

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ATERRAMENTO DE NEUTRO EM SUBESTAÇÕES
INDUSTRIAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO
SISTEMA DE PROTEÇÃO**

GLADSTON DE AZEVEDO FARIA BERNARDI

Itajubá,
Setembro de 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GLADSTON DE AZEVEDO FARIA BERNARDI

**ATERRAMENTO DE NEUTRO EM SUBESTAÇÕES
INDUSTRIAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SISTEMA
DE PROTEÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho

Setembro de 2015
Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GLADSTON DE AZEVEDO FARIA BERNARDI

**ATERRAMENTO DE NEUTRO EM SUBESTAÇÕES
INDUSTRIAIS E SUAS IMPLICAÇÕES NO SISTEMA
DE PROTEÇÃO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 25 de Setembro de 2015, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho (Orientador)

Prof. Dr. Ronaldo Rossi

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Setembro de 2015
Itajubá – MG

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Título da Dissertação: **"Aterramento de neutro em subestações industriais e suas implicações no sistema de proteção"**

Autor: **Gladston de Azevedo Faria Bernardi**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
 - (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
 - (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 25 de setembro de 2015.

Prof. Dr. Ronaldo Rössy
1º Examinador - UNESP/GUA

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho
3º Examinador (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para sua conclusão, e a todos aqueles que puderem aproveitá-lo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI a oportunidade e orientação oferecidas aos meus estudos e, aos professores do Grupo de Qualidade de Energia Elétrica da UNIFEI, todo o conhecimento compartilhado desde o ano de 2010, durante os cursos de especialização e pós-graduação em Proteção de Sistemas Elétricos - 5ª CEPSE. Foi um ambiente de aprendizado muito bom proporcionado pela alta qualidade técnica de seus professores.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho, o incentivo para a continuidade dos meus estudos de pós-graduação e a sua orientação, ainda mais num assunto de relevância prática e teórica, e com ampla aplicabilidade na indústria.

Agradeço à minha esposa e à família o apoio sem o qual nada poderia ser feito.

Agradeço, enfim, aos meus pais o esforço que despenderam para a minha educação e formatura como engenheiro.

SUMÁRIO

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA.....	IV
DEDICATÓRIA	V
AGRADECIMENTOS.....	VI
SUMÁRIO	VII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XX
RESUMO	XXII
ABSTRACT.....	XXIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 EVOLUÇÃO E FORMAS ATUAIS DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	9
1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	12
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	13
2 SISTEMA DE NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO.....	16
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
2.2 DETECÇÃO DE FALTAS À TERRA.....	17
2.2.1 PROTEÇÃO DE FALTA RESIDUAL À TERRA.....	17
2.2.2 PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR” (GS)	19
2.2.3 PROTEÇÃO COM RELÉ DE FUGA À TERRA	20
2.3 SISTEMA SOLIDAMENTE ATERRADO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO.....	21
2.4 ATERRAMENTO DE NEUTRO E FENÔMENO DE ARCO ELÉTRICO NA PROTEÇÃO DE PAINÉIS DE MT E BT	30
2.5 SISTEMAS SOLIDAMENTE ATERRADOS E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	32
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3 SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO POR RESISTOR DE BAIXO VALOR E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO.....	37
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
3.2 DETECÇÃO DE FALTAS	39

3.2.1	PROTEÇÃO DE FALTA RESIDUAL À TERRA.....	39
3.2.2	PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA POR “GROUND-SENSOR”	40
3.3	FORMAS DE INSTALAÇÃO E EFEITOS DE SATURAÇÃO LOCALIZADA SOB CORRENTES EQUILIBRADAS NA PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR”	42
3.4	EFEITOS DE SATURAÇÃO COM CORRENTES DESEQUILIBRADAS DE FALTA FASE-TERRA E DESEMPENHO DA PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR”	48
3.5	OUTRAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA PROBLEMA DE SATURAÇÃO EM TCs 52	
3.6	IMPLICAÇÕES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO RBV NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES	53
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
4	SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO POR RESISTOR DE ALTO VALOR E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO	65
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
4.2	SISTEMAS DE NEUTRO ISOLADO.....	67
4.2.1	CONCEITO DE INSTABILIDADE DE NEUTRO E SOBRETENSÕES	67
4.2.2	CORRENTES DE CARGA CAPACITIVA E CURTO FASE-TERRA	67
4.3	SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE RESISTOR DE ALTO VALOR	68
4.4	DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE “CHARGING” PARA PROJETO DE SISTEMAS ATERRADOS POR RESISTÊNCIA DE ALTO VALOR	69
4.5	DETECÇÃO DE FALTAS À TERRA EM SISTEMAS ISOLADOS OU DE ALTA IMPEDÂNCIA 73	
4.6	LIMITES DE DETECÇÃO DE FALTA À TERRA POR CAUSA DE DISPARO SOLIDÁRIO..	81
4.7	DISPARO INTEMPESTIVO DA PROTEÇÃO DE SOBRECARGA DE PEQUENOS MOTORES DEVIDO ÀS FALTAS À TERRA.....	84
4.8	RELÉ INDICADOR DIRECIONAL DE FALTA À TERRA.....	87
4.9	AJUSTES MÍNIMOS PARA PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR”	89
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5	SISTEMA DE ATERRAMENTO DE NEUTRO DE GERADORES E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO	98
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	98
5.2	MÉTODOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO DE GERADORES	98
5.3	NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO	99
5.4	NEUTRO ATERRADO POR ALTA RESISTÊNCIA	100

5.5	NEUTRO ATERRADO POR BAIXA RESISTÊNCIA.....	101
5.6	NEUTRO ATERRADO POR REATÂNCIA (NÃO SINTONIZADA).....	102
5.7	ATERRAMENTO RESSONANTE	103
5.8	SISTEMAS DE NEUTRO DE BAIXA RESISTÊNCIA COM VÁRIAS FONTES DE GERAÇÃO 104	
5.9	SISTEMA ATERRADO EM UM ÚNICO PONTO	105
5.10	SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO HÍBRIDO	106
5.11	SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO E IMPLICAÇÕES NOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA PARA GERADORES	109
5.11.1	PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL DE FASE (87)	110
5.11.2	PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TERRA (87GN).....	111
5.11.3	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE À TERRA (51G).....	112
5.11.4	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEA À TERRA (50G)	112
5.11.5	PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO DE TERRA EM TP COM DELTA ABERTO (59G)	113
5.11.6	PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO PARA SEQUÊNCIA ZERO DE NEUTRO PARA OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR (59GN)	113
5.11.7	PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA COM COBERTURA DE 100%.....	115
5.11.7.1	ESQUEMA DE SUBTENSÃO DE NEUTRO PARA 3ª HARMÔNICA.....	116
5.11.7.2	ESQUEMA DE INJEÇÃO DE TENSÃO SUB-HARMÔNICA	120
5.11.7.3	ESQUEMA DE RAZÃO DE 3ª HARMÔNICA	121
5.12	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
6	FALHAS EM ISOLAÇÃO DE MÁQUINAS E TRANSFORMADORES E IMPLICAÇÕES NO ATERRAMENTO DE NEUTRO E NA PROTEÇÃO DE TERRA 125	
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	125
6.2	NATUREZA DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	125
6.3	NATUREZA DE FALHAS CARBONIZANTES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	128
6.4	SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO, FALHAS À TERRA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO DE TERRA	130
6.5	FALHAS EM TRANSFORMADORES, INFLUÊNCIA DO TIPO DE ATERRAMENTO DE NEUTRO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO	135
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
7	IMPLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO NAS SOBRETENSÕES	140

7.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	140
7.2	ANÁLISE DE SISTEMA ISOLADO EM REGIME NORMAL.....	140
7.3	ANÁLISE DE SISTEMA ISOLADO COM FALTA SUSTENTADA À TERRA	141
7.4	CAUSAS DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM SISTEMAS ISOLADOS	144
7.4.1	SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM SISTEMAS ISOLADOS: EFEITOS DE RESSONÂNCIA E FERRORESSONÂNCIA	144
7.4.2	SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DEVIDAS ÀS FALTAS À TERRA DO TIPO INTERMITENTE EM SISTEMAS ISOLADOS	148
7.4.3	CONTROLE DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DEVIDO ÀS FALTAS À TERRA POR CURTOS INTERMITENTES E POR RESSONÂNCIA EM SISTEMAS ISOLADOS.....	151
7.4.4	CONTROLE DE SOBRETENSÕES ATRAVÉS DE NEUTRO ATERRADO POR INDUTÂNCIA SINTONIZADA (BOBINA DE PETERSEN).....	157
7.5	SOBRECORRENTES E SOBRETENSÕES PERMANENTES DURANTE FALTAS À TERRA SÓLIDAS E EFEITO DA RAZÃO Z_0/Z_1	159
7.5.1	ASPECTOS GERAIS DOS MÉTODOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO.....	159
7.5.2	CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA.....	160
7.5.3	CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA CONSIDERANDO RESISTÊNCIAS DESPREZÍVEIS	162
7.5.4	CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA CONSIDERANDO RESISTÊNCIA CONFINADA À SEQUÊNCIA ZERO.....	164
7.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	174
8	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO	178
8.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	178
8.2	CONTROLE DE SOBRETENSÕES F-T TRANSITÓRIAS E PERMANENTES.....	178
8.3	CONTINUIDADE DE SERVIÇO.....	179
8.4	PROBABILIDADE DE UMA FALTA COM ARCO F-T SUSTENTADO.....	180
8.5	EVOLUÇÃO DE FALTA COM ARCO F-T EM PAINÉIS	180
8.6	RISCO DE ARCO ELÉTRICO F-T.....	180
8.7	RISCOS DE CORRENTES DE FALTA À TERRA DISPERSAS E ARCOS AO LONGO DO CAMINHO DE RETORNO.....	181
8.8	SEGURANÇA CONTRA CHOQUES DEVIDO ÀS CORRENTES DE FALTA À TERRA DISPERSAS.....	181
8.9	LIMITAÇÃO DE DANOS DEVIDO ÀS CORRENTES DE FALTA À TERRA.....	182

8.10	FACILIDADE DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA À TERRA.....	184
8.11	ATENDIMENTO ÀS CARGAS MONOFÁSICAS ENTRE FASE E NEUTRO.....	184
8.12	RESUMO COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO	186
8.13	CONSIDERAÇÕES FINAIS	187
9	CONCLUSÕES.....	194
9.1	SISTEMAS DE NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO.....	194
9.2	SISTEMAS DE NEUTRO ATERRADO POR BAIXA RESISTÊNCIA - RBV	196
9.3	SISTEMAS DE NEUTRO ATERRADO POR ALTA RESISTÊNCIA - RAV.....	198
9.4	SISTEMAS DE NEUTRO ISOLADO.....	201
9.5	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	203
9.6	PUBLICAÇÕES	205
	REFERÊNCIAS.....	207
	ANEXO – LISTA E SIGNIFICADO DE TERMOS TÉCNICOS.....	214

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Princípio de detecção de falta à terra em sistemas isolados	1
Figura 1.2 - Os métodos de aterramento de neutro e os seus respectivos componentes de sequência zero do circuito de neutro (Beeman, 1955)	7
Figura 1.3 – Cada nível de tensão é aterrado independentemente (Beeman, 1955) ..	8
Figura 1.4 - Aterrar na fonte e, não, nas cargas (Beeman, 1955)	9
Figura 2.1 - Três TCs e o circuito residual	18
Figura 2.2 – Esquema típico de proteção principal de terra de motor de BT num sistema solidamente aterrado utilizando-se a proteção 64	20
Figura 2.3 - Sistema de distribuição de BT com lado do transformador em Y (Smith, 1982)	22
Figura 2.4 - Proteção “ <i>ground-return</i> ” para sistemas solidamente aterrados (Dunki- Jacobs, et al., 2007)	23
Figura 2.5 - Comparação entre as correntes de linha e de enrolamento de transformadores em Δ -Y sob condições de faltas trifásicas, fase-fase e fase- neutro, onde $I_{CC\ 3F} = 1,0\text{PU}$, $I_F = I_{FLA\ 3F}/Z_{PU}$ (Hermeto, et al., 2010)	24
Figura 2.6 – Proteção de fase típica para transformador em sistema solidamente aterrado ilustrando a curva <i>ANSI</i> deslocada (Hermeto, et al., 2010)	26
Figura 2.7 – Proteção de falta à terra na BT conforme <i>NEC</i> , seção 230-95 (Mardegan, 2012)	27
Figura 2.8 - Proteção de terra típica do ponto <i>NEC</i> em sistemas solidamente aterrados (Hermeto, et al., 2010)	27
Figura 2.9 - Verificação gráfica da seletividade das proteções, em sistema solidamente aterrado, com a curva térmica do transformador (T58) deslocada de 58% (curva <i>ANSI</i> deslocada) (Smith, 1982)	29
Figura 2.10 – Formas de proteção por relés e disjuntor para motor de BT recomendadas pelo “ <i>IEEE Guide for AC Motor Protection</i> ”	33
Figura 3.1 – Problema de seletividade do relé 51N na conexão residual com TCs de fase de alta relação, com o 51G no neutro do transformador (Dunki-Jacobs, et al., 2007), (Yu, 1991)	40
Figura 3.2 – Operação do relé “ <i>ground-sensor</i> ” (<i>GSR</i>). À esquerda: relé é insensível para correntes de cargas trifásicas balanceadas; À direita: relé é insensível às cargas monofásicas, se o condutor de neutro estiver inserido dentro do TC	41

Figura 3.3 - Proteção pelo relé “ <i>Ground-Sensor</i> ” (<i>GSR</i>). Para a condição de falta à terra, o relé é sensibilizado somente para as componentes de corrente de falta à terra	42
Figura 3.4 - Detalhe de instalação do toroide do “ <i>ground-sensor</i> ” no circuito com cabos não blindados usando-se uma blindagem anti-estresse magnética; e fita trançada aterrada de latão ou cobre (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	43
Figura 3.5 - Detalhes de instalação do TC do “ <i>ground-sensor</i> ” em cabos blindados normalmente utilizados para MT (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	44
Figura 3.6 – Curto-Circuito F-T e posicionamento do TC toroidal em relação ao aterramento da blindagem do cabo nas formas: (a) incorreta; e (b) correta (Alstom Guide)	44
Figura 3.7 - Efeito de correntes trifásicas balanceadas no TC toroidal (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	45
Figura 3.8 - Detalhes de instalação ilustrando o arranjo dos cabos internos através do toroide para circuitos com 2 cabos por fase no corte à esquerda; e distâncias recomendadas do circuito em função da dimensão do toroide, à direita (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998)	46
Figura 3.9 - Detalhe referente à manga de blindagem magnética colocada em volta dos cabos (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998)	46
Figura 3.10 - Propriedades de permeabilidade magnética da armação ou blindagem metálica do cabo, ou do eletroduto metálico tendem a reduzir a saturação localizada no toroide (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	47
Figura 3.11 - Técnica de enrolamento regressivo (Novak, et al., 1988)	47
Figura 3.12 – Aplicação da proteção “ <i>Ground Return</i> ” em sistema RBV de 400 A, TC 200-5 A, com atuação do relé 51TN diretamente no disjuntor secundário abrindo o disjuntor primário com temporização (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	50
Figura 3.13 – Ilustração de características operacionais de TC de “ <i>ground-sensor</i> ” típico: corrente senoidal 60Hz primária I_G de falta à terra; e a correspondente corrente secundária I_R de falta à terra, vista pelo relé (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	51
Figura 3.14 - Características BxH ou V-I de TCs com núcleos de ferro sem “ <i>gap</i> ”, com “ <i>gaps</i> ”, com acopladores lineares, e com a bobina de <i>Rogowski</i> (IEEE PSRC Committe, 2001 e 1996).....	52

Figura 3.15 – Corrente de falta à terra em enrolamento conectado em Y e neutro aterrado por resistência (Alstom Guide).....	54
Figura 3.16 – Percentual de enrolamento de transformador protegido, em função da corrente primária, para proteção diferencial de fase (87T) e para proteção de falta à terra restrita (87G) (Alstom Guide)	55
Figura 3.17 - Exemplo de falta à terra no lado secundário num sistema RBV de 400 A (Mozina, 2011).....	56
Figura 3.18 – Proteção de falta à terra restrita (87G) para um enrolamento em Y....	56
Figura 3.19 – Princípio da proteção diferencial de falta à terra restrita (87G ou 87REF): (a) falta interna; (b) falta externa (Cooper, Scott).....	57
Figura 3.20 - Relé de proteção diferencial de falta à terra (87G) combinado com a proteção diferencial de fase (87T) para transformador (Mozina, 2011)	58
Figura 4.1 – Circuito equivalente de um sistema aterrado por alta resistência (Baker, 1979).....	71
Figura 4.2 - Detecção de falta à terra por tensão no delta aberto. Para operação trifásica balanceada, em sistemas trifásicos a 3 fios, $V_{\Delta 1}$ é igual a zero	75
Figura 4.3 - Detecção de falta à terra por tensão no delta aberto. Para a condição de falta à terra em sistemas trifásicos a 3 fios, $V_{\Delta 3}$ não é igual a zero.....	75
Figura 4.4 - Três TPs na conexão em delta aberto	76
Figura 4.5 - Princípio para localização de faltas à terra em sistemas de alta resistência por método de sinal pulsante	78
Figura 4.6 - Tipos de faltas à terra: (a) sem falta; (b) falta de alta resistência; (c) falta solidamente aterrada; (d) falta à terra invertida (Baldwin, 2001).....	79
Figura 4.7 - Arquitetura centralizada do sistema de localização de falta à terra para uma rede simples definida pelo lado do secundário do transformador (Baldwin, 2001).....	80
Figura 4.8 – Sistema aterrado por alta resistência: sistema sem faltas, e sistema com uma falta à terra (Savostianik, 2000), (Paulson, et al., 2003).....	82
Figura 4.9 – Sistema aterrado por alta resistência com o alimentador 2 sob falta à terra e a circulação de correntes de sequência zero em cada alimentador (Paulson, et al., 2003),	83
Figura 4.10 - Sistema com múltiplos alimentadores e com uma falta à terra num dos alimentadores e circulação das correntes de “charging” (Savostianik, 2000)	84
Figura 4.11 – Curvas de proteção e seletividade para um motor de 1HP (Locker, et al., 2009)	85

Figura 4.12 - Efeito da corrente sobre os seres humanos, em função da sua intensidade e do tempo de passagem da corrente CA (15 a 100HZ), conforme a IEC 60479-1	90
Figura 4.13 – Correntes de fuga superficiais (“ <i>tracking currents</i> ”) iguais e acima de 300mA podem iniciar um incêndio (Merlin Gerin)	92
Figura 5.1 - Métodos de aterramento do neutro em geradores (Khan, 2008)	99
Figura 5.2 - Esquema de sistema aterrado por baixa resistência (Panetta, et al., 2009).....	104
Figura 5.3 - Sistema multi-aterrado (Panetta, et al., 2009).....	104
Figura 5.4 - Variação esquemática de um sistema aterrado em um único ponto (Panetta, et al., 2009).....	105
Figura 5.5 - Esquema de neutro comum ou sistema de ponto único de aterramento (Panetta, et al., 2009).....	105
Figura 5.6 - Sistema aterrado em ponto único, através do transformador “ <i>zig-zag</i> ” (Panetta, et al., 2009).....	106
Figura 5.7 - Sistema de Distribuição Industrial de MT com Múltiplas Fontes	107
Figura 5.8 - Exemplo de aterramento de gerador e do neutro do transformador	107
Figura 5.9- Esquema de um sistema de aterramento híbrido (Panetta, et al., 2009)	108
Figura 5.10 – Variação do sistema de aterramento híbrido (Panetta, et al., 2009) .	108
Figura 5.11 – Percentual de enrolamento do estator não protegido pelo relé diferencial para uma falta F-T (C37.102, IEEE Standards Board, 1995).....	110
Figura 5.12 - Proteção diferencial percentual de fase para gerador (Pillai, et al., 2003).....	110
Figura 5.13 - Proteção diferencial de terra para gerador (Pillai, et al., 2003)	111
Figura 5.14 - Proteção de sobrecorrente temporizada de terra para gerador (Pillai, et al., 2003)	112
Figura 5.15 - Proteção instantânea de sobrecorrente de terra (diferencial auto-balanceada de corrente de terra) (Pillai, et al., 2003)	113
Figura 5.16 - Proteção de sobrecorrente de terra por TP em Y- Δ aberto (Pillai, et al., 2003).....	113
Figura 5.17 - Proteção de tensão de sequência zero para geradores unitários, aterrados por alta resistência (Pillai, et al., 2003)	114

Figura 5.18 - Proteção convencional de estator contra falta à terra e perfil de tensão disponível em função da posição da falta ao longo do enrolamento (Turner, 2011), (Mozina, 2009)	115
5.19 - Representação gráfica de geração típica de tensão de 3ª harmônica ao longo do enrolamento do estator, em função de pleno carregamento do gerador, e sem carga, para: (a) operação normal; (b) falta à terra no neutro do gerador; (c) falta à terra nos terminais do gerador	118
Figura 5.20 - Gerador aterrado por alta resistência, e o esquema de proteção de falta à terra por sub-tensão de 3ª harmônica no neutro, para 100% de proteção do enrolamento do estator (Mozina, 2009).....	119
Figura 5.21 - Sobreposição do 59G e do 27TN (Subtensão de Terceira Harmônica) para proporcionar a cobertura da proteção de falta à terra para 100% do estator (Mozina, 2009)	119
Figura 5.22 - Gerador aterrado por alta resistência, e esquema de proteção de falta à terra baseado na tensão residual de 3ª harmônica ou esquema de injeção de tensão sub-harmônica, para 100% de proteção do enrolamento do estator	121
Figura 5.23- O esquema de razão de 3ª harmônica (Mozina, 2009).....	121
Figura 6.1- Esquema de enrolamento da fase A mostrando as espiras, do terminal A ao neutro, o efeito da capacitância distribuída das espiras sobre a atenuação de inclinação na frente de onda de surto atmosférico (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	126
Figura 6.2 - (A) Vista de seção transversal de um elemento de espira de enrolamento de 4kV, consistindo de 4 voltas trançadas; (B) Seção transversal de ranhura de enrolamento com dois enrolamentos de 4 voltas da figura (A), onde a falha de isolamento causa um curto entre espiras, resultando numa falta espira-espira no enrolamento da máquina (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	126
Figura 6.3 – Tensão aproximada e corrente de falta à terra em função da localização da falta ao longo do enrolamento do motor, para as conexões Y e Δ (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	130
Figura 6.4 – Proteção de falta de terra, de dois níveis	133
Figura 6.5 – Proteção diferencial autobalanceada em motores de MT ou geradores usando relés 50GS, equivalentes à função 87GS.....	134
Figura 7.1- Representação de um sistema isolado e as correntes de carga capacitivas em situação normal (Paul, et al., 1991)	141

Figura 7.2 – Sistema isolado com falta à terra na fase A, a configuração das correntes e o deslocamento de neutro através da tensão V_{NG} (Paul, et al., 1991).....	142
Figura 7.3 - Procedimento para medição da corrente de carga capacitiva do sistema ($3I_{CO}$) (I-Gard).....	142
Figura 7.4 - Equivalente de Thevenin e equações que expressam E_{ag} no sistema isolado devido a uma falta à terra através de uma impedância Z_F do tipo: (A) falta resistiva; (B) falta indutiva; (C) falta capacitiva (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	145
Figura 7.5 - Tensões E_{ag} de F-T e E_{ng} de neutro-terra, provocadas por faltas à terra de vários tipos de impedâncias, em sistemas isolados. A impedância Z_F é expressa por unidade de $X_{CO}/3$ (Dunki-Jacobs, et al., 2007).....	146
Figura 7.6 - Exemplos de acoplamentos não-intencionais altamente indutivos entre a linha e o terra que podem causar sobretensões em sistemas isolados devido ao fenômeno de ressonância ou ferroressonância (Beeman, 1955).....	147
Figura 7.7 – Exemplo de acoplamento não-intencional altamente indutivo entre linha e terra podendo causar sobretensões em sistemas isolados devido ao fenômeno de ressonância ou ferroressonância (Dunki-Jacobs, et al., 2007)...	147
Figura 7.8 - Sobretensões transientes devidas à uma falta à terra intermitente (Paul, et al., 1991)	149
Figura 7.9 - Circuito de sequência zero mostrando a descarga da capacitância do sistema.....	151
Figura 7.10 - Efeito do resistor no ponto de neutro para limitar as sobretensões transientes devidas aos curtos fase-terra intermitentes (Paul, et al., 1991).....	152
Figura 7.11 - Análise do efeito de falta à terra de indutância variável X_L num sistema descarregado e aterrado por resistência R_N (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	153
Figura 7.12 - Máxima sobretensão transitória fase-neutro em PU como função de $(X_{CO}/3)/R_N$ para faltas à terra intermitentes simuladas por centelhamentos através dos contatos do disjuntor (Dunki-Jacobs, et al., 2007); <i>IEEE Std C62.92.2, 2005</i> (IEEE, 2005)	156
Figura 7.13 - Alternativas de aterramento do neutro através de reatâncias:.....	158
7.14 – Circuito equivalente no ponto de falta	162
Figura 7.15 – Deslocamento do neutro e sobretensões permanentes nas fases sãs (Hermeto, et al., 2010)	163

Figura 7.16 – Lugar geométrico descrito pelo neutro ao longo da semi-circunferência, de $R_N=0$ a $R_N \rightarrow \infty$ (Hermeto, et al., 2010)	165
Figura 7.17 - Tensões durante uma falta à terra em um sistema com neutro isolado	166
Figura 8.1 – Ilustração mostrando porque os sistemas trifásicos a 4 fios (480 Y/277 V) não podem ser aterrados por resistência	185
Figura 8.2 – Sistema principal de neutro aterrado por alta resistência com cargas de iluminação trifásicas a 4 condutores (sistema solidamente aterrado), separadas por um transformador isolador (Nelson, et al., 1999)	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critério <i>NEC</i> para ajuste da proteção de transformadores	23
Tabela 2.2 - Corrente de falta de arco elétrico em percentagem do valor da falta trifásica sólida (Dunki-Jacobs, et al., 2007)	31
Tabela 4.1 – Correntes de “ <i>charging</i> ” devidas à falta fase-terra para motores e geradores (Baker, 1979)	72
Tabela 4.2 – Correntes de “ <i>charging</i> ” devidas às faltas fase-terra para capacitores de surto (Baker, 1979)	72
Tabela 4.3 – Disparo da proteção de sobrecarga de pequenos motores de 440V devido aos curtos à terra em sistemas de neutro de alta resistência.....	86
Tabela 6.1 – Reprodução da tabela 4 do <i>IEEE Guide for AC Motor Protection</i> , referente à proteção de motores de BT com relés	134
Tabela 6.2 – Faltas em transformadores e a filosofia de proteção geralmente adotada (General Electric, 2007)	137
Tabela 7.1- Estimativa da corrente capacitiva do sistema em função da potência instalada (I-Gard)	144
Tabela 7.2 – Valores de sobretensões permanentes em função de K real	163
Tabela 7.3 – Investigação de sobretensões permanentes nas fases sãs devido a um curto fase-terra sólido considerando-se $K = Z_0/Z_1$ complexo.	168
Tabela 7.4 - Resumo das Sobretensões Permanentes Máximas Devido aos Curtos Fase-Terra Sólidos.....	172
Tabela 7.5 – Características de Aterramento (IEEE, 2005)	174
Tabela 7.6 - Resumo das Sobretensões Máximas Devidas às Faltas à Terra Sólidas, Intermitentes e por Ressonância, sob os diversos Métodos de Aterramento de Neutro	175
Tabela 8.1 – Energia dissipada em função do tipo de aterramento de neutro	183
Tabela 8.2 - Comparação qualitativa dos métodos de aterramento de neutro	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	“ <i>Alternate Current</i> ” (ou Corrente Alternada, CA)
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AT	Alta Tensão
AVR	“ <i>Automatic Voltage Regulator</i> ”, ou dispositivo de regulação automática de tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CT	“ <i>Current Transformer</i> ”, ou Transformador de Corrente (TC)
CTR	“ <i>Current Transformer Ratio (CTR)</i> ”, ou relação do TC (RTC)
DC	“ <i>Direct Current</i> ” (Corrente Contínua, CC)
EMC	“ <i>Electromagnetic Compatibility</i> ”, ou CEM – Compatibilidade Eletromagnética
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FLA	“ <i>Full Load Ampere</i> ” ou Corrente de Plena Carga (de motor, transformador, etc) em Amperes.
FT	Curto-circuito (I_{F-T}) ou tensão (V_{F-T} ou V_{LN}) fase-terra ou monofásica
FF	Curto-circuito (I_{FF}) ou tensão (V_{FF} ou V_{LL}) fase-fase
FFT	Curto-circuito do tipo fase-fase-terra (I_{FFT})
FFF	Curto-circuito do tipo trifásico (I_{3F})
FFFT	Curto-circuito do tipo trifásico-terra (I_{3F-T})
FP	Fator de Potência
GS ou GSR	“ <i>Ground-Sensor</i> ” ou “ <i>Ground-Sensor Relay</i> ”
HP	“ <i>Horse-Power</i> ”, unidade de potência de motor (ou CV - cavalos)
HRG (ou HR ou HGR)	“ <i>High Resistance Grounding</i> ”, ou sistema de neutro aterrado por alta resistência – ou sistema RAV – Resistor (de Neutro) de Alto Valor
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LRG (ou LR)	“ <i>Low Resistance Grounding</i> ”, ou sistema de neutro aterrado por baixa resistência, ou sistema (de neutro) RBV – Resistência de (Neutro) de Baixo Valor
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
NEC	<i>National Electrical Code</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NFPA 70E	<i>Standard for Electrical Safety in the Workplace</i>
OLTC	“ <i>On-Load TAP Changer</i> ”, ou comutador automático sob carga
PU	Por Unidade, ou unidade de referência, estabelecida por

conveniência de cálculo, para expressar todos os parâmetros de um sistema elétrico de potência numa base de referência comum

RAV	Resistor de Alto Valor (equivalente ao “ <i>HRG</i> ” em inglês)
RBV	Resistor de Baixo Valor (equivalente “ <i>LRG</i> ” em inglês)
RTD	“ <i>Resistance Temperature Detector</i> ”, ou detector de temperatura baseado em resistor sensível à variação de temperatura
RMS	“ <i>Root Mean Square</i> ”, ou valor eficaz
TAP	É o ponto de conexão ao longo do(s) enrolamento(s) do transformador que permite(m) a seleção de um certo número de espiras, isto é, permite que um transformador tenha uma razão variável de transformação.
TC	Transformador de corrente
TNA	“ <i>Transient Network Analyser</i> ”, ou analisador de transitórios em redes elétricas
TP	Transformador de Potencial
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
VFD	“ <i>Variable Frequency Device</i> ”, ou inversor de frequência

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de apresentar os tipos de aterramento de neutro em sistemas trifásicos industriais, sua história e evolução, as características e desempenho de cada tipo de aterramento de neutro, os critérios de seleção em função das necessidades específicas do usuário e do tipo de proteção mais adequada para o sistema elétrico e para os equipamentos. Os tipos de detecção de falta à terra, o tipo de proteção e as faixas de ajuste são analisados diante de cada forma de aterramento de neutro. Os métodos de aterramento de neutro são comparados entre si em função de vários quesitos analisados, tais como, o controle de sobretensões causadas pelas faltas à terra e a limitação de altas correntes de curto fase-terra, o custo do nível de isolamento de cabos e equipamentos elétricos, a continuidade de serviço, o risco de arco elétrico, a segurança contra choque elétrico, a limitação de danos aos equipamentos, o risco de incêndio, a segurança de pessoal, a facilidade de localização da falta à terra, a eficiência para a proteção de máquinas elétricas girantes, transformadores e painéis, e as exigências da legislação. Analisa-se o comportamento das sobretensões transitórias e permanentes devidas às correntes de falta à terra no sistema elétrico, em função de cada tipo de aterramento de neutro. As correntes de “*charging*” são apresentadas. O fenômeno de arco elétrico e sua rápida evolução de arco fase-terra (F-T) para arcos F-F-T ou F-F-F-T, em painéis de BT e MT, são analisados sob o ponto de vista de método de aterramento de neutro e de eficiência das proteções. As proteções de terra do tipo residual à terra, “*ground-sensor*”, “*ground-return*”, diferencial de fase e de terra, etc, são analisadas diante de seus desempenhos para a proteção de máquinas elétricas girantes e transformadores, em função dos sistemas de aterramento de neutro.

Palavras Chaves:

Aterramento de Neutro; Proteção de Falta à Terra; Sistemas de Neutro Solidamente Aterrado; Sistemas de Neutro de Baixa Resistência (RBV); Sistemas de Neutro de Alta Resistência (RAV); Sistemas de Neutro Isolado; Sobretensões Transitórias e Permanentes

ABSTRACT

The objective of this undertaking is to present the various types of neutral grounding methods used in industrial power systems, their historical development and characteristics, comparative performance aiming at the best choice of a neutral grounding system which suitably meets the requirement of each application and the particular need of the user, and the consequences of that selection on the protection system among the most efficient and suitable protection of the electrical power system and equipment. The methods of ground-fault detection, the protective devices and their range of adjustment are analysed in regard to each type of neutral grounding system. The methods of neutral grounding are compared among themselves with respect to the many technical requirements, such as, the limiting of overvoltages caused by ground faults and the limiting of high phase-to-ground short-circuit currents, the cost of the insulation level suitable for cables and for the electrical power equipment, the continuity of service, the arc-flash hazard, the safety against electrical shock, the damage restriction of equipment, the fire hazard, the safety of personnel, the readiness to locate the ground fault, the efficiency of the ground protection for electrical machines, transformers and panels, and the requirements of the legislation. The behaviour of the steady-state and intermittent overvoltages due to the ground faults are analysed with respect to each type of neutral grounding scenario. The charging currents are presented. The arc-flash hazard, its fast evolution, from a phase-ground arc to a phase-phase-ground or to a 3-phase-ground arcs, in LV and MV panelboards, are analysed from the viewpoint of the neutral grounding methods and the efficiency of protections. The phase-to-ground protections, such as, the residually-connected ground fault protection, the ground-sensor, the ground-return protection, the differential and restricted earth-fault protection, etc, are analysed and their performance evaluated for the protection of the electrical machines and transformers with respect to the neutral grounding system.

Keywords:

Neutral Grounding Systems; Ground Fault Protection; Solidly Grounded Neutral Systems; High-Resistance Neutral Grounding Systems (HRG); Low-Resistance Neutral Grounding Systems (LRG); Ungrounded Neutral Systems; Transient and Steady-State Overvoltages;

1. INTRODUÇÃO

1.1 EVOLUÇÃO E FORMAS ATUAIS DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO

A entrada em operação dos sistemas trifásicos ocorreu pouco antes da virada do século vinte. Historicamente, havia uma tendência natural para sistemas não aterrados (Owen, 1997). Há indícios para se acreditar que os primeiros sistemas trifásicos foram operados em delta não aterrado pela razão prática de que somente três condutores são necessários para alimentar cargas trifásicas. A escolha foi baseada em dois fatores. Primeiro, fez-se uso mais eficiente do condutor de cobre. Segundo, nenhuma corrente de falta flui quando ocorre a primeira falta à terra, o que é ainda considerado uma vantagem em algumas aplicações, embora seja introduzido um risco ao choque elétrico. O sistema de detecção de falha de isolamento, em sistemas isolados usados antigamente, era feito através de lâmpadas incandescentes conectadas em estrela e aterradas no neutro, usadas como detector de faltas à terra. As lâmpadas, cada qual brilhando igualmente e sob condições normais, sinalizavam uma falta à terra sólida quando uma das lâmpadas ficava escura conforme mostrado na figura 1.1.

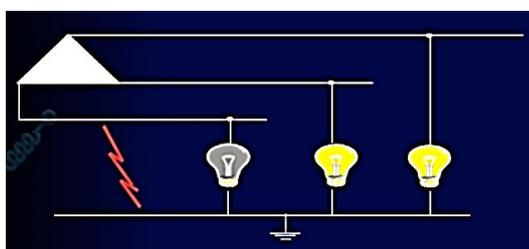


Figura 1.1 - Princípio de detecção de falta à terra em sistemas isolados

Posteriormente, por volta de 1940, observou-se um padrão de múltiplas falhas em motores elétricos, em numerosas plantas industriais de neutro isolado, causadas por sobretensões devidas às faltas à terra do tipo intermitente (*“intermittent ground faults”*). As isolações de enrolamentos de motores eram particularmente vulneráveis e as sobretensões aumentavam ao ponto de provocar dano ao núcleo do motor, além de serem um risco aos operários. Para resolver este problema de sobretensão devido às faltas intermitentes, muitos daqueles sistemas, que tinham o neutro isolado, passaram a tê-lo aterrado e, em geral, solidamente aterrado. Portanto, a solução simples e eficaz que os pesquisadores recomendaram para os problemas de sobretensões devidos, principalmente, aos curto-circuitos intermitentes, era a de aterrar o neutro do sistema elétrico.

Inicialmente, nos sistemas não aterrados do tipo delta, o principal recurso utilizado era aterrar um vértice do delta. Posteriormente, quando da elaboração dos novos projetos, a simples especificação de transformadores delta-estrela, ao invés de delta-delta, gradualmente resultou em sistemas em estrela com o neutro aterrado. Para fins de proteção de faltas à terra, as especificações de transformadores também requeriam que o neutro do lado estrela fosse acessível através de uma bucha de isolamento.

Entretanto, os primeiros usuários de sistemas de neutro solidamente aterrado eram contrários a aceitar a interrupção de serviço na eventualidade de uma primeira falta à terra. Os sistemas de neutro solidamente aterrado também requerem eficiência no projeto e na operação de sistemas de potência, pois são produzidas altas magnitudes de corrente de falta à terra, aproximadamente da mesma magnitude dos valores de curto trifásico.

A experiência acumulada logo mostrou outras desvantagens associadas aos sistemas de neutro solidamente aterrado, tais como, correntes de fuga fase-terra que são responsáveis pelos potenciais de passo e de toque, ou riscos de arco devidos às junções ou conexões imperfeitas no caminho de retorno das correntes fase-terra em eletrodutos e bandejamentos.

No início dos anos 60 foram feitos testes para se determinar técnicas e analisar o comportamento dos circuitos de retorno de terra. Medições resultaram na identificação de razões adequadas Z_0/Z_1 para os circuitos de retorno de terra, de forma a assegurar um desempenho adequado. Também no início da década de 60, o fio terra se tornou num componente essencial dos cabos armados, enquanto que o condutor nu de retorno de terra (quarto condutor) se tornou num padrão em eletrodutos e instalações de cabos aéreos.

Os danos causados por faltas à terra em enrolamentos de motores eram particularmente preocupantes nos sistemas BT de neutro solidamente aterrado, o que levou ao desenvolvimento de sistemas de neutro aterrados por alta resistência, pois tais faltas geralmente envolvem a queima do núcleo de ferro, requerendo o seu custoso re-empilhamento. Os operadores da indústria resolveram o problema mantendo, somente na BT, as vantagens do sistema de neutro solidamente aterrado (que requer uma proteção mais simples), enquanto que aceitavam a probabilidade de perda

destrutiva de motores de BT na eventualidade de faltas à terra internas a estes equipamentos.

Na década de 60, também, deu-se a devida atenção ao grande número de queimas devastadoras em CCMs e painéis nos sistemas solidamente aterrados no lado em estrela (Y) de 480V. Geralmente, os equipamentos afetados eram protegidos apropriadamente diante das correntes de curto-circuito máximas. Pesquisas e testes determinaram que as queimas foram causadas por arcos elétricos de falta à terra. Aqui o termo “falta à terra por arco” (“*arcing fault-to-ground*”) se distingue da “falta sólida ou sustentada à terra” (“*bolted ground fault*”). Uma das maiores revoluções na área de segurança no setor elétrico ocorreu a partir de 1982, com a publicação do artigo de Ralph Lee, “*The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Blast Burns*” (Lee, 1982). Até então, devido ao pouco conhecimento sobre o arco elétrico (“*arc-flash*”, “*arc*” ou “*arcing*”), julgava-se que o choque elétrico era a causa fundamental dos acidentes envolvendo a eletricidade. Além disso, sabe-se, hoje, que as queimaduras resultantes do arco elétrico (fundamentalmente em quadros de manobra de MT e BT) representam 80% das causas de ferimentos, lesões e mortes associados à eletricidade. O comportamento explosivo das faltas à terra com arco foi caracterizado por correntes de curto-circuito muito reduzidas, em comparação com os valores de curto-circuito das faltas francas à terra, mas que dissipavam uma enorme quantidade de calor. Arcos elétricos também apresentam, em geral, correntes elétricas relativamente baixas e que podem não sensibilizar os relés de sobrecorrente de fase. O arco elétrico possui propriedades particulares, tais como, o estado de plasma cuja temperatura atinge 20.000°C, provocando a fusão e a evaporação de materiais condutores e isolantes, que produz a sobrepressão a partir do ponto de formação do arco, através da rápida expansão de gases. A alta pressão interna pode romper portas, janelas e a estrutura dos quadros e painéis, ejetando partes e fragmentos, havendo ainda a mobilidade do arco dentro de painéis, onde a interação entre a corrente do arco e o campo magnético resultante das correntes nos barramentos empurra o arco na direção da fonte para a carga. Se os barramentos forem nus e não existirem barreiras, o arco se propaga e atinge outros compartimentos. Assim, o conhecimento dessas propriedades gera uma série de medidas na concepção e na especificação de quadros e painéis, inclusive, e caso não seja possível, até o uso de roupas adequadas anti-chama conforme o item 10.2.9.2 da NR-10 (Ministério do Trabalho, NR-10) e cuja regulamentação está na

NFPA-70E (*NFPA-70*, 2004). As medidas de segurança para o controle do arco elétrico provocaram um desenvolvimento concomitante no projeto de painéis que se mostram mais eficazes do que as medidas de proteção de terra existentes.

Sistemas com o neutro solidamente aterrado também têm as suas limitações na média tensão (tipicamente de 1 a 36kV) que, mesmo com relés de falta à terra, o dano no ponto de falta poderia ser excessivo. Para evitar ou minimizar estes danos, o aterramento de neutro com baixa resistência (RBV) foi largamente utilizado na indústria, mantendo-se ainda a corrente de falta à terra em níveis suficientes para sensibilizar o sistema de relés de proteção de forma eficiente. Os sistemas de neutro solidamente aterrado também têm outra limitação, que é a de não permitir a convivência com o curto fase-terra impedindo que usuários de processos contínuos possam manter a continuidade do serviço ou, pelo menos, proceder a um desligamento de seu sistema, de forma ordenada e programada, tal como é requerido nas indústrias de geração de energia, refinarias de petróleo, indústrias químicas e metalúrgicas.

Em resumo, conforme já mencionado, os sistemas de neutro solidamente aterrado têm as suas desvantagens, pois expõem equipamentos e seres humanos às altas energias incidentes, e também a um maior risco potencial devido ao arco elétrico.

Pesquisas e operações em sistemas experimentais almejavam, então, a limitação da corrente de falta à terra a um nível próximo daquele que ocorria em sistemas não aterrados, nível este que, uma década antes, era responsável pelas sobretensões transientes identificadas nos sistemas não aterrados. Os pesquisadores determinaram que essas sobretensões poderiam ser controladas inserindo-se no sistema um resistor de neutro de alta resistência que, sob condições de falta à terra, permitiria que uma corrente I_R fluísse no resistor, com valor mínimo, igual à corrente total de carga capacitiva do sistema, previamente identificada como $3I_{C0}$. Esta nova tecnologia, ficou conhecida como aterramento de neutro através de alta resistência.

