

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ATIVO  
PARA ATERRAMENTO DO NEUTRO**

por

Ugo de Faria Pereira Borel

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE MESTRADO DO  
CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS,  
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

Mestre em Engenharia Elétrica

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

2012

*De fato, eu não considero que tenha fracassado  
ao tentar cerca de dez mil vezes desenvolver o  
acumulador elétrico; simplesmente encontrei  
dez mil maneiras de como ele não funciona.*

*(Thomaz Edison)*

# Agradecimentos

Este trabalho certamente não teria sido realizado sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas e entidades, às quais serei eternamente grato.

À Deus, pela força a mim concedida.

Aos meus pais, José Eustáquio e Gláucia, pelo amor e incentivo incondicionais durante todo o caminho que me trouxe até aqui.

Ao Prof. Braz, pela orientação, pelos ensinamentos, pela compreensão e principalmente pela amizade construída ao longo destes anos.

Ao amigo Paulo Costa, co-orientador deste trabalho, por todo o empenho, competência e sabedoria transmitida, pelas valiosas discussões, correções, revisões e sugestões que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao colega Marco Túlio, pela amizade, companheirismo e "forte" apoio durante os testes experimentais.

À Senior Engenharia e Serviços Ltda., pelo suporte fornecido e pela oportunidade de ampliar meus conhecimentos em engenharia elétrica.

À minha esposa Roberta, companheira e amiga, pelo amor, incentivo, paciência e compreensão.

# Resumo

A maioria das paralisações impostas aos sistemas elétricos, sejam eles de geração, transmissão, distribuição ou consumo (industrial, comercial, residencial), é proveniente da ocorrência de faltas para terra as quais, segundo estatísticas, se situam na faixa de 70 a 90% do universo das faltas. Em geral estas falhas provocam desligamentos do sistema elétrico, gerando interrupções momentâneas ou duradouras de energia, afetando principalmente os sistemas industriais e comerciais onde se encontram instalados equipamentos eletrônicos sensíveis. Além das paralisações, um efeito extremamente importante das faltas para terra, está relacionado à segurança humana e de animais face às tensões perigosas de passo e toque que são desenvolvidas no ponto de defeito. Existem ainda riscos de incêndios provocados pelas faltas à terra, sendo que todos estes fenômenos estão diretamente relacionados com a forma de aterramento do neutro do sistema elétrico, daí sua importância na manutenção da qualidade no fornecimento de energia elétrica, da segurança pessoal e dos equipamentos.

Este trabalho se propõe a desenvolver um estudo teórico sobre a aplicação de conversores eletrônicos no controle da bobina de Petersen atuando no aterramento do neutro dos sistemas elétricos. Tal aplicação visa praticamente anular as correntes de falta para terra, o que torna possível a manutenção da continuidade operacional do sistema, além de melhorar significativamente os aspectos de segurança operacional. Aborda essencialmente as possibilidades desta aplicação, apresentando as principais questões relacionadas com seu uso e aspectos de desenvolvimento. Neste sentido, exibe uma vasta fundamentação teórica na aplicação da bobina, bem como o entendimento dos conceitos gerais relacionados à sua utilização.

Neste estudo é feito um aprofundamento sobre as metodologias de sintonia da bobina, abordando as dificuldades, vantagens e desvantagens e a definição de uma estratégia a ser utilizada na aplicação de conversores estáticos na obtenção da sintonia. Este trabalho abre, pois, novas perspectivas para o desenvolvimento de futuras e significativas condições de segurança e melhorias operacionais dos sistemas elétricos.

## *Abstract*

Most of the downtime imposed on electrical systems, be they generation, distribution or consumption (industrial, commercial, residential) is from ground faults for which statistics are in the range of 70 to 90% of all faults. In general, these failures cause electrical system shutdown, shutdown electric systems generating momentary or lasting power downtime, affecting mainly the industrial and commercial systems which have sensitive electronic equipment installed. Besides the downtime an extremely important effect of the ground fault is related to human and animal threatened by step potential and touch developed at the fault point. There are also risks of fires caused by ground faults and all these phenomena are directly related to the neutral grounding method of the electrical system, consequently its importance in maintaining the electricity supply quality, people safety and equipment performance.

This project aims to develop a theoretical study on electronic converters implementation for the Petersen coil control operating in the neutral grounding of electrical systems. Such application seeks to virtually eliminate the ground fault currents, what makes possible to maintain operational continuity. Essentially addresses the possibilities of this application and describes the main issues related to their use and development aspects. In this sense, exhibits a broad theoretical application of the coil, as well as understanding the general concepts related to their use.

In this study are done methodologies for the coil tuning, addressing the difficulties, advantages and disadvantages and the definition of a strategy to be used in the application of static converters in order to achieve the tuning. new prospects for the future development of safer conditions and significant operational improvements in electrical systems.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<i>Abstract</i>	<b>iii</b>
<b>Sumário</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Glossário</b>	<b>xii</b>
<b>Simbologia</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Objetivo .....	5
1.3 Organização do Trabalho .....	5
<b>2 Princípios Operacionais do Aterramento do Neutro através de Bobina Ressonante</b>	<b>7</b>
2.1 Princípios Básicos .....	7
2.2 Sintonia da Bobina .....	9
2.3 Corrente de Dispersão Ativa .....	10
2.4 Análise do Sistema Ressonante .....	12
2.4.1 Determinação da Tensão de Deslocamento do Neutro Através das Leis de Kirchoff .....	12
2.4.2 Cálculo da Corrente Fase-Terra em um Sistema Isolado com Neutro Flutuante	15
2.4.3 Condição de Sintonia com Bobina de Petersen .....	16
2.4.4 Análise através das Componentes Simétricas .....	17
2.5 Conclusões .....	21

<b>3</b>	<b>Controle da Sintonia</b>	<b>22</b>
3.1	Técnicas Convencionais de Controle da Sintonia .....	22
3.1.1	Parâmetros de Sistemas Compensados .....	22
3.1.2	Falta Fase-Terra Artificial .....	24
3.1.3	Curva de Ressonância .....	24
3.1.4	Inverso da Curva de Ressonância .....	26
3.1.5	Lugar Geométrico de $V_{NT}$ .....	27
3.1.6	Análise de Componentes Transitórios.....	28
3.1.7	Injeção de Corrente em 60Hz.....	29
3.1.8	Tecnologia de Identificação dos Parâmetros Através de Conversores Estáticos (Injeção de Correntes com Frequências Diferentes de 60Hz).....	31
3.1.9	Conclusão sobre as técnicas convencionais de controle da sintonia.....	33
3.2	Tecnologia de Compensação Residual .....	34
3.3	Conclusões .....	36
<b>4</b>	<b>Métodos Convencionais de Detecção de Faltas à Terra em Sistemas Aterrados via Reatância Sintonizada</b>	<b>38</b>
4.1	Métodos de Detecção de Faltas à Terra .....	38
4.2	Representação em Componentes Simétricas .....	39
4.3	Método Watimétrico .....	41
4.4	Método da Condutância .....	43
4.5	Método da Condutância Incremental .....	44
4.6	Método da Admitância .....	45
4.7	Conclusões .....	48
<b>5</b>	<b>Desenvolvimento do Sistema de Compensação Ativa</b>	<b>49</b>
5.1	Introdução .....	49
5.2	Requisitos Básicos do Sistema de Compensação Ativa .....	50

5.3	Topologias de Compensação .....	52
5.3.1	Compensação Ativa Completa .....	53
5.3.2	Compensação Ativa Capacitiva .....	55
5.4	Topologia Adotada .....	58
5.5	Descrição do Sistema de Compensação Ativa .....	58
5.5.1	Bobina de Compensação Fixa .....	59
5.5.2	Inversor de Frequência .....	60
5.5.3	Transformador de Acoplamento .....	61
5.5.4	Dispositivos de medição (TP's e TC's) .....	61
5.5.5	Sistema de Controle .....	61
5.5.6	Dispositivo de by-pass .....	61
5.6	Estimativa da Reatância Capacitiva Fase-Terra .....	62
5.6.1	Princípios Básicos da Estimativa de $X_C$ .....	62
5.6.2	Estimativa de $X_C$ com Frequência Diferente da Fundamental .....	65
5.6.3	Exemplo de Estimativa de $X_C$ através de Simulação .....	66
5.7	Identificação da Fase que está em Falta para Terra .....	70
5.7.1	Princípios Básicos de Identificação da Fase em Falta .....	71
5.7.1.1	Considerações sobre as Admitâncias de Falta .....	72
5.7.1.2	Faltas Plenas ou com Baixa Impedância .....	72
5.7.1.3	Faltas com Alta Impedância .....	73
5.7.2	Sobreposições das Regiões de Abrangência do Ângulo da Tensão Neutro-Terra .....	77
5.7.3	Metodologia Prática para Identificação da Fase em Falta .....	78
5.8	Fluxograma Básico para Operação do Sistema Ativo .....	81
5.9	Conclusões .....	82
<b>6</b>	<b>Estudos Experimentais</b> .....	<b>83</b>

6.1	Introdução .....	83
6.2	Projeto do Circuito de Teste .....	84
6.2.1	Concepção do Sistema Elétrico .....	84
6.2.2	Dados do Circuito .....	85
6.2.3	Determinação da Fase em Falta .....	87
6.3	Projeto do Conversor .....	87
6.3.1	Alimentação dos Circuitos de Controle .....	88
6.3.2	Condicionamento de Sinais .....	88
6.3.3	Geração do Sinal PWM .....	90
6.3.4	Estágio de Potência .....	92
6.3.5	Funcionalidades implementadas no protótipo .....	93
6.4	Esquemático da Placa de Testes .....	93
6.5	Bancada de Ensaios .....	95
6.6	Resultados Práticos Obtidos .....	97
6.7	Análise dos Resultados e Conclusões .....	99
<b>7</b>	<b>Conclusões e Propostas de Continuidade</b> .....	<b>102</b>
7.1	Conclusões .....	102
7.2	Propostas de Continuidade .....	103
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>105</b>

# Lista de Figuras

## Capítulo 2

2.1	Sistema trifásico equilibrado .....	8
2.2	Princípio operacional da Bobina de Petersen .....	8
2.3	Reatores com núcleo tipo “êmbolo móvel” ( <i>pluger cores</i> ) .....	10
2.4	Modelo do sistema elétrico .....	11
2.5	Representação do sistema elétrico em termos de admitâncias .....	12
2.6	Falta em um sistema isolado equilibrado .....	15
2.7	Sistema elétrico simplificado .....	18
2.8	Diagrama de Redes Sequenciais Correspondente .....	18
2.9	Diagrama de Redes Sequenciais Simplificado .....	20

## Capítulo 3

3.1	Esquema de Sintonia da Bobina através de uma Falta Artificial .....	24
3.2	Curva de Ressonância Típica ( $V_{NT}$ vs. $I_{pos}$ ) .....	25
3.3	Curva de Ressonância Inversa Estimada ( $1/V_{NT}$ vs. $I_L$ ) .....	26
3.4	Diagrama de Lócus da tensão $V_{NT}$ .....	27
3.5	Direção do desbalanço no sistema .....	27
3.6	Exemplo de onda de tensão neutro-terra após ocorrência de uma falta .....	28
3.7	Injeção de tensão auxiliar em série com a bobina .....	30
3.8	Injeção de corrente auxiliar em paralelo com a bobina .....	31
3.9	Circuito equivalente para compensação residual .....	35

## Capítulo 4

4.1.a	Esquema de Sintonia da Bobina através de uma Falta Artificial .....	40
4.1.b	Esquema de Sintonia da Bobina através de uma Falta Artificial .....	40
4.2	Diagrama de seqüência zero considerando desbalanço do sistema .....	41
4.3	Acréscimo watimétrico através de inserção de resistor $R_W$ no neutro .....	42
4.4	Diagrama de seqüência zero para as grandezas incrementais .....	45
4.5	Admitâncias fase-terra nos alimentadores .....	46

## Capítulo 5

5.1	Correntes durante uma falta fase-terra .....	51
5.2	Injeção de Tensão - Compensação Série .....	52
5.3	Injeção de Corrente - Compensação Paralelo .....	52
5.4	Compensação Ativa Completa .....	54
5.5	Falta fase A – Componentes Vetoriais de Correntes .....	54
5.6	Compensação Ativa Capacitiva .....	56
5.7	Falta na fase A – Componentes Vetoriais de $\underline{V}_{inj}$ .....	57
5.8	Falta na fase B – Componentes Vetoriais de $\underline{V}_{inj}$ .....	57
5.9	Falta na fase C – Componentes Vetoriais de $\underline{V}_{inj}$ .....	57
5.10	Sistema de Compensação Ativa Capacitiva de Neutro (série) .....	59
5.11	Deslocamento de tensão de neutro para determinação de $X_C$ .....	62
5.12	Relação entre $\underline{I}_{CAP}$ , $\underline{I}_{CR}$ e $\theta_C$ .....	64
5.13	Configuração do sistema para simulação computacional .....	66
5.14	Tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ medida com a injeção de $\underline{V}_{inj}^f$ no neutro .....	68
5.15	Corrente neutro-terra $\underline{I}_{NT}$ medida com a injeção de $\underline{V}_{inj}^f$ no neutro .....	68

5.16	Ângulo medido $\theta_C$ entre a tensão $\underline{V}_{NT}$ e a corrente neutro-terra $\underline{I}_{NT}$ .....	69
5.17	Impedância $Z_{\phi T}$ obtida a partir da tensão $\underline{V}_{NT}$ e a corrente neutro-terra $\underline{I}_{NT}$ .....	69
5.18	Falta fase-terra na fase A: ângulo da tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ .....	75
5.19	Falta fase-terra na fase B: ângulo da tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ .....	76
5.20	Falta fase-terra na fase C: ângulo da tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ .....	76
5.21	Regiões de sobreposição do ângulo da tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ na ocorrência de faltas em fases distintas .....	77
5.22	Identificação da fase em falta conforme o ângulo da tensão neutro-terra $\underline{V}_{NT}$ .....	78
5.23	Identificação da fase em falta - Sistema Subcompensado .....	79
5.24	Identificação da fase em falta - Sistema Sobrecompensado .....	80
5.25	Fluxograma básico de operação do sistema ativo de compensação .....	81

## Capítulo 6

6.1	Diagrama do Circuito de Experimental – Medição da corrente no ponto de falta através de osciloscópio. ....	84
6.2	Composição da fonte trifásica .....	85
6.3	Fonte de alimentação dos circuitos de controle .....	88
6.4	1º Estágio - Medição da Tensão de Falta .....	89
6.5	2º estágio - Retificador de precisão .....	89
6.6	3º estágio - Ajuste do sinal .....	90
6.7	Geração do Sinal PWM .....	91
6.8	Direção do sinal PWM .....	91
6.9	Estágio de Potência .....	92
6.10	Barramento CC .....	92
6.11	Disposição dos componentes .....	93
6.12	Layout da camada superior .....	94

6.13	Layout da camada inferior .....	94
6.14	Transformados monofásicos – conexão estrela-estrela .....	95
6.15	Circuito de injeção de tensão e capacitâncias fase-terra .....	95
6.16	Visualização 1 da montagem em bancada .....	96
6.17	Visualização 2 da montagem em bancada .....	96
6.18	Corrente no ponto de falta - Sistema sobrecompensado, sem injeção de tensão .....	97
6.19	Corrente no ponto de falta - Sistema sobrecompensado, com injeção de tensão .....	98
6.20	Corrente no ponto de falta - Sistema subcompensado, sem injeção de tensão .....	98
6.21	Corrente no ponto de falta - Sistema subcompensado, com injeção de tensão .....	99

# Glossário

c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CSI	Current Source Inverter
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
GCT	Gate Commutated Turn-Off Thyristor
GMR	Raio Médio Geométrico
GTO	Gate Turn-off Thyristor
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
LT	Linha de Transmissão
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
VSI	Voltage Source Inverter

# Simbologia

$B_{AT}, B_{BT}, B_{CT}$	susceptância fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$B_{NT}$	susceptância neutro-terra
$B_F$	susceptância de falta
$C_{AT}, C_{BT}, C_{CT}$	capacitância fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$C$	capacitância fase-terra para sistema equilibrado ( $C = C_{AT} = C_{BT} = C_{CT}$ )
$C_E$	capacitância fase-terra equivalente do sistema
$C_F$	capacitância de falta
$C_0$	capacitância fase-terra de seqüência zero do sistema
$C_{0L}$	capacitância fase-terra de seqüência zero da linha protegida
$C_{0S}$	capacitância fase-terra de seqüência zero dos demais alimentadores do sistema
$d$	grau de atenuação ou amortecimento
$E_a, E_b, E_c$	tensões fasoriais fase A-neutro, fase B-neutro, fase C-neutro
$E$	módulo da tensão nominal fase-neutro do sistema (igual a $V_{nom}$ )
$f$	freqüência [Hz]
$G_{AT}, G_{BT}, G_{CT}$	condutância fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$G_{NT}$	condutância neutro-terra
$G_F$	condutância de falta
$G_0$	condutância de seqüência zero
$G_{0N}$	condutância de seqüência zero de neutro-terra
$G_{0L}$	condutância de seqüência zero do alimentador protegido
$G_{0S}$	condutância de seqüência zero dos demais alimentadores do sistema
$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$	corrente fase A, fase B, fase C
$\underline{I}_{AT}, \underline{I}_{BT}, \underline{I}_{CT}$	corrente fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$\underline{I}_{TA}, \underline{I}_{TB}, \underline{I}_{TC}$	corrente terra-fase A, terra-fase B, terra-fase C
$\underline{I}_{NT}$	corrente neutro-terra

$\underline{I}_{TN}$	corrente terra-neutro
$\underline{I}_{inj}$	corrente injetada no neutro
$\underline{I}_F$	corrente de falta
$\underline{I}_{CAP}$	corrente capacitiva
$\underline{I}_L$	corrente indutiva
$I_1, I_2, I_0$	correntes de seqüências positiva, negativa e zero
$\underline{I}_{RES}$	componente resistiva no ponto de defeito
$\underline{I}'_{RES}$	contra-corrente resistiva de compensação no neutro
$I_R$	corrente resitiva ou watimétrica
$\underline{I}_{CR}$	corrente total que retorna do ponto de falta para o sistema composta de uma parcela resistiva e outra capacitiva
$I_{pos}$	corrente no neutro para cada posição da bobina
$j$	número imaginário ( $\sqrt{-1}$ )
$k$	fator de simetria
$L$	indutância real da bobina
$L_N$	indutância da bobina visa em paralelo com a resistência da bobina
$N$	ponto neutro do sistema
$R_{AT}, R_{BT}, R_{CT}$	resistência de dispersão fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$R_D$	resistência de dispersão fase-terra
$R_N$	resistência da bobina visa em paralelo com a indutância da bobina
$R_{D1}, R_{D2}, R_{D0}$	resistência de dispersão de seqüências positiva, negativa e zero
$R$	resistência real da bobina
$R_W$	resistência adicional utilizada pelo método watimétrico
$R_{in}$	resistência da fonte de injeção
$R_{0L}$	resistência de seqüência zero da linha protegida
$R_{0S}$	resistência de seqüência zero remanescente do sistema
$R_0$	resistência de seqüência zero do sistema
$R_F$	resistência de falta
$S_F, S_R$	chave F, chave R

$T$	referencial de terra
$v$	grau de sintonia
$\underline{V}_{AB}, \underline{V}_{BC}, \underline{V}_{AC}$	tensão entre as fases A e B, fases B e C, fases A e C
$\underline{V}_{AN}, \underline{V}_{BN}, \underline{V}_{CN}$	tensão fase A-neutro, fase B-neutro, fase C-neutro
$\underline{V}_{AT}, \underline{V}_{BT}, \underline{V}_{CT}$	tensão fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$VCC$	tensão no barramento de corrente contínua
$V_{nom}$	módulo da tensão nominal fase-neutro do sistema (igual a $E$ )
$\underline{V}_{inj}$	tensão injetada no neutro
$\underline{V}_{inj}^f$	tensão injetada no neutro na frequência “ $f$ ”
$\underline{V}_{NT}$	tensão neutro-terra
$V_{RES}$	tensão residual neutro-terra para determinada indutância da bobina
$V_1, V_2, V_0$	tensões de seqüências positiva, negativa e zero
$X_{CA}, X_{CB}, X_{CC}$	reatância capacitiva fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$X_{C1}, X_{C2}, X_{C0}$	reatância capacitiva fase-terra de seqüência positiva, negativa e zero
$X_{LT0}, X_{LT1}$	reatância de fase de seqüência positiva e negativa da linha
$X_C$	reatância capacitiva fase-terra
$X_{C\_LT}$	reatância capacitiva fase-terra da linha
$X_L$	reatância indutiva da bobina neutro-terra
$X_N$	reatância indutiva da bobina neutro-terra relacionada a $L_N$
$X_{CF}$	reatância capacitiva de falta
$X_C^f$	reatância capacitiva na frequência “ $f$ ”
$\underline{Y}_{AT}, \underline{Y}_{BT}, \underline{Y}_{CT}$	admitância fase A-terra, fase B-terra, fase C-terra
$Y_0$	admitância de seqüência zero
$\underline{Y}_{\phi T}$	admitância fase-terra
$\underline{Y}_{\phi N}$	admitância fase-neutro
$\underline{Y}_{NT}$	admitância neutro-terra
$\underline{Y}_F$	admitância de falta
$\underline{Y}_{eq}$	admitância equivalente de uma determinada equação

$Z_{La}, Z_{Lb}, Z_{Lc}$	impedância série da linha fase A, fase B, fase C
$Z_{F1}, Z_{F2}, Z_{F0}$	impedância de seqüências positiva, negativa, zero da fonte
$Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L0}$	impedância de seqüências positiva, negativa, zero da linha
$Z_{LU}$	impedância de desbalanço da linha protegida
$Z_{SU}$	impedância de desbalanço do resto do sistema
$Z_{\phi T}$	impedância fase-terra
$Z_N$	impedância neutro-terra
$Z_F$	impedância de falta
$W$	grandeza de saída de um relé direcional wattimétrico
$\Delta$	pequena variação de uma variável, obtida através da linearização em torno de um ponto de operação
$+\varepsilon, -\varepsilon$	valores limites positivo e negativo de um relé
$\phi_r$	ângulo definido pela relação entre as componentes capacitiva e resistiva no ponto de defeito
$\Omega$	unidade de resistência “ohm”
$\Omega.m$	unidade de resistividade “ohm x metro”
$\theta_c$	ângulo entre a corrente total no ponto de falta e tensão fase neutro ou a tensão neutro terra e a corrente de neutro
$\varphi_0$	ângulo entre as grandezas $V_0$ e $I_0$
$\omega$	freqüência angular [rad/s]
$\omega_0$	freqüência angular de seqüência zero

# Capítulo 1

## Introdução

*Este capítulo apresenta uma descrição sucinta da abordagem deste trabalho, cujo objetivo é propor melhorias na forma de aterramento do neutro via bobina ressonante ativa, aplicável às instalações elétricas, mostrando as justificativas e motivações para sua realização. A aplicação da bobina ressonante ativa visa possibilitar a continuidade de operação durante a primeira falta para terra, introduzindo significativa melhoria na segurança e qualidade de energia dos sistemas elétricos, quer sejam industriais, de distribuição ou de potência.*

### 1.1 Contextualização

O método ou filosofia de aterramento do neutro, embora não possua influência na operação normal do sistema elétrico, é de importância fundamental para o mesmo na ocorrência de uma falta para terra. Através do tratamento adequado da forma de aterramento do ponto de neutro é possível o controle dos níveis de sobretensões temporárias e transitórias, bem como os valores de correntes que surgem durante uma falta para terra. Estes aspectos estão relacionados diretamente à segurança pessoal e dos equipamentos, possibilidade de se identificar o defeito, afundamentos de tensão do sistema elétrico, seletividade da proteção elétrica e, principalmente, a continuidade de operação durante a primeira falta à terra.

Em termos de qualidade de energia, o problema que causa os maiores impactos aos usuários, considerando os consumidores industriais e mesmo os residenciais e comerciais, são as interrupções momentâneas [2]. Na maior parte das vezes este inconveniente está relacionado com a ocorrência de faltas no sistema elétrico. Estatisticamente, cerca de 70% a 90% dos curtos-circuitos são de fase para terra, sendo que, em geral, os curtos bifásicos e trifásicos são originados através de uma evolução da falta fase-terra [3]. Entende-se daí a importância do aterramento do neutro que influencia diretamente no valor das correntes de falta à terra e portanto das paralisações e danos resultantes.

Para se definir uma filosofia de aterramento do neutro é necessária uma análise e avaliação das particularidades de cada sistema em particular. Daí, é de se considerar que os sistemas de geração, transmissão, distribuição e industriais requerem diferentes formas de aterramento. A concepção do aterramento do neutro deve levar em conta os aspectos de magnitude da corrente de curto fase-terra, os requisitos de isolamento do sistema e as questões relativas à proteção elétrica. Portanto, a decisão do método de aterramento mais conveniente para um determinado sistema em estudo requer um conhecimento detalhado do mesmo, bem como as vantagens e desvantagens que cada um deles propicia.

Dentre os métodos de aterramento do neutro mais utilizados podem ser mencionados o neutro isolado (ou neutro flutuante), neutro solidamente aterrado e neutro aterrado através de impedância (que pode possuir as seguintes características: resistência de baixo valor, resistência de alto valor e reatância sintonizada, também conhecida como “Bobina de Petersen”). Cada um deles incorpora suas características peculiares, as quais se encontram resumidamente exploradas a seguir.

Os sistemas com o neutro isolado (ou neutro flutuante) possibilitam uma operação contínua, na presença de uma falta para terra em uma fase. Nestes sistemas, a corrente de falta é bastante reduzida, sendo predominantemente capacitiva. No entanto, a sobretensão nas fases sãs (fases sem defeito) pode ser bastante elevada, levando a esforços adicionais no isolamento dos cabos e dos equipamentos conectados ao sistema. Em geral estes sistemas requerem isolamento especial para sua operação contínua, durante a falta. Neste método de aterramento podem ocorrer sobretensões transitórias durante uma falta fase-terra, as quais podem atingir valores de até sete vezes da tensão nominal fase-neutro, caso a falta se apresente na forma de arco intermitente [4]. O fenômeno do arco intermitente, pode ser explicado devido ao fato de que a corrente capacitiva se extingue naturalmente em sua passagem por zero e se reascende logo em seguida. A elevada sobretensão transitória pode dar origem a uma segunda falta em uma outra fase, no ponto mais fraco do sistema, caracterizando portanto um duplo curto para terra (fase-fase-terra), ocasionando maiores danos e interrupções no sistema elétrico.

Nos sistemas solidamente aterrados as sobretensões durante as faltas para terra são reduzidas e completamente suportáveis. No entanto, a corrente de falta durante um defeito fase-terra pode alcançar valores extremamente elevados, dependendo da topologia do sistema elétrico e da posição da mesma. Esta prática tem sido evitada nos sistemas industriais de média e baixa tensão devido a alta probabilidade de formação de um arco elétrico nos curtos de fase para terra principalmente quando ocorrem no interior dos conjuntos de manobra. O alto grau de destruição provocado pela energia do arco elétrico, a probabilidade de incêndios,

principalmente em ambientes industriais, a probabilidade de queimaduras causadas em pessoas próximas dos locais de ocorrência do arco e a obrigatoriedade de desligamento rápido, têm tornado o sistema com o neutro solidamente aterrado pouco atrativo para aplicação nos diversos sistemas elétricos. Além dos inconvenientes já apontados, as correntes elevadas ao circularem pelo sistema de aterramento, podem representar perigo para pessoas, através do desenvolvimento de tensões de passo, toque e transferida. Pode-se considerar que o elevado valor da corrente de falta para terra seja uma vantagem para detecção da falta, embora a presença do arco elétrico possa tornar a proteção mais lenta e provocar um elevado nível de destruição.

A introdução do resistor entre o neutro e o potencial de terra é um método de aterramento que, à medida em que o resistor aumenta de valor, o sistema se aproxima do neutro isolado e à medida que o resistor é reduzido o sistema se aproxima do neutro solidamente aterrado. O resistor limita a corrente de falta a uma determinada magnitude e amortece as sobretensões geradas durante um curto para terra. A condição de dimensionamento do maior valor de resistor a ser instalado no neutro é que a corrente drenada pelo mesmo durante a falta para terra seja maior ou igual a corrente capacitiva do sistema. A corrente capacitiva é aquela que circula no sistema durante uma falta para terra, considerando o neutro não aterrado.

Em sistemas de baixa tensão industriais as correntes capacitivas caracterizam-se principalmente pela capacitância dos cabos condutores isolados (alimentadores das cargas) e dos motores elétricos, sendo em geral baixas, da ordem de até 5A. Portanto, pode ser dimensionado um resistor de alto valor, que mantém a corrente de falta bastante reduzida, com níveis de sobretensões mantidos dentro de limites admissíveis. Desta forma, é permitida a continuidade de operação do sistema elétrico mesmo após ocorrida a primeira falta para terra, considerando-se que as tensões entre fase do sistema não foram alteradas.

Nos sistemas de média tensão, a corrente capacitiva geralmente é superior a 10A, o que requer o dimensionamento de resistor de baixo valor ôhmico. Neste caso, tendo em vista o valor da corrente de falta, torna-se obrigatória a necessidade de desligamento do sistema. Observa-se que 10A é o limite considerado para desligar ou não o sistema elétrico durante uma falta para terra, uma vez que correntes permanentes superiores a este valor destroem chapas magnéticas de motores, transformadores, geradores e já provocam algum dano no ponto de defeito [5].

O método de aterramento através de reatância sintonizada consiste em se introduzir entre o ponto neutro e o potencial de terra do sistema um reator dimensionado de tal forma

que, durante a falta para terra, circule pelo mesmo uma corrente de módulo igual a corrente capacitiva do sistema. Assim, o circuito ressonante faz com que a corrente no ponto de falta seja praticamente igual a zero, eliminando assim o arco elétrico neste ponto. Dentre as vantagens deste método apontam-se o controle das sobretensões transitórias no sistema, baixas tensões perigosas desenvolvidas no solo e a continuidade operacional durante a primeira falta para terra. Outra grande vantagem está no fato de que, pela sua concepção, ao se extinguir o arco no ponto de ocorrência da falta fase-terra, evita-se a aplicação de religadores automáticos, que atualmente são altamente discutíveis na alimentação de consumidores que utilizam equipamentos com tecnologia da informação, produzindo baixa performance do sistema no tocante ao quesito de qualidade de energia.

Entretanto, apesar de se apresentar como um método de aterramento do neutro bastante promissor, a bobina de Petersen incorpora algumas dificuldades quanto à sua aplicação. A principal restrição quanto ao seu emprego diz respeito à manutenção da sintonia da bobina, ao se considerar que durante um curto para terra a corrente indutiva deve ser igual a corrente capacitiva. Em sistemas cuja configuração não varia, a exemplo das linhas de comprimento fixo, esta condição não representa nenhum inconveniente. A bobina é projetada com alguns tapes de modo a permitir o ajuste da sintonia somente no momento de pré-operação. Já nos sistemas onde a topologia se apresenta de forma variável, a capacitância é alterada devido a manobras, desligamentos setoriais, inclusão de novos alimentadores, entre outros, e com isto torna-se necessário que a bobina disponha de meios de variação contínua (ou ajuste fino) associado a uma estimativa (também contínua) da corrente capacitiva.

Existem diferentes recursos técnicos para se promover o controle da bobina de Petersen. Em geral, são utilizados sistemas de controle da sintonia onde a reatância é fisicamente alterada. As tecnologias para determinação dos parâmetros do sistema utilizam algoritmos avançados. No entanto, tais métodos de controle requerem complicados processos construtivos e são dominados por poucos fabricantes, além de estarem associados a custos elevados.

Em alguns países europeus, o emprego da reatância sintonizada (seja em configurações com topologia fixa ou variável) é uma prática tradicional e bem estabelecida. A Alemanha e os países das regiões norte da Europa destacam-se como principais usuários desta forma de aterramento, utilizada atualmente em sistemas até 400kV [3]. Em outras localidades, como por exemplo, a França [6] [7], Itália [8], Espanha [9] [10] [11] e Inglaterra [12], existem processos de conversão (total ou parcial) do aterramento do neutro de seus sistemas elétricos, utilizando a tecnologia da Bobina de Petersen.

No Brasil, raros são os sistemas com a utilização do aterramento via neutro ressonante. A principal dificuldade para a aplicação deste método diz respeito ao aspecto cultural, no qual os projetistas deparam com o desconforto de se abandonar uma tecnologia dominada em favor de outra ainda desconhecida ou pouco dominada. Para vencer as restrições técnicas da utilização da bobina ressonante, sem a necessidade de soluções construtivamente complexas, a Engenharia Eletrônica de Potência surge como uma alternativa atraente e viável. Com os conhecimentos atuais da eletrônica digital e de potência, é possível desenvolver um sistema ativo que explore bem as propriedades da bobina ressonante, mantendo o sistema permanentemente sintonizado.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é rever e consolidar a teoria relativa à aplicação da bobina de Petersen, culminando com o desenvolvimento de um sistema ativo com a capacidade de atuar no ajuste da sintonia da reatância de aterramento do neutro, com isto tornar-se possível a compensação da corrente residual durante uma falta para terra, melhorando o método de aterramento ressonante seja ele fixo ou variável. Através do sistema proposto, designado “Compensação Ativa”, pretende-se monitorar continuamente os parâmetros do sistema e atuar durante uma falta para terra, através da injeção de uma corrente ou tensão controlada no neutro, funcionando como uma fonte ativa. A concepção deste sistema irá permitir a continuidade operacional do sistema elétrico durante a primeira falta fase-terra e eliminar os inconvenientes apresentados pelo método clássico de aterramento do neutro via reatância sintonizada. A melhoria futura deste sistema permitirá ainda a determinação da distância da falta, além de proporcionar sensível melhoria na detecção das faltas com alta impedância, uma questão de extrema importância ainda não solucionada satisfatoriamente.

## **1.3 Organização do Trabalho**

O Capítulo 2 deste trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos gerais de aterramento do neutro através de bobina ressonante. Nele se inclui uma visão dos aspectos do sistema em regime permanente e o comportamento das correntes e tensões durante uma falta fase-terra.

O Capítulo 3 apresenta as técnicas das principais formas que atualmente se dispõe para o controle da sintonia dos sistemas com bobinas de compensação e na determinação dos

parâmetros envolvidos. Nesta abordagem que é de se verificar que as metodologias identificadas são aplicáveis a equipamentos cuja variação final da bobina se processa basicamente através de meios mecânicos.

O Capítulo 4 faz uma abordagem das técnicas existentes de proteção e detecção da corrente de falta para terra em sistemas aterrados via reatância sintonizada. Observa-se a necessidade da adoção de métodos especiais para identificação da falta, em função dos baixos níveis de correntes que surgem durante tais ocorrências.

O Capítulo 5 tem como foco o ponto crucial do sistema de aterramento ativo do neutro proposto, onde são avaliadas as possíveis topologias de compensação e definida aquela utilizada no presente trabalho. São apresentadas as formas de identificação dos principais parâmetros a serem obtidos para o adequado funcionamento da solução estudada.

O Capítulo 6 tem por objetivo relatar o desenvolvimento de um protótipo experimental visando validar os aspectos teóricos desenvolvidos ao longo do trabalho. Constam neste capítulo o projeto do circuito de teste e do conversor, diagramas esquemáticos, bancada de ensaios, resultados práticos obtidos, suas análises e aspectos a serem considerados em futuros experimentos.

O Capítulo 7 encerra este trabalho exibindo as conclusões e comentários finais dos estudos realizados, apresentando as contribuições e discutindo diversas propostas de continuidade. Finalmente, a bibliografia utilizada em todo o desenvolvimento encerra o texto.

## Capítulo 2

# Princípios Operacionais do Aterramento do Neutro através de Bobina Ressonante

*Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos necessários para a compreensão do aterramento do neutro através de bobina ressonante, tendo em vista o entendimento das proposições a serem feitas no sentido de sua melhoria. Serão abordados os princípios básicos de funcionamento, a sintonia da bobina, corrente residual não compensada, tensão de deslocamento do neutro, cálculo da corrente capacitiva e condições de sintonia.*

### 2.1 Princípios Básicos

De uma forma geral, quando o sistema elétrico funciona com o neutro isolado flutuante, isto é, com o neutro sem conexão intencional à terra, e ocorre uma falta à terra, as únicas correntes que circulam são capacitivas (com uma pequena componente de perdas ativas). Aterrando-se o neutro intencionalmente, de alguma forma, surge também uma componente no neutro cuja natureza depende do tipo de impedância instalada. No ponto de defeito, a corrente é a soma vetorial da corrente capacitiva total e da corrente do neutro. A figura 2.1. apresenta a condição de um sistema equilibrado, em operação normal (ausência de qualquer falta). Já a figura 2.2, mostra as componentes durante uma falta para terra, supondo o neutro aterrado através de bobina de Petersen sintonizada.

