trecho de linha, ou seja, no final extremo da linha. Neste contexto, duas condições são novamente ponderadas: (1) Falta imediatamente anterior ao capacitor; (2) Falta imediatamente posterior ao capacitor. Em ambos os casos, devem ser observados os comportamentos dos algoritmos para atuação ou não atuação quando aplicáveis.

Para o algoritmo DFT, apresentado na Figura 7.69, observa-se que apesar da localização da falta ser correta, o transitório final causado pela componente exponencial poderá ocasionar disparo da zona 1 incorretamente, uma vez que a trajetória atinge por algumas amostras a região definida por esta zona.

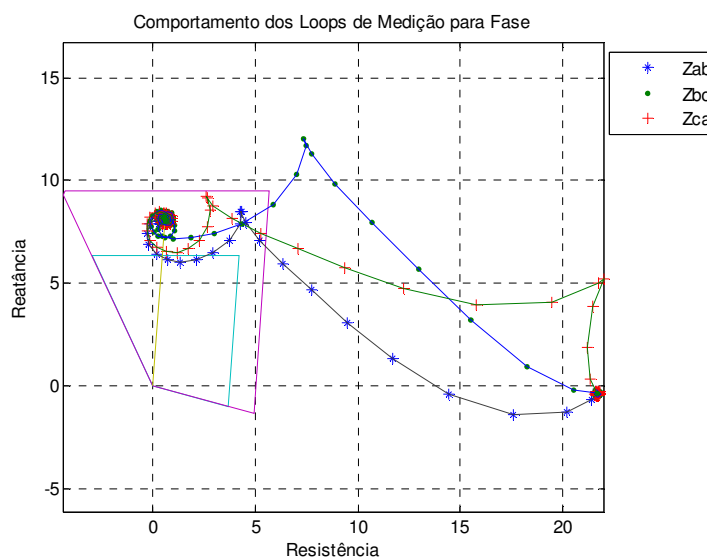


Figura 7.69: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor

Por outro lado, observa-se através da Figura 7.70 que o algoritmo baseado na equação diferencial apresenta comportamento adequado, não atingindo a Zona 1.

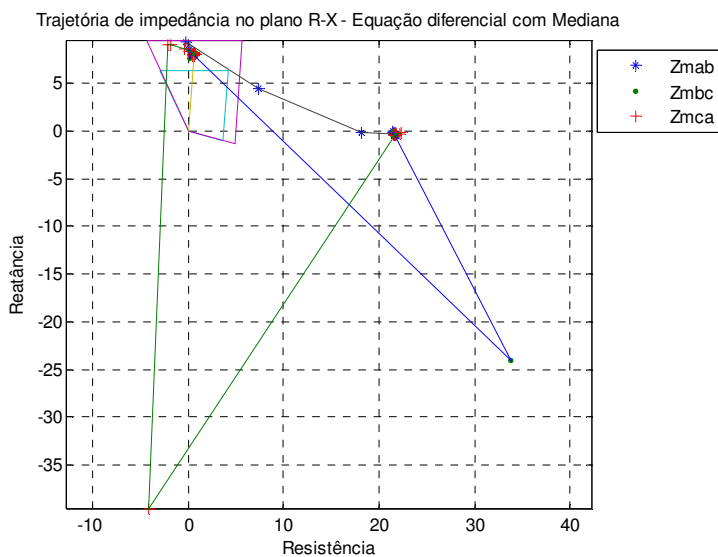


Figura 7.70: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta anterior ao capacitor

Seja em seguida avaliar os mesmos algoritmos para a falta ocorrendo após o capacitor remoto. Neste caso, mesmo com o transformador de potencial localizado no lado da linha para o terminal local, o capacitor remoto irá influenciar a medição da impedância, uma vez que este capacitor passa a fazer parte do loop de medição do algoritmo de proteção. A Figura 7.71 mostra que o elemento de impedância apresenta sobrealcance para esta condição de falta.

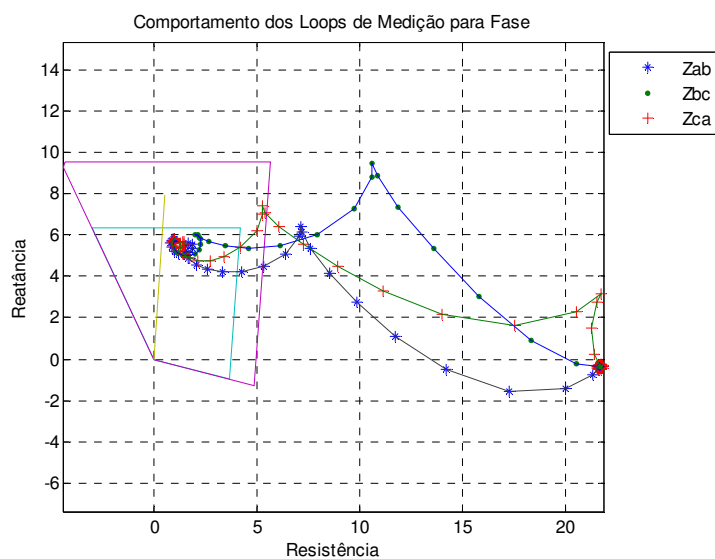


Figura 7.71: DFT ciclo completo, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

A trajetória calculada pelo algoritmo baseado no modelo da equação diferencial da mesma forma sofre esta influência, como pode ser observado pela Figura 7.72.

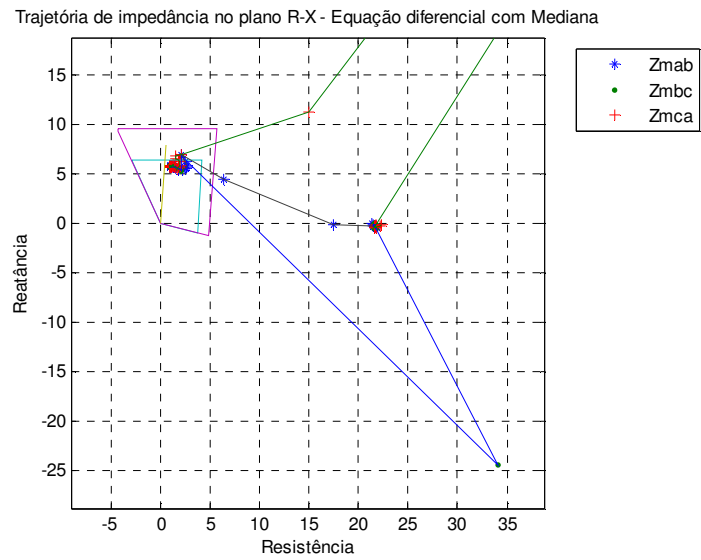


Figura 7.72: Equação diferencial, 100%, $R_f = 0\Omega$, falta posterior ao capacitor

Sistema com TCSC

O capítulo anterior apresentou a análise de algoritmos de proteção para uma linha de transmissão provida de compensação série através do uso de capacitor fixo. Foram então avaliados os comportamentos de diferentes algoritmos de proteção tendo em vista os fenômenos associados à presença do capacitor série.

No entanto, a análise que se seguiu foi ponderada sobre a premissa de que o capacitor série manteve seu valor de reatância fixo, desconsiderando a influência do MOV, dentro de um valor prévio estipulado. Assim, apesar da importância deste estudo e do número significativo de aplicações que envolvem o capacitor série fixo o estudo permanece de certa maneira incompleto, uma vez que esta compensação pode se apresentar de maneira variável, ou seja, através do uso de dispositivos no qual a capacitância série pode variar ao longo do tempo.

Neste capítulo será novamente avaliado o comportamento dos algoritmos de proteção anteriormente abordados, porém agora na presença de compensação série variável, através da modelagem do Capacitor Série Controlado por Tiristor ou em inglês Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), cuja descrição foi apresentada no Capítulo 4.

Para isso, o TCSC foi modelado em ATP/EMTP de maneira a permitir sua análise no ambiente de simulação de transitórios eletromagnéticos. As amostras obtidas desta simulação foram então levadas ao ambiente Matlab a fim de que os algoritmos de proteção desenvolvidos e analisados nos Capítulos 5, 6 e 7 pudessem ser avaliados para um sistema com o capacitor série variável. A implementação e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

8.1

Modelo Simplificado do Sistema de Potência

O sistema de potência modelado, e apresentado na Figura 8.1, é constituído de uma linha de transmissão que apresenta no terminal do lado da Barra A um capacitor série fixo com grau de compensação de 25% e um TCSC com grau de compensação de 5%, e no lado da Barra B um capacitor série fixo com grau de compensação de 30%.

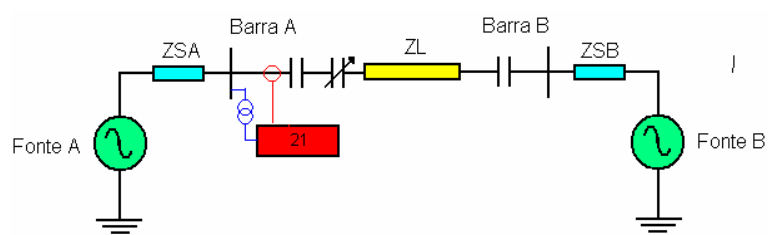


Figura 8.1: Modelo simplificado de sistema de potência

O modelo utilizado para a implementação do TCSC em ATP/EMTP pode ser visualizado através da Figura 8.2.

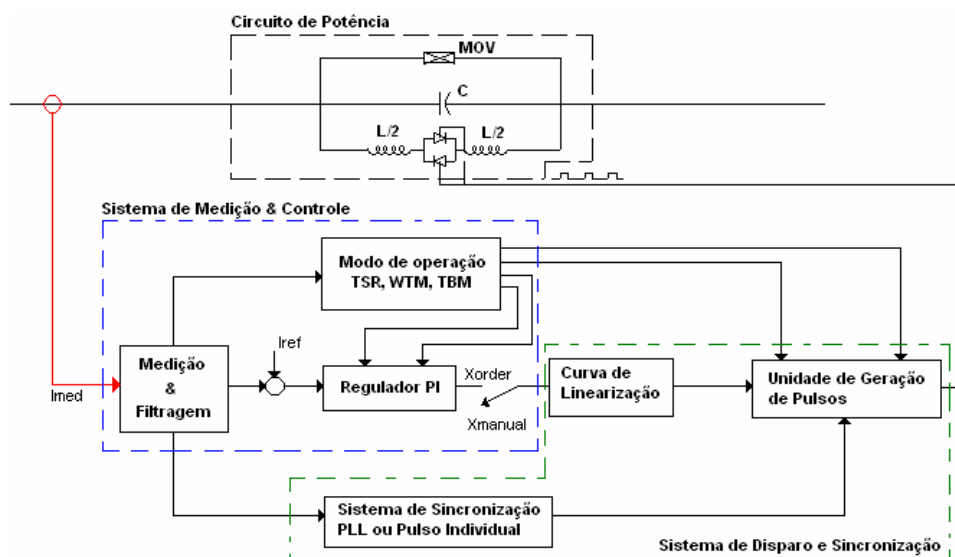


Figura 8.2: Modelo do Capacitor Série Controlado por Tiristor (TCSC)

Neste modelo são implementados, além do capacitor série e do dispositivo MOV, os tiristores, reatores e outros dispositivos responsáveis pelo controle do disparo dos tiristores. Observa-se, portanto, que o TCSC é na verdade um capacitor série em paralelo com um reator controlado por tiristor, TCR.

Através da Figura 8.2 pode-se identificar três subsistemas distintos, porém interligados pelas funcionalidades. O primeiro denominado Circuito de Potência é o responsável pela interação direta com o sistema de potência, ou seja, a linha ou corredor de transmissão no qual o TCSC está instalado. Este circuito pode se comportar de maneira indutiva ou capacitiva, dependendo do ângulo de disparo imposto aos tiristores.

O segundo subsistema, denominado Sistema de Medição e Controle é o responsável por verificar, para este caso, a corrente na linha de transmissão e prover referência para o circuito de disparo dos tiristores. Três modos de operação podem ser definidos através deste circuito:

- (1) TSR (Thyristor Switched Reactor) – neste modo os tiristores são chaveados de maneira automática, em condições especiais, quando a corrente da linha é elevada o suficiente para ocasionar sobretensão no banco de capacitor.
- (2) WTM (Waiting Mode) – significa que o TCSC espera durante um período de tempo definido com um ângulo de disparo constante, até que outro modo seja ativado.
- (3) TBM (Thyristor Blocked Mode) – significa que o regulador PI e a unidade geradora de pulsos estão desabilitadas, ou seja, o capacitor opera sozinho em série com a linha de transmissão.

Neste trabalho apenas a condição TSR é avaliada, havendo simulações tanto para o modo TSR ligado quanto desligado, e comparações sendo feitas para estas condições.

Por sua vez, o terceiro subsistema, ou Sistema de Disparo e Sincronização, é responsável pelo envio de disparos aos tiristores do circuito de potência. Estes disparos devem ser feitos de maneira sincronizada e um dispositivo de sincronização é fundamental para o correto funcionamento do sistema.

Os seguintes parâmetros do sistema foram utilizados nas simulações:

Tabela 8.1: Dados do sistema de potência com TCSC

		Resistência Ohm	Reatância Ohm	Capacitância $\mu\text{F}/\text{fase}$
Fonte A (440kV $\angle 0$)	Zero	1.667	18.316	-
	Positiva	0.7600	18.378	-
Fonte B (440kV $\angle -20$)	Zero	11.17	51.261	-
	Positiva	1.507	18.330	-
Capacitor série (30%)	Positiva	-	-	133.722
Capacitor série (25%)	Positiva	-	-	160.47
TCSC (5% a 15%)	Positiva	-	-	802.35*
		Resistência Ohm/km/fase	Reatância Ohm/km/fase	Susceptância $\mu\text{S}/\text{fase}$
Linha de Transmissão	Zero	2.91546e-1	0.904	3.3271
	Positiva	2.36174e-2	0.331	5.0186

*Capacitância física do banco de capacitores do TCSC

8.2

Análise de Falhas em Sistema com Capacitor Série Controlado por Tiristor

Serão inicialmente verificados os resultados dos algoritmos de impedância e de diferencial de linha para faltas trifásicas ao longo da linha de transmissão. Posteriormente, faltas monofásicas serão também consideradas. As faltas são simuladas com valores de resistência igual a zero. São considerados dois tipos de comportamento para o TCSC. No primeiro o modo TSR está desligado, TSROFF, e o comportamento esperado é bem similar ao de um capacitor série fixo. No segundo, o modo TSR é ligado, TSRON, havendo o bypass pelo reator controlado a tiristores quando a corrente for elevada.

8.2.1 Análise de Falhas Trifásicas

8.2.1.1 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR desativado

Seja inicialmente considerar uma falta trifásica localizada a 25% do trecho de linha, no modo TSR desativado. A Figura 8.3 apresenta o resultado das formas de onda de tensões e correntes trifásicas para esta falta.

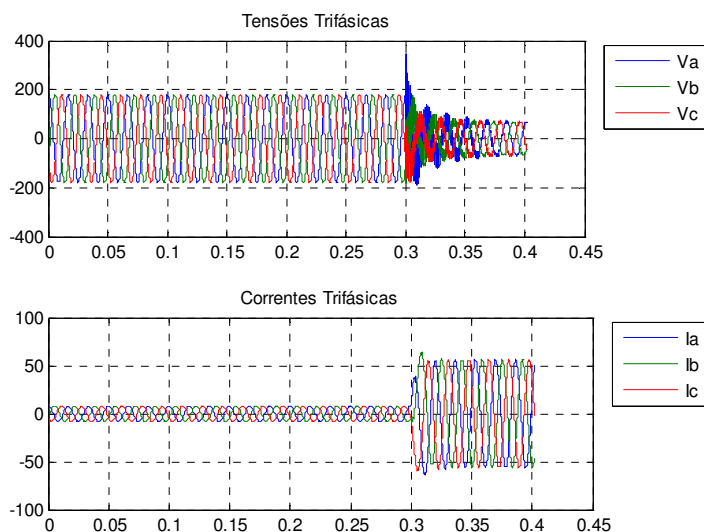


Figura 8.3: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, TSROFF

A Figura 8.4 apresenta o comportamento da trajetória de impedância do DFT, com destaque para o aumento da resistência equivalente em função da proteção do MOV. No entanto, observa-se que não houve disparo do Spark Gap.

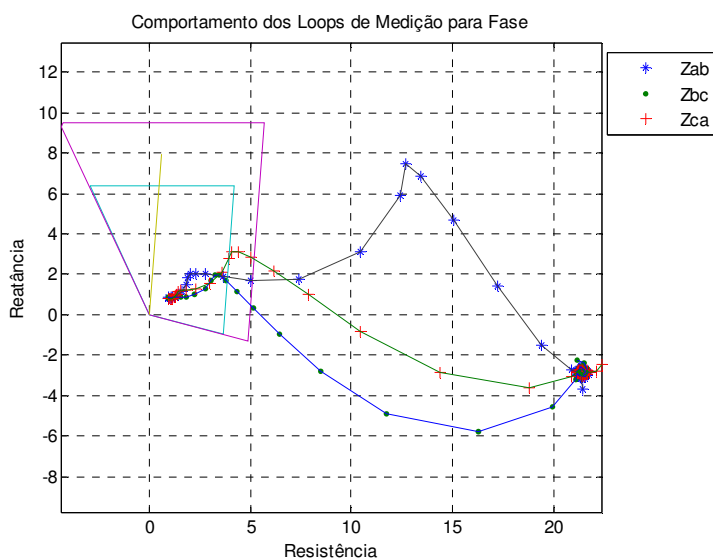


Figura 8.4: DFT ciclo completo, 25%, TSROFF

A Figura 8.5 apresenta o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de equação diferencial. Observa-se que também houve operação correta do elemento de distância.

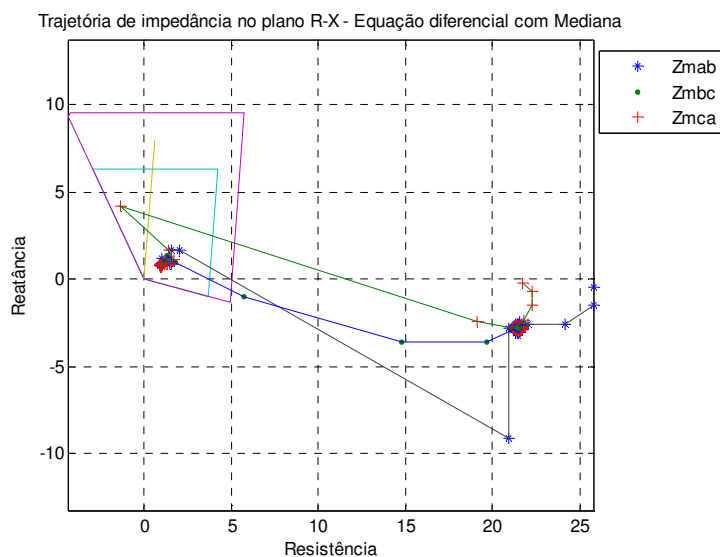


Figura 8.5: Equação diferencial, 25%, TSROFF

A Figura 8.6, por outro lado, mostra o comportamento das correntes trifásicas nos extremos da linha para a mesma falta, sendo estas correntes comparadas e processadas pelos algoritmos diferenciais de linha.

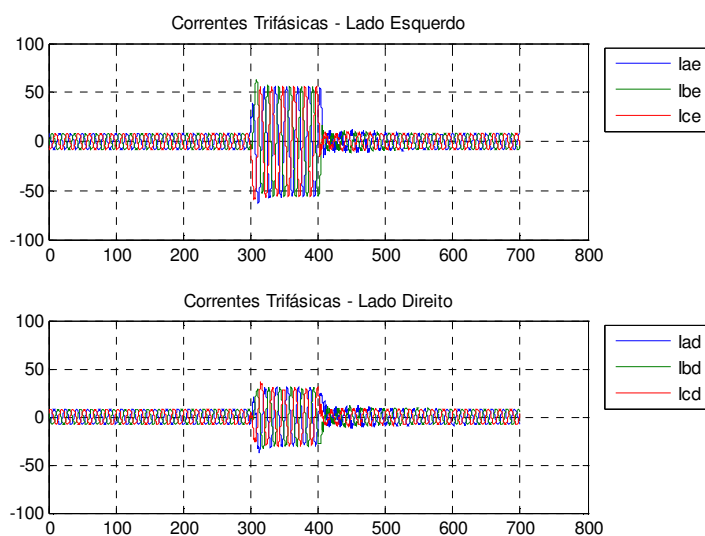


Figura 8.6: Correntes trifásicas nos extremos da linha, 25%, TSROFF

Apenas para efeito comparativo a Figura 8.7 mostra o comportamento das correntes da Fase C em ambos os extremos de linha, incluindo os valores RMS.

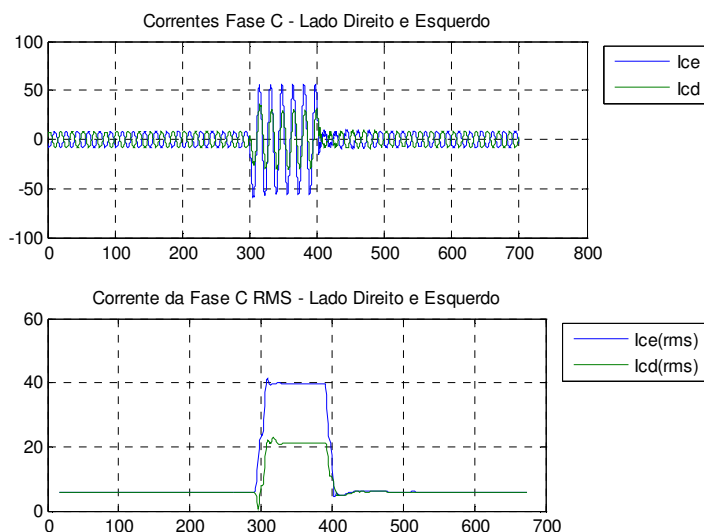


Figura 8.7: Corrente da Fase C, 25%, TSROFF

A diferença das correntes resulta na operação do elemento diferencial, conforme pode ser observado através da Figura 8.8. Ainda nesta figura, pode-se observar que o comprimento da linha em 200km acarreta em corrente diferencial mesmo para a condição de carga, em função da capacitância em derivação da linha.

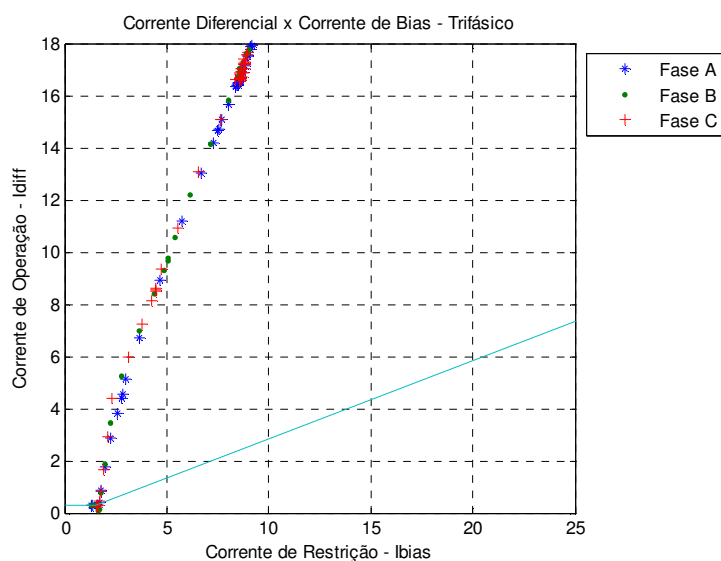


Figura 8.8: Diferencial plano cartesiano, 25%, TSROFF

Para a representação do elemento diferencial no plano alfa, Figura 8.9, observa-se que durante a condição de carga a medição inicial é deslocada do ponto $(-1,0)$. Isto é também resultado do comprimento longo da linha e sua conseqüente capacitância em derivação.

Ressalta-se, desta maneira, que os algoritmos diferenciais implementados neste trabalho, tanto na representação no plano cartesiano quanto no plano alfa, não consideram o erro devido ao carregamento capacitivo da linha. Os relés diferenciais são tipicamente empregados em linhas curtas, onde esta influência é desprezível para efeito de proteção da linha. No entanto, deve-se mencionar que para os casos de aplicação de relés diferenciais em linhas longas alguns fabricantes possibilitam um algoritmo adicional de compensação de carregamento da linha, subtraindo a componente relativa à corrente capacitiva do cálculo do elemento diferencial.

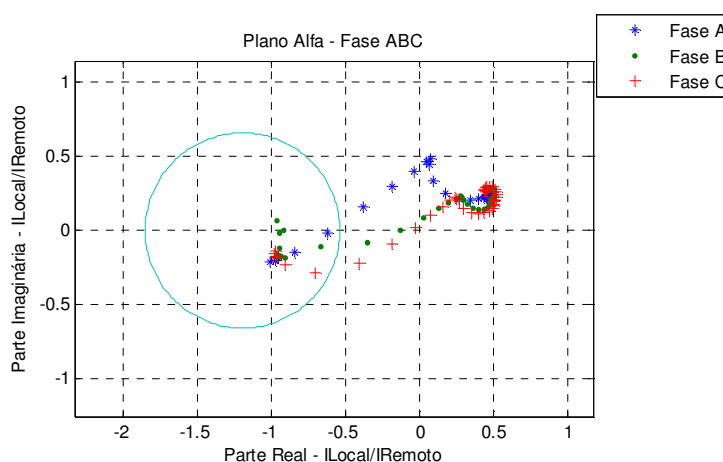


Figura 8.9: Diferencial plano alfa, 25%, TSROFF

8.2.1.2 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR desativado

Seja em seguida avaliar o comportamento dos algoritmos numéricos para faltas trifásicas a 75% do trecho da linha. A Figura 8.10 ilustra o comportamento das formas de onda de tensões e correntes para estas faltas, ainda com TSR desativado.

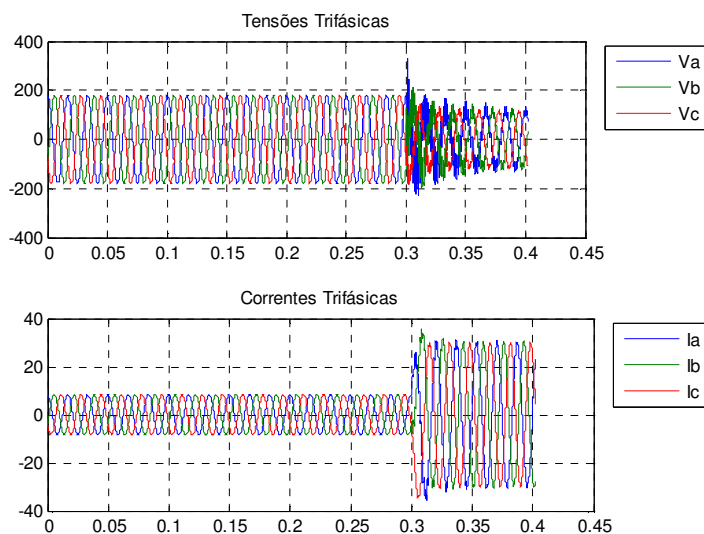


Figura 8.10: Formas de onda de tensões e correntes, 75%, TSROFF

A Figura 8.11 mostra o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo para a falta a 75% do trecho da linha. Observa-se que o comportamento obtido é bastante parecido com o caso do capacitor série fixo, apresentado na Figura 7.22.