Atualmente, o aterramento de alta resistência em BT está em uso nas plantas onde a continuidade do processo é mandatória. Para empregar este modo de aterramento de forma bem sucedida, deve haver um compromisso, em nível gerencial, para localizar e remover a primeira falta à terra o mais breve possível a fim de evitar a sua potencial escalada para uma falta fase-fase, especialmente para as faltas que ocorrem nos enrolamentos dos motores e geradores. A probabilidade desta escalada é em grande

parte influenciada pela energia $I^2.t$ dissipada no ponto de falta. Então, o fator determinante é o valor da corrente de regime permanente total de falta à terra, $I_F = \sqrt{I_R^2 + (3I_{C0})^2}$, onde I_R é a corrente nominal do resistor de aterramento de neutro e $(3I_{C0})$ é a corrente capacitiva do sistema. Em sistemas de 480V, o aterramento de alta resistência tornou-se amplamente aceito porque o valor $3I_{C0}$, a corrente capacitiva de um sistema típico de 1.000kVA, é menos do que 1 A. Se o resistor de neutro, então, for selecionado para fazer com que a corrente I_R exceda um pouco a corrente $3I_{C0}$, a corrente de falta à terra I_F não será maior do que uns 3 A. A experiência mostrou que esta falta à terra, constituída por uma pequena corrente, tem pouca probabilidade de evoluir para defeitos fase-fase, até que se localize a falta à terra e se isole o circuito.

Para resolver os problemas de paradas em processos contínuos e de energia incidente devido ao risco de arco elétrico e, ainda, evitar as sobretensões transitórias devidas aos curtos fase-terra intermitentes, os sistemas com o neutro aterrado por alta resistência foram desenvolvidos.

O sistema de neutro de alta resistência representa, nos sistemas de BT, uma tendência de retorno parcial aos sistemas de neutro isolado, e contrários àquela tendência ocorrida após a década de 40, que era a de usar o neutro solidamente aterrado. Com a compreensão dos fenômenos e com o avanço da tecnologia sabe-se que, agora, a alta resistência deveria permitir a circulação da corrente capacitiva do sistema. O aterramento de neutro através de alta resistência controla as sobretensões transientes durante as faltas à terra, minimiza os danos de arco elétrico e energia incidente no ponto de falta, e permite a operação contínua do sistema com uma falta à terra. Não há risco de arco elétrico para faltas à terra em sistemas de 480V com o neutro aterrado por alta resistência, como há para os sistemas solidamente aterrados, pois as correntes de falta fase-terra estão geralmente limitadas a apenas 5 A.

Os sistemas de aterramento de neutro com alta resistência são ainda complementados pelos recentes avanços tecnológicos, através do desenvolvimento de detectores de falta à terra, que indicam o local da falta e, assim, fornecem uma efetiva supervisão do nível de isolamento da instalação. Esta supervisão da isolamento é importante, pois possibilitou o próprio emprego dos sistemas a neutro aterrado por alta resistência, contribuindo decisivamente para o seu sucesso. Isto permite às plantas de processos

contínuos identificar e localizar a falta, organizando-se a equipe de manutenção para o reparo em horário programado.

Sabendo-se que correntes acima de 8- 10 A causam danos às máquinas rotativas e outros equipamentos, não se recomenda utilizar o aterramento de neutro de alta resistência (RAV) para sistemas de média tensão acima de 4,16kV, mais especificamente, em 13,8kV, por exemplo, devido ao fato de que há maiores correntes capacitivas, da ordem de 20 A ou mais, que são inerentes aos sistemas industriais desta classe de tensão.

Há, hoje, os seguintes métodos de aterramento de neutro utilizados em sistemas elétricos de potência genéricos, e que estão ilustrados na figura 1.2.

- a. Neutro isolado;
- b. Neutro solidamente aterrado;
- c. Neutro aterrado por meio de resistência de alto valor (RAV);
- d. Neutro aterrado por meio de resistência de baixo valor (RBV);
- e. Neutro aterrado por meio de reatância (não sintonizada);
- f. Neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (bobina de Petersen), ou neutralizadores de terra;
- g. Sistemas híbridos de aterramento de neutro (resistência de baixo valor e resistência de alto valor).

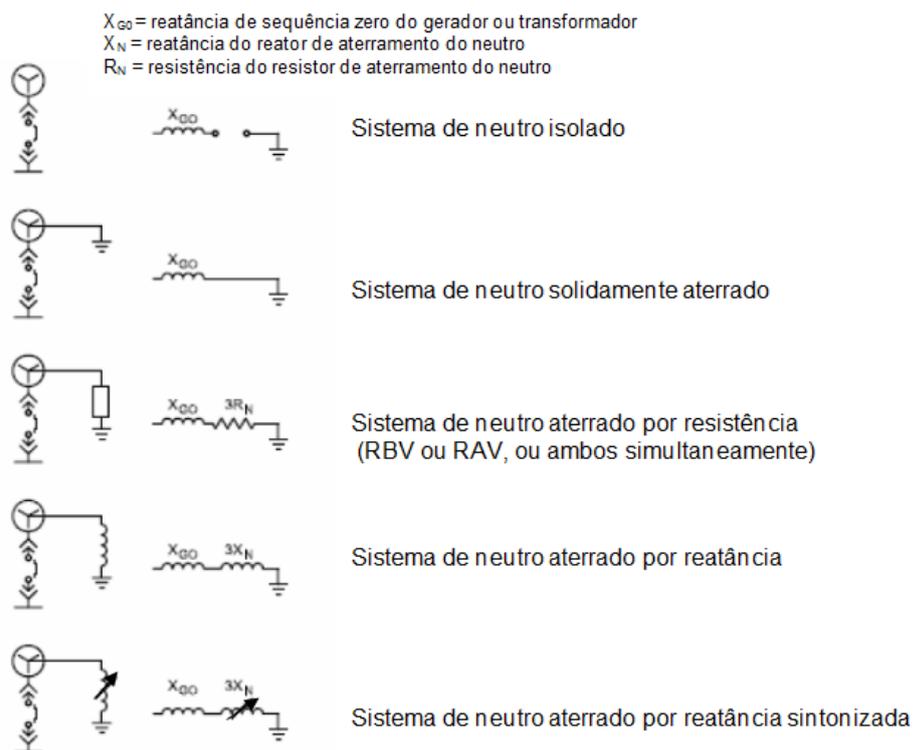


Figura 1.2 - Os métodos de aterramento de neutro e os seus respectivos componentes de sequência zero do circuito de neutro (Beeman, 1955)

Todos os casos ilustrados na figura 1.2 são utilizados em aplicações industriais, com as seguintes exceções: o sistema de neutro aterrado por reatância (não sintonizada) que só é utilizado em alguns casos de geradores; o sistema de neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (bobina de Petersen); e o sistema de neutro isolado, que será mostrado que não é recomendado na indústria em geral, por ser responsável pelas altas sobretensões devidas aos curtos fase-terra intermitentes e por ressonância.

O neutro aterrado por meio de reatância (não sintonizada) é um método utilizado para o aterramento, em certos casos, de geradores, especialmente de pequeno porte.

O neutro aterrado por meio de reatância sintonizada (bobina de Petersen) é um método utilizado nos sistemas de distribuição de energia em certos países da Europa central, mas que poderia também ser utilizado, sob certas condições, na indústria (Costa, 1995). Os sistemas de aterramento por meio de reator sintonizado estão fora do escopo deste trabalho, pois têm pouca aplicação industrial devido às variações de topologia e carga de uma indústria e que, conseqüentemente, dificultam a sua sintonia.

Os sistemas híbridos de aterramento de neutro (resistência de baixo valor e resistência de alto valor) é uma tendência recente em geradores de grande porte para evitar o

dano excessivo devido a uma falta fase-terra interna no gerador. Mesmo que desconectado após a falta, o gerador pode realimentar a sua própria falha interna enquanto estiver no processo de parada. Desta forma, o sistema de aterramento de neutro passa do tipo aterrado por baixa resistência (RBV) para o tipo aterrado por alta resistência (RAV), de forma a limitar a corrente fase-terra até a parada total do gerador.

A melhor forma de se obter o neutro do sistema, é através do neutro do transformador de alimentação ou dos geradores conectados em estrela (Y), conforme mostrado na figura 1.3, para cada nível de tensão (sistemas de 36kV, de 4,16kV e de 480V).

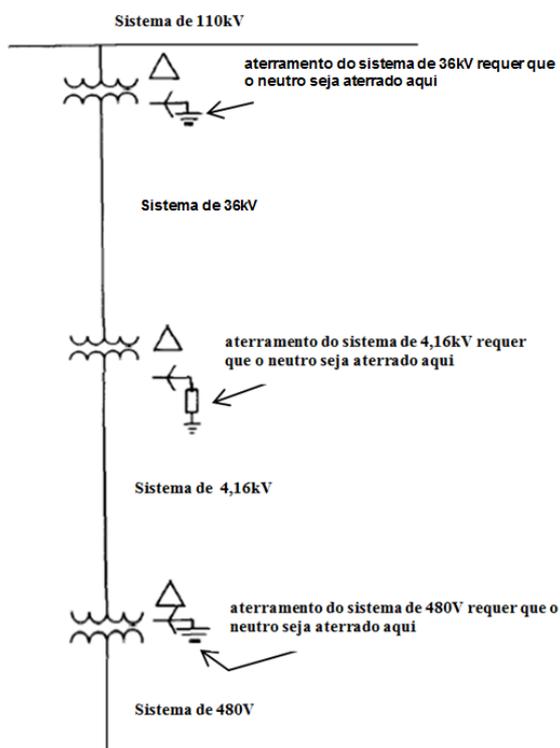


Figura 1.3 – Cada nível de tensão é aterrado independentemente (Beeman, 1955)

O tipo de aterramento de neutro influi na magnitude da falta à terra e, conseqüentemente, na proteção de terra. Devido ao fato de que as correntes de falta à terra não podem ser transferidas por transformadores Δ -Y ou Δ - Δ , a proteção de terra de cada nível de tensão é independente da proteção de terra dos outros níveis. Isto permite um ajuste de temporização pequeno e, conseqüentemente, uma atuação mais rápida da proteção de falta à terra. Além disso, a corrente de falta à terra é relativamente independente da corrente de fase ou de carga e, portanto, os valores de ajustes da proteção de terra podem ser menores que os de fase. Acrescenta-se ainda o fato de que a maioria das faltas são faltas à terra.

O aterramento através de resistores de neutro deve ser localizado na fonte de alimentação e, não, na carga. Quando um sistema é aterrado no neutro dos motores conectados em Y, ou nos primários de transformadores Y- Δ rebaixadores de tensão, é necessário aterrar vários destes pontos simultaneamente para assegurar que o sistema permanecerá aterrado quando uma ou mais destas cargas estiverem fora de serviço. Conseqüentemente, as correntes de falta à terra podem ser excessivamente altas quando todos estes pontos estiverem em serviço simultaneamente. Desde que as fontes de alimentação sejam em número pequeno em relação às cargas e que sejam menos propensas a serem desligadas, elas são as preferidas para serem os pontos de aterramento do sistema elétrico conforme mostrado na figura 1.4.

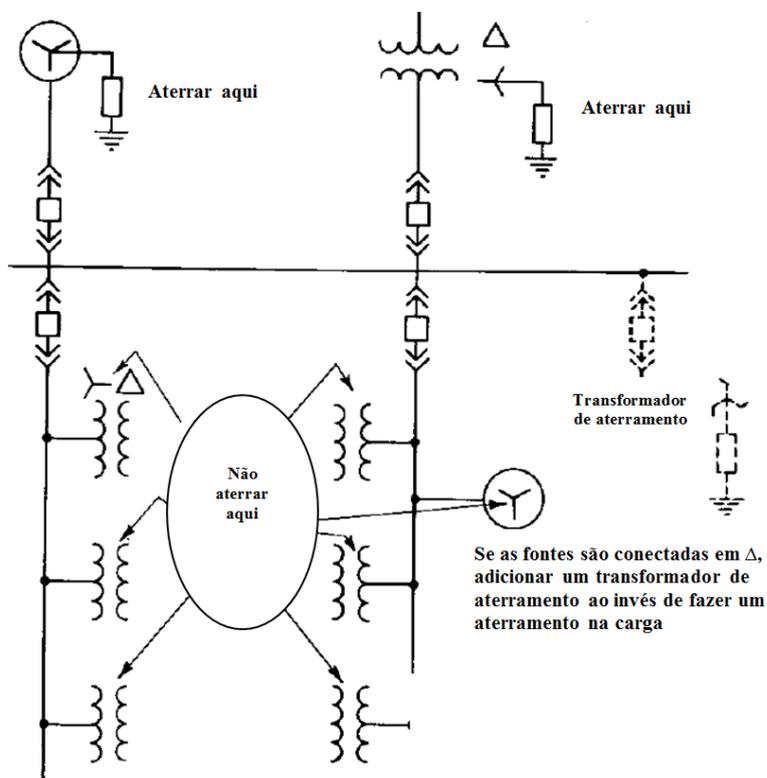


Figura 1.4 - Aterrar na fonte e, não, nas cargas (Beeman, 1955)

Caso o sistema não possua um neutro acessível, podem ser utilizados os transformadores de aterramento de neutro artificial, conforme mostrado na figura 1.4.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

Em primeiro lugar é preciso esclarecer o que significa e para que serve o aterramento do sistema elétrico. A palavra “aterramento” é utilizada em sistemas elétricos de potência para o “aterramento de sistemas” (do inglês: “*system grounding*”, “*system earthing*”, “*neutral grounding*”) e para o “aterramento de equipamentos” (do inglês:

“*equipment grounding*”, “*bonding*”, ou “*bonding equipment to electrical earth*”). O escopo principal deste trabalho é o “aterramento de sistemas” trifásicos industriais de corrente alternada.

O aterramento em sistemas elétricos industriais é feito através de uma conexão à terra do ponto de neutro ou de pontos de neutro do circuito, de transformadores, de geradores, ou de qualquer ponto de neutro do sistema elétrico. A função do aterramento do sistema elétrico é, então, proporcionar uma referência comum para as tensões do sistema.

O aterramento de sistemas elétricos envolve basicamente a forma como o neutro é aterrado, embora um sistema aterrado possa também ser definido como um sistema de condutores nos quais, pelo menos um deles ou um ponto (geralmente o condutor central ou ponto de neutro de transformador ou de enrolamento de gerador), é intencionalmente aterrado, tanto solidamente, quanto através de um dispositivo limitador de corrente.

Por outro lado, o aterramento de equipamentos refere-se à conexão à terra de uma ou mais partes metálicas que não conduzem corrente como normalmente é feito pelos sistemas de condutores e cabos do sistema elétrico. As partes metálicas assim definidas incluem os eletrodutos metálicos, as blindagens metálicas dos cabos, caixas metálicas de tomadas de força, painéis de controle ou de equipamentos elétricos, carcaças de motores, etc.

A relevância do tema “aterramento de neutro” pode ser resumida através da redução de custos de operação e manutenção, da melhoria da confiabilidade do sistema elétrico, e da maior segurança proporcionada ao pessoal e aos equipamentos. Portanto, o tipo de aterramento de neutro tem como consequência direta os seguintes aspectos:

1. Redução nos custos de operação e manutenção devido aos fatores de:
 - a. Controlabilidade das magnitudes das sobretensões e sobrecorrentes devidas a uma falta fase-terra, sólida ou intermitente, e o impacto na isolação dos equipamentos;
 - b. Proteção de terra mais efetiva para evitar danos em geradores, motores, e

- transformadores, de MT e BT;
- c. Simplificação na detecção e localização de faltas à terra;
 - d. Melhoria na proteção contra faltas à terra no sistema elétrico e nos equipamentos;
 - e. Redução de risco de mal funcionamento de equipamentos;
2. Melhoria na confiabilidade do sistema elétrico e, conseqüentemente, na continuidade de serviço;
 3. Maior segurança ao pessoal e aos equipamentos devido à:
 - a. Proteção de terra contra contatos diretos e indiretos do ser humano;
 - b. Proteção mais eficaz contra o risco potencial de arco elétrico em painéis;
 - c. Proteção e ajustes de terra apropriados contra o risco de incêndio em equipamentos elétricos;

O tema proposto nesta dissertação abrange as diversas implicações do tipo de aterramento de neutro adotado, sobretudo no sistema de proteção.

A título de ilustração, uma melhor proteção pode ser obtida nos sistemas com o neutro aterrado porque a proteção diferencial de motores, geradores e de transformadores é melhorada em relação à dos sistemas isolados. Se o neutro não for aterrado, a proteção contra falta à terra no enrolamento de uma máquina, por relés diferenciais percentuais, é eficaz somente na ocorrência de uma segunda falta à terra (curto F-F-T), enquanto que, num sistema com o neutro aterrado, os relés diferenciais percentuais operam para uma falta fase-terra dentro da sua zona de proteção.

Cabos especificados para trabalhar em sistemas com o neutro solidamente aterrado são também mais baratos do que aqueles especificados para sistemas isolados ou aterrados através de resistências baixas e altas, pois estes últimos estão sujeitos às sobretensões.

A experiência na operação de sistemas aterrados por resistor de alto valor (RAV) e isolados também mostra que a taxa de falhas é substancialmente mais baixa e o tempo em que o sistema fica fora de serviço é menor que os sistemas solidamente aterrados. Por outro lado, há estatísticas que consideram os casos de queimadas devastadoras ocorridas em painéis e com alto risco à segurança do pessoal de operação e manutenção, devido ao arco elétrico. Estas estatísticas indicam um número bem maior de ocorrências nos sistemas solidamente aterrados do que nos sistemas aterrados por resistência e, em especial, por alta resistência (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

Finalmente, outro objetivo deste trabalho é o de apresentar os diversos métodos de aterramento de neutro fornecendo subsídios para a escolha da forma de aterramento de neutro mais apropriada diante das necessidades de uma certa instalação industrial. O método de aterramento de neutro em sistemas de potência é talvez uma das características mais difíceis de escolha num projeto. Isto ocorre devido a uma série de fatores que não podem ser colocados individualmente lado a lado, ou colocados em termos de custo, e comparados entre si. Além disso, a evolução dos métodos de aterramento de neutro foi em função da experiência, de um maior entendimento dos fenômenos envolvidos e do avanço tecnológico.

1.3 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Apresentar o estado da arte dos sistemas de aterramento de neutro na indústria, sua história e evolução;
- Apresentar as características de cada sistema de aterramento de neutro;
- Apresentar os critérios para seleção do tipo de aterramento de neutro e escolha do sistema de proteção adequado;
- Apresentar os critérios para seleção de proteção eficiente para máquinas elétricas girantes, transformadores, painéis, cabos, etc, para cada tipo de aterramento de neutro;
- Apresentar o comportamento das sobretensões e sobrecorrentes de falta no sistema elétrico diante de cada tipo de aterramento;

- Analisar os aspectos de segurança de pessoas, animais e equipamentos, e os riscos de incêndio;
- Apresentar as exigências de continuidade de serviço na indústria, as restrições e exigências da legislação, e as últimas tendências tecnológicas na prática de aterramento de neutro.

Não foi encontrada na literatura atual uma única obra que analise, de forma abrangente e conjunta, todos os tipos de aterramento de neutro para a indústria. Os artigos e a literatura sobre o tema aterramento de neutro se referem a assuntos específicos. Portanto, julga-se que a pesquisa realizada nesta dissertação representa uma leitura de utilidade prática para projetistas e engenheiros, além de delinear áreas onde há questões em aberto, sugerindo pesquisas e desenvolvimentos futuros. Apresentam-se também, numa base mais completa e atual, as vantagens e desvantagens de cada sistema de aterramento de neutro.

Diante do contexto apresentado, o objetivo desta dissertação é o de contribuir para a apresentação organizada e estruturada dos principais conceitos e soluções envolvidas nos métodos de aterramento do neutro, e as suas implicações no sistema de proteção.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

De forma a organizar e estruturar as informações coletadas no amplo levantamento bibliográfico realizado, este trabalho está dividido em 9 (nove) capítulos, mais as referências bibliográficas.

O presente capítulo refere-se à introdução ao trabalho, descrevendo sua relevância no contexto atual, apresentando os principais objetivos almejados e as contribuições resultantes desta dissertação.

Os capítulos 2 (dois), 3 (três), 4 (quatro) e 5 (cinco) tratam respectivamente dos sistemas solidamente aterrados, dos sistemas de neutro aterrado por baixa resistência, dos sistemas de neutro aterrado por alta resistência, e dos sistemas de aterramento de neutro em geradores. Nestes capítulos discorre-se acerca dos principais sistemas de aterramento de neutro, apresentam-se os conceitos referentes ao aterramento de neutro em subestações industriais, as implicações no sistema de proteção, as formas de detecção de faltas à terra, e o grau de proteção de terra conferido aos

equipamentos dos sistemas elétricos.

No capítulo 6 (seis) discorre-se acerca da origem e natureza das falhas à terra em máquinas elétricas girantes e transformadores, as medidas efetivas de proteção em função dos métodos de aterramento de neutro.

No capítulo 7 (sete) aborda-se as implicações dos sistemas de aterramento de neutro nas sobretensões do sistema elétrico durante as faltas à terra. No caso de uma falta sólida à terra, mostra-se como são originadas as sobretensões em função dos tipos de aterramento de neutro adotados. Também são abordadas as causas e consequências do fenômeno de instabilidade de neutro em sistemas isolados, e as sobretensões originadas pelas faltas à terra intermitentes e por ressonância. Estas sobretensões em sistemas isolados são analisadas para a compreensão de seus efeitos nos outros tipos de aterramento e, em especial, nos sistemas de alta resistência (RAV), e quais são as medidas mitigatórias para controlá-las.

O capítulo 8 (oito) apresenta um resumo comparativo entre os diversos tipos de aterramento de neutro, em função de quesitos considerados como os mais importantes. Este capítulo é um resumo de todo o trabalho, e pode auxiliar e guiar as decisões de escolha do método de aterramento de neutro em função do que se deseja proteger e como se deve proteger. Discute-se a filosofia de proteção de terra a ser adotada, junto com as vantagens e desvantagens de cada sistema de aterramento de neutro e suas implicações na proteção de transformadores e de máquinas elétricas girantes.

O capítulo 9 (nove) apresenta as conclusões do trabalho e é subdividida em três partes: conclusões; desenvolvimentos futuros; e publicações.

De uma forma, ou de outra, vários assuntos de importância foram desenvolvidos e estão contidos dentro da organização desta dissertação, dentre eles podem-se citar:

- Detecção e localização de faltas nos diferentes sistemas de aterramento de neutro;
- Critérios de ajustes e sensibilidade das proteções de terra em função dos sistemas de aterramento de neutro;
- Cálculos e medição das correntes de “*charging*” em sistemas isolados ou de alta resistência de neutro;

-
- Impacto de escolha de tipo de aterramento de neutro na continuidade de serviço;
 - Sobretensões (transitórias e permanentes) versus nível de isolamento dos equipamentos, em função do tipo de aterramento de neutro;
 - Danos em motores e geradores em função do tipo de aterramento de neutro e implicações na proteção;
 - Danos em transformadores em função do tipo de aterramento de neutro, e implicações na proteção (curva *ANSI* deslocada, proteção do ponto *NEC*, etc);
 - Probabilidade de danos em painéis devido ao arco elétrico ("*arcing fault*") em função do tipo de aterramento de neutro;
 - Evolução da falta de arco elétrico de F-T para F-F-T, ou para F-F-F-T;
 - Sensibilidade da proteção fase-terra frente à energização de transformadores versus tipo aterramento de neutro;
 - Coordenação da proteção e tempos de atuação para baixas correntes de falta e alta energia incidente;
 - Dispositivos diferenciais de faltas à terra, sua eficiência e sistemas de aterramento de neutro adequados;
 - Proteção diante do risco de arco elétrico;
 - Proteção "*Ground-Sensor*" e sua possibilidade de uso diante do tipo de aterramento de neutro;
 - Proteção de 100% do enrolamento de geradores;
 - Especificação de TCs para a proteção fase-terra.

2 SISTEMA DE NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de neutro solidamente aterrado têm muita popularidade, especialmente na BT, pois são simples, e também eficientes no controle de sobretensões transitórias. Os sistemas de neutro solidamente aterrado geralmente protegem os motores e equipamentos contra as faltas à terra através das proteções instantâneas de fase. Há também formas de detecção de faltas à terra utilizando os três TCs das proteções de sobrecorrente de fase conectados na forma residual, isto é, ligados em estrela (Y) e, entre o ponto de neutro e a terra, é conectado um quarto TC associado à proteção de sobrecorrente residual (50N ou 51N). Para as correntes de cargas balanceadas e para os curtos balanceados ou para os curtos que não envolvem a terra, os três TCs de fase em Y não geram corrente residual entre o ponto de neutro dos TCs e a terra, isto é, o relé de sobrecorrente residual (51N) detecta somente correntes de fases desbalanceadas que envolvem a terra, ou seja, correntes de sequência zero. Este tipo de detecção de faltas à terra tem, porém, limitações devidas às relações e imprecisões dos TCs de fase, que são especificados para a corrente nominal de carga. Além disso, a proteção residual (51N) é geralmente temporizada para evitar os transitórios de partida de motores, por exemplo, que apresentam correntes desbalanceadas nas fases. Além disso, a proteção residual (51N) apresenta problemas de sensibilidade à medida que a razão dos TCs de fase aumenta. O esquema de conexão residual (51N) pode ter uma proteção temporizada de retaguarda (51TN) no neutro do transformador, porém, esta proteção, por ser temporizada para manter a seletividade com os elementos de proteção instantâneos à jusante, também não é tão eficiente para limitar a dissipação térmica dos curtos F-T.

Outra forma de detecção de faltas à terra seria pelo princípio dos “*ground-sensors*”. Porém, os “*ground-sensors*” de núcleo de ferro têm suas limitações para detectar altas correntes F-T, próprias de sistemas solidamente aterrados industriais. Desta forma, outras tecnologias de “*ground-sensors*” são discutidas para evitar o problema de saturação.

Os sistemas de neutro solidamente aterrado têm como consequência implicações importantes na proteção de equipamentos, na proteção do transformador, nos

problemas de seletividade com os dispositivos de proteção à jusante devido à curva *ANSI* deslocada do transformador (curva de limite térmico deslocada contra curtos passantes no transformador), no maior risco potencial de arco elétrico, e na proteção do ponto *NEC* (3.200 A, 1 seg.), conforme definidos no item 2.3.

2.2 DETECÇÃO DE FALTAS À TERRA

2.2.1 PROTEÇÃO DE FALTA RESIDUAL À TERRA

A proteção de falta à terra é realizada através de um relé conectado na forma residual, conforme mostrado na figura 2.1. A operação é baseada no conceito de que as correntes de fase num sistema trifásico balanceado somam-se vetorialmente zero, desde que os TCs transformem adequadamente as correntes de fase primárias em correntes secundárias.

O uso deste esquema de proteção de falta à terra apresenta duas limitações:

- A sensibilidade é influenciada pela razão de transformação dos TCs de fase, que são especificados para as correntes de fase. Neste caso, a sensibilidade de detecção da falta à terra sofre à medida que a razão dos TCs de fase aumenta;
- Imprecisões de transformação, causadas por pequenas diferenças nas características dos TCs de fase, podem fazer com que as correntes secundárias dos TCs não se somem exatamente em zero, mesmo que as correntes primárias estejam perfeitamente balanceadas. Esta característica pode se tornar um problema durante as correntes de “*inrush*” ou mesmo as correntes subtransitórias que contêm a componente *DC*. Este erro na soma fasorial das correntes secundárias dos TCs decai, em geral, rapidamente, em poucos ciclos mas, algumas vezes, não tão rapidamente para evitar uma falsa operação do relé instantâneo conectado na forma residual. Donde advém o fato de que somente relés temporizados devem ser usados.

A proteção de falta à terra residual encontra ampla aplicação nos sistemas com o neutro solidamente aterrado, onde as correntes de falta fase-terra são altas, da mesma grandeza das faltas trifásicas.

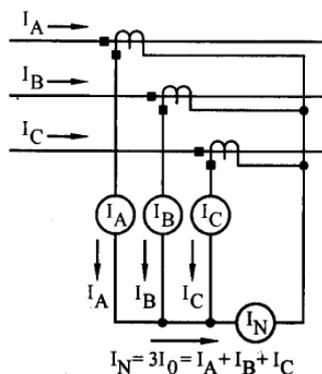


Figura 2.1 - Três TCs e o circuito residual

Historicamente, o uso do fasor I_0 de corrente de sequência zero e do fasor V_0 de tensão de sequência zero foram empregados nos relés para a proteção de terra. A razão pelo seu emprego é que os valores de sequência zero são diretamente proporcionais à soma das três correntes e tensões como mostrado nas equações 2.1 e 2.2.

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \tag{2.1}$$

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \tag{2.2}$$

Onde:

I_0 – fasor corrente de sequência zero;

V_0 – fasor tensão de sequência zero;

I_a, I_b, I_c – fasores das três correntes de fase;

V_a, V_b, V_c – fasores das três tensões de fase.

Portanto, a componente de corrente de sequência zero pode ser determinada pela soma das três correntes de fase de cada TC que é igual a $3I_0$.

As faltas à terra também criam valores de corrente e de tensão nos circuitos de sequência positiva e negativa que, historicamente, foram de menor importância à engenharia de proteção do que os circuitos de sequência zero. A razão disto é que os circuitos de sequência positiva e negativa necessitam de cálculos ou “filtragens” complexos conforme as equações (2.3) à (2.6).

Sequência positiva:

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + a * I_b + a^2 * I_c) \tag{2.3}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} (V_a + a * V_b + a^2 * V_c) \tag{2.4}$$

Sequência negativa:

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2 * I_b + a * I_c) \quad (2.5)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} (V_a + a^2 * V_b + a * V_c) \quad (2.6)$$

Onde:

I_1, I_2 são as correntes de sequência positiva e negativa, respectivamente;

V_1, V_2 são as tensões de sequência positiva e negativa, respectivamente;

a é o operador igual a $1/120^\circ$, e $a^2 = 1/240^\circ$

Com os modernos relés microprocessados e suas capacidades inerentes de cálculo matemático para processar as tensões e correntes de calcular as componentes de sequência zero, positiva e negativa, dispõe-se hoje de esquemas de proteção baseados em diversos algoritmos. Há quase uma capacidade ilimitada para fornecer todo o tipo de esquema de proteção necessário para uma proteção apropriada de falta fase-terra.

2.2.2 PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR” (GS)

Nos sistemas de neutro solidamente aterrados, onde a magnitude das correntes de falta à terra pode se igualar à magnitude das correntes de curto trifásico simétrico, um simples TC toroidal de núcleo de ferro, de baixa relação, envolvendo as três fases não deve ser usado sem uma análise cuidadosa por causa do seu baixo ponto de saturação (Linders, 1995). A proteção *ground-sensor* é composta por qualquer TC toroidal ou do tipo janela (“*window-type CT*”) que envolve todos os condutores de fase (mais o neutro, se este existir), através de acoplamento magnético, conhecida também por “*zero sequence sensor*”, por “*core balance zero sequence CT*”, ou simplesmente por “*core balance CTs*”, junto com um relé de falta à terra do tipo sensor de corrente.

Outros autores (Dunki-Jacobs, et al., 2007) são mais restritivos e afirmam que a proteção “*ground-sensor*” (50GS e 51GS) não deve ser usada em sistemas solidamente aterrados porque a sua sensibilidade inerente não é necessária, e também porque os testes de TCs de núcleo de ferro e relés acoplados é geralmente limitada a 3.500 A (Dunki-Jacobs, et al., 2007), bem abaixo dos valores das faltas fase-terra (de 10 a 50kA) normalmente encontrados nos sistemas elétricos industriais. Além disso, uma saturação severa do núcleo do TC deixa o “*ground-sensor*” inoperante. Neste caso, preferencialmente, um relé de tempo inverso (51N) com unidade instantânea

deve ser aplicado na conexão residual dos três TCs de fase, pois os TCs de fase têm geralmente alta relação de espiras e foram especificados para aqueles níveis de falta fase-terra que são semelhantes aos níveis do curto trifásico.

Há, porém, tecnologias recentemente desenvolvidas de TCs de núcleo de ar, do tipo bobina de Rogowski (Mardegan, 2012), (Schweitzer Engineering Laboratories), que poderiam mudar este cenário e possibilitar a inclusão de proteções de terra eficientes nos sistemas solidamente aterrados e que seriam úteis no caso de proteção de motores de BT em sistemas com altas magnitudes de curto F-T, evitando-se o problema de saturação do TC.

2.2.3 PROTEÇÃO COM RELÉ DE FUGA À TERRA

A proteção principal de terra num sistema solidamente aterrado pode ser constituída por um relé de alta impedância, como por exemplo, o relé 64 – proteção contra falhas de isolamento para terra, conforme mostrado no esquema típico de circuito terminal de motor de BT da figura 2.2, onde se mostra a proteção principal de terra de motor de BT (relé 64) com proteção 51TN de retaguarda (não mostrada), e a proteção de fase através de disjuntor termomagnético e imagem térmica (49).

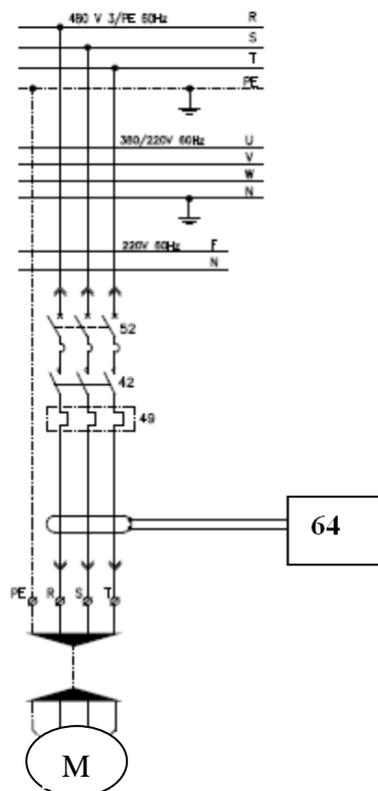


Figura 2.2 – Esquema típico de proteção principal de terra de motor de BT num sistema solidamente aterrado utilizando-se a proteção 64

O relé de fuga à terra 64 e o seu sensor de corrente toroidal, envolvendo todas as fases (para circuitos bifásicos ou trifásicos) mais o neutro, se este existir, formam um par casado que transforma a corrente de sequência zero em uma tensão proporcional à mesma e de nível adequado de medição do relé. Entende-se, aqui, por um “par casado” o conjunto TC/relé projetado e testado em conjunto para operar sob determinados níveis de curto F-T. Quando esta tensão atingir o valor pré-ajustado correspondente, o relé opera de forma instantânea ou temporizada, conforme o projeto. O relé 64 comercialmente disponível tem, em geral, as seguintes faixas selecionáveis de corrente: 30 a 300mA; 300mA a 3 A; e 3 a 30 A. A aplicação deste relé para a detecção de perda de isolamento ou defeitos à terra, ou mesmo para proteção de pessoal contra contatos acidentais pode ser possível através da seleção adequada de sua faixa de sensibilidade, desde que esta seja possível através de sua alta impedância, diferentemente do “*ground-sensor*” 50/51GS de núcleo de ferro que não se deve usar em sistemas solidamente aterrados conforme já comentado.

2.3 SISTEMA SOLIDAMENTE ATERRADO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

Na proteção de falta à terra nos sistemas de BT com o neutro solidamente aterrado, deve-se considerar (Dunki-Jacobs, 1972):

- proteção de falta à terra por arco elétrico para os equipamentos de manobra do lado do secundário do transformador;
- proteção do transformador para faltas passantes fase-terra, e faltas à terra nos enrolamentos do secundário do transformador;
- seletividade com os dispositivos de proteção à jusante;
- requisitos de normas para a proteção de falta à terra de equipamentos;
- custo da instalação.

O sistema de detecção de falta à terra pode também utilizar um TC no neutro do transformador como o circuito de retorno da falta à terra (esquema “*ground-return*”), conforme figura 2.3, pois o condutor de terra fornece baixa impedância no caminho de retorno para as correntes de falta à terra nos sistemas industriais. Qualquer corrente de terra retornando ao neutro do transformador indica que a falta pode estar na barra à jusante, no enrolamento secundário do próprio transformador, ou em qualquer circuito terminal à jusante. Para proporcionar uma proteção segura, o relé deve operar o disjuntor principal do secundário do transformador, e se a falta permanecer, indicando

que se trata de um curto fase-terra no próprio enrolamento secundário do transformador, um sinal temporizado deve operar o disjuntor principal do primário do transformador, conforme indicado na figura 2.4.

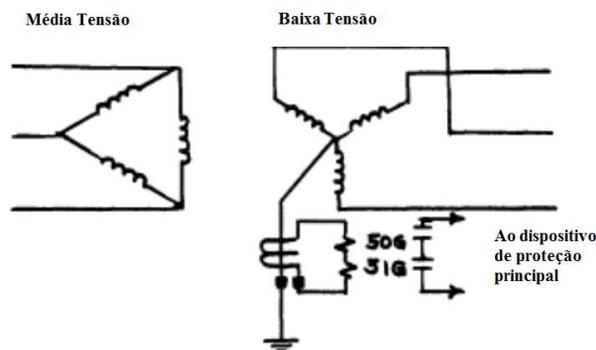


Figura 2.3 - Sistema de distribuição de BT com lado do transformador em Y (Smith, 1982)

A capacidade nominal do TC primário (“*CTR – Current Transformer Ratio*”, ou Relação de TC - RTC) é aproximadamente igual à corrente de plena carga do transformador (“*FLA – Full Load Ampere*”), pois em sistemas de neutro solidamente aterrados a falta fase-terra tem a magnitude próxima ao do curto trifásico (Dunki-Jacobs, et al., 2007). A escolha da relação do TC deve também ser precedida pela verificação do nível de curto presumido do sistema elétrico, da capacidade de o TC suportar os níveis térmicos e dinâmicos do curto, e do erro máximo apresentado pelo TC devido à saturação. O relé pode ser ajustado aproximadamente para a corrente equivalente à corrente de plena carga (“*FLA*”) do transformador. Considerando-se os valores de faltas próximas aos terminais do secundário, o curto fase-terra sólido é aproximadamente igual ao trifásico, que é aproximadamente 20 vezes a corrente de plena carga do transformador (supondo $Z = 5\%$ e barra infinita à montante do transformador). O valor presumido do curto fase-terra por arco é aproximadamente 40% do curto trifásico (tabela 2.2), ou seja, 8 vezes a corrente de plena carga do transformador. Assim, o relé também pode proteger contra uma falta fase-terra do tipo arco elétrico, desde que opere mais rapidamente do que o tempo de evolução do arco fase-terra para um arco trifásico, que é de apenas 2 ciclos. Este curto período de tempo de evolução do arco elétrico é o desafio de toda a proteção.

Normalmente utiliza-se o relé temporizado de sobrecorrente (também denominado por 51TN) para o esquema do “*ground-return*” em sistemas solidamente aterrados, e que opera diretamente o disjuntor do secundário e também pode comandar a abertura do disjuntor do primário do transformador, conforme indicado na figura 2.4. O 51TN é

geralmente temporizado porque é uma proteção de retaguarda em relação às proteções principais, de fase ou de terra, à jusante conforme mencionado. Porém, pode ser a proteção principal contra faltas à terra no enrolamento do secundário, que está fora da zona de proteção dos relés dos circuitos à jusante.

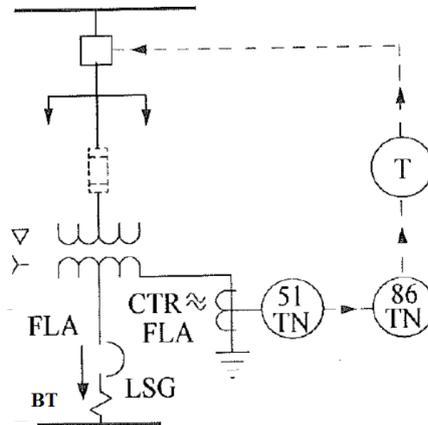


Figura 2.4 - Proteção “ground-return” para sistemas solidamente aterrados (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Os ajustes recomendados da proteção principal de fase estão na faixa de 2,5 a 6 vezes a corrente de plena carga (“FLA”) do transformador, conforme mostra o critério *NEC* mostrado na Tabela 2.1. Também recomenda valores máximos de 4 e de 6 vezes a corrente nominal para o ajuste do relé primário dependendo da impedância do transformador e de, no máximo, 2,5 vezes a corrente nominal para o ajuste do secundário, lembrando que os ajustes normalmente ficam em 1,20 para o relé secundário, que é o mínimo aceitável pelo critério *NEC*, e de 1,50 para o primário, dependendo do tipo de aplicação.

Tabela 2.1 – Critério *NEC* para ajuste da proteção de transformadores

Presença do relé 51 no secundário	Ajuste do relé do secundário	Ajuste do relé do primário
SIM	$\leq 2,5xI_{nominal\ secundária}$	<p>Para $6 \leq Z < 10\%$ $\leq 4xI_{nominal\ primária}$</p> <p>Para $Z < 6\%$ $\leq 6xI_{nominal\ primária}$</p>
NÃO	-----	$\leq 2,5xI_{nominal\ primária}$

Portanto, os ajustes máximos permitidos para a proteção de sobrecorrente do transformador, conforme o critério *NEC*, são também compatíveis para detecção da falta de arco fase-terra, nos sistemas solidamente aterrados.

Examinando ainda as correntes de linha do lado primário, em função de faltas trifásica, fase-fase e fase-terra, sólidas, no lado secundário, há as relações de correntes em PU em relação ao curto trifásico para um transformador usual do tipo delta-estrela, com o neutro solidamente aterrado, conforme mostrado na figura 2.5 e que são úteis para analisar o desempenho de proteções de fase do lado primário para eventuais curtos do lado secundário e, inclusive, curtos internos do lado secundário do transformador que estão fora da zona de atuação da proteção secundária.

Para um curto trifásico de 1,00PU no lado secundário, o mesmo produz 1,00PU nas três fases do lado primário, conforme a figura 2.5 (a). Para um curto bifásico de 0,866PU no lado secundário, o mesmo produz 1,00PU numa das fases e 0,50PU em duas outras fases do lado primário, conforme a figura 2.5 (b). Isto é, para os curtos trifásicos e bifásicos de 1,00PU do lado secundário, pelo menos uma das fases do lado primário terá uma corrente de 1,00PU. Desta forma, as proteções de fase do lado primário podem ser eficientes contra os curtos trifásicos e fase-fase do lado secundário. Para um curto fase-terra de 1,00PU no lado secundário, porém, nota-se pelo esquema da figura 2.5 (c) que o mesmo produz somente 0,58PU de corrente em duas fases do lado primário, e nenhuma corrente (0 PU) na terceira fase.