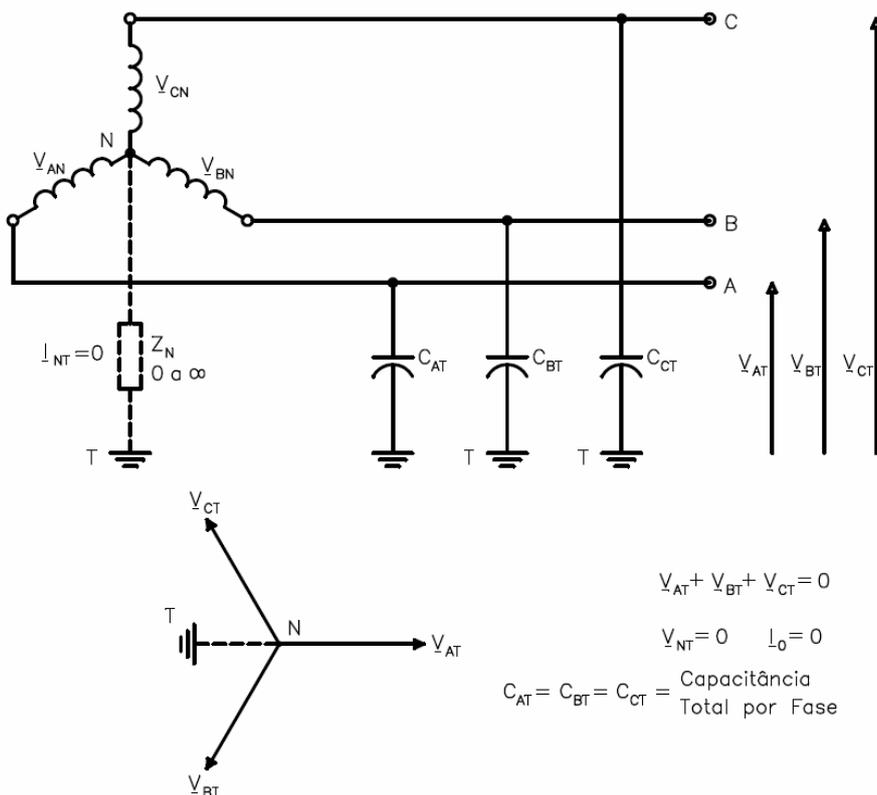


Figura 2.1. Sistema trifásico equilibrado

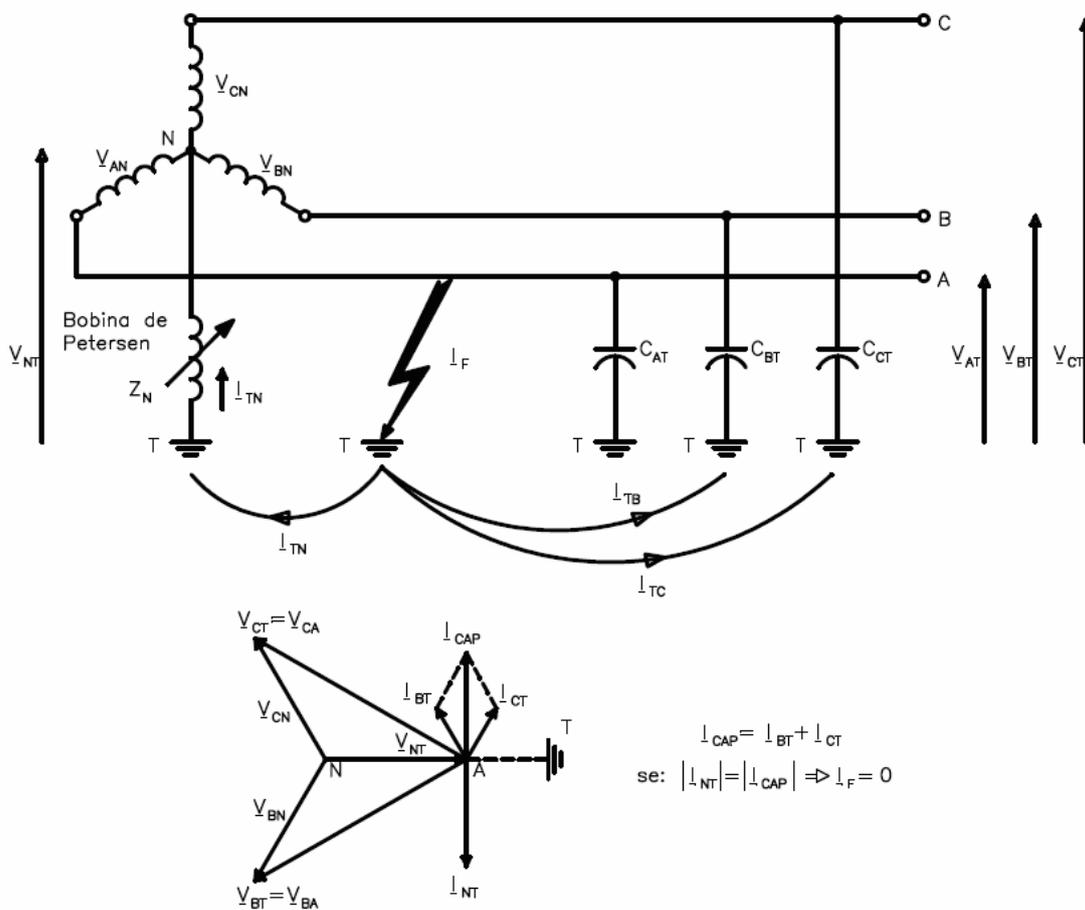


Figura 2.2. Princípio operacional da Bobina de Petersen

Se o neutro é aterrado através de uma reatância (indutiva), surge a possibilidade de dimensioná-la de tal forma que a corrente indutiva no neutro seja de mesmo valor (módulo) que a corrente capacitiva. Como estas duas são vetorialmente opostas, no ponto de ocorrência do curto a corrente resultante será teoricamente de valor nulo. Portanto, não existe arco elétrico no ponto de contato da fase com a terra. Isso justifica o fato de que esta bobina seja denominada algumas vezes de “Bobina de Extinção ou Supressora de Arco”, “Bobina de Compensação”, “Bobina Ressonante”, “Bobina Neutralizadora”, etc. A denominação “Bobina de Petersen” é uma homenagem ao seu idealizador, o alemão W. Petersen, que introduziu o conceito em 1916 [13] [14]. A bobina pode ser inserida no neutro (se acessível) do gerador ou do transformador de distribuição. Um transformador de aterramento na conexão *zig zag*, estrela aterrada-triângulo ou estrela aterrada delta aberto, deve ser instalado caso o neutro não seja acessível.

Quando a corrente capacitiva do sistema sob falta se iguala à corrente indutiva da bobina, o sistema está totalmente compensado, ou seja, a uma sintonia de 100%. Caso não seja atingida esta condição, o sistema pode estar sobrecompensado ou subcompensado.

A grande vantagem da bobina de Petersen decorre da eliminação da corrente de frequência fundamental, no ponto de falta à terra. A exploração desta propriedade é a chave para a manutenção da continuidade de operação de um sistema elétrico durante uma falta para terra, principal objeto desta forma de aterramento do neutro.

## 2.2 Sintonia da Bobina

O emprego da Bobina de Petersen em sistemas com configuração invariável, tais como linhas de usinas geradoras, linhas de consumidores fixos e linhas dedicadas é bastante simples. Nestes casos a sintonia da indutância é ajustada através de *tapes*, que são alterados manualmente na ocasião do “*start-up*”, ou pré-operação, do sistema elétrico.

No entanto, na maioria dos sistemas elétricos a configuração da rede é variável, ou seja, a capacitância equivalente do sistema assume valores diferentes conforme as mudanças na topologia do circuito. Isto implica na necessidade de se adequar a indutância da bobina para manter as condições de sintonia. Geralmente, os recursos técnicos disponíveis para ajustar esta indutância são pequenos, resumindo-se a comutadores de *tapes* ou alteração do entreferro da bobina (utilização de um êmbolo móvel). Quando a alteração de *tapes* é feita manualmente é necessário o desligamento do sistema elétrico para se executar o ajuste, o que pode ser considerado um inconveniente adicional. Por sua vez, a comutação automática através de

*tapes* encontra uma certa dificuldade para obter o ajuste fino, requerendo, portanto, um controle apurado. Os reatores com núcleo tipo “êmbolo móvel”, também conhecidos como “*plunger cores*” [15], apesar de propiciarem um meio suave para regular a sintonia, são equipamentos sofisticados e requerem uma tecnologia construtiva pouco convencional. A figura 2.3 apresenta a configuração básica destes equipamentos.

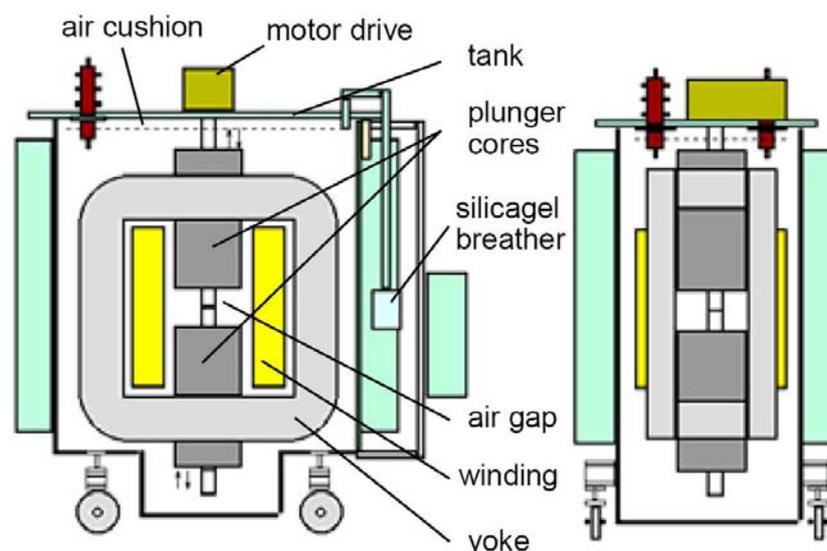


Figura 2.3. Reatores com núcleo tipo “êmbolo móvel” (*plunger cores*)

Os recursos e tecnologias atuais de medição e controle para verificação da alteração da rede e posterior modificação da bobina, serão discutidos nos itens seguintes. Neste trabalho, os propósitos concentram-se em desenvolver uma tecnologia de eletrônica de potência que seja capaz de executar o monitoramento da corrente capacitiva e manter a sintonia do sistema durante a falta para terra, sem a necessidade de componentes físicos que requeiram técnicas de construção elaboradas, tais como os descritos acima.

## 2.3 Corrente de Dispersão Ativa

O aterramento do neutro por meio de reatância, estando o sistema perfeitamente sintonizado, compensa a corrente capacitiva associada às capacitâncias fase-terra do sistema. No entanto, existe entre as fases e a terra uma resistência de dispersão, que é proveniente de fugas e perdas na isolação. Valores típicos de resistências de dispersão fase-terra em sistemas aéreos são da ordem de dez a vinte vezes as reatâncias capacitivas fase-terra [16]. Por outro lado, a bobina é um elemento que também possui uma resistência não nula. Desta forma,

devido a tais resistências, ainda que exista sintonia no sistema, verifica-se uma pequena componente ativa não compensada circulando no ponto de falta. A figura 2.4 apresenta o modelo no qual estão inclusas tais resistências; observa-se que a impedância da bobina foi transformada em um circuito paralelo, ao invés de circuito série.

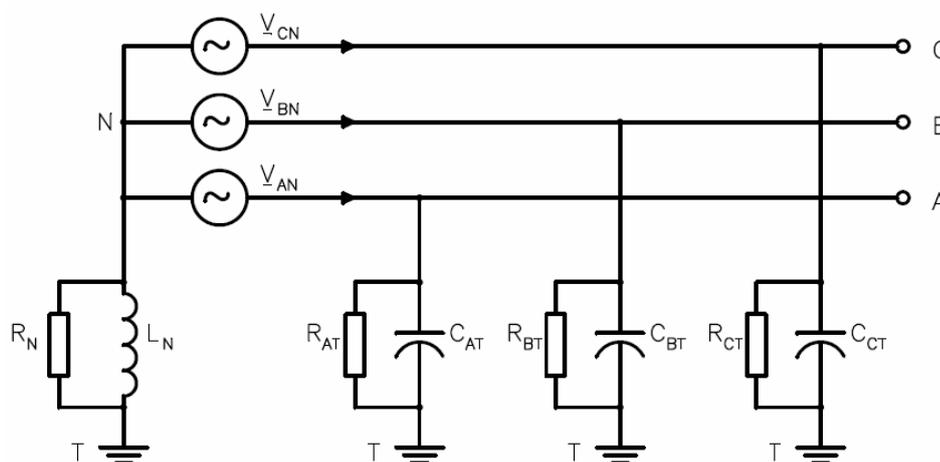


Figura 2.4. Modelo do sistema elétrico

Quando o reator sintonizado é aplicado a sistemas constituídos por linhas aéreas, a pequena parcela da corrente ativa no ponto de falta praticamente não influencia no desempenho final do sistema de aterramento. Porém, caso o sistema utilize cabos isolados, a aplicação da bobina não é tão efetiva. Ocorre que, no ar, geralmente em torno do isolador, após a passagem da corrente transitória e a extinção do arco de corrente fundamental que se segue, a isolação se recupera, o defeito é eliminado e a rede retorna ao normal. Em cabos isolados, o rompimento da isolação é definitivo. Mesmo que a falta seja extinta, não há recuperação do isolamento.

Assim, após o retorno da tensão normal, devido à componente ativa, o arco se reacende e torna a extinguir na passagem da corrente por zero, resultando em um processo de extinção e reignição periódica. Este processo pode gerar elevados valores de sobretensões transitórias e afetar a isolação adjacente das outras fases, dando origem a uma evolução do curto monofásico para polifásico, entre fases diferentes e a terra. Deve ser reiterado que a reignição do arco, em sistemas com cabos isolados se deve à significativa componente residual (resistiva) não compensada pela bobina. Esta componente ativa é uma característica inerente dos cabos isolados devido às perdas dielétricas nos mesmos.

Portanto, para que a corrente no ponto de falta seja completamente compensada torna-se necessária, além da supressão da componente indutiva, a eliminação também da corrente

ativa. Desta forma, a aplicação de um sistema de compensação que atue na parcela ativa está voltada principalmente para redes elétricas que possuem cabos isolados.

O sistema a ser desenvolvido no presente trabalho tem portanto seu foco voltado para as redes aéreas, nas quais a parcela resistiva da corrente de falta não é significativa. Porém, a evolução deste desenvolvimento poderá atuar em sistemas com cabos isolados, também incluindo a compensação da corrente residual resistiva.

## 2.4 Análise do Sistema Ressonante

A análise do sistema ressonante é importante para um melhor entendimento de seu comportamento durante os curto-circuitos fase-terra que são mantidos. Para esta análise considerou-se o uso tanto das componentes simétricas quanto das componentes de fase.

### 2.4.1 Determinação da Tensão de Deslocamento do Neutro Através das Leis de Kirchoff

Nesta abordagem, as capacitâncias e resistências de dispersão foram representadas em termos de admitâncias. Para fins de simplificação da análise, foram consideradas fontes ideais operando na frequência nominal e sem carga, desconsideradas a reatância, a resistência e a impedância série da linha e da fonte. Assumiu-se, pois, um sistema trifásico simétrico. No entanto, as admitâncias fase-terra podem ser diferentes para fases distintas, o que significa uma assimetria do sistema. A figura 2.5 mostra, de forma simplificada, o diagrama trifilar de um sistema trifásico compensado. Deseja-se calcular a tensão de deslocamento do neutro  $\underline{V}_{NT}$ .

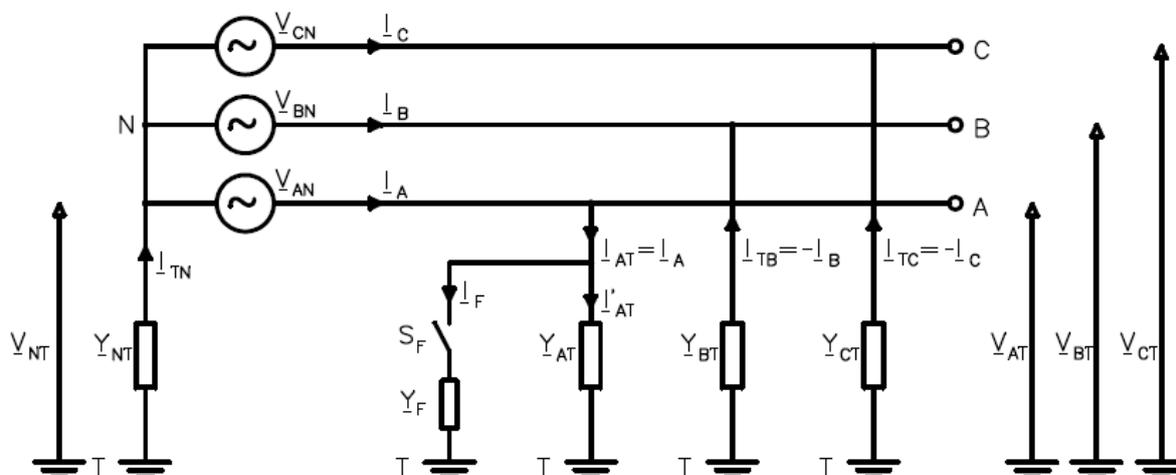


Figura 2.5. Representação do sistema elétrico em termos de admitâncias

Para o circuito equivalente da figura 2.5, considerando a falta na fase A, são avaliadas as seguintes equações:

$$\underline{I}_{NT} + \underline{I}_{AT} + \underline{I}_{BT} + \underline{I}_{CT} + \underline{I}_F = 0 \quad (2.1)$$

$$\underline{V}_{NT} \underline{Y}_N = \underline{I}_{NT} \quad (2.2)$$

$$(\underline{V}_{AN} + \underline{V}_{NT}) \underline{Y}_F = \underline{I}_F \quad (2.3)$$

$$(\underline{V}_{AN} + \underline{V}_{NT}) \underline{Y}_{AT} = \underline{I}_{AT} \quad (2.4)$$

$$(\underline{V}_{BN} + \underline{V}_{NT}) \underline{Y}_{BT} = \underline{I}_{BT} \quad (2.5)$$

$$(\underline{V}_{CN} + \underline{V}_{NT}) \underline{Y}_{CT} = \underline{I}_{CT} \quad (2.6)$$

Onde:

$$\underline{Y}_{AT} = \frac{1}{R_A} + j\omega C_A = \frac{1}{R_A} + j \frac{1}{X_{CA}} = G_A + jB_A \quad (\text{Admitância fase A-terra}) \quad (2.6)$$

$$\underline{Y}_{BT} = \frac{1}{R_B} + j\omega C_B = \frac{1}{R_B} + j \frac{1}{X_{CB}} = G_B + jB_B \quad (\text{Admitância fase B-terra}) \quad (2.7)$$

$$\underline{Y}_{CT} = \frac{1}{R_C} + j\omega C_C = \frac{1}{R_C} + j \frac{1}{X_{CC}} = G_C + jB_C \quad (\text{Admitância fase C-terra}) \quad (2.8)$$

$$\underline{Y}_N = \frac{1}{R_N} + \frac{1}{j\omega L_N} = \frac{1}{R_N} + j \frac{1}{X_L} = G_N + jB_N \quad (\text{Admitância do neutro}) \quad (2.9)$$

$$\underline{Y}_F = \frac{1}{R_F} + j\omega C_F = \frac{1}{R_F} + j \frac{1}{X_{CF}} = G_F + jB_F \quad (\text{Admitância de falta}) \quad (2.10)$$

$$R_N = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R} \quad (\text{Resistência da bobina vista em paralelo com a indutância}) \quad (2.11)$$

$$L_N = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L} \quad (\text{Indutância da bobina vista em paralelo com resistência}) \quad (2.12)$$

A Bobina de Petersen foi representada como uma combinação paralela de uma indutância  $L_N$  e uma Resistência  $R_N$ . Na realidade,  $L$  (indutância real da bobina) e  $R$  (resistência real da bobina) estão em série, porém, com a representação sugerida, simplificamos a avaliação além de facilitar a representação do circuito equivalente para o caso em que conectamos um resistor em paralelo com a bobina ou com um enrolamento auxiliar da mesma. Este artifício também é utilizado para auxiliar a identificação do local da falta.

Utilizando o operador  $a = e^{-j120^\circ}$ , com  $0 = 1 + a + a^2$  e  $V_{nom} = E$  a tensão nominal do sistema, podemos escrever as tensões  $\underline{V}_{AN}$ ,  $\underline{V}_{BN}$  e  $\underline{V}_{CN}$  na forma de:

$$\underline{V}_{AN} = \underline{E}_a = E \angle 0^\circ \quad (2.13)$$

$$\underline{V}_{BN} = \underline{E}_b = a^2 \underline{E}_a = E \angle -120^\circ \quad (2.14)$$

$$\underline{V}_{CN} = \underline{E}_c = a \underline{E}_a = E \angle +120^\circ \quad (2.15)$$

Agora, pela combinação das equações 2.1 a 2.6 e 2.13 a 2.15 temos:

$$0 = \underline{V}_{NT}(\underline{Y}_N + \underline{Y}_{AT} + \underline{Y}_{BT} + \underline{Y}_{CT} + \underline{Y}_F) + \underline{E}_a(\underline{Y}_{AT} + a^2 \underline{Y}_{BT} + a \underline{Y}_{CT}) + \underline{E}_a \underline{Y}_F \quad (2.16)$$

$$\underline{V}_{NT} = - \frac{(\underline{Y}_{AT} + a^2 \underline{Y}_{BT} + a \underline{Y}_{CT} + \underline{Y}_F) \underline{E}_a}{\underline{Y}_N + \underline{Y}_F + \underline{Y}_{AT} + \underline{Y}_{BT} + \underline{Y}_{CT}} \quad (2.17)$$

Ressalta-se que esta equação, de determinação do valor da tensão de deslocamento do neutro em qualquer situação, pode ser considerada como fundamental na análise.

Em um sistema trifásico simétrico equilibrado, considera-se que as admitâncias de fase para terra são iguais, ou seja,  $\underline{Y}_{AT} = \underline{Y}_{BT} = \underline{Y}_{CT} = \underline{Y}_{\phi T}$ . Assim, temos que:

$$\underline{Y}_{AT} + \underline{Y}_{BT} + \underline{Y}_{CT} = 3 \cdot \underline{Y}_{\phi T} \quad (2.18)$$

$$\underline{Y}_{AT} + a^2 \underline{Y}_{BT} + a \underline{Y}_{CT} = \underline{Y}_{\phi T} + a^2 \underline{Y}_{\phi T} + a \underline{Y}_{\phi T} = \underline{Y}_{\phi T} (1 + a + a^2) = 0 \quad (2.19)$$

Logo, a equação 2.17 pode ser reescrita das seguintes maneiras:

$$\underline{V}_{NT} = - \frac{\underline{Y}_F \underline{E}_a}{\underline{Y}_N + \underline{Y}_F + 3 \underline{Y}_{\phi T}} \quad (2.20)$$

$$\underline{V}_{NT} = - \frac{\underline{E}_a}{1 + \frac{1}{\underline{Y}_F} (\underline{Y}_N + 3 \underline{Y}_{\phi T})} \quad (2.21)$$

Em regime normal, ou seja  $\underline{Z}_F \approx \infty$  e  $\underline{Y}_F \approx 0$ ,  $\underline{V}_{NT} = 0$ , isto é não existe deslocamento do neutro. Por outro lado, neste mesmo sistema com um falta fase-terra sólida ( $\underline{Z}_F \approx 0$  e  $\underline{Y}_F \approx \infty$ ),  $\underline{V}_{NT} = -\underline{E}_a = -V_{AN} = V_{NA}$ .

### 2.4.2 Cálculo da Corrente Fase-Terra em um Sistema Isolado com Neutro Flutuante

Admitindo-se um sistema isolado equilibrado, com neutro flutuante ( $\underline{Z}_N \approx \infty$  e  $\underline{Y}_N \approx 0$ ) e uma falta a terra na fase A, com  $\underline{Z}_F \approx 0$  e  $\underline{Y}_F \approx \infty$ , representado pela figura 2.6, segue:

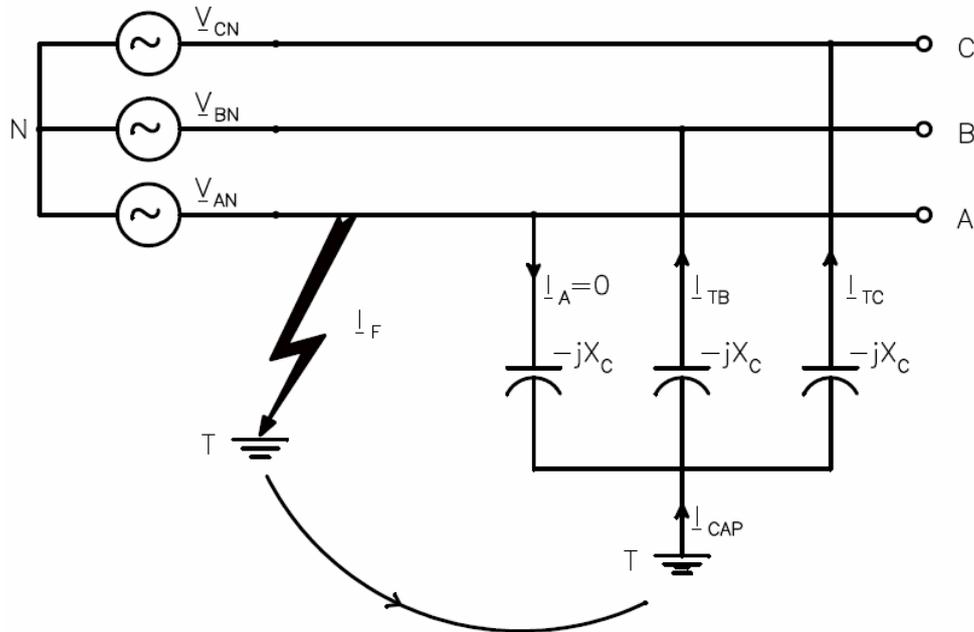


Figura 2.6. Falta em um sistema isolado equilibrado

$$\underline{V}_{AT} = 0 \quad (2.22)$$

$$\underline{V}_{BT} = \underline{V}_{BA} \quad (2.23)$$

$$\underline{V}_{CT} = \underline{V}_{CA} \quad (2.24)$$

$$\underline{V}_{NT} = \underline{V}_{NA} \quad \text{ou} \quad \underline{V}_{TN} = \underline{V}_{AN} \quad (2.25)$$

$$\underline{I}_F = \underline{I}_{CAP} = \underline{I}_{TB} + \underline{I}_{TC} = -\underline{I}_{BT} - \underline{I}_{CT} \quad (2.26)$$

$$\underline{I}_{BT} = \frac{\underline{V}_{BA}}{-jX_C} \quad (2.27)$$

$$\underline{I}_{CT} = \frac{\underline{V}_{AC}}{-jX_C} \quad (2.28)$$

$$\underline{I}_F = \frac{\underline{V}_{AB}}{-jX_C} - \frac{\underline{V}_{CA}}{-jX_C} = \frac{\underline{V}_{AB} + \underline{V}_{AC}}{-jX_C} \quad (2.29)$$

$$\underline{V}_{AB} + \underline{V}_{AC} = \underline{I}_F(-jX_C) \quad (2.30)$$

Da equação 2.44:

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{V}_{AT} + \underline{V}_{BT} + \underline{V}_{CT}}{3} \quad (2.31)$$

Substituindo a eq 2.31 pelas 2.22 a 2.25 temos:

$$\underline{V}_{NA} = \frac{0 - (\underline{V}_{AB} + \underline{V}_{AC})}{3} \quad (2.32)$$

Substituindo a eq 2.32 pela 2.30 temos:

$$3\underline{V}_{NA} = -\underline{I}_F(-jX_C) = \underline{I}_F(jX_C) \quad (2.33)$$

Portanto,

$$\underline{I}_F = \frac{3\underline{V}_{NA}}{jX_C} = \underline{I}_{CAP} \quad (2.34)$$

Esta fórmula permite avaliar facilmente o valor da corrente capacitiva em linhas aéreas, onde podem ser desprezadas as resistências de dispersão, o que não é válido para sistemas com cabos isolados.

### 2.4.3 Condição de Sintonia com Bobina de Petersen ( $\underline{Z}_F \approx 0$ e $\underline{Y}_F \approx \infty$ )

Ainda considerando sistemas aéreos, nos quais podemos desprezar as resistências de dispersão, para uma falta à terra na fase A, segue que:

$$\underline{V}_{NT} = \underline{V}_{NA} \quad \text{ou} \quad \underline{V}_{TN} = \underline{V}_{AN} \quad (2.35)$$

$$\underline{I}_F - \underline{I}_L - \underline{I}_{CAP} = 0 \quad (2.36)$$

$$\text{Para } \underline{I}_F = 0, \quad \underline{I}_L = -\underline{I}_{CAP} \quad (2.37)$$

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{V}_{TN}}{jX_L} = \frac{\underline{V}_{AN}}{jX_L} \quad (2.38)$$

Pelas eqs. 2.34, 2.35 a 2.38, temos:

$$\frac{\underline{V}_{AN}}{jX_L} = \frac{3\underline{V}_{AN}}{jX_C} \quad (2.39)$$

Portanto obtemos a condição de sintonia:

$$3X_L = X_C \quad (2.40)$$

$$X_L = \frac{X_C}{3} \quad (2.41)$$

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C} \text{ ou } L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (2.42)$$

As equações anteriores permitem determinar o valor da reatância e da indutância para a bobina de Petersen, em linhas aéreas fixas, isto é, de topologia invariável.

#### 2.4.4 Análise através das Componentes Simétricas

A avaliação do sistema através de componentes seqüenciais é importante uma vez que, normalmente, os métodos de detecção e identificação de faltas à terra são baseados nas grandezas de seqüência zero. Através do conhecimento dos diagramas seqüenciais, é possível avaliar a corrente de falta para terra e a tensão de deslocamento do neutro em qualquer sistema, bem como a compreensão mais detalhada dos fatores que influenciam no aterramento do neutro.

Para esta análise, considerou-se um sistema elétrico simétrico simplificado, composto por uma fonte trifásica associada a uma linha de transmissão com impedâncias seqüenciais conhecidas, sendo esta submetida a uma falta de fase para terra com impedância  $R_F$ . A figura 2.7 mostra o sistema em questão. Através das equações 2.43 e 2.44 fica demonstrado que, no momento do defeito, a tensão de seqüência zero ( $V_0$ ) é igual à tensão de deslocamento do neutro ( $\underline{V}_{NT}$ ), independentemente do valor de resistência de falta  $R_F$ .

$$\underline{V}_{AT} = \underline{V}_{AN} + \underline{V}_{NT}$$

$$\underline{V}_{BT} = \underline{V}_{BN} + \underline{V}_{NT}$$

$$\underline{V}_{CT} = \underline{V}_{CN} + \underline{V}_{NT}$$

$$\underline{V}_{AT} + \underline{V}_{BT} + \underline{V}_{CT} = \underline{V}_{AN} + \underline{V}_{BN} + \underline{V}_{CN} + 3\underline{V}_{NT} = 0 + 3\underline{V}_{NT} \quad (2.43)$$

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{V}_{AT} + \underline{V}_{BT} + \underline{V}_{CT}}{3} = \frac{3V_0}{3} = V_0 \quad (2.44)$$

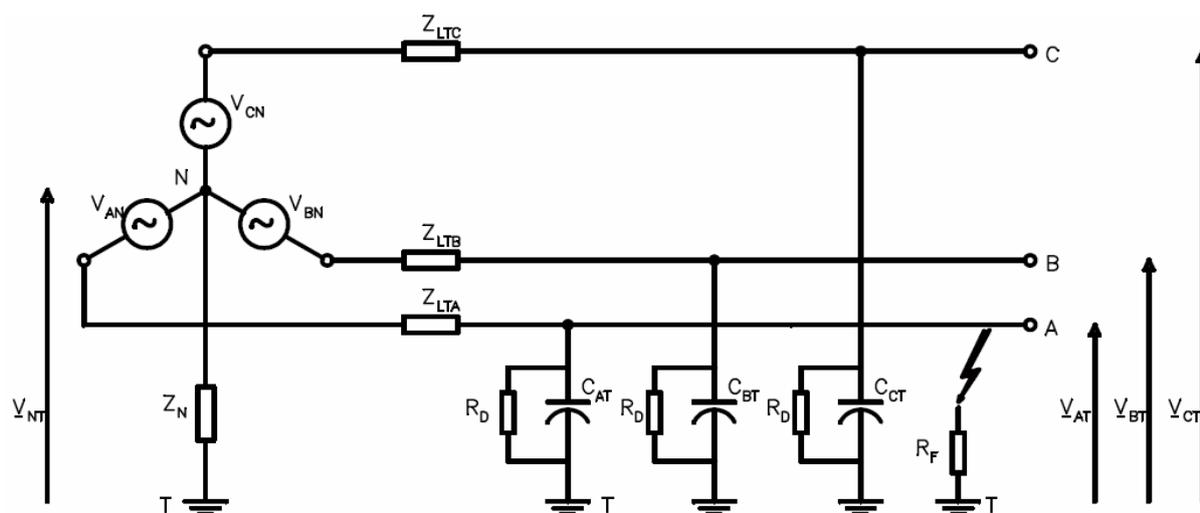


Figura 2.7. Sistema elétrico simplificado

A impedância de aterramento do neutro da fonte é indicada por  $Z_N$  e a capacitância equivalente fase-terra de uma fase da linha é representada por  $C$ . Esta capacitância única equivalente representa a soma das capacitâncias distribuídas no sistema. Na figura 2.8 são apresentados os diagramas de seqüência positiva, negativa e zero, bem como suas conexões seqüenciais obtidas a partir da condição de contorno de uma falta de uma fase para terra [13].

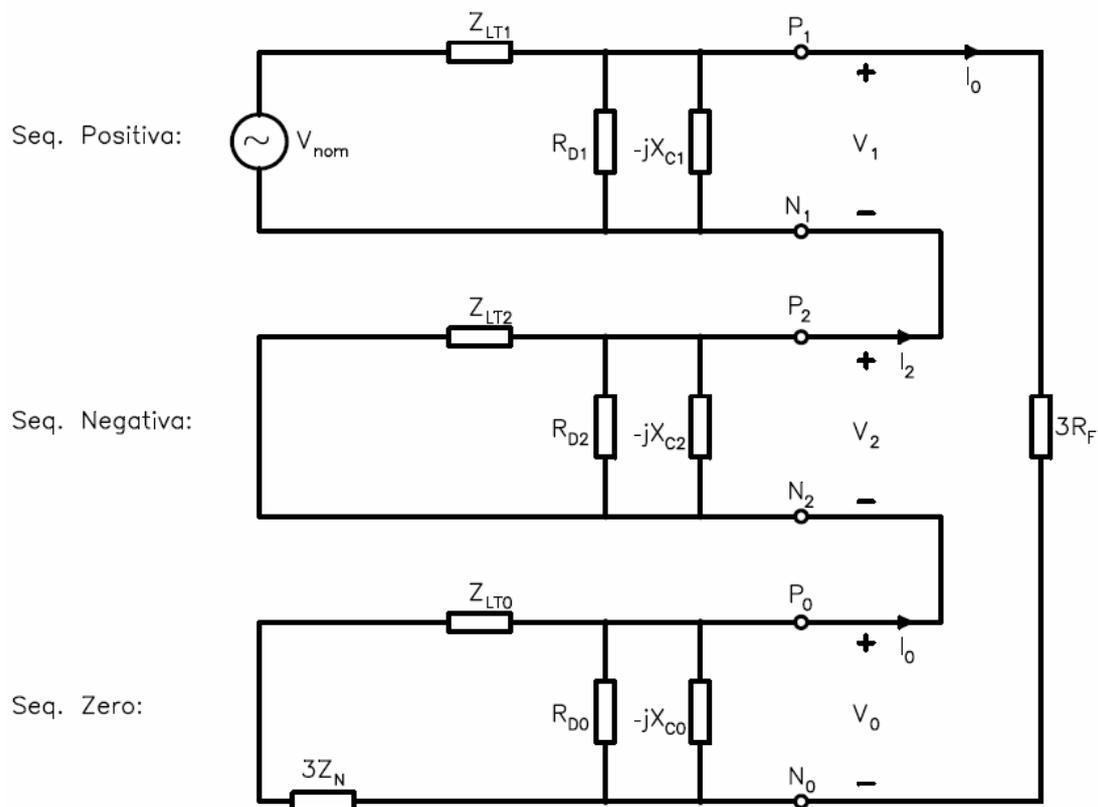


Figura 2.8. Diagrama de Redes Seqüenciais Correspondente

Na avaliação dos fenômenos que ocorrem durante um curto fase-terra, são importantes algumas considerações em relação às impedâncias seqüenciais [17]. As impedâncias de seqüência positiva e negativa das linhas de transmissão são iguais entre si. A impedância de seqüência zero é dependente de diversos fatores, principalmente do circuito de retorno, que geralmente ocorre via terra. Assim, os parâmetros tais como a resistividade do solo, a disposição e o espaçamento dos condutores entre si e para o solo são significativos. Além destes, a presença do condutor neutro e/ou cabo pára-raios multi-aterrado exerce influência no valor da impedância de seqüência zero das linhas de transmissão [3].

A fim de possibilitar uma comparação entre as magnitudes das impedâncias seqüenciais, foram determinadas as impedâncias de seqüência positiva e zero para linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão e suas respectivas reatâncias capacitivas, conforme apresentado na tabela 2.1. Para se obter as impedâncias considerou-se um solo com resistividade média de 500  $\Omega$ .m. e utilizou-se as características dos condutores, tais como diâmetro e raio médio geométrico (GMR), valores típicos de espaçamentos dos cabos e altura dos condutores ao solo [18] [19] [20] [21].

**Tabela 2.1:** Impedâncias Seqüenciais de uma Linha de Transmissão

Tensão da L.T. [kV]	Condutor <sup>(1)</sup>	$X_{LT1}$ (seq. pos.) <sup>(2)</sup> [pu/fase/km]	$X_{LT0}$ (seq. zero) <sup>(2)</sup> [pu/fase/km]	$X_{CLT}$ <sup>(2)</sup> [pu/fase/km]
13,8	CA 2/0 AWG	0.2671	1.1305	$0.1365 \times 10^6$
13,8	CAA 336,4 MCM	0.2051	1.0686	$0.1245 \times 10^6$
13,8	CAA 636 MCM	0.1926	1.0560	$0.1166 \times 10^6$
13,8	CAA 900 MCM	0.1865	1.0499	$0.1126 \times 10^6$
34,5	CAA 336,4 MCM	0.2150	1.0489	$0.1307 \times 10^6$
34,5	CAA 636 MCM	0.2024	1.0364	$0.1228 \times 10^6$
34,5	CAA 900 MCM	0.1963	1.0302	$0.1188 \times 10^6$
69,0	CAA 336,4 MCM	0.2193	1.0402	$0.1335 \times 10^6$
69,0	CAA 636 MCM	0.2067	1.0277	$0.1256 \times 10^6$
69,0	CAA 900 MCM	0.2006	1.0216	$0.1215 \times 10^6$

Notas:

1- CA: condutor de alumínio; CAA: condutor de alumínio com alma de aço.

2-  $V_{base} = V_{linha}$ ,  $P_{base} = 100MVA$ ,  $f_{nom} = 60Hz$ .

Através da tabela 2.1, é possível verificar que as impedâncias de seqüência positiva (igual a negativa) e zero de uma linha de transmissão possuem valores bastante inferiores quando comparadas à reatância capacitiva fase-terra do sistema. Este fato nos permite desprezar as impedâncias seqüenciais da linha, sem uma perda de precisão significativa quando da avaliação de faltas monofásicas. Considerando que a tensão de Thévenin, tensão de pré falta no ponto de falta, é igual à tensão nominal fase-neutro do sistema ( $V_{nom}$ ) e desprezando as resistências de dispersão ( $R_d \rightarrow \infty$ ), pois se tratam de linhas aéreas, obtém-se o diagrama seqüencial simplificado, conforme apresentado na figura 2.9.

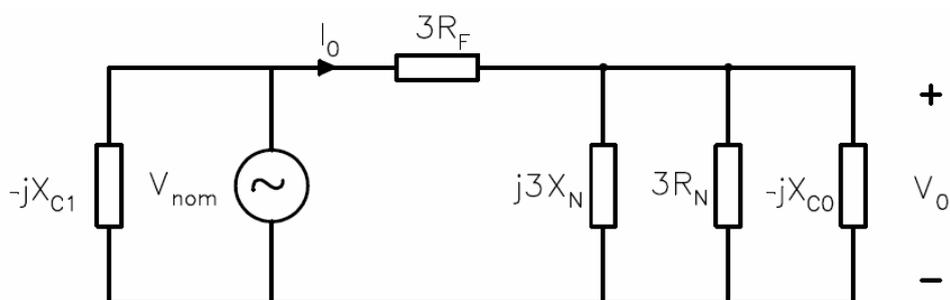


Figura 2.9. Diagrama de Redes Seqüenciais Simplificado

A partir da figura 2.9 obtém-se a corrente  $I_F = 3I_0$  e a relação entre  $V_{nom}/V_0$ , representada pela equação 2.45.

$$\frac{V_0}{V_{nom}} = \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_N} + j3R_F \left( \omega C - \frac{1}{3\omega L_N} \right)} \quad (2.45)$$

Conforme a equação 2.44 para faltas à terra, a tensão de seqüência zero do sistema iguala-se à tensão de neutro para terra. Logo, a equação 2.45 é uma versão de seqüência zero da equação 2.21.

Verifica-se através das avaliações efetuadas, por componentes simétricas ou componentes de fase, que a resistência de falta ( $R_F$ ) é um parâmetro fundamental quando da ocorrência de uma falta para terra. Considerando a análise no domínio das fases,  $R_F$  significa uma alteração na admitância fase-terra. No domínio seqüencial,  $R_F$  é um fator preponderante sobre os valores de corrente e tensão de seqüência zero.