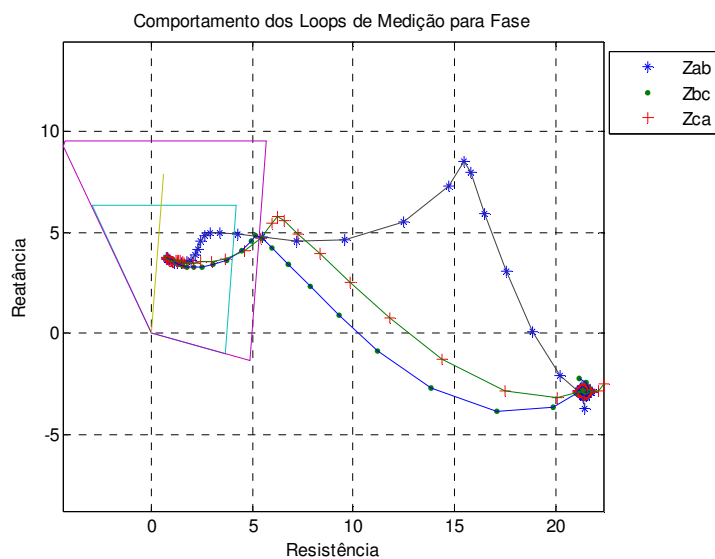


Figura 8.11: DFT ciclo completo, 75%, TSROFF

De maneira semelhante, o algoritmo de distância baseado no modelo de equação diferencial apresenta um resultado, Figura 8.12, bastante parecido com o obtido para o caso da linha com capacitor série fixo, Figura 7.24.

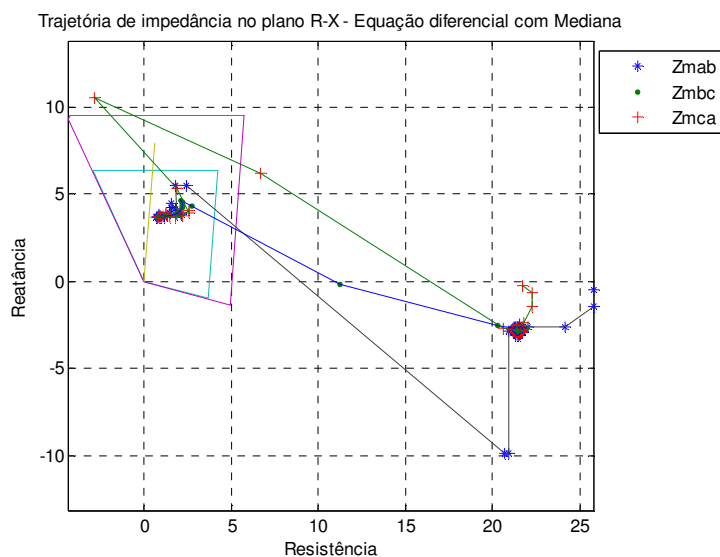


Figura 8.12: Equação diferencial, 75%, TSROFF

A Figura 8.13 apresenta o resultado do algoritmo diferencial de linha no plano cartesiano para a falta a 75% do trecho de linha.

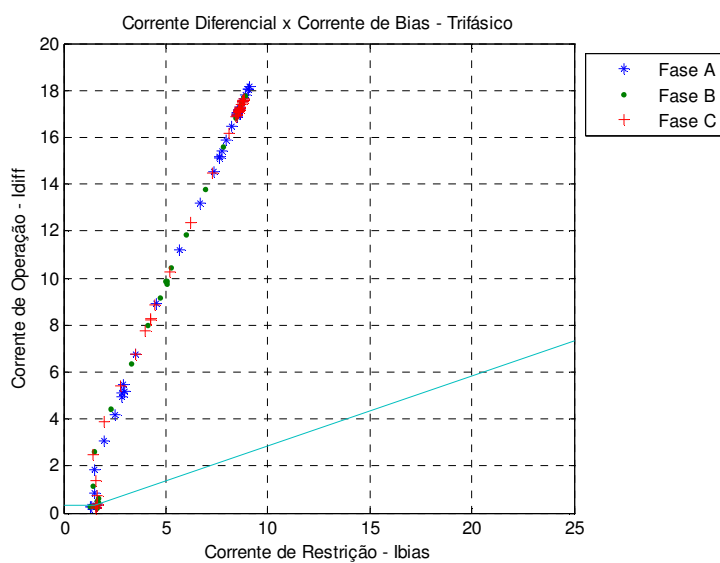


Figura 8.13: Diferencial plano cartesiano, 75%, TSROFF

A Figura 8.14 apresenta o resultado do algoritmo diferencial de linha no plano alfa para a mesma falta.

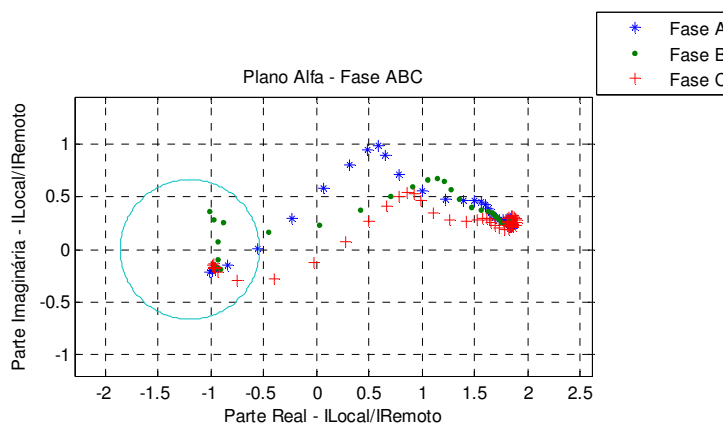


Figura 8.14: Diferencial plano alfa, 75%, TSROFF

8.2.1.3 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR desativado

A seguir é avaliado o comportamento dos algoritmos numéricos para faltas que ocorrem a 100% do trecho da linha, ou seja, no terminal remoto, ou Barra B. Neste capítulo apenas uma condição de falta a 100% do trecho da linha é avaliada, ou seja, apenas faltas anteriores ao capacitor série remoto são analisadas. Não é, portanto, avaliada a condição de falta imediatamente posterior ao capacitor.

A Figura 8.15 apresenta o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo. Pode ser observado que para esta falta o algoritmo mede a impedância final dentro da Zona 1. Neste tipo de falta, o relé de distância terá a sua frente toda a impedância da linha adicionada ao valor do capacitor série instalado próximo ao próprio relé. Desta forma, o valor da impedância final é a soma destes dois valores, resultando que o valor final incide dentro da Zona 1. O resultado obtido é semelhante ao obtido para o caso de capacitância fixa, conforme Figura 7.33.

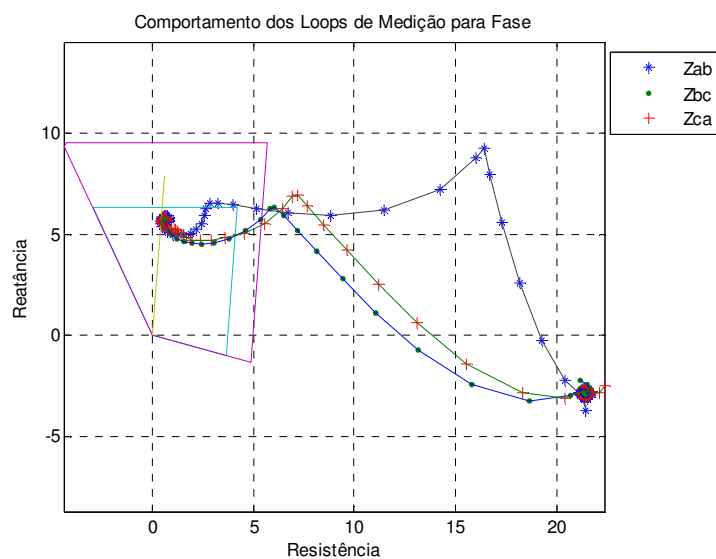


Figura 8.15: DFT ciclo completo, 100%, TSROFF

A Figura 8.16 apresenta o resultado do algoritmo de distância baseado no modelo de equação diferencial de linha. Nota-se, todavia, que tanto para DFT de ciclo completo quanto para modelo de equação diferencial diminui o efeito resistivo do MOV para faltas mais próximas do terminal remoto. O resultado obtido é também bastante parecido com o caso do capacitor série fixo, Figura 7.34.

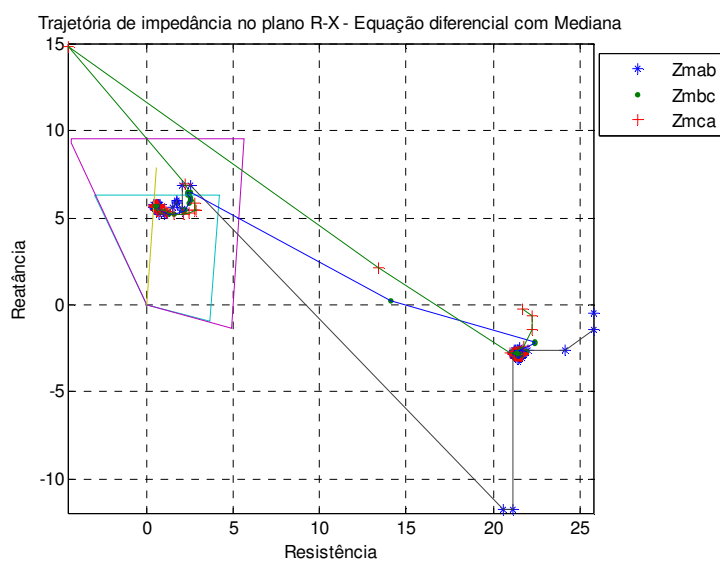


Figura 8.16: Equação diferencial, 100%, TSROFF

A Figura 8.17 apresenta o resultado do algoritmo diferencial de linha no plano cartesiano para a falta a 100% do trecho de linha.

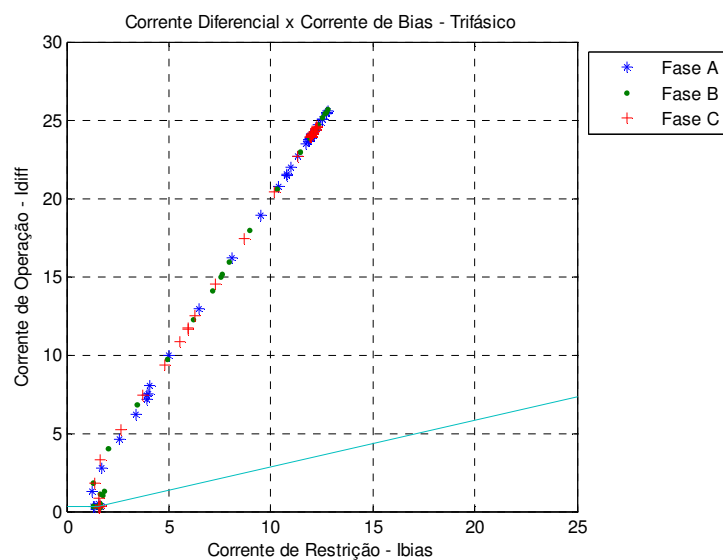


Figura 8.17: Diferencial plano cartesiano, 100%, TSROFF

A Figura 8.18 apresenta o resultado do algoritmo diferencial de linha no plano alfa para a mesma falta.

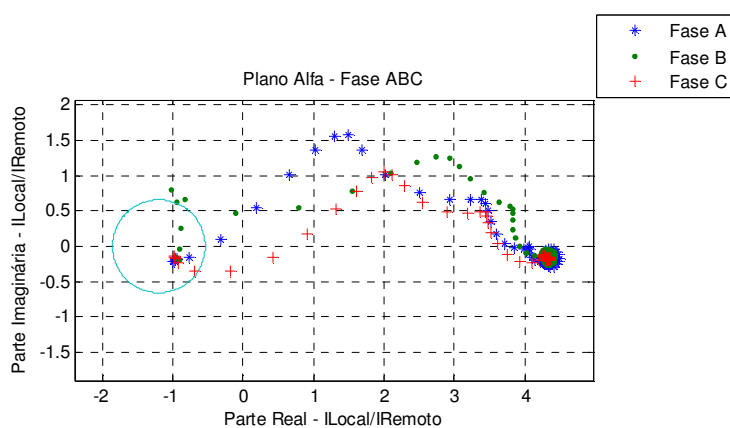


Figura 8.18: Diferencial plano alfa, 100%, TSROFF

8.2.1.4 Falta na direção reversa, modo TSR desativado

Uma condição de falta que também deve ser avaliada é aquela que ocorre atrás do local de instalação do relé, ou seja, na posição reversa. Esta condição de falta, não apresentada nos capítulos anteriores, é agora avaliada para os algoritmos já apresentados, já com o TCSC implementado. A Figura 8.19 apresenta o comportamento das correntes e tensões para a falta reversa.

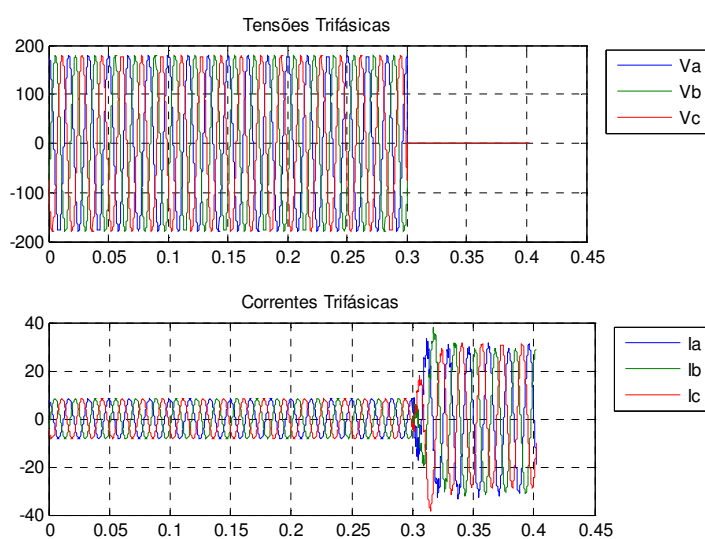


Figura 8.19: Formas de onda de tensões e correntes, Reversa, TSROFF

A falta reversa é aplicada na própria Barra A do sistema de potência simulado. Para este tipo de falta o relé de impedância pode enfrentar grande dificuldade de operação, uma vez que a tensão no ponto de falta é zero e está muito próxima ao relé de proteção, comprometendo a polarização dos elementos de impedância. A condição pré-falta, no entanto, permite que os algoritmos tenham resposta satisfatória para as faltas simuladas.

Na prática costuma-se ajustar alguma zona de proteção do relé de impedância na direção reversa para a cobertura de faltas nesta direção. Faltas na barra podem ainda ser cobertas por proteção diferencial de barras.

A Figura 8.20 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo.

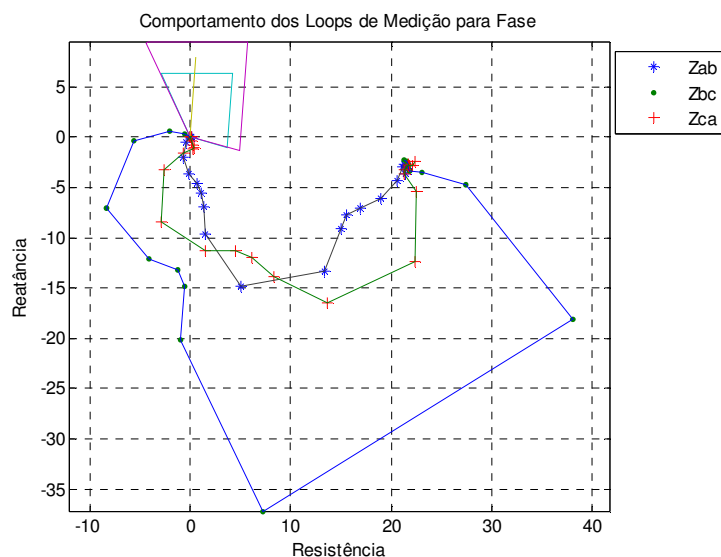


Figura 8.20: DFT ciclo completo, Reversa, TSROFF

A Figura 8.21 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo baseado no modelo de equação diferencial. Observa-se que para este caso pode haver risco de atuação indevida, pois algumas amostras se posicionam dentro da região definida pela Zona 1.

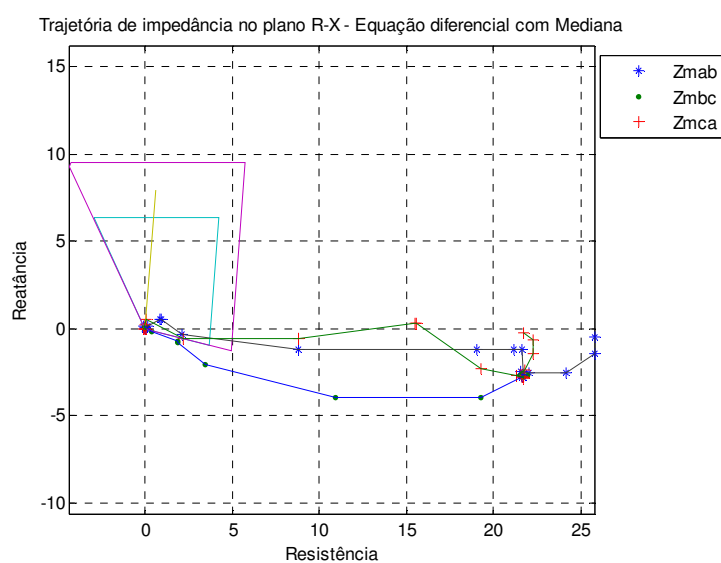


Figura 8.21: Equação diferencial, Reversa, TSROFF

Para a falta reversa localizada na Barra A os algoritmos diferenciais de linha não devem operar, tendo em vista que para estes elementos a falta é considerada externa à zona de proteção.

A Figura 8.22 ilustra que algumas amostras se aproximam da região de operação, porém isto se deve ao fato da não compensação do algoritmo para linhas longas, conforme já abordado anteriormente. Para a falta reversa o erro imposto pela capacitância da linha de transmissão diminui e as amostras caminham para a região de restrição, melhorando a estabilidade do esquema de proteção.

No entanto, vale ressaltar que para a falta reversa ocorrendo na barra próxima do ponto de medição do relé de proteção existe o risco de saturação do transformador de corrente de uma ou mais fases, que pode comprometer o desempenho do elemento diferencial, fato já observado através da Figura 6.48.

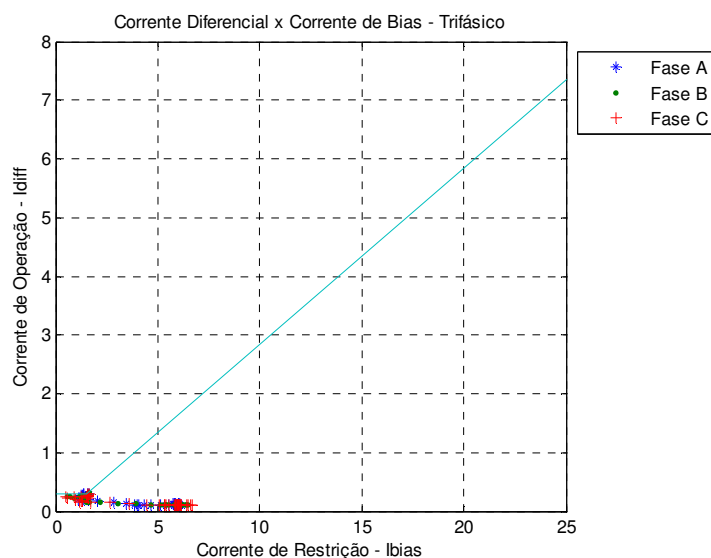


Figura 8.22: Diferencial plano cartesiano, Reversa, TSROFF

Da mesma maneira o algoritmo diferencial representado no plano alfa mostra que algumas amostras se tornam dispersas dentro da região de restrição, Figura 8.23.

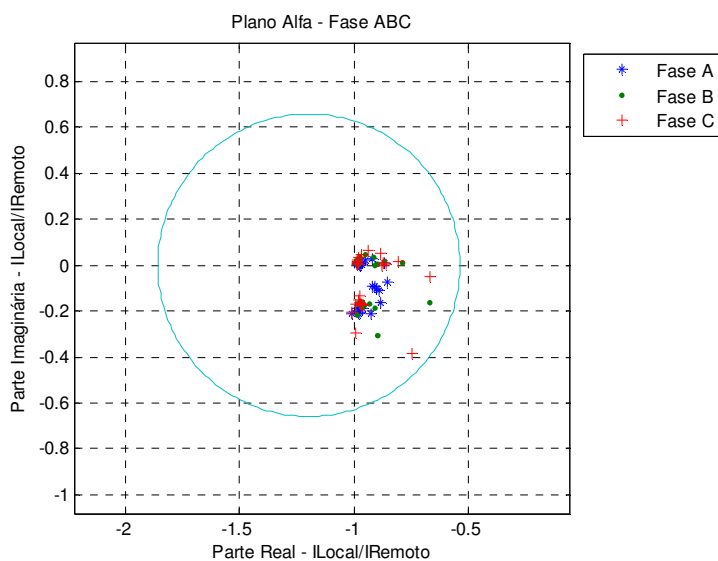


Figura 8.23: Diferencial plano alfa, Reversa, TSROFF

8.2.1.5 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR ativado

Os algoritmos são novamente testados para a falta a 25% do trecho de linha, porém agora no modo TSR ativado. A Figura 8.24 mostra o comportamento das formas de onda de correntes e tensões para esta simulação.

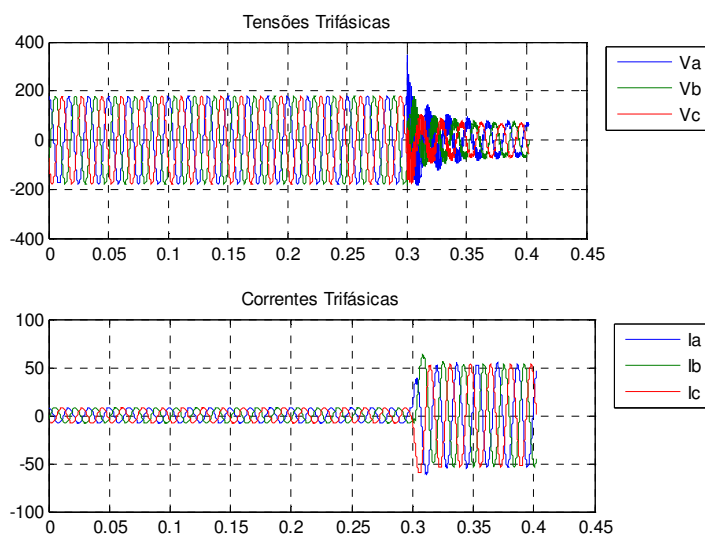


Figura 8.24: Formas de onda de tensões e correntes, 25%, TSRON

A Figura 8.25 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo. Observa-se que o resultado apresentado não difere substancialmente do resultado para o modo TSR desativado, Figura 7.57, não havendo também disparo do Spark Gap.

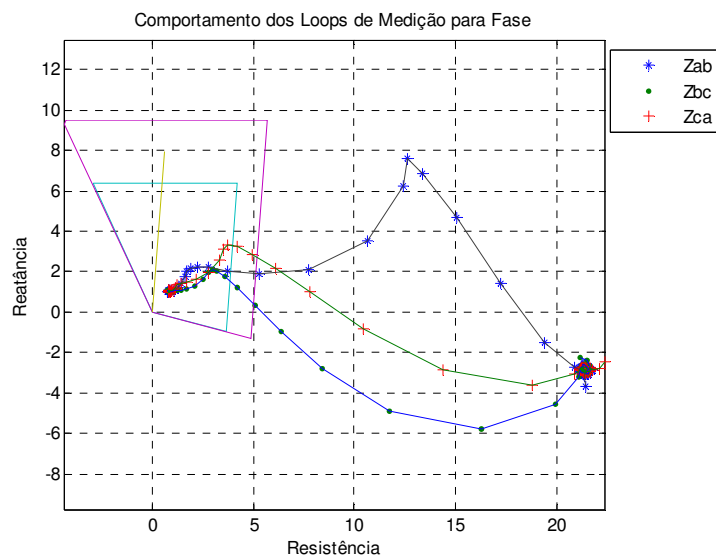


Figura 8.25: DFT ciclo completo, 25%, TSRON

A Figura 8.26 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo baseado no modelo de equação diferencial.

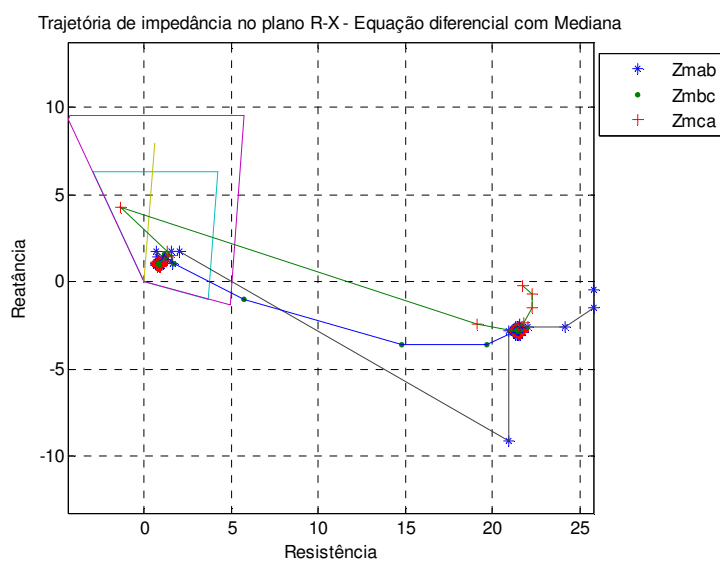


Figura 8.26: Equação diferencial, 25%, TSRON

A Figura 8.27 ilustra o comportamento do elemento diferencial no plano cartesiano para a falta a 25% do trecho de linha, com o modo TSR ativado. O elemento diferencial não apresenta dificuldade de operação para esta condição.

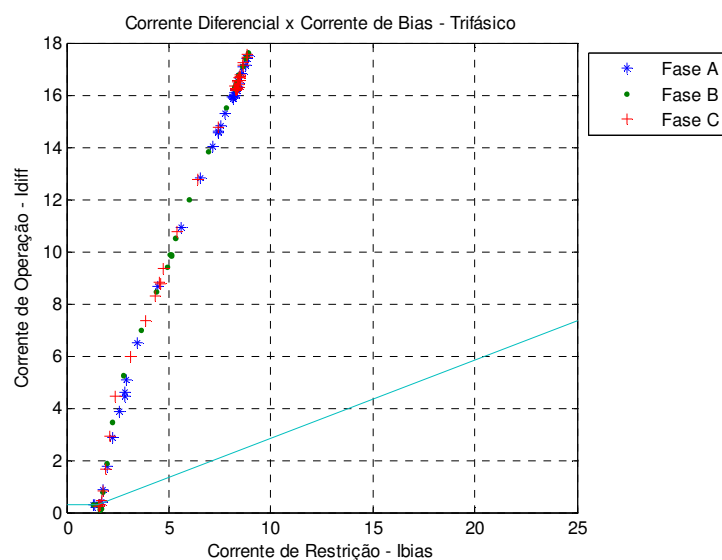


Figura 8.27: Diferencial plano cartesiano, 25%, TSRON

De maneira semelhante a Figura 8.28 apresenta o desempenho do elemento diferencial no plano alfa.

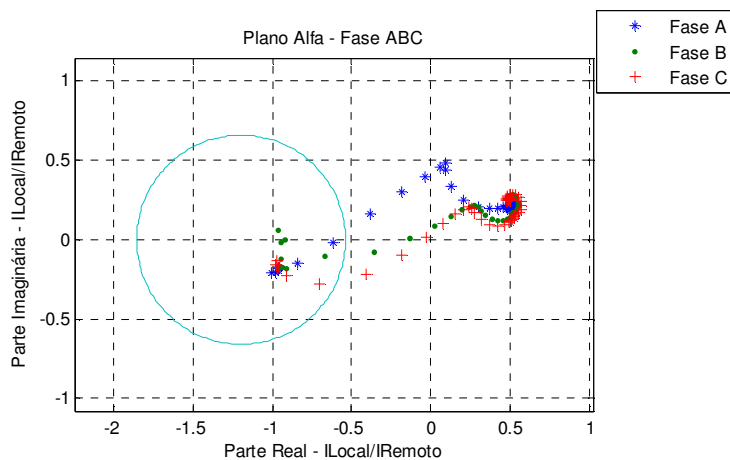


Figura 8.28: Diferencial plano alfa, 25%, TSRON

8.2.1.6 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR ativado

Seja em seguida avaliar o comportamento dos algoritmos de proteção para faltas a 75% do trecho da linha. A Figura 8.29 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo.