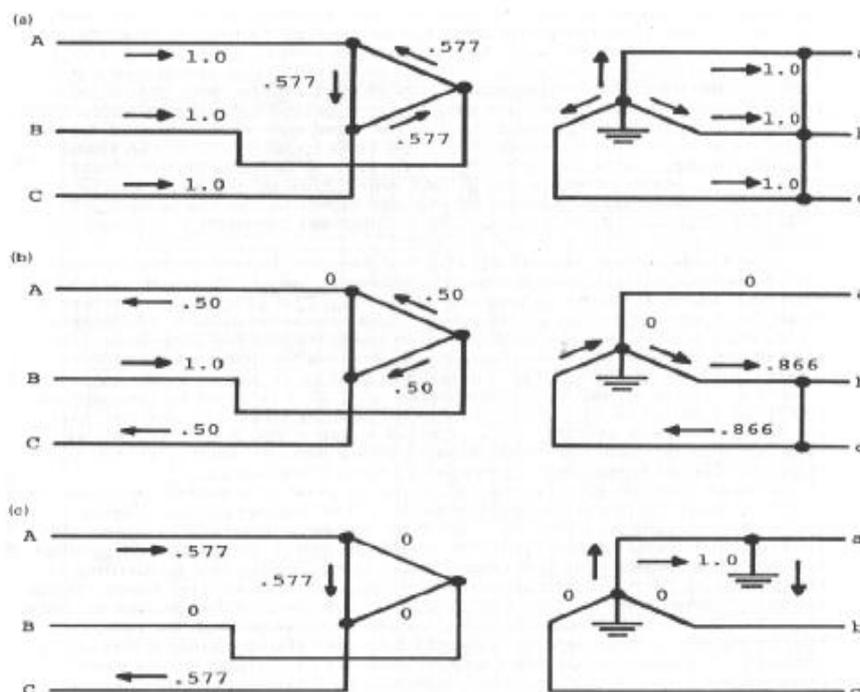


Figura 2.5 - Comparação entre as correntes de linha e de enrolamento de transformadores em Δ -Y sob condições de faltas trifásicas, fase-fase e fase-neutro, onde $I_{cc\ 3F} = 1,0PU$, $I_F = I_{FLA\ 3F}/Z_{PU}$ (Hermeto, et al., 2010)

Isto é, se o curto fase-terra no secundário for de 20 vezes a corrente nominal de plena carga, este se reflete no primário como 58% de 20, ou seja, 11,6 vezes a corrente de plena carga em duas fases do primário. É por esta razão que se considera a curva *ANSI* de suportabilidade contra curtos passantes do transformador deslocada de 58%, em relação à corrente, para sistemas com o neutro solidamente aterrado, para garantir a proteção do transformador contra os efeitos térmicos e dinâmicos gerados por um curto F-T no lado secundário, através da proteção de fase no lado primário.

As curvas *ANSI* de limite térmico típica de transformador (“*through-fault protection curves*”) são representadas, inicialmente, em aproximadamente 2,35PU correspondente ao tempo 1.000 segundos (IEEE Std 242, 2001). A curva de suportabilidade térmica para o caso de sistema solidamente aterrado é representada por outra curva deslocada em 58% e paralela em relação a esta curva. Portanto, a representação do seu início é deslocada de 2,35PU para 1,36PU aproximadamente, para o tempo de 1.000 segundos. Por esta razão, sobra menos espaço para ajustar uma curva de proteção ajustada em 1,20PU ou mais, e que também proteja a curva de limite térmico (“*through-fault protection curve*”) deslocada de 58% do transformador. O ajuste do dispositivo de sobrecorrente no lado secundário é ajustado, geralmente, em 1,20PU e a proteção do lado primário é geralmente ajustada em 1,50PU, porém o ajuste poderia ser em até 2,50PU, se não houver relé no secundário, ou em até 4,0-6,0PU, se houver proteção no secundário, conforme a tabela 2.1. Nota-se, portanto, que os ajustes superiores permitidos pela tabela 2.1 para os relés primários estão limitados pela curva (*ANSI*) de limite térmico deslocada do transformador. Portanto, o ajuste normalmente feito em 1,20PU no secundário pode, dependendo da curva de tempo inverso utilizada, não proteger o início da curva térmica deslocada de 58% do transformador que já está aproximadamente em 1,36PU referente ao início da curva em 1.000 segundos, devido ao deslocamento da curva *ANSI*. Reajustando-se o “*pick-up*” da proteção de modo a que toda a curva de limite térmico de 58% do transformador fique protegida, a proteção pode restringir, por outro lado, o pleno aproveitamento da potência nominal do transformador. Por esta razão, adotando-se ajustes mais restritos geralmente feitos em 1,20PU no lado secundário, ou mesmo adotando-se ajustes menos restritivos pelo critério *NEC*, há a necessidade de uma proteção mais efetiva da curva de proteção de curtos passantes deslocada em 58%, para protegê-la convenientemente contra curto-circuitos e também para evitar restringir a plena

utilização da capacidade nominal do transformador. Curvas de atuação com características extremamente inversas podem ser exigidas nesta situação.

A figura 2.6 (Hermeto, et al., 2010) ilustra a proteção de fase da curva ANSI deslocada de um transformador de 2.000kVA ($I_n = 84 \text{ A}$ em 13,8kV) através do relé primário com característica normalmente inversa e “pick-up” de 160 A (aproximadamente $2,0 \times I_n$), e instantâneo ajustado acima do curto máximo do lado secundário (I'_{cc} assimétrico) e acima do “inrush”, e proteção de “back-up” da curva ANSI deslocada através do disjuntor secundário com curva de tempo definido e “pick-up” em $1,20 \times I_n$, ou seja, 102 A em 13,8kV (ou 3.200 A em 440 V) para proteção contra sobrecarga do transformador.

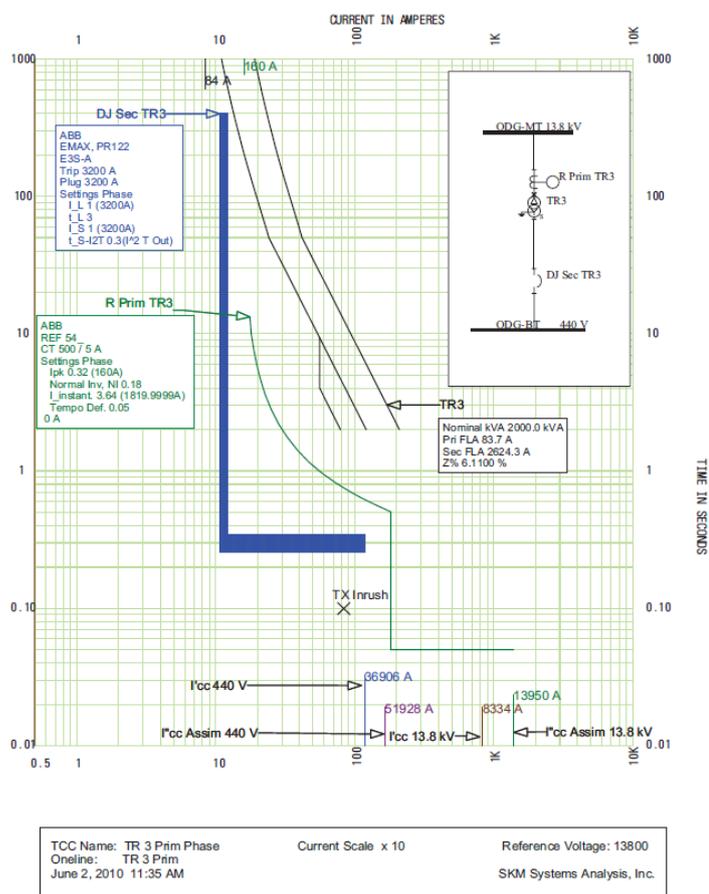


Figura 2.6 – Proteção de fase típica para transformador em sistema solidamente aterrado ilustrando a curva ANSI deslocada (Hermeto, et al., 2010)

Outra implicação na proteção em sistemas solidamente aterrados é a proteção do ponto NEC. O NEC, em sua seção 230-95, prescreve que todo sistema elétrico com mais do que 150V fase-terra e com correntes maiores que 1.000 A deve possuir uma proteção específica de terra, além das proteções de sobrecorrente convencionais. Esta

proteção de terra deve ser ajustada de forma que o “pick-up” da proteção não seja superior a 1.200 A e a temporização proteja o ponto 3.000 A, 1 segundo, conforme ilustrado na figura 2.7.

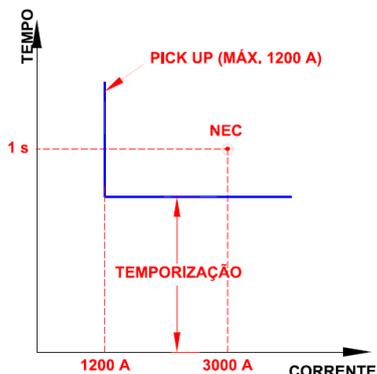


Figura 2.7 – Proteção de falta à terra na BT conforme NEC, seção 230-95 (Mardegan, 2012)

A figura 2.8 (Hermeto, et al., 2010) ilustra a proteção de terra para proteção do ponto NEC (3.200 A, 1 seg.) com “back-up” pela proteção mais à jusante.

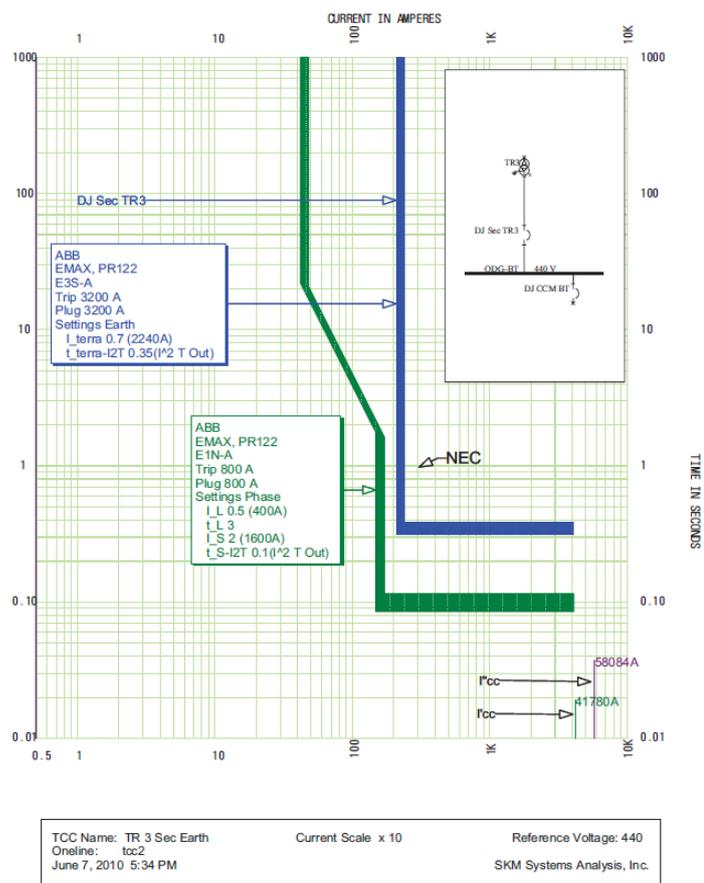


Figura 2.8 - Proteção de terra típica do ponto NEC em sistemas solidamente aterrados (Hermeto, et al., 2010)

Por outro lado, para a proteção contra o arco elétrico F-T, pode-se estimar uma corrente de arco em 38% do valor de curto trifásico, conforme a tabela 2.2. Assumindo-se um curto trifásico de 20 vezes a corrente nominal de plena carga ($20xI_n$), esta se reflete no primário como 58% de 20, ou seja, 11,6 vezes a corrente de plena carga em duas fases do primário. Assim, a corrente de arco F-T ficaria em 38% de 11,6 = 4,41 vezes em relação à corrente de plena carga ($4xI_n$) no exemplo típico considerado. Neste caso, o ajuste do relé de sobrecorrente (51) primário pode não proteger o sistema, caso o ajuste máximo permitido pelo critério *NEC* de $6xI_n$ seja escolhido. Mas este ajuste máximo é raramente utilizado, ficando geralmente em $1,5xI_n$ conforme se discutiu, o que faz com que um arco F-T, com $4,41 \cdot I_n$, seja perfeitamente percebido também pelo relé de sobrecorrente (51) do primário. Além disso, as correntes de falta F-T com arco, localizadas à jusante do transformador, geram correntes também detectáveis pela proteção de retorno do neutro (50G/51G ou 51TN), que é mais apropriada, e por esta razão, deve ser seletiva para abrir o disjuntor do secundário em primeiro lugar. Como a proteção de retorno do neutro deve, por sua vez, ser também seletiva com outras proteções de falta à terra instantâneas, utiliza-se a proteção de retorno do neutro temporizada (51G ou 51TN).

A figura 2.9 mostra as curvas tempo versus corrente para um CCM típico (Dunki-Jacobs, 1972), (Smith, 1982) com uma proteção de fusível no primário. As curvas estão plotadas em múltiplos da corrente de plena carga do transformador. O valor nominal de corrente do fusível limitador de corrente foi escolhido para 150% da corrente nominal de plena carga do transformador. O ajuste da unidade de tempo inverso do disjuntor do secundário é aproximadamente 125% da corrente de plena carga do transformador. O ajuste do instantâneo é de 4 vezes a corrente de plena carga do transformador. O relé de falta à terra 51G (ou 51TN) conectado ao TC de neutro do transformador tem uma característica moderadamente inversa. A verificação gráfica da seletividade das proteções de terra e de fase, mostrada na figura 2.9, ilustra a curva ANSI T58 do transformador deslocada de 58% em relação à curva ANSI T100, devido ao fato de o sistema ser solidamente aterrado. Também na mesma figura 2.9 observa-se a curva de proteção de retorno à terra temporizada (51G ou 51TN), e as curvas do fusível, do relé primário (51), do relé secundário (51), e a curva de proteção de tempo inverso e instantâneo do ramal do motor.

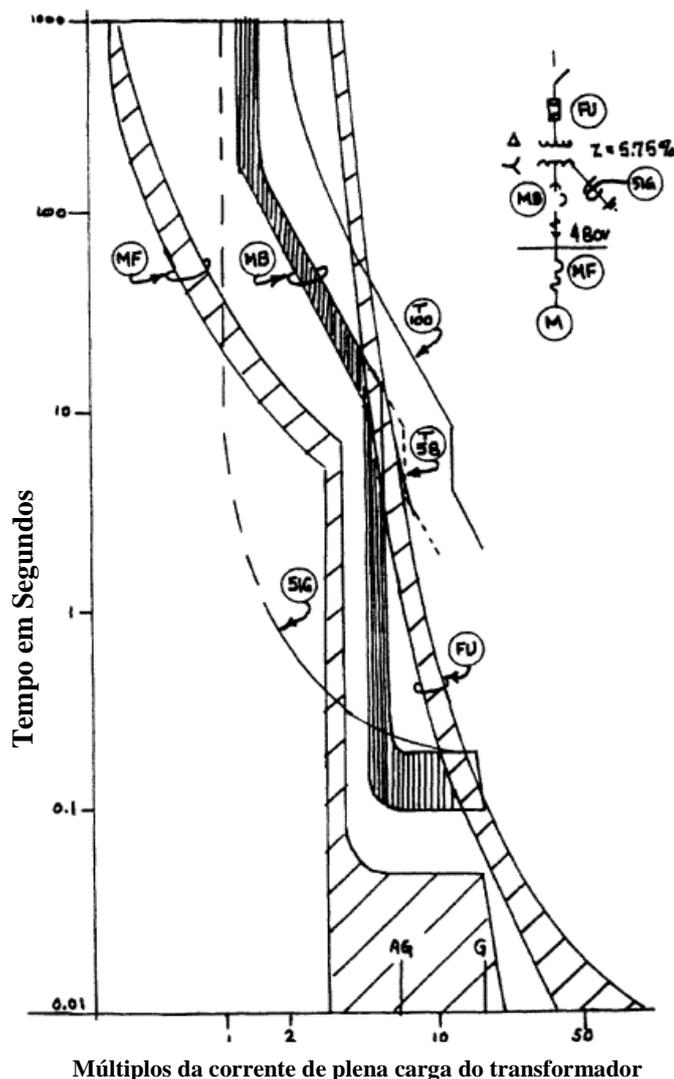


Figura 2.9 - Verificação gráfica da seletividade das proteções, em sistema solidamente aterrado, com a curva térmica do transformador (T58) deslocada de 58% (curva ANSI desloçada) (Smith, 1982)

Para faltas à terra no alimentador acima de 3 vezes a corrente de plena carga do transformador, a seletividade entre o relé de terra no neutro do transformador e a operação de proteção instantânea do ramal do motor pode ser conseguida.

Porém, para faltas entre 1 e 3 vezes a corrente de plena carga do transformador, a seletividade não é obtida.

Portanto, os esquemas de proteção de sistemas BT solidamente aterrados podem fornecer proteção adequada contra as faltas à terra com arco elétrico F-T para os equipamentos e painéis do lado secundário do transformador, além da proteção do próprio transformador para curtos fase-terra passantes, e faltas nos enrolamentos do transformador dentro de determinadas situações. A seletividade é obtida com os dispositivos de proteção à jusante para uma certa faixa prática de faltas à terra. A

mencionada proteção contra as faltas à terra por arco elétrico foi verificada apenas através de valores estimados de corrente do arco elétrico F-T, mas não foi verificada quanto à rapidez de extinção do arco antes que o mesmo possa evoluir para um arco do tipo trifásico, por exemplo. Esta possibilidade é analisada mais adiante no item 2.4 e conclui-se que a proteção contra arco F-T é apenas marginalmente eficiente.

2.4 ATERRAMENTO DE NEUTRO E FENÔMENO DE ARCO ELÉTRICO NA PROTEÇÃO DE PAINÉIS DE MT E BT

O conhecimento das características, comportamento e evolução do arco elétrico é um passo importante para o desenvolvimento de soluções para este problema através de sistemas eficazes de detecção e proteção de faltas de arco elétrico, e projetos de painéis mais resistentes. Este assunto, porém, está pouco relacionado com o objetivo proposto nesta dissertação que é analisar e descrever os meios de aterramento de neutro e suas implicações na proteção.

Para o correto ajuste do sistema de proteção, uma estimativa de magnitude da corrente de arco elétrico (Baker, 1979) poderia ser importante caso a eficiência e rapidez das proteções de terra fossem essenciais. Porém, as proteções de terra não são suficientemente rápidas para impedir a evolução do arco elétrico para um arco trifásico, o que pode tornar as proteções de terra inoperantes (Dunki-Jacobs, et al., 2007); (Dunki-Jacobs, 1986). Mesmo com esta limitação, os ajustes das proteções de terra para as correntes de arco devem ser almejadas, respeitando-se a seletividade das proteções, e mesmo que haja outras alternativas mais eficientes de proteção contra o arco elétrico. Desta forma, a corrente de arco pode ser estimada em 38% do valor da corrente de curto trifásico sólido para sistemas de 480V (Dunki-Jacobs, et al., 2007), baseando-se em modelos matemáticos mais imprecisos, que resultaram nos valores de corrente de arco ilustrados na tabela 2.2 e comumente utilizados, ainda hoje, na BT. Há pesquisas mais recentes que sugerem equações para se determinar a tensão mínima do arco auto-sustentável baseadas no comprimento do arco e na corrente de falta trifásica no ponto do arco (Malmedal, et al., 2000), (Arcing-Fault Models for Low-Voltage Power Systems, 2000) e que poderiam, no futuro, prover os meios de se calcular a corrente de arco com maior precisão. A tabela 2.2 foi desenvolvida para o caso específico de um espaçamento fixo de 2 polegadas entre a barra nua energizada e a terra, onde se assumiu como requerendo uma tensão de centelhamento de arco de 375V. Isto significa que painéis com barras de espaçamentos diferentes, sob outros

níveis de tensão, e outros tipos de faltas à terra (ex: trifásica e fase-fase) requerem o uso de outros fatores multiplicativos não apresentados na citada tabela. O fator 0% mostrado na tabela 2.2, para sistemas de 208V/120V, vem do fato de que a tensão de pico de $120V_{rms}$ ser $120\sqrt{2} = 170V$, isto é, menor que a tensão de centelhamento de 375V, determinada como um valor aplicável aos espaçamentos típicos de equipamentos. Se uma falta com arco à terra for iniciada e ocasionada, por exemplo, pela queda de uma ferramenta metálica, o arco será incapaz de se reinicializar e, portanto, torna-se auto-extinguível (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

A tabela 2.2 também sugere que, para sistemas de 480V com o neutro solidamente aterrado, os ajustes das proteções fase-terra devem ser até 38% do valor do curto trifásico, além de considerar a restrição da seletividade entre as curvas de proteção. Como foi explicado anteriormente, estas considerações de ajuste para as proteções fase-terra são parcialmente eficazes contra o arco elétrico havendo, entretanto, a necessidade de se tomar outras medidas mitigatórias muito mais eficientes e que estão fora do escopo deste trabalho, pois não dependem do tipo de aterramento de neutro adotado (Add Trip Security to Arc-Flash Detection for Safety and Reliability IEEE/Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 10-13 March, 2009), (Tripping with the Speed of Light: Arc Flash Protection, 2007), (Schweitzer Engineering Laboratories), (Rocha, 2011), (Lee, 2009), (Jamil, et al., 1997).

Tabela 2.2 - Corrente de falta de arco elétrico em percentagem do valor da falta trifásica sólida (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Tipo de falta a arco	480Y/277V	208Y/120V
Trifásica (F-F-F)	89%	12%
Fase-fase (F-F)	74%	2%
Fase-Terra (F-T)	38%	0%

Na eventualidade de o calor e os gases gerados pelo arco, dentro de um ambiente suficientemente confinado, produzirem o plasma, que é o ar quente e ionizado nas redondezas próximas ao arco, haverá a escalada mais rápida do arco F-T para um arco F-F-T, ou mesmo para um arco F-F-F-T. Devido à rápida evolução do arco F-T, os pesquisadores concluíram que a evolução da falta com arco F-T para uma falta multifase pode ocorrer de forma tão rápida (1 ou 2 ciclos) que deixará a proteção de terra inoperante provocando grandes danos nos equipamentos (Dunki-Jacobs, 1986).

2.5 SISTEMAS SOLIDAMENTE ATERRADOS E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Em sistemas com o neutro solidamente aterrado, os motores de BT não são normalmente protegidos por um relé de falta à terra dedicado (ex: 51N, 51TN, 50GS). Nesta situação, o calor desenvolvido por uma falta à terra causa severos danos que podem também atingir o núcleo e deixar o motor completamente danificado. Motores de BT em sistemas solidamente aterrados são protegidos normalmente contra faltas à terra pelos dispositivos magnéticos instantâneos das proteções de fase. Desta forma, o dano aumenta consideravelmente em função da potência do motor. Se não houver nenhuma proteção de falta à terra, isto implica que o motor é dispensável. Os efeitos de saturação dos “*ground-sensors*” com TCs de núcleo de ferro limitam a detecção de altas correntes fase-terra, próprias de sistemas solidamente aterrados conforme discutido anteriormente no item (2.2.2). Restam as proteções de falta residual à terra com relés 51N acoplados a TCs conectados na forma residual, que não são tão eficientes por serem geralmente temporizadas, conforme discutidas no item (2.2.1), para permitir a partida de motores, as proteções com relé de fuga à terra discutidas no item (2.2.3), e as proteções de retaguarda “*ground-return*” (51TN) temporizadas conforme apresentado no item (2.3). O *IEEE Guide for AC Motor Protection*, no seu item 5.4.5, também não fornece uma solução eficiente para a proteção de terra de motores, reafirmando simplesmente que os relés de fase, os dispositivos diretos de disparo e os fusíveis fornecem algum nível de proteção de terra para motores em sistemas solidamente aterrados, conforme ilustrado na figura 2.10 (retirado da referência da Fig. 3.19 e da Tabela 3.1 do *IEEE Guide for AC Motor Protection*). Para os motores de maior potência, relés de terra podem ser utilizados, tanto na conexão residual dos TCs (51N ou 51G), como pelo TC toroidal do “*ground-sensor*”. Quanto ao “*ground-sensor*”, o *IEEE Guide for AC Motor Protection* não recomenda ou fornece qualquer valor de ajuste ou especificação de sensibilidade para a proteção de motores de BT em sistemas solidamente aterrados, deixa somente recomendado o uso da função de terra 51N.

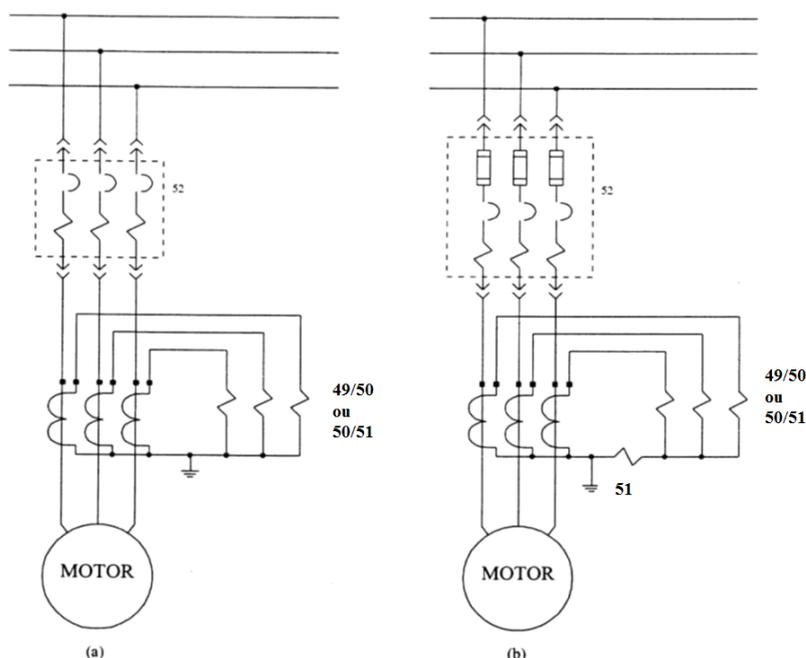


Figura 2.10 – Formas de proteção por relés e disjuntor para motor de BT recomendadas pelo “*IEEE Guide for AC Motor Protection*”

Pelo exposto, motores operando na BT em sistemas solidamente aterrados são geralmente protegidos contra faltas à terra pelos elementos magnéticos instantâneos de proteção de fase, apresentando a possibilidade de danos internos consideráveis à medida que a potência do motor for maior. Se não houver proteção de falta à terra eficiente, supõe-se que o motor seja descartável e sem importância para o processo produtivo, isto é, após a sua queima, o núcleo laminado pode se fundir, havendo pouca possibilidade de o motor ser recuperado.

Uma possibilidade de tecnologia para uma proteção eficiente de terra para sistemas industriais solidamente aterrados e capaz de superar os problemas de saturação dos TCs de núcleo de ferro são representados pelos TCs de núcleo de ar, do tipo bobina de Rogowski, conforme se discutiu anteriormente no ítem (2.2.2). Estas tecnologias ainda são restritas a alguns fabricantes e apresentam custos maiores do que as formas convencionais de proteção de fase.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas com neutro solidamente aterrado geralmente protegem os motores e equipamentos contra as faltas à terra através das proteções instantâneas de fase que é um método simples e barato. A proteção principal de terra num sistema de neutro solidamente aterrado baseia-se na utilização do tradicional sistema de detecção de

corrente de terra através da conexão residual dos três TCs de fase (50N/51N), conforme mostrado na figura 2.1. Como proteção de “*back-up*” pode-se utilizar um TC no neutro do transformador (51TN), conforme mostrado na figura 2.4, em relação às proteções instantâneas com as quais deve ser ainda seletiva e, portanto, deve ser sempre temporizada. O TC no neutro do transformador deve ter corrente nominal igual ou próxima aos TCs de fase, com o objetivo de evitar a saturação, pois os curtos fase-terra têm a mesma ordem de grandeza dos curtos trifásicos. Para proporcionar uma proteção segura, o relé deve operar o disjuntor principal do secundário do transformador e, se a falta persistir indicando que se trata de um curto fase-terra no próprio enrolamento secundário do transformador, um sinal temporizado deve operar o disjuntor principal no primário do transformador. Portanto, curtos F-T nos enrolamentos secundários do transformador podem ser detectados pelo esquema do TC no neutro do transformador, ou seja, o 51TN, que é temporizado, ou também pela proteção residual 51N no lado secundário, que é também temporizada. Por esta razão, o enrolamento secundário de transformadores necessita de uma proteção de terra mais eficiente, especialmente no caso de transformadores de maior potência.

Em sistemas com o neutro solidamente aterrado, os motores de BT não são normalmente protegidos por um relé de falta à terra dedicado, do tipo “*ground-sensor*”. Nesta situação, o calor desenvolvido por uma falta à terra causa danos severos que podem também atingir o núcleo e deixar o motor completamente danificado. Motores de BT em sistemas solidamente aterrados são protegidos normalmente contra faltas à terra pelos dispositivos magnéticos das proteções de fase instantâneas conforme já mencionado. Desta forma, o dano aumenta consideravelmente em função da potência do motor. Se não houver nenhuma proteção específica de falta à terra, isto implica que o motor é dispensável.

Os “*ground-sensors*” convencionais, de núcleo de ferro, apresentam limitações para detectar altas correntes fase-terra, próprias de sistemas industriais de neutro solidamente aterrados. Desta forma, fica difícil ter uma proteção de terra eficiente, baseada em “*ground-sensors*” que utilizam TCs de núcleo de ferro. Restam as proteções residuais com relés 50N/51N e as proteções “*ground-return*” (51TN). As proteções com relés 50N/51N acoplados aos TCs conectados na forma residual não são tão eficientes, especialmente para o caso de motores, pois são proteções geralmente temporizadas por causa dos transitórios assimétricos de partida de

motores. Além disso, a proteção residual (51N) perde sensibilidade à medida que os TCs de fase sejam projetados para altas correntes de fase. E as proteções de retaguarda “*ground-return*” (51TN) também não são eficientes para os motores, pois são sempre temporizadas para manter a seletividade com as proteções à jusante.

Atualmente, porém, há tecnologias recentemente desenvolvidas de TCs de núcleo de ar, do tipo bobina de Rogowski, por exemplo, e que possibilitam a inclusão de proteções de terra eficientes nos sistemas solidamente aterrados, sendo úteis no caso de proteção de motores de BT. Estes sistemas ainda são restritos a poucos fabricantes e a sua viabilidade técnica e econômica deve ser avaliada em cada projeto em função da importância de cada motor, da potência do motor, dos níveis de curto fase-terra, e dos danos potenciais que as laminações dos motores podem sofrer.

Para a proteção principal de terra de circuitos terminais típicos de motores de BT, descrevem-se a utilização do tradicional sistema de detecção de corrente de terra através da conexão residual dos TCs de fase (50N/51N), e o sistema do relé de fuga à terra (função 64), bem menos conhecido para este tipo de aplicação, e o seu sensor de corrente toroidal, envolvendo todas as fases mais o neutro, se este existir. Não está claro na escassa literatura sobre este tipo de aplicação se esta forma de proteção deve ser temporizada para evitar as correntes assimétricas e transitórias durante a partida de motores e como é a resposta em relação à tensão em função das correntes de curto F-T.

O “*ground-sensor*” 50/51GS com TCs de núcleo de ferro não deve ser usado em sistemas solidamente aterrados, a menos de algumas exceções que não se aplicam às instalações industriais, onde há baixos níveis de correntes de curto e eventuais altas impedâncias no ponto de contato do curto (curtos de alta impedância). Em aplicações industriais, porém, mesmo com circuitos muito longos, em BT, os níveis de curto fase-terra são muito mais altos. O circuito de retorno é, em geral, constituído por uma impedância baixa e projetada para este fim, com circuitos de retorno próximos aos de fase, isto é, com cabos de retorno em cobre nu instalados próximos aos respectivos circuitos de fase, e com malhas de aterramento interligadas de forma a minimizar a impedância de retorno Z_0/Z_1 . Desta forma, em instalações industriais minimiza-se a reatância indutiva do caminho de retorno para um curto fase-terra, maximizando o curto F-T, e a sensibilidade e operação da própria proteção de terra fica mais garantida.

Além disso, altas impedâncias de contato de curto fase-terra são mais difíceis de ocorrer em sistemas industriais com neutro solidamente aterrado por causa da rápida evolução de uma pequena fuga à terra para uma falta à terra sólida.

Outras implicações de sistemas de neutro solidamente aterrado na proteção é a curva *ANSI* de suportabilidade contra curtos F-T passantes no transformador deslocada de 58%. Esta curva deslocada garante a proteção do transformador contra os efeitos térmicos e dinâmicos gerados por um curto F-T no lado secundário, além de proteger contra curtos nos enrolamentos do secundário, através da proteção no lado primário. Para a proteção que está no lado secundário, esta curva *ANSI* deslocada não precisa ser considerada, e nem o ponto de “*inrush*” que também não é visto pela proteção do secundário, apenas pela proteção primária. Outra implicação na proteção dos sistemas de neutro solidamente aterrados é a obrigatoriedade de uso de proteção específica de terra, além das proteções convencionais de sobrecorrente de fase, dentro de determinadas situações, isto é, para correntes nominais de fase maiores que 1.000 A e tensões maiores que 150 V, e sob ajustes específicos para proteção de equipamentos (proteção do ponto “*NEC*”, ou seja, 3.000 A, 1 segundo).

O fenômeno e a natureza do arco elétrico foram descritos, assim como as suas implicações na proteção que apresentam peculiaridades por causa da rápida evolução do arco elétrico do tipo F-T para F-F-T, ou para F-F-F-T, o que pode tornar ineficaz a proteção de terra e causar grande dano aos equipamentos. A proteção contra arcos elétricos, exclusivamente feita pelos relés de proteção de faltas à terra, ou mesmo pelos relés de fase, não é totalmente eficiente e segura. Por esta razão, diversas medidas mitigatórias contra o arco elétrico devem ser tomadas e que fogem do escopo deste trabalho, pois independem do tipo de aterramento de neutro adotado. Porém, é uma boa prática ajustar a proteção instantânea de terra abaixo do valor mínimo provável de arco elétrico, como “*back-up*” de terra, se for possível e sem deixar de implementar outras medidas mitigatórias mais eficientes que também fogem do escopo deste trabalho.

Finalmente, para concluir, não se deve utilizar o sistema de neutro solidamente aterrado na MT em sistemas industriais por causa da alta energia dissipada num curto fase-terra sólido e que poderia inutilizar equipamentos, sobretudo motores e geradores.

3 SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO POR RESISTOR DE BAIXO VALOR E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O *IEEE Std 142* (IEEE, 2007) lista diversas razões para limitar a corrente de falta à terra por meio de uma resistência de neutro de baixo valor (RBV, ou “*LGR - Low Grounding Resistance*”):

- Redução dos efeitos de queimas e danos nos equipamentos elétricos tais como painéis, transformadores, cabos e máquinas elétricas rotativas;
- Redução dos estresses mecânicos em circuitos e equipamentos que conduzem as correntes de faltas;
- Redução do risco de choque elétrico ao pessoal causado por correntes de fuga de falta à terra no caminho de retorno de terra;
- Redução do risco de arco elétrico e de explosão devido ao arco elétrico contra pessoal que possa ter acidentalmente provocado a ocorrência de uma falta à terra, ou que possa estar nas proximidades de uma falta à terra;
- Redução da severidade de afundamento momentâneo de tensão ocasionado pela ocorrência de uma falta à terra;
- Controle de sobretensões transientes.

O sistema RBV é utilizado principalmente na MT. A aplicação na BT é rara pela razão que todos os alimentadores e circuitos terminais deveriam ser equipados com dispositivos de proteção de terra, como os “*ground-sensors*”, ou proteções diferenciais, tornando a proteção economicamente dispendiosa. Mas esta perspectiva pode se alterar devido às novas tecnologias que são técnica e economicamente viáveis tais como, por exemplo, conjuntos TCs/“*ground-sensors*” com bobinas de *Rogowski*, como ocorre em sistemas de neutro solidamente aterrado de BT discutidos no capítulo 2.

Historicamente, o aterramento do neutro em sistemas MT através de resistor de baixa resistência, limitando a corrente de curto sustentado à terra para valores baixos, foi inviabilizado pela relativa falta de sensibilidade dos dispositivos de proteção de falta à terra dos relés residuais 50/51N com TCs de fase na conexão residual (Owen, 1997). Como a relação do TC de fase determina a sensibilidade do relé com a função 51N (conexão residual), um TC 1000- 5 A, por exemplo, servindo um relé com um “*TAP*”

mínimo de 0,5 A irá fornecer uma corrente de “pick-up” de 100 A primários. Baseando-se na regra geral de que a corrente de falta presumida deveria ser de, no mínimo, dez vezes a sensibilidade do relé, o resistor de neutro, então, deveria ser escolhido para limitar a corrente sustentada de falta à terra para não menos do que 1.000 A, um nível bem além da faixa adequada do aterramento de neutro de baixa resistência (150 a 400 A). A severidade do dano ou a queima devidas aos 1.000 A era considerável. Somente até a introdução dos TCs do tipo “ground sensor” na década de 60 foi possível aplicar resistores de neutro limitando a corrente de curto franco à terra em 50 A. Hoje, o método de aterramento por baixa resistência tornou-se uma preferência universal para os sistemas de MT servindo a maioria das plantas industriais que, tipicamente, têm um grande número de motores. Portanto, o aumento de uso de motores maiores e, conseqüentemente, mais caros, que requerem tensões de 2,4, 4,16 e de 13,8kV, por exemplo, criaram na indústria a necessidade de sistemas de aterramento com uma resistência limitadora de curto circuito fase-terra em MT na faixa de 150 a 400 A.

Determinadas referências citam que a escolha do resistor de baixo valor pode estar entre 200 a 1.000 A. Outras citam que a escolha do resistor de neutro, pode ser feita entre 50 a 400 A, pois a corrente máxima suportada por uma máquina elétrica girante está nesta ordem de grandeza, desde que a desconexão seja instantânea, o que é proporcionado pelo “Ground-Sensor” (50GS). Contudo, a referência *IEEE C62.92.3* estabelece outro critério para a escolha de um resistor de baixo valor baseado no conceito de dano proporcional à energia dissipada dada em Ampere.segundo proveniente de uma falta de arco fase-terra de 100 V (*IEEE*, 2005) capaz de vaporizar 1,2cm³ de alumínio ou 0,5cm³ de cobre. Esta referência também define que, abaixo de 150 A, haveria problemas de sensibilidade da proteção. Com este critério de dano em “Ampere.segundo” aplicável aos equipamentos mais comuns, os níveis de corrente de falta à terra foram determinados e definidos entre 200 e 400 A, isto é, os resistores de neutro (RBV) devem estar nesta faixa, conforme o *IEEE C62.92.3*.

O sistema RBV possibilita também a utilização de proteções diferenciais de fase (87T) e de falta à terra restrita (87RGF ou 87G) em transformadores e em máquinas elétricas. A inclinação de restrição percentual é um conceito largamente utilizado pelos relés para garantir a segurança contra falsa operação durante uma falta passante através do transformador causada pelos erros diferenciais devidos aos TCs, TAPs, e às perdas de

magnetização. Quanto maior for a corrente de falta passante, maior será a possibilidade de que o desbalanceamento devido ao desempenho dos TCs, por exemplo, cause uma falsa corrente de erro diferencial. Desta forma, o ajuste das proteções diferenciais baseadas no princípio de restrição percentual deixa, inevitavelmente, uma grande parte dos enrolamentos próximos ao neutro desprotegida. A sensibilidade de ambos os tipos de proteção diferencial, a de fase e a de terra, são dependentes da escolha do resistor de neutro que restringe a magnitude de corrente de curto F-T, restando um valor baixo para sensibilizar o relé diferencial. Por outro lado, no sistema RBV, um resistor de neutro de maior resistência minimiza os danos causados pela dissipação térmica dos curtos F-T através dos equipamentos.

Os relés diferenciais devem também possuir ajustes de restrição de operação em caso de transformadores devido às correntes de “*inrush*”, sobreexcitações, desempenhos de TCs, compensação de magnitude de correntes e diferença de ângulos entre lados primário e secundário do transformador, compensação para o ajuste de TAPs do transformador, etc, que podem, por sua vez, impedir o funcionamento do relé exatamente quando ocorrer uma falha real. Estes outros fatores agem no sentido contrário ao desempenho das proteções diferenciais 87T e 87G e, assim, justificam ainda mais o fato de que o RBV deva ser ainda menor (maior nível de curto F-T) para poder compensar estes outros fatores negativos, e manter uma melhor cobertura da proteção diferencial. Por esta razão, resolvendo-se os problemas relacionados com estes fatores que fogem do escopo deste trabalho, tem-se também uma melhor cobertura e desempenho das proteções diferenciais (87T e 87G).

3.2 DETECÇÃO DE FALTAS

3.2.1 PROTEÇÃO DE FALTA RESIDUAL À TERRA

Conforme visto no capítulo 2, a proteção de falta à terra residual, através da conexão residual dos três TCs de fase, encontra ampla aplicação nos sistemas com o neutro solidamente aterrado, onde as correntes de falta fase-terra são altas, da mesma grandeza das faltas trifásicas.

Por outro lado, a proteção de falta à terra residual deve ser evitada nos sistemas com o neutro aterrado por baixa resistência (entre 50 a 1.000 A, mas usualmente utilizados na faixa de 200 a 400 A) dado que a corrente nominal dos TCs de fase são geralmente

muito altas, o que afeta a sensibilidade da proteção para detectar as faltas à terra da ordem de 400 A, além do fato de as proteções serem temporizadas. Este problema é melhor resolvido com o uso do princípio “*ground-sensor*”, explicado no item subsequente. Para ilustrar o problema de falta de seletividade, na figura 3.1 há os 3 TCs de fase de 500- 5 A, com o 51N na conexão residual. O ajuste em 10% corresponde a 50 A que é superior ao ajuste de 20 A (10% do resistor de neutro de 200 A) do relé à montante (“*upstream*”) 51G ou 51TN do neutro do transformador.

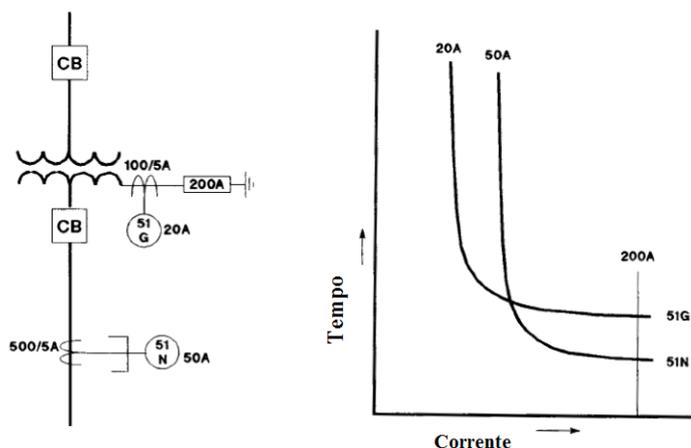


Figura 3.1 – Problema de seletividade do relé 51N na conexão residual com TCs de fase de alta relação, com o 51G no neutro do transformador (Dunki-Jacobs, et al., 2007), (Yu, 1991)

Para resolver este problema de falta de seletividade, o resistor de neutro deveria ser aumentado de 200 A para 500 A, no mínimo. Mas a melhor solução seria abandonar a conexão residual no ramal de saída, neste caso, e adotar o “*ground-sensor*”.

3.2.2 PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA POR “*GROUND-SENSOR*”

A proteção “*ground sensor*” é também denominada por “*zero sequence sensor*”, ou ainda por “*core balance CTs*”. A proteção “*ground-sensor*” é obtida através de um TC do tipo janela ou toroide, que envolve todos os condutores, com um relé especialmente casado com este TC, com características instantâneas ou temporizadas.

A proteção “*ground-sensor*” (50GS/51GS) substitui com vantagem a proteção 51N (conexão residual com os TCs de fase) nas aplicações em sistemas com o neutro aterrado por baixa resistência, pois não está sujeito às falsas correntes residuais do esquema 51N. Entretanto, deve-se prevenir contra as operações intempestivas devidas às correntes desbalanceadas de “*inrush*” que podem saturar o núcleo do TC.