Em geral, as alterações das tensões de fase são indicadores de falta no sistema. No entanto, as mudanças de magnitude da fase podem ser muito pequenas ou até negativas para faltas de alta impedância. A medida que  $R_F$  atinge valores elevados, menor é o deslocamento

do neutro e conseqüentemente torna-se mais difícil a detecção da falta. Como resultado, as faltas de alta impedância podem até melhorar o equilíbrio do sistema ao invés de desequilibrá-lo [22], embora estas faltas representem elevado risco à segurança pessoal. Isto representa um limite para a sensibilidade da detecção de faltas baseadas na magnitude da tensão neutro-terra. Por outro lado, observa-se uma oportunidade para detectar faltas de alta impedância através do sistema de compensação ativo, que pode forçar o deslocamento do neutro e portanto aumentar a corrente de falta à terra artificialmente.

## **2.5 Conclusões**

Neste capítulo foram abordados os princípios e as questões relativas ao aterramento do neutro via reatância sintonizada. Os conceitos aqui apresentados são pois fundamentais para o entendimento dos assuntos a serem discutidos nos capítulos seguintes.

# Capítulo 3

## Controle da Sintonia

*Um dos principais obstáculos que se pode apontar na aplicação do aterramento ressonante consiste na manutenção da sintonia da indutância da bobina, de uma forma contínua e em tempo real, quando o sistema varia seus parâmetros. O objetivo deste capítulo é o de apresentar uma revisão das técnicas atualmente em uso para controle da sintonia da bobina. Verifica-se, ao final, que todas elas utilizam a sintonia através de meios mecânicos. Este fator constitui uma limitação na qual o presente trabalho pretende propor uma solução.*

### 3.1 Técnicas Convencionais de Controle da Sintonia

As principais técnicas utilizadas para se efetuar o controle da sintonia consistem na identificação dos parâmetros do sistema, através de alguma forma de medição, seguido da alteração física da indutância da bobina. Para isto existem diversos algoritmos, dentre os quais podem ser mencionadas a curva de ressonância [23], o diagrama de lócus de  $\underline{V}_{NT}$  [24], análise dos componentes transitórios [25] [26], a falta fase-terra artificial [27] e a injeção de corrente [28] [29]. O objetivo final do controle é ajustar a bobina para compensar a parcela capacitiva da corrente de falta no ponto de defeito.

#### 3.1.1 Parâmetros de Sistemas Compensados

O grau de sintonia ( $\nu$ ), grau de atenuação ( $d$ ) e fator de simetria ( $k$ ) são os mais importantes parâmetros na avaliação dos sistemas compensados [42]. A maioria dos métodos de controle da sintonia da bobina utiliza tais parâmetros para caracterizar, supervisionar e atuar no sistema.

O grau de sintonia é definido como sendo a relação entre a corrente capacitiva ( $\underline{I}_{CAP}$ ) no ponto de falta e a corrente indutiva na bobina de neutro para terra ( $\underline{I}_L$ ). O circuito está completamente sintonizado quando  $\nu = 0$ . Caso  $\nu < 0$ , o sistema encontra-se subcompensado e na situação que  $\nu > 0$  o sistema está sobrecompensado. O parâmetro ( $\nu$ ) é determinado da seguinte forma:

$$v = \frac{I_{CAP} - I_L}{I_{CAP}} = 1 - \frac{I_L}{I_{CAP}} \quad (3.1)$$

O grau de atenuação ou amortecimento ( $d$ ) consiste na relação entre a corrente capacitiva e a corrente residual resistiva ( $I_R$ ) no ponto de falta. Conforme afirmado nos itens anteriores, a corrente  $I_R$ , também conhecida como corrente watimétrica, constitui o resultado de várias perdas no sistema, tais como fugas pelas superfícies dos isoladores e da fase para terra no ar, linhas aéreas, ou perdas dielétricas dos cabos isolados. O parâmetro  $d$  é dado por:

$$d = \frac{I_R}{I_{CAP}} \quad (3.2)$$

ou através de:

$$d = \frac{1}{R_N \omega C} \quad (3.3)$$

O fator de simetria ( $k$ ) corresponde ao desbalanço entre os acoplamentos capacitivos dos condutores das fases à terra, como, por exemplo, resultado de posições geométricas distintas ou chaveamento de linhas de individuais. A equação 3.4 define o parâmetro  $k$  [42].

$$k = \left| \frac{C_{AT} + a^2 C_{BT} + a C_{CT}}{C_{AT} + C_{BT} + C_{CT}} \right| = d \frac{V_{NT \max}}{V_{nom}} \quad (3.4)$$

Por fim, quando a rede está em serviço normal, ou seja, sem a presença de uma falta para terra, a tensão neutro-terra ( $V_{NT}$ ) pode ser determinada através da seguinte relação:

$$\underline{V}_{NT} = -\frac{k}{v + jd} V_{nom} \quad (3.5)$$

A estimativa dos parâmetros acima citados pode ser feita através de indicadores operacionais. A determinação dos valores exatos dos mesmos, somente é possível a partir de medições diretas no local de falta.

### 3.1.2 Falta Fase-Terra Artificial

Este método consiste em se produzir uma falta fase-terra artificial sob condições controladas [27], cujo esquema de execução está mostrado na figura 3.1. Durante a falta artificial, para diversas posições da bobina, são registrados os valores da tensão de neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$ , a corrente de falta ( $I_F$ ), a corrente na bobina ( $I_L$ ), bem como sua parcela wattimétrica ( $I_R$ ). A partir dos valores medidos é traçada uma curva de ressonância, chamada “Curva V”, da qual extraem-se as informações dos parâmetros de sintonia ( $\nu$ ) e atenuação ( $d$ ).

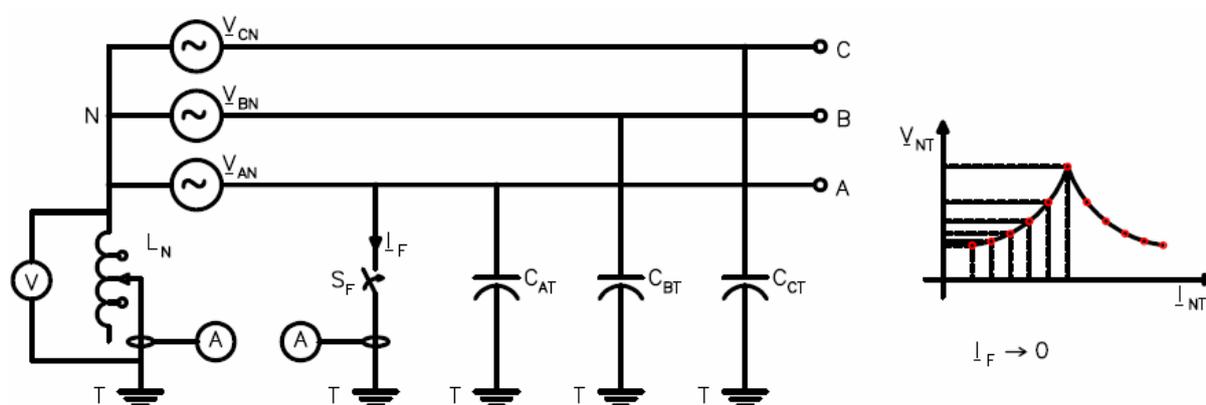


Figura 3.1. Esquema de Sintonia da Bobina através de uma Falta Artificial e exemplo de curva de medição ponto a ponto

Através do conhecimento da “Curva V” e dos parâmetros citados, a bobina pode ser sintonizada para a condição de mínima corrente de falta. A utilização deste método normalmente é feita somente por ocasião do “*start-up*” do sistema ou para se verificar a qualidade do algoritmo de controle da bobina.

### 3.1.3 Curva de Ressonância

Neste método o controle da sintonia da bobina é efetuado através da elaboração de uma curva de ressonância [23]. Para levantamento desta curva, o controlador utiliza o registro das medições da tensão neutro-terra ( $\underline{V}_{NT}$ ), a posição da bobina de Petersen e a respectiva corrente de neutro para terra. A atuação do controle é realizada quando da ocorrência de uma falta para terra ou no caso de detecção de desbalanço capacitivo natural de uma rede.

A partir dos valores medidos, é construída a curva de ressonância em função da corrente em cada posição da bobina ( $I_L$ ) e o valor absoluto da tensão de neutro para terra ( $V_{NT}$ ). A figura 3.2 ilustra uma curva típica desta natureza. A condição de sintonia é aquela na qual a tensão  $V_{NT}$  atinge seu valor absoluto máximo. Desta forma, o algoritmo busca obter a tensão residual máxima.

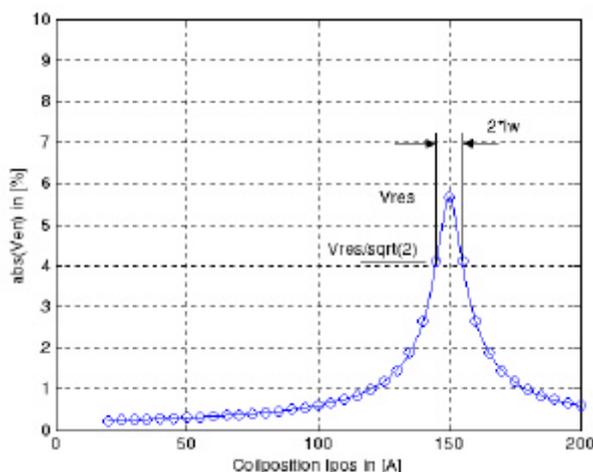


Figura 3.2. Curva de Ressonância Típica ( $V_{NT}$  vs.  $I_{pos}$ )

A curva de ressonância pode ser apresentada através dos parâmetros  $V_{pos}$  e  $I_{pos}$ . Este procedimento também é conhecido como “método  $\sqrt{2}$ ”, uma vez que para a tensão máxima da curva permanece a relação  $|V_{NT}/V_{pos}| = 1/\sqrt{2}$ .

Observa-se que este algoritmo é bastante sensível às variações da tensão  $V_{NT}$ . Desta forma, o controle é afetado por diversos tipos de distúrbios, os quais podem gerar tensões neutro-terra diferentes de zero. Logo, torna-se bastante difícil para o algoritmo de comando distinguir entre os pontos de ressonância “reais” e “fictícios” causados pelos distúrbios.

Dentre os distúrbios associados às alterações na tensão  $V_{NT}$ , podem ser apontados aqueles devidos a:

- desbalanço de tensão em uma fase (p.ex.  $\Delta V_{AT}$ ) a partir do lado de alta tensão;
- desbalanço de tensão em uma fase (p.ex.  $\Delta V_{AT}$ ) devido à tolerância de fabricação do transformador abaixador;
- desbalanço capacitivo das linhas devido, p.ex., ao arranjo geométrico das fases em linhas aéreas;
- altos níveis de ruído nas medições de  $V_{NT}$  provenientes, p.ex., de acoplamentos capacitivos e indutivos entre a linha e o enrolamento de medição do controlador;

- carga assimétrica do sistema auxiliar do enrolamento terciário do transformador de aterramento (zig-zag) gerando, p.ex., um desbalanço na tensão ( $\Delta V_{AT}$ );
- não linearidade entre a posição da bobina medida e a real susceptância da bobina de Petersen.

Combinações dos distúrbios acima mencionados sobre cargas não balanceadas também são relevantes e influenciam a tensão  $\underline{V}_{NT}$ . Para se reduzir a sensibilidade do método de controle diante destes distúrbios existem diversas alternativas relatadas, tais como, inverso da curva de ressonância e diagrama de lócus de  $\underline{V}_{NT}$ .

### 3.1.4 Inverso da Curva de Ressonância

Uma alternativa apontada para se evitar a influência de distúrbios é a utilização de um algoritmo baseado no inverso da curva de ressonância ( $1/\underline{V}_{NT}$ ). Neste método, os parâmetros são equacionados e a curva de ressonância é estimada através de aproximações clássicas de mínimos quadrados “*least square*” [30]. A figura 3.3 apresenta uma curva ilustrativa obtida através deste método.

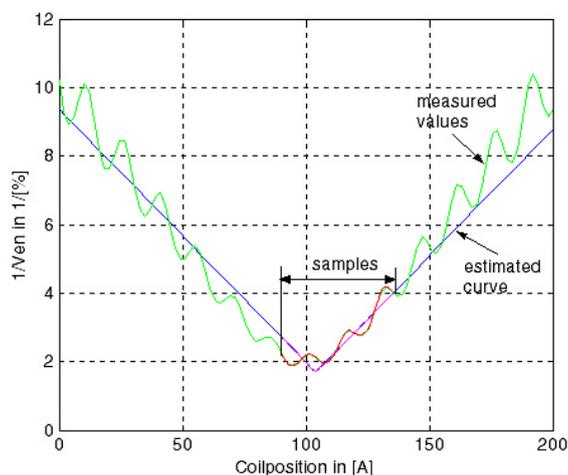


Figura 3.3. Curva de Ressonância Inversa Estimada ( $1/\underline{V}_{NT}$  vs.  $I_L$ )

Para a operação eficaz deste tipo de controle, torna-se necessário um processamento de sinais bastante robusto e de elevado consumo computacional. Este fato pode ser um inconveniente para os casos onde se requer uma rápida sintonia da bobina de Petersen.

### 3.1.5 Lugar Geométrico de $\underline{V}_{NT}$

Outra melhoria proposta, para se evitar que os distúrbios afetem o controle, consiste na investigação da mudança da tensão  $\underline{V}_{NT}$  no plano complexo. Durante a sintonia da bobina, para os valores de corrente  $\underline{I}_L$  e tensão  $\underline{V}_{NT}$ , medidos para a respectiva posição da bobina, descreve-se um diagrama de lócus (lugar geométrico), tangente ao ponto de neutro do sistema. Através de aproximações “*least square*” é possível estimar os parâmetros do sistema. Na figura 3.4 está mostrado, como exemplo, um diagrama gerado para se obter o ponto de ressonância do sistema.

A vantagem deste método deve-se à possibilidade de se trabalhar com pequenas variações do valor absoluto da tensão neutro-terra. Outro benefício importante é que, através do diagrama de lócus, permite-se obter informações da direção do desbalanço no sistema, conforme indicado na figura 3.5.

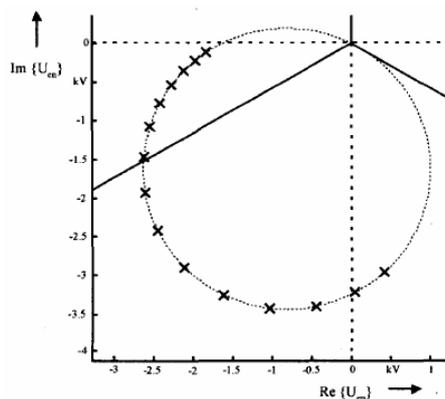


Figura 3.4. Diagrama de Lócus da tensão  $\underline{V}_{NT}$

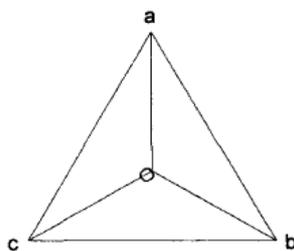


Figura 3.5. Direção do desbalanço no sistema

O lugar geométrico circular também pode ser utilizado para supervisionar o sistema. Para isto, é necessário gerar uma perturbação no neutro através de, por exemplo, da conexão de um elemento capacitivo no neutro. A comutação dá origem a dois pontos medidos de tensão neutro-terra. A partir de três pontos, incluindo-se o ponto neutro  $N$ , é possível construir

um círculo, com do qual são obtidos os parâmetros do sistema compensado, fazendo a projeção dos pontos medidos em uma escala ortogonal [24].

Este procedimento apresenta os inconvenientes de elevados tempos de resposta da medição e baixa precisão quando a assimetria é pequena, o que pode não levar a resultados não eficazes para todas as condições de exploração de uma rede.

Outra alternativa para produzir a perturbação no neutro consiste na injeção de corrente, método este que será discutido logo em seguida.

### 3.1.6 Análise de Componentes Transitórios

A análise de registros de faltas é um método que pode ser utilizado para determinar os parâmetros do sistema compensado e verificar a condição de sintonia [25] [26]. Após a ocorrência de uma falta, existe um processo transitório de recuperação para e a extinção do arco elétrico, onde a forma de onda de tensão neutro-terra apresenta um decaimento até retornar ao valor pré-falta, conforme ilustrado na figura 3.6.

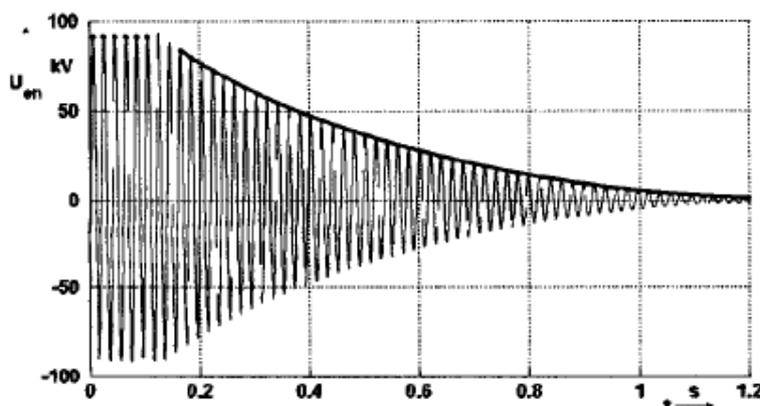


Figura 3.6. Exemplo de onda de tensão neutro-terra após ocorrência de uma falta

A envoltória da curva medida de tensão pode ser determinada através da equação 3.6:

$$v_{NT\_env} = \hat{v}_{NT\_env} \cdot e^{-t\delta} \quad (3.6)$$

Assumindo que um simples circuito paralelo de oscilação pode modelar o sistema, o parâmetro deste circuito pode ser calculado como:

$$\delta = \frac{1}{2RC} = \frac{1}{2T} \quad (3.7)$$

Onde as correntes residuais resistiva e capacitiva são definidas como:

$$\underline{I}_R = \underline{V}_{NT} / R_N \quad (3.8)$$

$$\underline{I}_{CAP} = \omega_0 \cdot C \cdot \underline{V}_{NT} \quad (3.9)$$

Os parâmetros grau de amortecimento ( $d$ ), e a sintonia ( $v$ ), são obtidos através das equações 3.10 e 3.11, onde  $f_0$  e  $f_p$  representam duas frequências de oscilação.

$$d = \frac{\underline{I}_R}{\underline{I}_{CAP}} = \frac{\delta \cdot 2}{\omega_0} \quad (3.10)$$

$$v = \frac{f_0 - f_p}{f_p} \quad (3.11)$$

Ressalta-se que, para trabalhar com o método de componentes transitórios é necessário que se efetue um processamento de sinais para filtrar os harmônicos presentes no circuito de seqüência zero. Apenas a título de esclarecimento, pode-se afirmar que estes harmônicos são gerados por não linearidades e saturação na bobina de Petersen. Em geral, os algoritmos que fazem esta análise transitória também utilizam técnicas de aproximações “*least square*” para determinar os parâmetros e obter a sintonia do sistema.

### 3.1.7 Injeção de Corrente em 60Hz

Neste método de estimativa dos parâmetros do sistema, são utilizados os valores de corrente ( $\underline{I}_{NT}$ ) e tensão de neutro para terra ( $\underline{V}_{NT}$ ) em duas situações. A primeira situação é para a operação normal do sistema, e a segunda através de uma injeção de corrente no neutro do sistema. A lógica por trás desta injeção é permitir a obtenção de dois valores distintos de tensão e corrente, porém sem variar a topologia do circuito. O sistema de injeção é baseado na suposição de que o sistema pode ser assumido como linear quando as variações são bastante pequenas. Este sistema relaciona diferenças ou acréscimos conforme equação 3.12:

$$\underline{Y}_{NT} = \frac{\Delta \underline{I}}{\Delta \underline{V}} = \frac{\underline{I}_{NT\_com\_injeção} - \underline{I}_{NT\_sem\_injeção}}{\underline{V}_{NT\_com\_injeção} - \underline{V}_{NT\_sem\_injeção}} \quad (3.12)$$

A injeção de corrente é feita através de um sinal auxiliar de medição, com frequência nominal da rede, no circuito de neutro para terra. Os parâmetros são calculados a partir da comparação do sinal injetado e da variação tensão neutro-terra provocada por esta injeção, em dois pontos no tempo, por meio do teorema da superposição. Mede-se assim, em amplitude e em fase, a nova admitância do circuito neutro-terra (realizando uma análise vetorial de  $\Delta \underline{I} / \Delta \underline{V}$ ) o que torna possível determinar a posição da bobina para se obter a sintonia do sistema.

O processo de injeção pode ser realizado de duas maneiras. A primeira forma é através de um sinal de tensão auxiliar, que é injetado por meio de um transformador cujo secundário está ligado em série com a bobina, conforme mostrado na figura 3.7. A outra maneira é feita através de um sinal de corrente auxiliar, injetada via um transformador monopolar, conectado em paralelo com a bobina, conforme ilustrado na figura 3.8. Ambas as maneiras de aplicação permitem a determinação dos parâmetros do sistema de forma satisfatória.

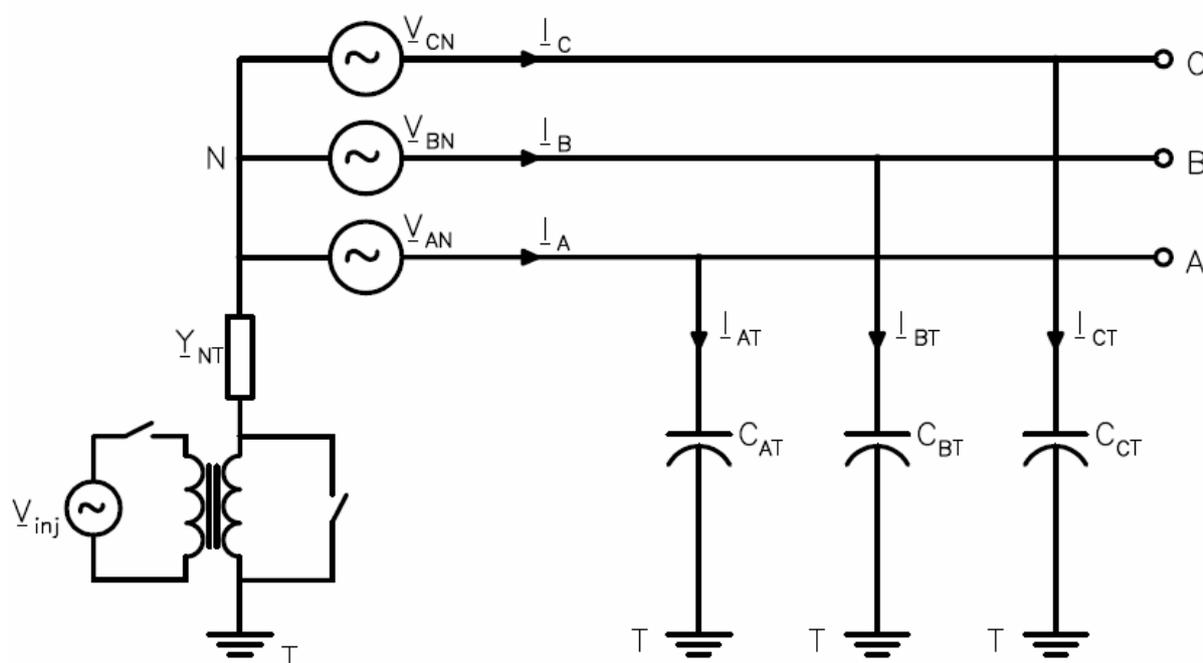


Figura 3.7. Injeção de tensão auxiliar em série com a bobina

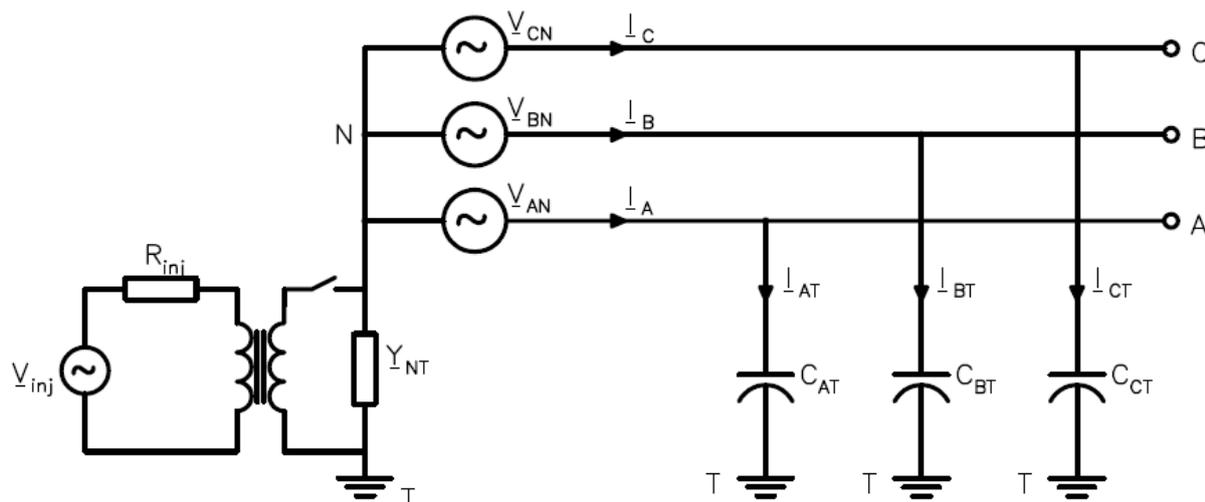


Figura 3.8. Injeção de corrente auxiliar em paralelo com a bobina

O método de injeção apresenta-se vantajoso em relação aos demais métodos de estimativa de parâmetros em diversos aspectos. Dentre as principais vantagens podemos mencionar o reduzido tempo de resposta para determinação dos parâmetros e a possibilidade de operação para quaisquer condições de exploração de um sistema, mesmo para baixos valores de tensões de neutro para terra. Além disso, evita-se o uso de reatores com êmbolo móvel que são de difícil concepção, o que permite reduzir notoriamente o custo da bobina.

### 3.1.8 Tecnologia de Identificação dos Parâmetros Através de Conversores Estáticos (Injeção de Correntes com Frequências Diferentes de 60Hz)

Seguindo-se a linha de atuação da método de injeção de corrente em 60Hz, a utilização de conversores estáticos possibilita a injeção de corrente no neutro com frequências diferentes da fundamental. A principal razão para utilização deste equipamento é a supressão do ruído da corrente de carga que influencia nas medições. Adicionalmente, o conversor possibilita diversas vantagens operacionais quando comparado com a simples injeção de corrente convencional.

O princípio desta tecnologia consiste na injeção de correntes com duas frequências  $f_n$  distintas e na medição das respectivas tensões de neutro para terra ( $V_{NT-f_n}$ ) [31]. A partir dos valores medidos determinam-se as admitâncias de neutro  $Y_{NT-f_1}$  e  $Y_{NT-f_2}$ . Em seguida, conforme mostrado nas equações 3.13 a 3.16, são obtidos os valores de  $R_N$  (resistência de dispersão total do sistema),  $C_E$  (capacitância equivalente do sistema) e  $L_N$  (indutância da bobina de Petersen).

$$Y_{NT\_fn} = \frac{I_{\_fn}}{V_{NT\_fn}} = \frac{1}{R_N} + \frac{1}{j\omega_n L_N} + j\omega_n C_E = \frac{1}{R_N} + j\left(\omega_n C_E - \frac{1}{\omega_n L_N}\right) \quad (3.13)$$

$$R_N = \frac{1}{\text{real}[Y_{NT\_f1}]} \quad (3.14)$$

$$C_E = \frac{\text{imag}[Y_{NT\_f1}]\omega_1 - \text{imag}[Y_{NT\_f2}]\omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (3.15)$$

$$L_N = \frac{1}{\omega_1^2 C_E - \text{imag}[Y_{NT\_f1}]\omega_1} \quad (3.16)$$

De posse dos valores referidos acima, é possível se obter os parâmetros de sintonia ( $v$ ) e atenuação ( $d$ ), considerando uma rede de 60Hz com tensão nominal do sistema ( $V_{nom}$ ), conforme as equações 3.17 e 3.18 a seguir. Finalmente, o valor da indutância da bobina é ajustado de forma adequada, mantendo o sistema em sintonia.

$$v_{60Hz} = V_{nom} \left( \frac{1}{\omega_{60Hz} L_N} - \omega_{60Hz} C_E \right) \quad (3.17)$$

$$d_{60Hz} = \frac{1}{R_N \omega_{60Hz} C_E} \quad (3.18)$$

Os destaques desta tecnologia estão relacionados com a rapidez das estimativas paramétricas, a insensibilidade frente aos erros de medição causados pelos transformadores de potencial (TP's) e a supressão do ruído de carga em 60Hz. A aplicação deste algoritmo pode ser estendida para sistemas com vários alimentadores através da medição individualizada em cada um deles. Adicionalmente, é possível utilizar a injeção de corrente de diferentes frequências para o reconhecimento e detecção de faltas de baixa e alta impedância. O método para este tipo de detecção de faltas é assunto para discussões posteriores.

De acordo com a filosofia de operação a ser adotada, a injeção de corrente pode ser ativada apenas por um pequeno intervalo de tempo, após a detecção de uma essencial mudança relativa de tensão de seqüência zero, de maneira a checar se é necessária uma nova sintonia da bobina de Petersen. Uma alternativa de operação possível é a injeção de corrente chaveada continuamente, detectando imediatamente qualquer operação de chaveamento na rede. Combinações destas duas filosofias são possíveis, por exemplo para checar a cada 10 minutos os parâmetros atuais do sistema.

Dependendo da curva de ressonância e da filosofia de operação normal do sistema, alguns requisitos adicionais devem ser adotados. As correntes injetadas não devem incluir componentes de 60Hz. A injeção de corrente deve ser variável em amplitude para possibilitar uma adaptação das perdas aos diferentes estados de chaveamento da rede. Um critério para detectar uma falta para terra é o valor da tensão de seqüência zero. Em redes de pequeno porte, as perdas são menores, logo apenas uma corrente reduzida deve ser injetada, atentando-se para não exceder o limite de sensibilidade do sistema de detecção de faltas, especialmente no ponto de ressonância. Por outro lado, no caso de situações com grandes desintonias, a injeção de baixas correntes não irá resultar medições de tensão para terra satisfatórias ( $V_{NT_{fn}}$ ), requerendo, assim, injeção de correntes mais elevadas.

As vantagens da utilização de conversores estáticos se devem ao apurado controle da corrente injetada. É possível selecionar a injeção de forma que as frequências sejam próximas do ponto de ressonância do sistema. Nesta condição, pequenas correntes injetadas resultam em valores tensão significativos, o que aumenta a precisão de estimativa dos parâmetros, principalmente para sistemas com grandes desintonias naturais.

### **3.1.9 Conclusão sobre as técnicas convencionais de controle da sintonia**

A obtenção dos benefícios da bobina de Petersen requer que a sintonia de ressonância entre a indutância da bobina e a capacitância de seqüência zero seja permanentemente mantida. Os métodos de controle estimam os parâmetros de sintonia, atenuação e assimetria para detectar as variações de topologia do sistema (manobras, inclusão de alimentadores, desligamentos setoriais, etc.). Em geral, para efetuar a estimativa destes parâmetros, os métodos utilizam a variação da indutância da bobina e respectiva medição da tensão de seqüência zero, bem como a análise dos registros das perturbações geradas sobre esta tensão. No entanto, apenas alterações de pequena monta na indutância podem ser toleradas, caso contrário não se alcança a sintonia, que é o objeto deste exercício. As soluções praticadas consistem no uso de reatores com núcleo tipo “êmbolo móvel”, e bobinas com comutação de *tapes*, que são efetivos para sintonia fina e contínua mas possuem difícil concepção. Infelizmente, o grau de ajuste fino (gama de controle da bobina ajustável) e o grande número de manipulações requeridas representam os maiores obstáculos para obter a sintonia do sistema.

A utilização da injeção de corrente no neutro é um método que permite determinar os parâmetros do sistema e a posição apropriada da bobina, sem a necessidade de se variar a

indutância durante a sintonia. A injeção de corrente com duas frequências, através de conversor, possibilita resultados mais apurados e suprime algumas deficiências da injeção convencional. No entanto, permanece a dependência do ajuste físico da mesma para se alcançar a sintonia, mesmo que os parâmetros sejam precisamente estimados. Por fim, a tolerância de variação da indutância também é um fator relevante para se obter a sintonia ótima.

Até então, verifica-se que o foco do aterramento do neutro está voltado para compensar a capacitância fase-terra do sistema, através apenas de elementos passivos, ou seja, a variação da indutância de neutro para terra. Por outro lado, a parcela resistiva da corrente de falta, apesar de ser relativamente pequena quando comparada à parcela capacitiva, é um fator significativo e somente pode ser compensada através da inserção de uma contra corrente ativa no circuito de seqüência zero.

### **3.2 Tecnologia de Compensação Residual**

A técnica de compensação residual é um fator adicional à sintonia da bobina de Petersen. Nesta tecnologia, o controle da variação da bobina é mantido e, durante uma falta à terra, introduz-se no neutro uma parcela ativa para contrapor a corrente residual resistiva, correspondente às perdas ativas no sistema elétrico [32] [33] [34].

A figura 3.9 representa o sistema elétrico equivalente em termos de admitâncias, com um conversor VSI (*voltage source inverter*) conectado ao neutro, enquanto a equação 2.17 (novamente apresentada abaixo) descreve a relação entre a tensão neutro-terra com as mesmas. Uma vez obtidas tais admitâncias, é possível determinar os parâmetros de sintonia, atenuação e simetria, bem como a parcela ativa para efetuar a compensação residual.

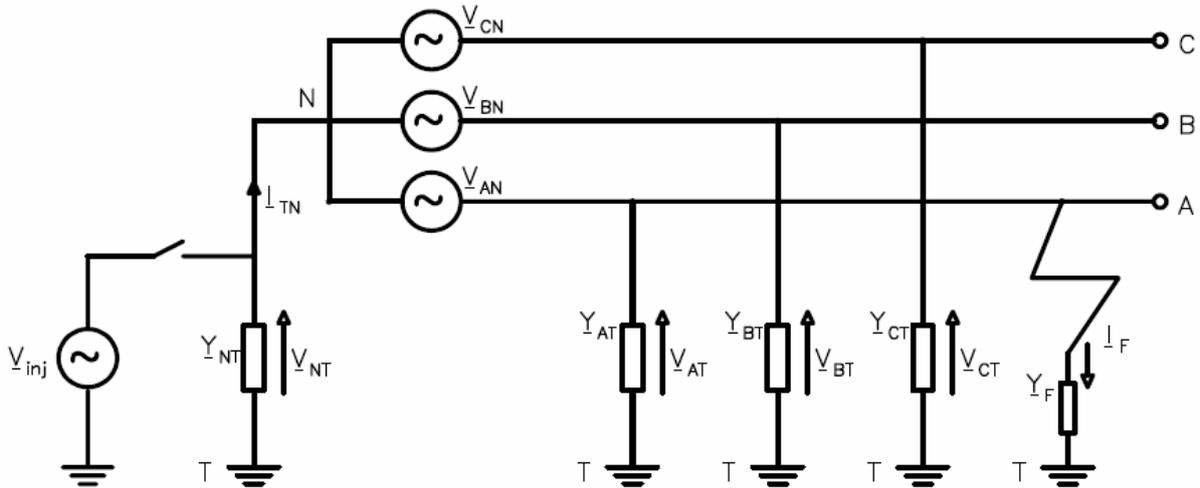


Figura 3.9. Circuito equivalente para compensação residual

$$\frac{V_{NT}}{V_{nom}} = -\frac{Y_{AT} + a^2 Y_{BT} + a Y_{CT}}{Y_N + Y_{AT} + Y_{BT} + Y_{CT}} \quad (2.17)$$

A determinação dos valores das admitâncias é realizada de forma semelhante à injeção de corrente (equação 3.12), no entanto são medidas as admitâncias fase-terra ao invés de neutro-terra. O acréscimo da tensão fase-terra é feito através da aplicação de uma tensão marginal de neutro para terra, em fase com a respectiva tensão fase-terra. A equação 3.19 apresenta o princípio da medição, para a fase  $\phi$ .

$$\underline{Y}_{\phi T} = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I_{\phi\_com\_acr\acute{e}scimo} - I_{\phi\_sem\_acr\acute{e}scimo}}{V_{\phi T\_com\_acr\acute{e}scimo} - V_{\phi T\_sem\_acr\acute{e}scimo}} \quad (3.19)$$

Após determinadas as admitâncias fase-terra ( $\underline{Y}_{AT}$ ,  $\underline{Y}_{BT}$  e  $\underline{Y}_{CT}$ ), os demais parâmetros que influenciam a tensão de neutro podem ser obtidos. As equações (3.19 a 3.21) a seguir relacionam os parâmetros de sintonia ( $v$ ), atenuação ( $d$ ) e simetria ( $k$ ). A partir destes parâmetros e a equação 2.17, é possível obter a relação dos mesmos e a tensão de neutro, conforme mostrado na equação 3.5.

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} = \frac{B_{AT} + B_{BT} + B_{CT} + B_{NT}}{B_{AT} + B_{BT} + B_{CT}} \quad (3.19)$$

$$d = \frac{I_R}{I_{CE}} = \frac{G_{AT} + G_{BT} + G_{CT} + G_{NT}}{B_{AT} + B_{BT} + B_{CT}} \quad (3.20)$$

$$k = \frac{Y_{AT} + a^2 Y_{BT} + a Y_{CT}}{B_{AT} + B_{BT} + B_{CT}} \quad (3.21)$$

$$\frac{V_{NT}}{V_{nom}} = -\frac{k}{v + jd} \quad (3.5)$$

As condutâncias fase-terra e neutro-terra ( $G_{AT}, G_{BT}, G_{CT}$  e  $G_{NT}$ ), são encontradas através das partes reais das admitâncias, fazendo  $\text{Re}[\underline{Y}_{\phi T}]$ . Já as susceptâncias fase-terra ( $B_{AT}, B_{BT}, B_{CT}$ ) são obtidas pelas partes imaginárias das admitâncias, através de  $\text{Im}[\underline{Y}_{\phi T}]$ .

A sintonia do sistema é ajustada de acordo com o valor de ( $v$ ), através da alteração da indutância da bobina, seja via reator com êmbolo móvel ou por comutadores de tapes. O controle da bobina é feito pelo lugar geométrico de  $\underline{V}_{NT}$ . Uma vez sintonizada, a parcela resistiva determina a corrente residual durante a falta.

O critério para identificar uma falta para terra é um rápido aumento na tensão de neutro. Durante a falta, a admitância da fase com defeito apresenta uma diferença significativa em relação às fases sãs. Identificada a existência de uma falta, o conversor VSI injeta uma tensão complexa de frequência fundamental e harmônica, em fase com a respectiva fase em falta, impondo que a tensão neutro-terra seja igual à tensão fase-terra da fase defeituosa antes da ocorrência do defeito ( $\underline{V}_{NT} = -\underline{V}_{nom}$ ). Esta condição é mantida por malha de controle fechada enquanto a falta para terra está presente, ou eliminada por escolha do operador.

Portanto, o método de compensação residual através de conversores de alta performance combinado com o controle da sintonia automático, propicia uma solução bastante eficiente para o aterramento do neutro. No entanto, os custos envolvidos para esta aplicação são bastante elevados e ainda permanece o requisito de equipamentos com controle de alteração da indutância para efetuar a sintonia.

### 3.3 Conclusões

O aterramento convencional do neutro através da bobina de Petersen constitui uma solução baseada em um elemento passivo. A partir do princípio de funcionamento deste componente foram concebidas diversas alternativas as quais, utilizando-se a mesma idéia da conexão do neutro à terra através de uma indutância, procuram de alguma forma melhorar suas características, principalmente em relação à sintonização da bobina.