Nota-se que este resultado é bastante parecido com o caso do modo TSR desativado, apresentado pela Figura 8.11, cujo resultado já era bastante próximo ao caso simulado para o capacitor série fixo.

Desta forma, pode-se concluir que a inclusão do TCSC não ocasionou grandes distorções no cálculo da impedância pelo algoritmo de distância. No entanto, observa-se uma pequena variação com relação ao ponto final de convergência do valor de impedância. Na Figura 8.29 o valor final de medição está praticamente sobre a linha de transmissão, enquanto que na Figura 8.11 existe um pequeno acréscimo no valor resistivo calculado.

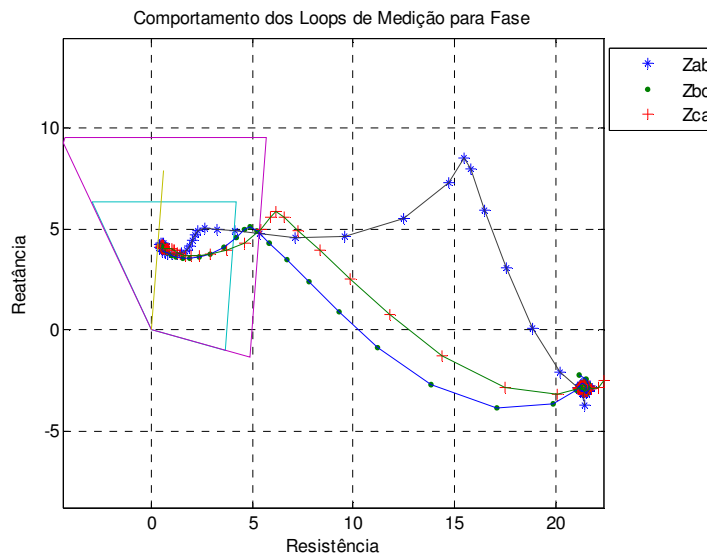


Figura 8.29: DFT ciclo completo, 75%, TSRON

A Figura 8.30 apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo de impedância baseado no modelo de equação diferencial.

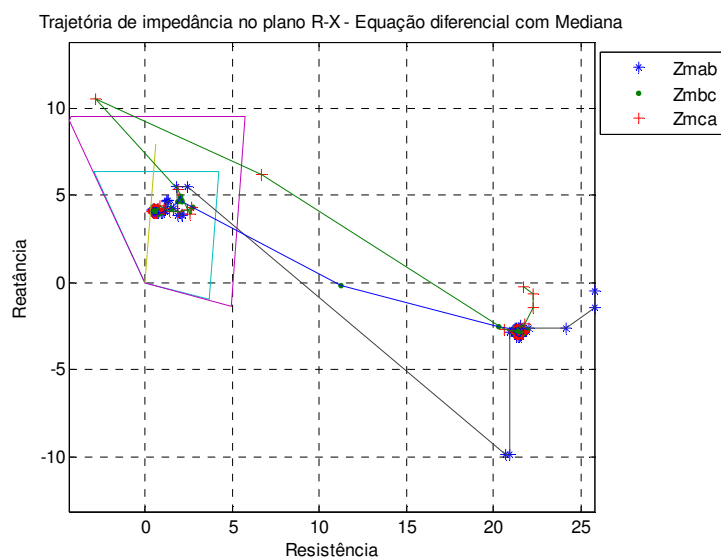


Figura 8.30: Equação diferencial, 75%, TSRON

A Figura 8.31 ilustra o comportamento do elemento diferencial no plano cartesiano para a falta a 75% do trecho de linha, com o modo TSR ativado. O elemento diferencial não apresenta dificuldade de operação para esta condição.

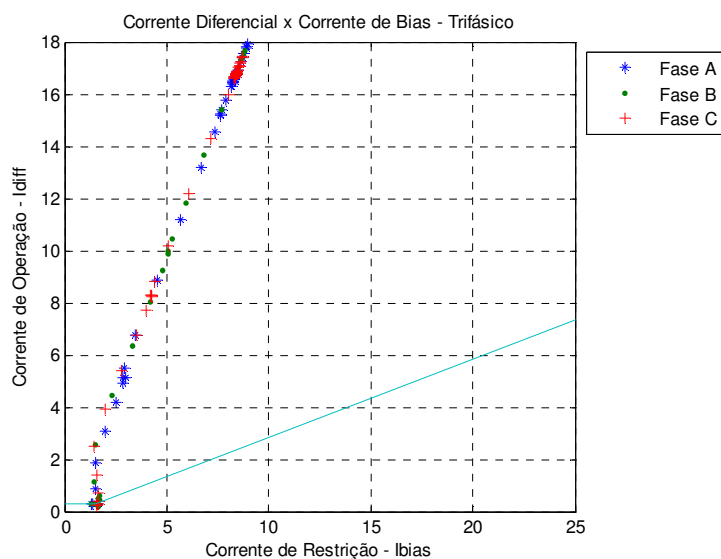


Figura 8.31: Diferencial plano cartesiano, 75%, TSRON

De maneira semelhante a Figura 8.32 apresenta o desempenho do elemento diferencial no plano alfa.

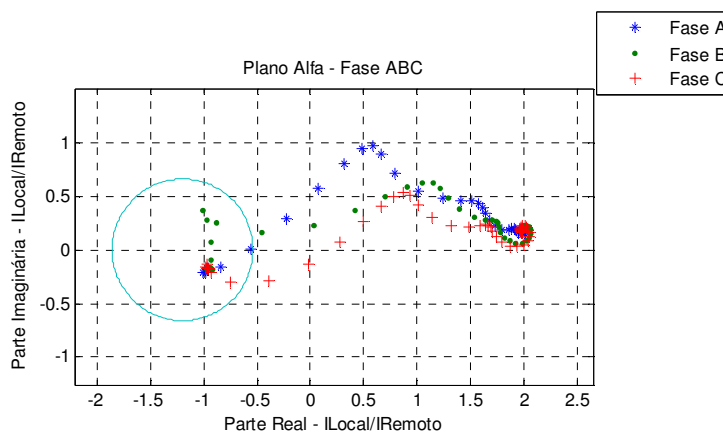


Figura 8.32: Diferencial plano alfa, 75%, TSRON

8.2.1.7 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR ativado

A seguir é avaliado o comportamento dos algoritmos numéricos para faltas que ocorrem a 100% do trecho da linha, ou seja, no terminal remoto, ou Barra B. Novamente apenas uma condição de falta a 100% do trecho da linha é avaliada, ou seja, apenas faltas anteriores ao capacitor série remoto são analisadas. Não é, portanto avaliada a condição de falta imediatamente posterior ao capacitor.

A Figura 8.33 apresenta o resultado da trajetória de impedância para o algoritmo de Fourier de ciclo completo. Pode ser observado que para esta falta o comportamento da convergência final da impedância é bastante comprometido, havendo grande oscilação durante os instantes finais, e sobrealcance da Zona 1 que irá causar disparo incorreto. Este resultado pode ser comparado a Figura 8.15, demonstrando que para este caso houve influência do TCSC na característica de medição do algoritmo de impedância.

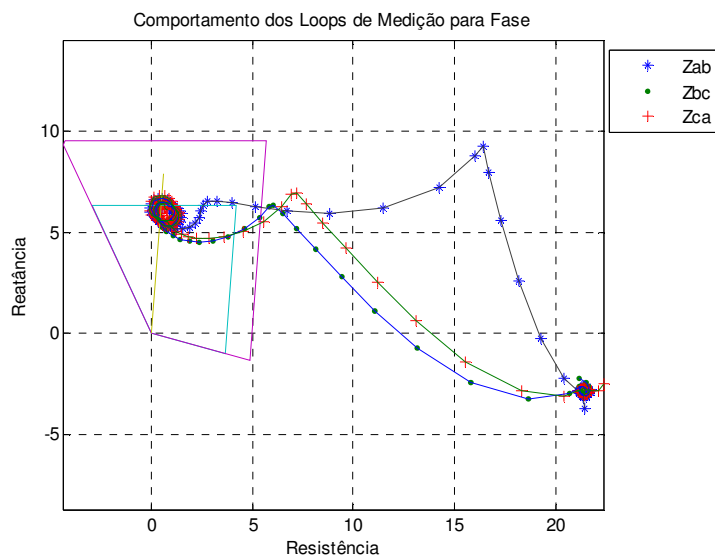


Figura 8.33: DFT ciclo completo, 100%, TSRON

De maneira semelhante a Figura 8.34 apresenta o desempenho do elemento de impedância baseado no modelo de equação diferencial, cujo resultado pode ser comparado ao apresentado pela Figura 8.16.

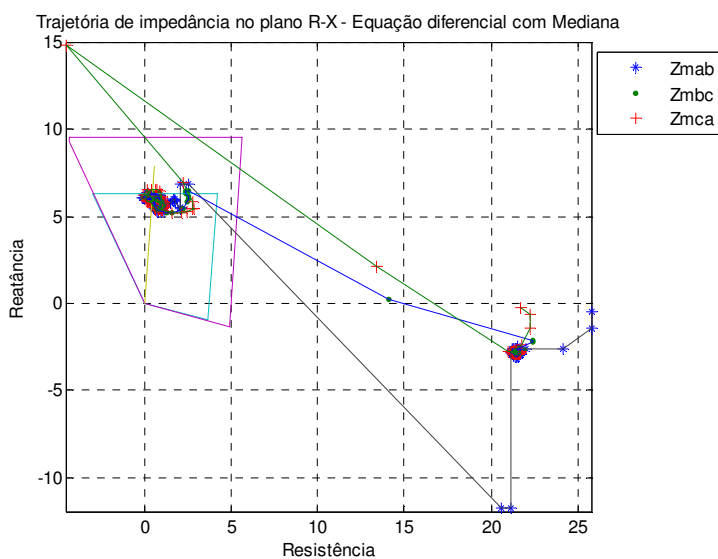


Figura 8.34: Equação diferencial, 100%, TSRON

A Figura 8.35 ilustra o comportamento do elemento diferencial no plano cartesiano para a falta a 100% do trecho de linha, com o modo TSR ativado. Novamente o elemento diferencial não apresenta dificuldade de operação para esta condição.

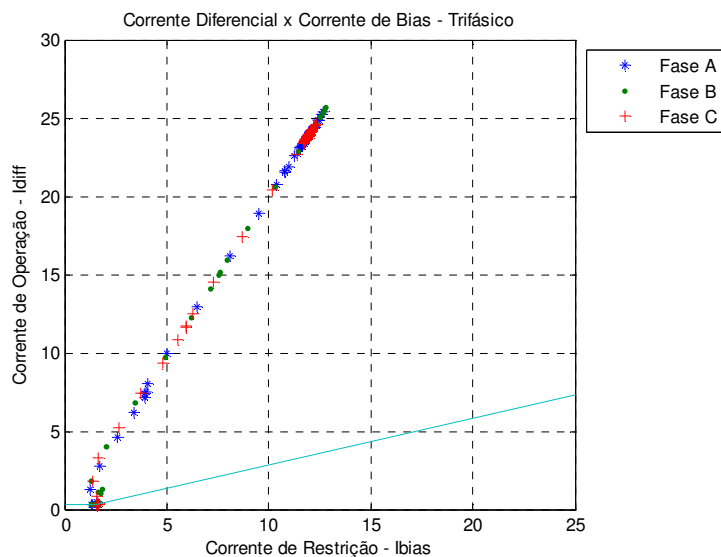


Figura 8.35: Diferencial plano cartesiano, 100%, TSRON

Dentro do mesmo contexto a Figura 8.36 apresenta o desempenho do elemento diferencial no plano alfa.

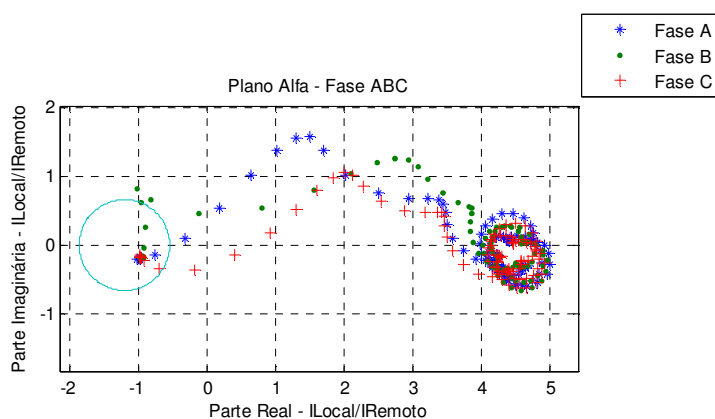


Figura 8.36: Diferencial plano alfa, 100%, TSRON

A Figura 8.37, por sua vez, apresenta as correntes RMS da Fase C para a falta em questão, mostrando a oscilação de corrente medida do lado esquerdo, Barra A.

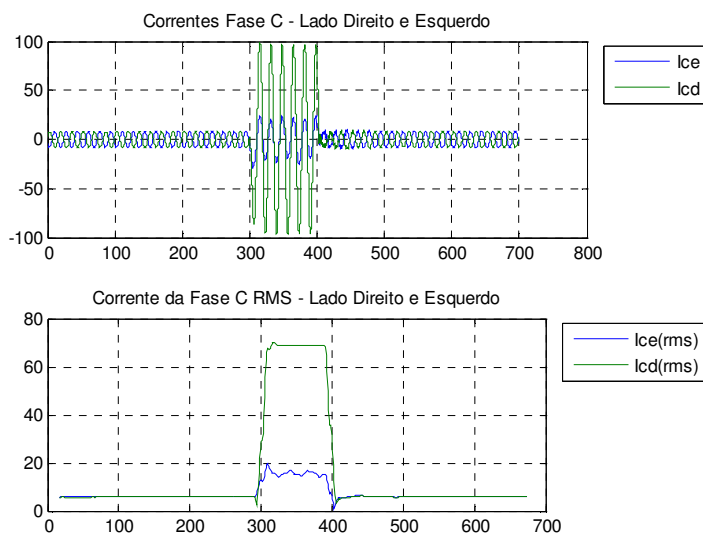


Figura 8.37: Correntes da Fase C, 100%, TSRON

8.2.1.8 Falta na direção reversa, modo TSR ativado

Seja novamente analisar o caso para faltas reversas. A Figura 8.38 mostra o comportamento das formas de onda de correntes e tensões para este tipo de falta.

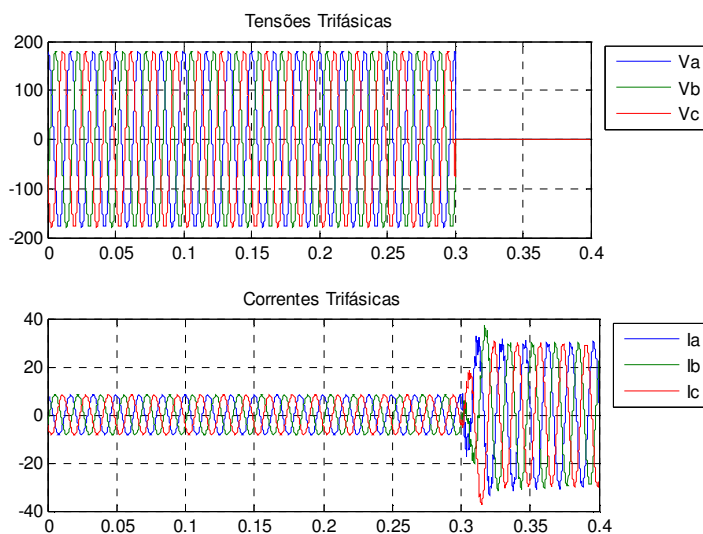


Figura 8.38: Formas de onda de tensões e correntes, Reversa, TSRON

Mesmo para a condição de TSR no modo ativado, o algoritmo de impedância não apresenta dificuldade em identificar a falta na direção reversa, conforme a Figura 8.39, que apresenta o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo DFT de ciclo completo.

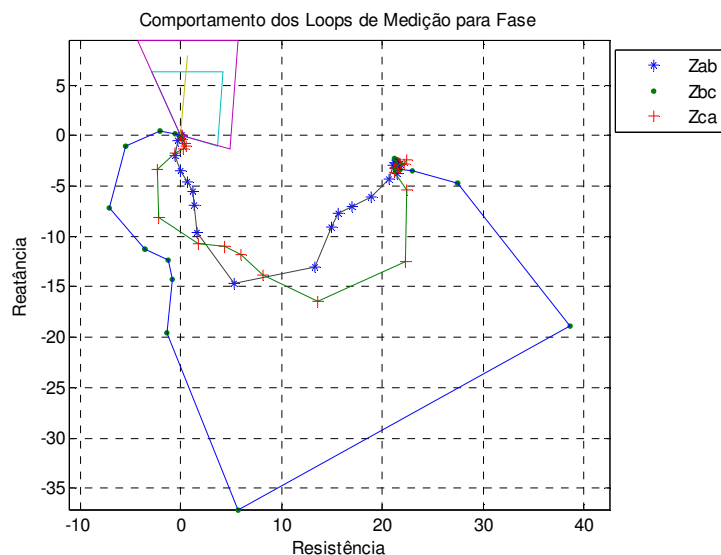


Figura 8.39: DFT ciclo completo, Reversa, TSRON

A Figura 8.40 ilustra novamente o risco de atuação indevida para o caso de falta reversa para a medição através de algoritmo baseado em equação diferencial.

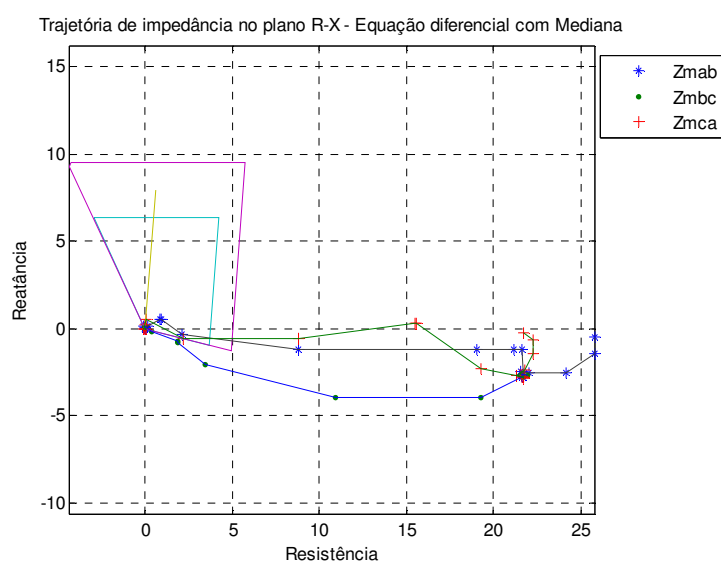


Figura 8.40: Equação diferencial, Reversa, TSRON

Para a falta reversa localizada na Barra A os algoritmos diferenciais de linha não devem operar, tendo em vista que para estes elementos a falta é considerada externa à zona de proteção. A Figura 8.41 mostra o comportamento estável do elemento diferencial representado através do plano cartesiano.

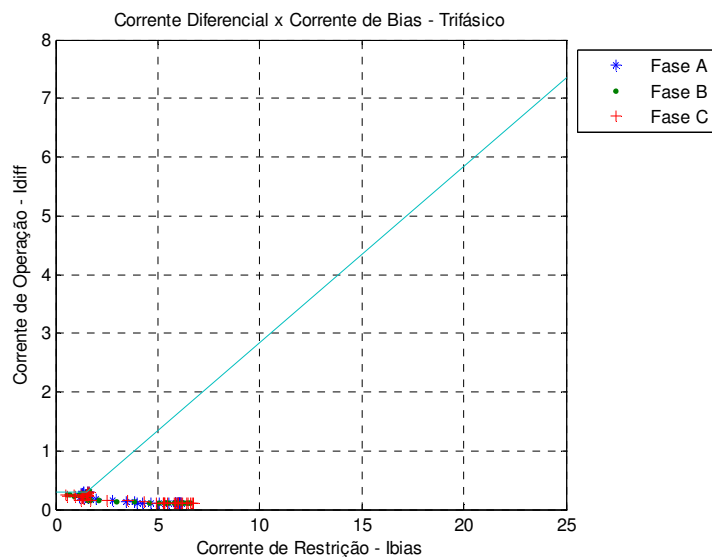


Figura 8.41: Diferencial plano cartesiano, Reversa, TSRON

A Figura 8.42, por outro lado, mostra o comportamento do elemento diferencial no plano alfa.

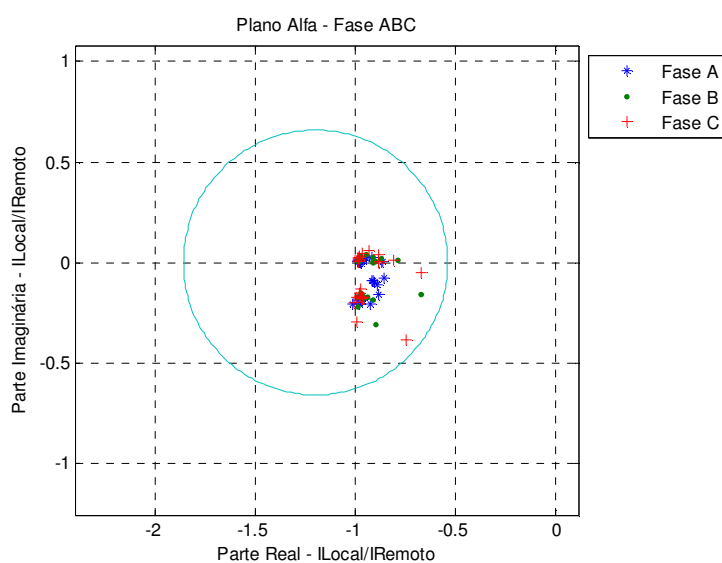


Figura 8.42: Diferencial plano alfa, Reversa, TSRON

8.2.2 Análise de Falhas Monofásicas

Para estas faltas apenas a condição com modo TSR ativado será avaliada.

8.2.2.1 Faltas a 25% do trecho da linha, modo TSR ativado

Seja inicialmente considerar uma falta monofásica localizada a 25% do trecho inicial de uma linha compensada através de um capacitor variável, neste caso um capacitor série controlado por tiristor ou TCSC, com modo TSR ativado. Para esta situação a Figura 8.43 apresenta o comportamento das formas de onda de tensões e corrente.

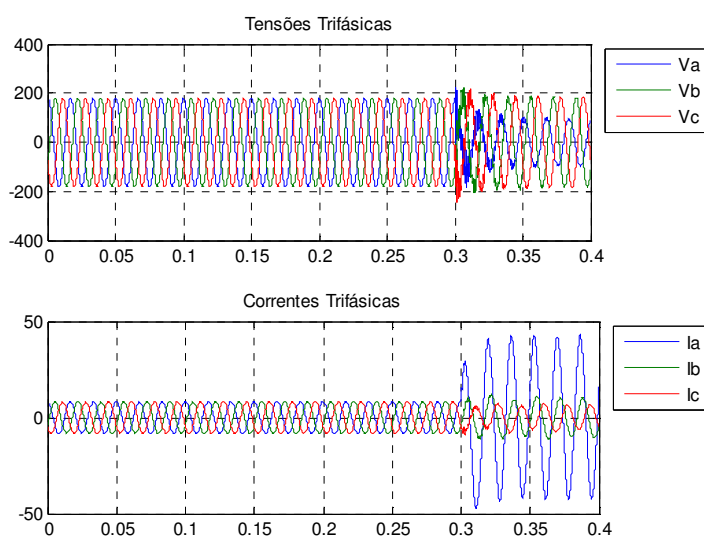


Figura 8.43: Formas de onda de tensões e correntes, 25%

A Figura 8.44 mostra que apesar do tipo de falta ser monofásica, o loop de medição fase-fase pode ocasionar disparo e/ou indicação de falta incorretamente.

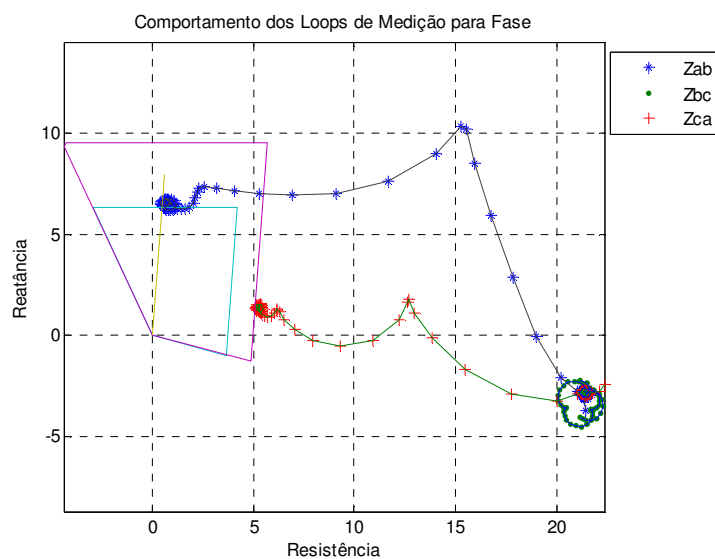


Figura 8.44: DFT ciclo completo, 25%, loop de fase

A Figura 8.45 mostra o comportamento da trajetória de impedância para o algoritmo baseado em DFT de ciclo completo, enquanto que a Figura 8.46 apresenta o resultado equivalente para o algoritmo baseado em modelo de equação diferencial. Para ambos os casos os algoritmos apresentaram bom desempenho.

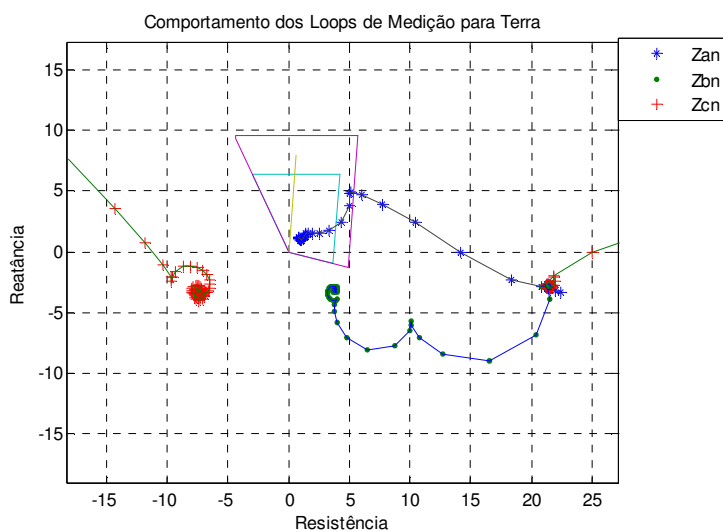


Figura 8.45: DFT ciclo completo, 25%, loop de terra

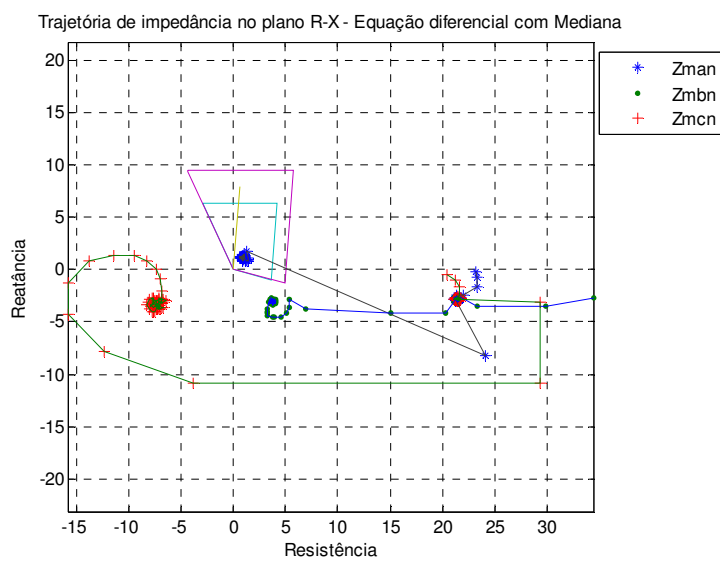


Figura 8.46: Equação diferencial, 25%

Novamente os algoritmos de proteção diferencial de linha apresentaram excelente desempenho, identificando corretamente a fase sob falta, conforme Figura 8.47 para o plano cartesiano e Figura 8.48 para o plano alfa.