A grande sensibilidade e velocidade de operação do 50GS contribui para reduzir os danos de queimas devido às faltas à terra, em especial, no controle de danos de queima em núcleos de máquinas elétricas.

Os sistemas de MT com RBV apresentam uma redução do risco de arco elétrico e de explosão devido ao arco elétrico contra pessoal que possa ter acidentalmente provocado a ocorrência de uma falta à terra, porém, não elimina o risco e a evolução do arco que já se origina de uma falta a arco que não envolva a terra. Para sistemas com o neutro aterrado por resistência, o percentual aplicado sobre o nível de curto trifásico da Tabela 2.2, para se obter a corrente de arco, não se aplica, pois as correntes de falta de arco fase-terra estão limitadas pelo resistor de neutro. Os sistemas de MT são construídos de forma diferente em relação aos de BT pois, frequentemente, operam em sistemas de neutro aterrado por resistência. Isto não quer dizer que faltas de arco à terra não ocorram na MT mesmo com resistores de neutro (de 400 A, por exemplo) por causa das eventuais formas de origem do arco. Além disso, os espaçamentos são maiores entre os barramentos e a terra, o que requer maiores tensões de centelhamento ou de arco.

Num sistema trifásico balanceado conforme mostrado na figura 3.2, ou mesmo num sistema trifásico desbalanceado a 4 fios, o fluxo magnético produzido por cada uma das correntes de fase e de neutro, cancelam-se mutuamente.

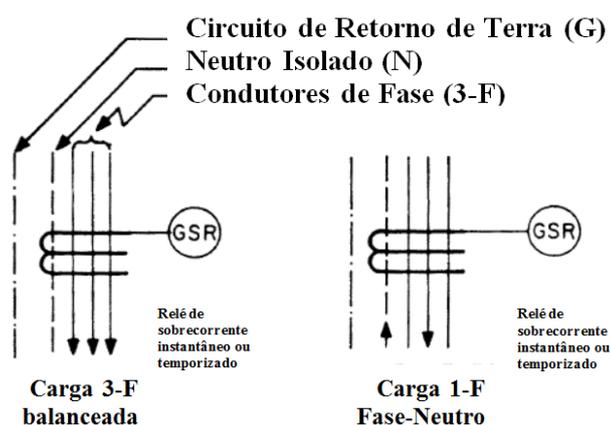


Figura 3.2 – Operação do relé "ground-sensor" (GSR). À esquerda: relé é insensível para correntes de cargas trifásicas balanceadas; À direita: relé é insensível às cargas monofásicas, se o condutor de neutro estiver inserido dentro do TC

Uma corrente de falta à terra retorna através de um circuito externo ao TC conforme mostrado na figura 3.3 e, portanto, não produz um fluxo magnético zero por causa da corrente à terra que flui num dos condutores de fase. Portanto, o TC produz uma

corrente de saída ao relé somente para correntes de falta à terra, e nenhuma corrente significativa ao relé para correntes normais de fase. Altas correntes de fase, no entanto, podem causar uma saturação "local" no núcleo do TC. A magnitude de corrente na qual este fenômeno acontece depende da configuração dos TCs, da razão de transformação, da distribuição espacial dos condutores de fase dentro da janela ou do toroide do TC, e da sensibilidade do relé. Por esta razão, as instruções dos fabricantes quanto à forma de instalação devem ser seguidas.

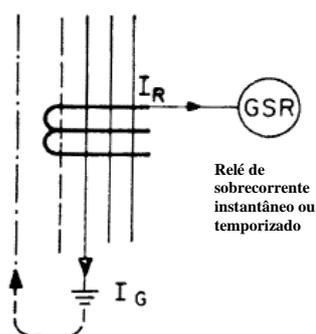


Figura 3.3 - Proteção pelo relé "Ground-Sensor" (GSR). Para a condição de falta à terra, o relé é sensibilizado somente para as componentes de corrente de falta à terra

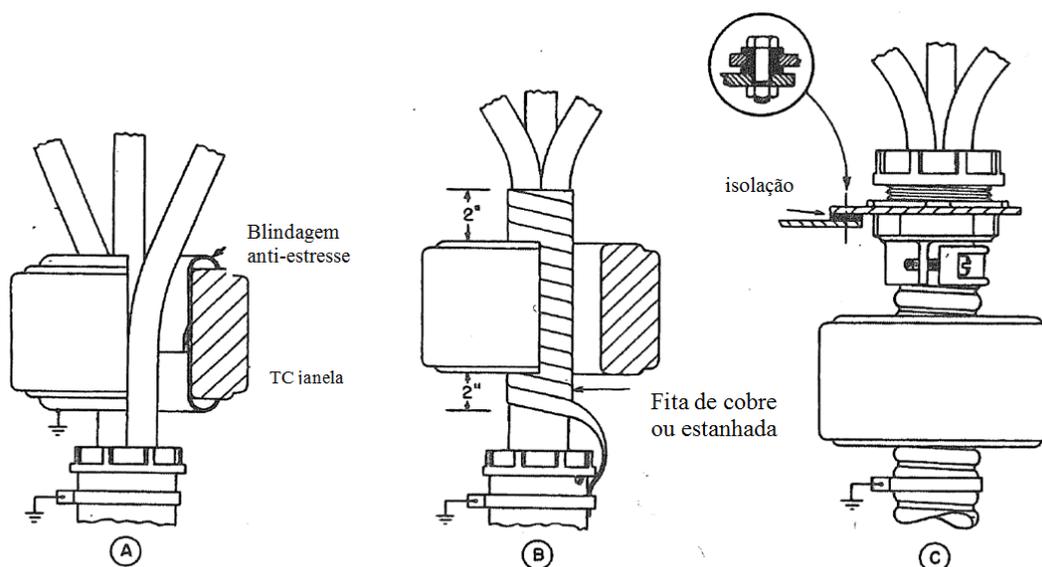
Da mesma forma, como acontece para o caso da proteção de falta à terra residual, quando o ajuste de "pick-up" do relé estiver acima do pior caso de corrente devido ao desbalanceamento das cargas fase-neutro, o condutor de neutro poderia passar por fora do TC toroidal para o caso de um circuito alimentador de carga monofásica. Neste caso o relé é sensibilizado para a componente de corrente de neutro e para a componente de corrente de falta à terra inferior ao "pick-up" do relé.

3.3 FORMAS DE INSTALAÇÃO E EFEITOS DE SATURAÇÃO LOCALIZADA SOB CORRENTES EQUILIBRADAS NA PROTEÇÃO "GROUND-SENSOR"

O termo "ground-sensor" compreende a combinação de um TC toroidal de 50- 5 A ou de 100- 5 A, geralmente de núcleo de ferro, e com um relé de sobrecorrente. O TC deve envolver todos os três condutores de fase (quatro, se for um sistema BT a 4 fios). O relé pode ser instantâneo (50GS) usado para circuitos terminais, ou temporizado (51GS) usado em circuitos à montante onde se necessita de seletividade com outros relés de falta à terra à jusante.

A isolamento do TC é geralmente para baixa tensão devido à limitação do dielétrico na construção do toroide (Dunki-Jacobs, et al., 2007). Porém, é possível utilizar TCs de classe de tensão de 1 kV em tensões mais altas, se os cabos do circuito de potência

forem isolados e blindados de forma compatível para a tensão do sistema. O problema é que, para tensões muito altas há o estresse do campo eletrostático entre um cabo não blindado e a parte interior da janela do TC toroidal. Neste local, pode também ocorrer o efeito corona, isto é, a ionização do ar que gera ozona na periferia interna da janela toroidal e que pode deteriorar a isolamento. Por esta razão, os condutores de MT (acima de 2,4kV) devem ser unidos e posicionados na posição central da janela para assegurar uma maior distância entre os cabos não blindados e a periferia interna da janela do toroide. Alternativamente, estes condutores podem ser aterrados através de uma fita de blindagem (blindagem anti-estresse) de cobre trançada ou uma fita de blindagem semi-condutora conforme mostrado na figura 3.4 (A, B e C). A literatura não impõe limitações de utilização na MT de TCs toroidais com isolamento de BT, desde que a isolamento da blindagem anti-estresse magnética seja compatível com a classe de tensão do circuito de potência para os cabos não blindados mostrados na figura 3.4.



Cabo não blindado

Figura 3.4 - Detalhe de instalação do toroide do “ground-sensor” no circuito com cabos não blindados usando-se uma blindagem anti-estresse magnética; e fita trançada aterrada de latão ou cobre (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Caso o cabo seja armado, a armação já oferece a blindagem eletrostática necessária, porém, certos cuidados devem ser tomados quanto à terminação desta armadura através dos cones de alívio de tensão, quanto à instalação e ao aterramento, pois qualquer corrente de falta à terra deverá passar por dentro do toroide “uma ou três vezes” para evitar dessensibilizar a proteção, conforme a figura 3.5 (D, E e F).

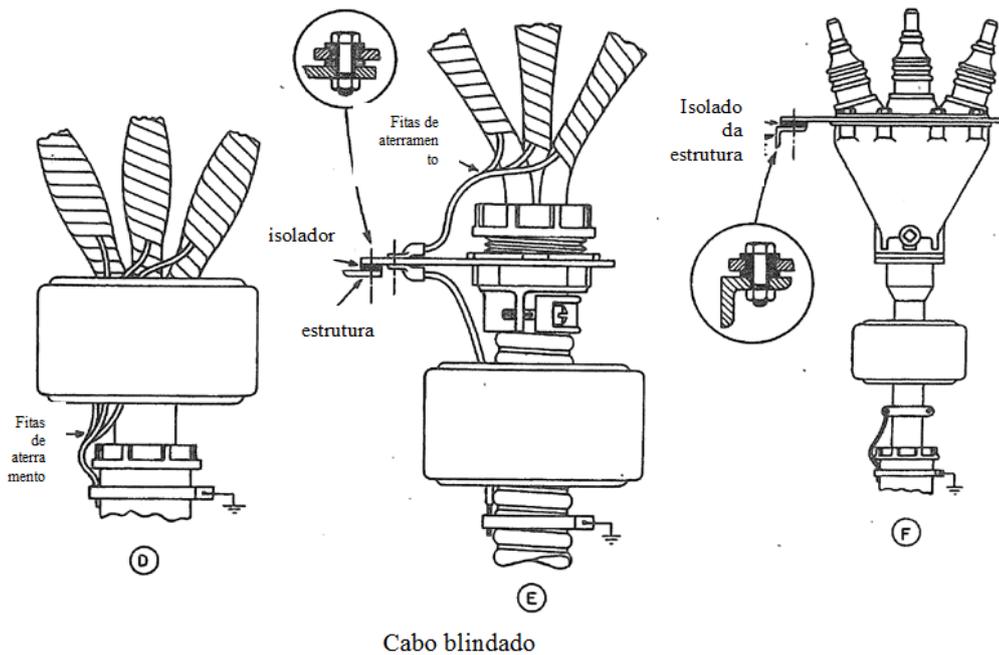


Figura 3.5 - Detalhes de instalação do TC do “ground-sensor” em cabos blindados normalmente utilizados para MT (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Para explicar, considera-se que uma corrente de falta à terra passa ao longo de um dos condutores de fase através do TC no sentido de cima para baixo na figuras 3.5. A corrente de retorno para cima procurará o caminho mais próximo do circuito condutor, isto é, ao longo da armadura do cabo, o que cancela o fluxo magnético da corrente de falta à terra que flui para baixo, em sentido contrário e, portanto, dessensibilizando o relé “ground-sensor”, conforme mostrado de forma esquemática na figura 3.6(a). Para evitar que a corrente de retorno à terra passe através do TC duas vezes, a armadura do cabo deve ser aterrada abaixo do TC, conforme a figura 3.6(b), e a terminação do cabo deve ser isolada da estrutura de suporte do cabo. Desta forma, a corrente de retorno seguirá o caminho de terra sem passar através do TC, isto é, a corrente de falta à terra, através do condutor de fase em falta, passa somente “uma vez” através do TC.

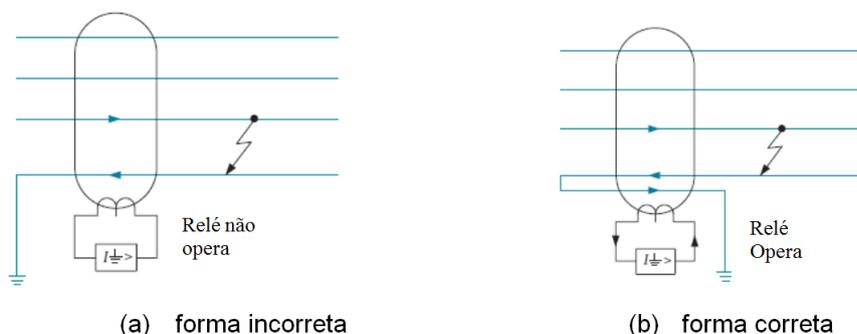


Figura 3.6 – Curto-Circuito F-T e posicionamento do TC toroidal em relação ao aterramento da blindagem do cabo nas formas: (a) incorreta; e (b) correta (Alstom Guide)

Para distribuir o estresse eletrostático na isolamento do cabo próximo à área de terminação, a fita de blindagem de cada condutor deve ser aterrada, roteando-se a fita

de cobre trançado de volta através do TC. A porção da corrente de falta à terra que retorna através da armadura do condutor será conduzida à terra no ponto de aterramento antes do TC, mas a parte desta corrente que sobe através blindagem do cabo passará por dentro do TC até o cone anti-estresse, onde será conduzida de volta através da fita de blindagem passando novamente por dentro do TC pela “terceira vez”. A porção de corrente que sobe através da blindagem do cabo, mesmo não sendo significativa por causa da resistência ôhmica maior da fita da blindagem, tenderia a dessensibilizar o relé. Correntes residuais que fluem durante a operação normal podem limitar a aplicação da proteção “*ground-sensor*”.

Quando os condutores conduzem correntes de curto-circuito muito altas, pode haver uma saturação local no núcleo dos TCs, induzindo-se uma tensão líquida no secundário, mesmo que as correntes primárias estejam perfeitamente balanceadas, conforme ilustrado pela figura 3.7, 3.8 e 3.9 (Dunki-Jacobs, et al., 2007), e (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998). Na figura 3.7 o efeito de correntes trifásicas balanceadas no TC toroidal é ilustrado da seguinte forma: em (A) os condutores estão bem separados que, quando conduzindo altas correntes, produzem saturação localizada que resulta em falsa operação do “*ground-sensor*”; em (B) há dois conjuntos de condutores paralelos dentro do toroide que reduzem a saturação localizada através de um arranjo do feixe de condutores bem firme e centralizado; e em (C) a saturação está localizada como em (A) ou (B), porém, pode ser reduzida distribuindo-se totalmente os enrolamentos do TC toroidal ao longo de todo o comprimento do toroide.

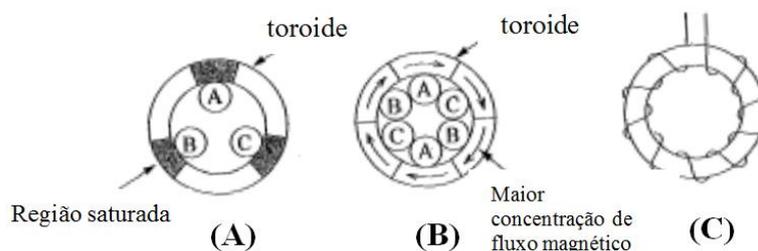


Figura 3.7 - Efeito de correntes trifásicas balanceadas no TC toroidal (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Na figura 3.8 são apresentados outros detalhes de instalação ilustrando o arranjo dos cabos internos através do toroide para circuitos com 2 cabos por fase, colocados na forma correta à esquerda, ou na forma errada, à direita. A figura 3.8, do lado direito, mostra a distância mínima da curva do próprio cabo para evitar o disparo intempestivo devido à ação de campos eletromagnéticos induzidos do próprio circuito.

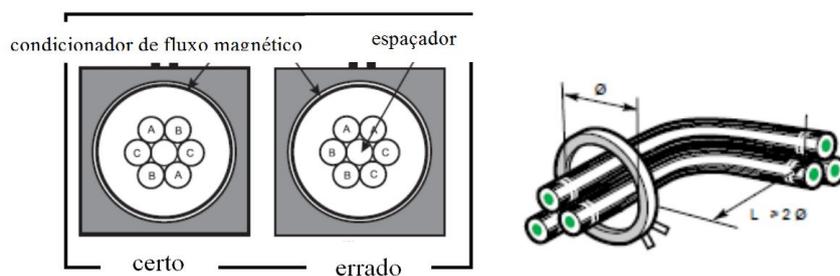


Figura 3.8 - Detalhes de instalação ilustrando o arranjo dos cabos internos através do toroide para circuitos com 2 cabos por fase no corte à esquerda; e distâncias recomendadas do circuito em função da dimensão do toroide, à direita (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998)

A figura 3.9 mostra outro detalhe referente à manga de blindagem magnética colocada em volta dos cabos, que ficam dentro do toroide, reduzindo o risco de disparo devido aos efeitos magnéticos dos picos de corrente.

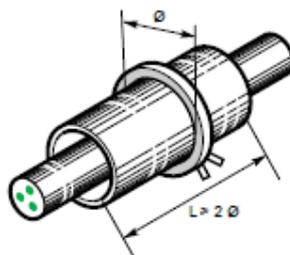


Figura 3.9 - Detalhe referente à manga de blindagem magnética colocada em volta dos cabos (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998)

Para evitar o problema de saturação localizada, mesmo com correntes equilibradas, as seguintes medidas são implementadas (Dunki-Jacobs, et al., 2007):

- Os condutores devem estar firmemente presos no centro do TC, inclusive para evitar movimentação destes cabos durante os esforços eletromecânicos provocados pelas correntes de curto-circuito;
- Se houver dois condutores por fase no circuito (6 condutores no total), arranjar os 6 condutores conforme mostrado em (B) na figura 3.7. Os condutores são mostrados separados, mas devem, de fato, ficar juntos e centralizados;
- Escolher um TC toroidal tendo enrolamentos distribuídos de forma completa ao longo de todo o comprimento do toroide;
- Instalar o TC toroidal em volta de um condutor magnético, formando um envelope magnético que tende a distribuir o fluxo concentrado em algumas partes do toroide, diminuindo os efeitos de saturação localizada, conforme mostrado na figura 3.10;

- Conectar o TC a um 51GS, ou a um relé 50GS capaz, através de seu próprio projeto, de anular os transientes de 6 a 12 ciclos, liberando-se assim dos efeitos de altas correntes.

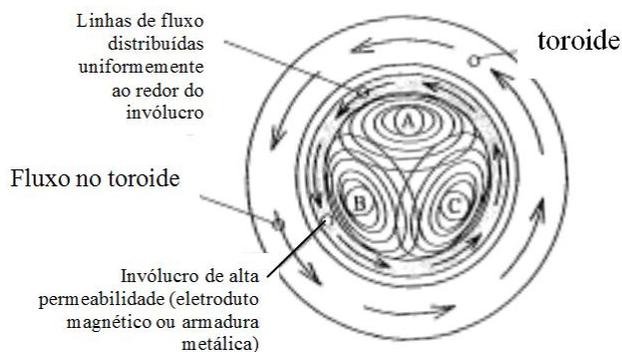


Figura 3.10 - Propriedades de permeabilidade magnética da armação ou blindagem metálica do cabo, ou do eletroduto metálico tendem a reduzir a saturação localizada no toroide (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Em aplicações muito específicas, que estão fora do escopo deste trabalho (ex: detecção de baixíssimos níveis de corrente de falta à terra em minas, hospitais, etc), os núcleos dos TCs da proteção “*ground-sensor*” podem ser enrolados com uma técnica especial para reduzir a interferência eletromagnética de condutores externos (que podem ser a parte externa dos próprios condutores que passam através do toroide), de forma a anular a ação dos campos magnéticos externos através de duas camadas de enrolamentos, enrolados simetricamente, porém em sentido contrário, conforme mostrado na figura 3.11 (Novak, et al., 1988). Assim, cada espira está em série aditiva com o fluxo interno do toroide, porém, cada par de espiras auto-cancela o fluxo eletromagnético externo, eliminando as interferências provocadas pelos condutores próximos (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998).

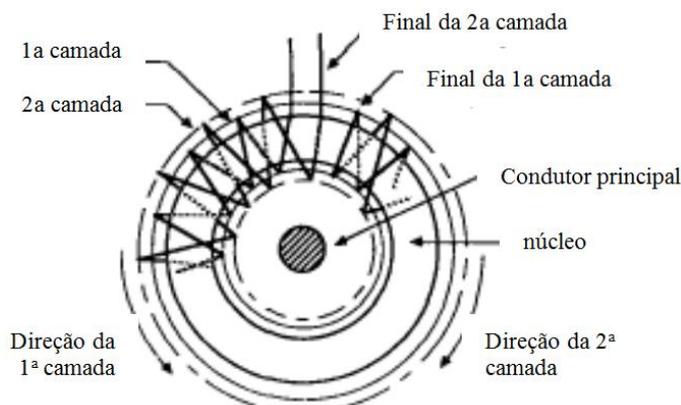


Figura 3.11 - Técnica de enrolamento regressivo (Novak, et al., 1988)

Estes núcleos são de alta permeabilidade magnética, trabalham com alta densidade de fluxo magnético, e apresentam características de ciclo de histerese e baixas perdas

com “loop” quadrado. O toroide proporciona um caminho magnético fechado segregando o fluxo magnético, o que proporciona um alto grau de acoplamento e minimiza o fluxo de dispersão. Isto tudo produz baixas correntes de excitação de TC, o que reduz o erro de TC. Além disso, os TCs têm um “burden” resistivo constante proporcionado pela eletrônica do relé digital. Com todos estes fatores em conjunto, obtêm-se TCs de alta classe de exatidão (Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114, 1998), e *Vigirex – Technical Aspects* – Merlin Gerin (Schneider Electric, 2008), especialmente para as aplicações onde se requer alta sensibilidade com a proteção “ground-sensor”. Em outras palavras, várias alternativas tecnológicas estão disponíveis, porém, são restritas a poucos fabricantes e podem ser melhor aplicáveis em determinadas situações fora da área industrial, mas o seu conhecimento é indispensável para uma análise de viabilidade técnica e econômica, e para a especificação de uma proteção de terra eficiente, baseada em “ground-sensors”, em projetos da área industrial.

3.4 EFEITOS DE SATURAÇÃO COM CORRENTES DESEQUILIBRADAS DE FALTA FASE-TERRA E DESEMPENHO DA PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR”

O TC de núcleo de ferro da proteção “ground-sensor”, que é em geral de 50- 5 A, satura (parcialmente) mesmo na presença de correntes de falta à terra moderadas, isto é, os “ground-sensors” operam sempre com um certo grau de saturação sob condições normais (Bridger, 1997). A sensibilidade de TCs econômicos, de baixas razões de espiras (50- 5 A), na presença de correntes de falta à terra moderadas é um tanto ruim, porém aceitável. Por causa desta saturação devida ao pequeno núcleo do TC, a maior parte da corrente no enrolamento secundário é absorvida na forma de corrente de excitação. O efeito de saturação tende, porém, a proteger o relé, pois a tensão aplicada no mesmo não excederá determinado valor. Também, pelo fato de haver saturação (parcial), é importante verificar se o valor eficaz da corrente altamente distorcida fornecida pelo TC é suficiente para operar o relé sob as condições e nível de curto-circuito máximo especificado, o que leva alguns usuários a questionar se os TCs usados comumente com o relé “ground-sensor” são adequados para o serviço, ou mesmo se determinados relés são apropriados para o uso como 50GS. Assim, muita ênfase é colocada na demonstração, por cálculo ou por teste, de que o conjunto relé 50GS e o seu(s) TC(s) são capazes de operar sob as correntes de curto fase-terra máximas especificadas (Bridger, 1997).

Desta forma, por causa do efeito de saturação causado pelos níveis de correntes de curto fase-terra, a aplicação do “*ground-sensor*” é determinada, principalmente, pelo tipo de aterramento de neutro do sistema (Linders, 1995), isto é, pode ser utilizado nos sistemas de aterramento de neutro RBV ou RAV, mas não nos sistemas de neutro solidamente aterrado.

Nos sistemas de neutro aterrado por resistor de baixa à média resistência, onde o valor do resistor de aterramento é geralmente escolhido para limitar a magnitude da corrente de falta à terra, a proteção de circuitos alimentadores pode ser feita pelo TC toroidal, ao redor dos três condutores de fase, trabalhando com um relé instantâneo (50N ou 50GS). Este tipo de releamento deve ser aplicado somente para circuitos de motores e circuitos do lado delta de transformadores (Linders, 1995), mesmo que estes sejam equipados com fusíveis primários, de forma que haja a remoção completa das 3 fases devido à falta fase-terra, incluindo ainda aquela entre o fusível e o enrolamento primário do transformador (Dunki-Jacobs, et al., 2007). Embora os fusíveis sejam ideais para a proteção contra altos curtos trifásicos, são geralmente insensíveis para a falta fase-terra nos sistemas de baixa resistência (RBV). Desde que os TCs sejam, em geral, de baixa relação de espiras nestas aplicações, os relés de tempo inverso não devem ser aplicados sem uma análise cuidadosa, pois os TCs podem ir à saturação antes de o relé operar. A relação nominal do TC é geralmente escolhida como sendo a metade da corrente nominal de curta duração do resistor de neutro. Desta forma, com a relação do TC pela metade da corrente nominal do resistor de neutro, e o ajuste de 10% da corrente do resistor, usualmente feito para o “*pickup*” do relé, a corrente de curto fase-terra presumida estará mais dentro da faixa de sensibilidade do relé, conforme esquematizado na figura 3.12.

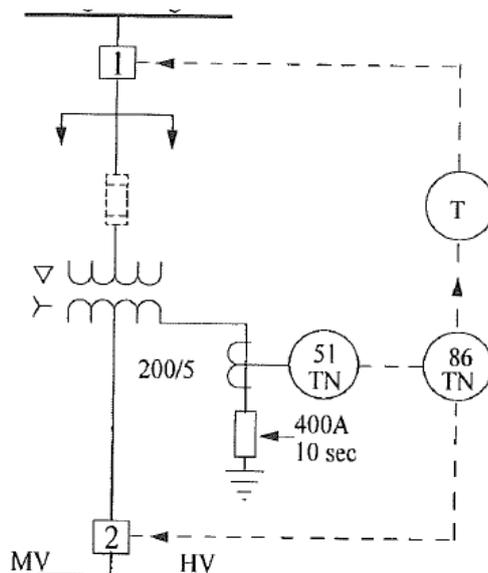


Figura 3.12 – Aplicação da proteção “Ground Return” em sistema RBV de 400 A, TC 200-5 A, com atuação do relé 51TN diretamente no disjuntor secundário abrindo o disjuntor primário com temporização (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Uma vez escolhido o resistor de neutro, a corrente nominal do TC pode ser igual ao valor nominal de corrente do resistor, o que proporciona cobertura de 90% do enrolamento do motor, ou a metade daquele valor para aumentar a sensibilidade do relé e proteger o enrolamento do motor em 95%, no sentido do terminal para o ponto de neutro. Além disso, a última parte de 10% ou de 5%, próxima ao neutro do motor, poderia ficar descoberta, isto é sem proteção, pois é a parte menos sujeita aos estresses mecânicos devidos às forças centrípetas e às descargas atmosféricas indiretas quando o motor é instalado em campo, distante da subestação.

Um conhecimento do relé digital é também importante para analisar a resposta do mesmo diante dos casos onde há elevada saturação do TC. Não basta somente ter o valor da corrente eficaz verdadeira (“*true RMS*”) dos picos de corrente reproduzidos pelos secundários dos TCs e compará-lo com o valor de “*pick-up*” do relé como é normalmente analisado por ferramentas de software (IEEE PSRC Committe, 2001 e 1996) amplamente utilizadas, onde se compara a corrente eficaz das formas de onda parcialmente saturadas com o valor eficaz de “*pickup*” do relé. Portanto, o desempenho do relé 50GS, ou o conjunto “par casado” relé/TC deve ser levado em consideração, pois os níveis de corrente eficaz são muito menores que a corrente de “*pickup*” do relé, não havendo ferramental de cálculo disponível para uma análise como seria feito normalmente para outros relés pela metodologia apresentada na literatura através do cálculo da corrente eficaz disponibilizada ao relé (IEEE PSRC Committe, 2001 e 1996);

(Cossé, et al., 2007); (Bridger, 1997). Alguns fabricantes utilizam filtros especiais para detectar as correntes de falta fase-terra sob alto nível de saturação do TC (Zocholl, 2004), o que pode conferir um desempenho melhor para determinados conjuntos relé 50GS/TC. Há, portanto, diversas variáveis para serem consideradas para se determinar o desempenho do “*ground-sensor*” e por esta razão há artigos que questionam (Cossé, et al., 2007) as formas atuais de se calcular a saturação de TCs, pois há a necessidade de se considerar a resposta do relé para os níveis de curto juntamente com a confirmação da razão do TC e de sua classe de exatidão.

A precisão de TCs economicamente viáveis e de baixa relação de espiras (50- 5 A) na presença de correntes de falta à terra moderadas é ruim, mas aceitável se for aplicada de forma criteriosa. Na figura 3.13 (Dunki-Jacobs, et al., 2007) a corrente I_R (curva em tracejado contínuo), vista pelo relé, é descontínua e de forma triangular, causada pela alta saturação do TC. Nota-se o decaimento rápido da curva, o que reduz mais ainda a corrente que pode sensibilizar o relé. Um TC de maior classe de exatidão iria se saturar sob maiores correntes, mostradas na figura 3.13 pela curva pontilhada da corrente I_R . A área sob a curva de I_R (tanto a curva contínua, como a tracejada) representa a energia transferida ao núcleo do relé. A curva tracejada tem, portanto, mais “energia” (ou “conteúdo informacional” que pode ser processado pelo algoritmo do relé) e que pode, desta forma, partir o relé com maior precisão e maior “*burden*”. Também é importante que esta onda triangular de corrente tenha corrente de frequência fundamental suficiente para ser capaz de sensibilizar o relé, considerando as mencionadas capacidades de processamento do mesmo.

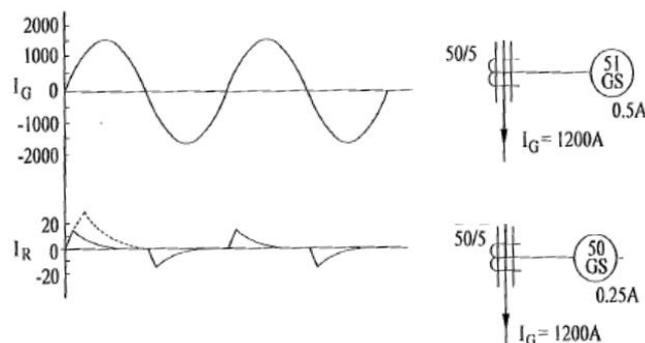


Figura 3.13 – Ilustração de características operacionais de TC de “*ground-sensor*” típico: corrente senoidal 60Hz primária I_G de falta à terra; e a correspondente corrente secundária I_R de falta à terra, vista pelo relé (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

3.5 OUTRAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA PROBLEMA DE SATURAÇÃO EM TCS

Há também, atualmente, outras alternativas tecnológicas para o problema da saturação, como o uso de TCs com “gaps” de ar, bobinas de *Rogowski* (Mardegan, 2012), e sensores óticos de corrente.

A comparação das características V-I (curva BxH) para os TCs de núcleo de ferro sem “gap” (normal), TCs com crescentes comprimentos de “gaps”, acopladores lineares, e as bobinas de *Rogowski* (núcleo inteiramente de ar) estão mostrados na figura 3.14 (IEEE PSRC, 2010) e sugerem que há materiais mais promissores para os núcleos de TCs que apresentam uma maior linearidade ao longo de altas correntes em relação aos TCs com núcleo de ferro sem o entreferro.

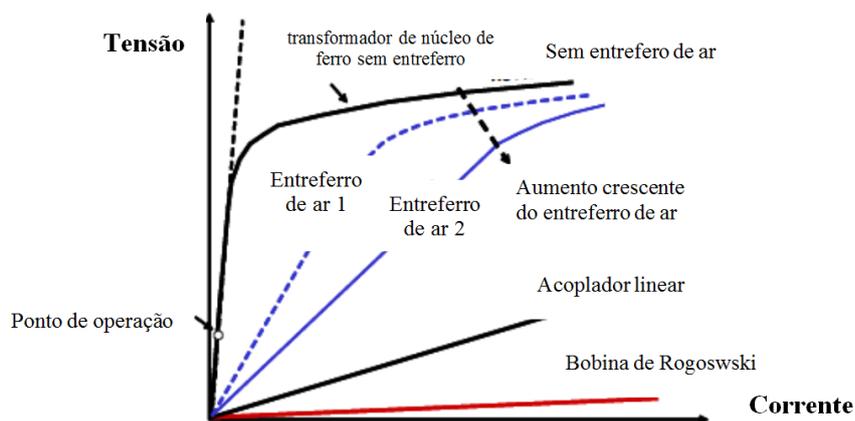


Figura 3.14 - Características BxH ou V-I de TCs com núcleos de ferro sem “gap”, com “gaps”, com acopladores lineares, e com a bobina de *Rogowski* (IEEE PSRC Committee, 2001 e 1996)

Para análise entre o caso da bobina de *Rogowski* e o TC de núcleo de ferro, é importante estimar os problemas e espaços de instalação e as limitações dos TCs de núcleo de ferro de proteções “*ground-sensor*” em aplicações sob altas correntes presumidas de curto F-T, sob a influência dos campos eletromagnéticos gerados por altos níveis de curto trifásico e por altas correntes de carga, e o ajuste de “*pick-up*” desejado em aplicações sensíveis. A tecnologia da bobina de *Rogowski* pode ainda apresentar vantagens nos casos onde a bitola dos condutores de fase não permite que sejam envolvidos pelo tamanho típico da janela do TC toroidal de núcleo de ferro do “*ground-sensor*”.

3.6 IMPLICAÇÕES DO SISTEMA DE ATERRAMENTO RBV NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

A figura 2.5 (capítulo 2) mostra o efeito das correntes de 3 tipos de falta no secundário de transformador em Y refletidas no primário em Δ . No caso de uma falta F-T no lado secundário em Y, supondo o sistema com neutro aterrado por resistência RBV, o lado em delta do primário iria sofrer uma corrente de 0,577PU em duas fases sem contar ainda o efeito atenuante do resistor RBV no neutro. Desta forma, o uso de fusíveis que são comuns para a proteção de transformadores com o neutro solidamente aterrado não seria mais possível em vários casos de sistemas RBV. Como exemplo numérico, uma corrente de falta sólida F-T no secundário de um transformador de 10MVA, 13,8/4,16kV, com o neutro aterrado por RBV de 400 A produziria uma corrente de falta F-T no lado primário de somente 69,6 A, a qual é bem menor do que a corrente de plena carga de 418 A do transformador. Por esta razão, não é possível usar fusíveis de proteção no lado primário contra as faltas externas F-T do lado secundário em determinados sistemas RBV. Neste caso, há a necessidade de se usar relés de proteção ou, mais precisamente, relés diferenciais, que são mais sensíveis do que as proteções de fase para se detectar as faltas F-T em sistemas de neutro aterrado por baixa resistência (RBV).

A corrente de falta à terra ao longo do enrolamento do transformador depende do valor de impedância de aterramento e é proporcional à distância do ponto da falta ao ponto de neutro, pois a tensão de falta é diretamente proporcional a esta distância. Para uma falta no enrolamento secundário, a correspondente corrente primária dependerá da razão de transformação entre o primário e as espiras do secundário até o ponto em curto, isto é, a corrente de falta primária (I_p) depende da posição do curto-circuito ao longo do enrolamento secundário e é proporcional ao quadrado da fração de enrolamento que está curto-circuitado, conforme ilustra a figura 3.15. Isto significa que faltas na terça parte do enrolamento, do lado do neutro, produzem muito pouca corrente no enrolamento primário, tornando a detecção de faltas, por medição de corrente primária, difícil (Alstom Guide). Para melhor ilustrar, através da figura 3.15, faltas à terra abaixo de 30% do enrolamento, do ponto de falta ao neutro, produzem somente 10% de corrente de curto (I_p) em relação à máxima corrente de falta à terra, o que está no limite de sensibilidade do relé de terra.

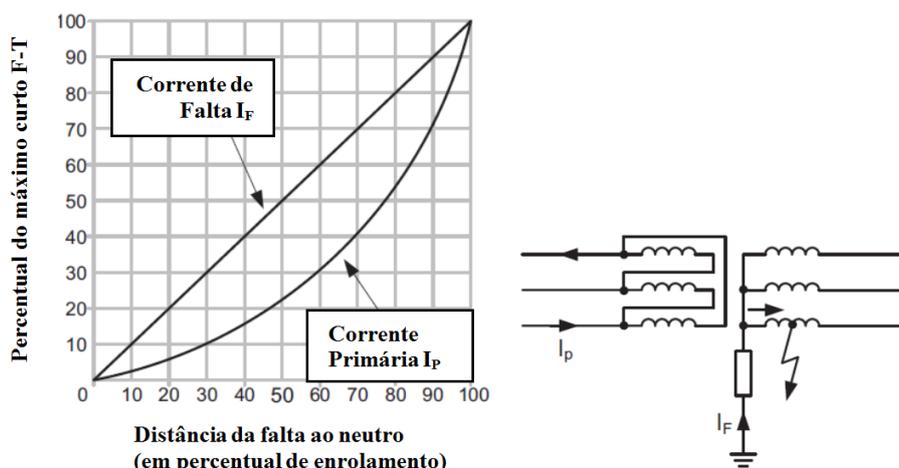


Figura 3.15 – Corrente de falta à terra em enrolamento conectado em Y e neutro aterrado por resistência (Alstom Guide)

A proteção diferencial 87T é afetada pelo valor do RBV. A figura 3.15 mostra a cobertura da proteção em função do curto F-T que é limitado diretamente pelo RBV. Quanto maior o valor maior de curto F-T, maior será o percentual protegido do enrolamento.

Há, por outro lado, diversos outros fatores que afetam o desempenho da 87T quanto à cobertura do enrolamento, além do valor do RBV, e que não têm relação direta com o RBV. Estes outros fatores agem no sentido contrário ao desempenho das proteções diferenciais 87T e 87G e, assim, justificam ainda mais o fato de que o RBV deva ser ainda menor para poder compensar estes outros fatores negativos, e manter uma melhor cobertura da proteção. Estes fatores são: “*inrush*” do transformador, sobrecitação do transformador, desempenho de TCs, compensação de magnitude de correntes e diferença de ângulos entre lados primário e secundário do transformador, compensação para o ajuste de TAPs do transformador. Estes fatores podem afetar a declividade (“*slope*”) da reta percentual da proteção diferencial e têm impactos no desempenho das proteções diferenciais, tal como ocorre com o “*inrush*” (Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers, 2007), (General Electric, 2007), (Impact of Transformer Inrush Currents on Sensitive Protection Functions – How to Configure Adjacent Relays to Avoid Nuisance Tripping, 2006). Outros fatores, tais como, o ângulo de chaveamento, a densidade de fluxo residual, o nível de tensão da rede, o nível de saturação do núcleo, o modo de energização do transformador e a energização sob carga, têm impacto na amplitude, na forma e na duração do “*inrush*” e há na literatura várias propostas de soluções (Chiesa, 2011),

(Power Transformer Characteristics and Their Effect on Protective Relays, 2006). Por esta razão, resolvendo-se os problemas relacionados com estes fatores, que fogem do escopo deste trabalho, tem-se também uma melhor cobertura e desempenho das proteções diferenciais (87T e 87G).

Muitos transformadores são protegidos somente pela proteção diferencial de fase (87T) para a proteção de falta à terra. Porém, a proteção diferencial de fase sozinha não tem a sensibilidade suficiente para detectar faltas sobre todo o enrolamento do transformador devido ao ajuste de 25 a 30% que corresponde à declividade (“*slope*”) da reta de restrição percentual. Isto significa que uma parte significativa dos enrolamentos em Y, próximo ao lado do terminal de neutro, não ficarão protegidos, se somente a proteção diferencial de fase for utilizada. Como exemplo ilustrado na figura 3.16, no caso de um transformador em Y com o neutro aterrado por uma resistência de 1 PU, a proteção diferencial de fase, tendo um ajuste de 20%, detectará as faltas à terra em somente 45% do enrolamento contados no sentido dos terminais em direção ao neutro, isto é, 55% ficará desprotegido (Alstom Guide).

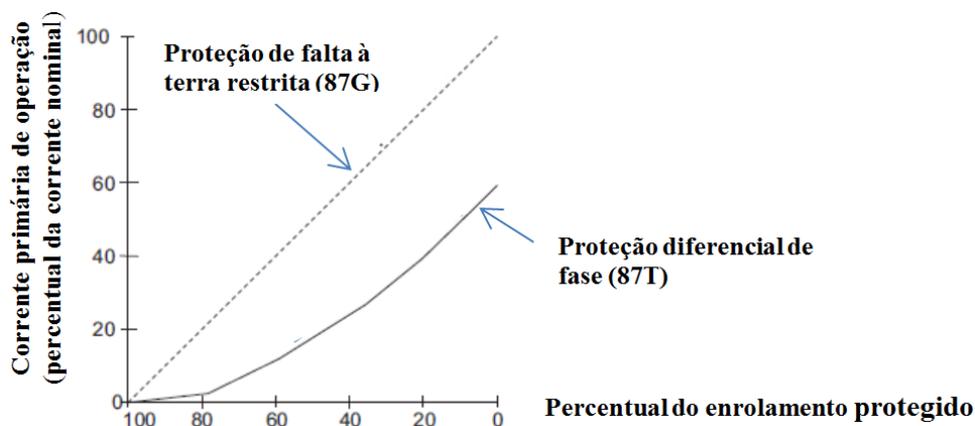


Figura 3.16 – Percentual de enrolamento de transformador protegido, em função da corrente primária, para proteção diferencial de fase (87T) e para proteção de falta à terra restrita (87G) (Alstom Guide)

A figura 3.16 mostra que a proteção de falta à terra restrita 87G é ainda bem melhor do que a 87T, porém esta também tem a sensibilidade afetada pelo valor do RBV.

Além disso, devido ao fato de que o sistema RBV adotado estar limitado na faixa de 200 a 400 A, uma sensibilidade adicional pode ser importante conforme ilustrado pelo exemplo da figura 3.17 (Mozina, 2011).

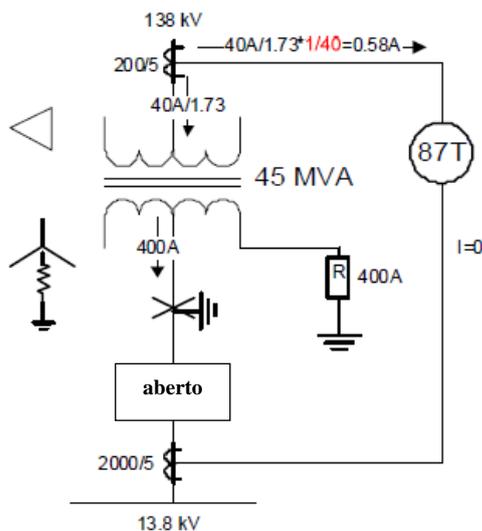


Figura 3.17 - Exemplo de falta à terra no lado secundário num sistema RBV de 400 A (Mozina, 2011)

Supõe-se, no exemplo, um transformador de 45MVA, 138/13,8kV, com TC de relação 200- 5 A no lado de 138kV, e um típico relé diferencial 87T com ajuste de “pickup” de 0,3PU. A distribuição de corrente no caso de uma falta fase-terra de 400 A no lado secundário está ilustrada na mesma figura 3.17. A corrente no lado dos TCs primários é de somente 0,58 A, abaixo do ajuste de “pickup” do relé 87T. Portanto, há a necessidade da proteção diferencial de falta à terra (87G) para aumentar a sensibilidade de detecção de faltas à terra, conforme o esquema ilustrado na figura 3.18, e também para aumentar o percentual do enrolamento protegido do transformador, conforme ilustrado na figura 3.16, onde a proteção diferencial de fase (87T) protege apenas 45% do enrolamento, enquanto que a proteção de falta restrita à terra (87G) protege 80% do enrolamento, ou seja, quase o dobro. De qualquer forma, ambos os tipos de proteção diferencial dependem do método RBV de aterramento de neutro do transformador.