Em geral, a alternativa mais adotada para ajustar a sintonia da bobina utiliza uma indutância variável mecanicamente, possibilitando a sintonização (com uma faixa limitada) em função das mudanças de topologia da rede. Normalmente, o ajuste é feito mediante a atuação de um motor ou comando manual o qual, atuando sobre um êmbolo em um núcleo magnético, permite a modificação do valor da indutância. As técnicas utilizadas para execução da sintonia agem apenas sobre o elemento passivo, sendo que os elementos de controle atual possuem esta limitação.

A indutância sintonizada, como elemento passivo, provoca uma circulação de corrente de neutro em função da impedância que está presente e da tensão que aparece em seus terminais como consequência de uma falta monofásica ou um desequilíbrio entre as fases. Portanto, um sistema passivo não tem capacidade alguma de variar a circulação de corrente de neutro livremente, sendo que a mesma é definida pela própria rede e sua situação operacional.

Enfim, os principais inconvenientes da utilização de um sistema com elementos passivos resumem-se na dependência da tensão de neutro que aparece no sistema durante a falta, na impossibilidade do controle da corrente em módulo, ângulo e componentes frequenciais, conseqüentemente na eliminação da componente ativa e no controle da sobretensão que é gerada no sistema. Além disso, verifica-se uma série de limitações e dificuldades em relação a algumas funções de proteção tais como localização da falta, detecção de faltas de alta impedância e obtenção de informações adicionais para faltas transitórias.

O tema central do presente trabalho consiste na proposição de um sistema de aterramento do neutro ativo que possibilite um controle da corrente de neutro a todo instante desejado. O desenvolvimento deste novo sistema, bem como seu aperfeiçoamento visa superar as deficiências identificadas nos sistemas passivos e proporcionar uma forma de aterramento completa e aprimorada, com desempenho superior aos métodos utilizados atualmente.

## Capítulo 4

# Métodos Convencionais de Detecção de Falta à Terra em Sistemas Aterrados via Reatância Sintonizada

*Uma das maiores dificuldades na implantação de um sistema de aterramento via reatância sintonizada está associada à detecção da corrente de falta à terra. O fator crítico está relacionado ao pequeno valor que esta corrente apresenta, tornando-se necessária a adoção de métodos especiais para detecção do defeito. O objetivo deste capítulo é proceder a uma revisão das metodologias atualmente utilizadas com esta finalidade.*

### 4.1 Métodos de Detecção de Falta à Terra

Os métodos de detecção de falta à terra nos sistemas compensados de distribuição podem ser classificados de acordo com os componentes dos sinais de entrada do relé que são usados para detectar a referida falta. Desta forma, os métodos podem ser agrupados dentro das seguintes classificações: frequência fundamental, baseados em harmônicos ou nos componentes transitórios e aqueles combinados com o controle da bobina e/ou injeção de tensão ou corrente no neutro.

Para o sistema compensado, é necessário que os relés de terra possuam alta sensibilidade, uma vez que a corrente de falta é muito baixa se comparada aos sistemas solidamente aterrados. Além disto, é de se considerar que os componentes de tensão e corrente com a presença da frequência fundamental fornecem informações mais confiáveis e significativas para a detecção de falta com alta resistência nos sistemas compensados de distribuição. Os métodos incluídos nestes grupos utilizam informações correspondentes ao estado de regime do sistema sob defeito, sendo que alguns desses requerem ainda as informações pré-falta do estado de regime.

Os métodos baseados em componentes fundamentais mais comuns em sistemas com bobina de Petersen tradicional, ou seja, sem o controle automático de variação da sintonia, são o wattimétrico, o da condutância e o da condutância incremental. Os conceitos destes métodos estão aprofundados nos itens seguintes.

Existem também os métodos que utilizam o conteúdo de harmônicos de tensão e corrente referentes ao estado de regime para detectar faltas à terra [41]. O conteúdo de harmônicos da corrente de falta à terra é pequeno e variável, especialmente para faltas com alta resistência. Um outro grupo de métodos detecta os componentes transitórios de corrente e tensão gerados pela falta [39]. Estes métodos possuem sensibilidade limitada, uma vez que as faltas com alta resistência reduzem o nível dos harmônicos referentes ao estado de regime e amortecem os componentes transitórios de corrente e tensão.

Outros métodos de detecção da falta, com destaque para o método da admitância, utilizam basicamente os dados sobre o estado de regime, porém requerem ações de controle da bobina de Petersen, seja por injeção de corrente ou desintonia temporária. Estes métodos fornecem uma melhoria na sensibilidade da proteção; no entanto, estão particularmente vinculados à tecnologia de controle da sintonia.

## 4.2 Representação em Componentes Simétricas

Para um melhor entendimento dos principais métodos de detecção da falta à terra, o sistema está representado através de componentes simétricas. A figura 4.1.a mostra o diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial compensado, no qual a localização do relé define a linha protegida. Todas as outras linhas da distribuição são agrupadas em uma impedância equivalente representando o restante do sistema de distribuição. A figura 4.1.b. é a representação aproximada da seqüência zero do sistema.  $C_{0L}$  e  $R_{0L}$  representam a capacitância e a resistência de dispersão de seqüência zero da linha protegida, respectivamente.  $X_N$  e  $R_N$  correspondem às respectivas reatância e resistência de neutro.  $C_{0S}$  e  $R_{0S}$  são os valores correspondentes remanescentes do sistema. Neste caso,  $C_0 = C_{0L} + C_{0S}$  e  $1/R_0 = 1/R_{0L} + 1/R_{0S}$ , onde  $C_0$  e  $R_0$  são a capacitância e a resistência de dispersão de seqüência zero do sistema respectivamente.

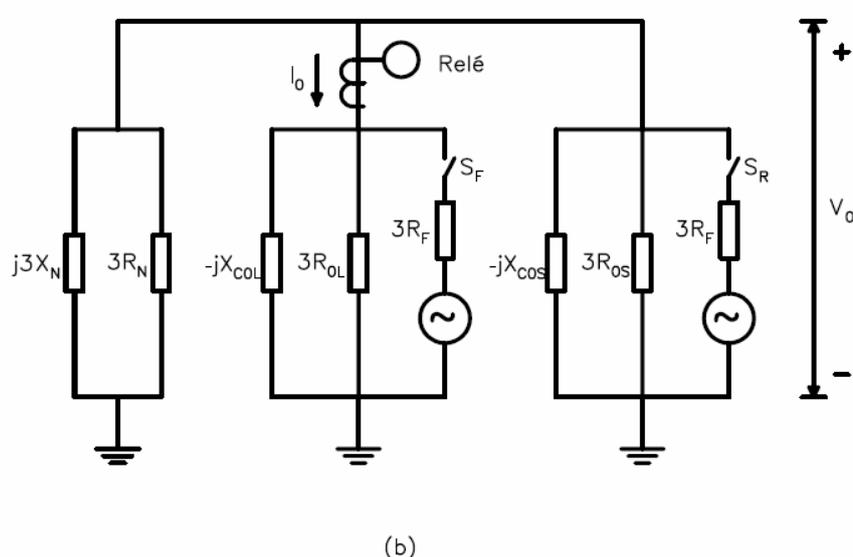
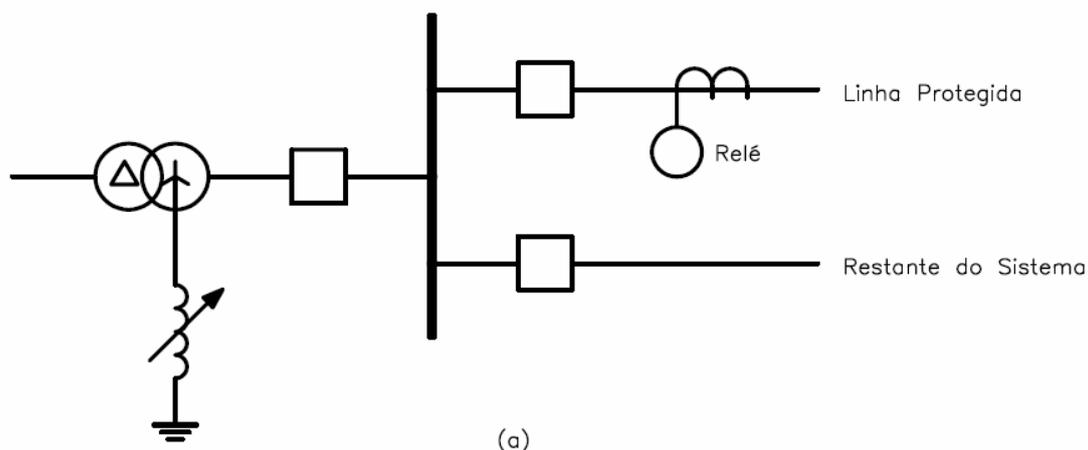


Figura 4.1.a. Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial compensado

Figura 4.1.b. Diagrama de seqüência zero deste sistema

A falta fase-terra é representada através da conexão de uma fonte equivalente de Thévenin em série com a resistência. Na figura 4.1.b., o fechamento da chave  $S_F$  representa uma falta na linha protegida (direção da falta “à frente” sob a perspectiva do relé). O fechamento da chave  $S_R$  representa uma falta à terra em outro ponto do sistema (falta na direção reversa).

Para representar de forma aproximada o desbalanço do sistema, foi conectada uma fonte equivalente de Thévenin em série com uma impedância no diagrama de seqüência zero. Na figura 4.2,  $Z_{LU}$  representa o desbalanço da linha protegida e  $Z_{SU}$  corresponde à impedância de desbalanço do restante do sistema. No lado do relé, o desbalanço inclui a assimetria do neutro do sistema primário e o desbalanço adicional introduzido pelos transformadores de corrente.

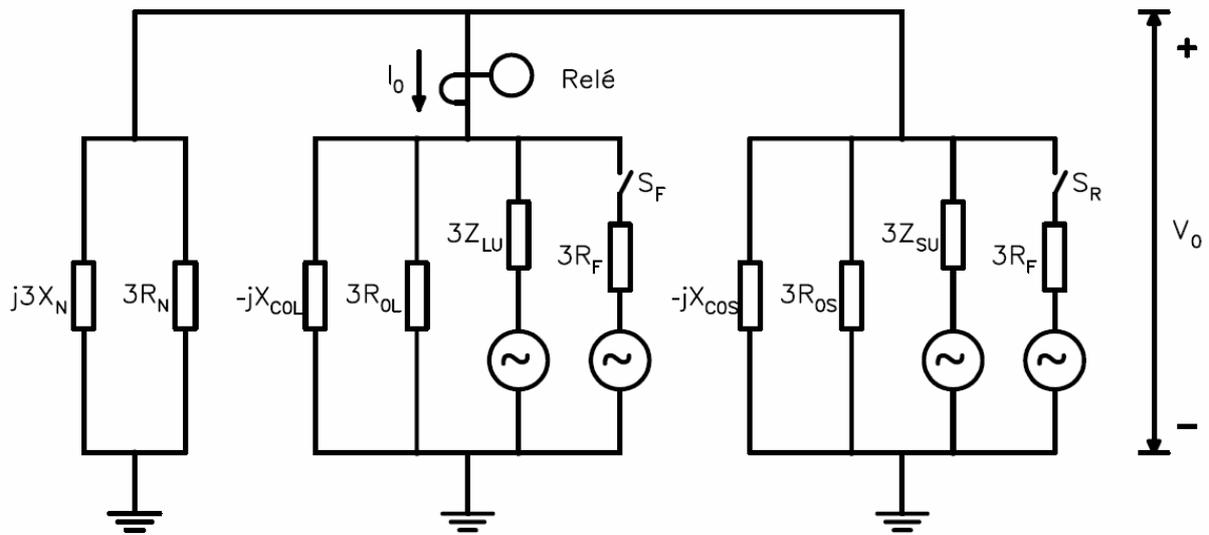


Figura 4.2 - Diagrama de seqüência zero considerando desbalanço do sistema

### 4.3 Método Watimétrico

O método watimétrico com elementos direcionais é a solução mais comum para detecção de faltas à terra nos sistemas compensados [35]. O elemento do relé responde à componente em fase (real) da corrente de seqüência-zero em relação à tensão de seqüência-zero. Tomando-se como referência a figura 4.1.b., para uma falta na direção à frente, a corrente de seqüência zero do relé  $I_0$  é dada pela equação 4.1, enquanto que, para uma falta reversa, a corrente do relé é dada pela equação 4.2.

$$I_0 = -V_0 \left[ \left( \frac{1}{R_{0S}} + \frac{1}{3R_N} \right) + j \left( \omega C_{0S} - \frac{1}{3\omega L_N} \right) \right] \text{ (falta à frente)} \quad (4.1)$$

$$I_0 = V_0 \left( \frac{1}{R_{0L}} + j\omega C_{0L} \right) \text{ (falta à reversa)} \quad (4.2)$$

Conforme equação 4.2, a direção da componente em quadratura de  $I_0$  pode mudar para faltas à frente, dependendo das condições de sintonia do sistema. Esta direção depende dos valores da capacitância de seqüência zero equivalente das linhas não submetidas ao defeito,  $C_{0S}$  e da indutância de seqüência zero do equivalente paralelo da bobina  $3L_N$ . Desta forma, para faltas à frente, a posição angular de  $I_0$  em relação a  $V_0$  pode variar significativamente. A

componente em quadratura de  $I_0$  é negativa quando o sistema é subcompensado (subsintonizado) e positiva para sistemas sobrecompensados.

Por outro lado, o sinal da componente ativa de  $I_0$  em fase, é sempre positivo para faltas reversas e negativo para faltas à frente. A equação 4.3 apresenta grandeza de saída ( $W$ ) de um relé direcional watimétrico.

$$W = \text{Re}[\underline{V}_0 \bullet \underline{I}_0^*] = V_0 I_0 \cos \varphi_0 \quad (4.3)$$

(\* = conjugado complexo)

Comparando-se  $W$  com os valores limites positivo e negativo ( $+\varepsilon$  e  $-\varepsilon$ ), pode se determinar se a falta é reversa ( $W > +\varepsilon$ ) ou falta à frente ( $W < -\varepsilon$ ). A componente ativa de  $I_0$  é muito pequena durante a falta à terra, de forma que o relé deve ser muito sensível ( $\varepsilon$  deve ser muito baixo). Para se evitar operações incorretas do relé durante condições normais do sistema, é acrescentada uma função de partida respondendo à magnitude de  $V_0$ .

Logo, a sensibilidade do relé watimétrico é determinada pela sensibilidade do elemento  $V_0$ . O valor limite de  $V_0$  deve ser maior do que o valor de  $V_0$  para desbalanços normais do sistema. Um ajuste típico é o de 20% da tensão nominal do sistema.

Um artifício utilizado para aumentar a sensibilidade deste método é a inserção de um elemento resistivo adicional em paralelo com a reatância de neutro, conforme ilustrado na figura 4.3. Ao acrescentar  $R_W$ , aumenta-se a corrente de seqüência zero. No entanto, isto significa que parcela resistiva da corrente não compensada no ponto de falta também irá aumentar.

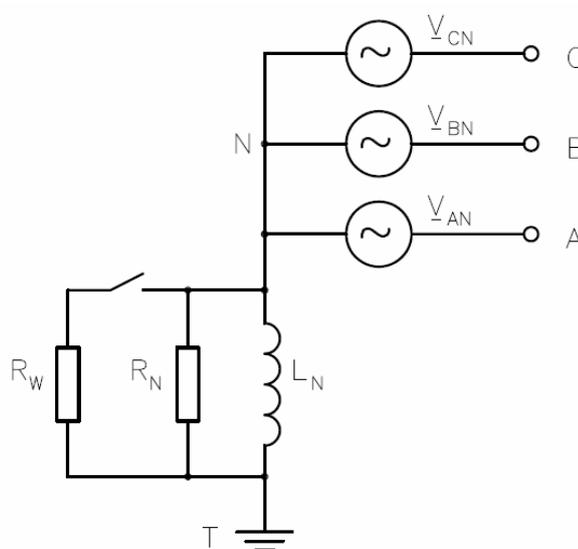


Figura 4.3. Acréscimo watimétrico através de inserção de resistor  $R_W$  no neutro.

O método wattimétrico tem sido usado por muitos anos nos sistemas compensados [16] [35]. Ele é simples, seguro e confiável para faltas à terra com baixa resistência. Entretanto, conforme a equação 2.45, o requisito da detecção de  $V_0$  limita a sensibilidade do método wattimétrico para resistências de falta de alta impedância.

#### 4.4 Método da Condutância

O método da condutância utiliza a relação entre corrente e tensão de seqüência zero [22]. Para melhor entendimento, consideramos os sistemas representados pelas figuras 4.1.a e 4.1.b e as equações 4.1 e 4.2 que descrevem a corrente de seqüência zero do relé ( $I_0$ ), para faltas nas direções à frente e reversa. A partir destas equações, obtém-se a admitância aparente de seqüência zero ( $Y_0$ ), medida pelo relé.

$$\underline{Y}_0 = \frac{\underline{I}_0}{\underline{V}_0} = - \left[ \left( \frac{1}{R_{0S}} + \frac{1}{3R_N} \right) + j \left( \omega C_{0S} - \frac{1}{3\omega L_N} \right) \right] \text{ (falta à frente)} \quad (4.4)$$

$$\underline{Y}_0 = \frac{\underline{I}_0}{\underline{V}_0} = \left( \frac{1}{R_{0L}} + j\omega C_{0L} \right) \text{ (falta à reversa)} \quad (4.5)$$

A condutância ( $G_0$ ) pode ser determinada medindo-se a parte real da admitância, conforme mostrado nas equações 4.6 e 4.7 a seguir, onde  $G_{0L}$  é a condutância de dispersão de seqüência zero do alimentador protegido,  $G_{0S}$  dos alimentadores restantes e  $G_{0N}$  representa a condutância correspondente ao equivalente paralelo da bobina de Petersen.

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[ \frac{\underline{I}_0}{\underline{V}_0} \right] = \left( \frac{1}{R_{0S}} + \frac{1}{3R_N} \right) = -(G_{0S} + G_{0N}) \text{ (falta à frente)} \quad (4.6)$$

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[ \frac{\underline{I}_0}{\underline{V}_0} \right] = \frac{1}{R_{0L}} = G_{0L} \text{ (falta à reversa)} \quad (4.7)$$

A detecção de faltas à terra através de um elemento de condutância compara  $G_0$  com os valores limites positivo e negativo ( $+\varepsilon$  e  $-\varepsilon$ ); logo,  $G_0 > +\varepsilon$  indica uma falta à frente e  $G_0 < -\varepsilon$  significa uma falta reversa.

Este método é inerentemente direcional e responde à relação corrente/tensão. Sua saída é relativamente independente das magnitudes da tensão e corrente de seqüência zero. Isto é

uma vantagem diante ao método wattimétrico, o qual falha na detecção de faltas com alta resistência causadas por baixos valores de  $V_0$  e  $I_0$ . Observa-se que o elemento wattimétrico é do tipo produto, enquanto o elemento de condutância é do tipo relação.

## 4.5 Método da Condutância Incremental

O método da condutância tradicional descrito no item anterior funciona bem nos sistemas equilibrados e para erros pequenos dos TC's, como por exemplo o uso dos TC's somadores de fluxo. Os desbalanços dos TC's e do sistema introduzem erros na condutância medida e, conseqüentemente, limitam sua sensibilidade. Uma solução para este problema é o método da condutância incremental [22]. Utilizando-se a corrente e a tensão de seqüência-zero incremental ( $\Delta I_0$  e  $\Delta V_0$ ), conforme as equações 4.8 e 4.9, obtém-se a condutância incremental  $\Delta G_0$ , descrita pela equação 4.10.

$$\Delta \underline{I}_0 = \underline{I}_{0\_FALTA} - \underline{I}_{0\_PRÉ-FALTA} \quad (4.8)$$

$$\Delta \underline{V}_0 = \underline{V}_{0\_FALTA} - \underline{V}_{0\_PRÉ-FALTA} \quad (4.9)$$

$$\Delta G_0 = \text{Re} \left[ \frac{\underline{I}_0}{\underline{V}_0} \right] \quad (4.10)$$

A figura 4.4 apresenta o diagrama de seqüência zero com grandezas incrementais. O circuito é o mesmo da figura 4.1.b; logo os valores medidos de  $\Delta G_0$  coincidem com aqueles fornecidos para  $G_0$  pelas equações 4.6 e 4.7. A seguir são mostradas as equações 4.11 e 4.12 para as condutâncias incrementais na direção à frente e reversa.

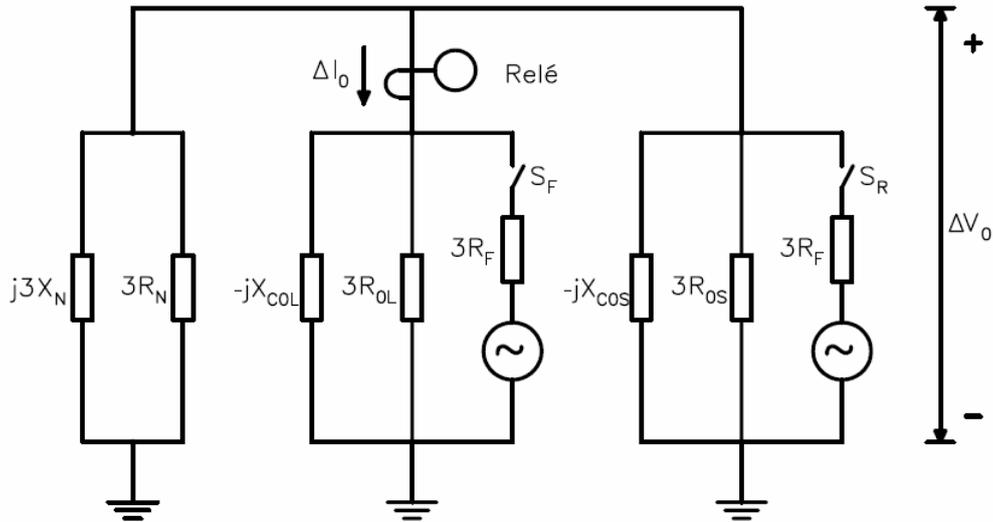


Figura 4.4. Diagrama de seqüência zero para as grandezas incrementais

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[ \frac{I_0}{V_0} \right] = \left( \frac{1}{R_{0S}} + \frac{1}{3R_N} \right) = -(G_{0S} + G_{0N}) \quad (\text{falta à frente}) \quad (4.11)$$

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[ \frac{I_0}{V_0} \right] = \frac{1}{R_{0L}} = G_{0L} \quad (\text{falta à reversa}) \quad (4.12)$$

O elemento de condutância incremental, que é altamente sensível, compara a condutância incremental medida, a parte real da relação da corrente incremental/tensão incremental, com valores limites positivo e negativo para discriminar as faltas à frente das faltas reversas. Este é um método inerentemente direcional do tipo-relação que não é afetado pelo desbalanço do sistema e que pode ser usado com TC's convencionais, apresentando alta cobertura para resistência de faltas.

## 4.6 Método da Admitância

O método da admitância para detecção de faltas à terra está associado à injeção de corrente ou tensão no neutro do sistema [43]. A partir desta injeção, mede-se a corrente nas fases e a tensão neutro-terra para cada alimentador. Os valores das admitâncias de todos os alimentadores do sistema são calculados e utilizados como referência. No caso da ocorrência de uma falta para terra, a admitância medida será diferente de seu valor pré-falta e, desta forma, o circuito com o defeito será identificado. O método da admitância é o mesmo

utilizado pela compensação da corrente residual em sistemas ressonantes. A figura 4.5 mostra a representação de um sistema elétrico para a avaliação das admitâncias para terra.

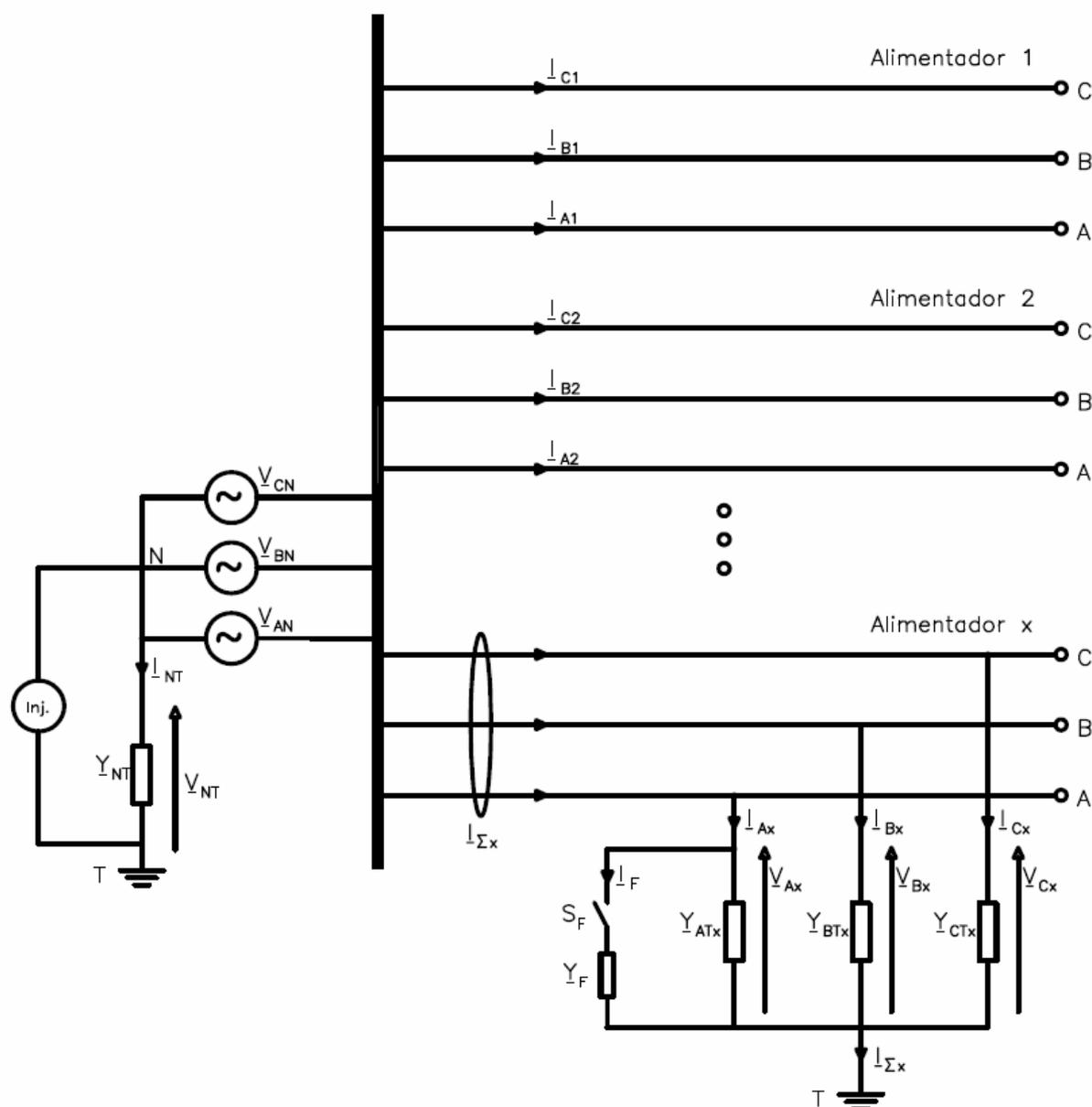


Figura 4.5 – Admitâncias fase-terra nos alimentadores

A confirmação da falta para terra é feita através das admitâncias totais equivalentes de cada alimentador, conforme mostrado pela equação 4.13. Uma vez computados os valores obtidos em uma medição ( $t_1$ ), realizam-se novas medidas após um determinado intervalo de tempo ( $t_2$ ). As admitâncias encontradas para ambas as medições são comparadas em magnitude e, no caso de uma falta para terra, a fase com defeito irá apresentar uma diferença significativa.

$$Y_{\Sigma_x} = \frac{I_{\Sigma_x}}{V_{NT_x}} = Y_{AT_x} + Y_{BT_x} + Y_{CT_x} = G_x + \frac{1}{j\omega L_{Ex}} + j\omega C_{Ex} \quad (4.13)$$

Um controle suplementar para a verificação de faltas de alta e baixa impedância é efetuado através do cálculo da assimetria de falta [43]. A partir da tensão neutro-terra ( $V_{NT_x}$ ) e do somatório das correntes  $I_{\Sigma_x}$ , para cada intervalo de medição ( $t_1$  e  $t_2$ ), computa-se a assimetria adicional  $Y_F$ . A seleção de  $k$  é feita de acordo com a maior componente ôhmica de falta para terra. Caso  $Y_F$  ultrapasse um limite ajustado, se reconhece uma falta no alimentador. A equação 4.14 apresenta o referido cálculo.

$$Y_F = \frac{(I_{\Sigma_x t_2} - I_{\Sigma_x t_1}) - Y_{\Sigma_x} (V_{NT_x t_2} - V_{NT_x t_1})}{V_{NT_x t_2} + k \cdot V_{nom}} \quad k = 1, a^2, a \quad (4.14)$$

Através do método da admitância também é possível se determinar as admitâncias de desbalanço  $Y_{u_x}$  totais para cada alimentador. Este desbalanço pode ser distribuído entre as admitâncias fase-terra, conforme mostrado através das equações 4.15 a 4.20. O conhecimento deste parâmetro é um fator suplementar para evitar o erro na detecção de faltas de alta impedância.

$$Y_{u_x} = \left( \frac{I_{\Sigma_x} - V_{NT_x} Y_{\Sigma_x}}{V_{nom}} \right) \quad (4.15)$$

$$Y_{AT_x} = Y_{\Sigma_x} / 3 \quad (4.16)$$

$$Y_{BT_x} = y_2 Y_{\Sigma_x} \quad (4.17)$$

$$Y_{CT_x} = y_3 Y_{\Sigma_x} \quad (4.18)$$

Onde:

$$y_3 = \frac{\frac{Y_{u_x}}{Y_{\Sigma_x}} - 1 - 2a^2}{a - a^2} \quad (4.19)$$

$$y_2 = 2 - y_3 \quad (4.20)$$

O grande diferencial do método das admitâncias é a alta sensibilidade que este proporciona. A injeção de corrente amplia a magnitude da corrente de seqüência zero e facilita a identificação do ramal sob defeito.

## **4.7 Conclusões**

Este capítulo resumiu as técnicas mais utilizadas atualmente na detecção de falta para terra em sistemas compensados. Verifica-se que são requeridos critérios especiais nesta detecção uma vez que as correntes de falta envolvidas possuem baixas magnitudes. Dentre todos os métodos destaca-se o das admitâncias, que está associado à injeção de corrente ou tensão no neutro através de equipamentos específicos. O grande mérito desta metodologia consiste na possibilidade de amplificar a sensibilidade dos sistemas de proteção, por meio de uma maior corrente ou tensão imposta ao neutro.

Com o desenvolvimento do sistema ativo para aterramento do neutro vislumbra-se a utilização do mesmo, com o emprego o método das admitâncias, para auxílio adicional na identificação de uma falta fase-terra. Neste caso, surge uma oportunidade de significativa melhoria de detecção das mesmas, visto que o sistema ativo permite trabalhar com a injeção de tensões ou correntes no neutro, com maiores magnitudes e de forma controlada. Portanto, aumenta-se a possibilidade da detecção de faltas de alta impedância, aspecto este que consiste em um grande desafio na atualidade.

# Capítulo 5

## Desenvolvimento do Sistema de Compensação Ativa

*Este capítulo tem por objetivo estudar e propor um sistema de compensação ativa capaz de anular a corrente de falta para terra em sistemas elétricos. Serão abordados os tipos de compensação e definida uma topologia a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho atual. O capítulo inclui também uma importante colaboração ao introduzir uma nova metodologia vetorial que permite identificar a fase que está sob falta à terra, aspecto este até não relatado na literatura corrente.*

### 5.1 Introdução

O método de aterramento do neutro através da bobina de compensação parte da premissa de que, com a presença da mesma, a corrente no ponto de defeito possui um valor suficientemente baixo de forma que ocorra sua auto-extinção. Durante uma falta fase-terra, ocorre um deslocamento da tensão de neutro, impondo uma diferença de potencial nos terminais da reatância conectada de neutro para terra. Assim, é gerada uma corrente de natureza indutiva que se contrapõe à corrente capacitiva do sistema, resultando na anulação da corrente no ponto de falta. Para que a corrente no ponto de falta seja suficientemente baixa e produza a auto-extinção da mesma, torna-se necessário que indutância esteja sintonizada com a capacitância do sistema, de forma que as correntes indutivas e capacitivas sejam iguais e

opostas. No entanto, a capacitância pode-se alterar à medida que ocorrem mudanças da topologia do sistema elétrico. A solução mais comumente utilizada para sintonizar a indutância consiste basicamente na alteração física da mesma. Conforme apresentado no Capítulo 2, a alternativa da sintonia baseada em equipamentos passivos possui uma série de inconvenientes como o processo construtivo, faixa de limitação, além da dificuldade de um controle instantâneo e suave, entre outros.

A idéia central do desenvolvimento do sistema de compensação ativa de neutro é proporcionar o controle da tensão e conseqüentemente da corrente no neutro durante uma falta para terra. Desta forma, torna-se possível controlar a correta injeção de corrente no sistema a todo instante desejado, de acordo com topologia que o sistema se encontra, sem a necessidade de alterações físicas na bobina supressora.

O princípio de funcionamento do sistema ativo mantém a mesma premissa de extinção de arcos elétricos e, portanto, a eliminação de faltas transitórias através da redução da corrente no ponto de falta. Além disso, permanece a utilização de uma impedância de neutro para terra, o que permite manter a filosofia de aterramento convencional com bobina fixa, a limitação da corrente de falta à terra e a confiabilidade dos sistemas compensados. Adicionalmente, o desenvolvimento do sistema ativo abre um novo campo para o avanço nas técnicas de proteção fase-terra em sistemas compensados, uma vez que o mesmo possibilita a incorporação de funções avançadas de identificação e localização de defeitos fase-terra, até então bastante limitadas nos sistemas com proteções convencionais.

Este capítulo é dedicado à descrição teórica dos fundamentos básicos acerca do sistema proposto. Serão apresentadas definições, exploradas as topologias e filosofias de compensação, princípios de atuação dos sistemas e simulações computacionais, efetuadas com o auxílio do programa *MatLab*, demonstrando suas características e seu funcionamento.

## **5.2 Requisitos Básicos do Sistema de Compensação Ativa**

Quando se parte para o desenvolvimento de um sistema de compensação ativa, é de suma importância que se conheça, de antemão, os requisitos para a efetiva eliminação da corrente no local da falta. Deste modo, pode-se avaliar as necessidades de se projetar de um equipamento capaz de controlar a tensão e a corrente que circula do neutro para terra. A Figura 5.1 é uma representação simplificada de tal sistema elétrico, indicando as correntes de interesse para a análise de uma falta para terra.

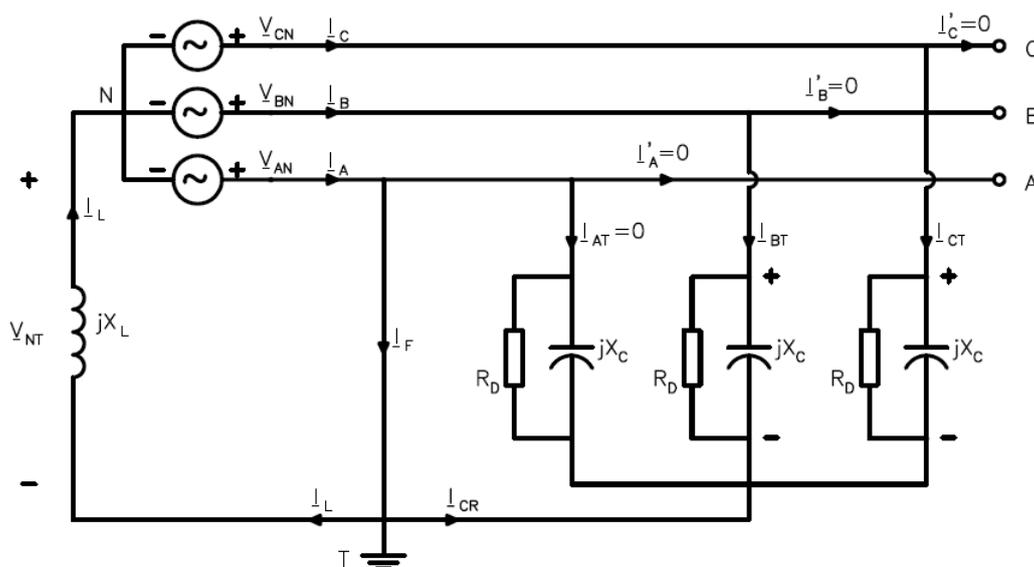


Figura 5.1. – Correntes durante uma falta fase-terra

Para que no ponto de falta a corrente  $I_F$  se iguale a zero, é necessário que a corrente que circula de neutro para terra ( $I_L$ ) seja de mesma magnitude e oposta à corrente ( $I_{CR}$ ) que retorna pelas capacitâncias de fase para terra do sistema, ou seja,  $I_L = -I_{CR}$ . O valor da corrente  $I_{CR}$  é determinado pela tensão do sistema, a reatância capacitiva para terra por fase ( $X_C$ ) e a resistência de dispersão em cada fase ( $R_D$ ), sendo composta, portanto, por uma parcela predominante capacitiva e outra de natureza resistiva.

Desta forma, o primeiro requisito para se determinar a corrente a ser injetada no neutro durante uma falta para terra é a correta estimativa dos parâmetros: reatância capacitiva fase-terra  $X_C$  e resistência de dispersão  $R_D$ . A partir destes parâmetros é possível determinar a magnitude da corrente a ser injetada.

O segundo requisito é determinar qual é o ângulo da corrente capacitiva a ser compensada. Este ângulo está relacionado com a fase que está em falta e com sua respectiva tensão, uma vez que esta última é responsável pela circulação da corrente. Assim, logo que for detectada uma falta fase-terra no sistema, deve-se identificar qual fase está em curto para se determinar o ângulo da corrente de neutro a ser injetada.

O método proposto para identificação de qual fase está em falta consiste na análise do ângulo da tensão neutro-terra ( $V_{NT}$ ), em relação a uma referência, durante a ocorrência do defeito para terra. Esta proposição, bem como a metodologia utilizada para efetuar a medição dos parâmetros  $X_C$  e  $R_D$ , serão posteriormente apresentadas.

### 5.3 Topologias de Compensação

A conexão entre o conversor de potência e a reatância pode ser efetuada através de duas topologias: em série, caracterizando uma fonte de tensão, ou em paralelo, constituindo uma fonte de corrente. As figuras 5.2 e 5.3 apresentam um diagrama ilustrativo simplificado das respectivas topologias.

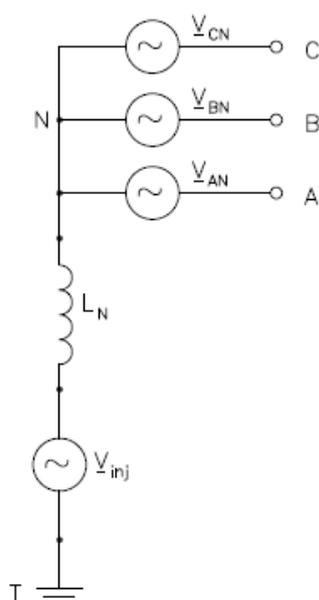


Figura 5.2. – Injeção de Tensão - Compensação Série

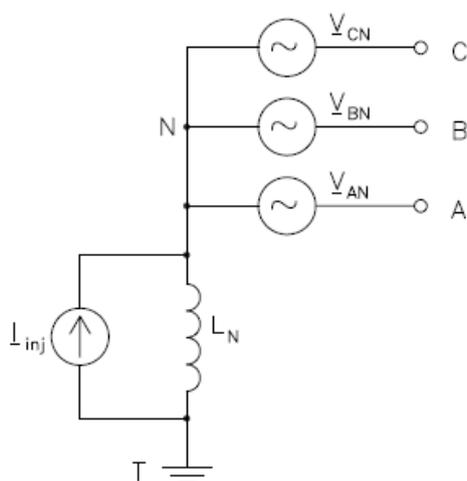


Figura 5.3. – Injeção de Corrente - Compensação Paralelo

A execução de cada topologia difere principalmente em relação à sua forma de controle, porém o objetivo final é o mesmo: a injeção de uma corrente pré-determinada no neutro durante a ocorrência de uma falta para fase-terra, que anule as correntes geradas nas capacitâncias e resistência de dispersão do sistema. No entanto, existem duas linhas de

interesse a serem exploradas. A utilização de cada topologia está diretamente ligada à linha a ser adotada.