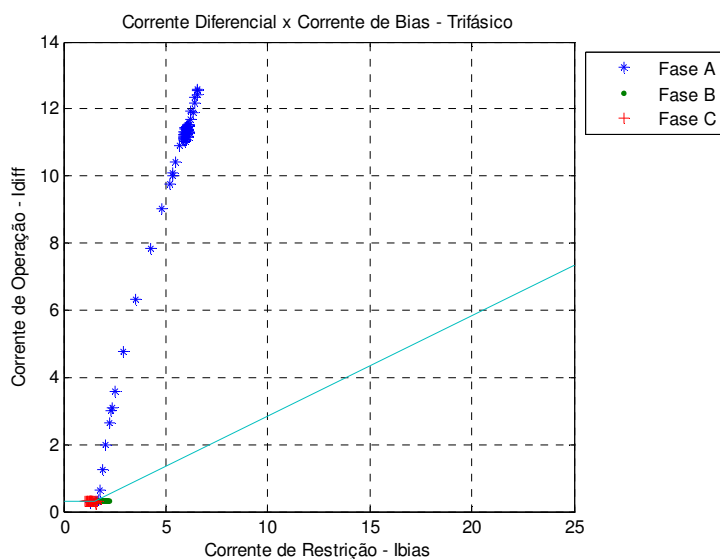


Figura 8.47: Diferencial plano cartesiano, 25%

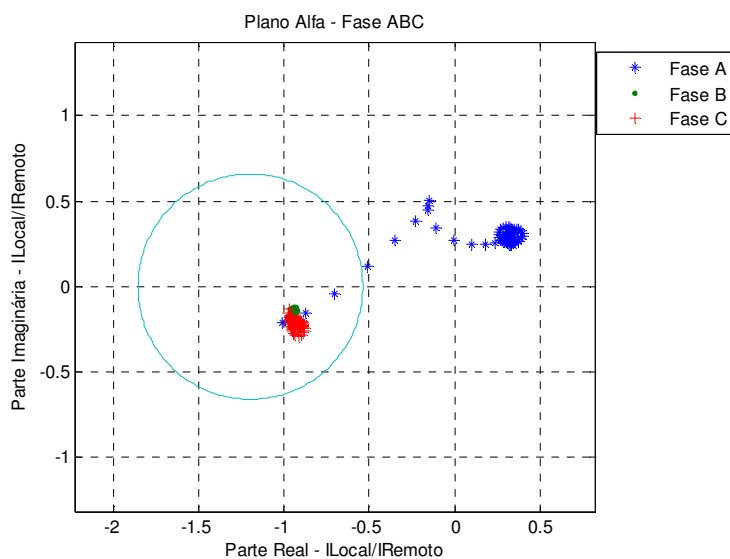


Figura 8.48: Diferencial plano alfa, 25%

8.2.2.2 Faltas a 75% do trecho da linha, modo TSR ativado

Para faltas monofásicas a 75% do trecho da linha observa-se, através da Figura 8.49, que um certo grau de oscilação na convergência final da impedância ocorre, se comparado ao caso de falta trifásica a 75% do trecho da linha, Figura 8.29, em função da influência da impedância de retorno na medição do algoritmo.

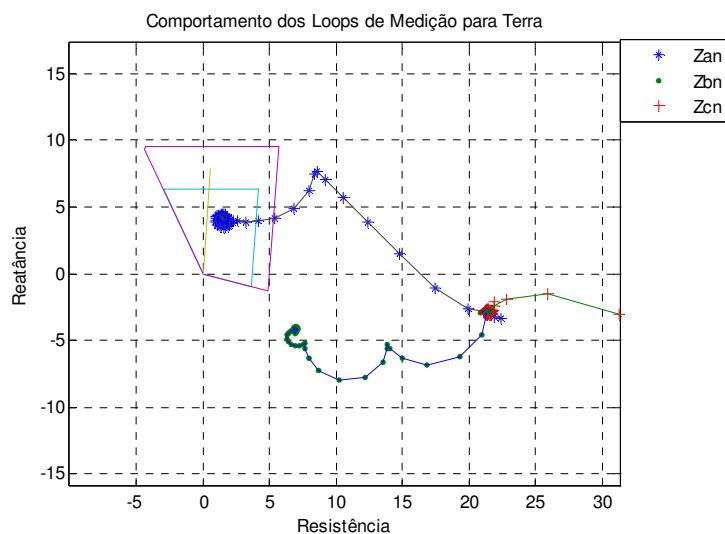


Figura 8.49: DFT ciclo completo, 75%

Situação semelhante pode ser observada para o algoritmo baseado em modelo de equação diferencial, Figura 8.50.

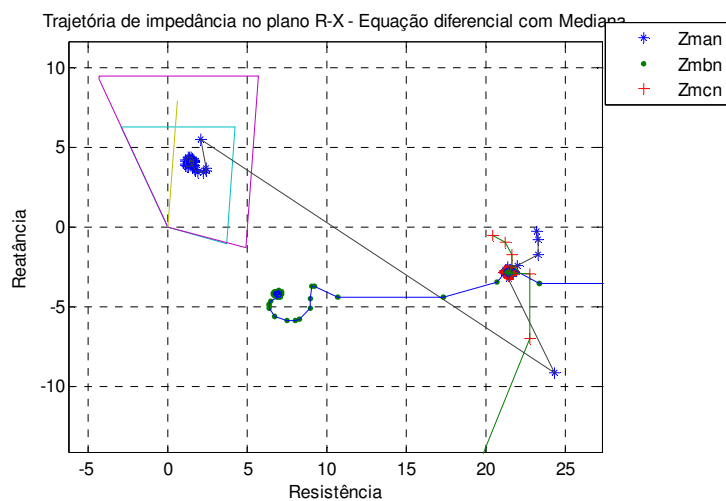


Figura 8.50: Equação diferencial, 75%

Para os algoritmos de proteção diferencial de linha, no entanto, uma vez mais nenhum problema é identificado durante a ocorrência desta falta, de acordo com Figura 8.51 para o plano cartesiano e 8.52 para o plano alfa.

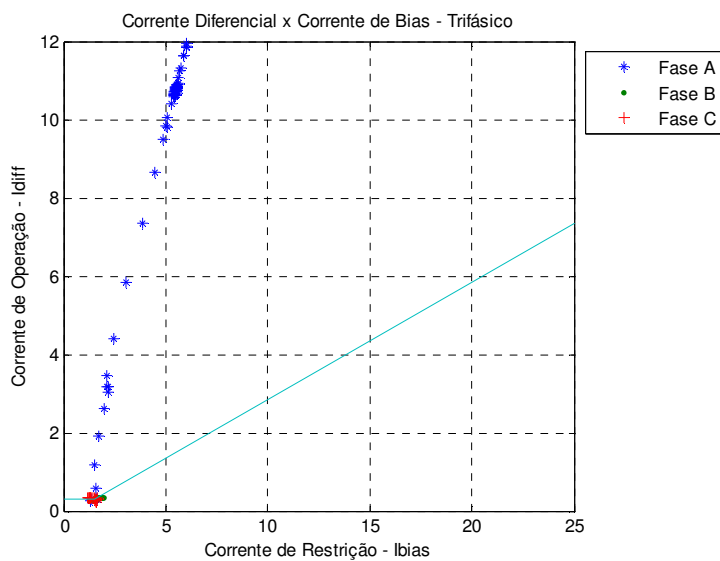


Figura 8.51: Diferencial plano cartesiano, 75%

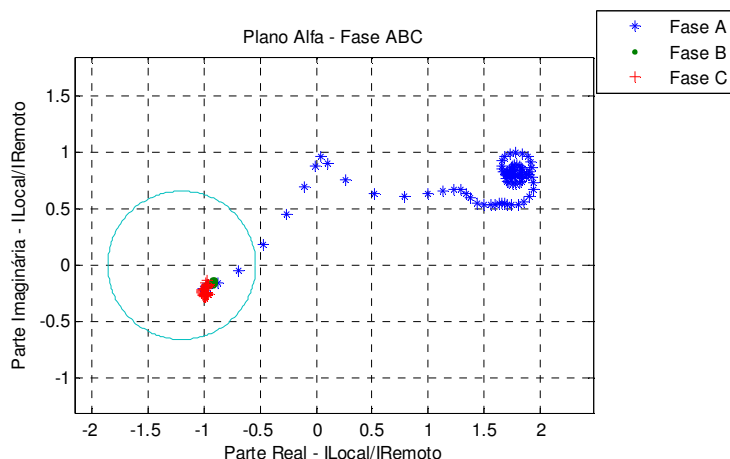


Figura 8.52: Diferencial plano alfa, 75%

8.2.2.3 Faltas a 100% do trecho da linha, modo TSR ativado

A seguir é avaliado o comportamento dos algoritmos numéricos para faltas monofásicas que ocorrem a 100% do trecho da linha, ou seja, no terminal remoto, ou Barra B. Novamente apenas uma condição de falta a 100% do trecho da linha é avaliada, ou seja, apenas faltas anteriores ao capacitor série remoto são analisadas. Não é portanto avaliada a condição de falta imediatamente posterior ao capacitor.

Assim como ocorrido para o caso trifásico, observa-se, através da Figura 8.53, que durante a aproximação final do valor da trajetória de impedância ocorre uma oscilação em torno do ponto de medição de convergência final, devido à atuação do circuito de disparo do TCSC para a dada falta.

Adicionalmente, observa-se pela mesma figura que a Zona 1 irá apresentar sobrealcance para esta falta.

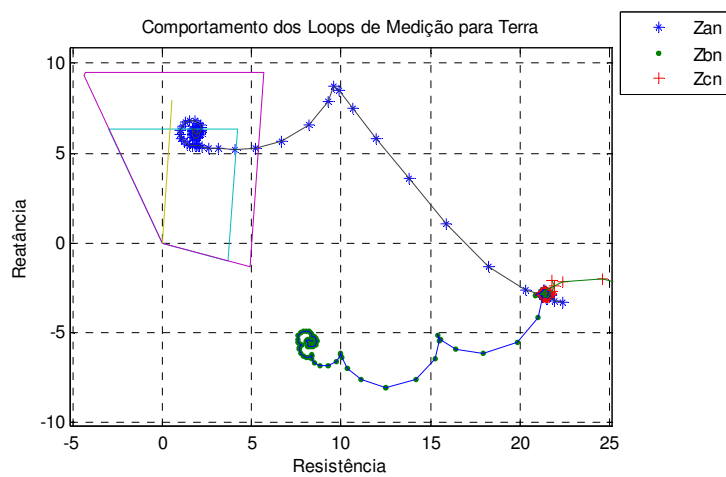


Figura 8.53: DFT ciclo completo, 100%

A Figura 8.54 indica que o algoritmo baseado em modelo de equação diferencial irá apresentar sobrealcançe de maneira semelhante.

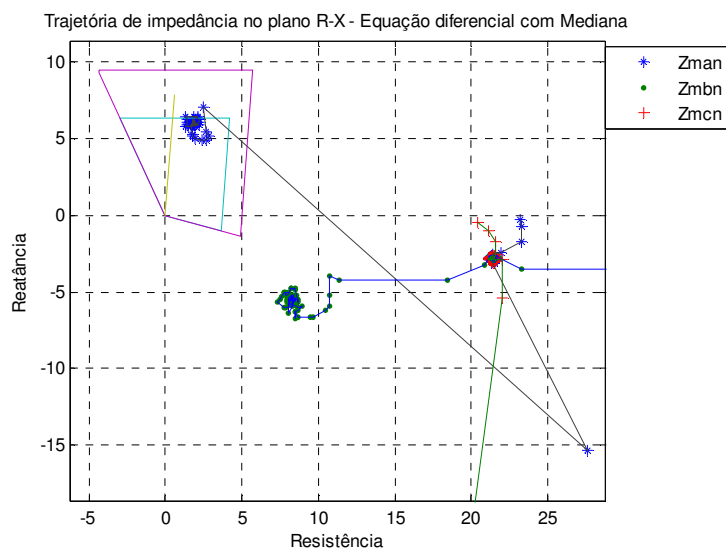


Figura 8.54: Equação diferencial, 100%

Para os algoritmos de proteção diferencial de linha novamente nenhum problema é identificado durante a ocorrência desta falta, de acordo com Figura 8.55 para o plano cartesiano e 8.56 para o plano alfa.

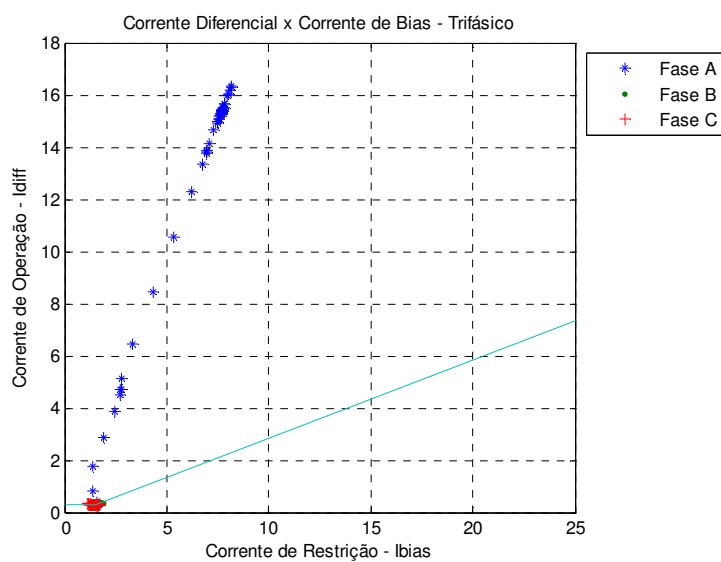


Figura 8.55: Diferencial plano cartesiano, 100%

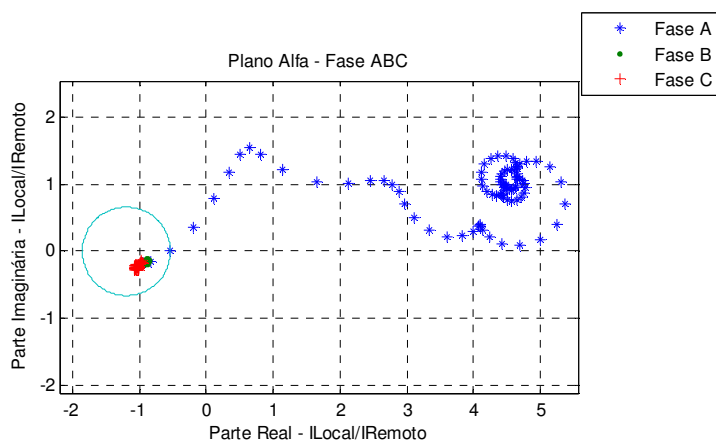


Figura 8.56: Diferencial plano alfa, 100%

8.2.2.4 Falta na direção reversa, modo TSR ativado

As Figuras 8.57 e 8.58 apresentam os respectivos comportamentos das trajetórias de impedância para a falta reversa que ocorre na Barra A. Apesar de todo o movimento espiral dos loops de medição Z_{bn} e Z_{cn} , não ocorre nenhuma aproximação das impedâncias das fases não envolvidas na falta da região de operação do elemento de distância.

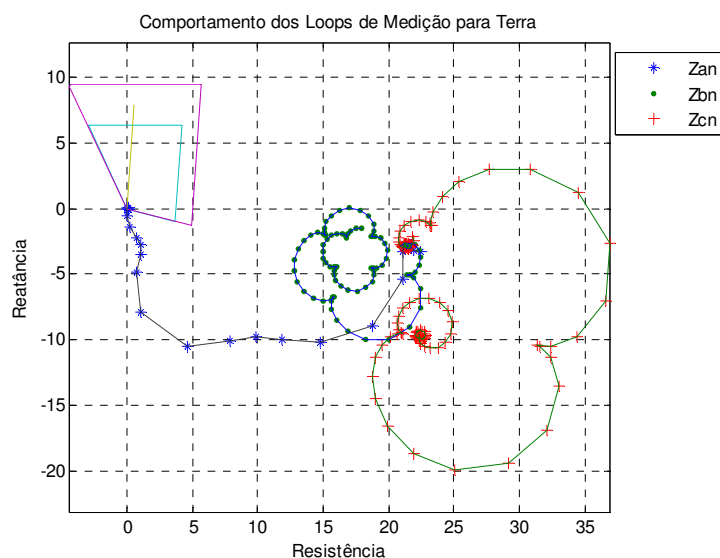


Figura 8.57: DFT ciclo completo, Reversa

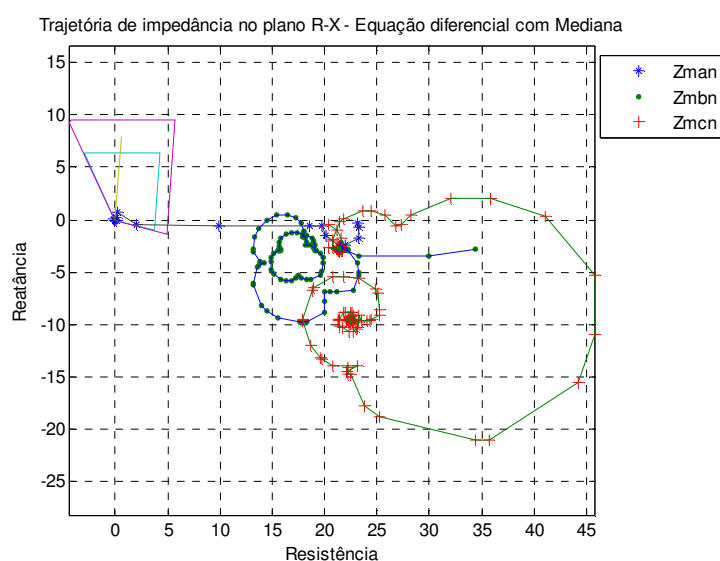


Figura 8.58: Equação diferencial, Reversa

Os algoritmos de proteção diferencial de linha, tanto no plano cartesiano quanto no plano alfa, apresentam novamente excelente desempenho, não operando para esta condição de falta, Figuras 8.59 e 8.60.

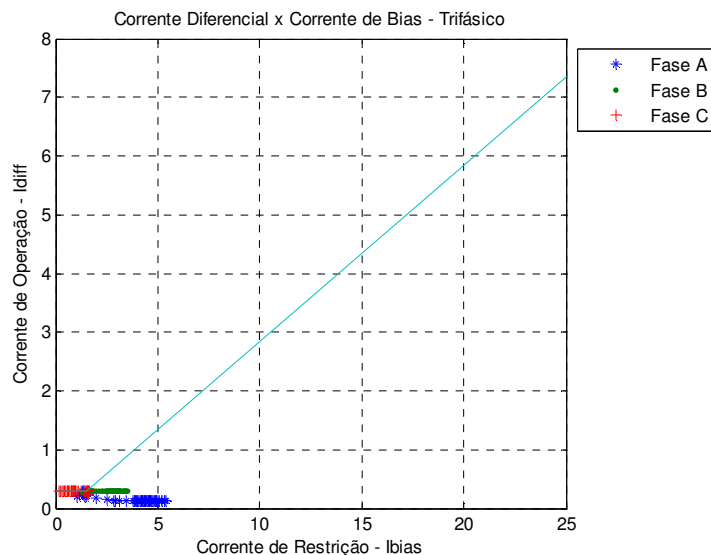


Figura 8.59: Diferencial plano cartesiano, Reversa

As amostras na região de operação ocorrem devido ao modelo de linha ser representado por parâmetros distribuídos e para comprimento longo de linha, conforme já mencionado em itens anteriores.

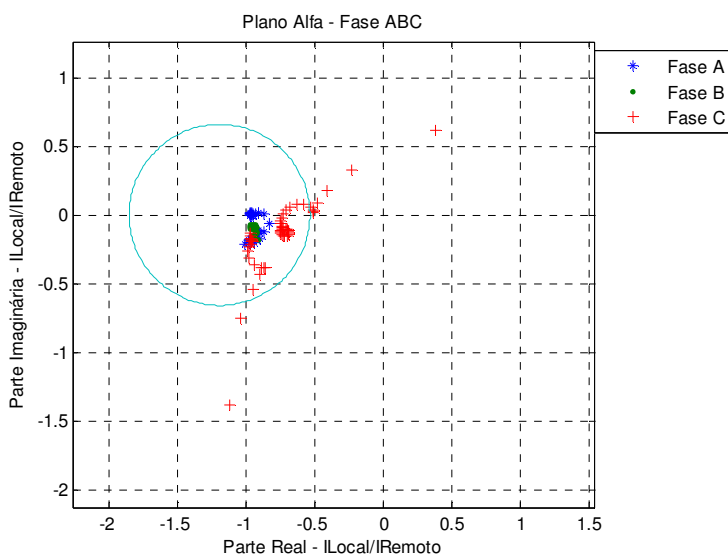


Figura 8.60: Diferencial plano alfa, Reversa

Conclusão

O trabalho apresentou uma avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas de transmissão com compensação série. Foram analisados os seguintes algoritmos: Fourier de ciclo completo e modelo baseado na equação diferencial para função de impedância; e o algoritmo diferencial de linha, sendo este último analisado tanto no plano cartesiano quanto no plano alfa.

Ênfase foi dada ao comportamento dinâmico destes algoritmos mediante resultados gráficos: variação da impedância plotada no diagrama RX, variação da corrente de operação versus corrente de restrição nos planos cartesiano e correntes nos extremos da linha para plano alfa.

No entanto, durante o desenvolvimento dos algoritmos matemáticos constatou-se uma maior dificuldade na implementação do algoritmo baseado em equação diferencial, tanto por seus aspectos de equacionamento quanto pelas poucas informações disponíveis em literatura específica. Vencidas tais dificuldades, verificou-se que o resultado final de desempenho foi mais positivo para este algoritmo, principalmente no que se refere à velocidade de atuação e ao sobrealcance transitório.

Foram inicialmente realizados ensaios em uma linha de transmissão sem a compensação série, Capítulos 5 e 6, a fim de se verificar o comportamento destes algoritmos para uma condição menos crítica do que uma linha compensada. Neste contexto, observou-se que o algoritmo baseado em equação diferencial apresentou um melhor rendimento se comparado ao Fourier de ciclo completo, uma vez que o primeiro apresenta menor influência da componente exponencial em sua medição, além de prover uma convergência mais rápida para o valor final da impedância de falta.

Foi possível observar, através das simulações realizadas, que os algoritmos apresentaram bom comportamento de medição para muitas das condições impostas.

Porém, para alguns casos simulados, principalmente para os algoritmos que são baseados no princípio de impedância, houve nítida dificuldade na medição, conseqüentemente causando desvio em sua trajetória no plano de impedância. Para estes casos, observou-se principalmente a influência da resistência de falta sobre a estimativa da impedância de falta.

Também, foi possível observar que os algoritmos diferenciais de linha, tanto no plano cartesiano quanto no plano alfa, apresentaram os melhores resultados se comparados aos algoritmos de impedância. Em particular, não apresentaram desvio de operação ou grandes erros de medição para todas as simulações realizadas, contemplando as faltas internas ou externas à zona de proteção diferencial, com ou sem saturação dos transformadores de corrente.

Adicionalmente aos aspectos observados no que se refere à verificação do comportamento das medições dos algoritmos, o trabalho permitiu visualizar alguns dos fenômenos descritos na literatura técnica existente sobre o assunto. De forma prática, foi possível monitorar a influência da resistência de falta na medição da impedância aparente e como o seu valor desloca substancialmente o ponto de medição final da impedância de falta para fora ou para dentro das zonas de proteção do elemento de impedância. Além disso, o trabalho permitiu verificar a influência da saturação dos transformadores de corrente na medição de impedância, e como este fenômeno afeta os resultados finais esperados.

Posteriormente, as mesmas simulações para o sistema não compensado foram repetidas para o sistema acrescido da compensação série, Capítulo 7. Neste caso, foi possível observar a influência direta que o capacitor série apresenta na medição de impedância de um algoritmo de proteção. Além do próprio deslocamento da impedância cujo valor é proporcional ao valor da reatância do capacitor, a trajetória sofre grande alteração de sua convergência final. O trabalho permitiu, desta forma, não apenas observar o comportamento dos algoritmos numéricos de proteção para diferentes circunstâncias, mas também compreender melhor os fenômenos associados à aplicação da compensação em sistemas de transmissão, tais como: inversões de corrente e de tensão, sobretensão no banco de capacitor série, atuação do MOV, etc.

Num primeiro momento as simulações realizadas para a linha com compensação série não levaram em consideração o dispositivo MOV de proteção dos bancos de capacitores contra sobretensões. Isto permitiu observar alguns fenômenos destacados na literatura, principalmente o erro imposto ao relé de impedância devido às oscilações de corrente durante faltas na linha de transmissão. Posteriormente, com a adição do dispositivo MOV foi também possível analisar outras questões com destaque para a influência que o MOV exerce na medição da impedância efetiva, aumentando o valor da resistência medida durante sua condução de corrente.

Novamente, e de maneira comparativa, pode-se afirmar que os algoritmos de proteção diferencial de linha apresentaram um melhor desempenho e comportamento que os algoritmos de proteção de impedância, tanto para faltas internas quanto externas, sem ou com a presença de saturação de transformadores de corrente. Como exemplo, as dificuldades experimentadas pelos algoritmos de impedância tais como a dificuldade em detectar a falta para valores elevados de resistência de falta e identificação correta do loop de falta não foram observadas para os algoritmos diferenciais de linha.

Verificou-se, para melhor compreensão, dois tipos adicionais de faltas para o caso da linha compensada, a saber: falta imediatamente anterior ao capacitor e falta imediatamente posterior ao capacitor. Para ambos os casos, o comportamento do elemento diferencial foi satisfatório, não havendo por exemplo os problemas de sobrealcance enfrentados pelos algoritmos de impedância.

Tanto para as simulações de faltas para a linha compensada sem o dispositivo MOV quanto para as simulações com o dispositivo MOV os resultados obtidos para os algoritmos de proteção diferencial de linha foram bastante positivos. Em nenhuma das simulações identificou-se dificuldade dos algoritmos em interpretar as faltas internas e externas.

Por fim, no Capítulo 8, os mesmos algoritmos foram avaliados para uma linha de transmissão que, além dos capacitores série fixos, apresentava um capacitor série variável, ou Capacitor Série Controlado por Tiristor (TCSC, em inglês). Neste caso, a investigação possibilitou avaliar como este dispositivo pode levar a erros de medição. Em particular, foi possível observar que o disparo dos tiristores do TCSC,

para determinadas condições de falta, aumentaram a dispersão dos pontos de medição de impedância na convergência final do ponto de falta, destacado na Figura 8.33. Este fenômeno deve ser conhecido e considerado pelos engenheiros de proteção, uma vez que pode alterar substancialmente o comportamento esperado de medição. Novamente, o trabalho permitiu observar que para os algoritmos de diferencial de linha todos os resultados obtidos foram satisfatórios.

Os assuntos abordados neste trabalho permitem ainda a exploração de diversos outros aspectos diretamente relacionados ao estudo dos algoritmos numéricos perante a compensação série de linhas de transmissão. Desta maneira, podem ser sugeridos para uma abordagem futura, em outros trabalhos, os seguintes temas:

- a. Considerar a eliminação da componente DC através de filtragem especial, antes da forma de onda ser processada pelo algoritmo de proteção DFT de ciclo completo. Isto deve melhorar a convergência final da trajetória de impedância da falta para algumas condições de simulação. No entanto, deve ser avaliado o atraso que esta filtragem adicional irá acrescentar no processo de cálculo de impedância.
- b. Realizar o estudo de outros algoritmos numéricos citados na revisão da literatura deste trabalho, como, por exemplo, o filtro de mínimos quadrados, filtro seno, filtro cosseno, filtro de Kalman, etc.
- c. Avaliar as novas técnicas existentes, tais como Redes Neurais, Lógica Fuzzy e Transformada Wavelet para linhas com compensação série, especialmente para o caso de capacitor série variável.
- d. Verificação de técnicas de proteção adaptativa, que possam melhorar o desempenho da proteção.
- e. Avaliar os algoritmos numéricos de proteção para a presença de outros dispositivos modernos presentes nos atuais sistemas de potência, tais como SVC, Transformador Defasador, etc.