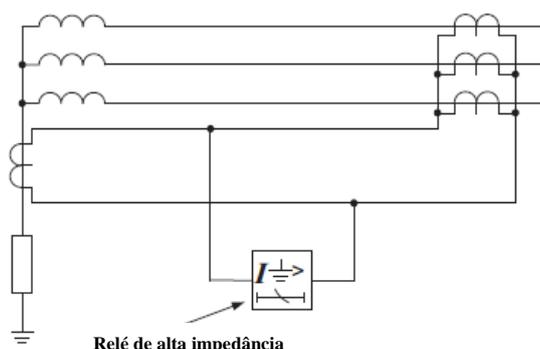


Figura 3.18 – Proteção de falta à terra restrita (87G) para um enrolamento em Y

O relé 87G utiliza a equação (3.1) como característica de operação do relé (Mozina, 2011).

$$I_{op} = (-3I_0).I_N.\cos\phi \tag{3.1}$$

Onde:

- $(-3I_0)$ = corrente residual do lado da barra dos TCs, calculada pela soma fasorial das correntes de fase;
- I_N = corrente de neutro medida do transformador (limitada a 400 A, no exemplo, pelo resistor de neutro);
- $\cos\phi$ = ângulo de fase entre as correntes I_N e $(-3I_0)$.

O “pick-up” do 87G utiliza a comparação direcional entre a corrente residual de fase ($3I_0$) e a corrente de falta à terra (I_N). O “pick-up” aplica-se somente quando $3I_0$ estiver abaixo de um determinado valor. Se $3I_0$ for maior que o valor escolhido de “pick-up”, o elemento de proteção utiliza:

- $(-3I_0).I_N.\cos\phi$, onde ocorre o “trip” somente quando as direções das correntes $(-3I_0)$ e I_N forem opostas, indicando que a falta à terra é interna;
- comparação de direção para mitigar o efeito da saturação nos TCs de fase e de terra.

O elemento direcional calcula o produto $(-3I_0).I_N.\cos\phi$ para uma indicação direcional baseada no sinal deste produto conforme mostrado na figura 3.19. O relé opera somente se as correntes $(-3I_0)$ (corrente de sequência zero proveniente dos TCs de fase) e I_N (corrente de terra do TC de neutro) têm polaridades opostas, que é o caso de uma falta interna no transformador. Neste caso, o ângulo ϕ entre I_N e $(-3I_0)$ é maior que 90° .

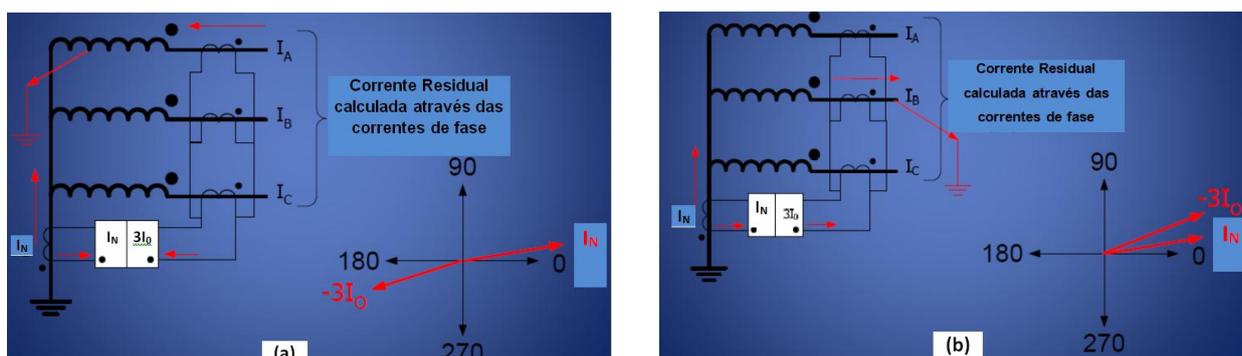


Figura 3.19 – Princípio da proteção diferencial de falta à terra restrita (87G ou 87REF): (a) falta interna; (b) falta externa (Cooper, Scott)

No caso de uma falta externa, $(-3I_0)$ e I_N têm a mesma polaridade, isto é, o ângulo ϕ é menor que 90° , e o relé não atua.

A sensibilidade da proteção diferencial de falta à terra é muito baixa e não possibilita a operação com correntes de 0,2 A. A figura 3.20 mostra a zona de operação do 87T. Em muitos casos, o relé de proteção de sobrecorrente de neutro 51G oferece uma proteção temporizada para as faltas nesta zona.

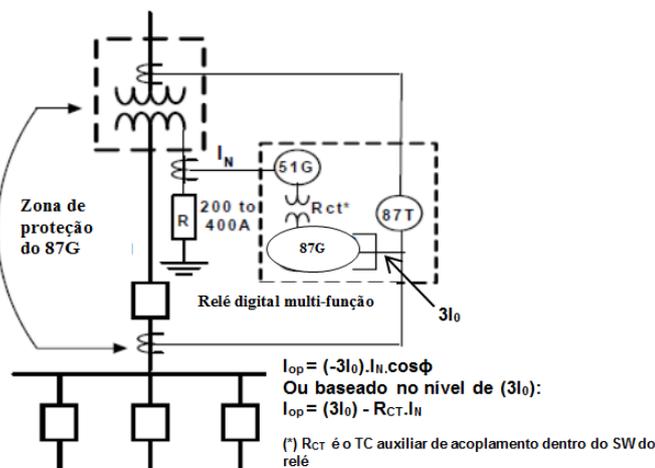


Figura 3.20 - Relé de proteção diferencial de falta à terra (87G) combinado com a proteção diferencial de fase (87T) para transformador (Mozina, 2011)

Para valores baixos de $3I_0$, o relé troca automaticamente o algoritmo do produto para o algoritmo de balanceamento $(3I_0 - R_{CT}.I_N)$, conforme mostrado na figura 3.20. Isto permite detectar faltas internas quando o disjuntor do lado secundário do transformador estiver aberto, isto é, baixo valor de corrente $3I_0$, conforme mostrado na figura 3.17.

A proteção “REF” - “Restricted Earth Fault Protection” (87G) ou proteção restrita de falta à terra é também conhecida por proteção diferencial de terra ou, ainda, por proteção diferencial de sequência zero (“zero-sequence differential protection”). A proteção “REF” é importante para o transformador porque não é influenciada pela corrente de carga e porque também oferece uma melhoria em relação à proteção diferencial de fase tradicional (87T). A denominação “restrita” advém do fato de que a proteção é restrita às faltas de terra dentro da zona definida pelo neutro e pelo ponto onde o TC é colocado nas fases. A corrente de neutro no transformador é usada como referência e comparação com a corrente de sequência zero dos terminais de fase, para se determinar se uma falta é interna ou externa em relação ao transformador. As falhas de operação nos algoritmos do “REF” são causadas principalmente pelas componentes pares de harmônicas da corrente de “inrush”, pelas harmônicas ímpares da

sobrecitação, e pela saturação de TCs devida às faltas externas muito altas, além de fatores intrínsecos aos algoritmos de relés de cada fabricante, que impactam na velocidade de processamento, sensibilidade e seletividade (Taj, 1991).

A proteção diferencial de terra (87G) tem uma sensibilidade bem melhor em relação à proteção diferencial de fase (87T) e é recomendada pelo *Buff Book* (IEEE Std 242, 2001). Além da aplicação em transformadores, pode ser aplicada nos enrolamentos do estator de geradores e em grandes motores. A proteção “REF” complementa a proteção de fase tradicional fornecendo uma boa sensibilidade contra as faltas à terra próximas ao neutro.

Com base no exposto, conclui-se que a sensibilidade de ambos os tipos de proteção diferencial, a de fase e a de terra, são dependentes da escolha do resistor de neutro. Se a corrente de neutro for alta, tal como ocorre num transformador solidamente aterrado, a sensibilidade do relé não é um problema para as faltas próximas ao neutro porque há corrente suficiente no TC de neutro e através do relé para garantir a operação (Labuschagne, Casper; Merwe, Izak van der, 2007).

Por outro lado, se o neutro do transformador for aterrado por resistência de valor R_N , a corrente de neutro I_N é dada pela equação 3.2 (Labuschagne, Casper; Merwe, Izak van der, 2007).

$$I_N = \frac{x.V}{\sqrt{3}.R_N} \quad (3.2)$$

Onde:

- I_N = corrente de falta (através do resistor de neutro);
- x = distância do neutro ao ponto de falta, ao longo do enrolamento do transformador, em “x” PU em relação ao ponto de neutro;
- V = tensão nas fases sãs F-F;
- R_N = valor do resistor de neutro.

A equação (3.2) define uma relação linear entre a localização da falta e a corrente de neutro disponível para operar o relé. Para pequenos valores de x , a corrente de neutro I_N é pequena e pode não haver corrente suficiente para operar o relé, mesmo para o “REF”, tendo-se somente o parâmetro R_N para melhorar a sensibilidade da proteção diferencial. Portanto, neste caso de neutro aterrado por resistência R_N , a sensibilidade

do relé é importante para as faltas à terra próximas ao neutro, bem como uma maior corrente através do neutro (menor valor R_N). O valor de x onde o relé começará a operar é diretamente relacionado à corrente de operação do relé e às características dos TCs, isto é, ao quanto de corrente de magnetização que os TCs das fases são requisitarão (Labuschagne, Casper; Merwe, Izak van der, 2007). Em outras palavras, a corrente de “pick-up” do relé e a corrente de magnetização do TC são fatores importantes para se determinar a cobertura de proteção do enrolamento do transformador. Além destes fatores, nos casos onde não há corrente de falta suficiente para o relé “REF”, a escolha entre um “REF” de alta impedância e um de baixa impedância não é tão importante quanto a escolha de TCs com relações de transformação mais convenientes. Porém, para TCs de baixa qualidade que requerem altas correntes de magnetização, relés “REF” de baixa impedância são mais sensíveis e, vice-versa, caso se utilize TCs de alta qualidade, os relés “REF” de alta impedância se tornam mais sensíveis.

Diante de todos estes fatores envolvidos no desempenho da proteção diferencial “REF”, ainda falta na literatura o desenvolvimento de estudos mais precisos para relacionar o desempenho destes relés com o valor de resistor de neutro considerando todos os fatores descritos, de modo a otimizar a máxima cobertura de proteção dos enrolamentos do transformador pela proteção diferencial de terra (que é máxima para altas correntes de curto fase-terra) e a minimizar os danos causados pela dissipação térmica devido aos curto-circuitos fase-terra.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de uma proteção de falta à terra eficiente, do tipo “ground sensor”, viabilizou o sistema RBV na MT. O sistema RBV tornou-se uma preferência universal para os sistemas de MT que utilizam motores maiores e, conseqüentemente, mais caros. Este fato criou na indústria a necessidade de sistemas de aterramento de neutro com uma resistência limitadora de curto-circuito F-T junto com os meios eficientes de proteção de falta à terra. Historicamente, o aterramento de neutro em sistemas de MT através do RBV foi inviabilizado pela relativa falta de sensibilidade dos dispositivos de proteção de falta à terra dos relés residuais 50/51N com TCs de fase na conexão residual.

As vantagens da proteção “ground-sensor” são:

- Operação com TC dedicado, a sua razão de espiras não é função das correntes de carga. A sua relação baixa (50- 5 A) aumenta a sensibilidade para a proteção dos circuitos alimentadores e circuitos terminais;
- Pode ser usado em qualquer lugar onde os condutores de fase, todos isolados, puderem atravessar através de sua janela. TCs com janelas especiais retangulares podem ser disponibilizadas para se ajustar em torno de um duto de barramentos, por exemplo;
- Enquanto o relé residual 51N é vulnerável para operar no resultado líquido de corrente proveniente do total dos fluxos dos TCs individuais de fase, o relé “*ground-sensor*” opera na corrente produzida pelo fluxo magnético líquido resultante de todos os condutores de fase. Esta diferença faz do relé “*ground-sensor*” menos sujeito a erros de saturação;
- O tipo de janela do “*ground-sensor*” é menos sujeita à saturação AC causada pelas altas correntes passantes não envolvendo a terra, e não é também virtualmente afetada pela corrente de falta DC, desde que os condutores sejam apropriadamente centralizados e fixados dentro do TC conforme discutido em 3.3 e 3.4;
- A melhor sensibilidade e velocidade de operação do 50GS contribui para uma redução de danos devidos às faltas à terra, o que controla também os danos de queimas no núcleo de máquinas elétricas girantes;
- A precaução expressa para o uso do dispositivo conectado residualmente 50N não se aplica ao uso do dispositivo 50GS, exceto no caso em que o 50GS não puder ser usado, como no caso de condutores múltiplos e longos, onde a corrente de carga capacitiva (corrente de “*charging*”) é maior do que o “*pickup*” do relé 50GS. Neste caso, usa-se o 51GS.

O TC da proteção “*ground-sensor*”, que é em geral de 50- 5 A, satura (parcialmente) mesmo na presença de correntes de falta à terra moderadas da ordem de 200 a 400 A, próprias dos sistemas RBV, isto é, os “*ground-sensors*” de núcleo de ferro operam sempre com um certo grau de saturação sob condições normais. A sensibilidade de TCs econômicos, de baixas razões de espiras, de 50- 5 A, ou de 100- 5 A, na presença de correntes de falta à terra moderadas é um tanto ruim, porém aceitável. Por esta razão, é importante verificar se o valor eficaz da corrente altamente distorcida fornecida pelo TC é suficiente para operar o relé com as características de projeto do TC e sob o

nível de curto-circuito F-T máximo especificado, ou se o conjunto TC/"*Ground-Sensor*" opera de forma conveniente sob os níveis presumidos de curto F-T do sistema elétrico.

A aplicação do RBV na BT é rara pela razão que todos os alimentadores e circuitos terminais deveriam ser equipados com dispositivos de proteção de falta à terra como, por exemplo, os "*ground-sensors*", tornando a proteção economicamente dispendiosa em relação aos fusíveis e às proteções instantâneas de fase, que são bem mais simples e baratas.

Mesmo sob correntes equilibradas trifásicas, os toroides de núcleo de ferro da proteção "*ground-sensor*" podem sofrer de saturação localizada, que pode provocar disparos intempestivos indesejados. Para isso, formas de instalação dos condutores de fase e do TC foram apresentados enfatizando a importância da qualidade da instalação dos TCs toroidais. Há outras alternativas tecnológicas para o problema da saturação de TCs de núcleo de ferro, como o uso de TCs com "*gaps*" de ar, bobinas de núcleo não magnético e sensores óticos de corrente. Há, hoje, conjuntos TC/"*ground-sensor*" baseados na tecnologia de bobinas de núcleo não magnético que estão disponíveis por um número ainda restrito de fabricantes, que os tornam técnica e economicamente viáveis em várias aplicações, inclusive para a aplicação economicamente viável do RBV na BT, visto que a tecnologia de bobinas de Rogowski já está disponível para sistemas de neutro solidamente aterrado, conforme discutido no capítulo 2.

Quanto ao valor ideal do resistor de neutro (RBV) não há, no entanto, um critério consensual. A referência *IEEE C62.92.3* fornece um critério para a escolha de um resistor de baixo valor baseado no conceito de dano proporcional à energia dissipada dada em Ampere.segundo proveniente de uma falta de arco fase-terra e também define que, abaixo de 150 A haveria problemas de sensibilidade da proteção. Com este critério aplicado aos equipamentos mais comuns os níveis de corrente de falta à terra foram determinados e definidos entre 200 a 400 A.

Para os transformadores, as proteções influenciadas diretamente pela forma de aterramento de neutro são as proteções que irão detectar as faltas à terra cujo caminho de retorno de corrente envolve o neutro do transformador. Estas proteções são as diferenciais (87T) de fase, e as diferenciais de falta à terra restrita (87RGF ou 87G) e que funcionariam idealmente quanto maior for a corrente diferencial. Os sistemas RBV

apresentam, portanto, uma certa restrição inerente de cobertura dos enrolamentos, especialmente próxima ao neutro, devido à limitação de magnitude do curto F-T no RBV.

O ajuste da proteção diferencial (de fase, 87T) por restrição percentual através de uma reta de inclinação 20%, por exemplo, deixa uma grande parte do enrolamento próximo ao neutro desprotegido pela proteção diferencial de fase. Além disso, devido ao fato de que o RBV adotado estar na faixa de 200 a 400 A, há também uma limitação inerente devido à limitada corrente de falta F-T. Portanto, há a necessidade da proteção diferencial de falta à terra (87G) para aumentar a sensibilidade de detecção de faltas à terra e também aumentar o percentual do enrolamento protegido do transformador. A proteção diferencial de terra (87G) tem uma sensibilidade bem melhor em relação à proteção diferencial de fase (87T) e é recomendada pelo *Buff Book*, podendo ser também aplicada aos enrolamentos do estator de geradores e aos grandes motores. Se a sensibilidade do relé diferencial (87G) é de 10% de corrente em relação ao fundo de escala, a relação (3.2) indica que a cobertura do relé é de 90% do enrolamento do transformador, se a corrente de falta através do resistor de neutro for a corrente máxima definida pelo valor nominal do mesmo. Se, porém, o valor de R_N for o dobro de corrente, a cobertura poderá ser de melhorada de 90% para 95%. Porém, há limites para esta corrente de falta à terra limitada pelo resistor, pois a dissipação térmica aumenta muito, e esta forma de melhorar a cobertura não é recomendada. Diante de todos estes fatores envolvidos no desempenho da proteção diferencial, ainda falta na literatura o desenvolvimento de estudos mais precisos para relacionar o desempenho destes relés 87G com o valor do resistor de neutro de modo a otimizar a máxima cobertura de proteção dos enrolamentos do transformador pela proteção diferencial (que seria máxima para altas correntes de falta F-T) e a minimizar os danos causados pela dissipação térmica devido aos curto-circuitos F-T.

Além de não ser recomendada a proteção de falta à terra dos relés residuais 50/51N com TCs de fase na conexão residual, também não é possível usar fusíveis de proteção no lado primário contra as faltas externas F-T do lado secundário em muitos sistemas RBV, pois a corrente no primário, devida ao curto fase-terra no secundário, pode ficar abaixo do valor de operação do fusível. Neste caso, há a necessidade de se usar relés de proteção, ou mais precisamente, relés diferenciais ou proteções “ground-

sensor”, conforme discutido, que são mais sensíveis do que as proteções de fase para detectar as faltas F-T em sistemas de neutro aterrado por baixa resistência (RBV).

4 SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO POR RESISTOR DE ALTO VALOR E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em sistemas elétricos industriais, a perda de serviço devida a uma primeira falta à terra, inerente aos sistemas solidamente aterrados, foi uma grande preocupação dos projetistas e operadores de plantas de processo contínuo, que desejavam uma redução de corrente de falta à terra a um nível que permitisse o sistema operar com uma falta não removida. Pesquisas e operações em sistemas experimentais almejavam, então, a limitação da corrente de falta à terra a um nível próximo daquele que ocorria em sistemas não aterrados, nível este que, uma década antes, era responsável pelas sobretensões transitórias identificadas exclusivamente nos sistemas não aterrados. Os pesquisadores determinaram que essas sobretensões poderiam ser controladas inserindo-se no sistema um resistor de neutro de alta resistência. Esta nova tecnologia é conhecida como aterramento de neutro através de alta resistência, RAV, ou “HGR” (“*High Grounding Resistance*”). O sistema de neutro aterrado por resistor de alto valor (RAV) oferece todos os benefícios de um sistema isolado e quase nenhuma de suas desvantagens, que são basicamente as sobretensões transitórias, devidas às faltas intermitentes e por ressonância, causadas pelos sistemas isolados. Entre uma das principais vantagens do sistema RAV, cita-se o controle da magnitude das correntes de falta à terra, que são baixas, da ordem de magnitude máxima limitada pelo resistor de neutro, que costuma ser de 5 A. Por ser a corrente de falta à terra (F-T) desta ordem de magnitude, o sistema pode conviver com este primeiro curto F-T por um tempo longo, porém, deve-se proceder à localização da falta e a sua correção o mais rapidamente possível para evitar a evolução desta falta e a consequente degradação da isolação. Neste nível de corrente de falta F-T de 5 A, as correntes de carga capacitivas (correntes de “*charging*”), que existem continuamente em qualquer sistema elétrico, passam a ter maior relevância nos sistemas RAV, pois são da mesma ordem de grandeza da componente resistiva da corrente de falta à terra. Desta forma, a corrente total de falta à terra é composta pela soma fasorial das componentes de correntes resistiva e capacitiva. Correntes capacitivas muito altas podem afetar os ajustes das proteções de terra, tornando estas proteções ineficazes em muitas situações. Mostra-se que a corrente de carga capacitiva, denominada por $3I_{C0}$, é numericamente igual à

soma escalar da corrente capacitiva das três fases à terra, antes da falta, e que é distribuída ao longo dos três ramos das fases à terra, à jusante do ponto de falta.

Nos sistemas de alta resistência de neutro (RAV), na BT e na MT, é possível haver as proteções do tipo “*ground-sensor*” (50GS/51GS) com os ajustes bem mais sensíveis, que devem estar acima do nível de corrente de disparo solidário, e abaixo do limite de 8 a 10 A, que representa o limiar de dano causado por faltas de carbono em enrolamentos de motores. Esta faixa de ajuste de “*trip*” de alarme assim definida, indica a existência de um primeiro curto fase-terra. Outras faixas ainda mais sensíveis de corrente, podem ser detectadas por outras proteções do tipo “*ground-sensors*”, ajustados entre 300 a 500mA, desde que as correntes capacitivas não sejam muito altas. Estes ajustes mais sensíveis proporcionam 90% de cobertura dos enrolamentos de motores e também possibilitam monitorar a lenta degradação da isolação em face das baixas correntes de fuga à terra. Os sistemas RAV são sistemas que atendem os requisitos de proteção de equipamentos contra incêndios na BT e, em menor grau, protegem também contra o contato direto em sistemas de BT.

Pelo fato de que um sistema RAV pode conviver com um primeiro curto F-T, este sistema oferece a vantagem de continuidade de serviço, o que é crítico para muitas indústrias. Por causa de muitos outros requisitos, que implicam em maiores custos e limitações dos sistemas RAV, a vantagem da continuidade de serviço passa a ser uma das principais condições norteadoras para a escolha do sistema de aterramento de neutro por alta resistência, além de proporcionar uma maior segurança para os equipamentos e para o pessoal.

O conceito de instabilidade do neutro em sistemas isolados é fundamental para o entendimento das causas de sobretensões transitórias inclusive aquelas devidas aos fenômenos de ressonância (“*resonance*”) e de curtos intermitentes (“*intermittent faults*”) e como estes fenômenos são solucionados pelo simples aterramento de neutro e, em especial, pelo aterramento de neutro dos sistemas RAV, onde se convive com uma certa sobretensão, embora esta passe a ser controlada. Este assunto sobre as sobretensões e os fenômenos de ressonância e de faltas intermitentes é tratado em maiores detalhes no capítulo 7.

4.2 SISTEMAS DE NEUTRO ISOLADO

4.2.1 CONCEITO DE INSTABILIDADE DE NEUTRO E SOBRETENSÕES

O conceito de instabilidade do neutro em sistemas de neutro isolado, ou simplesmente, sistemas isolados, é fundamental para o entendimento das causas de sobretensões, inclusive aquelas devidas aos fenômenos de ressonância e de curtos intermitentes.

Teoricamente, as sobretensões transitórias causadas por ressonância são limitadas somente pela resistência ôhmica do circuito ressonante. Na prática, podem chegar de 3 a 10 vezes a tensão de fase (Beeman, 1955), ou de 10 a 20 vezes a tensão de fase (Dunki-Jacobs, et al., 2007), ou até o rompimento da isolação, o que provoca um curto sólido fase-terra, ou outro tipo qualquer de curto-circuito sólido, extinguindo-se a instabilidade de neutro, porém, deixando a sua consequência, que é o rompimento da isolação numa ou, simultaneamente, em várias partes do sistema elétrico. O limite para as sobretensões causadas pelos curtos intermitentes também não tem um limite teórico, pois as sobretensões podem ser tanto maiores quanto mais carregada estiver a capacitância das fases do sistema elétrico. Na prática, as sobretensões devidas aos curtos intermitentes em sistemas isolados podem chegar de 5 a 6 vezes a tensão de fase (Beeman, 1955), ou até romper a isolação que, em particular, atinge primeiramente os pontos mais fracos do sistema, tais como, os enrolamentos de máquinas elétricas. A solução para limitar estas sobretensões é simplesmente o aterramento do neutro, tanto pela forma solidamente aterrada, como através de uma impedância.

4.2.2 CORRENTES DE CARGA CAPACITIVA E CURTO FASE-TERRA

As investigações determinaram que os sistemas de neutro isolado, ou também denominados por sistemas não aterrados são, na verdade, fracamente aterrados através de reatâncias capacitivas à terra. Os estudos levam a representar este efeito de aterramento, para fins de análise, como uma reatância capacitiva fase-terra $X_{C0}/3$, onde X_{C0} é a reatância capacitiva à terra de cada fase. Usando o teorema de Thevenin para converter um sistema trifásico balanceado em um sistema monofásico equivalente do sistema não aterrado, pode-se se mostrar que a reatância fase-terra $X_{C0}/3$ forma um circuito clássico LC (indutivo-capacitivo) na presença de uma falta à terra indutiva de impedância X_L . Este circuito LC série pode ser ressonante, ou quase ressonante, se a

indutância, no ponto da falta, X_L , for aproximadamente igual à reatância capacitiva efetiva à terra $X_{C0}/3$.

A quantidade $3I_{C0}$ é conhecida como a corrente de carga capacitiva (corrente de “charging”) total de um sistema não aterrado. O valor $3I_{C0}$ tem relevância na tecnologia de aterramentos de alta resistência.

Sob condições normais, as correntes capacitivas fase-neutro (fasoriais) i_{ac} , i_{bc} e i_{cc} formam um conjunto equilibrado de correntes com o neutro no potencial de terra, isto é, $i_{ac} + i_{bc} + i_{cc} = 0$. Sob condição de falta, a corrente de curto fase-terra I_F é igual à corrente capacitiva total $3I_{C0}$ do sistema isolado na situação anterior à falta fase-terra.

Pode-se medir a corrente capacitiva em sistemas não aterrados provocando-se, simplesmente, um curto fase-terra, e utilizando-se de um procedimento adequado e seguro para a realização da medição (I-Gard).

Para a realização deste teste, todos os componentes e equipamentos devem estar energizados de forma a obter o valor correto da corrente capacitiva da rede sob as condições de operação normal.

Caso não seja conveniente, do ponto de vista operacional, medir-se a corrente capacitiva após a instalação do projeto, pode-se estimá-la utilizando dados típicos apresentados na Tabela 7.1 do capítulo 7 (I-Gard). Alternativamente, pode-se utilizar dados de capacitância obtidas de catálogos de fabricantes de cabos e demais equipamentos (motores, para-raios, supressores de surto, geradores e transformadores).

4.3 SISTEMA DE NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DE RESISTOR DE ALTO VALOR

Os pesquisadores determinaram que as sobretensões podem ser controladas inserindo-se no sistema um resistor de neutro de alta resistência que, sob condições de falta à terra, permite que uma corrente I_R flua no resistor, com valor mínimo, igual à corrente total capacitiva do sistema, previamente identificada como $3I_{C0}$. Esta tecnologia, conhecida como aterramento de neutro através de alta resistência (RAV), tornou-se uma prática eficiente para determinados sistemas elétricos e a sua aceitação foi garantida pelo desenvolvimento de detectores de falta à terra, empregando-se uma tecnologia de pulsos para detecção e localização do ponto de falta (Baldwin, 2001);

(Senior Engenharia Ltda); (GE Electrical Distribution & Control, GEI-72116); (Cutler-Hammer, 2001).

Atualmente, o aterramento de alta resistência em BT e MT está em uso nas plantas onde a continuidade do processo é mandatória. Para empregar este modo de aterramento de forma bem sucedida, deve haver um compromisso em nível gerencial para localizar e remover a primeira falta à terra o mais breve possível, a fim de evitar a sua escalada para uma falta fase-fase, especialmente para as faltas que ocorrem nos enrolamentos dos motores e geradores. A probabilidade desta escalada é em grande parte influenciada pela energia $I^2.t$ dissipada no ponto de falta. Então, o fator determinante é o valor da corrente de regime permanente total de falta à terra, $I_F = \sqrt{(I_R)^2 + (3I_{C0})^2}$. Em sistemas de 480V, o aterramento de alta resistência tornou-se aceito porque o valor $3I_{C0}$ de um sistema típico de 1.000kVA é menos do que 1 A (vide Tabela 7.1 – capt. 7) conforme a referência (I-Gard). Se o resistor de neutro, então, for selecionado para fazer com que a corrente I_R exceda um pouco a corrente $3I_{C0}$, a corrente de falta à terra I_G não será maior que uns 3 A. A experiência mostrou que esta falta à terra com pequena corrente tem pouca probabilidade de evoluir para defeitos fase-fase até que se localize a falta à terra e se isole o circuito.

Paralelamente ao desenvolvimento do sistema com o neutro aterrado por resistor de alto valor, a tecnologia se desenvolveu para permitir a monitoração e a localização de falta à terra que será eliminada em momento oportuno, permitindo a continuidade da produção.

4.4 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE “CHARGING” PARA PROJETO DE SISTEMAS ATERRADOS POR RESISTÊNCIA DE ALTO VALOR

Uma explicação introdutória sobre as correntes capacitivas ou também denominadas por corrente de “*charging*” num sistema isolado é dada no capítulo 7. Ali são examinados os efeitos de sobretensões devidas ao curto fase-terra. Também é apresentado um método prático de medição direta da corrente de “*charging*” total do sistema ou, alternativamente, é apresentada uma tabela estimativa das correntes de “*charging*” de um sistema elétrico (Tabela 7.1), em função da potência e da tensão nominal do sistema elétrico.

O projeto de um sistema aterrado por alta resistência requer o dimensionamento do resistor de neutro que permita um fluxo de corrente igual ou maior do que três vezes a corrente de “*charging*” do sistema (I_{C0}) de cada fase.

O critério geralmente aceito para se determinar o resistor de aterramento de neutro R_N é representado pela equação (4.1).

$$R_N \leq \frac{X_{C0}}{3} \quad (4.1)$$

Desta forma, o resistor descarrega, total ou parcialmente, a carga acumulada na capacitância de um sistema elétrico, impedindo que a tensão fase-terra do sistema aumente devido ao fenômeno de instabilidade ou deslocamento do neutro, originado por ressonâncias ou faltas intermitentes.

Posto de outra forma, basta que a corrente resistiva de neutro seja maior que três vezes a corrente de carga capacitiva (corrente de “*charging*”) conforme a equação (4.2) para que não ocorra o fenômeno de deslocamento de neutro e, assim, as tensões ficam controladas dentro de certos níveis.

$$I_R \geq 3I_{C0} \quad (4.2)$$

Na equação 4.3 (Baker, 1979), E_{LL} é a tensão fase-fase do sistema em kV, f é a frequência, e C_0 é a capacitância de “*charging*” à terra por fase em microfarads (μF).

$$3I_{C0} = \frac{E_{LN}}{\frac{X_{C0}}{3}} = 2\sqrt{3} * 10^{-3} \pi E_{LL} f C_0 \quad (4.3)$$

Como a corrente no resistor está em fase com a tensão E_{LN} e que a corrente de “*charging*” está em quadratura, as duas correntes se somam vetorialmente para produzir uma corrente no ponto de falta que é, no mínimo, igual a $\sqrt{2} \cdot (3I_{C0})$. Esta relação está ilustrada na figura 4.1. Portanto, o maior valor do resistor de aterramento de neutro é determinado pela soma das correntes de “*charging*” de todos os componentes e equipamentos do sistema elétrico, tais como, condutores, motores, transformadores e capacitores de surto.

Notar que a corrente de falta mostrada na figura 4.1 é composta pela corrente de carga capacitiva (“*charging*”) do sistema, $3I_{C0}$, e pela componente de corrente, I_R , limitada pela resistência R_N de neutro, de forma que a corrente total de falta seja dada por

$$I_F = \sqrt{(I_R)^2 + (3I_{C0})^2}.$$

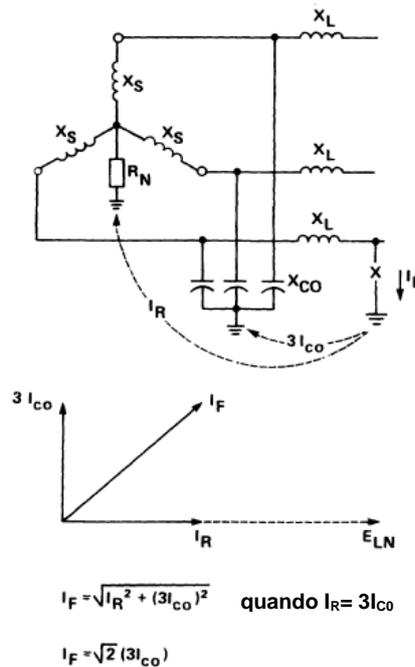


Figura 4.1 – Circuito equivalente de um sistema aterrado por alta resistência (Baker, 1979)

Um percentual significativo da corrente capacitiva total do sistema é proveniente dos cabos. Por esta razão, a bitola, o comprimento, a tensão, o material de isolamento e a espessura, devem ser conhecidos. A capacitância de “charging” dos cabos, para cabos singelos ou trifásicos blindados, pode ser calculada através da equação 4.4 (Baker, 1979).

$$C_0 = \frac{0,00735 * (SIC)}{\log \frac{D}{d}} \mu F / 1000 ft \tag{4.4}$$

Onde “SIC” é a capacidade indutiva específica da isolamento (constante dielétrica), “D” é o diâmetro do cabo da isolamento sobre a blindagem, e “d” é o diâmetro do condutor.

Combinando as expressões de $3I_{C0}$ e C_0 dadas pelas equações (4.3) e (4.4), resulta na equação (4.5) (Baker, 1979).

$$3I_{C0} = \frac{4,8 E_{LL} (SIC)}{\log \frac{D}{d}} mA / 1000 ft \tag{4.5}$$

Onde E_{LL} é a tensão fase-fase do sistema em kV. Pode-se ainda fazer a plotagem de uma família de curvas (Baker, 1979), que são soluções da equação (4.5), em função de níveis de tensão e espessuras de isolamento usando o parâmetro “SIC” de 5,0 para 480V, típico para o cabo de PVC, e 3,5 para 2,4KV e 13,8kV, típico para cabos XLPE, EPR e de isolamento de Butil, por exemplo. Se o valor escolhido “SIC” da isolamento diferir do valor

usado nas curvas, fatores de multiplicação podem ser usados para corrigir os valores plotados.

Os dados de corrente de “*charging*” de transformadores são baixos, pois nas construções do tipo “*core*” os dois enrolamentos circulares de MT e de BT são colocados concentricamente ao redor de uma seção retangular do núcleo. Disto resulta num valor de capacitância distribuída entre os enrolamentos e a terra muito pequeno.

Os dados de corrente de “*charging*” para motores e geradores estão indicados na tabela 4.1 (Baker, 1979).

Tabela 4.1 – Correntes de “*charging*” devidas à falta fase-terra para motores e geradores (Baker, 1979)

Tensão	Motores, mA/1.000HP		Geradores, mA/MVA	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
0,48kV	5	10	-----	-----
2,4kV	20	40	12	16
4,16kV	35	70	18	25
6,9kV	60	115	25	35
13,8kV	115	230	36	50

O valor de correntes de “*charging*” para capacitores de surto é um dos mais significativos para o cálculo, conforme pode ser visto na tabela 4.2 (Baker, 1979).

Tabela 4.2 – Correntes de “*charging*” devidas às faltas fase-terra para capacitores de surto (Baker, 1979)

Tensão	C μ F/fase	$3I_{C0}$ mA
0,48kV	1,0	313
2,4kV	0,5	784
4,16kV	0,5	1.357
6,9kV	0,5	2.253
13,8kV	0,25	2.253

O banco de capacitores para a correção do fator de potência (FP) é normalmente conectado em delta ou em Y com o neutro do banco. Por esta razão, os bancos de capacitores não contribuem à corrente de “*charging*”.

A título de ilustração (Baker, 1979), apresenta-se um exemplo numérico típico que revela qualitativamente a influência dos elementos de circuito na corrente de “charging”. Considerando-se um circuito trifásico de 1.000 metros de cabo de 13,8kV, 300MCM, que apresenta uma corrente de “charging” de 1.400mA. Mais a contribuição de três capacitores de surto de 0,25µF/fase que, pela tabela 4.2 fornecem: $3 \times (2,253\text{mA}) = 6.759\text{mA}$. E mais a corrente de “charging” do próprio motor de 1.000HP (13,8kV) que, pela tabela 4.1 fornece: 230mA. O total da corrente de “charging” é de:

1.400mA (devido aos cabos, ou seja, 16,7% do total)

(+) 6.759mA (devido aos três capacitores de surto do motor, ou seja, 80,6% do total)

(+) 230mA (devido ao motor, ou seja, 2,7% do total)

(=) 8.389 mA

Observa-se que $8,389 \text{ A} > 8 \text{ A}$, que é o limite de suportabilidade adotado aqui. Portanto, o sistema de alta resistência, neste caso, não poderia ser aplicado neste simples circuito de apenas um motor em 13,8kV, 1.000 metros de circuito trifásico de alimentação, e com três capacitores de surto. Nota-se também que a maior contribuição (80,6%) à corrente de “charging” provém dos três capacitores de surto enquanto que, em 4,16kV, os capacitores de surtos adequados apresentam aproximadamente menos da metade da corrente de “charging” em relação aos capacitores de surto em 13,8kV, mostrando que o sistema RAV pode ser possível para aplicações objetivando a proteção de motores de MT em sistemas até 4,16kV.

4.5 DETECÇÃO DE FALTAS À TERRA EM SISTEMAS ISOLADOS OU DE ALTA IMPEDÂNCIA

Um dos problemas mais comuns e difíceis de solucionar é a localização e a eliminação de faltas fase-terra que ocorrem em sistemas de neutro isolado ou aterrados por alta resistência (Baldwin, 2001); (Senior Engenharia Ltda); (GE Electrical Distribution & Control, GEI-72116); (Cutler-Hammer, 2001); (Yu, 1991); (Hou, 2006); e (Paulson, et al., 2003). Estas faltas podem não provocar correntes suficientes para sensibilizar a proteção. Mas as faltas à terra podem ser detectadas pela supervisão das tensões à terra nas três fases. Num sistema isolado, com uma falta à terra sólida na fase A, a tensão de fase na fase A será zero, enquanto que nas outras duas fases sãs, B e C, as tensões fase-terra subirão para a tensão plena fase-fase.

A intenção primordial de um sistema isolado é a de manter a operação mesmo após a indicação de uma primeira falta à terra. O pessoal de manutenção do sistema elétrico será responsável, então, para localizar e corrigir o problema antes que uma segunda falta à terra possa ocorrer numa outra fase. Quando esta manutenção for realizada eficiente e rapidamente, este esquema permite que o sistema elétrico opere de forma quase contínua na maioria das situações. Os reparos poderiam ser feitos durante uma parada programada.

A detecção de faltas à terra em sistemas de neutro aterrado por alta resistência é feita através dos TPs em delta aberto (“*broken delta*”), para detectar baixíssimas correntes, de ordem de 2,5 a 6 A. Há também a necessidade de detecção de correntes da ordem de 300 a 500mA para proteção e maior cobertura de máquinas elétricas girantes. Desta forma, utilizam-se “*ground-sensors*” com este ajuste para a proteção de terra dos enrolamentos de motores, com atraso de 5 segundos ou com filtragem (desde que disponibilizada pela tecnologia do fabricante) para superar os transientes de partida dos motores. Este ajuste de 500mA garante a cobertura de 90% dos enrolamentos dos motores. Um relé de alta impedância, tal como o relé 64, também pode ser usado em sistemas de neutro aterrado por alta impedância e para este fim, alguns modelos são dotados de capacidade de detecção de correntes de defeito pulsante e com ampla faixa de medição e atuação mais adequadas aos mais baixos níveis de corrente de fuga à terra, próprios dos sistemas de alta impedância industriais.

Um relé de terra conectado conforme a figura 4.2 mede a tensão $V_{\Delta 1}$ entre os terminais em aberto do delta do TP (“*broken delta*”) avaliando-se, desta forma, a corrente de falta à terra. Durante a operação normal a adição vetorial das tensões dos três sensores é zero. Quando ocorrer uma falta à terra à jusante, a corrente de falta à terra causa uma tensão $V_{\Delta 3}$ nos terminais do relé conforme mostrado na figura 4.3. Se a magnitude de corrente for suficiente para produzir uma tensão igual ou maior do que o nível de operação ou “*pick-up*” do relé, o disparo do dispositivo de interrupção é atuado. O nível ajustável de tensão de “*pickup*” e o ajuste de tempo fornecem os parâmetros necessários para se obter a seletividade.

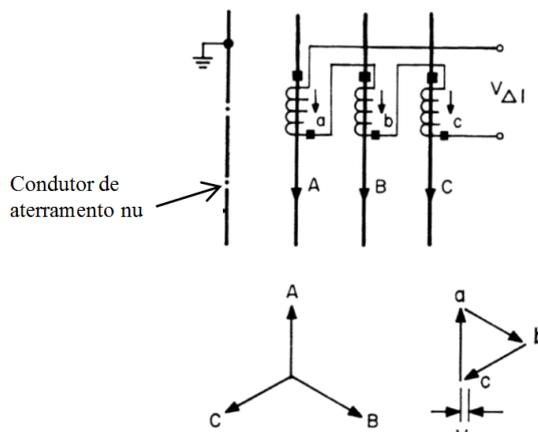


Figura 4.2 - Detecção de falta à terra por tensão no delta aberto. Para operação trifásica balanceada, em sistemas trifásicos a 3 fios, $V_{\Delta 1}$ é igual a zero

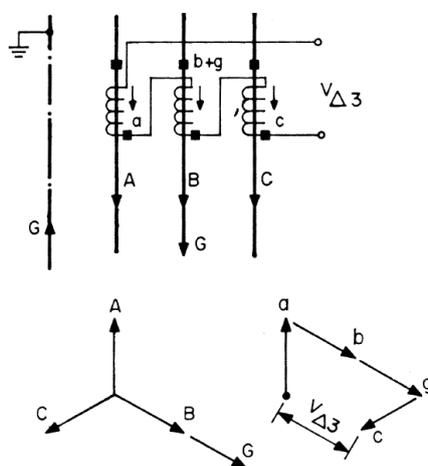


Figura 4.3 - Detecção de falta à terra por tensão no delta aberto. Para a condição de falta à terra em sistemas trifásicos a 3 fios, $V_{\Delta 3}$ não é igual a zero

A tensão do delta aberto pode ser produzida por três sensores de tensão de fase interligados em delta, com um terminal aberto. O valor de tensão é medido por um relé de falta à terra de alta impedância.