A primeira linha em questão é a compensação de toda a corrente no ponto de falta, ou seja, a eliminação das parcelas capacitiva e resistiva que circulam durante o defeito, denominada “Compensação Ativa Completa”. A segunda linha a ser abordada é a compensação apenas da parcela capacitiva predominante, denominada “Compensação Ativa Capacitiva”.

Conforme abordado no capítulo 2, nos sistemas constituídos por linhas aéreas, a ordem de grandeza da corrente resistiva é bastante inferior à parcela de corrente capacitiva. Além disto, após a extinção de uma falta fase-terra com arco elétrico, o isolamento a ar se recupera e a rede retorna à sua operação normal. Verifica-se na prática o bom desempenho de redes aéreas aterradas através da bobina de Petersen, nos quais apenas a componente capacitiva no ponto de falta é compensada.

Por outro lado, nos sistemas onde são utilizados cabos isolados, devido às perdas dielétricas nos mesmos, a componente resistiva possui um valor significativo. A elevada corrente residual pode provocar a reignição do arco elétrico e, conseqüentemente, causar sobretensões transitórias possibilitando a evolução do curto monofásico para polifásico.

Portanto, a motivação para o desenvolvimento de um sistema de “compensação ativa completa”, onde são compensadas as correntes capacitivas e resistivas, é direcionado para as aplicações nos sistemas elétricos constituídos por cabos isolados. Para sistemas formados por linhas aéreas, entende-se que a eliminação apenas da corrente capacitiva é suficiente e efetiva.

### **5.3.1 Compensação Ativa Completa**

A “compensação ativa completa” requer a injeção de uma corrente no neutro ( $I_{inj}$ ) que elimine as componentes capacitivas e resistivas da corrente no ponto de falta. Para isso, é necessário um controle de corrente adequado, em módulo e ângulo. Para visualização deste controle, conforme indicado na Figura 5.4, considera-se um sistema com a fase A em falta.

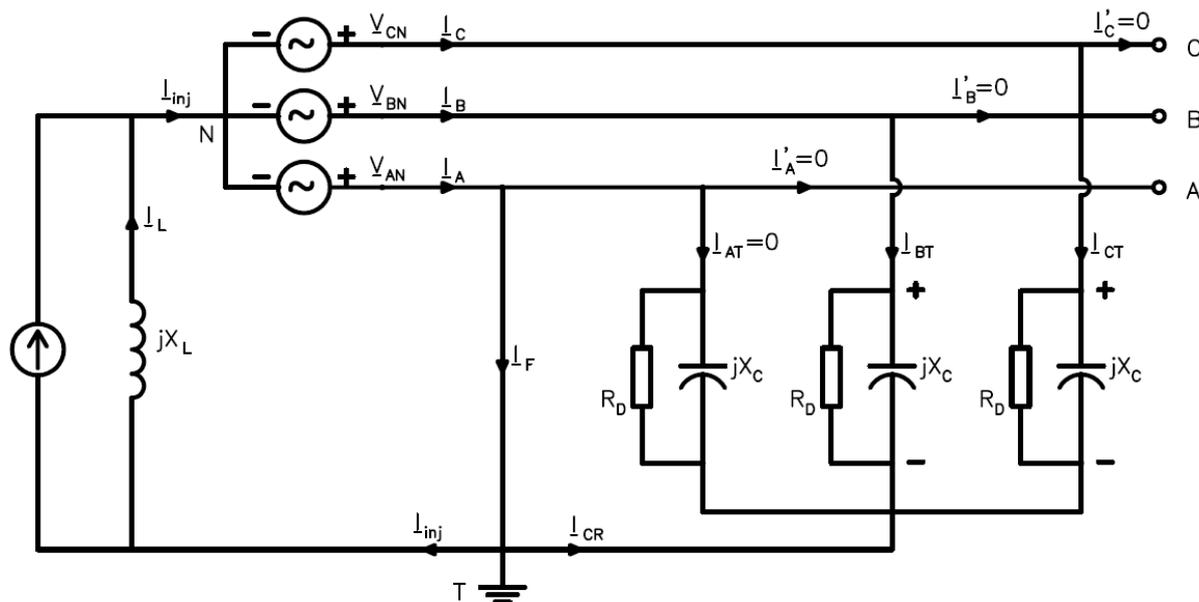


Figura 5.4. – Compensação Ativa Completa

Na Figura 5.5 estão apresentados os componentes vetoriais para um sistema com a fase A em falta. Observa-se que, tomando-se como referência a tensão  $\underline{V}_{ab}$ , o ângulo de  $\underline{I}_{inj}$  deverá ser  $60^\circ$  somado ao ângulo  $\phi_r$ .

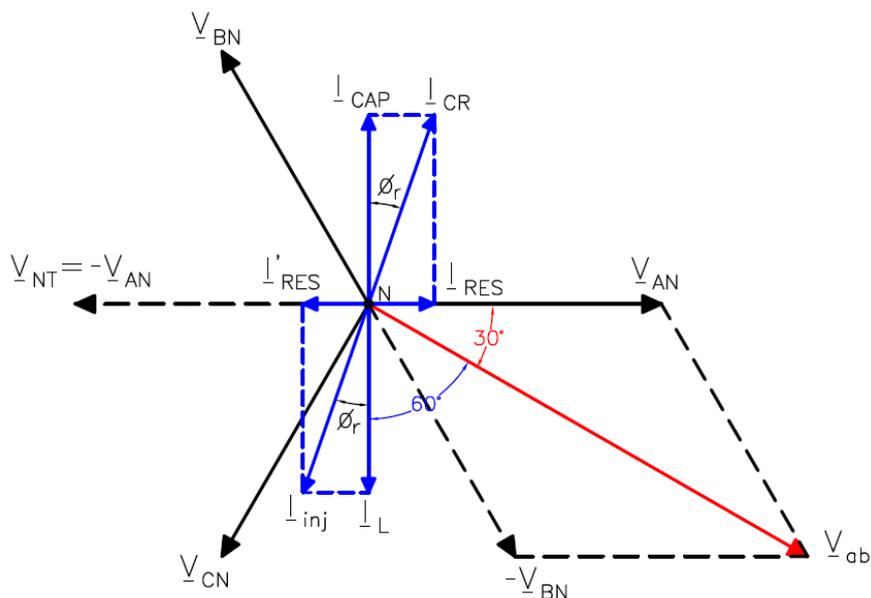


Figura 5.5. – Falta fase A – Componentes Vetoriais de Correntes

Onde:

- $\underline{I}_{CAP}$ : Componente capacitiva no ponto de defeito
- $\underline{I}_{RES}$ : Componente resistiva no ponto de defeito
- $\underline{I}_{CR} = \underline{I}_{CAP} + \underline{I}_{RES}$ : Corrente total a ser compensada

- $\underline{I}_L$ : Componente indutiva no neutro (que elimina a componente capacitiva  $\underline{I}_{CAP}$ )
- $\underline{I}'_{RES}$ : Contra-corrente resistiva de compensação no neutro (que elimina a componente resistiva  $\underline{I}_{RES}$ )
- $\underline{I}_{inj} = \underline{I}_L + \underline{I}'_{RES}$ : Corrente total a ser injetada no neutro
- $\phi_r = \arctg (|I_{CAP}|/|I_{RES}|)$ : Ângulo entre definido pela relação entre as componentes capacitiva ( $\underline{I}_{CAP}$ ) e resistiva ( $\underline{I}_{RES}$ ) no ponto de defeito

A execução deste controle é possível através da topologia em que o conversor é conectado ao neutro em paralelo à bobina de compensação, funcionando como uma fonte de corrente. Na aplicação em questão, a implementação da malha de controle de corrente exige um processamento complexo, onde devem ser monitorados simultaneamente amplitude e o ângulo da corrente injetada. Observa-se que, para que este tipo de compensação funcione de maneira satisfatória, a estimativa do ângulo entre as componentes capacitiva e resistiva deve ser bastante precisa.

### 5.3.2 Compensação Ativa Capacitiva

A “compensação ativa capacitiva” segue os mesmos fundamentos da bobina de Petersen, injetando no neutro uma corrente de natureza indutiva para eliminação da corrente capacitiva no ponto de falta. No entanto, não se preocupa com a parcela resistiva residual.

Distintamente da compensação “completa”, não é necessário manter o controle da corrente injetada em ângulo na compensação “capacitiva”, considerando-se que a corrente sempre será completamente indutiva, com ângulo fixo, pré-definido, de acordo com a fase em falta. Desta forma, é possível se estabelecer uma topologia onde o conversor é conectado em série com a bobina de compensação e controla a tensão imposta no neutro, produzindo, conseqüentemente a injeção de corrente adequada. Para visualização deste controle, conforme indicado na Figura 5.6, considera-se um sistema com uma falta plena (franca) para terra na fase A.

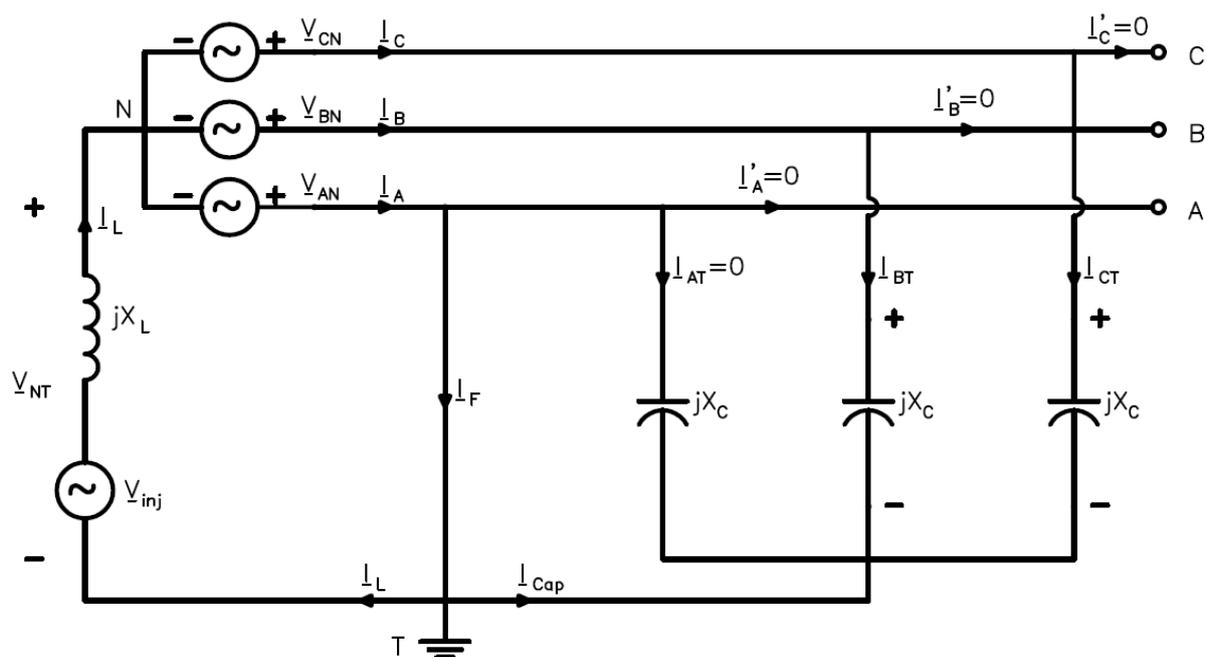


Figura 5.6. – Compensação Ativa Capacitiva

Uma vez que a reatância  $X_L$  é um valor fixo e conhecido, pode-se calcular a amplitude da tensão a ser injetada ( $V_{inj}$ ) através da equação 5.4, onde a corrente indutiva a ser injetada no neutro é determinada de acordo com corrente capacitiva ( $I_L = -I_{CAP}$ ). Observa-se que devido à natureza da corrente indutiva, a mesma será sempre  $90^\circ$  defasada atrasada em relação à tensão neutro-terra.

$$I_L = -I_{CAP} = 3V_{AN} / jX_C \quad (5.1)$$

$$V_{AN} = V_{TN} = -V_{NT} \quad (5.2)$$

$$V_{TN} = V_{inj} + (jX_L)I_L \quad (5.3)$$

$$V_{inj} = V_{AN} - (jX_L)I_L \quad (5.4)$$

Desta forma, para se determinar o ângulo de  $V_{inj}$ , basta conhecer qual fase está em falta. As figuras 5.7 a 5.9 apresentam os componentes vetoriais para o caso de faltas monofásicas nas fases A, B ou C.

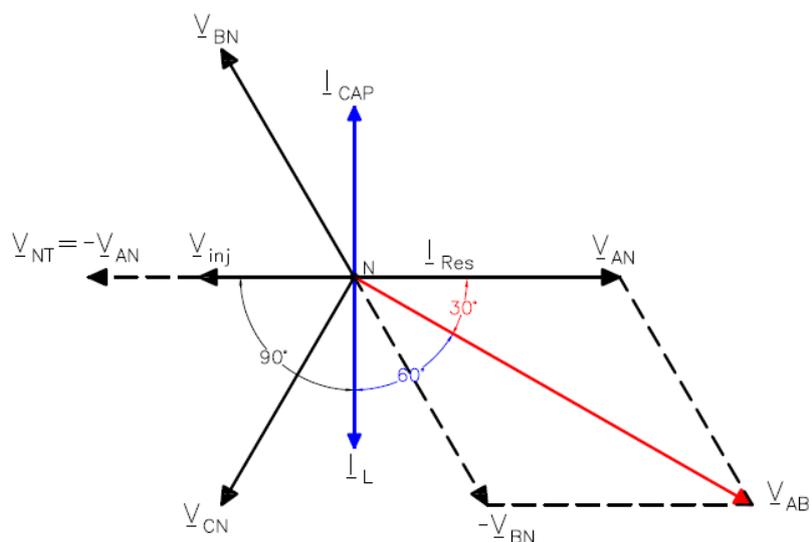


Figura 5.7. – Falta na fase A – Componentes Vetoriais de  $\underline{V}_{inj}$

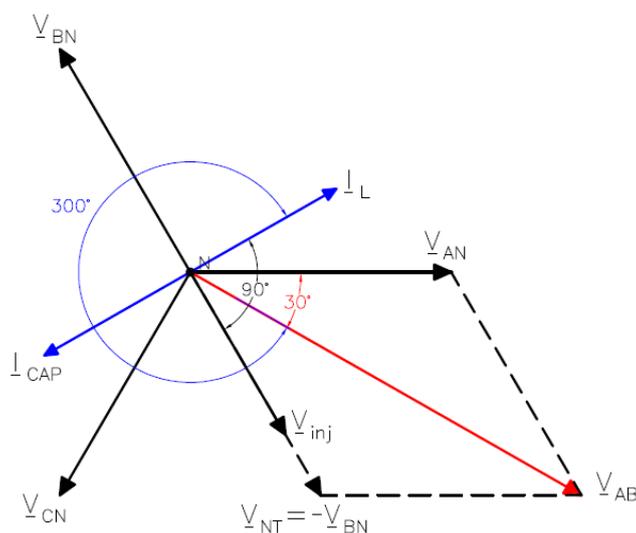


Figura 5.8. – Falta na fase B – Componentes Vetoriais de  $\underline{V}_{inj}$

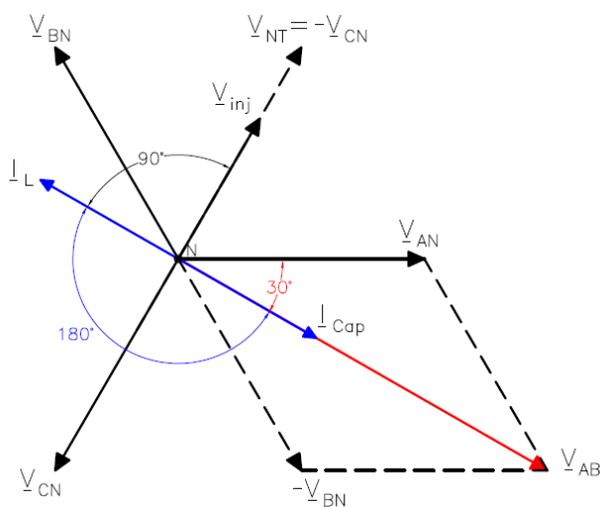


Figura 5.9. – Falta na fase C – Componentes Vetoriais de  $\underline{V}_{inj}$

Tomando como referência a tensão  $\underline{V}_{ab}$ , o ângulo de  $\underline{V}_{inj}$  deverá ser:

- 150° caso a falta seja na fase A;
- 30° caso a falta seja na fase B;
- 270° caso a falta seja na fase C.

## 5.4 Topologia Adotada

No presente trabalho, para o desenvolvimento do “sistema de compensação ativa de neutro”, optou-se pela adoção da topologia de compensação série, na qual é controlada a injeção de tensão no neutro. Desta forma, o sistema atende à “compensação capacitiva”, sendo que sua aplicação é focada em redes compostas por linhas aéreas.

A principal contribuição deste trabalho é o entendimento dos fenômenos envolvidos na aplicação de um sistema de compensação ativa. A “compensação ativa completa”, útil para sistemas onde são aplicados cabos isolados, se beneficia deste desenvolvimento. Será possível ainda avançar futuramente em vários pontos identificados neste estudo, explorando o embasamento teórico aqui exposto.

## 5.5 Descrição do Sistema de Compensação Ativa

A “compensação ativa de neutro” tem como base um equipamento eletrônico de potência (fonte de tensão ou corrente) combinado com uma reatância indutiva fixa, conectados entre o ponto de neutro do sistema elétrico e a terra. Esta fonte de potência consiste em um inversor monofásico, capaz de realizar o controle da injeção de tensão ou corrente em amplitude, fase e componentes frequenciais. A Figura 5.10 ilustra a composição do sistema adotado através da “compensação ativa capacitiva”, que é uma topologia série.

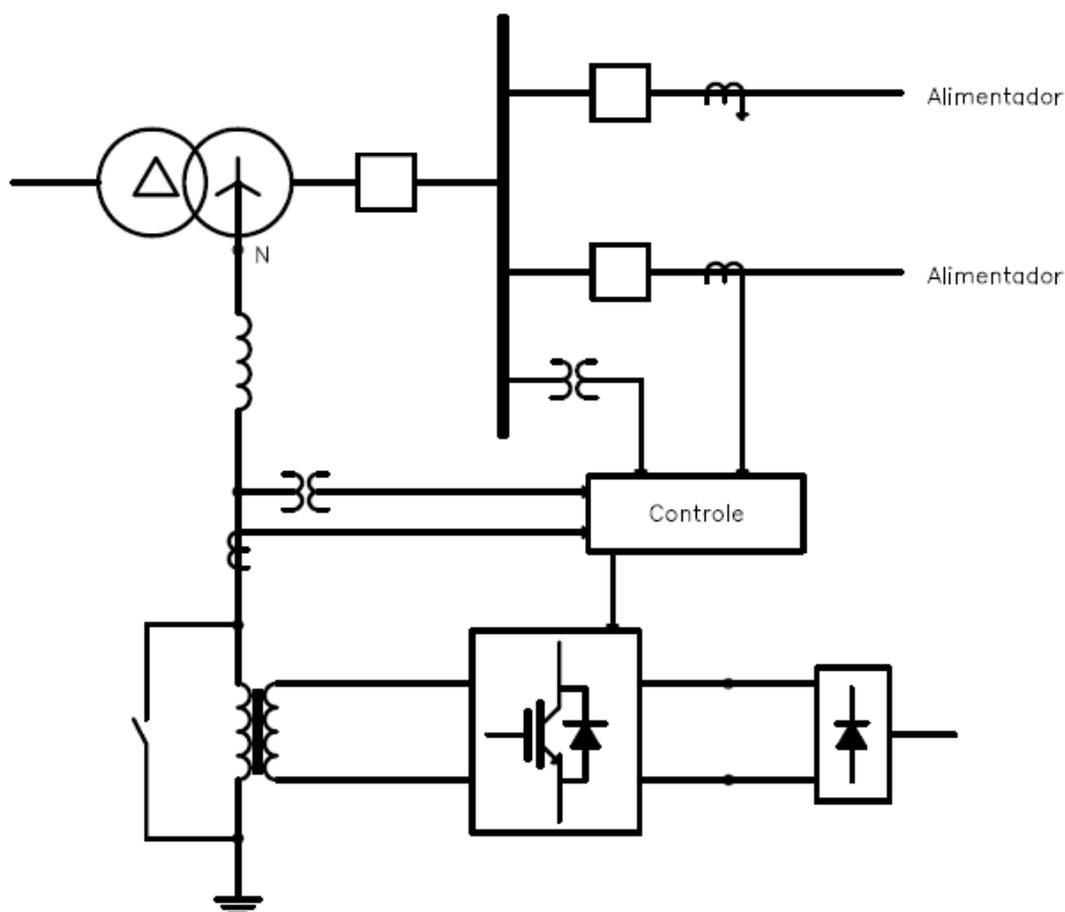


Figura 5.10. – Sistema de Compensação Ativa Capacitiva de Neutro (série)

Os elementos que estão presentes no referido sistema são:

- 1- Bobina de Compensação Fixa
- 2- Inversor de Frequência
- 3- Transformador de Acoplamento
- 4- Dispositivos de medição (TP's e TC's)
- 5- Sistema de controle, processamento de sinais e interface com o usuário
- 6- Dispositivo de *by-pass*

### 5.5.1 Bobina de Compensação Fixa

A bobina de compensação, ou bobina de Petersen, consiste numa reatância indutiva fundamentada nos princípios descritos no capítulo 2 deste trabalho. O dimensionamento desta reatância com a presença do sistema ativo não difere em relação ao método tradicional. Para a

situação em que o inversor é removido de serviço através do *by-pass*, o sistema opera com o regime de aterramento do neutro convencional.

Caso e deseje, poderá ser levada em consideração a parcela de tensão injetada no neutro pelo inversor de frequência em série, para definição do valor da indutância. Desta forma, a sintonia inicial ajustada na bobina poderá tornar o sistema naturalmente subcompensado ou sobrecompensado, sem prejudicar a corrente no ponto de falta, uma vez que a atuação do conversor irá controlar a corrente de neutro.

### **5.5.2 Inversor de Frequência**

Para o sistema em questão considerou-se um inversor PWM (*Pulse Width Modulation*) monofásico c.c.-c.a., alimentado em tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*) [44]. O conversor deve ser capaz de injetar uma corrente controlada no circuito de neutro.

Atualmente o uso de inversores em sistemas de baixa tensão (em geral, até 690V) já é uma prática bastante disseminada na indústria. A tecnologia da Eletrônica de Potência possui um comprovado status de alta confiabilidade, com muitos anos de utilização, aplicada em larga escala em ambientes industriais e militares, sendo bastante conhecida e consolidada.

O avanço da tecnologia de fabricação de dispositivos semicondutores vem permitindo a popularização deste tipo de conversor também em sistemas de média tensão, pois os níveis de tensão de trabalho das chaves normalmente utilizadas nestes equipamentos já apresentam valores compatíveis com os níveis de tensão do sistema, o que elimina a necessidade da associação série de dispositivos de maneira a atender às especificações do sistema. Existe uma enorme gama de dispositivos IGBT's e IGCT's com capacidades de bloqueio na faixa de 600V até valores superiores a 6000V.

No caso da aplicação de inversores para um sistema ativo de aterramento do neutro, a utilização da própria rede para o suprimento de energia impõe uma questão no que se refere às condições de manutenção de tensão no barramento c.c.: no momento que o retificador precisa retirar energia, a rede encontra-se com um curto para terra.

Neste momento, para o sistema com bobina ressonante no neutro, assim como em sistemas isolados, verifica-se que tensões entre fases não sofrem alterações. Desta forma, é permitido que se mantenha a tensão no barramento c.c. e a operação do sistema injeção de potência no neutro. A abordagem de auto-alimentação, em princípio, apresenta-se como uma solução simples, possivelmente de menor custo e adequada para os inversores na presente aplicação.

### **5.5.3 Transformador de Acoplamento**

O inversor é conectado ao neutro através de um transformador de acoplamento monofásico. As funções deste transformador são os seguintes: realizar um isolamento galvânico do equipamento eletrônico e possibilitar uma adaptação do nível de tensão de operação do mesmo.

### **5.5.4 Dispositivos de medição (TP's e TC's)**

O sistema de compensação ativa utiliza transformadores de potencial (TP's) e de corrente (TC's) para medir as formas de onda tensão e corrente de neutro para terra. Observa-se também que neste sistema os elementos de medição de corrente e tensão estão situados no barramento de saída, bem como aqueles dispositivos instalados individualmente em cada alimentador da rede.

### **5.5.5 Sistema de controle**

O sistema de controle tem por finalidade adquirir dados do sistema, processar os sinais e comandar o inversor injetando uma corrente adequada, o que permite anular a corrente de falta à terra. Adicionalmente, o controle possibilita a interface com o usuário e registros de ocorrência.

### **5.5.6 Dispositivo de by-pass**

A função do dispositivo de *by-pass* é possibilitar a remoção de serviço do inversor de frequência para execução de manutenções no equipamento, ou para operação do sistema elétrico em um regime de neutro que exclua o sistema de compensação ativa, ou seja, apenas na presença da bobina de compensação. O *by-pass* pode ser composto por uma chave seccionadora (manual ou motorizada) ou por um disjuntor.

## 5.6 Estimativa da Reatância Capacitiva Fase-Terra

### 5.6.1 Princípios Básicos da Estimativa de $X_C$

Para-se determinar a reatância capacitiva para terra por fase ( $X_C$ ) utilizam-se os mesmos princípios de injeção de corrente apresentados no capítulo 2, nos quais é assumido que a relação entre tensão e corrente de neutro para terra é linear. A corrente é provocada através de um deslocamento da tensão de neutro criado pela injeção de uma tensão série  $\underline{V}_{inj}$ . Devem ser medidos os módulos de  $\underline{V}_{NT}$  e  $\underline{I}_{NT}$ , bem como o ângulo entre os mesmos. Através destas medições torna-se possível determinar a impedância fase-terra  $Z_{\phi T}$ , que é composta pela combinação em paralelo de  $X_C$  e  $R_D$  e, em seguida, estimar o valor da reatância capacitiva  $X_C$ . A Figura 5.11 apresenta o circuito utilizado para demonstrar o método em questão.

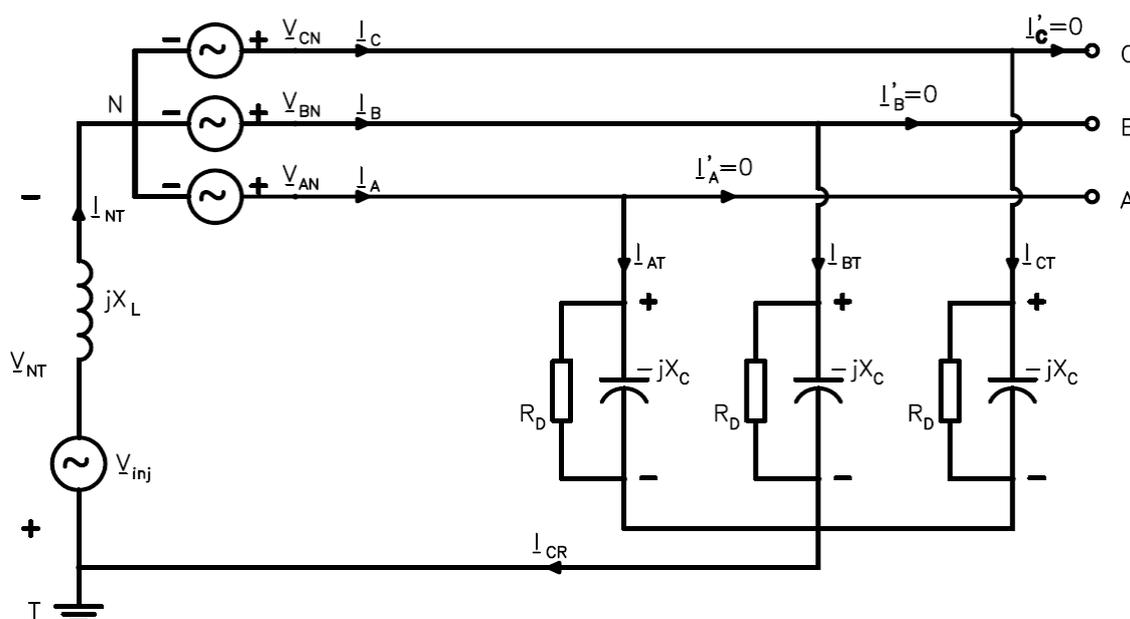


Figura 5.11. – Deslocamento de tensão de neutro para determinação de  $X_C$

Durante a injeção da tensão série  $\underline{V}_{inj}$  no neutro, altera-se a tensão  $\underline{V}_{NT}$ , sendo que as capacitâncias e resistências de dispersão do sistema são submetidas a uma nova tensão de fase para terra. Desta forma, circulam correntes capacitivas e resistivas de fase para terra, as quais são somadas e retornam pelo circuito de neutro. Logo, o módulo da corrente medida no neutro corresponde à corrente  $\underline{I}_{CR}$  gerada devido ao respectivo deslocamento de tensão do neutro. Considerando a linearidade do sistema, relação entre  $\underline{V}_{NT}$  e  $\underline{I}_{NT}$  é mantida constante para

qualquer variação de tensão no neutro. As equações 5.5 a 5.10 demonstram a obtenção da impedância fase terra ( $Z_{\phi T}$ ) em função da tensão  $\underline{V}_{NT}$  e a corrente  $\underline{I}_{NT}$ .

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{V}_{AN} + \underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} \quad (5.5)$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{V}_{BN} + \underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} \quad (5.6)$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{V}_{CN} + \underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} \quad (5.7)$$

$$\underline{I}_{CR} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \frac{\underline{V}_{AN} + \underline{V}_{BN} + \underline{V}_{CN} + 3 \cdot \underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} = \frac{3 \cdot \underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} \quad (5.8)$$

$$|\underline{I}_{CR}| = |\underline{I}_{NT}| = 3 \cdot \left| \frac{\underline{V}_{NT}}{Z_{\phi T}} \right| \quad (5.9)$$

$$Z_{\phi T} = 3 \cdot \left| \frac{\underline{V}_{NT}}{\underline{I}_{NT}} \right| \quad (5.10)$$

Após obtido o valor de  $Z_{\phi T}$ , a reatância capacitiva  $X_C$  é calculada utilizando-se o ângulo  $\theta_c$  medido entre  $\underline{V}_{NT}$  e  $\underline{I}_{NT}$ . A Figura 5.12 mostra como o ângulo  $\theta_c$  está relacionado com as correntes  $\underline{I}_{CAP}$  e  $\underline{I}_{CR}$ . Admite-se que a tensão injetada no neutro foi de tal forma que  $\underline{V}_{NT}$  seja oposta a  $\underline{V}_{AN}$ .

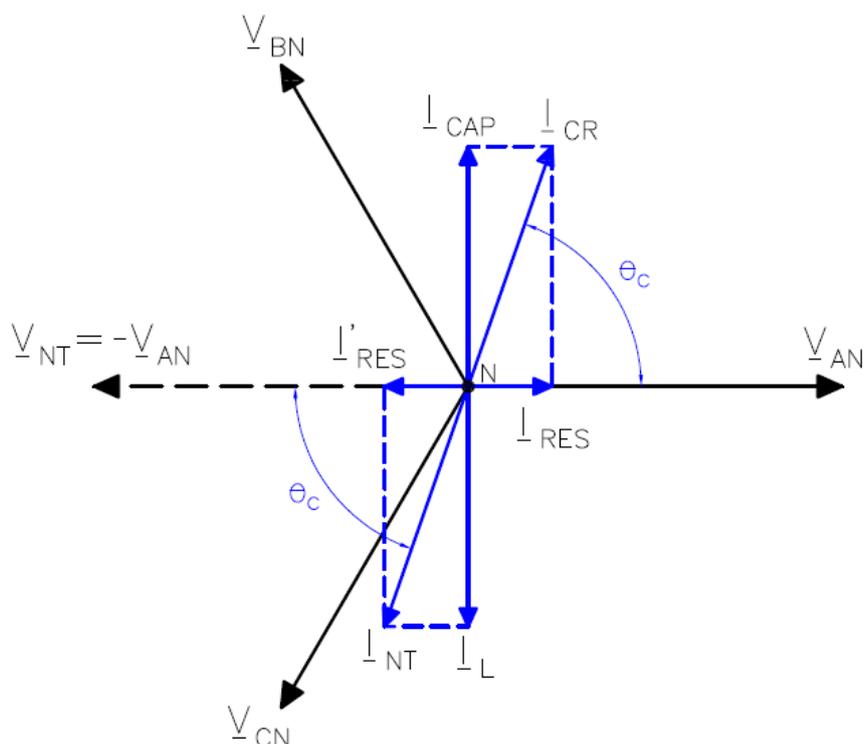


Figura 5.12. – Relação entre  $\underline{I}_{CAP}$ ,  $\underline{I}_{CR}$  e  $\theta_c$

Da Figura 5.12 tem-se que:

$$\underline{I}_{CAP} = \underline{I}_{CR} \cdot \text{sen}(\theta_c) \quad (5.11)$$

Naturalmente, a impedância fase-terra  $Z_{\phi T}$  e a corrente  $\underline{I}_{CR}$ , bem como a corrente capacitiva  $\underline{I}_{CAP}$  e a reatância  $X_C$ , são inversamente proporcionais. Desta forma, a partir das equações 5.12 e 5.13, obtém-se a relação entre  $X_C$  e  $Z_{\phi T}$  em função do ângulo  $\theta_c$ .

$$\frac{Z_{\phi T}}{X_C} = \frac{1/\underline{I}_{CR}}{1/\underline{I}_{CAP}} = \frac{\underline{I}_{CAP}}{\underline{I}_{CR}} = \frac{\underline{I}_{CR} \cdot \text{sen}(\theta_c)}{\underline{I}_{CR}} \quad (5.12)$$

$$X_C = \frac{Z_{\phi T}}{\text{sen}(\theta_c)} \quad (5.13)$$

Observa-se que, desprezando a resistência de dispersão fase-terra, o ângulo  $\theta_c$  é igual a  $90^\circ$  e a impedância  $Z_{\phi T}$  torna-se igual à reatância  $X_C$ . Desta forma, supondo o caso em que a tensão  $\underline{V}_{NT}$  se iguale à tensão de fase (p. ex.  $\underline{V}_{NT} = \underline{V}_{NA}$ ), a corrente de neutro gerada

corresponderá à mesma corrente capacitiva que circula durante uma falta para terra em um sistema com neutro isolado, conforme equação 2.34 reproduzida abaixo.

$$\underline{I}_{NT} = \underline{I}_{CAP} = \frac{3 \cdot \underline{V}_{NA}}{-jX_C} \quad (2.34)$$

### 5.6.2 Estimativa de $X_C$ com Frequência Diferente da Fundamental

Visto que a injeção de tensão  $\underline{V}_{inj}$  provoca a circulação de corrente no neutro, o parâmetro  $X_C$  medido terá a mesma frequência da tensão injetada. Um dos objetivos de se executar esta medição com frequência diferente de 60 Hz é evitar interferências causadas por ruídos eventualmente existentes no sistema.

Conforme discutido no capítulo 3, a estimativa da reatância capacitiva introduzindo frequências diferentes da fundamental é uma prática utilizada nos sistemas avançados que possuem bobinas de Petersen com êmbolo móvel, onde também estão presentes conversores estáticos. Nestes sistemas, nos quais a indutância é fisicamente alterada, é requerida a estimativa da reatância capacitiva ( $X_C$ ) bem como a indutiva ( $X_L$ ). Desta forma, foi proposto um método que utiliza duas frequências distintas para se determinar a capacitância equivalente e, em seguida, obter o valor da indutância presente.

A metodologia proposta neste trabalho consiste na aplicação de uma frequência ( $f$ ) inferior à fundamental. Após a obtenção da reatância capacitiva para esta frequência ( $X_C^f$ ) calcula-se a reatância  $X_C$  equivalente para 60Hz. A equação 5.14 apresenta este cálculo.

$$X_C = \frac{f}{60} X_C^f \quad (5.14)$$

A questão da injeção de tensão  $\underline{V}_{inj}^f$  com frequência inferior à 60 Hz está relacionada com a reatância série ( $X_L$ ) entre o conversor e o neutro. Uma vez que  $X_L$  é igual a  $2\pi fL$ , para pequenas frequências o valor desta reatância torna-se reduzido. Como a topologia de injeção é em série, quanto menor for  $X_L$ , menor será a queda de tensão neste componente durante a execução da estimativa de  $X_C^f$ . Daí, o deslocamento de tensão de neutro para terra ( $\underline{V}_{NT}$ ) será

o mais próximo da tensão injetada ( $\underline{V}_{inj}^f$ ), conforme pode ser comprovado através da equação 5.15.

$$\underline{V}_{NT} = \underline{V}_{inj} - (jX_L)\underline{I}_{NT} \quad (5.15)$$

Logo, ao se deslocar o neutro em, por exemplo, 10% da tensão fase-neutro nominal, a corrente  $\underline{I}_{NT}$  que irá circular pelo neutro será aproximadamente igual a 10% da corrente capacitiva.

O interesse em obter uma tensão  $\underline{V}_{NT}$  de valor aproximado à tensão  $\underline{V}_{inj}^f$  deve-se ao fato de que, quando se estima  $X_C^f$  é possível prever qual tensão deverá ser injetada no neutro, de forma que a corrente produzida corrente seja de fácil medição e não atinja níveis elevados. Portanto, são melhores controladas as condições de contorno durante a estimativa do parâmetro em questão.

### 5.6.3 Exemplo de Estimativa de $X_C$ através de Simulação

Para se demonstrar como proceder a estimativa da reatância capacitiva através de injeção de tensão no neutro, é apresentada a seguir uma simulação efetuada através do programa *MatLab*, na qual é modelado um sistema elétrico trifásico equilibrado. Neste exemplo, adotou-se a configuração do sistema conforme apresentado na Figura 5.13.