Por fim, vale ressaltar que este trabalho possibilitou a elaboração de artigos técnicos que foram aprovados em importantes seminários e congressos, inclusive de

cunho internacional, demonstrando a relevância do assunto e a qualidade do material gerado a partir das implementações e simulações aqui apresentadas.

ANEXOS

Adaptive distance protection for Series Compensated Transmission Lines

Ricardo Dutra
FURNAS, BRAZIL

Luis Fabiano Wagner Oliveira
ABB, BRAZIL

Murari Mohan Saha Stig Lidström
ABB, SWEDEN

Abstract: A new high speed distance protection scheme for single line to ground faults and multi phase faults for EHV (Extra High Voltage) transmission lines is described in this paper. This scheme also performs well on series compensated lines. The new complementary fast tripping algorithms together with the earlier experienced algorithm and multi-processor based distance algorithm, have led to the development to an adaptive hybrid scheme. This scheme is implemented into a well-proven hardware platform with moderate requirements on the communication. The protection scheme provides high speed tripping (less than one cycle) and high speed signalling. Extensive testing by using EMTP simulations as well as real time simulation with a power system simulator have confirmed the validity of this hybrid concept as a fast, secure and dependable protection scheme. The scheme is in operation for the protection of Series Compensated Lines in some 25 countries around the world.

Keywords: distance relay, high speed hybrid concept, series compensated lines, testing

I. INTRODUCTION

Distance relays can benefit from ideas in the newly developed field of adaptive protection, and can offer an even more selective and sensitive form of protection, under a variety of system configurations. The benefits of installing series capacitors in the power system include increased power transfer capability, improved power system stability, reduced system losses, improved voltage regulation, and the possibility to regulate power flow. Installation of series capacitors, however, introduces challenges to protection systems with regards for both the series compensated lines and the adjacent lines [1,2]. Based on the principle of superimposed transient signals outlined in [3], the first travelling wave relay was developed for commercial use. This relay satisfied the ultra high speed requirements for one cycle fault clearances and has been in service for many years. The drawback however is that it is not based on a continuous measuring algorithm. In order to overcome drawback, the above mentioned method has been combined with an impedance measuring method. It is, not possible to use only one algorithm but rather a hybrid solution with parallel and adaptive algorithms has to be implemented.

This paper explores such a hybrid solution in order to achieve high speed of operation while maintaining high dependability and security.

Verification of the fast measuring algorithms is done by using EMTP/ATP [4], as well as by real time simulation with a power system simulator [5] and with a real time Digital Transient Network Analyser [6]. The results are presented in this paper.

II. DESCRIPTION OF THE NEW PROTECTION SCHEME

Fig. 1 shows the schematic diagram of the new protection that consists of the main distance protection, a fast tripping algorithm for multi phase faults, and a fast tripping algorithm for single phase to ground faults. Besides that there are also different blocks representing the A/D converter circuit board and the logical output CPU. The binary outputs "Trip" and "Direction" are respectively the phase selective tripping and the directional information to be used in the communication scheme.

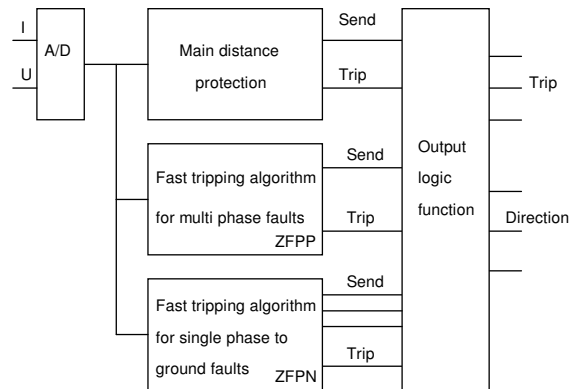


Fig. 1. Block diagram of the new protection scheme.

A. Main distance protection

The main protection function is a full scheme distance protection with three impedance measuring zones, having a quadrilateral characteristic [7], as shown in Fig. 2. The setting for each zone are independent for: reactive and resistive reach, resistive reach for single phase to ground and multi phase faults, zero sequence compensation factor and directionally of all zones.

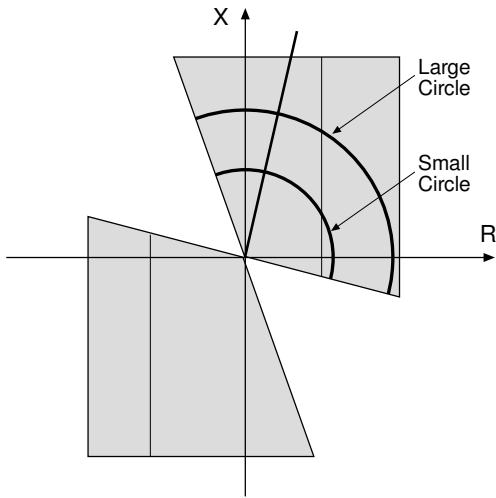


Fig. 2. Fault detection elements and adaptive expanding characteristic.

A filter described in [7] gives initially an underestimation of the current, which increases security of the scheme. The comparison of the currents and voltages gives an impedance circle (small circle in Fig. 2) and the operating time is shorter. The apparent characteristic will increase (large circle in Fig. 2) when the filter factors are adjusted towards a narrower bandwidth and as the estimate of the fault current grows.

B. Theory of operation

The high speed function is achieved by measuring the three phase to ground loops as well as the three phase to phase loops. The trip, in case of three phase faults is issued by the phase to phase measuring loops (operation of one of the loops is sufficient for a three phase trip).

The measurement is of the full scheme type, the three phase to ground loops and the three phase to phase loops are calculated in parallel. In proposed protection scheme, a new set of samples is issued every ms. All calculations are repeatedly performed on each new set of samples and a result is available every ms. The trip as well as the carrier send function require that the operation criterion has been fulfilled during a number of calculation. The results are accumulated in a trip counter.

C. Basic characteristic

The characteristic can be described by the Fig. 2. Due to the transient character of the measuring principle static measurement can not verify the characteristic. Dynamically, it can be verified that within the accuracy no operation will occur outside the characteristic.

The different measuring criterion can be identified in the characteristic and all of them have to be fulfilled for operation.

The characteristic is principally identical for all type of faults. The reactive and resistive reach settings are different for the phase to ground and the phase to phase measuring loops.

D. Fast tripping algorithm for multi phase faults (ZFPP)

The main interest is to gain speed at multi phase faults, close to the relaying point. For such faults, the fault currents are quite high. This provides good measuring conditions and enables faster measurements. This has been achieved by a comparison of the estimated filtered current amplitudes with the corresponding voltage amplitudes, such that

$$I * X_{set} > k * U,$$

where X_{set} is a set reactance, I, U are the estimated current and voltage amplitude respectively and k is a constant suitable for fast tripping.

The presence of zero sequence current prevents unselective three phase tripping at ground faults, where single phase tripping is to be provided by some other means (as for example by using the ZFPN scheme).

The fast tripping algorithm function utilizes fault quantities within one half cycle in order to avoid overreach during subsequent breaker opening transients and other phenomena. This function is supervised with an instantaneous measurement of the phase-to-phase current before an output is issued.

E. Fast tripping algorithm for single phase to ground faults (ZFPN)

This algorithm presents a new approach to the distance protection with adaptive features. It consists of three main parts. One part is for the determination of the direction of a fault utilizing superimposed currents and polarized voltages. The directional function provides a very high speed phase selective signal for directional comparison.

The second part is the determination of the faulty phases. The method of phase selection uses a novel technique utilizing the pre-fault quantities of the voltages and currents. The pre-fault quantities are obtained with help of information from the healthy phases. The phase selection is the most important function to prevent unwanted operation in the unfaulted phases.

The third part is the determination of the fault loop impedance. This is done by using the algorithm (ZI) measures the impedance of the faulted loop by utilizing the line model, neutral model and the fault model. Correlation

and adaptive filter techniques are used in order to improve measuring condition.

The fast tripping algorithm for the single phase to ground fault module, ZFPN, will be described in more detail below. In the equations that follow, sample values will have lower case letters, while amplitudes will have upper case letters. The amplitudes are calculated from voltage and current samples and their derivatives. Superscript “ ’ ” is used to define the time derivatives.

The ZFPN scheme is a further development of the principles introduced in Ultra High Speed protections described in references [3, 8]. The philosophy of the hybrid solution is to enable the fast tripping algorithm to provide a high security and let the main distance protection algorithm improve the dependability. The ZFPN is optimized to give a high speed operation in case of single phase to ground faults and is only activated by the following "ground fault conditions":

- for currents in all phases $\hat{I}_n > 0.40 * \text{rated current}$ and $\hat{I}_n > 0.20 * \text{maximum of differences of phase currents}$ where \hat{I}_n is the amplitude of the sum of the phase currents
- the phase selective function can define only one faulted phase. The measurement is performed during a time window of 15 ms.

As a next step, pre-fault load current and voltage values in a faulted phase are calculated from currents and voltages in unfaulted phases. These values are calculated by using derivatives of current and voltage samples. The pre-fault values are used to calculate superimposed voltage and current (Δ -quantities) in the faulted phase. The phase selection, directional, and distance measurement parts will be described below.

Phase selection (P) - The phase selection algorithm is common for both single phase to ground and multi phase faults. The phase selection is performed by the comparison of changes in the phase to phase currents between phases L1 and L2, L2 and L3, and L3 and L1. The changes in the phase to phase currents are obtained by subtracting the actual fault currents with respective pre-fault quantities. The quantities (changes of currents) should be above certain operation levels in order to indicate the faulted phase. Due to the fact that, the changes in the phase currents can not be measured continuously, the phase selection for all types of faults must be blocked after 15 ms and facilitating the performance of high speed measurement.

Direction (D) - The directional measurement is performed with full cross polarization. The polarizing voltage is taken entirely from the healthy phases. The change in the phase current (Δi_{phase}) is used for the directionality to eliminate the

influence of load current. The change in current is calculated by subtracting the faulted phase current from the respective pre-fault value.

An impedance is calculated for each phase. As for example, for the phase L1, the impedance is calculated by utilizing:

$$u_{L2-L3} / \Delta i_{L1}$$

where u_{L2-L3} is the different of voltages between healthy phases L2 and L3, and Δi_{L1} is the change of current in phase L1.

For the detection of fault in "forward direction" the argument for the calculated "impedance" shall be within -15 to 115 degrees.

Fast zone 1 (Z1) - A zone 1 fault will be indicated if the measured impedance is within the rectangular characteristic defined by the zone 1 settings and if the following condition is satisfies:

$$\hat{I} * (X_{lset} + X_{nset}) > k * \hat{U}$$

This function is similar to the ZFPP scheme described before.

Logic functions - The output from the various ZFPN algorithms are combined in the form of logic output. The internal signals for each phase are: phase selection (*P*), direction (*D*), fast zone 1 tripping (*Z1*) and overreaching zone 2 (*Z2*). Using * as an "and" operator, combinations used to form output signal from the logic as follows:

$$\text{Send} = D * P * Z2 \quad \text{and} \quad \text{Trip} = \text{Send} * Z1$$

The Z2 function is used to limit the reach of *Send*. The directional phase selection function can be used to speed up the main 2nd zone tripping in the remote end. It could also be used in directional comparison if the ZFPN directional functions in both ends are used and compared.

III. IMPLEMENTATION

A. Hardware Platform

Implementation of the new distance protection with fast tripping algorithms has been made in a modular line terminal platform as shown in Fig. 3, that is a part of an automated substation concept. The transformer module, the A/D conversion module, the main processing module, the power supply module, the binary I/O module and the communication module are shown in Fig. 3.

The main processing module can have up to 12 DSPs and one 32 bit CPU (Central Processing Unit). The CPU is used for logic and communication. Fig. 3 also illustrates the signal and information flow as a "pipe-line" within a line terminal. 5 currents and 5 voltages are connected to the A/D converter that has a sampling rate of 2 kHz or 40 samples/cycle in a 50 Hz system. In addition to the phase quantities, the $3I_0$ of the parallel line and the bus voltage are included to allow mutual compensation and synchrocheck. The 2 kHz signal is filtered down to 1 kHz with sliding average filtering. This oversampling technique gives both fast operation and good transient behaviour. Each millisecond, numerical data for 10 analogue (5 voltage, 5 current) are sent to 12 DSPs, which are operating in parallel. This means, a separate continuous measuring micro-processor is used for each main function, which allows for both rapid and complex algorithms, as well as tailor made filtering for each function. The total capacity of the DSPs and CPU is approximately 100 MIPS. The data from the A/D converter is available for all 12 DSPs. Each DSP performs both the specific filtering and algorithm, required for each function. By this architecture each DSP with its software can be seen as one protection function. A program change in one DSP will not affect any of the others. The two modules ZFPF and ZFPN are implemented on one DSP each.

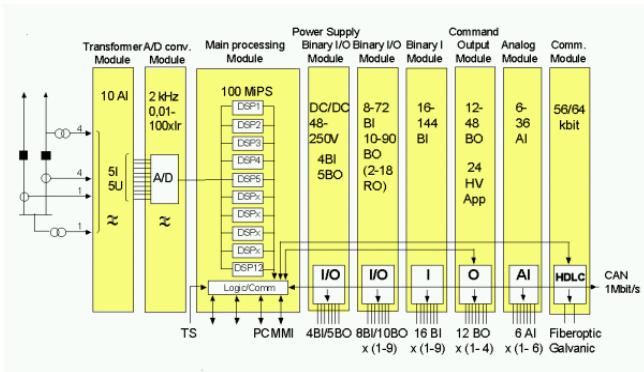


Fig. 3. The protection platform.

B. Software Platform

The software platform is structured in different levels, such as:

- Software incorporating basic elements as start-up routines, self supervision, operative system, etc.
- Functional platform, containing software library for different functions, programmable logic/timers, MMI, etc.
- Product specific configuration.

The application library contains all the basic software modules, which have been developed. It also contains possibilities to connect future modules. The application library for protection, control and monitoring functions are shown in Fig. 4. Each software module corresponds to a

function block. The function blocks for a particular terminal are chosen based on the application requirements. This concept offers the possibility to custom-design the protection and control terminals based on the actual field requirements.

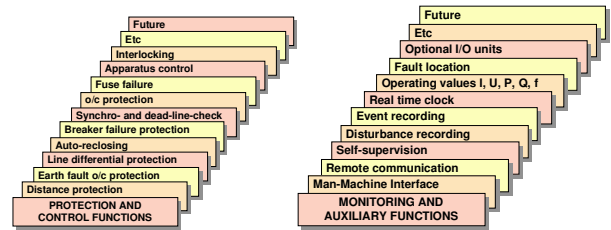


Fig. 4. Protection, Control and Monitoring Functions- Application Library

C. Functional Configuration

The various functions are arranged as individual blocks, that can be combined either as predetermined schemes or custom designed utilising "connectables" as shown in Fig. 5. An output signal from one function can be used as an input signal to another function. The function blocks include all protection functions, tripping and autoreclosing logic, all control functions for apparatus control and interlocking, binary inputs and outputs as well as a logical function library with AND, OR and Time Delayed elements. As an example, each distance zone can be programmed individually and also accessible individually in the logic. External (or internal) signals can be used to block or enable the auto reclosure.

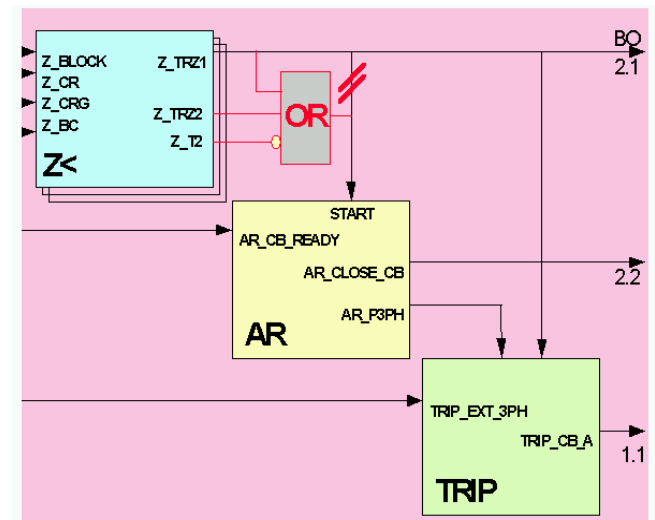


Fig. 5. Programmable logic

For the control functions different software modules are available. For apparatus control the select before execute principle is utilised. The protection and control functions can be integrated in the terminal in a very cost efficient way. To allow the user to take advantage of the configuration

flexibility, a Computer Aided Tool (CAT) for PC is available. The tool CAP 531 is based on the IEC standard 1131-3, and allows the user to configure the terminal using graphic symbols, which makes the handling of the configuration tool very simple.

IV. APPLICATION WITH SERIES COMPENSATED LINES

Series compensation is a method which is increasingly used to allow transmission of heavy load over long distances, with maintained stability. Short clearing time is most important to maintain stability. This is especially true for close in faults. In systems with series compensation, low frequency transients, large phase shifts, current and voltage reversals may furthermore influence the measured quantities. Finally, both protective gaps and MOV will change the voltages and currents used by the protection system.

The fast tripping algorithms proposed in this paper have been accomplished with added features for the protection of series compensated transmission lines. Some of them can be mentioned as follows:

- In order to maintain correct directional discrimination in case of voltage reversal a polarization function is added to the main distance protection. The polarization voltage is based on healthy phase and memorized voltage.
- The directional determination associated with ZFPN scheme utilize superimposed currents and polarizing voltages during a short interval after fault occurrence. It makes it possible to extend the reach of the fast tripping zone regardless of the capacitor presence in the fault loop, since the apparent reactance changes slowly.
- The comparison of the current level with voltage level gives impedance circles (Fig. 2) for close in faults with higher fault current. During this condition the effective compensation is reduced due to the influence of the over voltage protection. This enables the protection to cover a larger position of the protected line.

V. TESTING

Development and evaluation of the new protection schemes has been done within an interactive software environment. The software testing of the protection schemes is accomplished by using EMTP-MATLAB software tools. EMTP/ATP files and recorded data from a real time power system simulator (with a connected disturbance recorder) have been used as input data. To thoroughly evaluate operation of the proposed protection schemes, several network configurations have been simulated [9].

Additional tests have been done using a real time power system simulator [5] and using a real time Digital Transient Network Analyser (DTNA)[6]. The DTNA test was carried out on a 500 kV, 288 km parallel transmission line as shown

in Fig. 6. The transmission line has four (4) series capacitors (each 28 % compensation) which are protected by MOV. A phase to phase fault was initiated at point F3 (aprox. 40% of the total length seen at relay R1, Fig. 6). The protections are placed at both end points (R1 & R2).

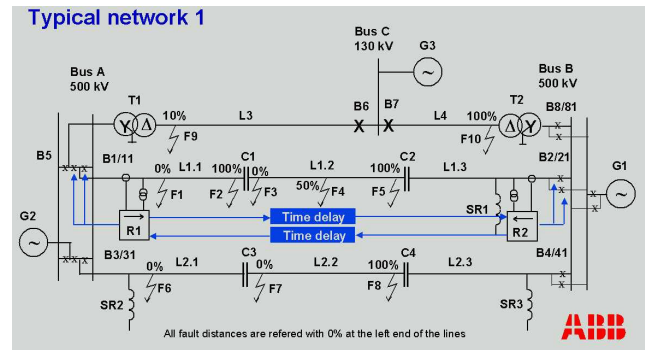


Fig. 6. A parallel series compensated transmission line for DTNA test.

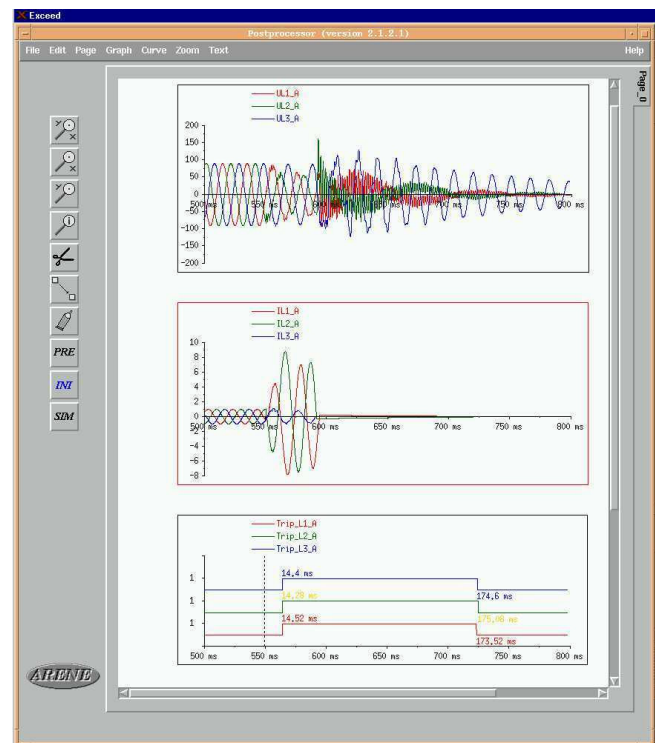


Fig. 7. Phase to phase fault at F3 as in Fig. 6.

The response of the protection as well as voltages and currents at relay point R1 are shown in Fig. 7. The total operate time including output relays is aprox. 14.5 ms. The DTNA tests have confirmed the validity of the high speed protection algorithm presented in this paper.

VI. CONCLUSIONS

This paper describes a new, high speed protection for EHV transmission lines. The presented scheme also performs well on series compensated lines. The protection consists of a main distance protection and fast tripping algorithm for multi phase faults and single phase to ground faults. The fast tripping algorithm for multi phase faults (ZFPP) and for single line to ground faults (ZFPN) are introduced to overcome the effects if the series capacitor installation is present in the fault loop. Comprehensive test results on various test systems and a utility system [9] show the benefits of the proposed schemes. The fast tripping algorithm (ZFPN) that minimizes the fault time in case of single phase to ground faults is described in detail in this paper. The highlights of the scheme are:

- Combination of measuring algorithms provides a solution for a high speed protection for EHV as well as for series compensated transmission lines. The scheme provides a high-speed operate time (typically less than half a cycle). Total protection operate time is less than one cycle.
- The protection can be set to cover up to 70 % of the total uncompensated positive sequence reactance, in case of low resistance faults. Large fault resistance may cause a reduction in the protection reach.
- The scheme is in operation in some 25 countries around the world for the protection of Series Compensated Transmission Lines. The operational experiences are very good.

VII. REFERENCES

- [1] F. Andersson and W. Elmore, "Overview of Series-Compensated Line Protection Philosophies", Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1990.
- [2] J. Cheetham, A Newbould, and G. Stranne, "Series-Compensated Line Protection: System Modelling and Test Results", 15th Annual Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1988.
- [3] M. Chamia and S. Liberman, "Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines- Development, design and application", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-97, No.6, Nov./Dec. 1978.
- [4] Alternative Transient Program(ATP), Rule Book, K.U.Leuven, EMTP Centre, Leuven, Belgium 1987.
- [5] G. Nimmersjö, B. Hillström, O. Werner-Erichsen, and G.D. Rockefeller "A digitally controlled real time, analogue power-system simulator for closed loop protective relaying testing", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 1, January 1988.
- [6] G. Nimmersjö, M.M. Saha, and B. Hillström, "Protective relay testing using a modern digital real time simulator", companion paper to be presented at IEEE PES Winter meeting 2000, Singapore, January 23-27, 2000.
- [7] A. Engqvist and L. Eriksson, Numerical Distance Protection for Sub-transmission lines, Cigré, 34-04, Aug./Sept. 1988.

- [8] G. Nimmersjö and M.M. Saha, "A new approach to high speed relaying based on transient phenomena", IEE-DPSP-89, Edinburgh, UK, April 1989.
- [9] C. Öhlen, J. Esztergalyos, G. Nimmersjö, and M.M. Saha, "EMTP used in testing of a protection scheme for series compensated network", Cigré, Stockholm, June 11-17, 1995.

VIII. ACKNOWLEDGMENTS

The authors extend their grateful acknowledgement to Gunnar Nimmersjö and Leif Eriksson of ABB Automation Technologies, Sweden, for their substantial contributions during basic development of this concept.



VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle
28 de Junho a 1º de Julho de 2005
Rio de Janeiro - RJ

Artigo: ST-1

SOLUÇÕES DE APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Ricardo de Azevedo Dutra^{1*}
 radutra@furnas.com.br

Luis Fabiano dos Santos²
 luis.fabiano@br.abb.com

Guilherme Cardoso Júnior³
 cardoso@ons.org.br

(1) Furnas Centrais Elétricas
 (2) ABB - Relés de Proteção
 (3) ONS - Operador Nacional do Sistema

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade apresentar alguns dos principais problemas encontrados na aplicação da proteção digital de distância em linhas com compensação série, fazendo um mapeamento destes problemas e de suas possíveis soluções, verificando as condições em que são aplicáveis.

O trabalho destaca ainda a importância dos testes e simulações que devem ser realizados antes da instalação de esquemas de proteção para linhas compensadas, permitindo a detecção e a verificação das soluções dos consagrados problemas destas aplicações no sistema de potência.

Palavras Chave: Proteção de Linhas, Compensação Série.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da compensação serie reduz o efeito da reatância indutiva das linhas de transmissão, aumentando a sua capacidade de transporte. Desta forma, apresentam as seguintes vantagens:

- a) Permitem obter uma desejada transferência de potência entre linhas paralelas de impedâncias diferentes;
- b) Aumentam o limite de estabilidade de um sistema para uma determinada potência a ser transmitida;
- c) Podem substituir ou postergar a adição de novas linhas de transmissão ao sistema;
- d) Reduzem a compensação reativa capacitiva no sistema de transmissão, uma vez que geram potência reativa de acordo com a variação da magnitude da corrente de carga.

No entanto, sob o ponto de vista de proteção, estas aplicações provocam uma série de problemas que devem ser criteriosamente analisados e contornados

através da correta aplicação do sistema de proteção e da correta integração do sistema de proteção da linha compensada com o sistema de proteção do banco de compensação série, entre as quais, podemos citar :

- a) Inversões de Corrente ou de Tensão, e as necessidades dos algoritmos de polarização dos relés;
- b) A convivência da proteção com a resistência introduzida pelo “MOV” durante o seu disparo e a conseqüente variação dinâmica da impedância da Linha (XC negativo, reinserção do banco de capacitores, etc), podendo, inclusive, causar sub e sobrealcance das zonas.
- c) Transitórios harmônicos;
- d) Problemas relacionados aos esquemas de teleproteção, incluindo eco, “weak infeed”, infeed e outfeed no sistema, sobretensões transitórias, mútua de acoplamento entre linhas paralelas, “transient blocking”, acoplamento 21/67N, etc.
- e) Atuação do esquema de detecção de “fuse failure”;
- f) Convivência entre as proteções da linha e do compensador, no que se refere às atuações das lógicas de “by-pass”, religamento automático e reinserção.

2. REQUISITOS DO SISTEMA

A aplicação da compensação série tipicamente ocorre em sistemas de transmissão em níveis de alta tensão, geralmente em grandes corredores de transmissão. Nestes sistemas, a atuação de um esquema de proteção de alta velocidade é uma natural exigência, principalmente pelo fato de envolver grandes quantidades de carga e da preocupação em se manter a estabilidade durante distúrbios. Adicionalmente, nestas linhas, é comum a aplicação de disparo e religamento monopolar.

Assim, o desafio para os relés de linha é prover uma proteção confiável, seletiva, segura, de alta velocidade,

com disparo monopolar em redes com fontes fortes e fracas e com circuitos paralelos. Adicionalmente, não devem efetuar disparos indevidos em condições de carga pesada, oscilações do sistema, faltas em linhas paralelas, mesmo com acoplamento mútuo, faltas resistivas, faltas externas em sistemas com fontes muito fracas e/ou fontes muito fortes, durante condições de “bypass” dos capacitores para faltas monofásicas e ainda quando os capacitores estão próximos ao local de instalação dos relés.

Nesse contexto, os projetos, as técnicas de aplicação e os algoritmos dos terminais de proteção devem estar preparados não apenas para os requisitos de alta velocidade de disparo que as condições sistêmicas impõem, mas também devem prover segurança operacional para as situações adversas e especiais que a aplicação em redes compensadas apresentam. Assim, não apenas os algoritmos e funções internas dos terminais de proteção devem possuir alta velocidade, mas também todo o esquema que integra a proteção da linha compensada.