Em determinados projetos sob pesquisa e desenvolvimento, os TCs de núcleo de ferro convencionais podem ser substituídos por TCs de núcleo a ar, com secundário composto por um número bem maior de espiras. Como estes TCs não necessitam de corrente de excitação e não se saturam, eles são denominados como “acopladores lineares”. Por esta razão, estes transdutores asseguram uma reprodução mais precisa da corrente primária de cada fase para as correspondentes tensões secundárias, além de pesarem menos e ocuparem menos espaço, tornando-se em características atrativas para as aplicações com os sensores de falta à terra.

Em termos de componentes simétricas, a componente de tensão de sequência zero pode ser encontrada de forma semelhante pela soma fasorial das três tensões no circuito delta aberto (“*broken delta*”), conforme a figura 4.4.

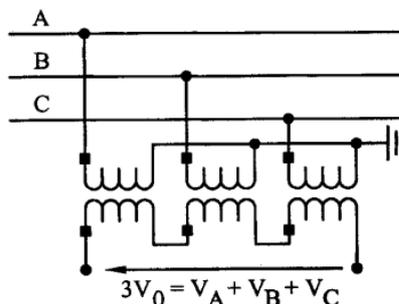


Figura 4.4 - Três TPs na conexão em delta aberto

Após realizar a detecção da falta à terra em sistemas de neutro de alta resistência, podem ser utilizados dois métodos de localização da falta: (1) isolamento da falta por chaveamento da rede; e (2) circuito de rastreamento usando um injetor de sinais e um detector ou sensor manual.

A detecção de presença de uma falta à terra é simples. Técnicas usando indicadores luminosos, voltímetros, e relés sensíveis à tensão são aplicados há anos para a monitoração das tensões nas três fases. Quando uma fase é aterrada, a tensão fase-terra decresce a zero e as tensões das outras fases aumentam. Em sistemas aterrados por alta resistência, o relé de corrente no resistor do neutro pode ser usado para medir correntes de falta muito baixas. O problema é quando os detectores de tensão indicam apenas em qual fase o curto está, sem determinar em qual ramo à jusante o curto se encontra. Neste caso resta fazer a interrupção, de circuito a circuito, até descobrir onde se encontra a falta. Se a falta à terra é simultânea em dois circuitos, o único procedimento seguro é desligar todos os circuitos e ligar um a um, para se localizar a primeira falta, desligando-se novamente este circuito e religando os restantes, um a um, até descobrir a segunda falta.

Todos estes métodos de detecção de falta à terra são do tipo “não seletivos”. A fase sob falta é identificada, mas a falta poderia estar em qualquer parte do sistema elétrico. Então, a localização da falta à terra se torna sempre mais difícil por este método.

O chaveamento da rede é o método mais simples. O operador desenergiza um alimentador de cada vez até que a falta desapareça. Mas este processo de procura do circuito sob falta elimina a continuidade do serviço, ou a energização intencional em

paradas programadas, que pode não ser conveniente. A própria falta pode desaparecer quando todos os equipamentos estiverem desligados numa parada programada. Este processo de procura também usa intensivamente a mão-de-obra além de pessoal bem treinado e que esteja familiar com toda a rede elétrica.

Quando o procedimento de interrupção é impraticável, detectores de falta à terra muito sensíveis, com TCs toroidais, podem ser aplicados aos diversos circuitos.

O rastreamento dos circuitos com sinais sobrepostos é o método preferido para localizar uma falta, depois que a mesma foi localizada em nível de circuito, cada um dotado por um detector de falta à terra.

Para sistemas aterrados por alta resistência, o sinal pode ser fornecido pela modulação da própria corrente de falta à terra, por meio de um segundo resistor de aterramento de neutro chaveado em paralelo ao primeiro, de forma que, através de um contator, uma corrente pulsante de maior magnitude proveniente da própria corrente de falta seja inserida no sistema, aumentando a corrente de falta à terra momentaneamente, mas somente o suficiente para a detecção por amperímetros ou sensores toroidais de corrente, conforme o princípio conceitual ilustrado na figura 4.5. Para sistemas isolados, um injetor eletrônico de sinais pulsantes é acoplado à rede sob falta, e detectores manuais rastreiam os sinais pulsantes ao longo dos circuitos em falta. Os circuitos de pulsos são constituídos por um oscilador que funciona na faixa de audiodfrequência e é acoplado entre a fase em falta e à terra. Alternativamente, a injeção de sinais de alta frequência no circuito pode apresentar certas vantagens porque são mais facilmente separáveis do sinal fundamental de 60Hz da rede e de sinais de harmônicas (Valdes, et al., 2007). O ramo de circuito em falta é o único a mostrar uma variação de corrente, que pode ser detectado manualmente.

As práticas atuais para localizar faltas à terra têm certos pontos fracos, que se originam de três condições que não são frequentemente consideradas: (1) condições de falta intermitente; (2) faltas múltiplas numa mesma fase; (3) faltas à terra invertidas.

Faltas intermitentes são frequentemente encontradas na indústria quando as faltas ocorrem na proximidade de cargas sujeitas a ciclos de operação, e a falta está do lado da carga do contator de controle. Nestas circunstâncias, a detecção da falta pode nem ser notada pela operação se o ciclo de operação é baixo, ou a falta ocorrer por um

tempo muito curto. Um outro tipo de falta intermitente é encontrada durante os ciclos de manutenção. Uma falta à terra será detectada, mas a localização é atrasada até o começo do período de manutenção. Com a parada da produção, a falta à terra desaparece. Quando a produção recomeça, a falta à terra reaparece assim que o circuito sob falta é reenergizado.

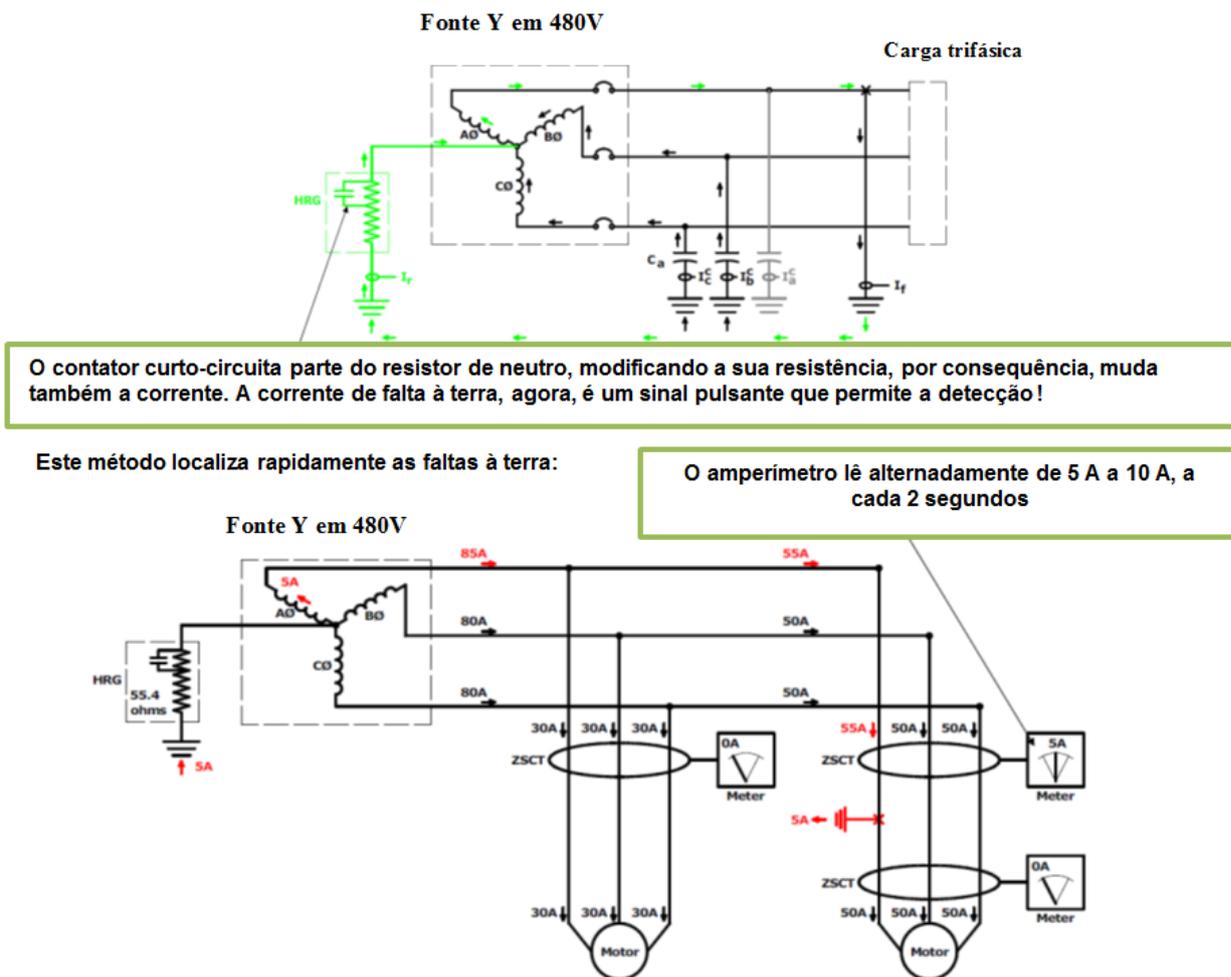


Figura 4.5 - Princípio para localização de faltas à terra em sistemas de alta resistência por método de sinal pulsante

A ocorrência de múltiplas faltas numa mesma fase é frequentemente encontrada em plantas muito grandes. Quando esta condição ocorre, fica difícil isolar a falta pelos métodos de chaveamento da rede, ou a detecção de vários sinais pulsantes em todo o sistema elétrico. O problema é ainda mais complicado em sistemas em anel.

Faltas à terra invertidas (Baldwin, 2001) são aquelas nas quais a referência de terra está fora do triângulo de tensões, conforme ilustrado na figura 4.6, caso (d).

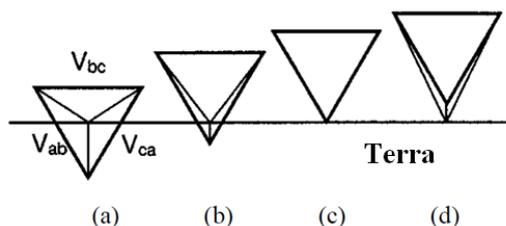


Figura 4.6 - Tipos de faltas à terra: (a) sem falta; (b) falta de alta resistência; (c) falta solidamente aterrada; (d) falta à terra invertida (Baldwin, 2001)

Faltas à terra invertidas (Baldwin, 2001) são atribuídas às faltas de arco elétrico que causam uma multiplicação de tensão em relação à terra, e o consequente deslocamento de tensão do sistema e da terra de referência. As faltas à terra invertidas podem ocorrer quando houver uma falta em carga desequilibrada. Nestas circunstâncias, há uma carga desbalanceada de capacitância e indutância que causa um deslocamento do terra de referência para o lado de fora do triângulo de tensões.

Faltas à terra invertidas são difíceis de se rastrear manualmente. O caminho da falta pode conter tanto um arco, como uma alta impedância. Métodos de pulsos de sinais não podem ser usados com este tipo de falta porque requerem circuitos de baixa impedância e podem ter uma natureza transitória difícil de ser detectada. Por esta razão, há técnicas de localização de faltas à terra através de dispositivos de relés digitais, geradores de sinais de sequência zero e indicadores de faltas à terra (Baldwin, 2003); e (Valdes, et al., 2007).

Um problema físico adicional relacionado ao método de procura por sinais pulsantes é a dificuldade de monitorar vários locais e fiações. Os circuitos de potência são frequentemente encaminhados por locais inacessíveis, onde fica difícil de se colocar o amperímetro toroidal. As fiações que têm cabos blindados aterrados ou revestimento metálico aterrado, tais como, os próprios eletrodutos, que podem “proteger” os sinais de modo que os sensores não os detectem, forçando com que as medições de sinais sejam feitas nas junções onde os condutores estão disponíveis.

As técnicas de localização requerem um sinal discernível que identifique a localização da falta. Para as faltas à terra, este sinal é a corrente de sequência zero. O resistor de aterramento de neutro e a capacitância do sistema limitam a própria corrente de falta e, portanto, a corrente de sequência zero.

O fluxo de corrente de sequência zero permite uma variedade de técnicas para localizar a falta. Os dados de impedância obtidos da tensão de sequência zero e da corrente podem fornecer a distância do local de medição até a falta.

A arquitetura de um sistema de localização de falta à terra típico é mostrado na figura 4.7 e contém os seguintes dispositivos:

- Relé digital da subestação;
- Gerador de sinais de sequência zero;
- Indicadores remotos de falta à terra.

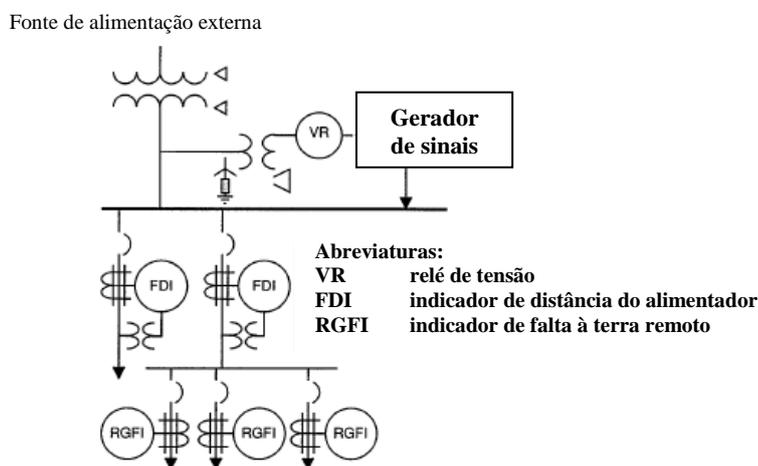


Figura 4.7 - Arquitetura centralizada do sistema de localização de falta à terra para uma rede simples definida pelo lado do secundário do transformador (Baldwin, 2001)

Os indicadores remotos de falta à terra instalados em cada alimentador monitoram toda a rede e identificam em qual ramo do circuito, ou em qual a carga, o evento de falta à terra ocorreu, comunicando-o à central de dados e também ao indicador local.

Como exemplo de sistemas de supervisão, detecção e localização de faltas fase-terra em sistemas elétricos de alta resistência, há no mercado algumas unidades para sistemas isolados ou de alta resistência desenvolvidas por fabricantes (Senior Engenharia Ltda) “Limitação e Supervisão de Correntes de Curto-Circuito Fase-Terra em BT e MT”); (GE Electrical Distribution & Control, GEI-72116); (Cutler-Hammer, 2001). Uma característica fundamental dos sistemas de supervisão, detecção e localização de faltas fase-terra em sistemas elétricos de alta resistência é a arquitetura do tipo centralizada, com um processador único para todo o sistema sob supervisão definido pela seção de alimentação do secundário do transformador, pois as faltas à terra não se propagam através de transformadores Δ -Y.

4.6 LIMITES DE DETECÇÃO DE FALTA À TERRA POR CAUSA DE DISPARO SOLIDÁRIO

O limite prático de proteção de falta à terra em sistemas elétricos industriais é função de parâmetros físicos. A corrente que flui à terra tem somente dois caminhos: (a) pode fluir à terra através de uma falta fase-terra; ou (b) pode fluir à terra através da capacitância distribuída do sistema.

A corrente fluindo à terra através das capacitâncias distribuídas do sistema pode causar o disparo solidário (“*sympathetic tripping*”) durante uma falta à terra, ou causar um disparo intempestivo (“*nuisance tripping*”) durante a operação normal (Evaluation of Sympathetic Nuisance Tripping Involving Instantaneous Ground Fault Relays and General Considerations for Ground Fault Protection of Industrial Power Systems, 1998). Se o nível de disparo da proteção for alto o suficiente para eliminar o disparo solidário, o disparo intempestivo, devido à corrente de carga capacitiva desbalanceada, não é geralmente um problema. Entretanto, se o disparo solidário não é o problema, e se os níveis de disparo da proteção são abaixados, o disparo intempestivo pode se tornar um problema.

A detecção de baixos níveis de corrente para a proteção de falta à terra é limitada pela capacitância do sistema, pelas cargas desbalanceadas, pela limitação dos sensores de corrente, e pelas harmônicas. Todos estes fatores afetam a medição de corrente e limitam a capacidade de detecção de faltas à terra (Savostianik, 2000).

Supondo um sistema de alta resistência, como aquele mostrado na figura 4.8, e supondo $I_A = I_B = I_C = 1,0$ A (sistema sem falta à terra), tem-se que $(3I_{C0}) = 3,0$ A. Notar que, quando há uma falta na fase A, supondo resistor de neutro de 5 A, $I_R = 5,0$ A, e $I_B = I_C = 1,73$ A. A magnitude da falta fase-terra é de $I_F = I_R - (I_B + I_C) \Rightarrow I_F = \sqrt{(I_R)^2 + (3I_{C0})^2} = \sqrt{(5)^2 + (3)^2} = 5,8$ A, isto é, a corrente de falta à terra pode ser detectada, pois é maior do que $3I_{C0}$ (5,8 A > 3 A).

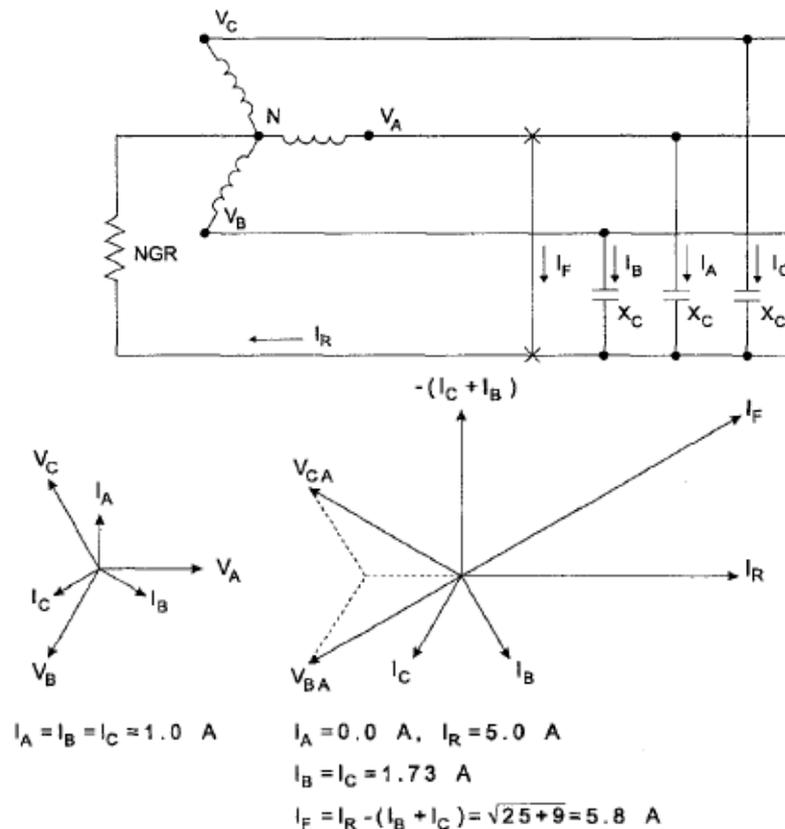


Figura 4.8 – Sistema aterrado por alta resistência: sistema sem faltas, e sistema com uma falta à terra (Savostianik, 2000), (Paulson, et al., 2003)

Considerando-se o mesmo sistema da figura 4.8, mantendo-se $3I_{C0} = 3,0 \text{ A}$, porém, com três alimentadores conforme mostrado no diagrama trifilar da figura 4.9, sendo um dos alimentadores com a falta fase-terra. Isto é, cada alimentador tem uma corrente de “charging” de $3I_{C0} = 1,0 \text{ A}$. Sem qualquer falta à terra, cada amperímetro de “ground-sensor” mostrado nos circuitos da figura 4.9 mostraria uma corrente de sequência zero nula. Após uma falta à terra no alimentador 2, o amperímetro A_1 lê: $I_{B1} + I_{C1} = 1,0 \text{ A}$; A_3 lê: $I_{B3} + I_{C3} = 1,0 \text{ A}$; e A_2 lê: $I_{B2} + I_{C2} + I_F = 5,4 \text{ A}$, conforme mostrado na figura 4.9. Isto é, os alimentadores são apresentados, após a falta à terra, uma corrente de $1,0 \text{ A}$, enquanto que o alimentador diretamente sob falta à terra apresenta uma corrente de $5,4 \text{ A}$. Isto significa que o ajuste para detecção de falta à terra deve estar acima de $1,0 \text{ A}$, porém abaixo de $5,4 \text{ A}$ para cada alimentador.

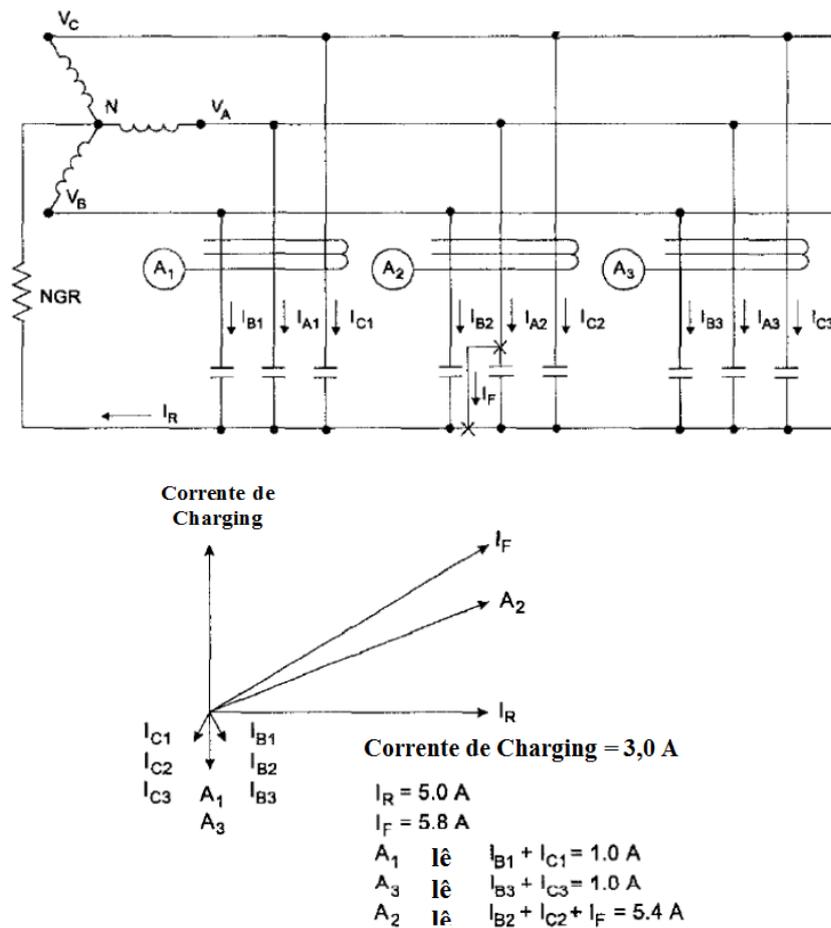


Figura 4.9 – Sistema aterrado por alta resistência com o alimentador 2 sob falta à terra e a circulação de correntes de sequência zero em cada alimentador (Paulson, et al., 2003),

A título de ilustração, a figura 4.10 mostra com mais detalhes como a corrente de “charging”, num sistema de alta resistência de neutro (RAV), pode causar o disparo solidário (“*sympathetic tripping*”) nos alimentadores normais, por causa de uma falta à terra no outro alimentador.

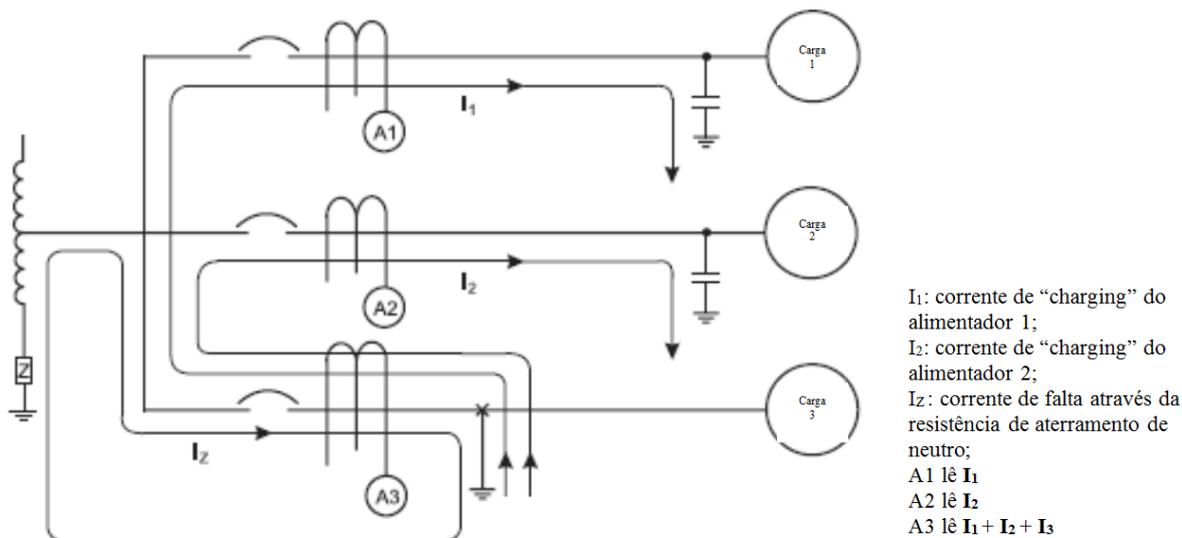


Figura 4.10 - Sistema com múltiplos alimentadores e com uma falta à terra num dos alimentadores e circulação das correntes de “charging” (Savostianik, 2000)

Os TCs toroidais dos ramos que não sofreram a falta detectam a corrente de “charging” dos seus respectivos alimentadores, porém, o TC do ramo sob falta à terra detecta o fasor resultante da soma das correntes de “charging” dos alimentadores (sem falta) e da corrente que flui ao resistor de neutro de alta impedância. Para evitar o disparo solidário em todos os dispositivos de proteção de terra, o nível de “pick-up” de corrente do dispositivo de proteção de falta à terra deve ser ajustado acima da máxima corrente de “charging” referente ao alimentador com a maior contribuição de corrente de “charging”. Para evitar o disparo solidário em ramos de circuito mais à montante, o nível de “pick-up” de corrente do dispositivo de proteção de falta à terra de um alimentador mais à montante deve ser ajustado acima da corrente de “charging” referente a todo o sistema à jusante (“downstream”). O “pick-up” de todo o sistema de proteção F-T deve ser o mesmo, enquanto que a seletividade é conseguida pelo atraso nos tempos de disparo para os elementos de proteção de terra mais à montante.

4.7 DISPARO INTEMPESTIVO DA PROTEÇÃO DE SOBRECARGA DE PEQUENOS MOTORES DEVIDO ÀS FALTAS À TERRA

Quando há pequenos motores num sistema de neutro aterrado por alta resistência, o dispositivo de sobrecarga de um motor pode operar intempestivamente (“nuisance trip”) quando houver uma falta fase-terra do lado da carga em relação ao dispositivo de proteção de terra (Locker, et al., 2009) do ramal do motor.

Para ilustrar o problema, considera-se um pequeno motor de 1 HP, 440V, alimentado por um sistema trifásico de 440V, com corrente nominal de $I_n = 1,8$ A, isto é, $I_A = I_B = I_C =$

1,8 A, e o sistema com neutro de resistor de alto valor de 3 A. Quando ocorrer um curto fase-terra na fase A aparece, então, uma corrente de 3 A adicionais, nesta fase A, devido à corrente de “charging” $3I_{C0}$ do ramo do motor. Assim, as novas correntes em cada fase serão a soma fasorial da corrente capacitiva de “charging” com a corrente resistiva de 3 A que foi assumida como aproximadamente igual à soma algébrica entre elas:

$$I_A \approx 1,8 + 3 = 4,8 \text{ A, ou seja, aproximadamente 211\% de sobrecarga na fase A;}$$

$$I_B = I_C = 1,8 \text{ A;}$$

Utilizando disjuntores termomagnéticos típicos, conforme mostrado na figura 4.11, pode-se verificar que a proteção de sobrecarga irá operar entre 61 segundos e 115 segundos.

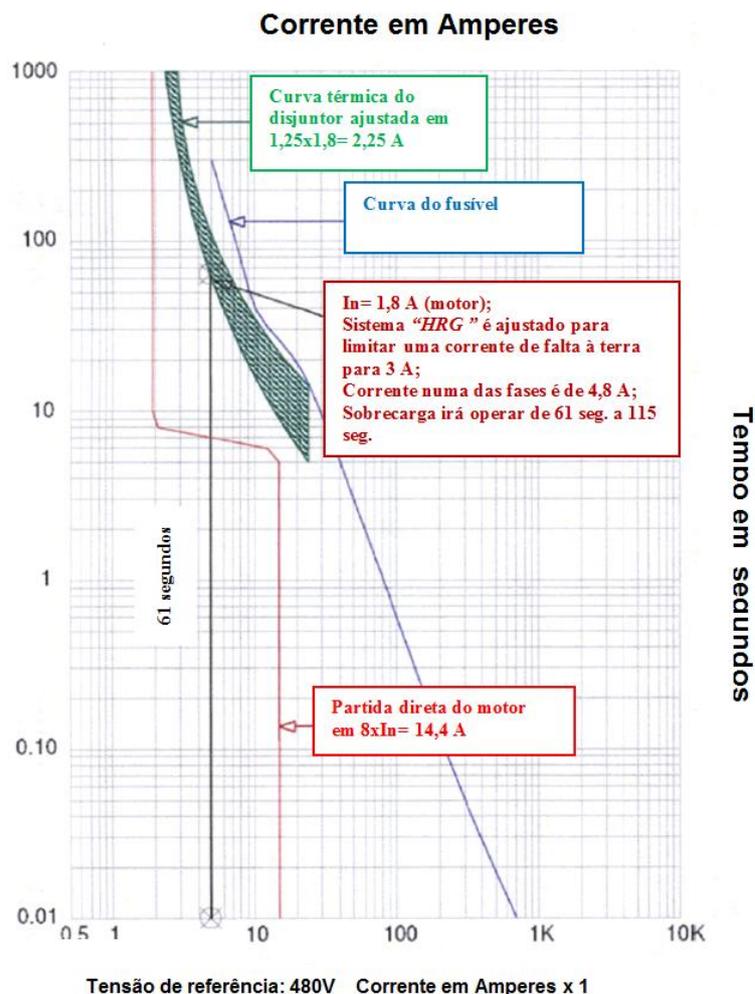


Figura 4.11 – Curvas de proteção e seletividade para um motor de 1HP (Locker, et al., 2009)

Baseada neste exemplo, a tabela 4.3 foi construída com os dados de correntes nominais dos motores de fabricação nacional, mostrando-se as diversas potências de motores que poderão sofrer o disparo da proteção de sobrecarga sob um sistema de resistor de neutro de alto valor de 3 A e de 5 A, supondo-se que a proteção possa operar para sobrecargas iguais ou acima de 125% da corrente nominal. Todas as sobrecargas acima de 125% foram realçadas na tabela 4.3, na coluna intitulada por “% sobre FLA”.

Da tabela 4.3, conclui-se que em sistemas de resistor de neutro de 3 A, os motores menores ou iguais a 7,5HP sofrerão “trip” de sobrecarga para o caso de uma falta fase-terra, pois os motores de 7,5HP apresentam 127% de sobrecorrente em relação à corrente nominal numa das fases devido a uma falta à terra. Analogamente, para um resistor de 5 A, motores menores ou iguais a 15HP, sofrerão disparo de sobrecarga para faltas à terra, pois apresentam valores de sobrecorrente iguais ou maiores do que 125% da corrente nominal.

Tabela 4.3 – Disparo da proteção de sobrecarga de pequenos motores de 440V devido aos curtos à terra em sistemas de neutro de alta resistência

HP	FLA (corrente de plena carga, em Amperes)	Ajuste da curva térmica em 1,25*FLA (proteção de sobrecarga)	FLA + 3 A de corrente de terra	% sobre FLA	FLA + 5 A de corrente de terra	% sobre FLA
0,5	1,0	1,25	4,0	400,0%	6,0	600,0%
0,75	1,4	1,75	4,4	314,3%	6,4	457,1%
1	1,8	2,25	3,8	211,1%	5,8	322,2%
1,5	2,5	3,13	5,5	220,0%	7,5	300,0%
2	3,4	4,3	6,4	188,3%	8,4	247,1%
3	4,5	5,63	7,5	166,7%	9,5	211,1%
5	7,5	9,38	10,5	140,0%	12,5	166,7%
7,5	11,0	13,75	14,0	127,3%	15,0	136,4%
10	14,0	17,50	17,0	121,4%	19,0	135,7%
15	20,0	25,0	23,0	115,0%	25,0	125,0%
20	26,0	32,5	29,0	111,5%	31,0	119,2%
25	32,0	40,0	35,0	109,4%	37,0	115,6%
30	39,0	48,75	42,0	107,7%	44,0	112,8%
40	52,0	65,0	55,0	105,8%	57,0	109,6%

Para resolver este problema de disparo intempestivo da proteção de sobrecarga em motores menores ou iguais a 15HP em sistemas RAV, é necessário o uso de dispositivos de proteção de sobrecarga inteligentes (Locker, et al., 2009), por exemplo, que medem as correntes de fase reais do motor, com um ajuste percentual de corrente máximo para decidir quando há realmente a sobrecarga e, conseqüentemente, disparar a proteção de sobrecarga, somente quando for necessário.

4.8 RELÉ INDICADOR DIRECIONAL DE FALTA À TERRA

A proteção de falta à terra direcional pode ser utilizada nas seguintes situações (Alstom Guide):

- Proteção de falta à terra onde a proteção de sobrecorrente é constituída por relés direcionais;
- Redes de neutro isolado;
- Redes de neutro aterrado por bobina de Petersen;
- Quando a sensibilidade da proteção sensível à terra é ainda insuficiente, neste caso, o uso da proteção de falta à terra direcional pode aumentar a sensibilidade da proteção.

Há alguns métodos de detecção de faltas de terra comercialmente disponíveis, tais como, o método de indicação luminosa, baseados no deslocamento do sistema de tensões. Mas o desafio dos sistemas de alta resistência, após a detecção e localização da falha, de forma mais geral, é a localização exata do ponto de falta que, em geral, requer que sua realização seja feita através de uma procura manual utilizando medidores portáteis para seguir um sinal injetado de uma fonte pulsante ao ponto de falta. As faltas fase-terra em sistemas de alta resistência se caracterizam por baixíssimas correntes e por deslocamentos de tensão não uniformes ao longo de todo o sistema elétrico. As altas impedâncias do aterramento em paralelo das capacitâncias e da alta resistência de neutro limitam a corrente de falta à terra para valores muito baixos. A capacitância “*shunt*” distribuída cria um desafio adicional que advém do fato de que a corrente de falha está dispersa através do sistema.

Os relés numéricos modernos melhoraram a proteção de redes estimando os fasores de tensão e corrente e processando os sinais digitais. Os algoritmos de processamento de sinais digitais fornecem um maior desempenho na detecção e identificação de faltas.

No caso de localização de faltas de terra em sistemas de alta resistência, o conhecimento da direção de uma falta num determinado ponto do sistema é uma informação útil. A corrente de falta sempre flui da fonte do sistema elétrico ao local do ponto de falta. A diferença angular entre o fasor de corrente de falta e o fasor de tensão de referência determina a direção da falta. Com as técnicas de proteção numérica, tais como, o processamento de fasores de sequência zero, as pequenas correntes de falta são isoladas da corrente de carga para uma melhor detecção.

A corrente de falta e as correntes normais de fase têm uma componente de sequência zero que não está presente nas correntes de carga normais. A corrente de falta de sequência zero é muito maior do que qualquer corrente dispersa gerada por cargas ou circuitos assimétricos. O registro de polarização garante a informação de direcionalidade (Baldwin, 2003) e auxilia na distinção das correntes de dispersão que existiam antes da falta. Dependendo da configuração do esquema de aterramento, a corrente de falta pode ter componentes resistiva e capacitiva, ou apenas uma componente capacitiva. Pela natureza da capacitância “*shunt*” distribuída, a corrente capacitiva de “*charging*” alimentando a falta diminui à medida que se move para fora da falta, em direção aos limites do sistema elétrico.

Correntes residuais que fluem durante a operação normal podem limitar a aplicação da proteção “*ground-sensor*” em aplicações sensíveis. Proteções de terra com características de detecção de direcionalidade também podem ser úteis nestas aplicações (Alstom Guide).

Embora uma falta à terra num sistema de alta resistência possa permanecer indefinidamente, muitas faltas são do tipo intermitente. Em especial, as faltas localizadas durante o funcionamento de cargas cíclicas. Isto é, a falta está no sistema por um curto período, de fração de segundo, durante o funcionamento de uma determinada carga (carga de motores de posicionamento de equipamentos na manufatura, cargas de motores de equipamentos de solda a ponto, etc). Isto tudo leva à necessidade de algoritmos rápidos de detecção e identificação de direção de faltas dentro dos primeiros ciclos, o que não é possível de ser detectado por métodos de localização manuais, através da modulação de sinais de corrente no resistor de neutro, ou injeção de sinais de frequência não fundamental.

Por outro lado, teoricamente, as informações fasoriais poderiam ainda fornecer, não somente a informação de direcionalidade da falta, mas também uma estimativa de distância elétrica do ponto de medição. Mas a maior vantagem deste método é a identificação e a detecção das faltas intermitentes (Baldwin, 2003) que, pela sua natureza de ocorrência durante um curto lapso de tempo, fica quase impossível de ser detectada pelo método convencional de localização manual através de sinais pulsantes causadas por um pequeno curto-circuito parcial e periódico que flui através do resistor de neutro, ou pelo método de injeção de sinais pulsantes de frequência não fundamental.

4.9 AJUSTES MÍNIMOS PARA PROTEÇÃO “GROUND-SENSOR”

Utilizando-se um resistor de neutro de 5 A, por exemplo, pela precisão de 10% de fundo de escala comumente encontrada em relés, o relé 50/51GS tem sensibilidade para correntes iguais ou maiores que 500mA. No valor de corrente de 500mA, tem-se uma cobertura de 90% do enrolamento de uma máquina elétrica, se o resistor de neutro for de 5 A, conforme será ‘exposto no capítulo 6.

Por outro lado, na parte de proteção contra incêndios, há estudos que falam da ignição dos depósitos de carbono sobre enrolamentos de máquinas elétricas ou, genericamente, sobre a superfície de qualquer equipamento elétrico que começa em 300mA na BT. Uma certa potência de corrente de fuga (corrente x tensão) seria, então, capaz de produzir incêndio e a norma fixou o valor máximo em 500mA na BT e que, coincidentemente, seria o ajuste que daria 90% de cobertura para um motor.

No caso de proteção do ser humano, o valor ideal seria 30mA, mas isto é praticamente impossível de se ajustar num ambiente industrial. A prática, na maioria das instalações industriais de BT em sistemas RAV, mostra que o ajuste instantâneo do 50GS em 30mA (alta sensibilidade) pode abri-lo intempestivamente, de modo a não permitir que os motores de BT, em ambiente industrial, partam ou funcionem normalmente devido às pequenas correntes de fugas à terra. As razões podem ser as mais variadas: desgaste da isolação que não resulte em falha capaz de acionar a proteção por seccionamento automático, uso errôneo de equipamento classe 0 em locais não-isolantes, perda ou interrupção do condutor de proteção, etc, isto é, são riscos difusos, mas reais, difíceis de serem quantificados. Até 300mA tem-se alguma proteção do ser humano. Portanto, há uma coincidência e convergência de conceitos

e de interesses de ajustes que sugerem fortemente o ajuste mínimo de “trip” para alarme da proteção de terra, baseada em ground-sensor, em 300mA, ao invés de 500mA. Este ajuste também possibilita acompanhar a deterioração da isolação na BT mas, principalmente, na MT, que têm os motores com os maiores custos e que se justificam economicamente para terem o emprego de proteções 50/51GS individualizadas para cada motor.

A possibilidade de detecção de baixas correntes através da corrente residual, da ordem de 300 a 500mA, é uma exclusividade proporcionada pelos sistemas de neutro aterrado por alta resistência (RAV). Além de os sistemas RAV possibilitarem o acompanhamento da deterioração da isolação dos enrolamentos de um motor de MT com estes ajustes sensíveis, eles possibilitam também a proteção parcial do ser humano contra o contato direto na BT, e a proteção do patrimônio contra incêndios na BT.

O gráfico 4.12 sobre os efeitos de corrente elétrica no corpo humano versus tempo, dada na *IEC-60479* (IEC-60479), é o que originou todas as outras recomendações de normas pertinentes ao assunto de proteção do ser humano, inclusive a NBR-5410 (ABNT).

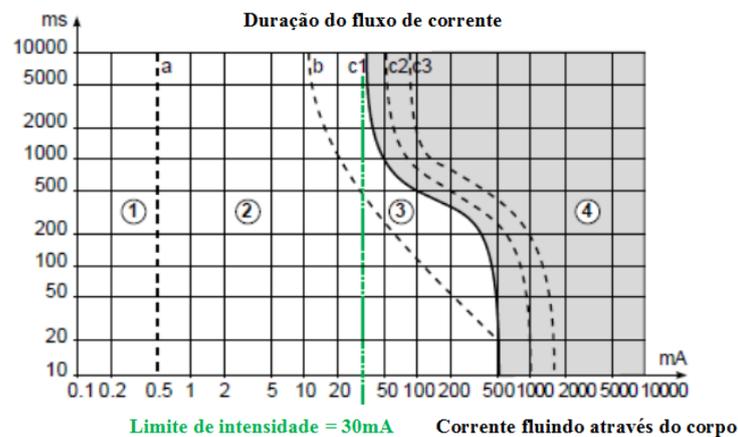


Figura 4.12 - Efeito da corrente sobre os seres humanos, em função da sua intensidade e do tempo de passagem da corrente CA (15 a 100HZ), conforme a IEC 60479-1

Na figura 4.12 distinguem-se as 4 zonas de gravidade crescente:

- Zona 1 – ($\leq 0,5\text{mA}$) – Normalmente nenhum efeito perceptível;
- Zona 2 – Sente-se a passagem da corrente, mas não se manifesta qualquer ação do corpo humano;

- Zona 3 – Zona em que se manifesta o efeito de agarramento: uma pessoa empunhando o elemento causador do choque elétrico não consegue mais largá-lo. Todavia, não há sequelas após a interrupção da corrente;
- Zona 4 – Probabilidade, crescente com a intensidade e duração da corrente, de ocorrência do efeito mais perigoso do choque elétrico, que é a fibrilação ventricular.