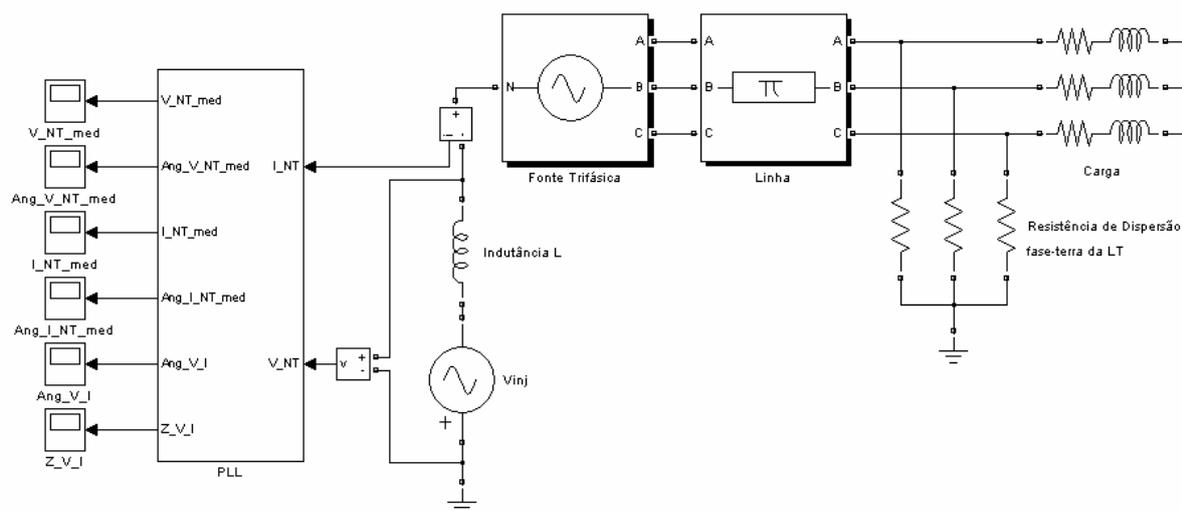


Figura 5.13. – Configuração do sistema para simulação computacional

Os seguintes elementos compõem o sistema simulado:

- Fonte de tensão trifásica, ligação interna em estrela, tensão fase-fase  $13.800 V_{rms}$  ;
- Linha de Transmissão (LT) trifásica. Os parâmetros da linha foram calculados baseados em uma rede de distribuição urbana típica de 20 km de comprimento, condutor de alumínio (CA), bitola 4/0AWG, estrutura tipo meio beco (M1), cruzeta de 2,4 metros, altura entre condutor e solo 6,0 metros e resistividade média do solo igual a  $500 \Omega \cdot m$ . A capacitância de seqüência zero da LT é  $C_0 = 10,7 \cdot 10^{-9} F/km$ ;
- Resistência de Dispersão fase-terra,  $R_d = 100M.\Omega$  por fase;
- Carga trifásica ligada em estrela não aterrada;
- Indutância de neutro,  $L = 10 H$ ;
- Fonte de tensão monofásica, para injeção de tensão no neutro.

Para a capacitância de seqüência zero definida no sistema em questão, tem-se a seguinte reatância capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10,7 \cdot 10^{-9}} = 0,249 \cdot 10^6 \Omega/km \quad (5.16)$$

considerando o comprimento da linha 20 km, tem-se que  $X_c = 12,45 \cdot 10^3 \Omega$ . O objetivo do procedimento proposto é obter este valor de  $X_c$  através das medições de tensão, corrente de neutro e seus respectivos ângulos. No presente trabalho, foi utilizado um *PLL (Phase-Locked Loop)* para viabilizar tais medições simuladas, identificando os valores de pico.

O primeiro passo para a estimativa  $X_c$  é a injeção de uma tensão senoidal no neutro, com frequência inferior a 60Hz. A tensão escolhida para esta simulação foi de 1% da tensão fase-fase nominal, ou seja,  $\underline{V}_{inj}^f = 138 / \sqrt{3} = 79,67 V_{rms}$ . Foi adotada uma frequência  $f = 10Hz$  para a aplicação; daí se obtém a reatância  $X_c^f$  relativa a frequência considerada. A tensão  $\underline{V}_{inj}^f$  foi aplicada com um ângulo de  $150^\circ$  adiantado de  $\underline{V}_{ab}$  (ângulo propositalmente escolhido, no qual o deslocamento de tensão provocado está relacionado com a fase A).

Uma vez injetada a tensão  $\underline{V}_{inj}^f$  no neutro, foi medida a tensão  $\underline{V}_{NT} = 115,59 V_{pico}$  e a corrente de neutro para terra  $\underline{I}_{NT} = 5,81 mA_{pico}$ . A Figura 5.14 apresenta o gráfico da medição

da tensão senoidal neutro-terra ( $\underline{V}_{NT}$ ) enquanto que a Figura 5.15 mostra a corrente  $\underline{I}_{NT}$  medida. O algoritmo PLL, ilustrado na cor azul, identifica o valor de pico registrado.

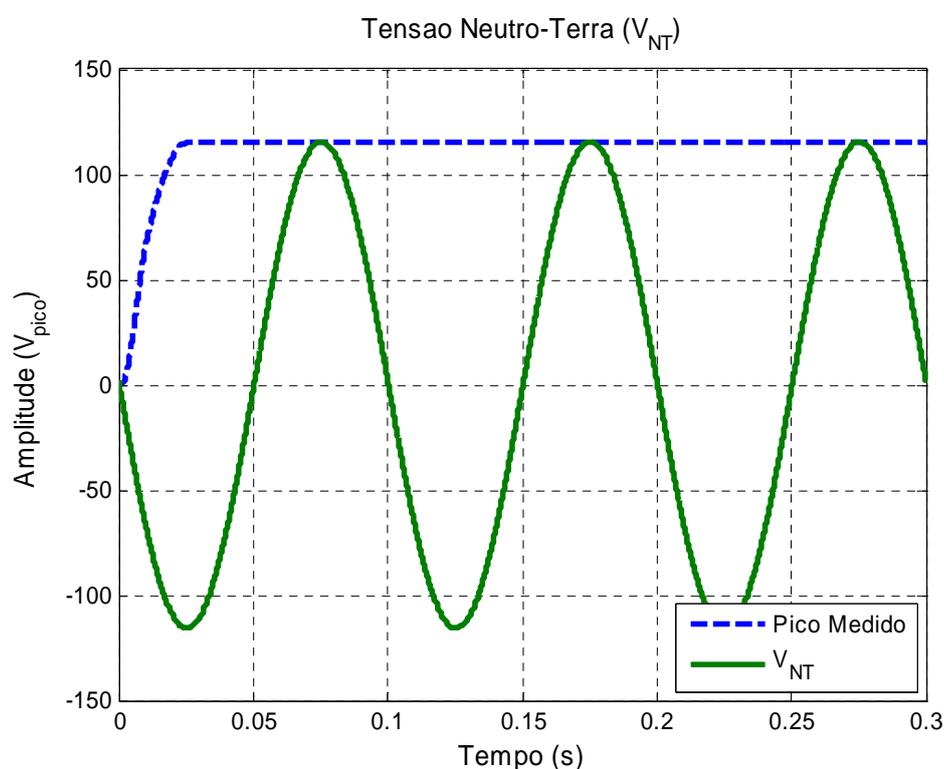


Figura 5.14. – Tensão neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$  medida com a injeção de  $\underline{V}_{inj}^f$  no neutro

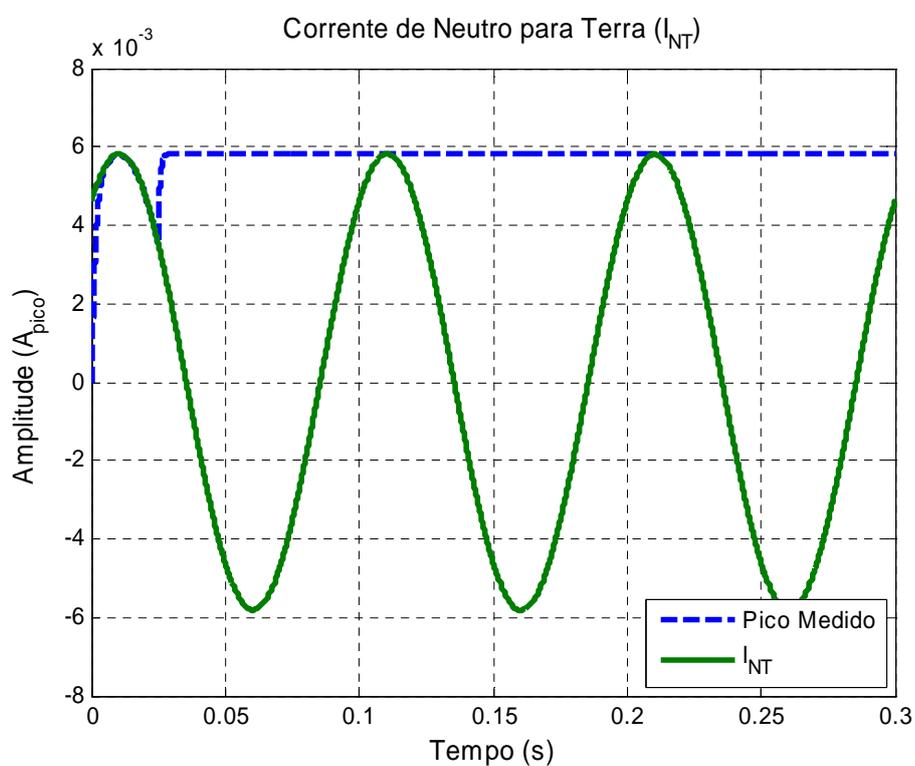


Figura 5.15. – Corrente neutro-terra  $\underline{I}_{NT}$  medida com a injeção de  $\underline{V}_{inj}^f$  no neutro

A partir da injeção de  $\underline{V}_{inj}^f$  e das medições efetuadas, também são processadas pelo algoritmo PLL o valor do ângulo  $\theta_C$ , entre  $\underline{V}_{NT}$  e  $\underline{I}_{NT}$ , bem como a impedância  $Z_{\phi T}$ . Para a simulação realizada, conforme a Figura 5.16, obteve-se  $\theta_C = 126,85^\circ$ . A Figura 5.17 ilustra a medição de  $Z_{\phi T} = 59,67 \cdot 10^3 \Omega$  (três vezes  $(\underline{V}_{NT} / \underline{I}_{NT})$ ).

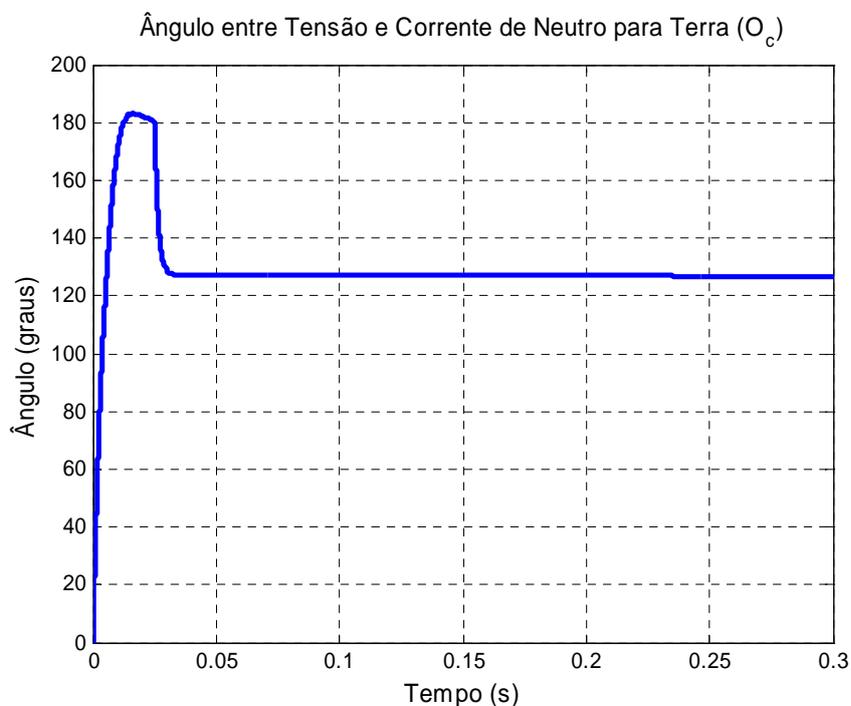


Figura 5.16. – Ângulo medido  $\theta_C$  entre a tensão  $\underline{V}_{NT}$  e a corrente neutro-terra  $\underline{I}_{NT}$

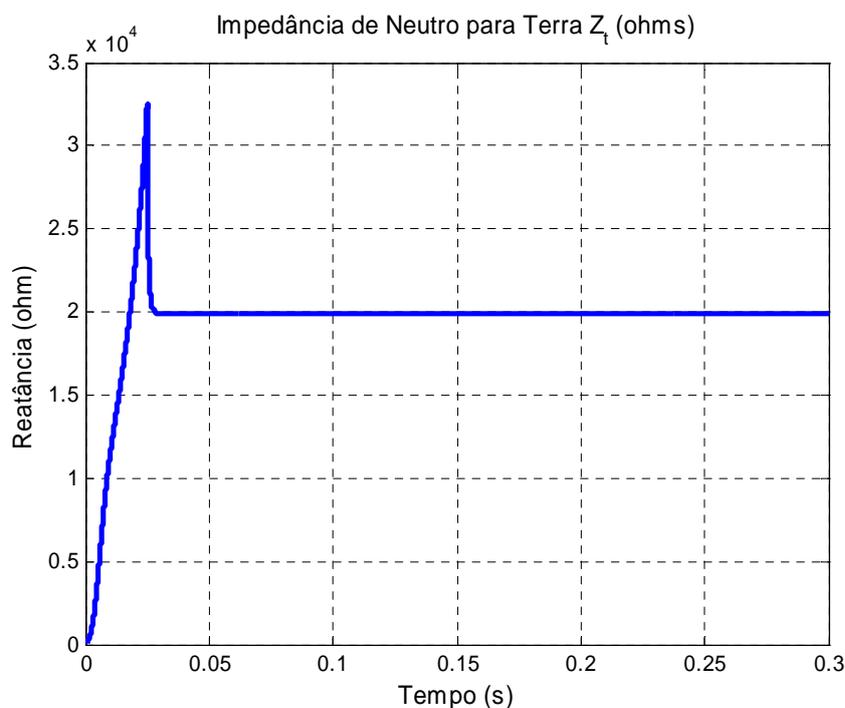


Figura 5.17. – Impedância obtida a partir da tensão  $\underline{V}_{NT}$  e a corrente neutro-terra  $\underline{I}_{NT}$

Através dos dados obtidos é possível calcular a reatância  $X_C^f$  utilizando a equação 5.13. Em seguida o valor de  $X_C$  é calculado pela equação 5.14, no qual a frequência utilizada no teste foi igual a 10Hz.

$$X_C^f = \frac{Z_{\phi T}}{\text{sen}(\theta_C)} = \frac{59,67 \cdot 10^3}{\text{sen}(126,85)} = 74,57 \cdot 10^3 \Omega.$$

$$X_C = \frac{f}{60} X_C^f = \frac{10}{60} \cdot 74,57 \cdot 10^3 = 12,43 \cdot 10^3 \Omega.$$

Verifica-se que a reatância  $X_C$  estimada corresponde àquela determinada para a linha em questão simulada. O exemplo apresentado ilustra a simplicidade do método de estimativa de  $X_C$ , que é um parâmetro chave a ser conhecido.

## 5.7 Identificação da Fase que está sob Falta para Terra

Durante uma falta para terra, nos sistemas em que o neutro é isolado ou aterrado através de uma bobina de compensação, as tensões entre fases não sofrem alterações. Caso a falta seja de alta impedância, as variações nas tensões entre fase e terra podem ser pouco significativas. Desta forma, a medição da tensão, seja fase-fase ou fase-terra, não é um artifício consistente para indicação da fase que se encontra sob falta. Por outro lado, as correntes que circulam no circuito sob falta são de pequena magnitude, correspondendo basicamente às correntes capacitivas do sistema. Logo, a medição da corrente por fase também não é um bom indicador da fase defeituosa.

A metodologia proposta para identificar qual fase está em falta consiste na avaliação do ângulo da tensão neutro-terra ( $V_{NT}$ ), em relação a uma referência pré-determinada, durante a ocorrência do defeito para terra. Esta é uma importante contribuição deste trabalho, não vista por este autor em nenhuma literatura internacional ou nacional. É um método vetorial bastante simples e não requer a utilização de equipamentos com elevada sensibilidade para a execução das medições.

Observa-se que a associação desta metodologia de determinação da fase sob falta, com o sistema de injeção de corrente no neutro permitirá a identificação de faltas de alta impedância.

### 5.7.1 Princípios Básicos de Identificação da Fase em Falta

Da teoria do sistema elétrico, na ocorrência de uma falta para terra, pode-se avaliar as tensões de neutro-terra e fase-neutro de acordo com as impedâncias presentes no circuito. Conforme demonstrado no capítulo 2, a relação entre a tensão  $\underline{V}_{NT}$  e  $E_a$  em termos de admitâncias é apresentada através da equação 5.17 abaixo reproduzida, considerando a fase A sob falta.

$$\underline{V}_{NT} = -\frac{E_a}{1 + \frac{1}{\underline{Y}_F}(\underline{Y}_N + 3\underline{Y}_{\phi T})} \quad (5.17)$$

Para representar a fase sob falta, foi utilizado o operador  $\underline{A}$  no qual:

$\underline{A} = 1\angle 0^\circ$  caso a falta ocorra na fase A.

$\underline{A} = a^2 = 1\angle -120^\circ$  caso a falta ocorra na fase B.

$\underline{A} = a = 1\angle +120^\circ$  caso a falta ocorra na fase C.

Se for tomada como referência a tensão  $\underline{V}_{ab}$ , a fase A está defasada de  $30^\circ$ . O sinal de negativo pode ser substituído pelo fasor  $1\angle 180^\circ$ . Daí, pode-se reescrever a equação 5.17 acima como:

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{A} \cdot E \angle 150^\circ}{1 + \frac{1}{\underline{Y}_F}(\underline{Y}_N + 3\underline{Y}_{\phi T})} \quad (5.18)$$

Observa-se que a definição do ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  resultante está relacionada principalmente à magnitude das admitâncias preponderantes. Uma vez que o ângulo do denominador é obtido através de uma operação de soma de admitâncias, aquela que possuir maior magnitude prevalecerá seu ângulo em relação à outra.

### 5.7.1.1 Considerações sobre as Admitâncias de Falta

A impedância de falta é composta por uma resistência  $R_F$  em paralelo com uma capacitância  $C_F$ . A admitância de falta, assim como a equação 2.10, está reproduzida na equação 5.19.

$$\underline{Y}_F = \frac{1}{\underline{Z}_F} = \frac{1}{R_F} + j\omega C_F = \frac{1}{R_F} + \frac{1}{-jX_{CF}} \quad (5.19)$$

Na maioria dos casos, a impedância de falta é de natureza resistiva, ou seja, despreza-se a reatância capacitiva de falta. Desta forma, tem-se que:

$$\underline{Y}_F = \frac{1}{\underline{Z}_F} = \frac{1}{R_F \angle 0^\circ} = \frac{1}{R_F} \angle 0^\circ \quad (5.20)$$

No entanto, deve ser considerada a situação onde a parcela capacitiva é significativa, tal como uma fuga para terra através do isolamento, a exemplo de uma redução da isolação sem que haja um curto pleno para terra. Para este caso é recomendada uma experimentação prática para que seja avaliada a predominância resistiva ou capacitiva bem como sua influência no sistema de identificação de faltas proposto. A equação 5.21 apresenta a composição desta admitância.

$$\underline{Y}_F = \frac{1}{\underline{Z}_F} = \frac{1}{R_F \angle 0^\circ} + \frac{1}{X_{CF} \angle -90} \quad (5.21)$$

### 5.7.1.2 Faltas Plenas ou com Baixa Impedância

A primeira situação a ser avaliada refere-se aos casos de faltas monofásicas francas ou de baixa impedância. Como se sabe, a admitância é o inverso da impedância de falta; logo as faltas deste tipo implicam em uma admitância  $\underline{Y}_F$  de elevada magnitude. Considerando a equação 5.18, o segundo termo do denominador torna-se bastante inferior ao primeiro, ou seja,

$$1 \angle 0^\circ \gg \frac{1}{\underline{Y}_F} (\underline{Y}_N + 3\underline{Y}_{\phi T}) \quad (5.22)$$

conseqüentemente, obtém-se a seguinte relação para o ângulo da tensão neutro-terra:

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{A} \cdot E \angle 150^\circ}{1 \angle 0^\circ} = \underline{A} \cdot E \angle 150^\circ. \quad (5.23)$$

Portanto, nas faltas para terra com esta característica, tomando-se como referência a tensão  $\underline{V}_{ab}$ , tem-se que o ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  será:

- 150° caso a falta seja na fase A;
- 30° caso a falta seja na fase B;
- 270° caso a falta seja na fase C.

### 5.7.1.3 Faltas com Alta Impedância

Através de uma análise análoga à anterior, na situação de faltas com alta impedância, a admitância  $\underline{Y}_F$  será de baixo valor o que levará o segundo termo do denominador a tornar-se superior ao primeiro, ou seja,

$$1 \angle 0^\circ \ll \frac{1}{\underline{Y}_F} (\underline{Y}_N + 3\underline{Y}_{\phi T}). \quad (5.24)$$

Assim, considerando que a falta seja resistiva, dentre as admitâncias  $\underline{Y}_N$  e  $3\underline{Y}_{\phi T}$ , a que possuir maior magnitude irá determinar o ângulo resultante do denominador e, como conseqüência, o ângulo da tensão  $\underline{V}_{NT}$ .

Conforme demonstrado no capítulo 2 (equação 2.40), a condição de sintonia de compensação é obtida para  $3X_L = X_C$ . Verifica-se que, nesta situação a soma  $\underline{Y}_N + 3\underline{Y}_{\phi T}$  é igual a zero, uma vez que tais admitâncias são dadas por:  $\underline{Y}_N = 1/jX_L$  e  $\underline{Y}_{\phi T} = 1/-jX_C$ . Quando o sistema estiver fora de sintonia, o ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  será afetado de acordo com a admitância predominante.

a) Sistema Sobrecompensado:

Caso a admitância  $\underline{Y}_N$  seja superior a  $3\underline{Y}_{\phi T}$  significa que o sistema se encontra sobrecompensado, ou seja,  $1/X_L > 3/X_C$  ou  $X_C > 3X_L$ , o que implica em um denominador com predominância indutiva:

$$\underline{Y}_{eq} = \frac{1}{Y_F \angle 0^\circ} (Y_N \angle -90^\circ + 3Y_{\phi T} \angle +90^\circ) \rightarrow \underline{Y}_{eq} \approx Y_{eq} \angle 0^\circ \text{ até } Y_{eq} \angle -90^\circ. \quad (5.25)$$

conseqüentemente, obtém-se a seguinte relação para o ângulo da tensão neutro-terra:

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{A} \cdot E \angle 150^\circ}{Y_{eq} \angle (0^\circ \text{ até } -90^\circ)} = \underline{A} \cdot E \angle (150^\circ \text{ até } 240^\circ). \quad (5.26)$$

b) Sistema Subcompensado:

Para a condição em que  $\underline{Y}_N$  seja inferior a  $3\underline{Y}_{\phi T}$  tem-se que o sistema se encontra subcompensado, ou seja,  $1/X_L < 3/X_C$  ou  $X_C < 3X_L$ , o que implica em um denominador com predominância capacitiva:

$$\underline{Y}_{eq} = \frac{1}{Y_F \angle 0^\circ} (Y_N \angle -90^\circ + 3Y_{\phi T} \angle +90^\circ) \rightarrow \underline{Y}_{eq} \approx Y_{eq} \angle 0^\circ \text{ até } Y_{eq} \angle +90^\circ. \quad (5.27)$$

desta forma, tem-se que:

$$\underline{V}_{NT} = \frac{\underline{A} \cdot E \angle 150^\circ}{Y_{eq} \angle (0^\circ \text{ até } +90^\circ)} = \underline{A} \cdot E \angle (60^\circ \text{ até } 150^\circ). \quad (5.28)$$

c) Gráfico do ângulo  $\underline{V}_{NT}$  para faltas nas fases A, B ou C:

As figuras 5.18 a 5.20 apresentam os vetores de tensão fase-neutro  $\underline{V}_{\phi N}$ , a tensão neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$  e o ângulo em relação à referência  $\underline{V}_{ab}$ , quando da ocorrência de uma falta fase-terra

seja na fase A, B ou C respectivamente, esteja o sistema compensado, subcompensado ou sobrecompensado.

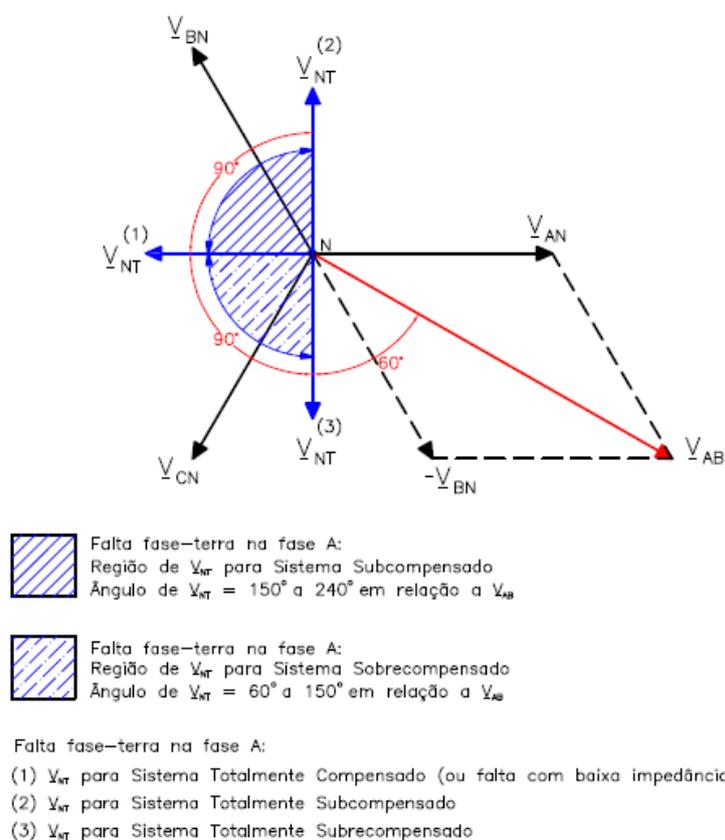


Figura 5.18. – Falta fase-terra na fase A: ângulo da tensão neutro-terra  $V_{NT}$

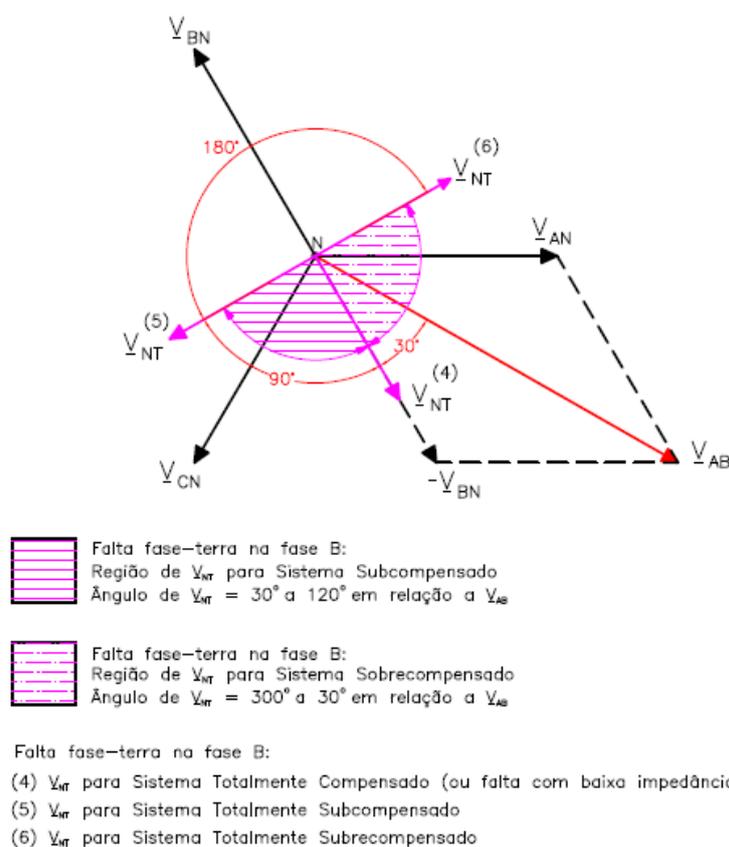


Figura 5.19. – Falta fase-terra na fase B: ângulo da tensão neutro-terra  $V_{NT}$

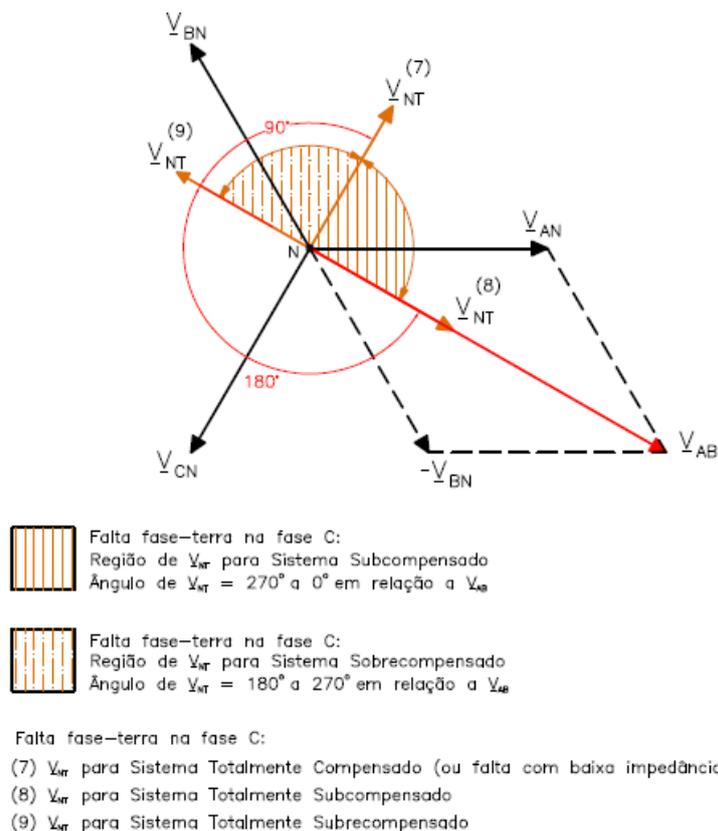


Figura 5.20. – Falta fase-terra na fase C: ângulo da tensão neutro-terra  $V_{NT}$

### 5.7.2 Sobreposições das Regiões de Abrangência do Ângulo da Tensão Neutro-Terra

Após a análise dos princípios básicos de identificação da fase sob falta verifica-se que, conforme grau de descompensação, ou seja, estando o sistema fora de sintonia, existe uma sobreposição da região de abrangência do ângulo da tensão neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$  para faltas em diferentes fases. Tal constatação ocorre quando o sistema encontra-se extremamente sobrecompensado ou subcompensado. A Figura 5.21 mostra as áreas onde se apresentam estas sobreposições.

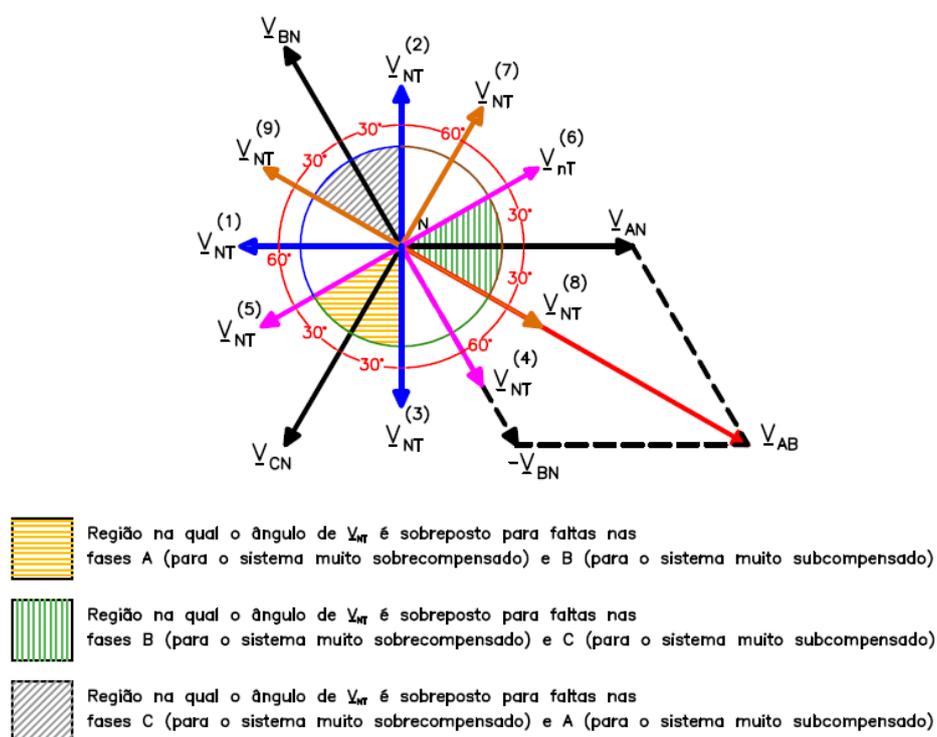


Figura 5.21. – Regiões de sobreposição do ângulo da tensão neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$  na ocorrência de faltas em fases distintas.

A situação na qual o sistema encontra-se extremamente sobrecompensado ou subcompensado é bastante remota. Isto se deve ao fato de que o ajuste da sintonia inicial da bobina de compensação, ou seja, a escolha da reatância indutiva fixa para 100% de sintonização, é feita através de uma estimativa precisa da reatância capacitiva do sistema. Em determinados casos, a sintonia é ajustada tomando-se como base medições da corrente capacitiva. Assim, por mais que ocorram variações na capacitância equivalente da rede, é pequena a probabilidade de um sistema estar muito descompensado.

### 5.7.3 Metodologia Prática para Identificação da Fase sob Falta

A metodologia prática proposta para identificação da fase sob falta adota as faixas de ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  apresentadas na Figura 5.22. Na grande maioria dos casos de falta fase-terra, o ângulo da tensão neutro-terra estará contido nestes intervalos no qual não ocorre nenhuma das referidas sobreposições.

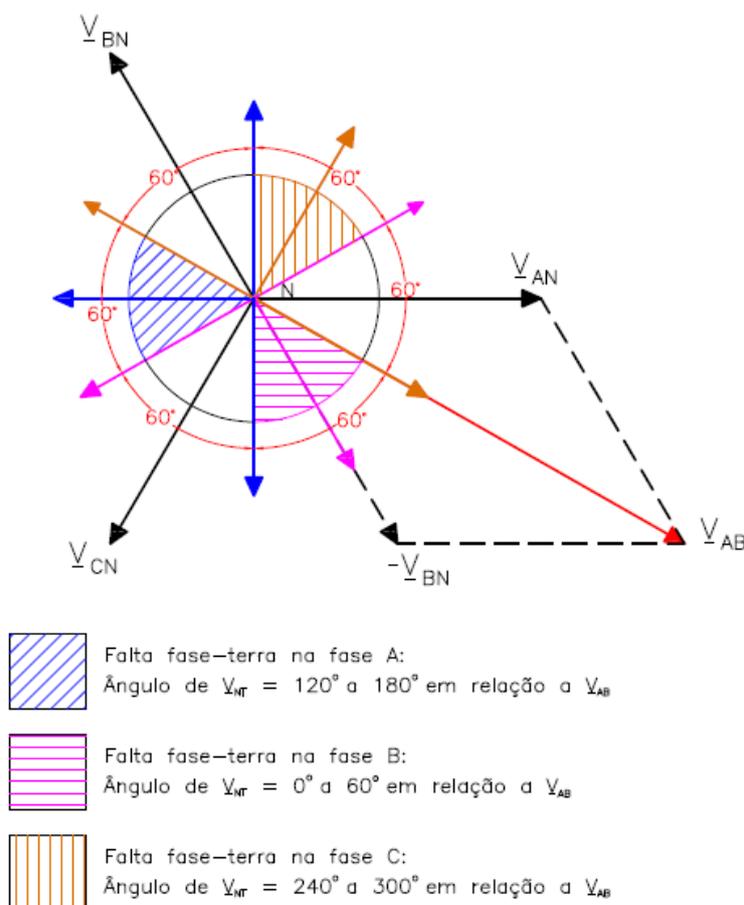


Figura 5.22. – Identificação da fase sob falta conforme o ângulo da tensão neutro-terra  $\underline{V}_{NT}$

Portanto, a metodologia de identificação da fase sob falta se resume nas seguintes faixas de ângulo de  $\underline{V}_{NT}$ , tomando-se como referência a tensão  $\underline{V}_{ab}$ :

- Ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  de 120° a 180°: falta na fase A;
- Ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  de 0° a 60°: falta na fase B;
- Ângulo de  $\underline{V}_{NT}$  de 240° a 300°: falta na fase C.

Para as demais faixas não compreendidas acima, requer-se o conhecimento do grau de sobrecompensação ou subcompensação da rede em questão. Esta informação é obtida através da estimativa da reatância capacitiva efetuada pelo sistema de compensação ativa, visto que a reatância indutiva é fixa. Uma vez estimado este parâmetro, é possível ajustar a metodologia de identificação da fase em falta através do ângulo de  $\underline{V}_{NT}$ . As figuras 5.23 e 5.24 apresentam as regiões de abrangência deste ângulo considerando que o sistema esteja subcompensado e sobrecompensado respectivamente.

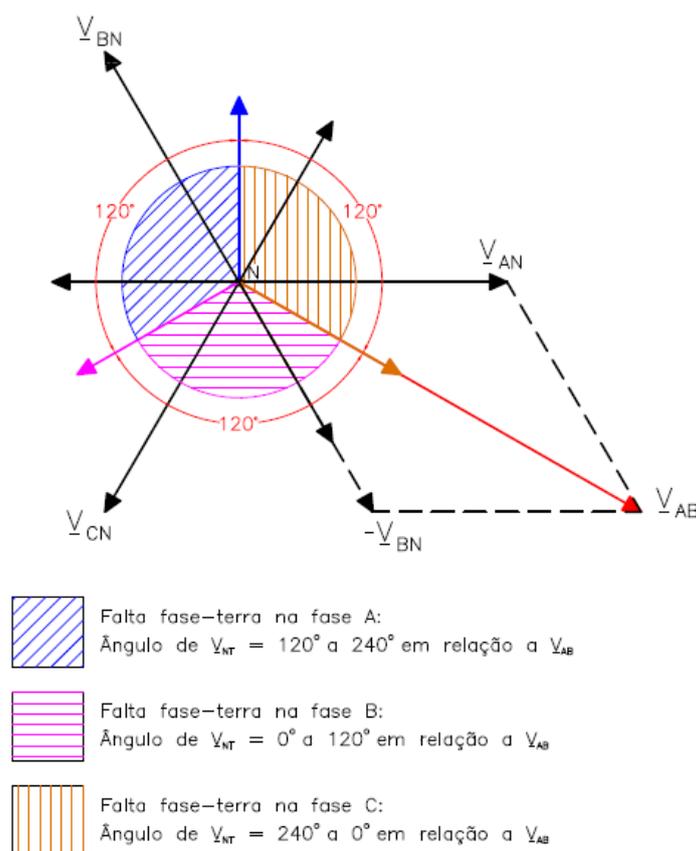


Figura 5.23. – Identificação da fase em falta - Sistema Subcompensado

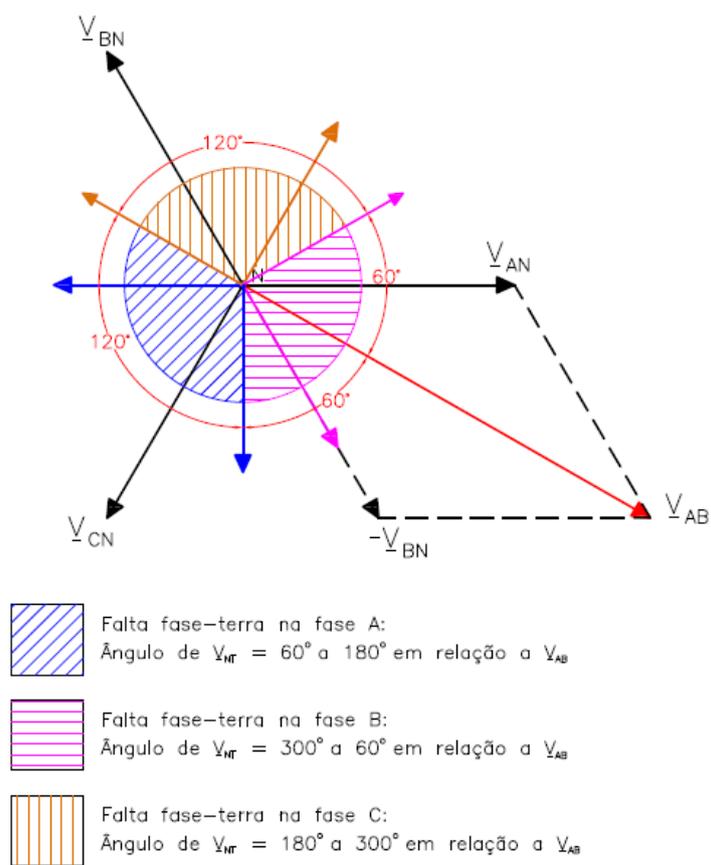


Figura 5.24. – Identificação da fase em falta - Sistema Sobrecompensado

## 5.8 Fluxograma Básico para Operação do Sistema Ativo

O fluxograma apresentado na figura 5.25 resume a proposta de operacionalidade de um sistema de “compensação ativa capacitiva” (série). São representadas as etapas de estimativa da reatância capacitiva, determinação da fase em falta e atuação do sistema ativo para injeção de tensão e eliminação da corrente no ponto de defeito.