Um requisito quase sempre imprescindível, para o bom desempenho dos sistemas de proteção, é a utilização de esquemas de teleproteção. Assim como o emprego de dois conjuntos de relés redundantes, com o meio de comunicação também redundante. Desta forma, pode-se empregar relés de proteção com tempo de disparo em cerca de um ciclo ou menos para faltas próximas, e permitir um ciclo adicional quando o disparo é realizado com a ajuda do esquema de teleproteção.

Outro requisito altamente recomendável, para a manutenção da estabilidade do sistema, é a utilização de um esquema de falha de disjuntor, devendo os tempos totais de eliminação das faltas serem observados com a mesma importância.

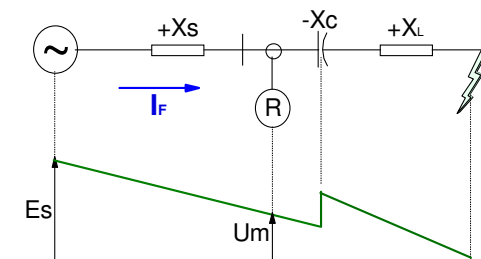
3. PRINCIPAIS PROBLEMAS

As análises dos sistemas de proteção de linhas compensadas indicam que seus desempenhos são dependentes, quantitativamente e qualitativamente, de uma série de fatores, entre os quais podemos citar : a configuração do sistema, a relação entre a reatância capacitiva do compensador série e a impedância equivalente da fonte no ponto de conexão, o carregamento da linha, a localização da fonte de potencial para o relé, o tipo e a magnitude da polarização do relé, a tecnologia e a integração entre as proteções da linha e do compensador, os esquemas de teleproteção utilizados e o esquema de religamento adotado.

Alguns dos problemas mais comuns, com os sistemas de proteção de linhas compensadas, foram selecionados e relacionados a seguir, com suas respectivas análises e, quando aplicável, soluções recomendadas :

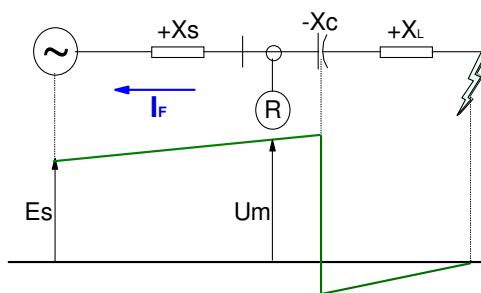
3.1 Inversão de Corrente

Um problema clássico, para as proteções de linhas compensadas, é a inversão de corrente. Considerando o sistema simplificado, representado na Figura 1, pode ser observado que a inversão de corrente ocorre quando a reatância do capacitor série é maior do que a reatância de fonte do sistema, no caso de faltas internas à linha protegida.



(a) $|X_c| < |X_s + X_L|$

$$I_F = -j \frac{E_s}{|X_s - X_c + X_L|}$$



(b) $|X_c| > |X_s + X_L|$

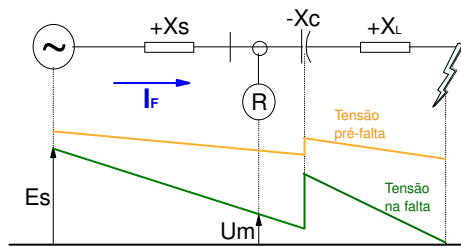
Figura 1 : Sistema com e sem inversão de corrente.

Esta inversão provoca graves problemas para as unidades de distância e direcionais dos relés. Mesmo a utilização de tele-proteção não resolve estes problemas, tendo em vista que os relés das duas extremidades da linha não veriam coerentemente uma falta interna. A única solução proposta para este problema é aplicável por ocasião da fase de especificação e dimensionamento do compensador série, de forma a se evitar que sua reatância seja maior do que a reatância de fonte, no ponto onde o mesmo será instalado. Outra possível solução alternativa pode ser o planejamento de divisão do compensador de uma linha em duas partes, distribuídas em seus dois terminais. Esta alternativa deve também ser analisada sobre a ótica de diversos outros fatores elétricos e econômicos.

Vale ressaltar que, trabalhando favoravelmente para a proteção, nestes casos em que $X_c > X_s$, a corrente de falta deve ser suficientemente elevada para provocar o disparo do gap, eliminando a inversão da corrente, e fazendo com que a proteção opere como nos sistemas puramente indutivos.

3.2 Inversão de Tensão

Outro entre os clássicos problemas, relacionados à proteção de linhas compensadas, é a inversão de tensão. Considerando o sistema simplificado, representado na Figura 2, pode ser observado que a inversão de tensão ocorre quando a reatância do capacitor série é maior do que a reatância da linha até o ponto de falta, ou seja, ocorre para faltas no trecho entre o capacitor e o ponto onde a reatância indutiva da linha se iguala, em módulo, à reatância capacitiva do compensador.

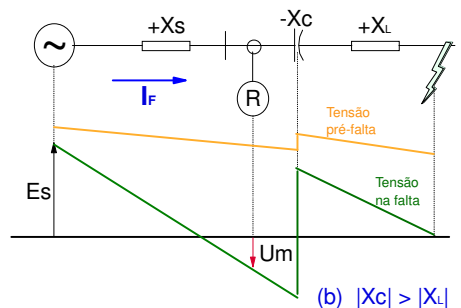


Cons.: $|X_c| < |X_s + X_L|$ (a) $|X_c| < |X_L|$

$$I_F = -j \frac{E_s}{|X_s - X_c + X_L|}$$

$$V = j(-X_c + X_L) \cdot I_F$$

$$V = \frac{E_s \cdot (-X_c + X_L)}{|X_s - X_c + X_L|}$$



(b) $|X_c| > |X_L|$

Figura 2 : Sistema com e sem inversão de tensão.

A inversão de tensão pode trazer graves problemas para as proteções de distância e para os elementos direcionais da linha. No caso da proteção utilizar fonte de tensão localizada no lado da barra, uma falta interna pode ser vista, pelo relé, como externa, e no caso em que sua fonte de tensão está no lado da linha, uma falta externa pode ser vista como interna. Como no exemplo da Figura 2, o relé da linha poderia ver a falta indicada como externa, portanto, não atuando, enquanto o relé de uma linha adjacente poderia ver a falta como interna, desligando incorretamente esta linha sã.

Os relés adequados para aplicação em linhas compensadas utilizam, como solução para este problema, duas alternativas de polarização. A primeira utilizando as tensões das fases sãs como grandeza de referência (polarização cruzada) ou o emprego de

polarização por memória da tensão de fase ou de seqüência positiva pré-falta. Outra solução, que pode ser aplicável somente em alguns casos, é a utilização de circuito de polarização por corrente. A Figura 3 abaixo apresenta estas duas principais alternativas de polarização por tensão :

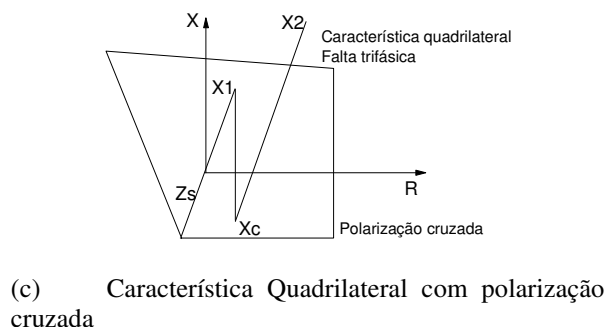
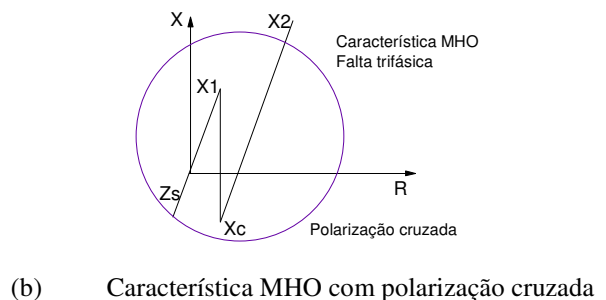
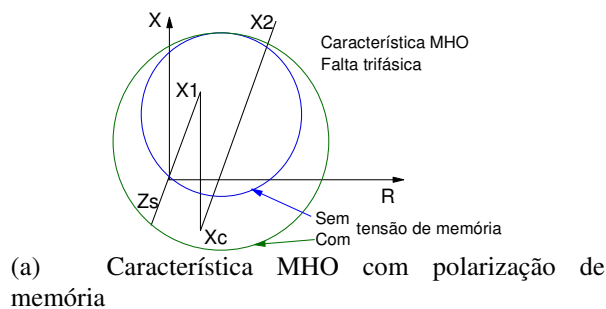


Figura 3 : Alternativas de polarização por tensão.

Outro ponto importante a ser observado é que o pior caso de inversão de tensão, durante faltas internas, ocorre logo após o capacitor, ou seja, na região em que as correntes são as maiores e, portanto, melhores são as possibilidades de atuação do gap, eliminando a inversão de tensão, normalizando as condições de operação das proteções da linha.

3.3 Não Linearidade da Impedância da Linha

Os varistores de óxido metálicos (MOVs) tem sido utilizados, nas últimas duas décadas, para proteção dos capacitores série, contra sobretensões transitórias. A não linearidade dos MOVs provoca nenhuma condução em condições normais do sistema, enquanto que, na ocorrência de uma falta, aumenta a corrente no capacitor, e conseqüentemente, a tensão no mesmo aumenta, iniciando a condução no MOV, com o objetivo de limitar a tensão no capacitor, em um valor abaixo do limite protetivo, que usualmente, se encontra na faixa de 2 a 3 pu.

O MOV é normalmente especificado para suportar energia suficiente para o pior caso de falta externa, em todos os cenários possíveis, permitindo que o capacitor permaneça em serviço nas situações em que ele será mais necessário ao sistema. Um spark-gap em paralelo é utilizado para proteger o MOV quando o limite de energia for alcançado, sendo, por isso, disparado pelo sistema de proteção do compensador.

A característica de operação do gap é, portanto, discreta, ou seja, ele está ou não disparado, eliminando totalmente, ou não, a reatância capacitiva do banco. No entanto, o MOV possui uma característica contínua e não linear, conduzindo dentro de sua faixa, valores de corrente que poderiam causar no capacitor tensões superiores às permitidas, até o valor de disparo do gap. Dentro desta faixa, o valor da impedância da linha estará variando num circuito RLC, dependendo, dentre outros fatores, da corrente que estará nela passando. Este inconveniente para os relés de impedância deve ser contornado através de valores de ajustes de alcance que levem em consideração, inclusive, o by-pass total do banco, pelo gap ou pelo disjuntor do compensador.

A Figura 4 ilustra a condição em que o MOV afeta o valor da impedância equivalente vista a partir do ponto de instalação de um terminal de proteção.

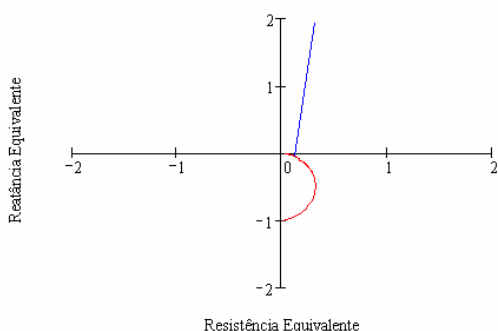


Figura 4: Impedância equivalente

3.4 Alteração nos valores de alcance das Zonas

Este é o problema mais evidente, mas que não deve deixar de ser mencionado.

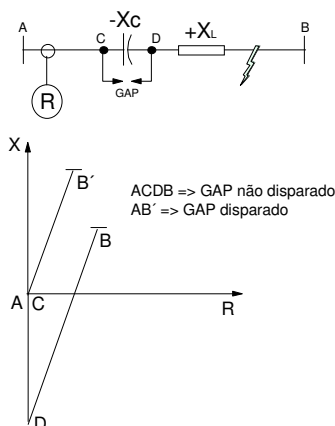


Figura 5 : Impedância vista pelos relés de proteção da linha compensada.

Para evitar o sobre-alcance da zona 1 dos relés de proteção, por exemplo, no caso de se utilizar a fonte de tensão do relé no lado da barra, quando houver uma falta além do terminal remoto, com o capacitor inserido, este alcance deve ser reduzido para evitar descoordenação com a proteção da linha adjacente, como pode ser observado na Figura 5 acima.

Outras compensações de ajuste devem ser observadas nos sobrealances do terminal remoto da linha e nos alcances reversos das linhas adjacentes.

3.5 Transitórios Harmônicos

Quando capacitores série são instalados em um sistema, transitórios de frequência não fundamental são introduzidos nas tensões e correntes durante uma falta no sistema, ou durante determinadas condições de energização de transformadores ou reatores. A combinação capacitância e indutância podem estabelecer um circuito ressonante com frequência na faixa entre 5 e 30Hz. A proteção de corrente sub-harmônica dos capacitores pode vir a atuar e retirar o banco de operação, podendo, ou não, eliminar a ressonância.

O efeito deste transitório é causar uma variação não linear, no tempo, da impedância vista pelo relé.

A impedância segue um percurso espiral, no diagrama R-X, desde o ponto de carga até sua posição final, como observado na Figura 6.

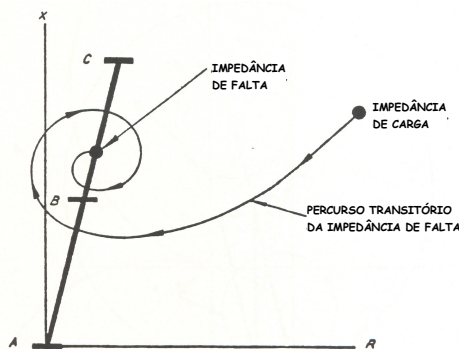


Figura 6 : Transitório da impedância de falta.

Dependendo do valor de compensação, o tempo deste percurso pode chegar à cerca de 100 mseg, podendo provocar aumento de tempo de eliminação das faltas, ou até mesmo perda de seletividade. Devido ao percurso realizado, pode ser provocado um sobrealcançe transitório da zona 1, ou um subalcançe transitório da zona 2, ou até a perda de direcionalidade do relé. Normalmente a solução para estes problemas está relacionada à determinação adequada de seus ajustes.

Outro transitório possível é a geração de altas frequências que ocorre quando do disparo de gaps dos compensadores. Por serem transitórios de alta frequência, normalmente, eles são eliminados pela combinação das filtragens anti-aliasing e das filtragens

digitais dos relés numéricos, não tendo, portanto, nenhum efeito prejudicial ao seu desempenho.

3.6 Esquemas de Teleproteção

Para se alcançar uma boa coordenação entre as funções de proteção de distância e de sobrecorrente direcionais de uma linha, pode ser necessária, em alguns casos, uma adequação do esquema de tele-proteção, inclusive no esquema de bloqueio transitório (transient blocking), para resolver os problemas de convivência entre estas funções, no caso de faltas externas. Principalmente quando houver fonte forte / fonte fraca e quando houver linhas paralelas, alterações de ajustes, adequação dos esquemas e utilização conjugada dos canais de unblocking devem ser analisados.

Um exemplo de cuidados especiais com os esquemas de teleproteção é o caso em que a fonte de tensão da proteção está localizada no lado da linha e ocorre uma energização sob falta na linha paralela. Pode haver dificuldade na detecção de falta reversa pelo relé, não bloqueando o Eco e permitindo que o terminal remoto da linha sã comande indevidamente o disparo.

Outro problema considerável é encontrado quando da ocorrência de uma falta monofásica em um sistema com linhas paralelas, em carga pesada, no qual tanto os relés da linha sob falta, quanto da linha paralela devem operar corretamente, apesar do considerável acoplamento mútuo de seqüência zero, e do desequilíbrio que ocorre durante a abertura da fase sob falta.

3.7 Atuação indevida do Falha de Fusível

Dependendo do tipo de falta, pode ocorrer a ativação da função Falha de Fusível no caso de linhas compensadas próximas de linhas paralelas. Durante uma falta na linha compensada, é possível haver suficiente tensão de seqüência zero, e insuficiente corrente de seqüência zero medida pelos relés das linhas paralelas próximas, uma vez que a corrente de seqüência zero se distribui entre elas.

A medição de tensão de seqüência zero e a não medição de corrente de seqüência zero ativa a função de falha de fusível, que permite o envio de Eco permissivo, indevido nestes casos. Como resultado pode haver disparo indevido das duas linhas paralelas.

O problema pode ser resolvido aumentando-se o ajuste de detecção de tensão de seqüência zero e diminuindo-se o ajuste de detecção de corrente de seqüência zero. Além disso, a configuração de falha de fusível pode ser alterada para incluir Weak Infeed em sua lógica. Outras soluções de projeto podem ser empregadas, caso a solução anterior não seja possível.

3.8 “By-pass”, Religamento e Re-inserção

Como já descrito anteriormente, os capacitores série atualmente empregados utilizam, como proteção, os

varistores de metal óxido (MOV) para sua proteção contra sobretensões, assim como gaps e disjuntores de "bypass" para proteger o MOV quando a energia acumulada ou a corrente de falta ultrapassa os limites seguros de operação. Se ocorrer o "bypass" durante uma falta monofásica apenas o grupo de capacitores da fase sob falta será "bypassado".

Por outro lado, os capacitores das fases sãs irão permanecer em operação, provocando uma corrente de desequilíbrio durante um curto período de tempo após a falta e quando ambos os terminais de linha tiverem religado. Cuidados especiais devem ser tomados, para que os relés de linha não atuem durante este período, antes que a fase do compensador série seja re-inserida.

Em alguns casos, pode ser necessária uma adequação dos esquemas de religamento automático da linha, seja mono ou tripolar, com os esquemas de by-pass temporário ou definitivo, com re-inserção automática.

4. DESCRIÇÃO DE UM ESQUEMA DE PROTEÇÃO

Com o avanço da tecnologia microprocessada, aplicada aos relés de proteção, inúmeros recursos técnicos têm surgido na aplicação destes dispositivos aos sistemas elétricos de potência. Porém, sua aplicação a linhas com compensação série ainda impõe certas condições especiais, abordadas nos itens anteriores, e que devem ser criteriosamente analisadas.

Assim, além da necessidade destes dispositivos serem concebidos com algoritmos de disparo rápido, devem também obedecer aos requisitos específicos para a proteção de linhas compensadas e circuitos de transmissão adjacentes. Devem ainda manter a correta discriminação direcional no caso de inversão de tensão, através de funções de polarização, adicionadas à proteção de distância principal. A Figura 7 apresenta um dos esquemas de proteção adequados a estas redes.

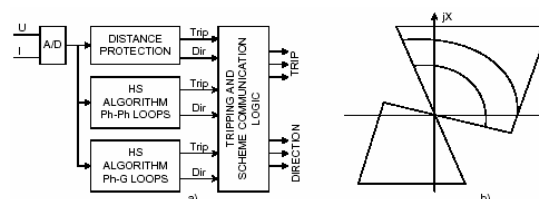


Figura 7: (a) diagrama de blocos
(b) característica de operação composta.

Com os recursos dos modernos relés de proteção numéricos, funcionalidades adicionais podem também ser implementadas ao mesmo hardware, tais como sobrecorrente de terra direcional, esquema de comunicação segregado por fase, conexão direta ao equipamento de teleproteção sem a necessidade de interfaces adicionais, disparo monopolar para os elementos de proteção de terra, operação por fase da zona 1, independente do esquema de comunicação,

operação da zona 2 por fase e com disparo monopolar utilizando-se da lógica de disparo permissivo, com teleproteção incorporando as lógicas de Weak-Infeed com Eco permissivo e disparo local, além de outras funções de proteção que estão disponíveis em terminais multifunção. Podem ainda ser acrescentadas outras funcionalidades tais como lógica de falha de disjuntor, disparo tripolar para as funções de retaguarda, detecção de energização sob falta, etc.

Os terminais de proteção modernos permitem ainda, a programação de lógicas através de portas E, portas OU e temporizadores, entre outros, que tornam possível a concepção de qualquer tipo de esquema. Este recurso permite a reprodução de certos esquemas de proteção pré-estabelecidos e comprovadamente eficazes.

5. TESTES DE SIMULAÇÃO (MODELO)

Uma parte fundamental na aplicação de um esquema proteção, principalmente os esquemas associados a linhas com compensação série, é a realização de testes e comissionamentos operacionais, no intuito, principalmente, de se verificar os ajustes e lógicas internas preparadas para uma determinada linha de transmissão.

Neste contexto, um dos testes mais importantes que podem ser realizados é a simulação em laboratório de transitórios eletromagnéticos em um modelo digital da linha a ser protegida. Para isso, utiliza-se tipicamente a ferramenta ATP/EMTP ou um simulador digital em tempo real (RTDS), para esta finalidade. Isto permite que várias situações de faltas sejam analisadas, e os respectivos dados enviados ao relé de proteção a fim de que seja verificado seu desempenho em cada um entre as centenas de casos de faltas que podem ser simulados.

Pode-se, desta forma, verificar o comportamento do relé para diferentes condições de resistência de falta, de carga do sistema, da influência de linhas paralelas, de oscilações ao longo do sistema, etc. A vantagem em se realizar tais testes é a possibilidade de que problemas operacionais especiais, ou de ajustes e de lógicas, sejam identificados antes da instalação do novo esquema de proteção no sistema.

6. CONCLUSÕES

A utilização de proteções de distância e direcionais, em linhas com compensação série, deve ser analisada criteriosamente, numa vasta diversidade de situações possíveis do sistema elétrico, e coordenadas através de adequados esquemas de tele-proteção, com os terminais remotos da linha compensada e com as proteções das linhas adjacentes a estas.

Atenção especial deve ser dada ao método de polarização dos relés utilizados, para melhor convivência com os problemas usualmente encontrados

nestas aplicações. Experiências têm demonstrado que a utilização de polarização dual pode ser uma alternativa interessante em alguns casos, mas a utilização de polarização singela pode ser capaz de contornar tais problemas descritos ao longo do texto.

Alguns fabricantes vêm aplicando, há alguns anos, proteções numéricas adequadas a linhas compensadas, com funções de proteção de distância e direcionais. Não obstante, as características especiais de alguns sistemas incitaram o desenvolvimento e aprimoramento de algumas estratégias bastante interessantes, apresentadas no trabalho, para que sejam conhecidas e analisadas pelas empresas que possuem esta aplicação para um eventual aproveitamento técnico, apesar das diferenças entre as aplicações e os modelos de proteção utilizados.

As características de concepção das proteções numéricas possuem uma série de ferramentas de análise, com excelentes condições de se otimizar seu desempenho, devendo todo o conjunto do sistema de proteção ser submetido aos ensaios clássicos de modelo, para verificação geral de seu desempenho, nestas clássicas aplicações em linhas compensadas e em linhas do sistema elétrico que sejam adjacentes a elas. Somente desta forma pode-se ter a segurança desta aplicação de proteção, frente aos variados e emergentes problemas de linhas compensadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.Dutra, et al, "Adaptive Distance Protection for Series Compensated Transmission Lines", *IEEE T&D Latin America*, São Paulo, Brazil, 2004.
- [2] W.Elmore, *Protective Relaying: Theory and Applications*, ABB Power T&D Company, Florida.
- [3] G. Ziegler, "Numerical Distance Protection - Principles and Applications", SIEMENS, Publicis - MCD - Verl., 1999
- [4] J. M. Ordacgi Fo, R.M.Moraes, R.B. Sollero, "Efeitos de Diferentes Polarizações no Comportamento das Proteções de Distância de Linhas Compensadas por Capacitores Série", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005.
- [5] CIGRE, "Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations", SC34-WG04, May-1991.
- [6] S.Wilkinson, "Series Compensated Line Protection Issues", GE Power Management.
- [7] "Protection of Network with Series Compensated Lines", ASEA Relay Division, RFA-1981
- [8] R.J.Marttila, "Performance of Distance Relay MHO Elements on MOV Protected Series Compensated Transmission Lines", Ontario Hydro Research, IEEE, Canada-1992.
- [9] G.E.Alexander, J.G.Andrichak, S.D.Rowe, S.B.Wilkinson, "Series Compensated Line Protections : Evaluation & Solutions, Western Protective Relay Conference, October-1988.

Evaluation of Numerical Distance Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines

L. F. Santos and P. M. Silveira

Abstract: This paper is focused on the analysis of numerical protection algorithms applied to transmission lines with series compensation. Particularly, the analysis evaluates the behavior of numerical distance protection relay algorithms. The simulation of the distance algorithm routines is based on two different techniques: the One Cycle Discrete Fourier Filter and the filter based on the Line Differential Equation model.

Keywords: distance protection, line protection and series compensated line.

I. INTRODUCTION

When studying the application of series capacitors in transmission lines, the history will take us to about 80 years ago. At that time, the engineers were already forced to provide more and more energy transmission capacity over long corridors and distances.

However, as expected, problems for the reactive power control has appeared, since the voltage in the receiving end became out of limits during maximum loading conditions. The solution came with the application of the series capacitors banks in the transmission corridor. Since then, the use of the series compensation technique has increased, both in size and type of application, providing better transmission capability, increase of the stability, etc.

Whatever its size and application, an appropriate line protection must be provided, in such a way that faults over the line can be correctly identified and eliminated. Also, the use of the series capacitor may not be restricted to a specific transmission line, but can be applied in other parts of the power system, in the neighborhood of a transmission line to be protected. Again, the line protection must be able to correctly operate for this condition.

The insertion of series capacitors brings other phenomena in which the protection devices should be able to respond correctly. Voltage Inversion, Current Inversion, Sub-harmonic frequencies, etc, are examples of such phenomena, and have been seriously investigated during the last years, resulting in different application strategies and special schemes to counteract them.

On the other hand, the concept of using digital computers for protection relay applications has started about 40 years ago. Since then, a fast development can be observed and

nowadays its application is essential in modern protection schemes and substation automation structures.

In fact, numerical relays are today preferred when either economical or technical issues are taken into account. Among many features, numerical relays can present self-supervision, functional flexibility and adaptive characteristics, and can be easily integrated into substation automation architectures.

In this context, the paper is focused on the need of better understanding the functionalities performed internally within the protection relays; mainly concerning their application in series compensated networks. The main task is, therefore, an attempt to reproduce some of the internal calculations, or algorithms, used in available commercial products. These algorithms are used to estimate electrical quantities that will be checked in order the relay to decide its operation or not (trip decision).

Initially, the mathematical development was restricted to reproduce and test these algorithms in typical non-compensated transmission lines. Later, the same algorithms were evaluated for series compensated transmission lines and the behavior of such routines verified.

Two different algorithms are considered for the distance protection approach: The One Cycle Discrete Fourier Filter and the Line Differential Equation Model.

Besides the better understanding of the internal routines performed by a numerical relay, the simulations and results here presented allow the opportunity of better understanding the behavior and phenomena for the series compensated network transients.

It must be mentioned, however, that although performing many simulations of different algorithms, philosophies and situations for non-compensated and series compensated lines only a few part of them are presented here, since a very big amount of scenarios and possibilities will result.

II. PROTECTION CHALLENGES

The performance of the series compensated line protection depends very much on some of the followings subjects: system configuration, line loading, potential transformer location, polarization of the relay, technology and integration of line protection, teleprotection schemes, autoreclose, etc. Additionally, the protection engineer may face different

challenges for this particular application, which can be mentioned as follows:

A. Current Inversion

A classical problem that may occur in the protection of series compensated lines is the current inversion. The current inversion shall happen when the reactance of the series capacitor is bigger than the reactance of the source, if internal faults in the line are considered. This will cause difficulty for the distance protection to clearly identify the correct direction of the fault.

B. Voltage Inversion

Another classic problem is the voltage inversion. The voltage inversion shall happen when the reactance of the series capacitor is bigger than the line reactance up to the point of fault. This will cause again difficulty for the distance protection to clearly identify the correct direction of the fault.

C. Non-Linearity of the Line Impedance

In order to protect the series capacitor bank against transient over-voltages, the MOV (Metal Oxide Varistors) is typically used. During the normal condition of the power system the MOV is not conducting. When a fault occurs the current in the series capacitor will increase, and so the voltage as well. When this voltage increases, the MOV starts conducting in order to protect the series capacitor.