Na proteção contra choques elétricos estabelecida pelas normas de instalação, é considerado apenas o risco de eletrocussão devido à fibrilação ventricular, que é função da intensidade e do tempo de passagem da corrente. O documento *IEC* também traz detalhes deste parâmetro, apurados indiretamente com dados experimentais, trabalhados estatisticamente, acerca do corpo humano e da tensão de contato associada. É na zona 4 que ocorre a fibrilação ventricular. Isto mostra que se pode receber até uns 300mA em 100ms, dependendo ainda das condições em que se encontra o corpo humano (tensão aplicada, trajeto da corrente no corpo que é função dos pontos onde a corrente é injetada e retirada do corpo humano, umidade da pele, etc) e da própria condição da instalação. A curva assinalada pela "corrente de 30mA" mostra uma área ideal para proteção contra choques diretos onde o nível de 30mA está em função do tempo de 50ms, caindo na zona 2 (*IEC-60479*). Somente este ajuste de sensibilidade oferece uma proteção efetiva ao ser humano contra contatos diretos na BT. Assim, os dispositivos residuais com ajuste superior a 30mA só são admitidos na proteção contra contatos indiretos, devendo a instalação e os equipamentos suprir, através de um projeto mais apropriado, a isolação necessária para a segurança do ser humano. O tempo de operação dos dispositivos residuais de corrente na BT deve estar conforme a tensão de contato estipulada na tabela 6.1 da *IEC-60364* (*IEC*), em função de condições ambientais e, particularmente, da presença ou ausência de água, e da tensão limite de segurança (tensão abaixo da qual não há risco para o ser humano).

Na NBR-5410 e, em geral, nas normas nacionais de instalação alinhadas com a *IEC-60364* (*Electrical Installations of Buildings*), o ajuste da proteção diferencial especificada deve ser de, no máximo, 500mA, sendo recomendável que o dispositivo residual seja ajustado a, no máximo, 300mA, para eliminar os riscos de incêndio e que, conforme a *IEC-60479* ainda teria, concomitantemente, alguma proteção ao ser humano. Desta forma, este limite de ajuste em 300mA está mais voltado para a

proteção da instalação do que para o do ser humano e, principalmente, para proteção contra contatos indiretos. Com este objetivo de proteção do ser humano e contra incêndio, a proteção deve abrir o circuito imediatamente. A publicação *IEC-60364* (IEC) cita que correntes de fuga à terra acima de 300mA representam um risco real de incêndio. Pesquisas indicam (vide figura 4.13) que um aumento progressivo nas correntes de fuga superficiais (“*tracking currents*”) sobre isolações ou superfícies sujas resultam em pequenas descargas que ocasionam depósitos de carbono. Este fenômeno é lento, pois está relacionado com ciclos de condensação e secagem da umidade sobre a superfície. Mas se a corrente de fuga superficial exceder os 300mA, um fenômeno denominado de “avalanche” ocorre e pode inflamar os depósitos de carbono os quais, por sua vez, podem iniciar um incêndio sobre as isolações e, conseqüentemente, podem atingir os dispositivos elétricos (Merlin Gerin) - “*Protection of Property: Fire Hazards*”.

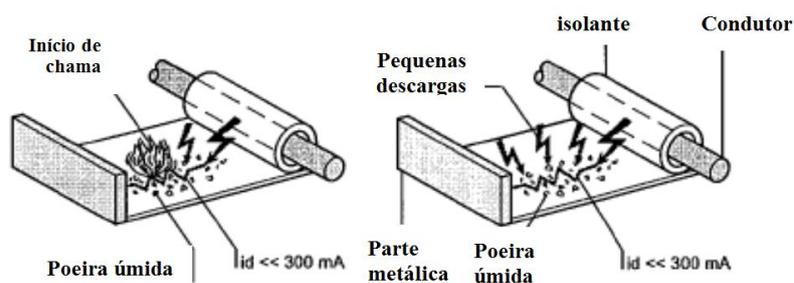


Figura 4.13 – Correntes de fuga superficiais (“*tracking currents*”) iguais e acima de 300mA podem iniciar um incêndio (Merlin Gerin)

Quanto à forma de aterramento das massas a proteção residual é obrigatória na indústria como proteção complementar em sistemas TN-S na BT, abrangidos pela NBR-5410 (ABNT), nos painéis que alimentam dispositivos (ex: circuitos e tomadas de equipamentos diretamente acessíveis e que podem ter contato com um operador, aparelhos de iluminação posicionados em altura inferior a 2,50m, etc). A proteção residual também é obrigatória na BT e com sensibilidade indeterminada na proteção contra choques elétricos na BT por seccionamento automático em esquemas TT, para as tensões superiores à tensão limite de segurança, definida como 50 V ou 25 V, conforme o local. No sistema TT o dispositivo de sobrecorrente é ineficaz e de uso não permitido. A proteção residual é também de uso obrigatório na BT e com sensibilidade indeterminada na proteção contra choques elétricos por seccionamento automático em esquemas IT, quando as massas forem aterradas individualmente ou por grupos, onde recai o caso do sistema RAV. As proteções definidas em função dos

esquemas de aterramento de massas e equipamentos são também aplicáveis para a MT, pois há regras equivalentes na NBR-14039.

Quando os circuitos são energizados, há correntes transitórias causadas por motores e transformadores, pela capacitância de carga dos cabos em relação à terra, por inversores de frequência que geram correntes de fuga de alta frequência. Por esta razão, os dispositivos de proteção residual na indústria necessitam geralmente de filtros e de medições de corrente eficaz de fuga para otimizar a proteção do ser humano e do patrimônio, e manter a continuidade do serviço (Schneider Electric, 2008).

Outros fatores que afetam o desempenho do “*ground-sensor*” com ajuste sensível podem ser os seguintes: desgaste da isolação que não resulte em falha capaz de acionar a proteção por seccionamento automático, uso errôneo de equipamento classe 0 em locais não-isolantes, perda ou interrupção do condutor de proteção, etc, isto é, são fatores difusos, mas reais, difíceis de serem quantificados. É importante também que as instalações observem também os critérios de compatibilidade eletromagnética (“*EMC*”) de modo que os condutores PE não conduzam corrente em operação normal. Para evitar o problema de saturação localizada em sistemas de neutro aterrado por baixa resistência, mesmo com correntes equilibradas, várias medidas de projeto de instalação devem ser implementadas, inclusive para reduzir a interferência eletromagnética de circuitos vizinhos, para permitir ajustes de média sensibilidade do “*ground-sensor*”, isto é, para detecção e interrupção instantânea de curtos fase-terra da ordem de 200 a 400 A. Em suma, os ajustes de alta sensibilidade em sistemas elétricos industriais, na faixa de 300 a 500mA, têm uma melhor garantia de funcionamento e desempenho nos sistemas de neutro aterrado por alta resistência e a vantagem de se poder conviver com esta falta sem acarretar danos imediatos aos equipamentos.

Motores de BT, ou melhor, um conjunto deles alimentados por um CCM, em sistemas de neutro de alta resistência (RAV), têm a vantagem de poderem ser protegidos pelos dispositivos 50GS/51GS (temporizados, ou instantâneos, porém com filtros para superar os transientes de partida) e com possibilidade de ajuste bastante sensível, entre 300 e 500mA e que, por este nível de ajuste, atendem concomitantemente os requisitos de normas de proteção de equipamentos contra incêndios. As falhas em enrolamentos indicam que, em sistemas RAV de 2,4 e 4,16kV, as correntes de falta à

terra, de 8 a 10 A, não dissipam energia suficiente para provocar a carbonização dos enrolamentos nas máquinas girantes e, conseqüentemente, provocar o arco de carbono (“*carbonous arc*”) e a sua escalada ou evolução para causar a fundição apreciável das chapas laminadas do núcleo do motor. Desta forma, a proteção 50/51GS em sistemas RAV, ajustada entre 300 e 500mA, para alarmar, apresenta uma perfeita proteção aos motores contra os “arcos de carbono” nos enrolamentos proporcionando a monitoração da lenta deterioração da isolação de motores na BT e na MT. A proteção 50GS pode ainda proporcionar uma proteção contra incêndios na BT, e uma proteção relativa contra o choque elétrico na BT, desde que o circuito seja aberto imediatamente.

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de aterramento de neutro de alta resistência oferece a vantagem de continuidade de serviço sob a condição de uma falta simples à terra, o que é crítico para muitas indústrias, como aquelas do ramo de petróleo, químico, minas, têxtil, cimento, papel e celulose, alimentos, vidros, etc.

Os sistemas de alta resistência de neutro (RAV) podem ser aplicados na BT e na MT até 4,16kV com as ressalvas discutidas. Na MT podem proteger cada motor individualmente, além dos ramais alimentadores de CCMs e de painéis em geral. Na BT são economicamente mais viáveis na proteção de painéis de força e iluminação, e de CCMs para um conjunto de motores de BT. A aplicação do RAV na MT (até 4,16kV) não é tão comum na literatura mundial, e mostra-se neste trabalho que é justamente a aplicação da proteção 50GS em motores de 4,16kV onde haveria as maiores vantagens. Os sistemas RAV devem ser dotados de proteções do tipo “*ground-sensor*” (50GS/51GS) com os ajustes entre 300 a 500mA, que proporcionam 90% de cobertura dos enrolamentos e podem também monitorar a degradação mais lenta da isolação de motores. Os sistemas RAV podem atender os requisitos de proteção de equipamentos contra incêndios na BT e, em menor grau, podem proteger contra o contato direto na BT, desde que os circuitos sejam desconectados instantaneamente. As falhas em enrolamentos indicam que, em sistemas de 2,4 e 4,16kV, com neutro aterrado por alta resistência, correntes de falta à terra de 8 a 10 A não dissipam energia suficiente para provocar a carbonização ou a evolução do arco carbono nos enrolamentos de máquinas girantes de até 13,8kV. Por outro lado, mesmo para o sistema de

aterramento de alta resistência, o seu sucesso depende principalmente da remoção rápida do motor que apresentar uma falta à terra pois, assim mesmo, um dano já considerável pode ter acontecido ao motor.

Dentre as principais vantagens do sistema RAV, destacam-se:

- Oferece todos os benefícios de um sistema isolado e quase nenhuma de suas desvantagens;
- Permite a continuidade do processo industrial com uma simples falta fase-terra no sistema;
- Permite o desligamento ordenado, se necessário, para remover um circuito faltoso;
- Elimina as sobretensões devidas às faltas intermitentes e por ressonância, porém, exige níveis de isolamento do sistema para 250%, em contraste com 100% para os sistemas efetivamente aterrados, conforme a tabela 7.6 (a parte de sobretensões é analisada no capítulo 7). Isto influencia na especificação de cabos, para-raios, motores, CCM's, barramentos, contadores, e todo tipo de equipamento sujeito ao estresse adicional de isolamento fase-terra;
- Reduz o risco de arco elétrico em relação ao sistema de neutro aterrado por baixa resistência, e muito mais em relação ao sistema solidamente aterrado;
- Pode ser equipado com vários tipos de dispositivos de alarme ou indicadores para localizar a primeira falta à terra de forma fácil e rápida;
- Pode ser combinado com relés de proteção de fase que respondem para uma segunda falta.

A aplicação do sistema de alta resistência afeta a parte econômica do projeto em relação ao próprio sistema de detecção e proteção de terra, aos cabos de potência de MT que devem ter maior classe de isolamento, e devido aos seguintes aspectos:

- Maiores custos do sistema de proteção de terra que utiliza um sistema de detecção de falta à terra (50/51GS) com ajustes da ordem de 2,5 a 6 A para detectar um curto F-T, junto com outro sistema de proteção de terra (50/51GS), mais sensíveis, com ajustes da ordem de 300 a 500mA, para garantir a cobertura de 90% do enrolamento de motores de MT, podendo também monitorar a deterioração da isolamento de motores. Podem também proporcionar uma proteção contra incêndio (na BT) e contra o choque elétrico (na BT). Este sistema de proteção de terra, com

possibilidade de ajustes mais sensíveis, é uma vantagem exclusiva do sistema de alta resistência (RAV);

- Custo maior de material devido à isolação maior dos cabos e equipamentos;
- Requisitos maiores para o preenchimento de eletrodutos e leitos de cabos devido aos diâmetros maiores, e menores raios de curvatura;
- Maiores custos de instalação devidos ao peso e tamanho dos cabos;
- Maiores custos relativos ao sistema de detecção e localização de faltas, inclusive a detecção de continuidade do caminho de neutro para a eventualidade de perda deste;
- Treinamento de pessoal mais especializado para saber lidar com uma primeira falta à terra, e localizá-la num curto espaço de tempo;
- O projeto de distribuição de cabos deve ser feito de forma a facilitar a identificação dos circuitos, através de amperímetros manuais, após a detecção e localização mais geral proporcionada pelo sistema centralizado de supervisão e localização de faltas. O acesso e identificação dos cabos e circuitos devem ser previstos de modo a evitar a exposição do pessoal de manutenção às partes vivas enquanto estiverem à procura do ponto exato de falta à terra no sistema;
- O sistema com resistor de neutro não admite cargas monofásicas. Se for o caso, estas cargas podem ser segregadas por um transformador de isolação, o que retira a vantagem do RAV para estes tipos de cargas;
- Motores de menores ou iguais a 15HP podem sofrer o disparo da proteção de sobrecarga devido aos curtos fase-terra, à jusante da proteção. Para isto, requer-se o uso de proteções inteligentes ou a segregação destes motores para serem alimentados através de um transformador o que retira a vantagem do RAV para estes tipos de cargas, pois estas seriam alimentadas por outro método de aterramento de neutro, isto é, o solidamente aterrado;
- Altas correntes harmônicas podem obrigar a um ajuste maior ou mesmo limitar a utilização destes sistemas de neutro de alta resistência. Além disso, o ajuste deve estar acima das correntes de “*charging*” devidas aos curtos em outros circuitos, e

acima das correntes residuais devidas aos desbalanceamentos do sistema. Correntes residuais que fluem durante a operação normal podem limitar a aplicação da proteção “*ground-sensor*” em aplicações sensíveis, especialmente se a mesma não for dotada de características de detecção de direcionalidade. Cargas fontes de harmônicas (ex: inversores de frequência ou “*VFDs – Variable Frequency Devices*”) podem impactar nas proteções de terra e no seu ajuste, especialmente se forem destituídas de filtros de correntes harmônicas de terceira ordem e de suas múltiplas (Littelfuse, Inc., 2012);

- Há a necessidade de proteção eficiente de curto de espira para espira em máquinas girantes para evitar a evolução deste tipo de falha ao ponto de degradação final da isolamento evitando-se a severa queima do núcleo do motor. Este assunto está analisado no capítulo 6.

Nos sistemas de neutro de alta resistência (RAV) a detecção de falta à terra, por causa dos baixíssimos níveis de corrente, é geralmente fornecida pela medida de tensão de sequência zero (“*broken-delta*”) e, portanto, o desempenho do TC não está envolvido, (com exceção dos eventuais “*ground-sensors*” utilizados com ajuste sensível de 500 mA para a proteção de terra e o monitoramento da isolamento de motores). E, complementarmente, pode-se utilizar TCs toroidais extras para fins de detecção das correntes de falta à terra em sistemas de neutro aterrado por alta resistência, da ordem de 8 a 10 A, referente ao limite admissível para evitar a escalada das falhas de carbonização (“*carbonous faults*”) em enrolamentos de máquinas girantes em sistemas de 2,4 e de 4,16kV.

5 SISTEMA DE ATERRAMENTO DE NEUTRO DE GERADORES E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O aterramento da fonte pode ser realizado pelo aterramento do(s) gerador(es) e/ou pelo(s) transformador(es) de potência. O aterramento dos transformadores pode ser utilizado no lugar do aterramento dos geradores em várias situações, ou em conjunto. Os geradores de MT não são projetados para suportar a corrente de curto-circuito fase-terra plena, e é esta a razão pela qual eles são comumente conectados aos sistemas através de neutro aterrado por resistência de baixo valor ou de alto valor. Além disso, o tipo mais comum de falta à qual o enrolamento do estator do gerador pode ser submetido é o curto-circuito à terra. Num contexto geral, este capítulo tem como objetivo apresentar os métodos típicos de aterramento de neutro de geradores, pois estes métodos apresentam suas peculiaridades em relação ao aterramento de neutro de transformadores, e têm implicações no percentual de cobertura do enrolamento de geradores e na eficiência da proteção de terra em função do tipo de aterramento de neutro. É também analisado o caso de grandes geradores que trabalham em paralelo e que podem ter sistemas de aterramento de neutro híbrido, de alta e de baixa resistência, para minimizar danos internos às máquinas, em caso de falta à terra.

5.2 MÉTODOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO DE GERADORES

Os principais métodos de aterramento de neutro de geradores são: de baixa resistência RBV (também denominado por “LRG” – “*Low Resistance Grounding*”); efetivamente aterrado; aterrado por reatância; aterrado por alta resistência (também denominado por “HRG” – “*High Resistance Grounding*”); e não aterrado.

Os objetivos do aterramento de neutro de gerador são:

- Minimizar os danos para faltas à terra internas;
- Limitar os esforços mecânicos no gerador para faltas externas;
- Limitar temporariamente as sobretensões transientes no sistema de isolamento do gerador;
- Fornecer meios para a efetivação de um sistema de detecção de falta à terra;

Os principais métodos de aterramento do neutro em geradores são apresentados na figura 5.1 e serão descritos nos itens subsequentes.

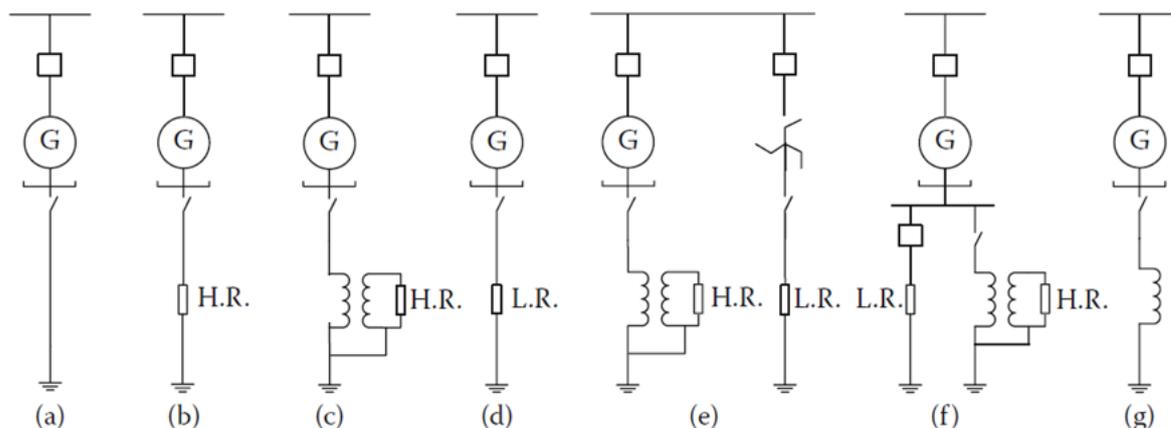


Figura 5.1 - Métodos de aterramento do neutro em geradores (Khan, 2008)

5.3 NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO

O gerador com o neutro solidamente aterrado conforme mostrado em 5.1(a) não é um método recomendado para os geradores pelas seguintes razões:

- A corrente de falta à terra é alta e os danos são proporcionais a $I^2.t$, havendo possibilidade de ocorrer extensos danos internos aos enrolamentos do estator;
- O gerador é normalmente projetado para suportar esforços associados às faltas trifásicas em seus terminais. Como geralmente a impedância de sequência zero do enrolamento do gerador é baixa, uma falta sólida fase-terra nos terminais da máquina produzirão altas correntes nos enrolamentos, superiores àquelas correspondentes ao do curto trifásico;
- Há risco de circulação anormal de correntes harmônicas de 3ª ordem;
- Há risco de ocorrer dano mecânico devido às faltas fase-terra.

Entretanto, neutros solidamente aterrados podem ser aplicados em geradores de emergência que alimentam diretamente sistemas de BT, onde há cargas monofásicas conectadas entre fase-neutro.

O *Buff Book* (IEEE Std 242, 2001) diz que o aterramento sólido do neutro de gerador não é recomendado porque pode resultar em altos esforços mecânicos e danos às máquinas, com exceção para o caso de geradores de pequeno porte. Pela *ANSI*, o máximo esforço que um gerador é projetado para suportar está associado às faltas trifásicas em seus terminais. Para atender a norma *ANSI C50.13-1989*, os geradores

devem ser aterrados de tal forma que as máximas correntes fase-terra sejam menores do que os valores correspondentes trifásicos.

5.4 NEUTRO ATERRADO POR ALTA RESISTÊNCIA

O aterramento por alta resistência é mostrado em 5.1(b) ou (c). A corrente é limitada na faixa entre 5 a 15 A, e o gerador é desligado na primeira falta à terra. As vantagens são:

- Mínimo dano devido às faltas internas;
- Limitação das sobretensões transientes.

A aplicação bem sucedida do aterramento RAV depende de a capacitância do sistema ser suficientemente limitada.

Um resistor diretamente conectado, conforme mostrado em 5.1(b) não é recomendado, pois alta resistência e baixa corrente tornam o resistor mais frágil contra danos mecânicos. Numa combinação resistor-transformador conforme mostrado em 5.1(c), um transformador do tipo distribuição monofásico é usado para o aterramento do neutro e o resistor é conectado ao secundário. Esta combinação permite a aplicação de resistores robustos de corrente nominal mais alta.

O problema do emprego do sistema RAV é a sensibilidade da proteção de terra. O valor da falta fase-terra é intimamente dependente do tipo de aterramento do gerador e, conseqüentemente, os dispositivos de proteção de fase podem não ser suficientemente sensíveis para as faltas à terra. Assim, o valor da falta fase-terra pode variar desde zero (sistema não aterrado) até o valor do curto-circuito trifásico (ou maior, para sistemas solidamente aterrados). Outro aspecto importante é que, conforme o ponto de falta se move dos terminais na direção do neutro do gerador, o valor da corrente de falta no estator vai decaindo.

Um esquema diferencial pode detectar uma falta fase-terra dependendo do valor da falta e do tipo de aterramento. Quanto mais o valor da falta à terra é limitado em relação à corrente de carga nominal do gerador, maior o percentual desprotegido do enrolamento do estator. Esquemas diferenciais não propiciarão proteção de terra em sistemas aterrados por resistência de alto valor.

A norma *ANSI/IEEE C37.101-1993* (Pillai, et al., 2003) fornece alguns esquemas de proteção de terra. O esquema mais comumente utilizado para resistência de alto valor (RAV) consiste na utilização da proteção 59GN. Este relé é projetado para ser sensível à tensão de frequência fundamental e insensível para tensões harmônicas de terceira ordem e outras harmônicas de sequência zero. Há também o método de terceira harmônica que proporciona uma proteção contra falta à terra de 100% do enrolamento do estator.

5.5 NEUTRO ATERRADO POR BAIXA RESISTÊNCIA

O resistor é diretamente conectado ao neutro do gerador conforme mostrado em 5.1(d). Este método permite obter seletividade com os outros equipamentos conectados ao sistema e é geralmente usado onde:

- Um gerador for conectado diretamente ao barramento de carga da planta;
- Dois ou mais geradores estiverem em paralelo e conectados ao sistema através de um transformador elevador.

O valor nominal do resistor é geralmente de 100 A a 1,5 vezes a corrente de plena carga do gerador com um tempo de 10 segundos. Para aplicações industriais, o limite superior é de 400 A. Valores mais altos são usados em sistema de distribuição que utilizam condutores aéreos nus para os alimentadores de distribuição.

Embora os sistemas de aterramento de baixa resistência com o arranjo indicado na figura 5.1(d), sejam frequentemente usados para os geradores de plantas industriais, há a possibilidade de um dano extensivo devido às correntes mais altas de faltas internas. Por esta razão, o arranjo mostrado em 5.1 (e) é o mais aplicado, porém, com a proteção 59G e TPs em delta aberto.

Para sistemas aterrados na forma RBV, porém, com geradores aterrados em RAV, o método mostrado em 5.1(e) é o aplicado. Este arranjo fornece uma proteção contra as faltas fase-terra durante o “*start-up*” e a sincronização. A combinação de um transformador “*zig-zag*” de aterramento RBV de neutro e o gerador aterrado em RAV é muito recomendado pois, uma vez aberto o disjuntor do gerador, oferece as seguintes vantagens:

- Os danos devido às faltas à terra internas são reduzidas;

- A magnitude da corrente de terra é independente do número de transformadores ou geradores conectados ao barramento.

O método de aterramento híbrido mostrado na figura 5.1(f) é aplicado para um gerador conectado diretamente à barra numa instalação existente com aterramento RBV. Neste método, os sistemas RAV e RBV de aterramento de neutro são conectados ao neutro do gerador. O dispositivo de interrupção RBV é aberto como parte do esquema do gerador para a falta à terra, dentro da zona de proteção do gerador.

5.6 NEUTRO ATERRADO POR REATÂNCIA (NÃO SINTONIZADA)

A finalidade da reatância inserida no neutro é a de limitar a corrente de falta à terra. Este método não é usado, com a exceção discutida referente aos geradores de pequeno porte e discutida a seguir, e no caso de reatância sintonizada, pelas seguintes desvantagens:

- A corrente de falta requerida para operar o dispositivo de proteção é maior do que no caso de aterramento por resistência para a mesma condição de falta;
- Altas tensões transientes aparecem sob condições de falta.

Na figura em 5.1(g) é mostrado este método que é geralmente usado onde o gerador for conectado diretamente ao sistema de distribuição com um sistema solidamente aterrado.

Para fins de comparação entre os sistemas de neutro aterrado por reatância e os sistemas solidamente aterrados, e considerando curtos próximos à fonte de geração, a corrente de curto fase-terra poderia atingir níveis superiores ao curto trifásico. Denominando-se Z_0 como a impedância de sequência zero, e $3Z_g$ como a impedância do caminho de retorno de terra, a impedância total de sequência zero vale $(Z_0 + 3Z_g)$,

e o curto F-T vale: $I_{F-T} = \frac{3V_{TH}}{2Z_1 + (Z_0 + 3Z_g)}$. Assumindo-se $Z_g \approx 0$ e $Z_0 = Z_1$, o curto F-T vale:

$I_{F-T} = \frac{3V_{TH}}{2Z_1 + Z_0} = \frac{3V_{TH}}{3Z_1} = \frac{V_{TH}}{Z_1} = I_{3F}$. Porém, se $Z_0 < Z_1 \Rightarrow I_{F-T} > I_{3F}$. Isto é, para curtos F-

T próximos ao gerador com neutro solidamente aterrado, pode-se ter valores presumidos de curto F-T maiores do que o curto trifásico. Este é o motivo que os projetistas aterram o neutro de geradores com reatância de baixo valor, de modo que o curto fase-terra fique, pelo menos, igual ou pouco menor do que o curto trifásico para

evitar a possibilidade de dano no núcleo de ferro do enrolamento ou ranhura devido às faltas internas (do estator).

A reatância indutiva é escolhida para fornecer uma razão X_0/X_1 nos terminais da máquina na faixa de 1 a 10 (C37.102, IEEE Standards Board, 1995). A prática comum estipula em se manter um sistema efetivamente aterrado mantendo-se $X_0/X_1 \leq 3$ (C37.102, IEEE Standards Board, 1995). Desta forma, o aterramento de baixa reatância produz uma corrente fase-terra de 25% a 100% da corrente de falta trifásica. A referência *IEEE Std 142-2007 – “System Grounding”* (IEEE, 2007), no item 1.4.4 (“*Reactance Grounding*”) diz que, em sistema aterrados por reatância, a corrente de curto fase-terra deve ser de, no mínimo, 25% ($X_0 = 10X_1$). E, preferencialmente, 60% ($X_0 = 3X_1$) da corrente de curto trifásica para evitar sobretensões transitórias. O termo X_0 é a soma da reatância de sequência zero da fonte, mais três vezes a reatância de aterramento, $3X_N$ (onde $X_0 = X_{0_FONTE} + 3X_N$). Isto representa um valor de curto consideravelmente maior em comparação com o do sistema aterrado por resistência e, portanto, o aterramento por reatância não é, em geral, considerado como uma alternativa ao aterramento de baixa resistência.

Este método de neutro aterrado por reatância não é recomendado para plantas industriais.

5.7 ATERRAMENTO RESSONANTE

Este método é similar ao aterramento RAV conforme mostrado na figura 5.1(e), usando-se uma combinação transformador-resistor, exceto em que o resistor é trocado por um reator. O reator é escolhido de forma que a reatância indutiva se case com a reatância capacitiva trifásica do equipamento. Em faltas fase-terra a corrente de carga do sistema é neutralizada por uma componente igual ao da corrente indutiva. O sistema, também conhecido como sistema de bobina de Petersen, é geralmente usado para redes aéreas pequenas, mas tem a desvantagem de que o reator necessita ser ajustado para sintonizar-se em qualquer momento em que ocorra uma mudança na capacitância do sistema. A aplicação desta técnica para o aterramento de unidades de geração é mais favorável do que quando aplicada em sistemas de distribuição, por exemplo, porque envolvem curtas distâncias e valores fixos de capacitância do sistema. Com correntes de falta muito baixas, esta técnica permite a operação contínua do gerador com uma falta à terra até que uma parada programada seja feita. Esta

técnica não tem sido utilizada no Brasil e há trabalhos que indicam a possibilidade de sua utilização em aplicações industriais dentro de certas condições (Costa, 1995).

5.8 SISTEMAS DE NEUTRO DE BAIXA RESISTÊNCIA COM VÁRIAS FONTES DE GERAÇÃO

Estes sistemas consistem de conexões de aterramento através de resistências que limitam a corrente de falta em magnitudes de 100 a 800 A por um curto período de tempo. A escolha da magnitude da corrente de falta é feita para minimizar o dano no ponto de falta e possibilitar seletividade do sistema de proteção conforme ilustra a figura 5.2.

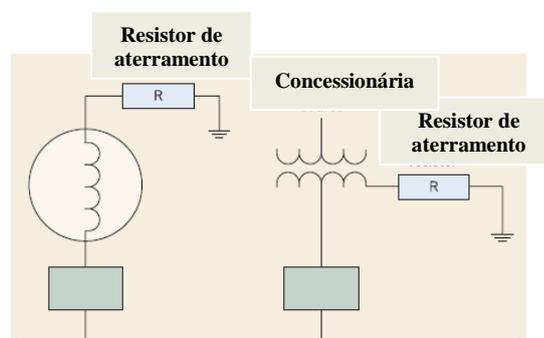


Figura 5.2 - Esquema de sistema aterrado por baixa resistência (Panetta, et al., 2009)

Além da minimização do dano no ponto de falta, os sistemas de baixa resistência reduzem os riscos ao choque devido às correntes de fuga, diminuem os esforços térmico e mecânico sobre os equipamentos, e controlam as sobre-tensões transientes.

À medida que a capacidade de geração cresce numa planta, o valor da corrente de falta também aumenta, conforme mostrado na figura 5.3.

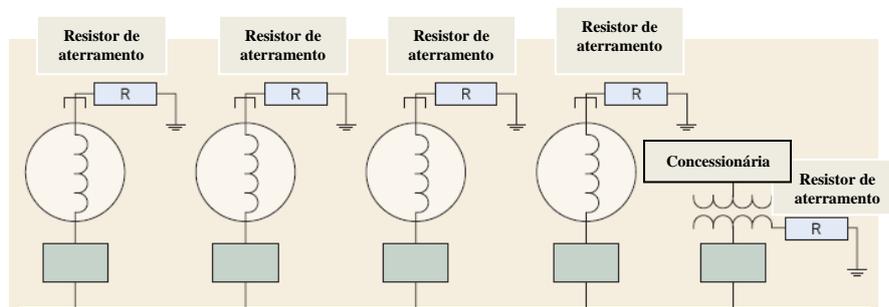


Figura 5.3 - Sistema multi-aterrado (Panetta, et al., 2009)

Por exemplo, se quatro geradores são acoplados a uma barra comum, a máxima corrente da falta à terra com resistores de neutro de 800 A pode estar entre 800 A (se apenas um gerador estiver ligado) até 3.200 A (se todos os quatro geradores estiverem ligados). A maior desvantagem deste tipo de sistema é quando uma falta à terra ocorrer dentro do enrolamento do estator de um dos geradores. A experiência mostra que a

falta à terra não será removida do gerador quando o disjuntor se abrir. De fato, o gerador continuará a alimentar a corrente de falta até que a excitação de campo desapareça. O resultado do dano físico causado ao gerador é função da duração da falta e, não, somente de sua magnitude.

5.9 SISTEMA ATERRADO EM UM ÚNICO PONTO

O aterramento em um único ponto assegura que somente uma única fonte seja aterrada em qualquer instante de tempo. Há diversas formas em que isso pode ocorrer. A figura 5.4 mostra um sistema com múltiplos pontos de aterramento de neutro, no qual seccionadoras garantem que somente um resistor esteja conectado ao sistema elétrico num determinado instante.

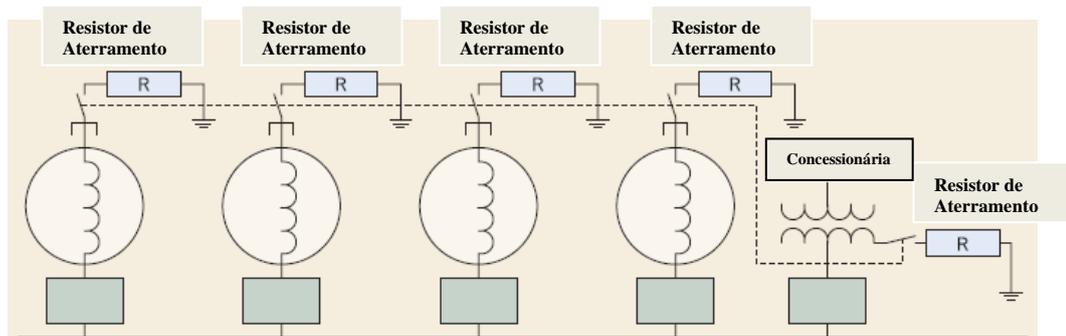


Figura 5.4 - Variação esquemática de um sistema aterrado em um único ponto (Panetta, et al., 2009)

A desvantagem deste arranjo é a complexidade causada pelas seccionadoras. O sistema também precisa de um procedimento operacional para qualquer tipo de configuração. Outra desvantagem é que o sistema se torna não aterrado enquanto os geradores são acelerados e colocados em serviço, até que sejam conectados ao sistema elétrico.

O sistema mostrado na figura 5.5 trata estas desvantagens.

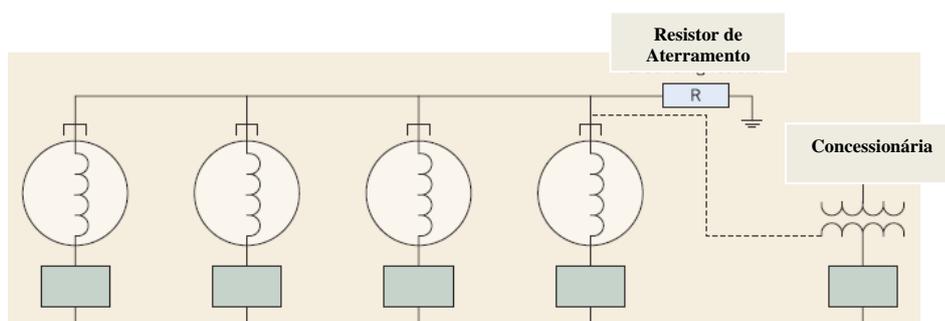


Figura 5.5 - Esquema de neutro comum ou sistema de ponto único de aterramento (Panetta, et al., 2009)

Neste cenário, os neutros são conectados juntos, e há somente um retorno para qualquer falta à terra. As duas maiores desvantagens inerentes a este tipo de sistema são: correntes de 3ª harmônica circulando através do neutro e risco de acidente ao pessoal quando da manutenção do gerador. Com os neutros conectados de forma conjunta, uma falta à terra em qualquer parte do sistema eleva o potencial do neutro, caso o gerador esteja conectado ao sistema, ou não. Disso resulta um risco de segurança ao pessoal trabalhando no gerador.

O arranjo na figura 5.6 trata o aterramento de neutro num único ponto através de um neutro artificial.

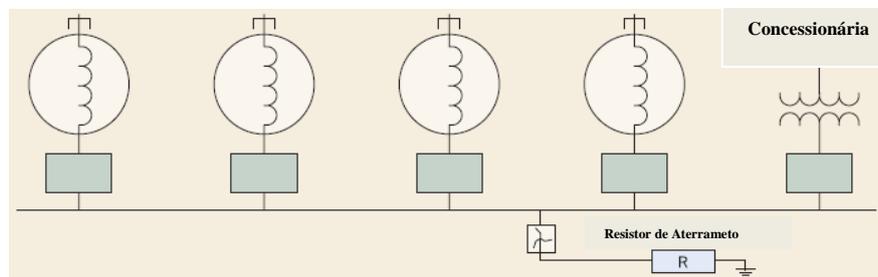


Figura 5.6 - Sistema aterrado em ponto único, através do transformador “zig-zag” (Panetta, et al., 2009) Este método mostrado na figura 5.6 é mais simples do que aquele mostrado na figura 5.4 onde há diversos resistores de aterramento, além de ser um sistema aterrado num único ponto. Porém, a desvantagem deste sistema é o estado não aterrado dos geradores quando não estiverem conectados ao sistema elétrico.

5.10 SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO HÍBRIDO

A figura 5.4 foi anteriormente descrita como um exemplo de sistema aterrado por múltiplos pontos. Em anos recentes, foram constatados em diversas instalações danos severos em geradores conectados em barramentos de MT (Shipp, 2010), (IEEE/IAS Working Group Report, 2009), e (Panetta, et al., 2009). Muitas destes geradores estão em plantas com múltiplos geradores em operação conectados em barramentos sincronizados de MT, conforme mostrado na figura 5.7.

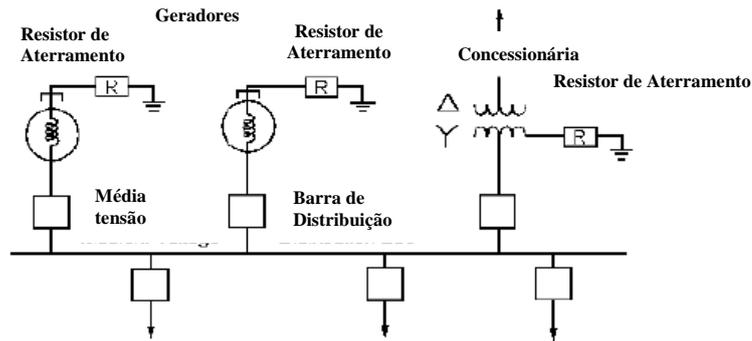


Figura 5.7 - Sistema de Distribuição Industrial de MT com Múltiplas Fontes

Tradicionalmente, os neutros destes geradores são aterrados através de resistores de 100 a 800 A. As falhas ocorridas necessitavam, em geral, de reparos de laminação do estator, fora da planta. As investigações revelaram que a maioria dos danos de queima foi causada pelas correntes de falta do próprio gerador, e ocorria depois que o disjuntor do gerador se abria.

Para o exemplo da figura 5.8, a falta terá uma magnitude total de 800 A, devido à contribuição do gerador $i_g = 400$ A, mais a contribuição do sistema $i_s = 400$ A. O dano representado pela energia total, em watt.segundo, associado a estas correntes pode ser determinado integrando-se os valores de correntes de falta ao longo do tempo e somando-se as duas componentes de correntes para se determinar a energia total. Pode ser mostrado que a maior parte do dano ocorre por consequência do próprio gerador, mesmo após a abertura do seu disjuntor (Shipp, 2010).

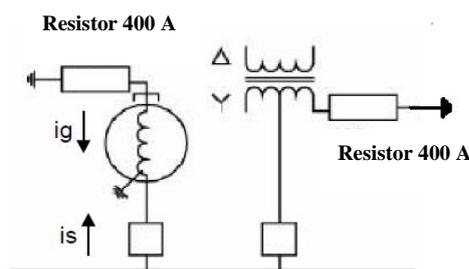


Figura 5.8 - Exemplo de aterramento de gerador e do neutro do transformador

Quanto maior o número de fontes de corrente de terra, maior será a energia que o sistema irá contribuir, mas se tiver que diminuir significativamente o dano, a contribuição do gerador deve também ser reduzida. Por esta razão, os sistemas híbridos mostrados nas figuras 5.9 e 5.10, costumam ser adotados para grandes geradores.

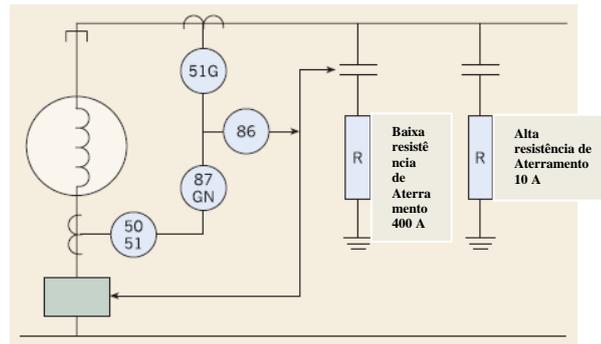


Figura 5.9- Esquema de um sistema de aterramento híbrido (Panetta, et al., 2009)

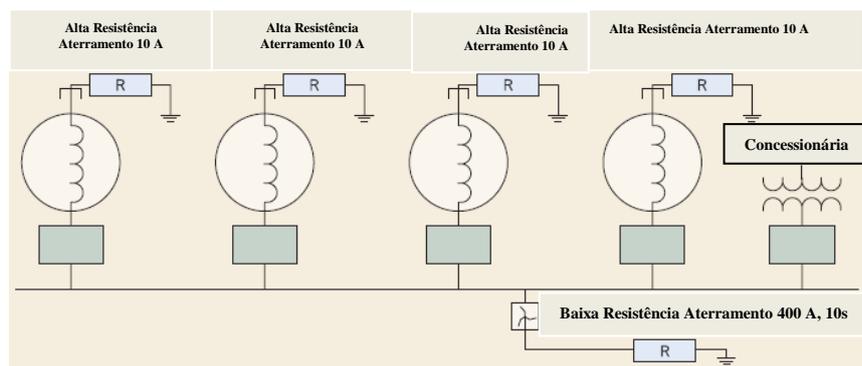


Figura 5.10 – Variação do sistema de aterramento híbrido (Panetta, et al., 2009)

Estes sistemas híbridos são uma combinação de sistemas aterrados por baixa e por alta resistência (RBV e RAV). Neste caso, conforme o exemplo da figura 5.10, com todo o sistema de geradores em paralelo na barra comum, tem-se um resistor de neutro de baixa resistência de 400 A, acoplado através de um transformador de aterramento, mais quatro resistores de alta resistência em cada neutro de gerador, dando 4x10 A, isto é, um total de 440 A. No caso de uma falha interna num gerador este é desconectado do sistema de baixa resistência, ficando com o neutro aterrado através de alta resistência, até que o fluxo do campo decaia. Desta forma, a corrente de falta à terra é limitada a apenas 10 A, e evita-se o dano interno ao próprio gerador. Desta forma, cada gerador é aterrado, tanto na forma de baixa resistência, como na de alta resistência. Este tipo de aterramento híbrido de neutro é seguro ao gerador porque, mesmo na condição de neutro do gerador aterrado por alta resistência, evitam-se as sobretensões próprias dos sistemas isolados. Na condição de sistema de baixa resistência (ex: 400 A), as faltas à terra à jusante são isoladas pelo disjuntor mais próximo à falta, através da seletividade, e as faltas à terra dentro do estator são isoladas pelo esquema diferencial.