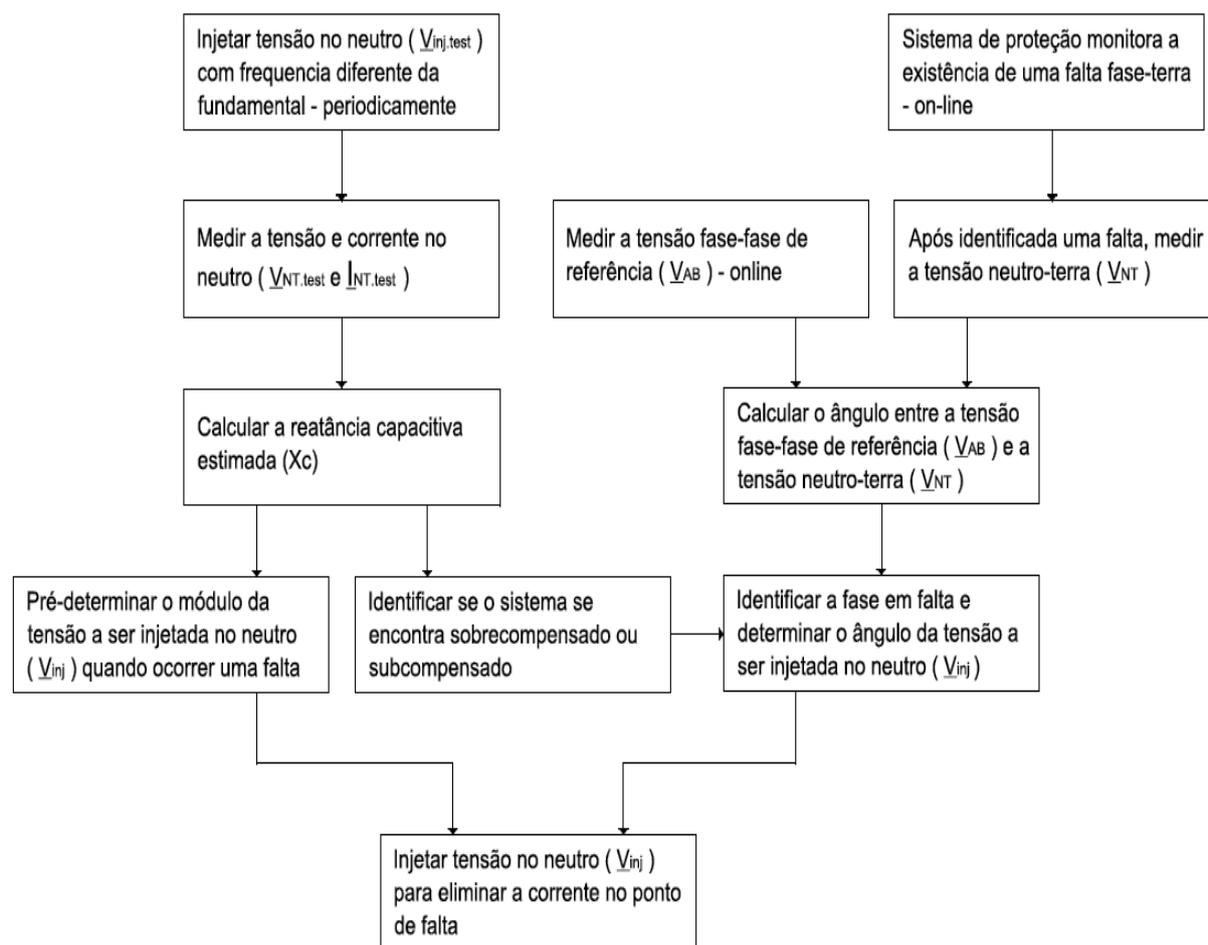


Figura 5.25. – Fluxograma básico de operação do sistema ativo de compensação

## 5.9 Conclusões

No presente capítulo foram estudados os requisitos básicos do sistema ativo para que seja anulada uma falta para terra em um sistema elétrico, bem como as filosofias de “Compensação Ativa Completa” (paralela) e “Compensação Ativa Capacitiva” (série). Esta última topologia foi definida como aquela a ser adotada para o desenvolvimento do presente trabalho. Esta aplicação foi descrita utilizando-se o inversor de frequência como fonte de tensão e ângulo variáveis, com os demais acessórios necessários.

Uma vez que, para a compensação ativa adotada (série), exige-se o conhecimento da reatância capacitiva para terra, foi abordado o processo de estimativa da mesma através da injeção de tensão no neutro com frequência inferior à nominal da rede. A demonstração deste método de avaliação foi exemplificada através de uma simulação computacional utilizando o software *MatLab*.

No sistema proposto é fundamental que se conheça qual a fase foi à terra durante uma falta. Portanto, foram estudados os princípios básicos para identificação da fase sob falta através da avaliação do ângulo da tensão de neutro-terra a ser medido em relação a uma referência pré-determinada, o que constitui, como já relatado, uma importante contribuição do presente trabalho. Reitera-se que a associação desta metodologia desenvolvida com a injeção de corrente ou tensão controlada no neutro permitirá a identificação de faltas de alta impedância, aspecto de intensa pesquisa nos últimos quarenta anos, mas que não possui ainda uma solução definitiva.

Considerando-se todos os aspectos abordados, conclui-se que o sistema de compensação ativo abre uma janela de oportunidades, ainda não exploradas para uso da bobina de Petersen, permitindo as seguintes funcionalidades:

- anular corrente de falta para terra em sistemas com topologia variável, com compensação completa das correntes ativas e capacitivas, sem alteração física da bobina;
- identificar a impedância fase-terra dos sistemas elétricos;
- identificar a fase que se encontra sob falta à terra;
- identificar situações de faltas de alta impedância;
- identificar a distância da falta à terra, a partir do conhecimento dos parâmetros do sistema.

# Capítulo 6

## Estudos Experimentais

*O objetivo deste capítulo é apresentar o experimento prático desenvolvido para demonstração da aplicação de um sistema de compensação ativa entre o neutro e a terra. O foco da abordagem consiste na validação dos conceitos trabalhados na tese utilizando-se um protótipo do conversor estático e elementos que representam o sistema elétrico equilibrado. São relatadas as características do circuito montado e os resultados obtidos.*

### 6.1 Introdução

A utilização de equipamentos eletrônicos no neutro do sistema elétrico, por ser uma proposição inusitada, requer uma verificação prática para evidenciar seu funcionamento. Com base nesta premissa, o presente trabalho desenvolveu um circuito de teste, em escala laboratorial, com o objetivo de demonstrar a viabilidade da aplicação de conversores eletrônicos associados ao aterramento do neutro, tendo como finalidade o controle das tensões e correntes entre neutro e terra. O circuito proposto contempla as características básicas de um sistema elétrico trifásico equilibrado. O aterramento do neutro neste experimento se dá por uma indutância em série com um inversor monofásico chaveado através de sinal PWM.

O presente capítulo expõe as principais características do experimento realizado, suas condições de contorno e premissas utilizadas. É efetuada uma abordagem da composição do circuito de teste e do conversor eletrônico, descrevendo os sistemas de controle, medição, geração e acionamento dos sinais. Os resultados obtidos tendem confirmar que o emprego da eletrônica no aterramento do neutro é um recurso viável e bastante interessante, capaz de praticamente anular as correntes de falta fase-terra, no ponto de defeito.

## 6.2 Projeto do Circuito de Teste

### 6.2.1 Concepção do Sistema Elétrico

O foco deste experimento concentra-se na verificação da teoria de que, para um sistema não sintonizado, é possível minimizar a corrente no ponto de falta através do controle da corrente e da tensão no neutro. Logo, considerando-se uma indutância de neutro para terra fixa, as capacitâncias fase-terra adotadas são escolhidas propositalmente para resultar em um sistema subcompensado ou sobrecompensado, possibilitando avaliar o desempenho do equipamento eletrônico proposto.

Para reprodução de um sistema elétrico equilibrado em modelo reduzido projetou-se um circuito de baixa tensão composto por uma fonte trifásica, estabelecida através de transformadores monofásicos. As capacitâncias entre as fases e terra do sistema foram compostas por capacitores eletrolíticos, ligados em “anti-série” (despolarização), para permitir a aplicação de sinais alternados sobre os mesmos. A montagem do circuito experimental foi realizada no laboratório de acionamentos elétricos da UFMG utilizando-se os recursos disponíveis tais como: bancada de testes, varivolt trifásico e varivolt monofásico, osciloscópio, pontas de prova e multímetros digitais.

O aterramento do neutro do sistema elétrico em questão foi realizado através de uma associação série entre o conversor estático (fonte ativa que permite alterar a tensão e ângulo da corrente) e um indutor fixo. Para o acoplamento do dispositivo eletrônico utilizou-se um transformador monofásico de relação unitária. O diagrama simplificado do sistema em teste está mostrado na figura 6.1.

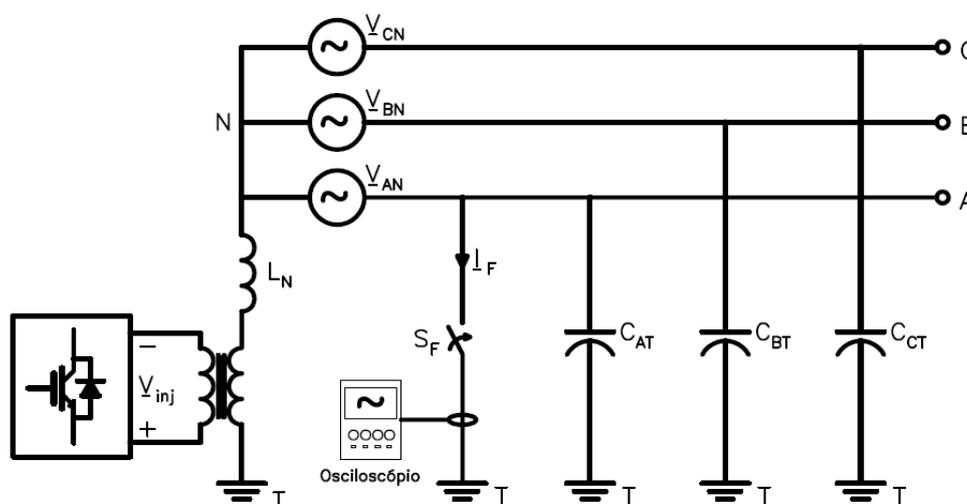


Figura 6.1. – Diagrama do Circuito de Experimental –  
Medição da corrente no ponto de falta através de osciloscópio

### 6.2.2 Dados do Circuito

Selecionou-se uma tensão nominal fase-fase ( $V_{\phi,\phi}$ ) do circuito igual a 52V, resultando em uma tensão fase-neutro ( $V_{\phi,N}$ ) igual a 30V. O varivolt trifásico foi conectado a três transformadores monofásicos de relação de tensão de 120V/30V, com conexão primária em estrela e conexão secundária em estrela com o neutro acessível, de maneira a obter as tensões desejadas. A figura 6.2 ilustra a composição da fonte do sistema experimental.

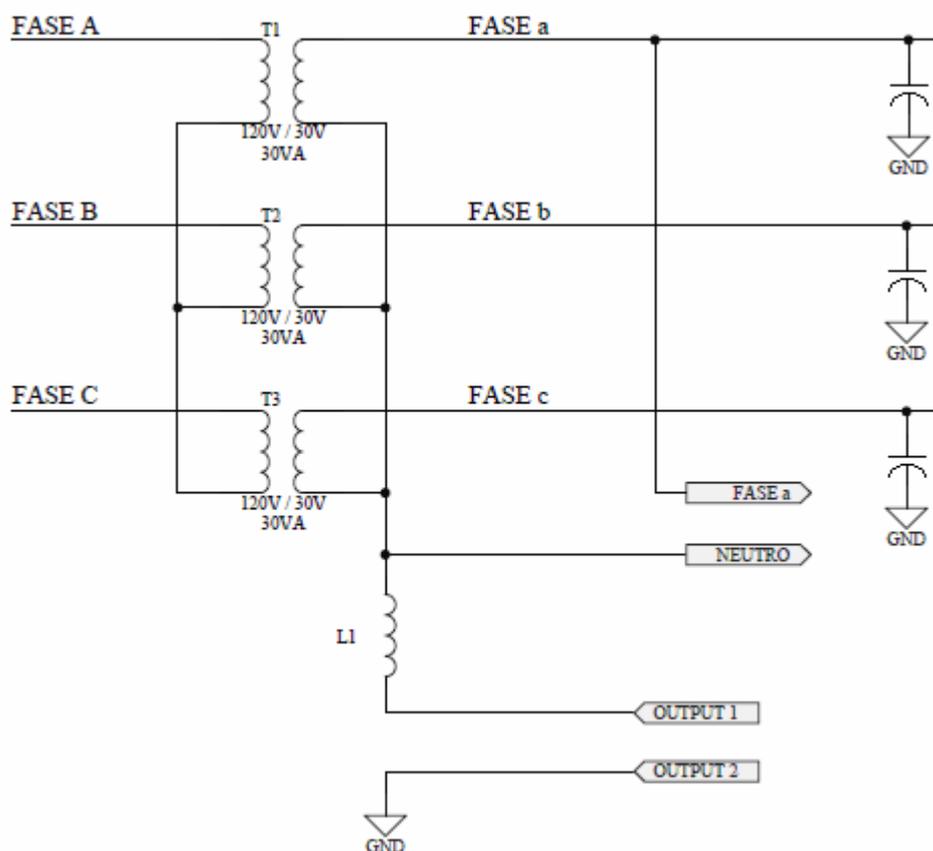


Figura 6.2. – Composição da fonte trifásica

Com a configuração do sistema acima definida, dimensionou-se os valores das capacitâncias fase-terra, que determinam a corrente capacitiva bem como a indutância de neutro, levando-se em consideração as limitações de corrente e tensão dos dispositivos eletrônicos que compõem o inversor. Na obtenção de um sistema sobrecompensado foi adotado um valor fixo de capacitância e, para obtenção de um sistema subcompensado, substituiu-se a capacitância fase-terra por outra também de valor fixo. A seguir estão apresentados os dados dos componentes utilizados bem como o cálculo das correntes estimadas.

- Capacitores fase-terra:
  - Sistema sobrecompensado:  $C_{AT} = C_{BT} = C_{CT} = 5\mu F$
  - Sistema subcompensado:  $C_{AT} = C_{BT} = C_{CT} = 15\mu F$
- Indutor neutro-terra (núcleo de ar):  $L_N = 234,5mH$

Os cálculos dos valores de correntes capacitivas, para cada situação de compensação do sistema sob falta, são os seguintes:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (6.16)$$

$$I_{CAP} = \sqrt{3} \cdot V_{\phi,\phi} / X_C \quad (2.34)$$

- Sistema sobrecompensado:  $X_C = 530,52 \Omega$ ,  $I_{CAP} = 170mA$

- Sistema subcompensado:  $X_C = 176,84 \Omega$ ,  $I_{CAP} = 510mA$

Já a corrente neutro-terra, quando da ocorrência de uma falta, considerando a indutância fixa e sem injeção de tensão ( $V_{inj} = 0$ ) pelo conversor em série com o indutor é dimensionada pelas seguintes relações:

$$X_L = 2\pi f \cdot L_N = 88.42 \Omega \quad (6.1)$$

$$I_{NT} = V_{\phi,N} / X_L = 340mA \quad (6.2)$$

Portanto, a partir da diferença entre a corrente capacitiva e a corrente de neutro, obtém-se as seguintes correntes resultantes no ponto de falta ( $I_F$ ):

- Sistema sobrecompensado ou  $I_F = 510mA - 340mA = 170mA$

- Sistema subcompensado:  $I_F = 170mA - 340mA = -170mA$

Observa-se que os valores de capacitância fase-terra foram propositalmente escolhidos de forma a se obter uma desintonia igual a 100%, tanto para o sistema sobrecompensado quanto para o sistema subcompensado, ou seja, em ambas situações a relação entre a corrente

indutiva e capacitiva é de duas vezes no ponto de falta, representado um caso extremo. Na prática, em sistemas reais, a expectativa é que não ocorram desintonias tão elevadas. No entanto, no presente trabalho, buscou-se evidenciar a atuação do sistema ativo de aterramento do neutro, para o qual os casos extremos facilitam tal objetivo.

No circuito em questão não foram implementadas as capacitâncias entre fases uma vez que o enfoque principal é o circuito de terra. Em relação aos demais parâmetros do sistema elétrico não considerados, tais como a impedância série do transformador e dos cabos, estimou-se que os mesmos possuam uma ordem de grandeza inferior às impedâncias fase-terra e neutro-terra, razão pela qual os mesmos foram desprezados. Em futuros experimentos, de modo a certificar-se sobre esta consideração, o procedimento recomendado é a execução de ensaios nos transformadores.

### **6.2.3 Determinação da Fase em Falta**

Um aspecto importante relacionado ao experimento deve-se ao fato de que, durante a ocorrência da falta fase-terra franca, a atuação adequada do conversor para controle da tensão e corrente no neutro, em módulo e ângulo, requer o conhecimento de qual fase se encontra para terra. Para fins de simplificação do protótipo de teste, foi definida sempre a fase “A” como fase em falta. Desta forma, a injeção pelo inversor possuirá a todo o momento um ângulo de referência pré-definido, tornando necessário apenas o controle da magnitude a ser aplicada.

## **6.3 Projeto do Conversor**

O conversor eletrônico projetado é constituído basicamente pelos seguintes módulos: retificador, condicionador de sinais, geração e direção do sinal PWM e estágio de potência. O critério na escolha dos componentes utilizados considerou a disponibilidade em laboratório e as facilidades na aquisição dos mesmos. Observa-se que, para os futuros experimentos, é recomendado o aprimoramento na concepção do projeto e a utilização de dispositivos mais adequados, tais como amplificadores de instrumentação, capacitores tipo polipropileno e outros. A seguir está apresentada uma breve explanação da composição de cada parte do equipamento.

### 6.3.1 Alimentação dos Circuitos de Controle

Para alimentação dos circuitos de controle, conforme ilustrado na figura 6.3, foi utilizado o transformador T1 alimentado com 30V, o qual fornece tensões de 12V em ambos enrolamentos secundários (tapa central). Uma ponte retificadora de onda completa composta pelos diodos D1 a D4, e um filtro composto pelos capacitores C5 e C6 produz tensões contínuas para as entradas dos circuitos reguladores de tensão U2 e U3, os quais geram tensões contínuas reguladas respectivamente em +12Vcc e -12Vcc. Os capacitores C7 e C8, posicionados nas saídas dos reguladores têm como função garantir a estabilidade das tensões reguladas.

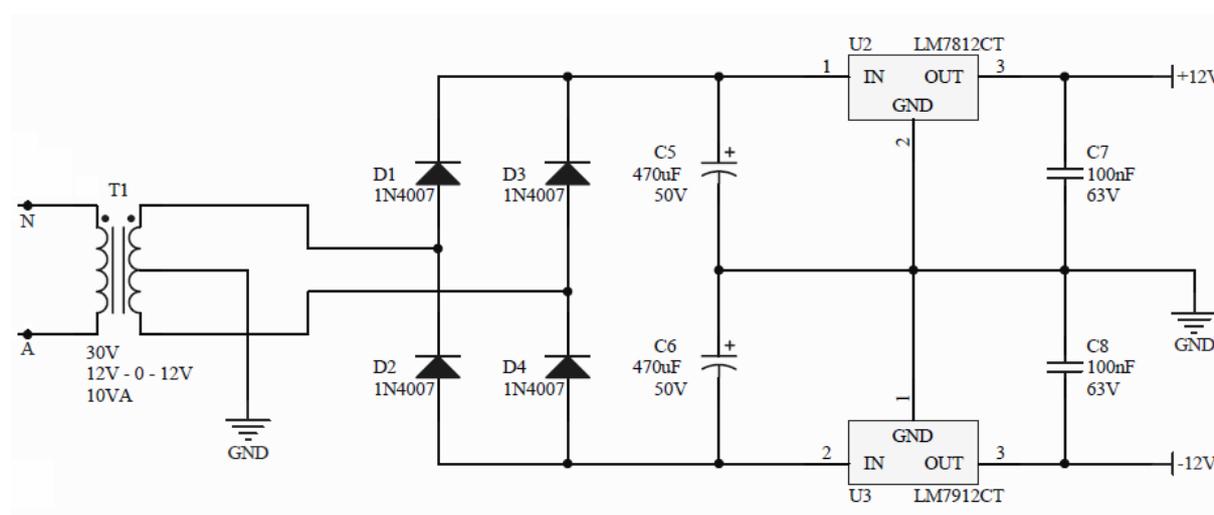


Figura 6.3. – Fonte de alimentação dos circuitos de controle

### 6.3.2 Condicionamento de Sinais

A medição da tensão neutro-terra, ou tensão de falta, é realizada através de um divisor resistivo e de estágios contendo amplificadores operacionais. As figuras 6.4 a 6.6 ilustram como se compõe cada etapa do condicionamento de sinais. O primeiro estágio atenua a tensão medida, de maneira a obter uma imagem da tensão neutro-terra dentro dos níveis adequados ao circuito de controle ( $V_{AN}$ ). O segundo estágio realiza, através de um circuito retificador de onda completa de precisão, a retificação do sinal entregue pelo primeiro. Em um terceiro estágio é adicionado ao sinal retificado ( $V_{AN\_ret}$ ) um sinal de OFF-SET e uma amplificação. Tanto o sinal de OFF-SET quanto a amplificação do sinal são utilizados posteriormente para o ajuste do sinal de chaveamento ( $V_S$ ).

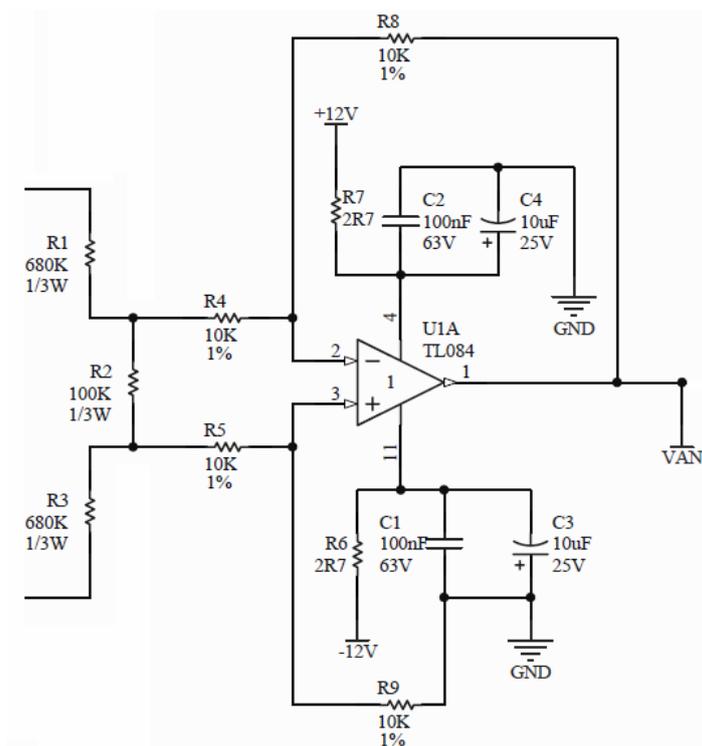


Figura 6.4. – 1º Estágio - Medição da Tensão de Falta

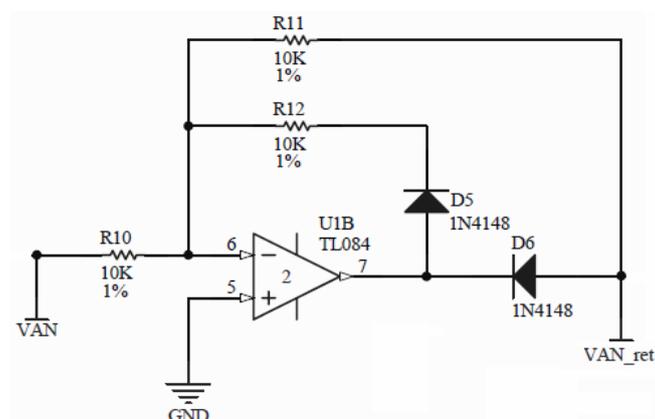


Figura 6.5. – 2º estágio - Retificador de precisão

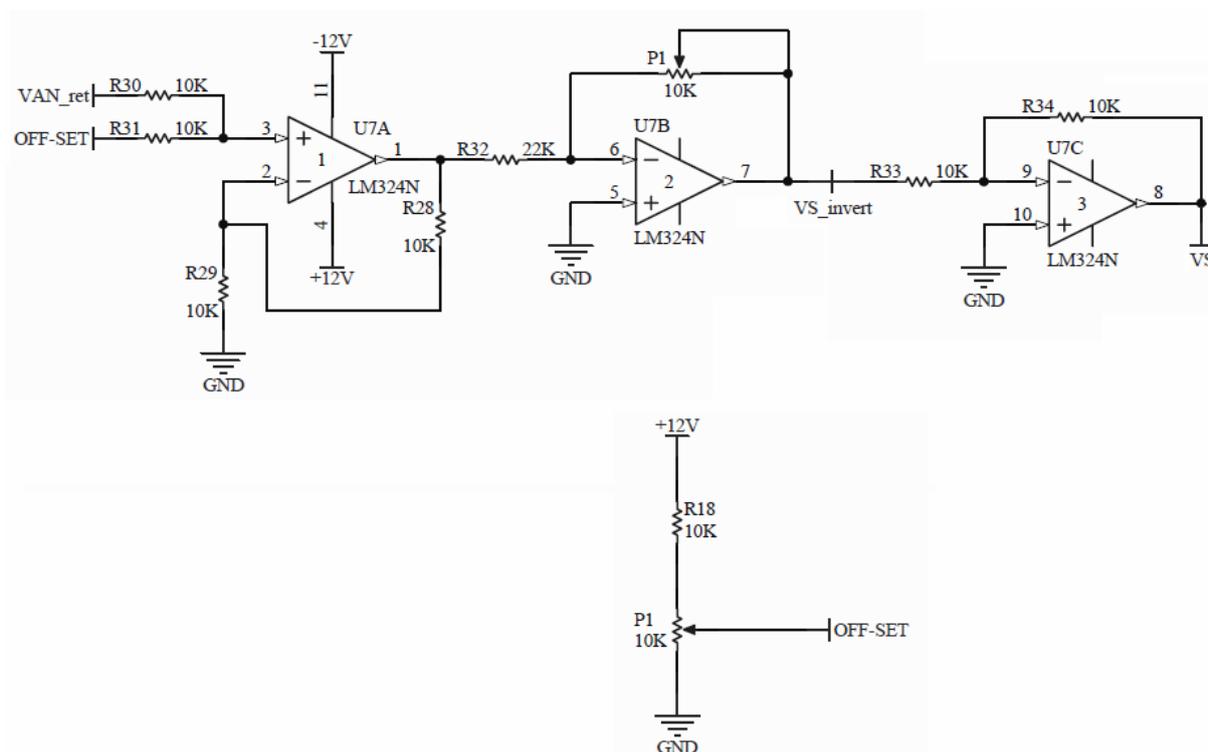


Figura 6.6. – 3º estágio - Ajuste do sinal

### 6.3.3 Geração do Sinal PWM

A partir do sinal da tensão de falta e após sua retificação e ajuste, o sinal  $V_S$  é utilizado para gerar o sinal PWM, o qual é obtido através de um circuito integrado (LM3524D) dedicado a esta função, conforme mostrado na figura 6.7. A frequência da onda portadora é determinada através da associação do resistor R25 e do capacitor C13, sendo seu valor calculado por meio da expressão:

$$F_{osc} \cong \frac{1}{CT \cdot RT} = \frac{1}{C13 \cdot R25} = \frac{1}{1nF \cdot 3,3k} = 303kHz$$

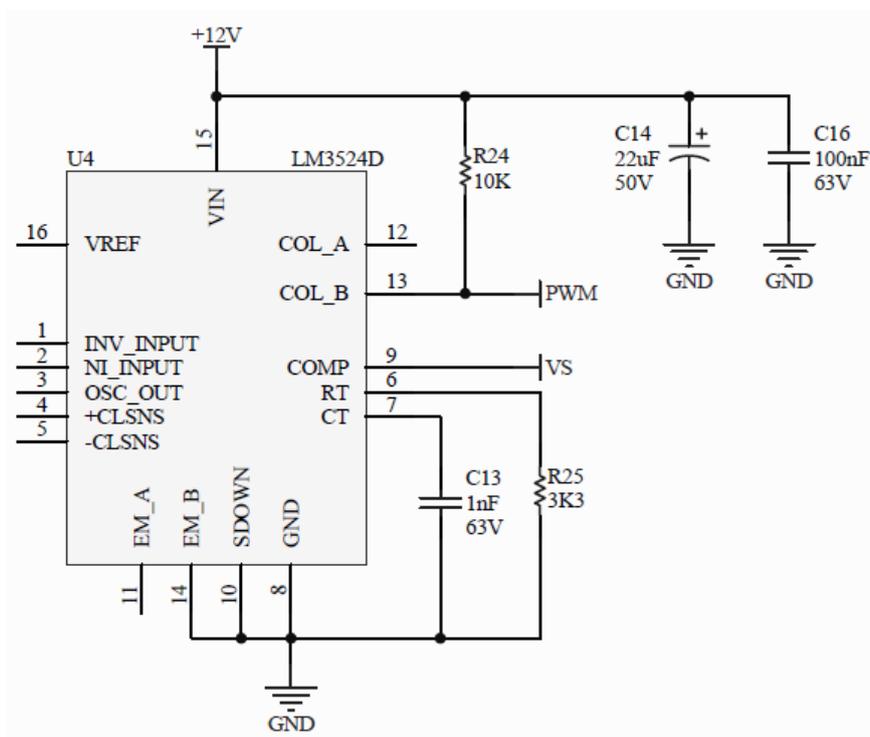


Figura 6.7. – Geração do Sinal PWM

Além do sinal PWM, é necessária a geração de um sinal de direção, de maneira a garantir a correta operação do estágio de potência. Esta operação é realizada pelo circuito integrado LM311P, utilizando-se o sinal de tensão neutro-terra medido  $V_{AN}$ , conforme mostrado na figura 6.8.

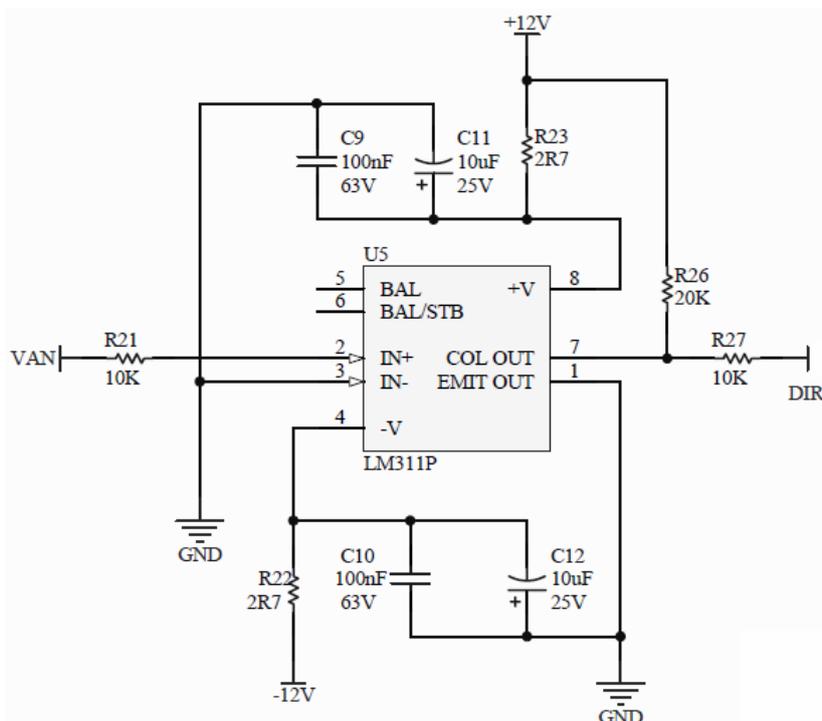


Figura 6.8. – Direção do sinal PWM.

### 6.3.4 Estágio de Potência

O estágio de potência é constituído por um conversor e um barramento de tensão contínua. Para esta configuração utilizou-se um circuito integrado LMD18200, o qual possui um inversor monofásico do tipo ponte H, *drivers* de acionamento das chaves estáticas e medição de corrente incorporados. Os sinais de controle anteriormente gerados são então disponibilizados para o conversor, conforme mostrado na figura 6.9.

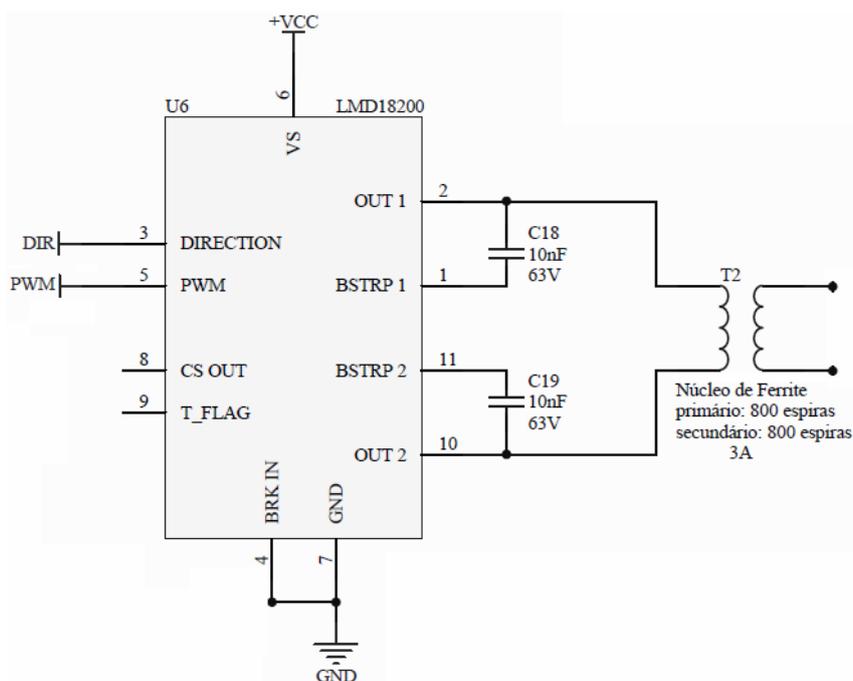


Figura 6.9. – Estágio de Potência.

Para o funcionamento do conversor, é criado um barramento de tensão contínua, através de um retificador de onda completa e um filtro capacitivo, conforme apresentado na fig. 6.10.

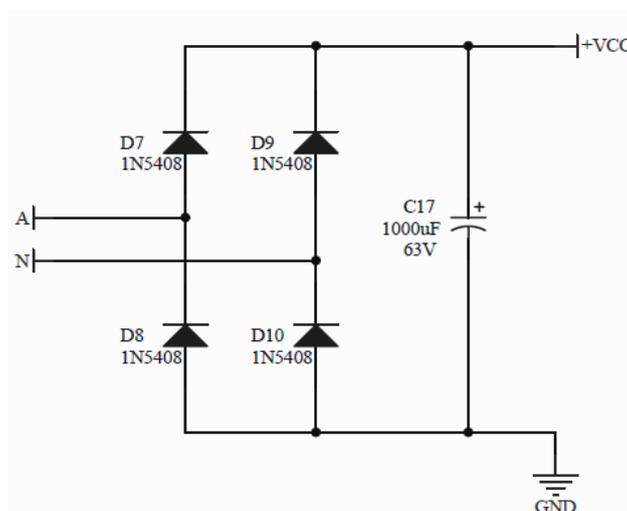


Figura 6.10. – Barramento CC.

### 6.3.5 Funcionalidades implementadas no protótipo

O circuito do protótipo elaborado permite implementar o controle da amplitude da tensão injetada pelo estágio de potência, na faixa de  $30 \angle 0^\circ \text{ V}$  a  $30\text{V} \angle 180^\circ$ , estando o ângulo desta tensão relacionado com a tensão de falta, que neste caso sempre será a tensão da fase “A”. O nível de tensão aplicada irá definir o grau de compensação da corrente no ponto de falta.

## 6.4 Esquemático da Placa de Testes

A placa de testes foi projetada de forma a atender as necessidades dos circuitos eletrônicos utilizados. Sua configuração pode ser visualizada através das figuras 6.11 a 6.13 mostradas a seguir.