However, it should be noted that the MOV presents a non-linear behavior, and the distance protection will see the measured impedance as a combination of RLC parameters. It must be mentioned that this behavior depends very much on the level of fault current.

D. Other Challenges

Some other challenges can be listed: sub-harmonic transients, teleprotection schemes, malfunction of the fuse failure detection, bypass of a single-phase series capacitor during an autoreclose sequence and re-insertion of the bank, etc.

III. NUMERICAL ALGORITHMS

In order to evaluate and analyze the behavior of numerical relays, we should implement some of the calculations that these devices fulfill internally. These calculations are known as numerical algorithms, or digital filters, and are responsible for the estimation of the electrical parameters needed to provide the relay with the references for its operation (trip decision) or not.

Among many different algorithms available, for this paper it was decided to implement the One Cycle Fourier Filter and the Line Differential Equation model for the distance protection, both available in commercial products and widely investigated by academic developments.

The paper does not cover any theory and description about distance protection, since these concepts and ideas can be found in many different publications available.

A. Discrete Fourier Filter

This is probably the most used and implemented numerical filter for protection purposes, either for commercial or academic developments. This technique, developed from the Discrete Fourier Transformer, allows the user to determine the spectral content of a periodic signal.

In the One Cycle Fourier Filter, i.e., with a rectangular window of one cycle length of the fundamental component, using N samples per cycle, $[(N/2)-1]$ harmonics can be extracted. The phasor components (fundamental frequency) can be expressed by (1) and (2):

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (1)$$

$$Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (2)$$

The One Cycle Fourier Filter presents good transient response and harmonic rejection. However, it is very much sensitive to non-harmonic components, and will take at least one cycle of the fundamental frequency to reach the steady-state condition.

B. Differential Equation Model

This type of algorithm is based on the system model, instead of the signal model, as previous shown for the Fourier Algorithm.

Using this sort of calculation, the estimation of the line parameters is done through the solution of the differential equation which represents the transmission line, taking into account the values of $i(t)$ and $v(t)$, as in (3).

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

It must be observed that both current and voltage can be measured, but it is not possible to measure the values of the derivative of the current. The algorithms based in the solution of the differential equation are then usually classified in two different groups, which identify the method used to eliminate the measurement of the derivative of the current. These two groups can be mentioned as:

- Elimination of the derivative by integration
- Approximation of the derivative using samples

Depending on the method used, the estimation of the parameters can be accomplished by using three samples of currents and three samples of voltages only, making this algorithm faster than some others, although this short window could be interpreted as non selective compared to others.

However, one of the great advantages of such algorithm is the ability of recognizing the DC component from the fault current, since the differential equation model predicts this component. Therefore, the algorithm will interpret the DC component as a part of the solution of the differential equation, and does not need to treat and process it like a non-expected transient. It should be mentioned, however, that this model does not contain the shunt capacitances of the transmission line, and additional care must be taken for long lines approximation.

C. Other Algorithms

Although not covered in this article, many other filters are available for the application of parameter estimations in power system protection developments. The Mann-Morrison algorithm, the Half-Cycle Discrete Fourier Filter, the Trigonometric Filters (Sine and Cosine Filters), the Least Mean Square Filter and the Kalman Filter are examples of such additional filters.

IV. SIMULATIONS AND RESULTS

In order to verify the behavior of the algorithms developed for this paper, it is important to define a sample of a power system in which some faults will be applied. Fig. 1 shows the model of power system adopted for the simulations. The transmission line is modeled as a typical 440kV line, with distributed parameters, and all the simulations were performed using Matlab/Simulink.

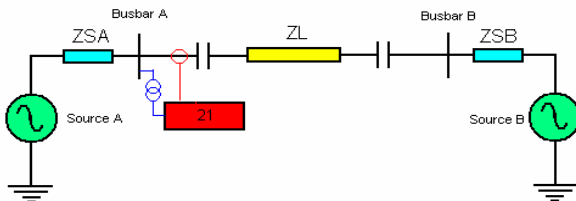


Fig. 1. Simplified power system model

Initially, the algorithms have been tested for a non-compensated transmission line. This is very important, since enable us to verify the behavior of the algorithms for some very known conditions. After that the algorithms can be checked for a more complex situation, including the addition of the series capacitor in both ends of the transmission line.

A. Non-Compensated Transmission Lines

First, the behavior of the algorithms can be verified for a non-compensated system, i.e., the transmission line does not have a series capacitor installed. Different types of faults can be analyzed, including different fault positions along the line, fault resistance values, types of faults (single-phase to earth, three phase and two-phase faults, with and without fault resistances), importing and exporting load conditions, etc. In this paper, for simplification purposes, only some results for three phase faults at 50% and 100% of the line length, with no fault resistance, are presented.

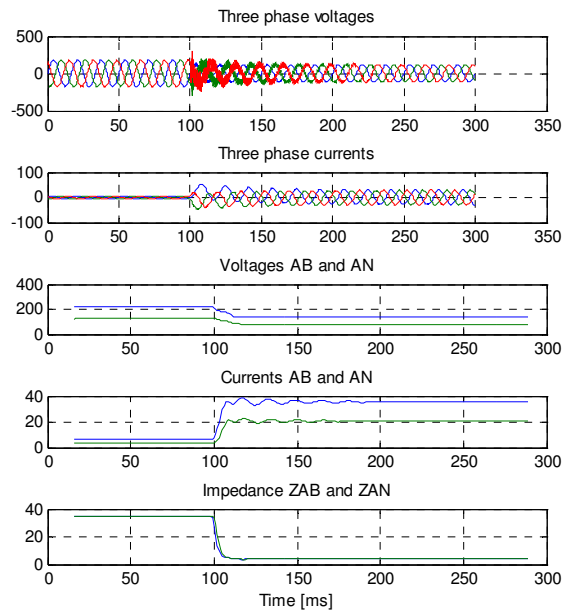


Fig. 2. Waveforms for a three-phase fault – non-compensated line

Fig. 2 depicts the results of calculations over time for the One Cycle Fourier Filter for a three-phase fault at 50% of the line length. It is clear the effect of the distributed parameters model of the line on the voltage analog channels. At this point, it is also interesting to highlight the behavior of the RMS current and the little oscillation due to the effect of the DC component.

Another possible result to be checked is the measured impedance trajectory from the load point up to the fault point, as presented by Fig. 3. A zoom of this figure is presented on Fig. 4, where it is possible to see the effect of the DC component over the impedance results.

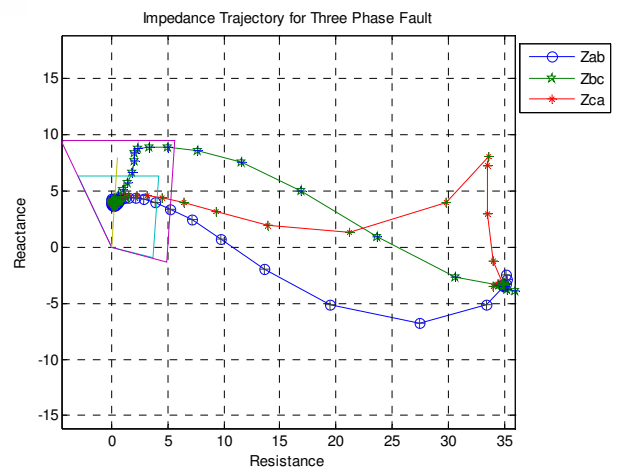


Fig. 3. Impedance trajectory with samples highlighted

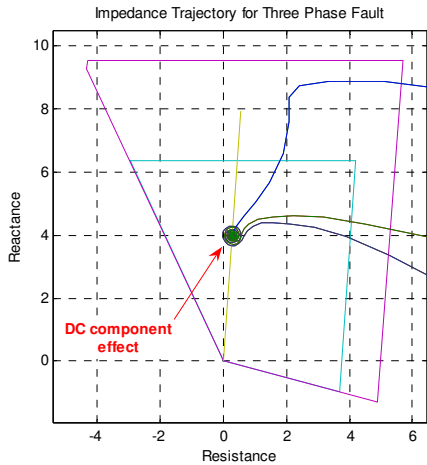


Fig. 4. Final approach to fault impedance value

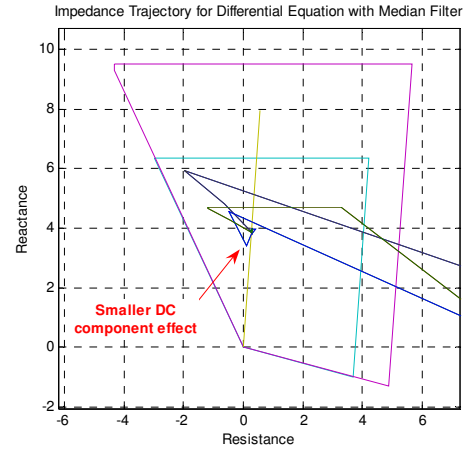


Fig. 6. Final approach to fault impedance value

It must be mentioned that using appropriate filtering the DC component influence can be eliminated. This can be accomplished by using a mimic circuit or digital filtering designed for this purpose. However, here the DC component is not filtered in order the results of the One Cycle Fourier Filter to be compared to the Differential Equation Filter approach.

Fig. 5 shows the results of the impedance trajectory when the Differential Equation algorithm is used to estimate the desired measurements for the same three-phase fault applied before. It is possible to observe through the samples that this algorithm converges must faster than the One Cycle Fourier Filter (Fig. 3).

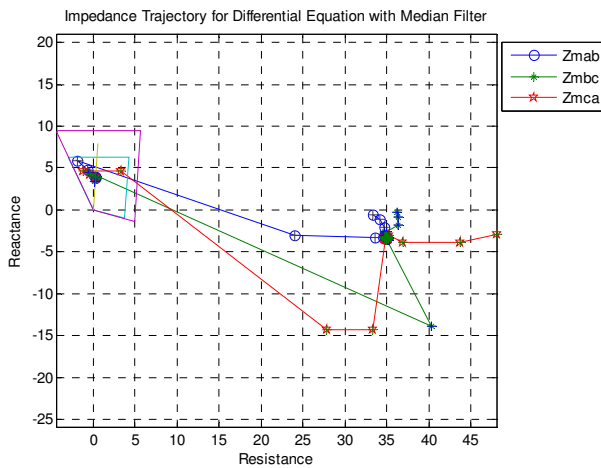


Fig. 5. Impedance trajectory with samples highlighted

We can have a zoom near the final approach for the fault impedance, and better observe the behavior of the impedance trajectory. From Fig. 6, it is evident how the differential equation model can recognize the DC component over the estimation, presenting a more straight convergence of values.

B. Series Compensated Transmission Lines

For the series compensated lines, all the algorithms developed can be checked again, and the results compared to the case where the transmission line was not compensated. The series capacitor is modeled with its overvoltage protection, including the MOV and the Spark Gap devices. Fig. 7 shows the results of the One Cycle Fourier Filter for the series compensated line and a three-phase fault at 50% of the line length.

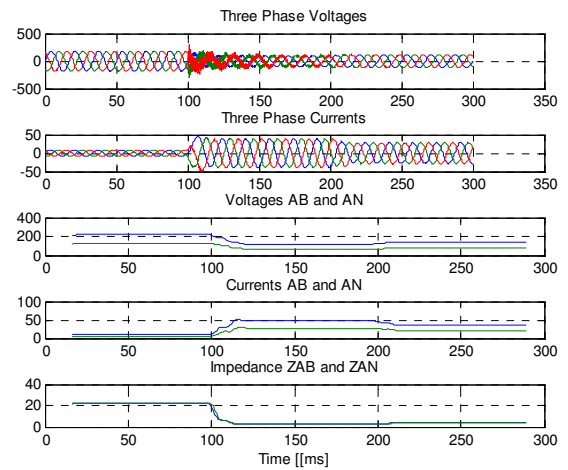


Fig. 7. Waveforms for a three-phase fault – compensated line

It can be observed that at 200ms another event happens, changing the waveforms. The explanation for this new event is the actuation of the Spark Gap, which is used to protect the MOV from excessive energy. Fig. 8 shows the voltage over the series capacitor, the current and the energy dissipated by the MOV during the fault on the line.

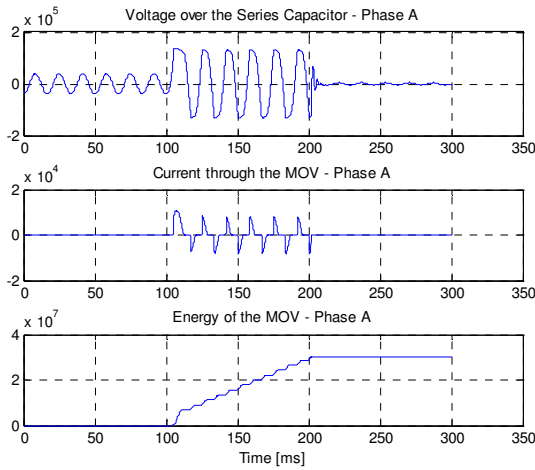


Fig. 8. Protection against over-voltage over the series capacitor

As a result, the impedance trajectory will be affected by the operation of the over-voltage protection, MOV and Spark Gap, and the relay will see a combination of RLC parameters. This phenomenon can be better visualized in Fig. 9.

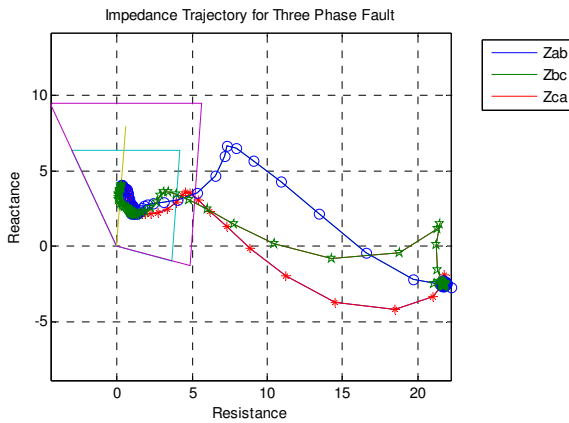


Fig. 9. Impedance trajectory with samples highlighted

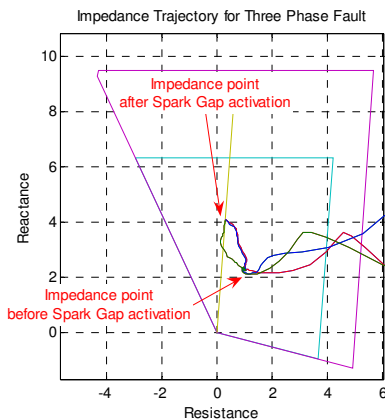


Fig. 10. Final approach to fault impedance value

With the zoom of Fig. 10 it is possible to see that the series capacitor is out of service after the Spark Gap activation and the final impedance is the same as presented by a non compensated line (Fig. 3).

Another possible situation to be verified is a three-phase fault at 100% of the line length, which means that the fault is supposed to be outside the region covered by Zone 1. In this case, for the system presented in Fig. 1, it must be observed the relay will see a total reactance that includes both capacitors at the final ends of the line. This situation will reduce even more the total inductive reactance of the system, and the phenomena observed can be very different from the case presented before.

Fig. 11 presents the results of the impedance trajectory for a three-phase fault at 100% of the line length, and for a series compensated line. It can be observed that the final impedance value measured by the algorithm of One Cycle Fourier Filter is inside the region covered by Zone 1, although the fault is located outside this region.

Indeed, the fault seems to be at 50% of the line length, and additionally it can be observed that some resistance is measured as well, although no fault resistance is simulated for this fault. This fact is explained by the influence of the MOV conducting characteristic, which will affect the total impedance measured by the relay at that point.

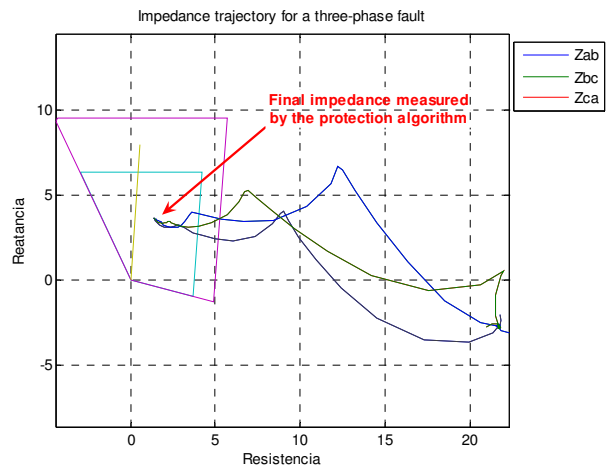


Fig. 11. Impedance trajectory for a fault at 100% of the line

Fig. 12 below shows the impedance trajectory for the same fault at 100% of the line length, but measured by differential equation algorithm.

Fig. 13 shows a zoom of Fig. 12. It can be noted that the final result of impedance is the same as presented by the One Cycle Fourier Filter from Fig. 11. It must be observed that although the differential equation method presents some deviation of sample values during the trajectory evolution, this method converges faster than the Fourier Filter.

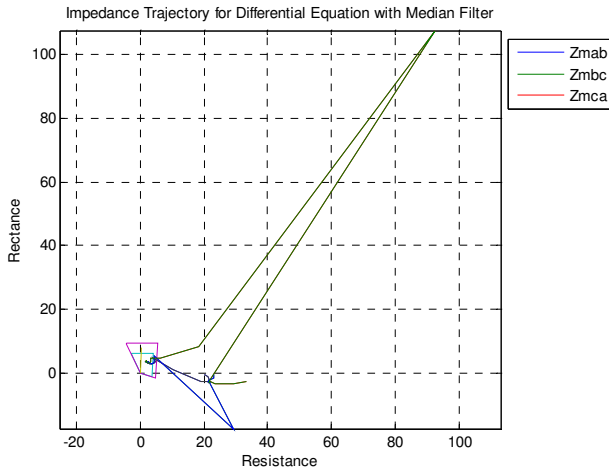


Fig. 12. Impedance trajectory for a fault at 100% of the line

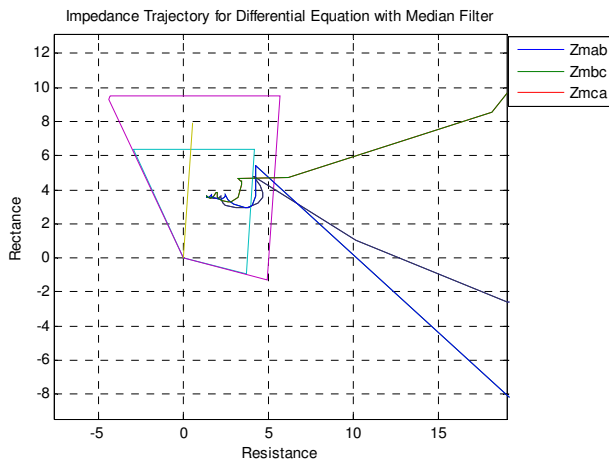


Fig. 13. Final approach to fault impedance value

V. CONCLUSIONS

This paper describes the implementation and analysis of two different distance protection algorithms, the One Cycle Fourier Filter and the filter based on the Differential Equation model, applied to series compensated transmission lines. Both algorithms were firstly applied to non-compensated lines in order to verify the behavior and benefits of each one for certain types of faults.

It was possible to note that for non-compensated lines the Differential Equation approximation will recognize the DC component from the current waveform, since this algorithm interpret this component as a part of the solution of the differential equation. Also, it can be noted that the differential equation model is faster than the One Cycle Fourier Filter.

The development of such algorithms and the application over series compensated transmission lines has also allowed to better understand the phenomena during transients on these lines. Many different scenarios could be simulated, although not all of them are here presented.

Finally, it was possible to verify the influence of the MOV device on the behavior of the measured impedance, including

the effect of the Spark Gap action on the final measured impedance.

VI. REFERENCES

- [1] F. Andersson and W. Elmore, "Overview of Series-Compensated Line Protection Philosophies", Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1990.
- [2] J. Cheetham, A Newbould, and G. Stranne, "Series-Compensated Line Protection: System Modelling and Test Results", 15th Annual Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1988.
- [3] D.L.Goldsworthy, "A Linearized Model for MOV Protected Series Capacitors", IEEE/PES 1986 Summer Meeting.
- [4] IEEE Tutorial Course, "Computer Relaying", 1979.
- [5] IEEE Tutorial Course, "Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication", 1997.
- [6] A.G.Phadke, J.S.Thorp, "Computer Relaying for Power Systems" Reseach Studies Ltd., Taunton, Somerset, England, 2000.
- [7] M.Akke, J.S.Thorp, "Improved Estimates from the Differential Equation Algorithm by Median Post Filtering", Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, IEE, 1997.
- [8] M.Akke, J.S.Thorp, "Some improvements in the Three Phase Differential Equation Algorithm for Fast Transmission Line Protection", Sydkraft AB & Cornell University.

VII. BIOGRAPHY



Luis Fabiano dos Santos was born in Ribeirão Preto, SP, on November 14, 1972. He graduated from the Itajubá Federal School of Engineering (EFEI). He has specialization on Electrical Power System Protection and on Electrical Power Systems, both at post-graduation level.

He worked for Alstom Protection & Control, as protection application engineer, and is currently working for ABB Ltda, Substation Automation Products, as application and marketing engineer.

His main areas of interests are the protection of electrical power systems, simulations of electrical power systems, wide area monitoring and protection, and substation automation.



Paulo Márcio da Silveira was born in Itajubá, Brazil, in 1960. He received his BSEE and MSc degrees from the Itajubá Federal School of Engineering (EFEI), Brazil, and his DSc degree in electrical engineering from the University of Santa Catarina (UFSC), Brazil in 2001.

He is Associate Professor at Itajubá Federal University, where he is also the Power Quality Study Group sub-coordinator. His research interests include Power System Protection and Power Quality issues.

Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines

L. F. Santos and P. M. Silveira

Abstract: This paper is focused on the analysis of numerical protection algorithms applied to transmission lines with series compensation. Particularly, the analysis evaluates the behavior of numerical current differential protection relay algorithms. The simulation of the differential protection algorithm routines is based on two different techniques: the Cartesian Plan and the Alpha Plan approaches.

Keywords: current differential protection, differential protection, line protection and series compensated line.

I. INTRODUCTION

When studying the application of series capacitors in transmission lines, the history will take us to about 80 years ago. At that time, the engineers were already forced to provide more and more energy transmission capacity over long corridors and distances.

However, as expected, problems for the reactive power control has appeared, since the voltage in the receiving end became out of limits during maximum loading conditions. The solution came with the application of the series capacitors banks in the transmission corridor. Since then, the use of the series compensation technique has increased, both in size and type of application, providing better transmission capability, increase of the stability, etc.

Whatever its size and application, an appropriate line protection must be provided, in such a way that faults over the line can be correctly identified and eliminated. Also, the use of the series capacitor may not be restricted to a specific transmission line, but can be applied in other parts of the power system, in the neighborhood of a transmission line to be protected. Again, the line protection must be able to correctly operate for this condition.

The insertion of series capacitors brings other phenomena in which the protection devices should be able to respond correctly. Voltage Inversion, Current Inversion, Sub-harmonic frequencies, etc, are examples of such phenomena, and have been seriously investigated during the last years, resulting in different application strategies and special schemes to counteract them.

On the other hand, the concept of using digital computers for protection relay applications has started about 40 years ago. Since then, a fast development can be observed and

nowadays its application is essential in modern protection schemes and substation automation structures.

In fact, numerical relays are today preferred when either economical or technical issues are taken into account. Among many features, numerical relays can present self-supervision, functional flexibility and adaptive characteristics, and can be easily integrated into substation automation architectures.

In this context, the paper is focused on the need of better understanding the functionalities performed internally within the protection relays; mainly concerning their application in series compensated networks. The main task is, therefore, an attempt to reproduce some of the internal calculations, or algorithms, used in available commercial products. These algorithms are used to estimate electrical quantities that will be checked in order the relay to decide its operation or not (trip decision).

Initially, the mathematical development was restricted to reproduce and test these algorithms in typical non-compensated transmission lines. Later, the same algorithms were evaluated for series compensated transmission lines and the behavior of such routines verified. The protection scheme adopted in this paper is the line or current differential protection algorithm, and the routines implemented reproduce the behavior of this method of protection.

Two approaches are considered for the line differential protection algorithms: the named Cartesian Plan and the Alpha Plan, both based on the One Cycle Fourier Filter. The main purpose of such developments is not to compare the results of both techniques, checking which one is the best, but only to visualize the results for internal and external fault conditions, the behavior of such algorithm for different applications, fault conditions or challenges faced by protection engineers.

Besides the better understanding of the internal routines performed by a numerical relay, the simulations and results here presented allow the opportunity of better understanding the behavior and phenomena for the series compensated network transients.

It must be mentioned, however, that although performing many simulations of different algorithms, philosophies and situations for non-compensated and series compensated lines only a few part of them are presented here, since a very big amount of scenarios and possibilities will result.

II. PROTECTION CHALLENGES

The performance of the series compensated line protection depends very much on some of the followings subjects: system configuration, line loading, potential transformer location, polarization of the relay, technology and integration of line protection, teleprotection schemes, autoreclose, etc. Additionally, the protection engineer may face different challenges for this particular application, mainly regarding the communication that will provide the necessary information to the relays. Also the eventual possibility of current transformer saturation, which may affect the general performance of the differential protection scheme, is of most importance.

A. Communication for Differential Protection

The first challenge when considering the line differential protection is communication, Fig. 1. Historically, one of the most used communication interface between the relays located at the ends of the transmission line was the so-called pilot-wires, generally of shielded copper conductor type. This kind of interface performs the communication by means of electrical connections. The main challenge for this type of interface is related to the integrity of the physical installation, since the electrical wires can be exposed to damages from animals, vandalism, accidents, etc. Also, these communication overhead cables can be exposed to interferences from high voltage transients.

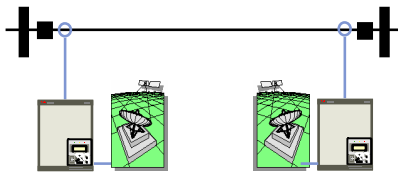


Fig. 1. Line differential protection requires communication

The communication between the relays can also be achieved by means of radio and microwaves facilities. The difficulty here is generally referred to installation of antennas and license to operate over a range of frequency.

Another possibility is the use of the Power Line Carrier, which enables the communication information to propagate over the transmission line through a signal injection. The installation of such schemes is generally high cost, however.

Finally, the modern solution for the communication between protection relays applied to line differential protection schemes is the fiber optic cable. This solution provides a big capacity of data transmission, and is not susceptible to electrical or electromagnetic interferences. Nevertheless, the fiber optic solution is usually very expensive.

B. Current Transformer Saturation

Referring to the line protection itself, the main challenge for the protection engineer is to guarantee a good sensitivity of the protection function and to keep a good safety scheme as well. In other words, whether a fault exists it must be

eliminated as soon as possible. But if no fault exists, the relay must keep itself in silence.

The differential protection function is always preferred, since it defines intrinsically the region of operation, and as a consequence the region of non-operation. Because of that, the operation of the differential protection, in case of a fault, can be instantaneous, and no coordination is necessary to other parts of the system.

However, sometimes the relays can face some difficulty to identify whether the fault is inside or outside its zone of operation. One of the most probable reasons for this situation is the saturation of current transformers. When the saturation of a current transformer occurs, for example during an external fault, a wrong measurement of current will be informed to the relay and a wrong decision can be taken by the differential protection scheme. Most usually the wrong operation will happen for faults outside the operating zone, resulting in a false trip of the protection.

CT saturation conditions must always be verified before the protection scheme is put into operation. Nowadays, on the other hand, most of the numerical relays are able to identify a CT saturation condition and take the necessary actions to avoid the false operation.

III. LINE DIFFERENTIAL PROTECTION

The line differential protection basic principle of operation will compare the currents entering and leaving the protected object. In this context, two basic plans can be used to represent the operating and restraint characteristics and are here mentioned.