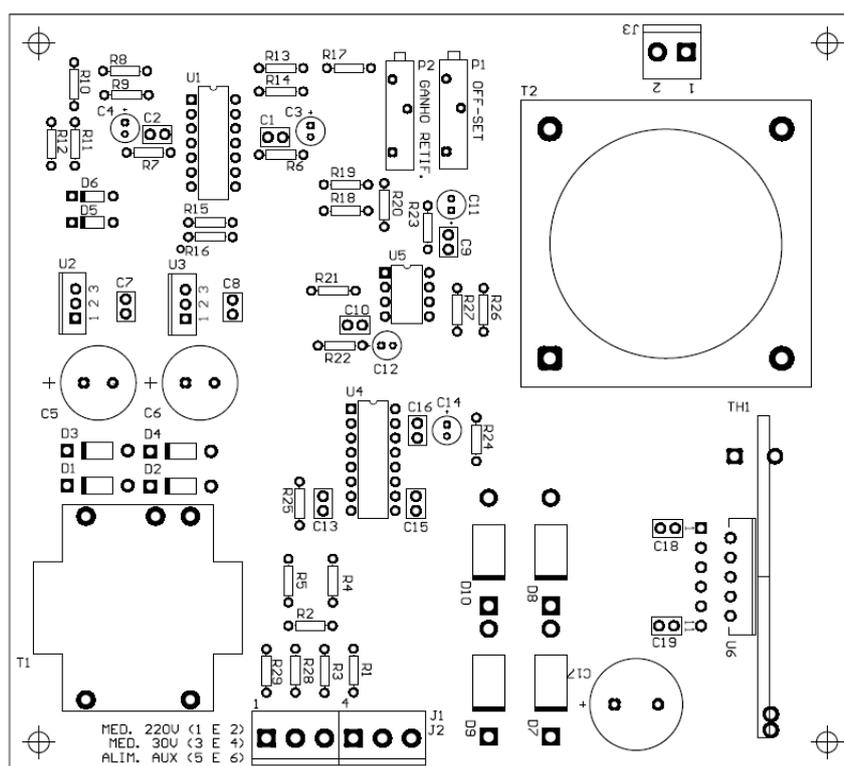


Figura 6.11. – Disposição dos componentes

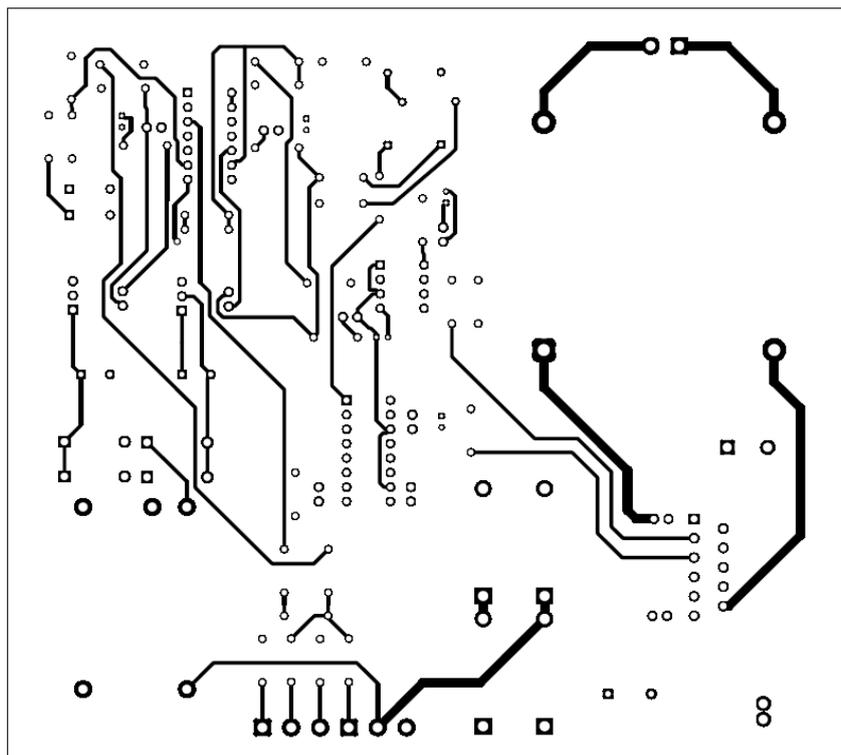


Figura 6.12. – Layout da camada superior

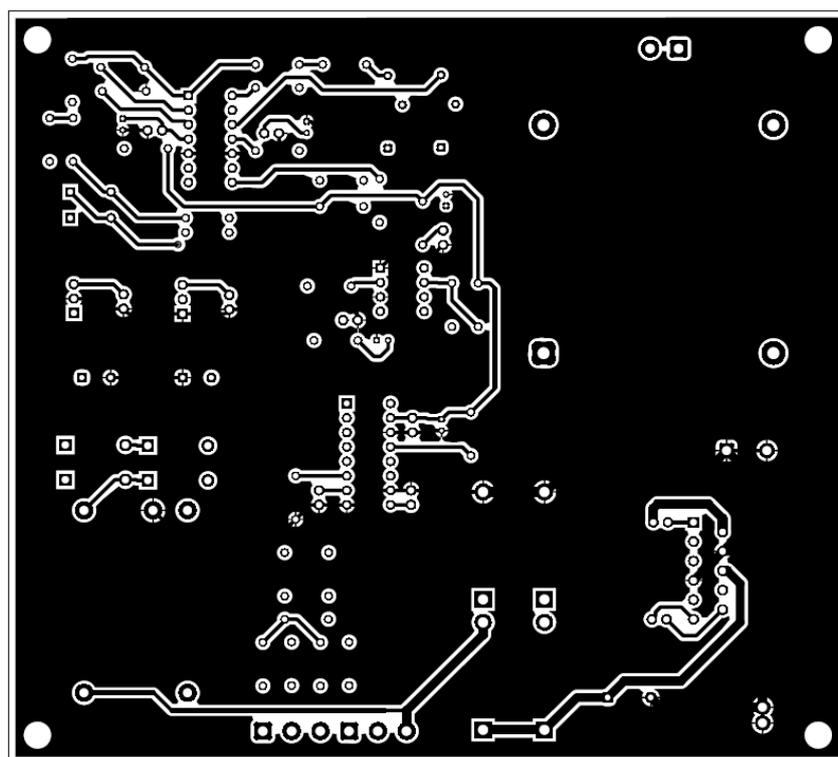


Figura 6.13 – Layout da camada inferior

## 6.5 Bancada de Ensaio

O experimento descrito foi montado no laboratório de acionamentos elétricos da UFMG. As fotos a seguir, figuras 6.14 a 6.17 permitem visualizar os componentes da execução realizada.

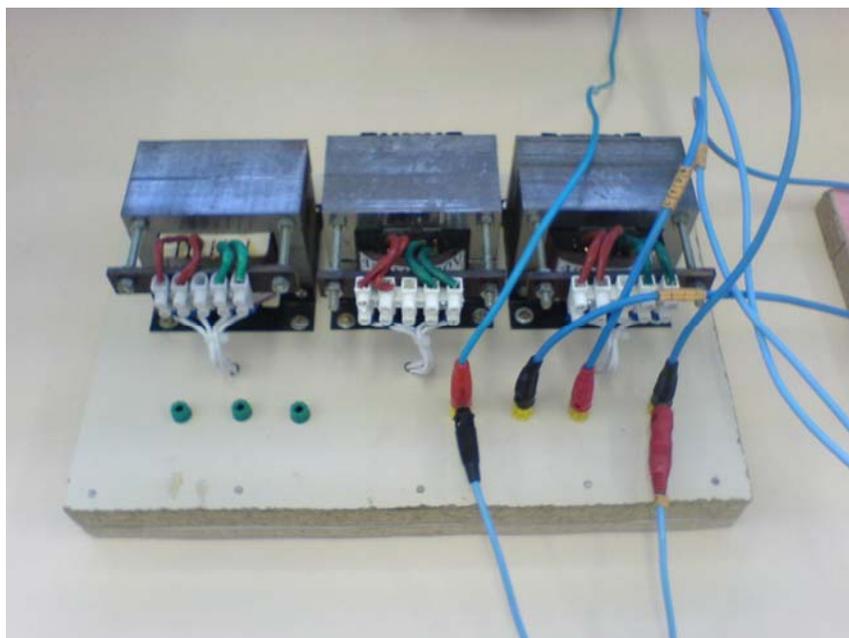


Figura 6.14. – Transformados monofásicos – conexão estrela-estrela.

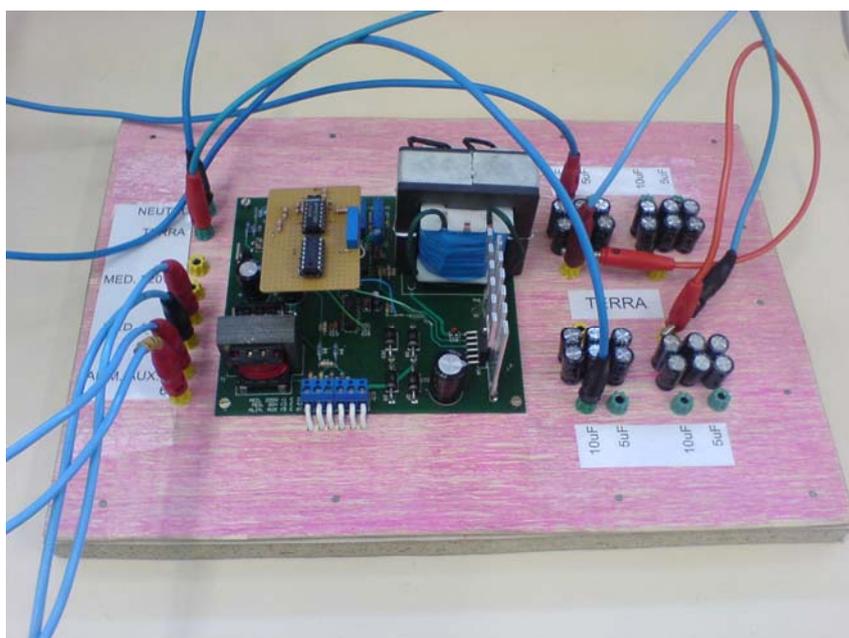


Figura 6.15. – Circuito de injeção de tensão e capacitâncias fase-terra.



Figura 6.16. – Visualização 1 da montagem em bancada.

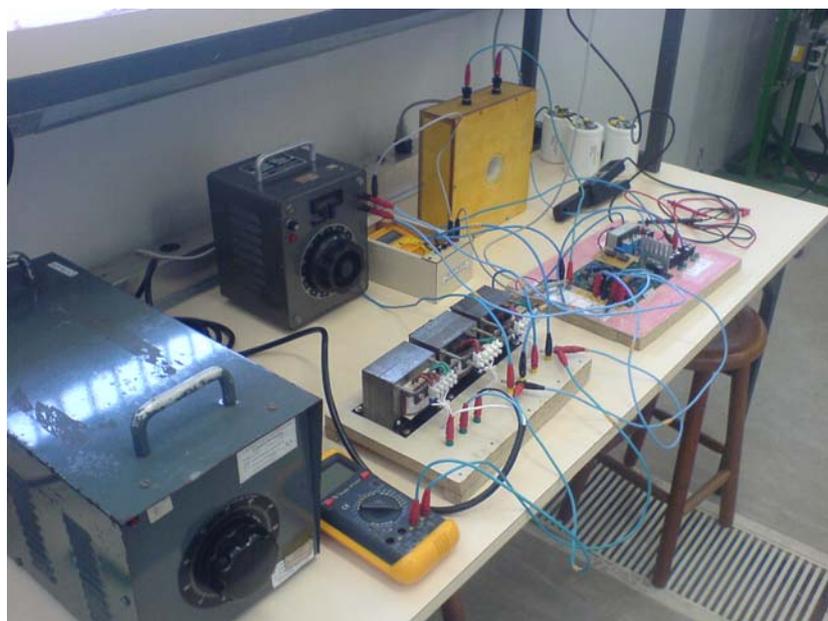


Figura 6.17. – Visualização 2 da montagem em bancada.

## 6.6 Resultados Práticos Obtidos

Os resultados capturados via osciloscópio permitem visualizar o comportamento sob falta nas situações dos sistemas sobrecompensado e subcompensado. Durante a realização dos experimentos, verificou-se que a rede elétrica de 60 Hz do laboratório onde foram realizados os ensaios registrava uma forte presença de ruídos e um conteúdo harmônico de elevada frequência. Nos gráficos das medições realizadas pode-se observar tais interferências. A medição efetiva é apresentada na cor azul, enquanto que a corrente vista em vermelho foi obtida através da aplicação de um filtro de alta frequência.

A figura 6.18 mostra a corrente no ponto de falta para o sistema sem a atuação da fonte ativa, sendo o sistema sobrecompensado. Na figura 6.19, é visto o mesmo sistema com o acionamento da fonte ativa, injetando uma tensão de  $15 \angle 0^\circ$  V através do conversor. As mesmas observações se aplicam às figuras 6.20 e 6.21 para um sistema subcompensado.

O módulo da tensão de injetada (igual  $15 \angle 0^\circ$  V) foi determinado a partir de cálculos, utilizando-se a equação 6.4, com o objetivo de validação da mesma. Para o sistema sobrecompensado foi utilizada uma tensão de  $15 \angle 0^\circ$  V enquanto para o sistema subcompensado injetou-se uma tensão de  $15 \angle 180^\circ$  V.

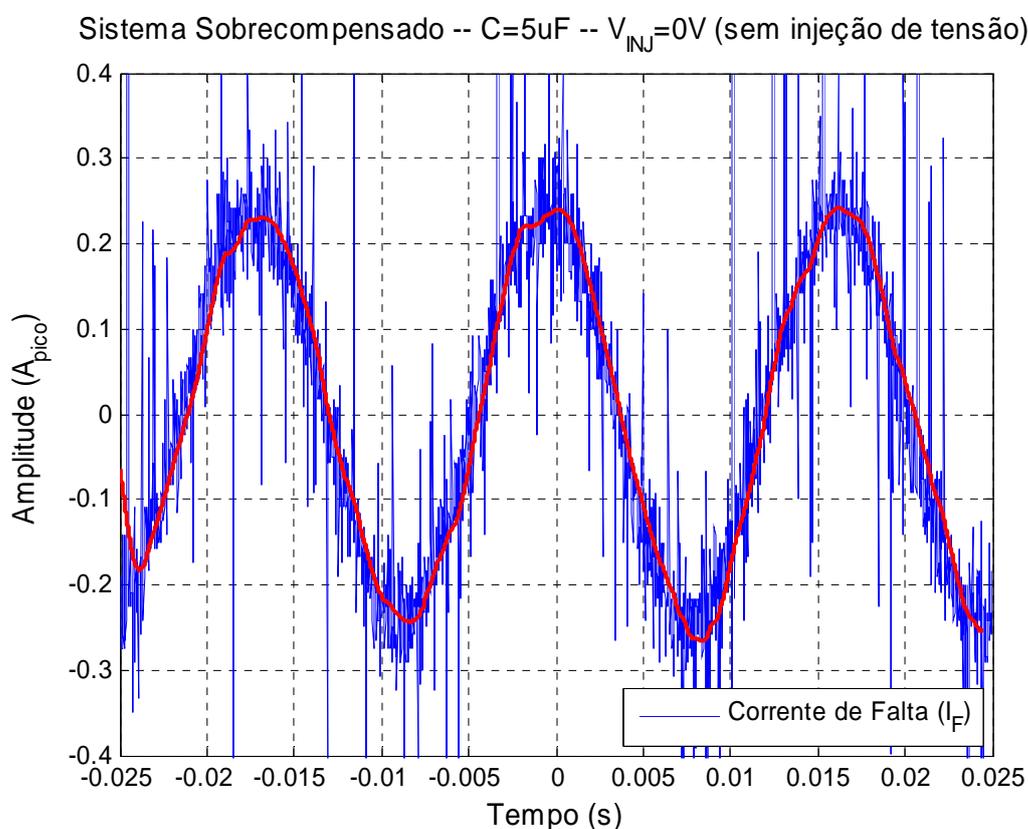


Figura 6.18. – Corrente no ponto de falta - Sistema sobrecompensado, sem injeção de tensão

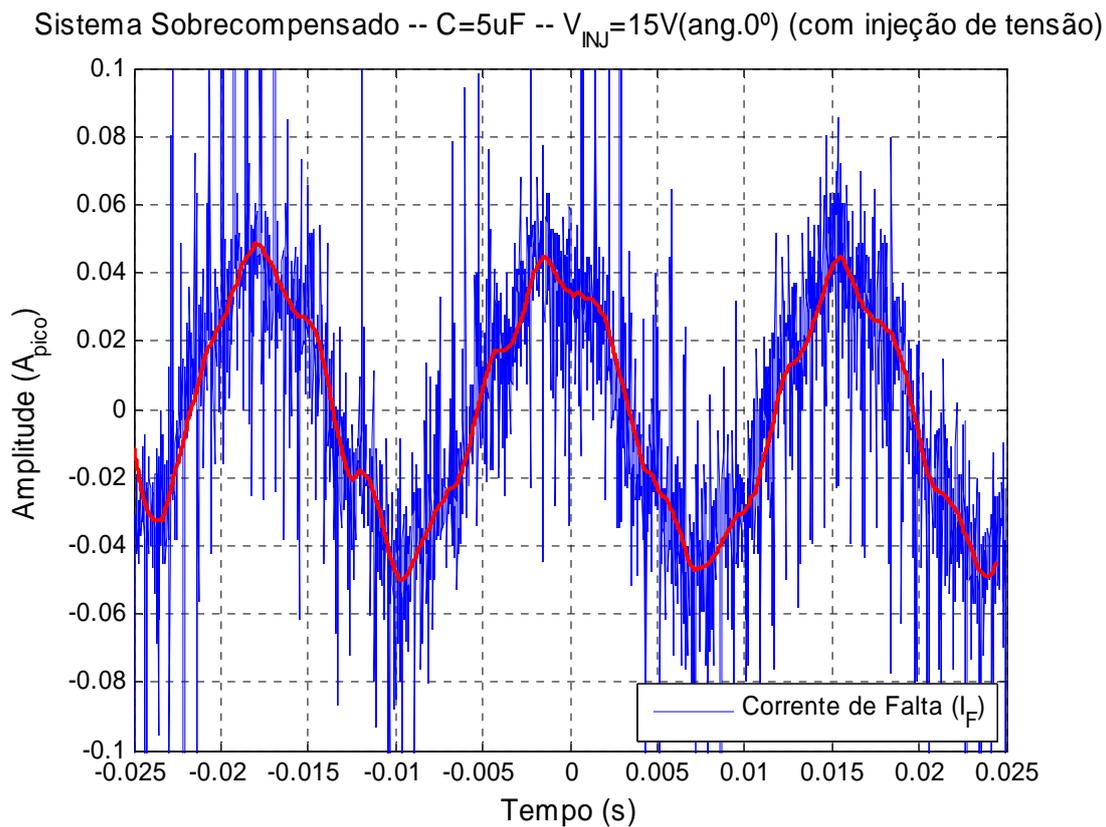


Figura 6.19. – Corrente no ponto de falta - Sistema sobrecompensado, com injeção de tensão

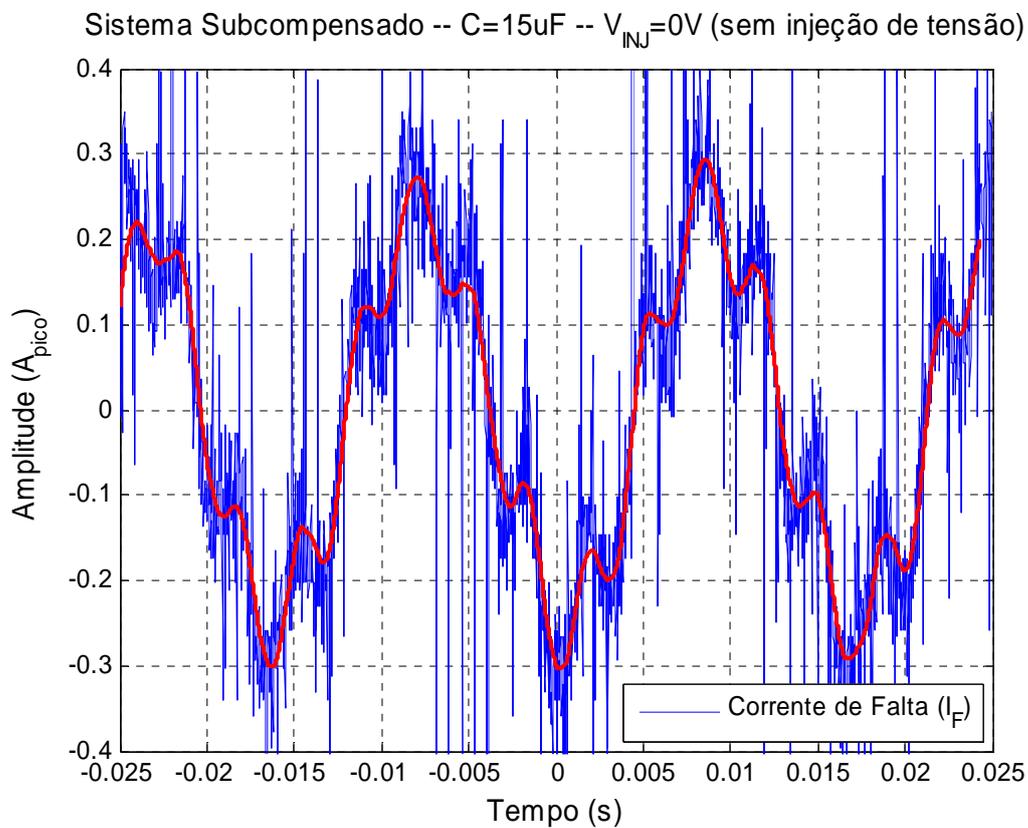


Figura 6.20. – Corrente no ponto de falta - Sistema subcompensado, sem injeção de tensão.

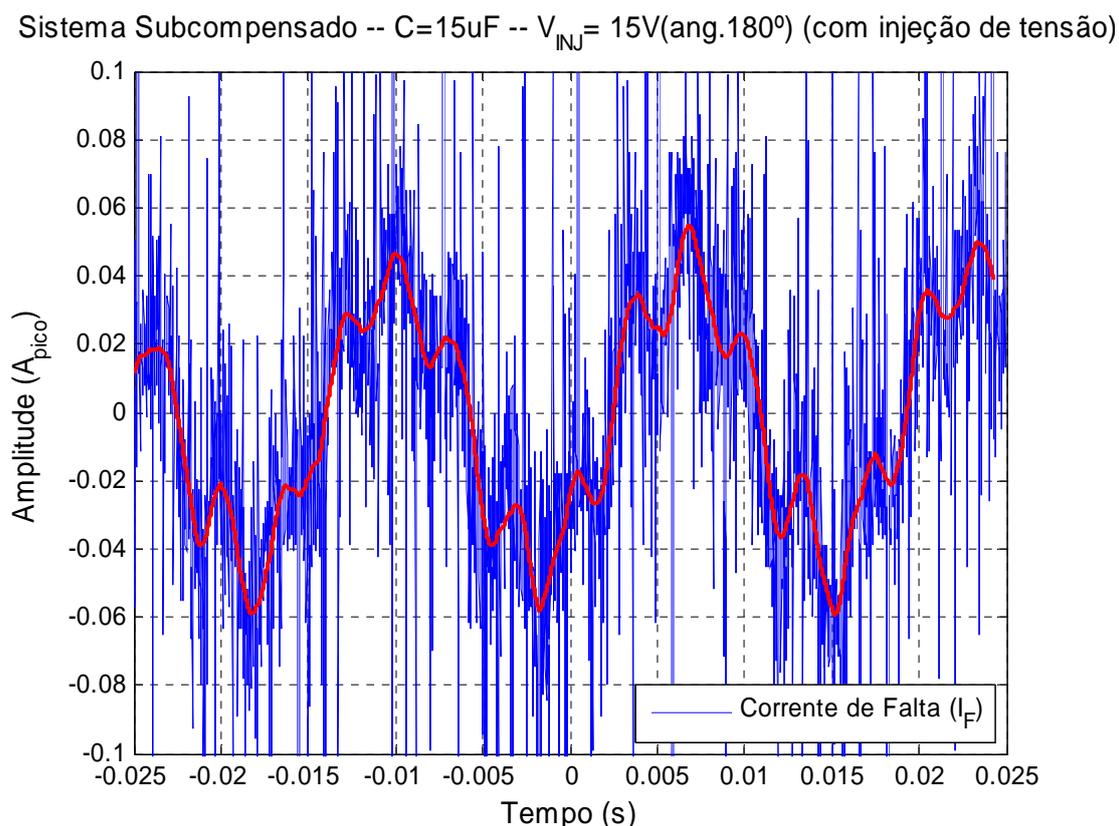


Figura 6.21. – Corrente no ponto de falta - Sistema subcompensado, com injeção de tensão.

## 6.7 Análise dos Resultados, Recomendações e Conclusões

Através dos resultados obtidos pode-se afirmar que o principal objetivo do experimento foi atingido. Demonstrou-se que é possível, de forma prática, reduzir significativamente a corrente no ponto de ocorrência de uma falta à terra em um sistema elétrico, seja para sistemas subcompensados ou sobrecompensados.

Com a atuação do dispositivo eletrônico constatou-se a permanência de uma corrente residual no ponto de falta. Tal resíduo corresponde a cerca de 20% da corrente de falta inicial, sendo basicamente resultante da parcela resistiva não anulada. A origem da parcela resistiva deve-se à resistência do transformador de acoplamento e, principalmente, à resistência intrínseca da bobina, do tipo de núcleo a ar, com diversas espiras. É de se observar que as tensões envolvidas no experimento são relativamente muito baixas. Daí o fato da resistência presente caracterizar-se como significativa em relação às impedâncias do sistema trabalhado.

Na prática, os sistemas que utilizam linhas aéreas, com tensões mais elevadas e equipamentos bem dimensionados, a expectativa é a de que a resistência presente no circuito

seja menos significativa, conduzindo a uma parcela residual muito menor. Nestes sistemas, muito embora exista uma corrente residual intrínseca relacionada a perdas dielétricas ativas, esta parcela é pequena e pode-se prever que a redução da corrente seja suficiente para extinção da falta resultante no ponto de defeito, como de fato ocorre nos sistemas fixos aterrados via bobina de Petersen sintonizada.

Observa-se ainda que existe a possibilidade de se desenvolver um protótipo de conversor com recursos mais bem elaborados, através da implantação de um sistema de controle de corrente de neutro em módulo e ângulo. Este desenvolvimento adicionalmente permitirá a anulação da componente residual resistiva em sua totalidade e abre campo para utilização da bobina também nos sistemas elétricos que fazem o uso de forma predominante dos cabos de força isolados.

No protótipo trabalhado não foram extraídos resultados em outras condições operacionais ou em outros pontos do sistema, tais como a forma de onda PWM injetada, a tensão entre neutro e terra, tensões sobre a bobina e tensões nas fases sãs, o que poderá ser obtido dando-se continuidade ao desenvolvimento deste trabalho, de forma mais avançada.

A partir da experiência de realização do teste prático, são pontuados a seguir, por este autor, alguns aspectos e recomendações para o sucesso na execução de futuros experimentos mais avançados:

- desenvolver o conversor de potência e seus módulos de controle com recursos que permitam a estimar a reatância capacitiva, identificar a fase em falta e injetar tensão no neutro sem necessidade de comandos externos, ou seja, através da utilização de processadores de sinais digitais;
- realizar ensaios prévios para melhor conhecimento dos valores de impedâncias do transformador, condutores e indutor;
- escolher as capacitâncias fase-terra de tal forma que a reatância capacitiva possua uma ordem de grandeza bastante superior em relação às impedâncias intrínsecas dos demais componentes;
- trabalhar com tensões mais elevadas, tanto quanto possível;
- efetuar simulações computacionais com os parâmetros do circuito sob teste;
- atentar para as condições elétricas da rede local, especialmente quanto ao sistema de aterramento, à presença de interferências por ruídos ou harmônicos ;
- evitar a realização dos testes em simultaneidade com outros experimentos associados a mesma rede elétrica;

- executar os testes iniciais de injeção de tensão no neutro utilizando uma fonte de tensão monofásica variável, do tipo varivolt e avaliar a desejada redução da corrente no ponto de falta;
- realizar testes aplicando faltas com impedâncias alta e baixa;
- monitorar, durante os testes práticos, as tensões entre fases, tensões neutro-terra, tensão injetada, corrente neutro-terra e corrente no ponto de falta.

Para trabalhos futuros, o autor propõe a criação de protótipos com recursos que permitam: supervisão e controle de amplitude e ângulo da tensão ou corrente injetada, determinação da fase em falta e estimativa da corrente capacitiva. Com novos avanços teóricos e, apoiado pela dinâmica dos constantes aperfeiçoamentos apresentados nas tecnologias de instrumentação eletrônica e recursos de informática, vislumbra-se também utilizar o sistema ativo para o auxílio na identificação de faltas de alta impedância e na avaliação da distância do ponto de falta à terra nos sistemas elétricos.

# Capítulo 7

## Conclusões e Propostas de Continuidade

*No âmbito deste trabalho, abordou-se uma série de questões fundamentais relativas ao aterramento do neutro via bobina ressonante, culminando com o desenvolvimento de um sistema ativo, aplicável à redes compostas por linhas aéreas. Entretanto, uma gama de outras questões foi levantada, em razão da diversidade de conhecimentos necessários à proposição. Este capítulo sumariza o enfoque dado no trabalho, bem como, registra outros tópicos, considerados de grande relevância para desenvolvimentos futuros.*

### 7.1 Conclusões

O presente trabalho realizou a revisão dos conhecimentos atuais sobre o aterramento do neutro, especificamente para sistemas aterrados via reatância sintonizada, bem como colaborou com novas técnicas que permitem a aplicação de uma fonte ativa para identificação dos parâmetros da rede e da fase em defeito. Esta contribuição representa um significativo avanço no aperfeiçoamento da aplicação da Bobina de Petersen.

O sistema ativo trabalhado utiliza a Eletrônica de Potência em conjunto com a bobina ressonante permitindo sua sintonia durante uma falta à terra. Como consequência, torna-se possível anular a corrente no ponto de defeito, eliminar as sobretensões transitórias e garantir a operacionalidade do sistema elétrico durante a referida falta, mesmo em sistemas cujo arranjo é variável, ou seja, a capacitância fase-terra se altera durante sua operação normal. A topologia adotada foi direcionada para redes aéreas onde a componente residual resistiva pode ser desprezada em relação à parcela capacitiva.

Apresenta-se como resultado da pesquisa, a obtenção de um importante ganho no fato de se eliminar a necessidade de se alterar fisicamente a bobina para se atingir a sintonia, tal como é feito nos sistemas ressonantes atualmente utilizados. Ressalta-se que as técnicas construtivas de bobinas mecanicamente variáveis são dominadas por um reduzido número de fornecedores.

Também uma importante contribuição é apresentada introduzindo-se uma metodologia para identificar a fase em falta através da observação do ângulo da tensão de neutro para terra, em relação a uma referência pré-definida.

Finalmente observa-se que o trabalho contribui em relação a dois aspectos importantes da exploração dos sistemas elétricos:

- a) A disseminação do aterramento do neutro através de bobina ressonante, quebrando preconceitos e aspectos de resistência cultural, ainda hoje existentes, na aplicação deste método de aterramento.
- b) Introdução da Eletrônica de Potência na melhoria da qualidade de energia, porém com novo enfoque, diferentemente daquele de controle e atuação frente a afundamentos e elevações momentâneas de tensão da rede (equipamentos denominados FACTS - *Flexible AC Transmission Systems*), onde a aplicação é sobre as fases do sistema. O novo ponto proposto para inserção dos equipamentos eletrônicos de controle no sistema elétrico é através do neutro para terra.

## 7.2 Propostas de Continuidade

Ao longo dos estudos, deparou-se com diversas oportunidades para desenvolvimentos futuros, considerados também de grande importância e alcance no sentido de melhoria do desempenho do aterramento dos sistemas elétricos, principalmente no tocante à questão da qualidade de energia dos mesmos. Dentre os tópicos relevantes, podem ser enumerados os seguintes:

- a) extensão do controle da injeção de potência no aterramento neutro com foco nos sistemas cuja distribuição de energia é feita essencialmente através de cabos isolados, onde não se pode desprezar a componente residual ativa e onde o material isolante não é auto-regenerativo. Este objetivo deverá ser atingido empregando-se uma fonte eletrônica de corrente ativa, controlada em ângulo e módulo, ao invés de uma fonte de tensão ativa.

- b) identificação do ramal no qual esteja presente uma falta para terra, dentre os diversos ramais de um determinado sistema. Este objetivo poderá ser alcançado através de aumento da sensibilidade da proteção com o uso do deslocamento do neutro provocado pelo sistema ativo.
- c) localização da distância da falta à fonte, questão essa de extrema importância para as equipes de manutenção do sistema elétrico. Este ponto pode ser tratado através do desenvolvimento de um algoritmo, aliado à obtenção de parâmetros identificados pela injeção de potência ativa no neutro, capaz de estimar a distância do ponto de falta.
- d) identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas. Esta questão atualmente é motivo de um grande número de pesquisas, tendo em vista o risco proporcionado ao ser humano, nas instalações elétricas que utilizam tais redes. A injeção de potência ativa no neutro oferece uma nova e interessante oportunidade para abordagem das falhas em consideração. O deslocamento do neutro permite controlar o valor da corrente de falta à terra, mesmo com alta impedância no ponto de defeito, facilitando desta forma a atuação da proteção através de métodos convencionais.

# Referências Bibliográficas

- [1] U.F.P. Borel, B.J. Cardoso Filho, P.F. Costa, “Aplicação de Conversores Eletrônicos na Sintonia da Bobina de Petersen no Aterramento do Neutro”, *IX CBQEE Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, pp. 359-364. Cuiabá - MT, Ago 2011.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and W. H. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, pp. 2-80. New York- NY: McGraw-Hill, 1996.
- [3] P.F. Costa, “Aterramento do Neutro nos Sistemas de Distribuição Brasileiros: Uma Proposta de Mudança,” Dissertação de Mestrado, PPGEE/EEUFMG, Belo Horizonte - MG, Dez 1995.
- [4] D.D. Ship and F.J. Angelini, “Characteristics of different power systems neutral grounding techniques: Facts and Fiction,” *IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, pp. 106-117, May 1991.
- [5] H.H. Dewey, “General Considerations in Grounding the Neutral of Power Systems,” *Transactions of AIEE*, pp. 405-416, Apr 1923.
- [6] D. Griffel., V. Leitloff, Y. Harmand, and J. Bergeal, “A new deal for safety and quality on MV networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 1428-1433, Oct 1997.
- [7] P. Folliot, J.M. Boyer, and S. Bolle, “Neutral Grounding Reactor for Medium Voltage Networks,” *CIGRE 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, vol. 1, Jun 2001.
- [8] B. Ceresoli, E. Berardinis, A. Cerretti, A. Gallerani, P. Perna, and G. Valtorta “Neutral connection to earth in medium voltage networks: operation experience in ENEL,” *CIGRE 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, vol. 3, Jun 2001.
- [9] A.J. Mazon, I. Zamora, L. Zabala, F. Antepará, J. Amantegui and J.R. Saenz, “First resonant neutral grounding implantation in Spanish distribution system,” *IEEE Porto Power Tech Proceedings*, vol. 4, Set 2001.

- [10] A.J. Mazon, I. Zamora, F. Antepará, M. Pühringer and J.R. Saenz, “Experiences of Neutral Resonant System Implantation in Gorliz Substation,” *CIGRE 17th International Conference on Electricity Distribution*, Section 2, May 2003.
- [11] I. Zamora, A.J. Mazon, K.J. Sagastabeitia and O. Pico, “Verifying Resonant Grounding in Distribution Systems,” *IEEE Computer Applications in Power Systems*, vol. 15, pp. 45-50, Oct 2002.
- [12] A. Newbould and K. Chapman, “Improving UK Power Quality with Arc Suppression Coils,” *17th IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, pp.487-490, Apr 2001.
- [13] R. William and M. Waters, *Neutral Grounding in High Voltage Transmission*, pp. 121, Elsevier Publishing Company, 1956.
- [14] P.F. Costa e J.O.S. Paulino, “Utilização da Bobina de Petersen nos Sistemas Aéreos de Distribuição”, *XVII SENDI – Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica*, Mar 2006.
- [15] Trench Group, “Arc Suppression Coils (ASC)” URL:<http://www.trenchgroup.com>. Product Description. Internet Site.
- [16] E.T.B. Gross, “Sensitive Fault Protection for Transmission Lines and Distribution Feeders”, *AIEE Transactions*, Vol. 60, pp. 968-972, Nov 1941.
- [17] J.B. Royle, “Analysis and Protection of Power Systems” Course GEC Measurements, publicação não datada.
- [18] W.D. Stevenson Jr., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, McGraw-Hill Book Co., 1974.
- [19] Westinghouse Electric Corporation, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 4th Edition, 1964.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, Fev 1985.

- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5434 - Redes de Distribuição Aérea Urbana de Energia Elétrica, Nov 1982.
- [22] J. Roberts, H.J. Altuve, and D. Hou, "Review of Ground Fault Protection Methods for Grounded, Ungrounded, and Compensated Distribution Systems," Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) Technical Articles, 2001.
- [23] G. Druml, A. Kugi and B. Parr, "Control of Petersen Coils," *IEEE XI. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Aug 2001.
- [24] K. Winter, "Supervisory system for impedance-earthed power systems," United States Patent Number US4729052, Mar 1988.
- [25] R. Zivanovic, P. Schegner, O. Seifert and G. Pilz, "Identification of the Resonant-Grounded System Parameters by Evaluating Fault Measurement Records," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 1085-1090, Jul 2004.
- [26] P. Schegner, G. Pilz, and O. Seifert, "Methods for Automatic Parameter Estimation of Resonant-Earthed Systems," *International Symposium Modern Electric Power Systems*, Sept. 2002.
- [27] P. Martel, H.J. Radtke, P. Schegner and O. Seifert "Results Of Earth Fault Measurements in an Earth Fault Compensated 110 kV System," *CIREN 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, vol. 3, Jun 2001.
- [28] D. Griffel and Y. Harmano, "Nouvelles Techniques de Mise a la Terre des Neutres Sur le Réseaux à Moynee Tension," *Revue Générale de Électricité*, n.º 11, pp. 35-44, 1994.
- [29] J. Bergeal, "Method and device for measuring the compensation tuning and detuning of an electrical distribution network," United States Patent Number US5559439, Set 1996.
- [30] P. Fred, J.P. Lewis, "Practical Least-Squares for Computer Graphics," Siggraph course notes, 2007.
- [31] G. Druml and O. Seifert, "New Method for the State Evaluation of the Zero-Sequence System," *PSCC 15th Power Systems Computation Conference*, Aug 2005.

- [32] M. Janssen, S. Kraemer, R. Schmidt and K. Winter, "Residual Current Compensation (RCC) for Resonant Grounded Transmission Systems Using High Performance Voltage Source Inverter," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, vol. 2, pp. 574-578, Sept. 2003.
- [33] K. Winter, "Swedish Distribution Networks - A New Method for Earthfault Protection in Cable and Overhead Systems," *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 268-270, 1993.
- [34] K. Winter, "Swedish Distribution Networks - Aspects on Neutral Treatment, Earthfault Clearance and Related Matters," *Third International Conference on Future Trends in Distribution Switchgear*, pp. 127-129, Apr. 1990.
- [35] AIEE Committee Report, "Sensitive Ground Protection", *AIEE Transactions*, Vol. 69, 1950, pp. 473-476.
- [36] A. Cerretti, F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, G. Valtorta, "Temporary overvoltages due to ground faults in MV networks," *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Jun 2009.
- [37] A. Novitskiy, H. Schau, "Influence of the ground impedance on the earth fault current calculation in lengthy electrical networks containing harmonic sources," *Power Quality and Supply Reliability Conference*, pp. 157-162, Oct. 2008.
- [38] B. Gustavsen, J.A. Walseth, "A case of abnormal overvoltages in a Petersen grounded 132-kV system caused by broken conductor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 195-200, Jan.2003.
- [39] E. Bjerkan, T. Venseth, "Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators," *IPST'05 International Conference on Power Systems Transients*, Jun. 2005.
- [40] I.G. Kulis, A. Marusic, S. Zutobradic, "Insufficiency of Wattmetric Protection in Resonant Grounded Networks," *8<sup>th</sup> IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, vol. 2, pp. 486-489, 2004.

- [41] G. Achleitner, L. Fickert, "Earth fault distance protection," *CIGRE 20<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Jun. 2009.
- [42] J. Schlabbach, *Short-circuit Currents*, The Institution of Engineering and Technology, Power and Energy Series 51, Oct. 2005.
- [43] G. Druml, A. Kugi, "Earth connection method for recognizing and locating earth connections with low and high impedance measures frequencies different from a mains frequency," Deutsches Patent Number DE10307972A1, Sept. 2004.
- [44] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robbins, "*Power Electronics: Converters, Applications, and Design*", Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [45] B. Chen, "Development and application of the Light Triggered Emitter Turn-Off (LLET) thyristor," Dissertação de Doutorado, North Carolina State University, Raleigh-NC, Estados Unidos, May. 2008.
- [46] A. Amezua, I. Gutierrez, F. J. Pazos, G. Santamaría, J.M. García, G. Buigues, "Active Earthing System to Optimise Power Quality in MV Networks," *9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation*, Oct. 2007.