A. The Differential Protection in the Cartesian Plan

When considering the differential protection function plotted in the Cartesian plan two basic elements are usually considered: the differential current and the bias (restraint) current. The differential current is the result of the difference between the current entering and the current leaving the protected object and forces the relay to operate. The restraint current is a balance of current, referred to both entering and leaving currents, and forces the relay to restraint. As a result, the operation of the differential element is a compromise between differential current (operation) and the bias current (restraint).

$$I_{diff} = |I_1 - I_2| \quad (1)$$

$$I_{bias} = \frac{|I_1| + |I_2|}{2} \quad (2)$$

Where I_1 is the current entering the differential zone and I_2 is the current leaving the differential zone.

These currents are plotted in the Cartesian plan and the differential characteristic can be defined. The region above the curve of the differential characteristic is related to the operation zone. The region below the curve of the differential

characteristic is related to the blocking or restriction zone. Fig. 2 depicts the differential characteristic curve and the operating and blocking zones.

During normal conditions or outside faults, the resulting point must be below the characteristic curve. But during internal faults, the resulting point will be placed above the characteristic curve. A trip signal will be issued in this case.

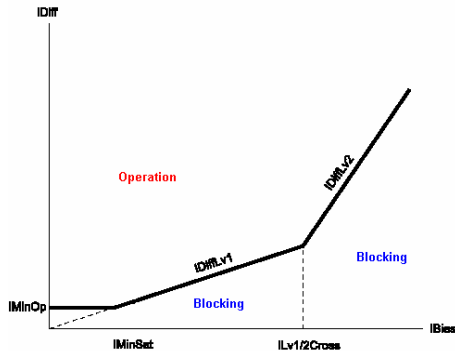


Fig. 2. The Cartesian Plan – Idiff x Ibias

A. The Differential Protection in the Alpha Plan

When considering the differential protection function plotted in the Alpha plan, a complex plan with real and imaginary references is used. This concept was introduced in beginning of the last century and uses the local and remote current measurements to generate the complex values.

In this method the local and remote currents are divided, and the result, a complex number, split. The real part of the number is placed in the x-axis and the imaginary part of the number in the y-axis.

During normal conditions or external faults, the resulting point is placed at (-1,0), considering ideal conditions. However, during internal faults the resulting point will pass through positive values and a trip signal will be issued. A circle in the complex plan represents the operating and the restraint characteristic. Points inside the circle represent the stable condition and the protection is not operating. Points outside the characteristic represent an internal fault condition and the differential protection scheme is operating.

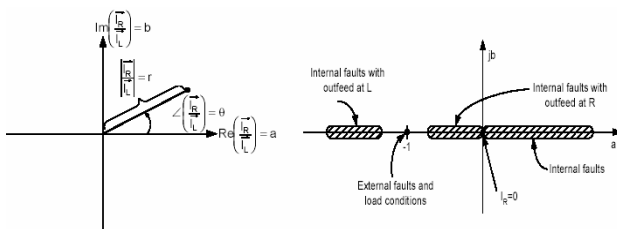


Fig. 3. The Alpha Plan – Real x Imaginary

IV. NUMERICAL ALGORITHMS

In order to evaluate and analyze the behavior of numerical relays, we should implement some of the calculations that

these devices fulfill internally. These calculations are known as numerical algorithms, or digital filters, and are responsible for the estimation of the electrical parameters needed to provide the relay with the references for its operation (trip decision) or not.

A. Discrete Fourier Filter

This is probably the most used and implemented numerical filter for protection purposes, either for commercial or academic developments. This technique, developed from the Discrete Fourier Transform, allows the user to determine the spectral content of a periodic signal.

In the One Cycle Fourier Filter, i.e., with a rectangular window of one cycle length of the fundamental component, using N samples per cycle, $[(N/2)-1]$ harmonics can be extracted. The phasor components (fundamental frequency) can be expressed by the following (3) and (4):

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3)$$

$$Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (4)$$

The One Cycle Fourier Filter presents good transient response and harmonic rejection. However, it is very much sensitive to non-harmonic components, and will take at least one cycle of the fundamental frequency to reach the steady-state condition. In this paper, the One Cycle Fourier Filter is implemented for the line differential algorithm purposes, both for the Cartesian and Alpha plan.

C. Other Algorithms

Although not covered in this article, many other filters are available for the application of parameter estimations in power system protection developments.

V. SIMULATIONS AND RESULTS

In order to verify the behavior of the algorithms developed for this paper, it is important to define a sample of a power system in which some faults will be applied.

Fig. 4 shows the model of power system adopted for the simulations. The transmission line is modeled as a typical 440kV line, with distributed parameters, and all the simulations were performed using Matlab/Simulink.

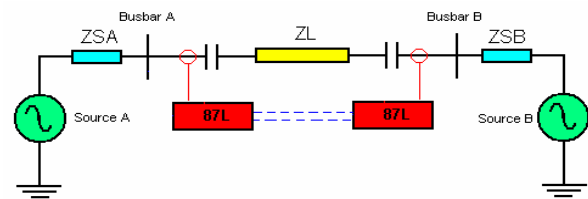


Fig. 4. Simplified power system model

Initially, the algorithms have been tested for a non-compensated transmission line. This is very important, since it gives the possibility of verifying the behavior of the algorithms for some very known conditions. After that the algorithms can be checked for a more complex situation, including the addition of the series capacitor in both ends of the transmission line.

For the line differential protection algorithm, the simulations do not consider any communication delay between the line ends. In this case, samples are considered to be synchronized.

A. Non-Compensated Transmission Lines

First, the behavior of the algorithms can be verified for a non-compensated system, i.e., the transmission line does not have a series capacitor installed.

Different types of faults can be analyzed, including different fault positions along the line, fault resistance values, types of faults (single-phase to earth, three phase and two-phase faults, with and without fault resistances, importing and exporting load conditions, etc. In this paper, for simplification purposes, only some results for three phase faults at 50% and 100% of the line length, with no fault resistance, are presented.

Fig. 5 depicts the results for the RMS differential current calculation for a three-phase fault at 50% of the line length, where it can be observed the transient behavior due to the DC component effect.

It must be mentioned that using appropriate filtering the DC component influence can be eliminated. This can be accomplished by using a mimic circuit or digital filtering designed for this purpose. However, in this paper the DC component is not filtered and the results can be verified also for this condition.

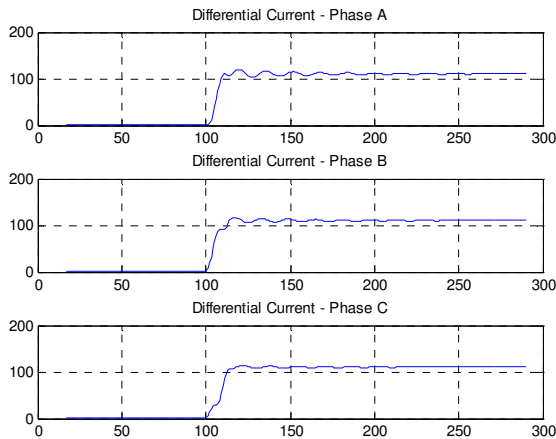


Fig. 5. RMS differential currents for a three-phase fault

Fig. 6 shows the samples transition for the three-phase fault at 50% of the line length in the Cartesian plan. From this figure it is possible to verify that the differential protection algorithm will not have any difficulty to identify the fault, and the operation will certainly occur.

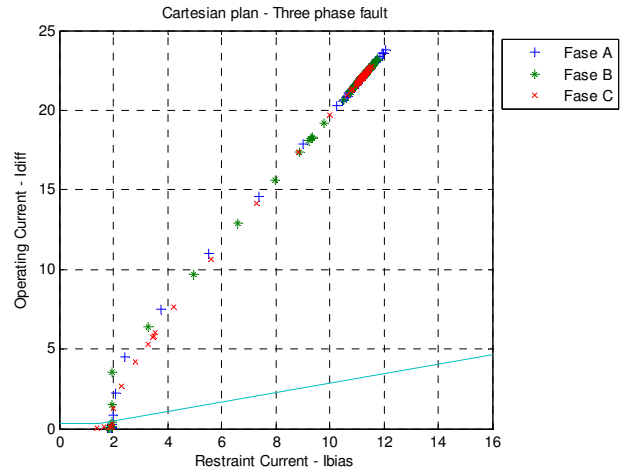


Fig. 6. Three phase fault in a non-compensated transmission line

Initially the samples are below the differential curve or characteristic. It represents the period of load condition before the fault condition is applied. During this period of time the current entering and leaving the protection zone is equal, and the differential current is zero.

After the application of the fault condition, the samples will propagate to the operating region, since the fault applied is internal to the protection zone.

Fig. 7, on the other hand, presents the results for the same fault as shown in Fig. 6, but with the samples transition in the Alpha plan. Once again it is possible to verify the good behavior of the line differential protection algorithm in case of internal faults for non-compensated transmission lines.

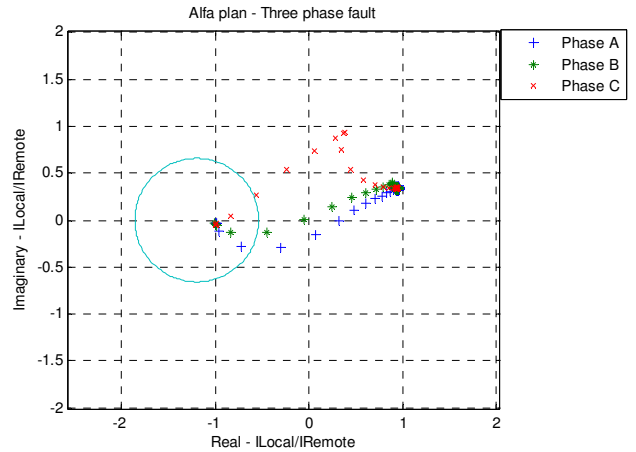


Fig. 7. Three phase fault in a non-compensated transmission line

B. Series Compensated Transmission Lines

For the series compensated lines, all the algorithms developed can be checked again, and the results compared to the case where the transmission line was not compensated. The series capacitor is modeled with its overvoltage protection, including the MOV and the Spark Gap devices. Fig. 8 shows the results of the One Cycle Fourier Filter for the

series compensated line and a three-phase fault at 50% of the line length in the Cartesian plan.

The line differential protection algorithm does not show any difficulty to identify correctly the internal fault. For all simulations the presence of the series capacitor, the MOV and the Spark Gap devices did not affect the good performance of the differential protection scheme, including different positions of the fault point over the line length.

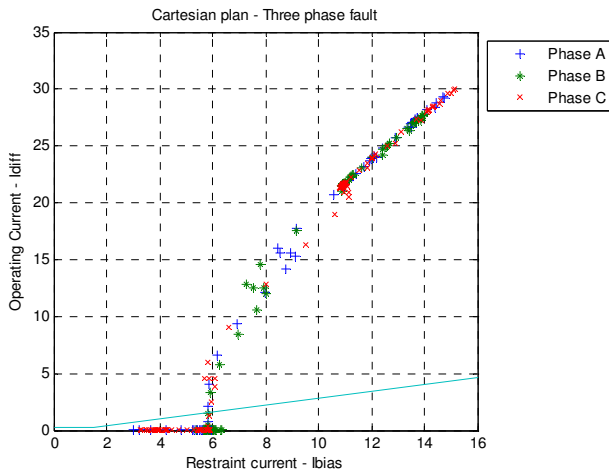


Fig. 8. Three phase fault in a compensated transmission line

The results for the Alpha plan are presented in Fig. 9. It can be realized the transient behavior from the load condition (-1,0) to the fault point. The condition inside the circle represents the restraint characteristic and the condition outside the circle represents the operating characteristic.

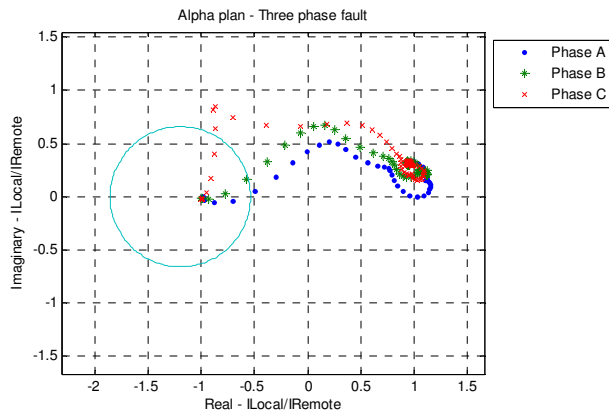


Fig. 9. Three phase fault in a compensated transmission line

The line differential protection scheme must remain stable for all external fault conditions. Fig. 10 depicts the results of a three-phase fault at 100% of the line length for the Cartesian plan representation. It can be observed that the differential protection is stable for the external fault and the presence of the series capacitor does not affect substantially the transient behavior over the time. The samples are all below the operating characteristic and no trip will be issued for this condition.

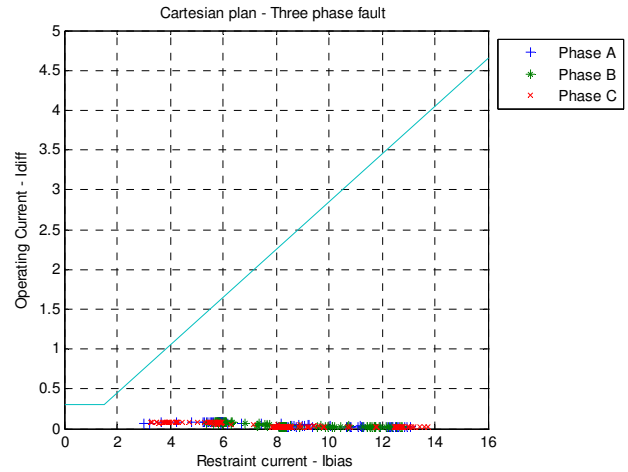


Fig. 10. Three phase fault at 100% of a compensated transmission line

In the Alpha plan the external fault simulation result can be observed by Fig. 11. The samples remain inside the circle for the three-phase fault condition at 100% of the line length. No trip is issued for this condition and the protection scheme is stable.

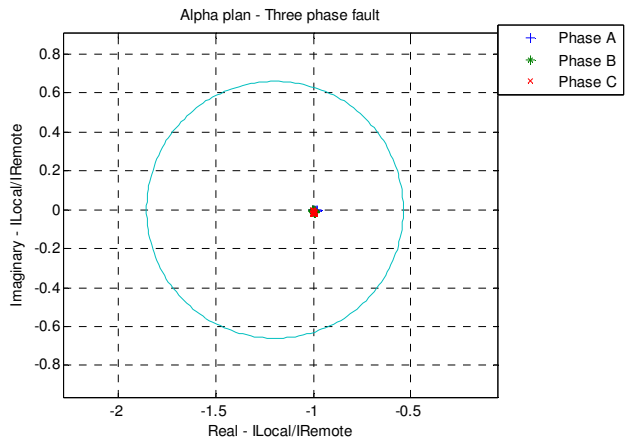


Fig. 11. Three phase fault at 100% of a compensated transmission line

C. Non-Compensated Transmission Lines with CT Saturation

In order to evaluate the differential protection algorithm for different challenges, the current transformer saturation was considered as well. For this case, the non-compensated transmission line model is used and an external fault at 100% of the line length applied. The main purpose of this simulation is to verify the possibility of mal-operation of the differential algorithm for such faults.

The simulation is performed considering different magnetizing characteristics for the current transformers at both ends of the transmission line. The high current level for the external fault and the different behavior of the current transformers will result in different currents informed to the protection algorithms, which will interpret this difference in current as an internal fault. The protection algorithm will issue a trip and open the breakers. Fig. 12 presents the waveforms of

the primary current referred to the secondary side of the current transformer (no saturation) and the secondary current from the current transformer, which is informed to the differential protection calculations.

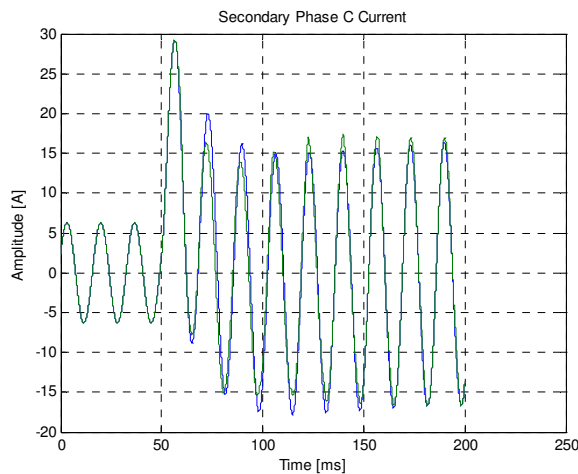


Fig. 12. Current fault with CT saturation

This difference in current may sometimes lead to non-expected operations of the differential protection scheme, resulting in wrong operations of the circuit breakers and consequently the interruption of the power supply. Fig. 13 shows the behavior of the transient samples excursion during an external fault with current transformer saturation.

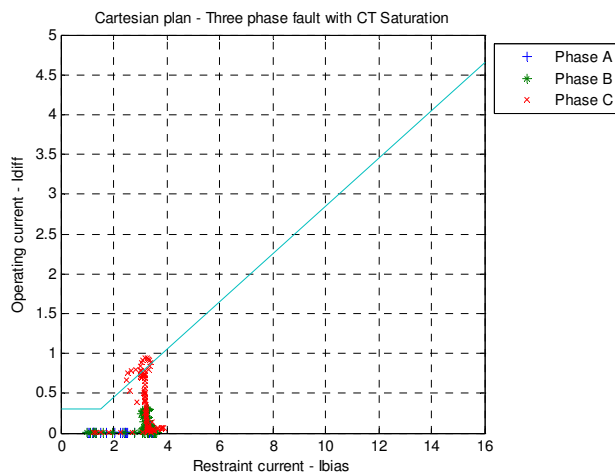


Fig. 13. Mal-operation of the differential protection scheme

From Figure 13 it can be observed that Phase C will false operate due to the saturation of the current transformer, since the samples for such phase reaches the operating area of the differential protection characteristic.

VI. CONCLUSIONS

This paper describes the implementation and analysis of two different current differential protection algorithms, both based on the One Cycle Fourier Filter: the Cartesian plan and the Alpha plan approaches. These algorithms were applied to

series compensated transmission lines in order to verify the behavior and benefits of each one for certain types of faults.

The developments, simulations and results had made possible to investigate the behavior of internal calculations performed by numerical relays applied to the protection of power systems.

It is possible to verify from the results the good performance of the differential protection scheme applied both to non-compensated and compensated transmission lines.

VII. REFERENCES

- [1] F. Andersson and W. Elmore, "Overview of Series-Compensated Line Protection Philosophies", Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1990.
- [2] J. Cheetham, A Newbould, and G. Stranne, "Series-Compensated Line Protection: System Modelling and Test Results", 15th Annual Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1988.
- [3] D.L.Goldsworthy, "A Linearized Model for MOV Protected Series Capacitors", IEEE/PES 1986 Summer Meeting.
- [4] IEEE Tutorial Course, "Computer Relaying", 1979.
- [5] IEEE Tutorial Course, "Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication", 1997.
- [6] A.G.Phadke, J.S.Thorp, "Computer Relaying for Power Systems" Reseach Studies Ltd., Taunton, Somerset, England, 2000.

VIII. BIOGRAPHY



Luis Fabiano dos Santos was born in Ribeirão Preto, SP, on November 14, 1972. He graduated from the Engineering Federal School of Itajubá. He has specialization on Electrical Power System Protection and on Electrical Power Systems, both at post-graduation level.

He worked for Alstom Protection & Control, as protection application engineer, and is currently working for ABB Ltda, Substation Automation Products, as application and marketing engineer.

His main areas of interests are the protection of electrical power systems, simulations of electrical power systems, wide area monitoring and protection, and substation automation.



Paulo Márcio da Silveira was born in Itajubá, Brazil, in 1960. He received his BSEE and MSc degrees from the Itajubá Federal School of Engineering (EFEL), Brazil, and his DSc degree in electrical engineering from the University of Santa Catarina (UFSC), Brazil in 2001.

He is Associate Professor at Itajubá Federal University, where he is also the Power Quality Study Group sub-coordinator. His research interests include Power System Protection and Power Quality issues.

Bibliografia

- [1] W.J.Cheetham, A.Newbould, G.Stranne, “Series Compensated Line Protection: System Modeling and Test Results”, 15th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 1988.
- [2] G.D.Rockefeller, “Fault Protection with a Digital Computer”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No.4, April 1969.
- [3] M.Ramamoorthy, G.R.Slemon, S.D.T. Robertson, “High Speed Protection of Power Systems based on Improved Power System Models”, CIGRE, Paris, June 1968, Paper 31-09.
- [4] B.J.Mann, I.F.Morrison, “Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, No.1, Jan/Fev 1971.
- [5] E.A.Udren, G.D.Rockefeller, G.Gilcrest, “High Speed Distance Relaying using a Digital Computer”, Parts I and II, *IEEE T-PAS-91*, No.3, Maio/Junho 1972.
- [6] A.M.Ranjbar, B.J.Cory, “An Improved Method for the Digital Protection of High Voltage Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No.2, Março/Abril 1975.

- [7] W.D.Breingan, M.M.Chen, T.F.Gallen, "The Laboratory Investigation of a Digital System for the Protection of Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp.350-357, Março/Abril 1979.
- [8] M.M.Chen, W.D.Breingan, T.F.Gallen, "Field Experience with a Digital System for Transmission Line Protection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp.1796-1804, Setembro/Outubro 1979.
- [9] M.Ibrahim, T.Hlibka, A.G.Phadke, "Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No.2, Março/Abril 1977.
- [10] W.J.Smolinski, "An algorithm for Digital Impedance Calculation using a Single PI Section Transmission Line Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.5. Setembro/Outubro 1979.
- [11] B.Jeyasurya, T.H.Vu, W.J.Smolinski, "Determination of Transient Apparent Impedances of Faulted Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.10. Outubro 1983.
- [12] B.Jeyasurya, W.J.Smolinski, "Identification of a best algorithm for digital distance protection of Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Outubro 1983.
- [13] H.Kudo et al., "Implementation of a Digital Distance Relay using an Interpolated Integral Solution of a Differential Equation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.4, Outubro 1988.

- [14] J.Lambert, A.G.Phadke, D.M.Nabb, “Accurate Voltage Phasor Measurement in a Series-Compensated Network”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.1, Janeiro 1994.
- [15] R.K.Aggarwal, et al, “Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.15, No.1, Fevereiro 2000.
- [16] E.Rosolowski, et al, “Differential Equation Based Impedance Measurement for Series Compensated Lines”, IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, 1999.
- [17] W.D.Breingan, M.M.Chen, T.F.Gallen, “The Laboratory Investigation of a Digital System for the Protection of Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp.350-357, Março/Abril 1979.
- [18] B.Jeyasurya, W.J.Smolinski, “Identification of a best algorithm for digital distance protection of Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Outubro 1983.
- [19] IEEE Tutorial Course, “Computer Relaying”, 1979.
- [20] IEEE Tutorial Course, “Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication”, 1997.
- [21] A.G.Phadke, J.S.Thorp, “Computer Relaying for Power Systems” Reseach Studies Ltd., Taunton, Somerset, England, 2000.
- [22] P.M.Silveira, “Tópicos em Proteção de Sistemas Elétricos”, Universidade Federal de Itajubá, Setembro 2004.

- [23] W.A.Elmore, “Protective Relaying – Theory and Applications”, Marcel Dekker, Copyright 2004.
- [24] W.A.Elmore, “Pilot Protective Relaying”, Marcel Dekker, Copyright 2000.
- [25] A.F.Tupiassú, et al, “Avaliação de algoritmos para proteção digital de sistemas elétricos de potência”, SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.
- [26] C.Pereira, F.C.Cruz, “Análise do Desempenho de Quatro Filtros Digitais de Fourier para Proteção de Distância de Linhas de Transmissão”, VI STPC, Natal, RN, 1998.
- [27] M.Akke, J.S.Thorp, “Improved Estimates from the Differential Equation Algorithm by Median Post Filtering”, Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, IEE, 1997.
- [28] S.Lindahl, “Protection of Series Compensated Network”, Apostila de treinamento, ABB Technology Products AB, Sweden.
- [29] R. Grünbraum, “Enhancing of transmission capability of power corridors by means of series compensation”, ABB Power Systems AB.
- [30] Catálogo Informativo, “Thyristor Controlled Series Capacitor”, ABB Utilities AB, Power Systems.
- [31] M.Akke, J.S.Thorp, “Some improvements in the Three Phase Differential Equation Algorithm for Fast Transmission Line Protection”, Sydkraft AB & Cornell University.

- [32] R.A.Macedo, “Algoritmo baseado na Equação Diferencial para Proteção Rápida de Linhas de Transmissão”, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, Dezembro 2000.
- [33] D.V.Coury, R.A.Macedo, “Um Esquema Completo para Proteção Rápida de Linhas de Transmissão com o Uso de Equações Diferenciais”, Revista Controle & Automação, Vol.14, No.2, Junho 2003.
- [34] R. Grünbraum, et al, “FACTS – powerful systems for flexible power transmission”, ABB Review 5 / 1999, ABB Power Systems.
- [35] R. Grünbraum, et al, “Improving the efficiency and quality of AC transmission systems”, Joint World Bank, ABB Power Systems Paper.
- [36] Application Note A02-0171 E, “North-South 500 kV AC power interconnection: transmission stability improvement by means of TCSC and SC”, ABB Power Systems AB.
- [37] R. Grünbaum, et al, “FACTS – Improving the performance of electrical grids”, ABB Utilities AB, Power System.
- [38] G.E.Alexander, J.Mooney, W.Tyska, “Advanced application guidelines for ground fault protection”, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [39] P.M.Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, The IOWA State University Press, 1976.
- [40] BBC Brown Boveri, “Distance Protection of High-Voltage Lines Containing Series Capacitors”, Baden, Switzerland.

- [41] M.M.Saha, S.Ward, “Adaptive Distance Protection for Series Compensated Transmission Lines”, 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers, April, 2001.
- [42] B.Kasztenny, “Distance Protection of Series Compensated Lines – Problems and Solutions”, Spokane, October, 2001.
- [43] S.Wilkinson, “Series Compensated Line Protection Issues”, GE Power Management
- [44] ABB Network Partner AB, “Functions for Application on Series Compensated Network”, 1MRK580118-XEN, February, 1997.
- [45] D.L.Goldsworthy, “A Linearized Model for MOV Protected Series Capacitors”, IEEE/PES 1986 Summer Meeting.
- [46] A.Newbould, P.Hindle, “Series Compensated Lines: Application of Distance Protection”, 14th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 1987.
- [47] C.Gagnon, P.Gravel, “Extensive Evaluation of High Performance Protection Relays for the Hydro-Quebec Series Compensated Network”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.4, October, 1994.
- [48] D.Novosel, A.Phadke, M.M.Saha, S.Lindahl, “Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated Lines”, Developments in Power System Protection, IEE, 1997.
- [49] N.P.Parfijanowitsch, “Análise do Desempenho de Esquemas de Proteção em Sistemas de Transmissão de Extra Alta Tensão Dotados de Compensação Série”, Dissertação de Mestrado, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dezembro, 1974.

- [50] E.C.Navarro, “Proteção Diferencial Digital de Linhas de Transmissão com Compensação Série”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2002.
- [51] V.Cook, “Analysis of Distance Protection”, Research Studies Press Ltd., 1985.
- [52] G.Ziegler, “Numerical Distance Protection – Principles and Applications”, Publicis MCD, 1999.
- [53] Alstom T&D, “Protective Relays Application Guide”, Alstom T&D Protection & Control Ltd, 1987.
- [54] M.Khederzadeh, “Power Quality Impact of Series and Shunt Compensated Lines on Digital Protective Relays”, IPST 2003, New Orleans, USA.
- [55] M.M.Saha, et al, “ATP-EMTP Investigation of a New Distance Protection Principle for Series Compensated Lines”, IPST 2003, New Orleans, USA.
- [56] J.Y.Heo, et al, “Simulation of the Distance Relay using EMTP Models”, KIEE International Transactions on PE, Vol.4-A, No.1, pp.26-32, 2004.
- [57] G.E.Alexander, et al, “Series Compensated Line Protection – Evaluation & Solutions”, GE Power Management, GER3736.
- [58] F. Garcia, et al, “Behavior of the Protection System of Extra High Voltage Lines in Faults with Resistance to Ground”, Protection Department of UTE.
- [59] “Understanding Microprocessor-Based Technology Applied to Relaying”, Power System Relaying Committee, Report of Working Group I16 of the Relaying Practices Subcommittee.