5.11 SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO E IMPLICAÇÕES NOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA PARA GERADORES

Os métodos típicos de proteção de falta à terra (Pillai, et al., 2003), (IEEE/IAS Working Group Report, 2009), C37.101 (ANSI/IEEE, 2006), e que estão intimamente relacionadas com a forma de aterramento de neutro dos geradores são:

- Proteção Diferencial Percentual de Fase (87);
- Proteção Diferencial de Terra (87GN);
- Proteção de Terra por Sobrecorrente de Tempo Inverso de Terra (51G);
- Proteção de Terra por Sobrecorrente Instantânea (50G);
- Proteção de Terra por Sobretensão em TP no Delta Aberto (“*Broken Delta*”) (59G);
- Proteção de Sobretensão por Sequência Zero de Neutro para o Enrolamento do Estator (59GN);
- Proteção de falhas à terra que cobrem 100% do enrolamento do estator: técnicas baseadas em tensão de 3ª harmônica, e técnicas baseadas na injeção de tensão residual de neutro sub-harmônica.

Tal como ocorre para a proteção de motores, a proteção diferencial exclusivamente para faltas F-T em geradores não é recomendada em sistemas RAV que fornecem níveis de falta F-T que podem ser incapazes de operar a proteção, especialmente nos níveis de falta à terra na faixa de 3- 25 A (C37.102, IEEE Standards Board, 1995). A proteção diferencial pode detectar algumas faltas F-T no estator dependendo de como o gerador é aterrado. A figura 5.11 ilustra a relação aproximada entre a corrente de falta F-T disponível e o percentual de enrolamento do estator protegido pelo método de proteção diferencial. Se a corrente de falta F-T for pequena, é necessário providenciar uma proteção de falta à terra sensível, conforme aqueles métodos resumidos acima e discutidos em detalhes na literatura (Pillai, et al., 2003), (IEEE/IAS Working Group Report, 2009), e C37.101 (ANSI/IEEE, 2006).

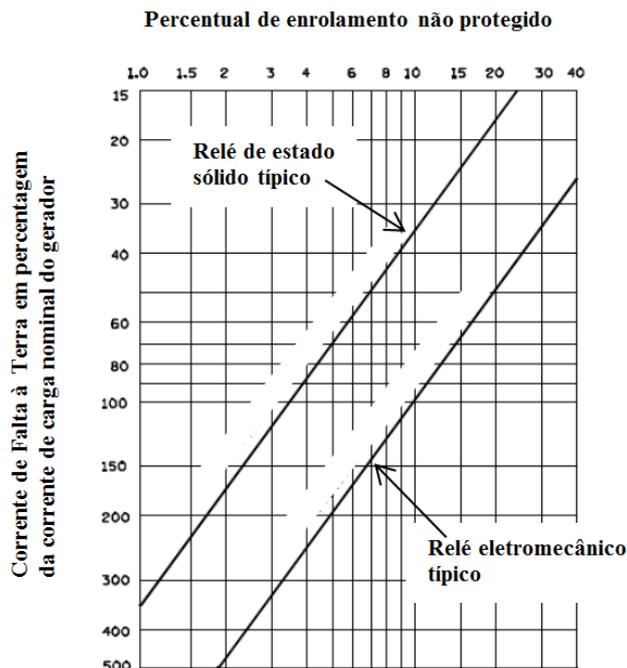


Figura 5.11 – Percentual de enrolamento do estator não protegido pelo relé diferencial para uma falta F-T (C37.102, IEEE Standards Board, 1995)

A seguir, descreve-se brevemente cada um dos métodos típicos de proteção de falta à terra listados inicialmente e as principais implicações do aterramento de neutro nestas proteções.

5.11.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL DE FASE (87)

A proteção diferencial percentual convencional para faltas fase-fase no enrolamento (vide figura 5.12) possibilita a detecção da maioria das faltas à terra, dependendo da corrente de falta à terra disponível, para os sistemas com o neutro aterrado por baixa resistência.

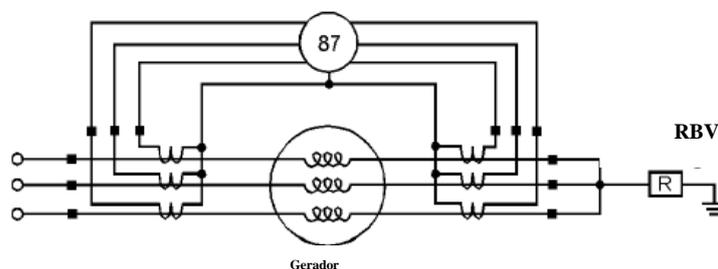


Figura 5.12 - Proteção diferencial percentual de fase para gerador (Pillai, et al., 2003)

Se a máxima corrente de falta à terra estiver abaixo do “pick-up” do relé diferencial percentual de fase, o relé diferencial de fase não poderá proteger contra qualquer falta à terra. Neste caso, um esquema diferencial de terra discutido adiante no item 5.11.2 irá proteger o gerador de forma mais adequada.

5.11.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TERRA (87GN)

Devido às altas correntes que estão disponíveis nos sistemas aterrados por baixa resistência de neutro (ex: 400 A, ou mais), é importante uma proteção diferencial de terra sensível e de alta velocidade para os geradores. Como já citado no item 5.11.1, com um sistema de neutro de baixa resistência, os relés diferenciais de fase podem não ser suficientemente sensíveis para detectar faltas à terra internas do gerador, em especial, nos casos em que a máxima corrente de falta à terra estiver limitada a valores abaixo do valor de “*pick-up*” do relé diferencial de fase. Nestes casos, um esquema de proteção diferencial de terra, como mostrado na figura 5.13, é preferível.

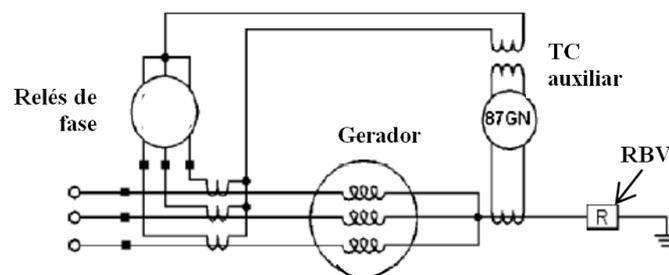


Figura 5.13 - Proteção diferencial de terra para gerador (Pillai, et al., 2003)

Quando aplicado apropriadamente, este esquema é capaz de detectar faltas à terra para dentro dos 10% do neutro do gerador sem o risco de falso disparo devido às faltas externas (Pillai, et al., 2003). Um relé de sobrecorrente direcional de terra é geralmente usado nesta aplicação, com a corrente diferencial como sendo a quantidade de operação do relé, e a corrente de neutro, como sendo a quantidade de polarização. A comparação diferencial é polarizada de forma que uma restrição exista para uma falta externa. Isto é, se a falta for interna ao gerador, o ângulo relativo entre as correntes de neutro e residual de fase ($3I_0$) é tal que o relé pode ser sensibilizado a partir de um certo valor de “*pick-up*” para as magnitudes de correntes residual de fase e de neutro. Se a falta for externa ao gerador, o ângulo relativo entre as correntes de fase e de neutro restringe a operação do relé independentemente dos valores de correntes residuais de fase e de neutro. Este esquema de proteção diferencial é similar à proteção de falta à terra restrita 87G exposta no item 3.6 Este esquema oferece, dependendo dos TCs de fase (corrente nominal e “*burden*”), uma segurança excelente contra a operação indevida devido às faltas externas, e uma detecção sensível para as faltas internas.

5.11.3 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE À TERRA (51G)

Uma das vantagens mais importantes do aterramento de neutro de baixa resistência é a possibilidade de obter seletivamente da proteção de sobrecorrente de terra para as faltas à jusante conforme pode ser observado na figura 5.14, entre a proteção 50G, do lado da carga, e a 51G dos ramos superiores.

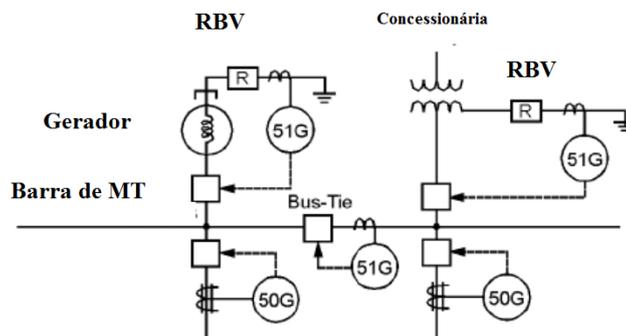


Figura 5.14 - Proteção de sobrecorrente temporizada de terra para gerador (Pillai, et al., 2003)

No caso de uma falta cuja proteção 50G não atuou, um relé de sobrecorrente de tempo inverso (51G) no disjuntor de interligação de barras irá fornecer a proteção de back-up, isolando a seção da barra sob falta. Mais proteções de “back-up” são fornecidas pelos relés de sobrecorrente de tempo inverso (51G) dos neutros aterrados por baixa resistência. A seletividade da proteção fica difícil no caso de haver múltiplos geradores, pois a magnitude da corrente de terra poderá variar com a adição ou remoção destes geradores.

Há também a possibilidade de um dano sério no gerador por causa de uma alta corrente de falta prolongada, especialmente no caso em que a falta à terra ocorre próxima dos terminais do gerador. Este dano pode ser reduzido usando-se um relé de sobrecorrente de terra instantâneo (50G) em conjunto com o relé de sobrecorrente temporizado. O relé instantâneo detecta as faltas no neutro do gerador, e é “back-up” da proteção dos alimentadores.

5.11.4 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEA À TERRA (50G)

Esta também é denominada por esquema de relé diferencial de terra auto-balanceado, conforme mostrado na figura 5.15.

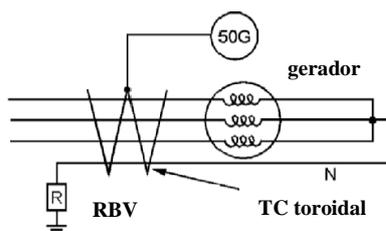


Figura 5.15 - Proteção instantânea de sobrecorrente de terra (diferencial auto-balanceada de corrente de terra) (Pillai, et al., 2003)

Um TC toroidal (também denominado TC de núcleo balanceado, ou de sequência zero) envolve as fases e o neutro do gerador. Para uma falta externa, a saída do TC é zero. O limite de sensibilidade é afetado quando grandes blocos de cargas são energizados, e pela posição física dos cabos dentro do toroide.

5.11.5 PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO DE TERRA EM TP COM DELTA ABERTO (59G)

Este esquema de proteção é usado em sistemas de gerador com o neutro aterrado por alta resistência. Este esquema é uma variação da proteção de sobretensão por sequência zero para os enrolamentos do estator, apresentado na próxima seção 5.11.6.

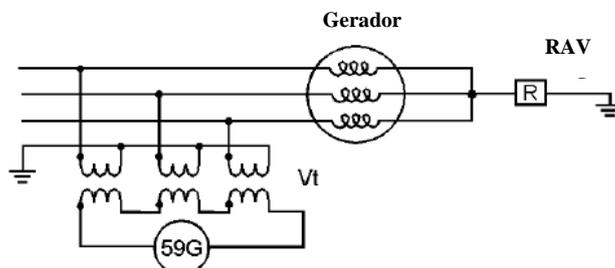


Figura 5.16 - Proteção de sobrecorrente de terra por TP em Y-Δ aberto (Pillai, et al., 2003)

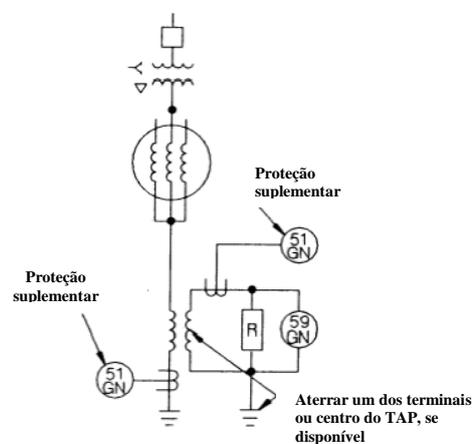
Neste esquema um dispositivo de sobretensão (59G) é conectado no secundário em delta aberto do TP. Quando não há uma falta desequilibrada, a soma fasorial das tensões de fase é zero. Quando ocorre uma falta à terra interna no gerador, é detectada por uma tensão nos terminais do delta aberto, que é a soma fasorial das tensões de fase. Esta tensão tem o valor da tensão plena fase-fase, e o TP deve ser especificado para esta tensão nominal.

5.11.6 PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO PARA SEQUÊNCIA ZERO DE NEUTRO PARA OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR (59GN)

O esquema de proteção mais largamente utilizado para sistemas com o neutro aterrado por alta resistência é com o relé de sobretensão de tempo inverso (59GN) conectado em paralelo com o resistor de neutro conforme mostrado na figura 5.17. O relé usado

nesta aplicação deve ser sintonizado à tensão de frequência fundamental e ser insensível às tensões de 3ª harmônica que estão presentes no neutro do gerador sob condição de operação normal.

Como a resistência de aterramento é alta comparado com a impedância do gerador e do circuito, a tensão plena fase-neutro será impressa através do resistor de aterramento para uma falta fase-terra nos terminais do gerador. A tensão no relé é função da razão do transformador e da localização da falta. A tensão será máxima para uma falta num terminal do gerador, e diminui à medida que a falta ocorra cada vez mais próxima em direção ao neutro do gerador.



51G - Relé de sobretensão de neutro

59G - Relé de sobretensão de neutro sintonizado na frequência fundamental

Figura 5.17 - Proteção de tensão de sequência zero para geradores unitários, aterrados por alta resistência (Pillai, et al., 2003)

Até a década de 70, quase todas as proteções de falta à terra do estator para geradores conectados unitariamente envolviam o uso de somente um relé de sobretensão (59G) no neutro do gerador sintonizado na frequência fundamental. Este esquema detectava faltas acima de 90-95% do enrolamento do estator. A figura 5.18 ilustra esta proteção. Há uma dependência linear entre a tensão medida pelo relé 59G e a localização da falta dentro do enrolamento do gerador.

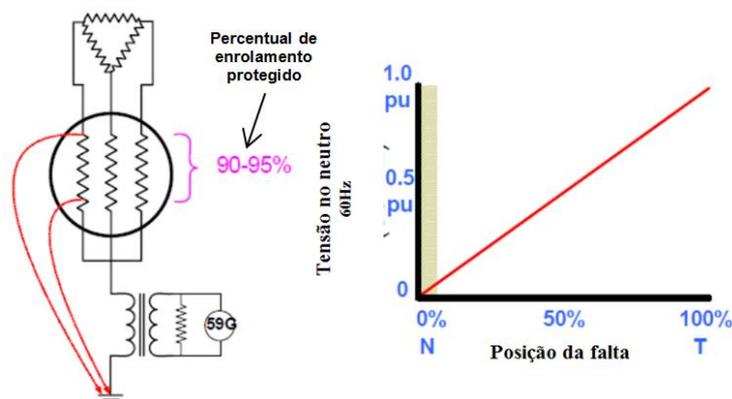


Figura 5.18 - Proteção convencional de estator contra falta à terra e perfil de tensão disponível em função da posição da falta ao longo do enrolamento (Turner, 2011), (Mozina, 2009)

Para faltas próximas ao neutro (N), a tensão medida pelo relé 59G é diminuída conforme ilustrado no gráfico da figura 5.18. A máxima tensão ocorre para uma falta nos terminais do gerador (T), onde a tensão plena fase-neutro ocorre através do transformador de aterramento de neutro. Tipicamente, os últimos 5-10% do enrolamento não são protegidos pelo 59G. Os usuários aceitavam esta falta de proteção à terra naquela parte do enrolamento uma vez que são partes menos suscetíveis de falhas à terra. Porém, há também a possibilidade de haver uma segunda falha à terra que envolva uma outra fase e, assim, poderia causar danos devastadores.

Do ponto de vista dos esquemas que garantem a proteção de falta à terra para 90-95% do estator, todas aquelas apresentadas anteriormente têm este tipo de limitação. Por esta razão, os esquemas que garantem a proteção de 100% do enrolamento da máquina são mais eficientes em relação a este esquema.

5.11.7 PROTEÇÃO DE FALTA À TERRA COM COBERTURA DE 100%

Para a proteção de falta à terra com cobertura de 100% do enrolamento, o esquema de sub-tensão de 3ª harmônica no neutro é o mais popular, hoje, pois é barato e fornecido por todos os pacotes de proteção digitais para geradores. Um relé (27TN) de sub-tensão de 3ª harmônica é instalado através de um resistor de aterramento RAV no secundário do transformador de aterramento do gerador. O relé opera na diminuição da tensão de 3ª harmônica, que ocorre durante uma falta à terra no estator, próxima ao neutro do gerador. O relé 27TN é supervisionado por um relé de sobretensão de fase (59) que impede as falsas operações quando o campo é removido do gerador. Isto previne o falso disparo quando o gerador estiver fora de serviço. O relé de supervisão 59 possibilitará o funcionamento do esquema, quando o campo retornar antes da

sincronização do gerador, para manter a proteção de 100% contra falta fase-terra. A cobertura do 59N é de 90% do enrolamento, enquanto que o método da 3ª harmônica cobre os restantes 10% próximos ao neutro. A combinação da sobretensão fundamental de neutro, 59N, e do diferencial de tensão de 3ª harmônica propicia uma cobertura de 100% para as faltas à terra no estator. Os dois elementos atuam como zonas de proteção independentes, cada um deles com sua própria temporização ajustável (tempo-definido). Duas vantagens importantes desse método são a sensibilidade e a sobreposição dos elementos. O elemento 59N tem boa sensibilidade para defeitos no meio do enrolamento, que é a faixa morta para o elemento de subtensão de 3ª harmônica que detecta defeitos na parte inferior do enrolamento (próximo ao neutro), e que produzem uma tensão de neutro fundamental muito pequena. Ambos os elementos detectam faltas na área superior do enrolamento, propiciando dois métodos de detecção das faltas mais graves. É possível estudar e otimizar a sensibilidade (sobreposição) dos dois elementos para todas as condições de carga e de faltas à terra.

As técnicas para a detecção de falhas à terra que cobrem 100% do enrolamento do estator podem ser divididas em duas categorias:

- Técnicas baseadas em tensão de 3ª harmônica;
- Injeção de tensão residual de neutro sub-harmônica;

5.11.7.1 ESQUEMA DE SUBTENSÃO DE NEUTRO PARA 3ª HARMÔNICA

No fim da década de 70, um grande fabricante europeu introduziu o relé de subtensão de 3ª harmônica de neutro (27TN) que, em conjunto com a proteção de sobretensão tradicional de 60Hz (59G), forneceu uma proteção de falta à terra para toda a extensão do enrolamento do estator. Desde aquele tempo, os usuários têm melhorado a proteção do gerador para 100% do enrolamento contra faltas à terra. O conceito básico é que, quando ocorre uma falta à terra no gerador, próxima ao neutro, a tensão de 3ª harmônica cai a zero. Se o gerador tem suficiente tensão de neutro de 3ª harmônica durante a operação normal para impedir a falsa operação de atracamento do relé de sub-tensão, então este gerador é candidato para o esquema de 100% de proteção através da detecção de 3ª harmônica de neutro.

No início da década de 80, um segundo esquema de 3ª harmônica foi desenvolvido por um fabricante americano. Este esquema comparava a 3ª harmônica no neutro e nos terminais. A grande vantagem deste esquema é que era mais seguro do que simplesmente usar a subtensão de 3ª harmônica medida no neutro do gerador. Este método requeria uma conexão em delta aberto para medida do potencial através da instalação de um TP, cujo enrolamento primário necessitava de ser em Y aterrado. Muitos geradores, especialmente aqueles de unidades menores, requereram a adição deste TP, pois estes geradores usavam as conexões de TP em delta aberto. O custo adicional e a complexidade de fiação reduziram o número de usuários para este esquema.

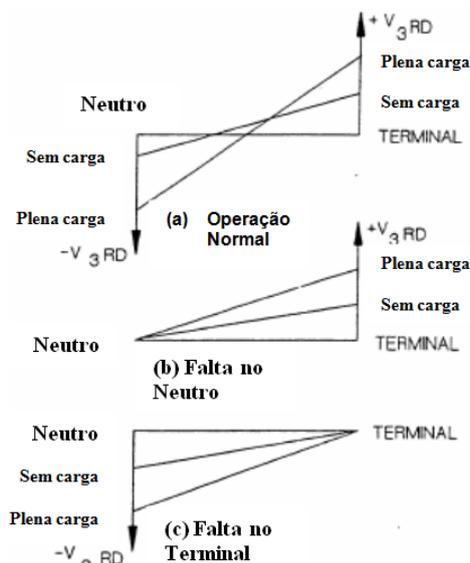
O nível de tensão de 3ª harmônica presente num determinado gerador depende de um número de fatores que incluem:

- A construção do próprio gerador, onde o passo do enrolamento do estator é um fator determinante na quantidade de 3ª harmônica. Há geradores que apresentam pouca quantidade de 3ª harmônica e, assim, a detecção de faltas à terra pelo esquema de 3ª harmônica não pode ser utilizado;
- A potência de saída ativa e reativa do gerador. A tensão de 3ª harmônica geralmente aumenta com a carga. Sem carga, ou com gerador sob baixo carregamento, a tensão de 3ª harmônica do gerador está geralmente no nível mais baixo, que pode não permitir um ajuste confiável. A potência reativa de saída do gerador também afeta a 3ª harmônica e é ainda mais imprevisível. Em alguns casos, uma demanda maior em reativos aumenta a 3ª harmônica, e em outros casos (especialmente em turbinas à gás), há quedas repentinas na saída de reativos que tornam a aplicação do esquema de 3ª harmônica não confiável;
- Capacitância no terminal do gerador também afeta o nível de 3ª harmônica. A capacitância de enrolamento fase-neutro, assim como a capacitância de barra e de enrolamento de baixa tensão geralmente têm um papel menor no nível de 3ª harmônica presente nos dois itens acima. Uma maior adição de capacitância nos terminais do gerador tem uma influência positiva na 3ª harmônica.

A figura 5.19 mostra a tensão de 3ª harmônica medida entre o neutro do gerador e os seus terminais sob condição de nenhuma falta (a), para uma falta à terra no neutro do

gerador (b), e para uma falta nos terminais do gerador (c). Notar que a tensão de 3ª harmônica cai a zero no ponto de falta.

Há um grande número de artigos que discutem o cálculo das tensões de 3ª harmônica no neutro e nos terminais do gerador. Estes cálculos tipicamente resultam em erros significativos, fazendo que o ajuste do relé não seja confiável. Hoje, as medições de campo são recomendadas pela maioria dos fabricantes como o método para se obter os dados para ajustar os relés de 3ª harmônica. Não é incomum que os dados obtidos de medições em campo determinem que o esquema de 3ª harmônica para 100% de proteção do estator contra faltas à terra simplesmente não funcionarão ou que têm sérias limitações.



5.19 - Representação gráfica de geração típica de tensão de 3ª harmônica ao longo do enrolamento do estator, em função de pleno carregamento do gerador, e sem carga, para: (a) operação normal; (b) falta à terra no neutro do gerador; (c) falta à terra nos terminais do gerador

O esquema de sub-tensão de 3ª harmônica no neutro é o mais popular, hoje, pois é barato e fornecido por todos os pacotes de proteção digitais para geradores. A figura 5.20 ilustra o esquema e a lógica de disparo tipicamente utilizada. Um relé (27TN) de sub-tensão de 3ª harmônica é instalado através de um resistor de aterramento no secundário do transformador de aterramento do gerador. O relé opera na diminuição da tensão de 3ª harmônica, que ocorre durante uma falta à terra no estator, próxima ao neutro do gerador. O relé 27TN é supervisionado por um relé de sobretensão de fase (59) que impede as falsas operações quando o campo é removido do gerador. Isto previne o falso disparo quando o gerador estiver fora de serviço. O relé de supervisão

59 possibilitará o funcionamento do esquema, quando o campo retornar antes da sincronização do gerador, para manter a proteção de 100% contra falta fase-terra.

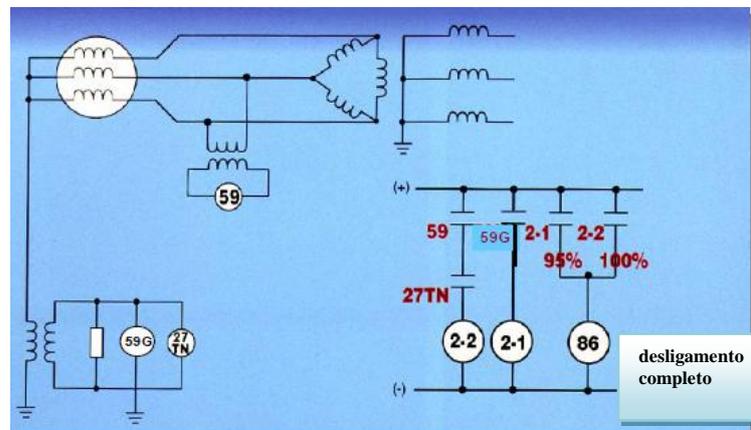


Figura 5.20 - Gerador aterrado por alta resistência, e o esquema de proteção de falta à terra por sub-tensão de 3ª harmônica no neutro, para 100% de proteção do enrolamento do estator (Mozina, 2009)

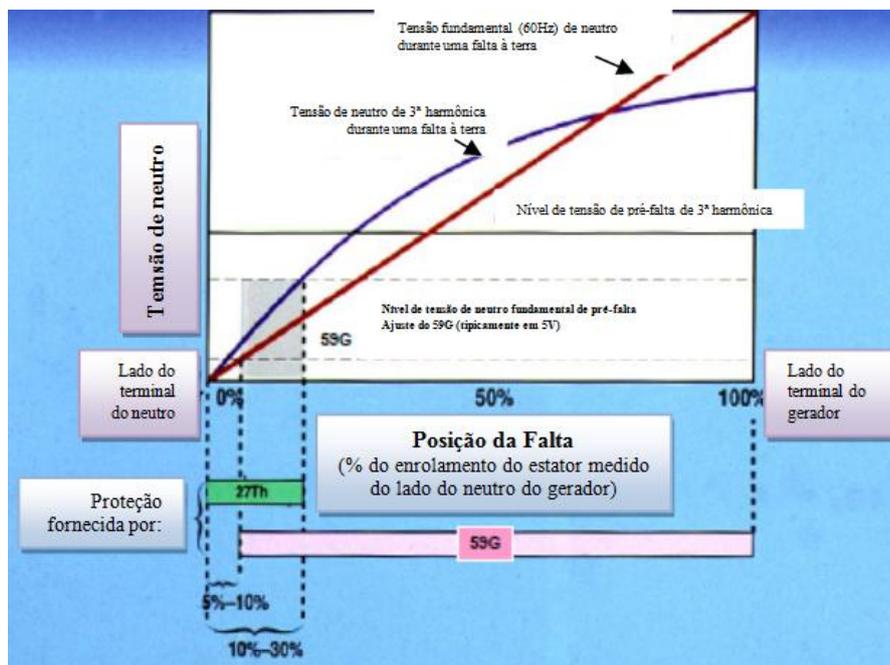


Figura 5.21 - Sobreposição do 59G e do 27TN (Subtensão de Terceira Harmônica) para proporcionar a cobertura da proteção de falta à terra para 100% do estator (Mozina, 2009)

A cobertura do 59N é de 90% do enrolamento, enquanto que o método da 3ª harmônica cobre os restantes 10% próximos ao neutro, conforme mostrado nas figuras 5.19, 5.20 e 5.21. A combinação da sobre-tensão de neutro fundamental, 59N, e do diferencial de tensão de 3ª harmônica propicia uma cobertura de 100% para as faltas à terra no estator. Os dois elementos atuam como zonas de proteção independentes, cada um deles com sua própria temporização ajustável (tempo-definido). Duas vantagens importantes desse método são a sensibilidade e a sobreposição dos

elementos. O elemento 59N tem boa sensibilidade para defeitos no meio do enrolamento, que é a faixa morta para o elemento V_{3d} . O elemento V_{3d} detecta defeitos na parte inferior do enrolamento (próximo ao neutro), que produzem uma tensão de neutro fundamental muito pequena. Ambos os elementos detectam faltas na área superior do enrolamento, propiciando dois métodos de detecção das faltas mais graves.

5.11.7.2 ESQUEMA DE INJEÇÃO DE TENSÃO SUB-HARMÔNICA

Uma alternativa ao esquema de proteção 100% de 3ª harmônica foi desenvolvida por um fabricante europeu e é largamente usada na Europa e em outros países fora do Estados Unidos. Este esquema injeta uma sub-harmônica de baixa frequência nos enrolamentos do estator do gerador. A frequência injetada é da ordem de 15-20Hz. O sinal é injetado através do neutro do transformador de aterramento de neutro. A carga é apresentada ao injetor deste esquema como a capacitância fase-neutro dos enrolamentos do gerador, associada ao cabo/barramento que conecta o gerador ao transformador da unidade (*GSU – “Generator Step-Up Transformer”*), e o enrolamento delta do transformador da unidade e o transformador auxiliar. O uso de uma frequência baixa de sub-harmônica torna esta reatância capacitiva uma alta impedância. Então, a potência do transformador injetor é reduzida em relação ao que seria o caso de um transformador utilizado na frequência fundamental. Sob condições normais, uma pequena corrente fluirá na frequência sub-harmônica. Quando uma falta à terra ocorre em qualquer lugar do enrolamento do gerador ou de sua barra associada, a capacitância é curto-circuitada naquela fase e uma corrente maior fluirá, a qual será detectada por um relé de sobrecorrente. O esquema tem a vantagem adicional que pode detectar uma falta à terra do estator numa condição de geração off-line, antes de ser colocado em serviço. Este esquema não é afetado pelo carregamento ativo e reativo do gerador. Tipicamente, o relé 59G é utilizado como back-up. As medições de campo da corrente sub-harmônica capacitiva são importantes no comissionamento.

O maior problema deste esquema, quando foi desenvolvido nas décadas de 60 e 70, foi o fato de que era implementado numa eletrônica muito cara. O injetor e os filtros utilizados representavam os custos mais significativos. Como resultado, muitos usuários americanos deixaram de usá-lo. Com o advento da tecnologia digital, o custo

diminuiu e os mesmos usuários estão voltando a considerar este esquema, conforme a figura 5.22.

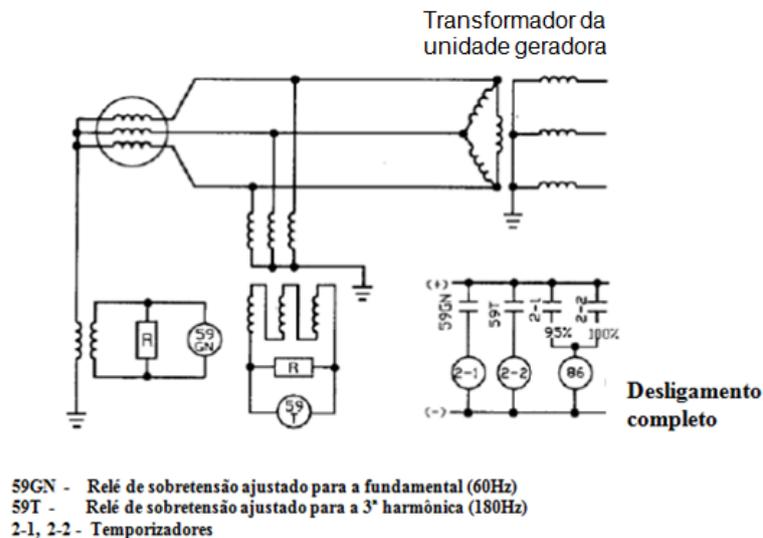


Figura 5.22 - Gerador aterrado por alta resistência, e esquema de proteção de falta à terra baseado na tensão residual de 3ª harmônica ou esquema de injeção de tensão sub-harmônica, para 100% de proteção do enrolamento do estator

5.11.7.3 ESQUEMA DE RAZÃO DE 3ª HARMÔNICA

Este esquema requer a medição da tensão de 3ª harmônica em ambos os lados, isto é, do neutro e dos terminais ($3V_0$) do gerador. A figura 5.23 ilustra o esquema de razão de 3ª harmônica.

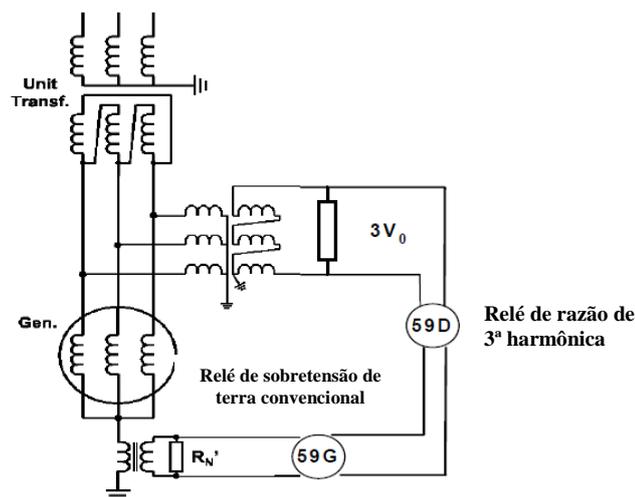


Figura 5.23- O esquema de razão de 3ª harmônica (Mozina, 2009)

Em alguns geradores esta razão permanece razoavelmente constante. Em outros geradores, a razão varia bastante em função da potência demandada em MW e MVar. A razão de 3ª harmônica do terminal para o neutro aumentará para uma falta à terra no estator próxima ao neutro do gerador. A medição geralmente requer uma conexão de

TP $Y_{\text{aterrado}} - \Delta_{\text{aberto}}$, que não é um padrão típico de conexão na maioria dos geradores. Usualmente, este esquema, com TP em delta aberto, é aplicado exclusivamente para este fim. O elemento 59D detectará as faltas à terra no neutro do gerador, ou próximo a ele. Não detectará faltas próximas ao centro do enrolamento do gerador ou nos terminais do mesmo. Então, o elemento convencional 59G é necessário para detectar estas faltas. A combinação do 59D e do 59G fornece uma cobertura de 100% do enrolamento do estator. O esquema de razão de 3ª harmônica é geralmente mais seguro do que o esquema de cobertura de 100% do enrolamento do estator, no entanto, se a máquina não gerar 3ª harmônica suficiente, este esquema também não funcionará.

5.12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de aterramento de neutro para geradores diferem ligeiramente dos métodos utilizados para aterramento de neutro de transformadores. Há ainda a particularidade de que um conjunto de geradores esteja em operação isolada ou em conjunto com a alimentação normal da rede industrial através da concessionária.

Neutros solidamente aterrados podem ser aplicados somente para pequenos geradores de emergência que alimentam diretamente sistemas BT, onde há cargas monofásicas fase-neutro. O *Buff Book* (IEEE Std 242, 2001) diz que o aterramento sólido do neutro de gerador não é recomendado porque pode resultar em altos esforços mecânicos e danos às máquinas, com exceção para o caso de geradores pequenos.

O problema do emprego de RAV é a sensibilidade da proteção diferencial de terra (87G). O valor da falta fase-terra é intimamente dependente do tipo de aterramento do gerador e, conseqüentemente, os dispositivos de proteção de fase podem não ser suficientemente sensíveis para as faltas à terra. Assim, o valor da falta fase-terra pode variar desde zero (sistema não aterrado) até o valor do curto-circuito trifásico (ou maior, para sistemas solidamente aterrados). Outro aspecto importante é que conforme o ponto de falta se move dos terminais da máquina na direção ao neutro do gerador, o valor da corrente de falta no estator vai decaindo, tal como ocorre no caso de motores e transformadores. Desta forma, o esquema mais comumente utilizado para neutro de resistência de alto valor (RAV) consiste na utilização da proteção 59GN, que mede uma tensão através de TPs em delta aberto, dispensando-se a proteção diferencial. Este

relé é projetado para ser sensível à tensão de frequência fundamental e insensível para tensões harmônicas de terceira ordem e outras harmônicas de sequência zero. Um esquema diferencial pode detectar uma falta fase-terra dependendo do valor da falta e do tipo de aterramento. Quanto mais o valor da falta à terra é limitado em relação à corrente de carga nominal do gerador, maior o percentual desprotegido do enrolamento do estator. Esquemas diferenciais de fase não propiciarão proteção de terra em sistemas aterrados por resistência de alto valor, tal como ocorre também com a proteção diferencial de fase aplicada em motores e transformadores. Somente sistemas RBV possibilitam a aplicação da proteção diferencial (87 e 87G) deixando, porém, parte do enrolamento próximo ao neutro desprotegido. Melhorias podem ser obtidas com a adição da proteção diferencial de terra (87G) nos sistemas RBV, tal como é também utilizada para motores e transformadores. Mas há também outros métodos de proteção, baseados em 3ª harmônica em geradores, que possibilitam a proteção de terra de 100% do enrolamento, e que requerem um sistema RAV. A cobertura do 59N é de 90% do enrolamento, enquanto que o método da 3ª harmônica cobre os restantes 10% próximos ao neutro. A combinação da sobretensão de neutro fundamental, 59N, e do diferencial de tensão de 3ª harmônica, propicia uma cobertura de 100% para as faltas à terra no estator. São técnicas baseadas em tensão de 3ª harmônica pré-existentes em nível adequado na maioria dos geradores, ou podem ser técnicas baseadas na injeção de tensão residual sub-harmônica de neutro.

No caso de uma falha interna num gerador de grande potência, quando este é desconectado do sistema RBV, por exemplo, mesmo que o gerador fique isolado dos demais, as investigações revelaram que a maioria dos danos de queima é causada pelas correntes de falta do próprio gerador, e ocorre mesmo depois que o disjuntor do gerador se abre. Para resolver o problema das queimas ocorridas por defeito interno em geradores de grande potência em sistemas RBV e que necessitavam, em geral, de reparos de laminação do estator fora da planta, os geradores foram dotados também de um sistema RAV, que funciona enquanto o fluxo do campo decai e o gerador para. Desta forma, a corrente de falha à terra é limitada apenas ao valor do resistor RAV individual do gerador, evitando-se o dano interno ao próprio gerador. Assim, cada gerador é aterrado, tanto na forma de baixa resistência (RBV), como na de alta resistência (RAV). Este tipo de aterramento híbrido de neutro é seguro ao gerador porque, mesmo na condição de neutro do gerador aterrado por alta resistência, evitam-

se também as sobretensões próprias dos sistemas isolados. Este sistema híbrido é um dos últimos desenvolvimentos da tecnologia de aterramento de neutro, constituído de baixa (RBV) e de alta resistências de neutro (RAV), que funcionam juntos, de forma a atuarem simultaneamente de acordo com a operação conjunta, ou operação isolada, ou mesmo de saída do gerador de um conjunto de geradores que operam em paralelo, devido a uma falha à terra interna no próprio gerador. Por esta razão, a proteção também deve ser reconfigurável para se adaptar em ambos os sistemas RBV e RAV, conforme os princípios de proteção expostos para cada um destes sistemas de aterramento de neutro.

6 FALHAS EM ISOLAÇÃO DE MÁQUINAS E TRANSFORMADORES E IMPLICAÇÕES NO ATERRAMENTO DE NEUTRO E NA PROTEÇÃO DE TERRA

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os pontos de origem de falha em isolação de máquinas elétricas podem ocorrer nas conexões dos enrolamentos e nos próprios enrolamentos. As faltas de espira a espira, ou de fase-terra, que ocorrem em determinadas partes do enrolamento nas ranhuras do estator, são as faltas mais prováveis de ocorrer (Dunki-Jacobs, et al., 2007). Além destes tipos de falhas de isolação, serão discutidas neste capítulo as falhas carbonizantes, e as implicações no sistema de proteção de terra em função do tipo de aterramento de neutro e, em especial, no sistema RBV, que é o sistema que possibilita uma boa proteção de terra para as máquinas elétricas e geradores, e também as implicações da proteção de terra no sistema RAV. No final do capítulo, são também discutidas as falhas gerais e de terra em transformadores e as implicações nas proteções.

6.2 NATUREZA DE FALHAS DE ISOLAÇÃO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

A construção dos enrolamentos de geradores e motores é feita através de um número idêntico de espiras em série e/ou em paralelo para formar, cada um, o enrolamento de cada fase. No caso geral de uma máquina com os enrolamentos em Y, um lado dos enrolamentos trifásicos são conectados juntos para formar o neutro que fica, em geral, isolado e não acessível nos motores, porém acessível no caso dos geradores que é essencial para o esquema de aterramento de neutro. Os outros lados dos enrolamentos formam os 3 terminais, A, B e C, da máquina que são conectados ao sistema elétrico.

A figura 6.1 mostra a construção para o enrolamento desde a fase A ao neutro e a representação das capacitâncias distribuídas dos enrolamentos em relação ao terra. Em geral, cada espira é construída usando-se um número de condutores em paralelo, de bitola menor, para minimizar o efeito pelicular. Um surto atmosférico percorre as linhas de fase e entra pelo terminal A do motor, com alta inclinação de onda provocando o maior estresse no dielétrico nas primeiras espiras, e dissipando-se, via

efeito capacitivo de cada espira à terra, até chegar ao lado do neutro com inclinação de frente de onda mais baixa, estressando menos o dielétrico.

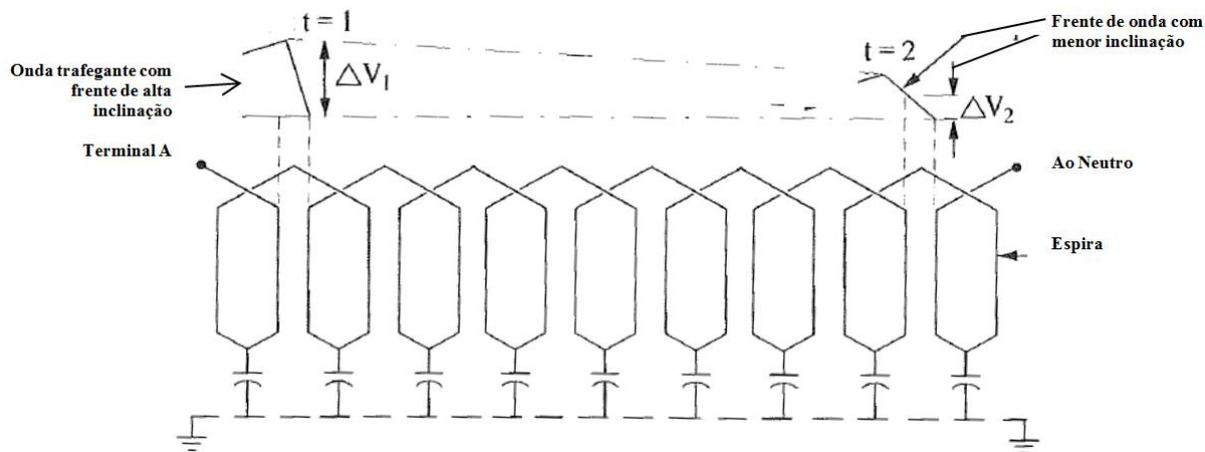


Figura 6.1- Esquema de enrolamento da fase A mostrando as espiras, do terminal A ao neutro, o efeito da capacitância distribuída das espiras sobre a atenuação de inclinação na frente de onda de surto atmosférico (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Em todas as máquinas de MT e em grandes máquinas de BT, as bobinas são construídas espira a espira, com fio de cobre chato, recoberto por uma fibra ou uma película isolante. Estes fios são pré enrolados para formar a espira que tem dois lados, um lado colocado no fundo de uma ranhura do estator e, outro, colocado no topo da próxima ranhura separada por uma distância denominada de passo do enrolamento, em cima de outra espira dentro da mesma ranhura, conforme figura 6.2. Um material isolante é aplicado na espira pré-fabricada para assegurar a isolamento entre as espiras de baixo e de cima de uma mesma ranhura, bem como entre a espira e a ranhura do estator.

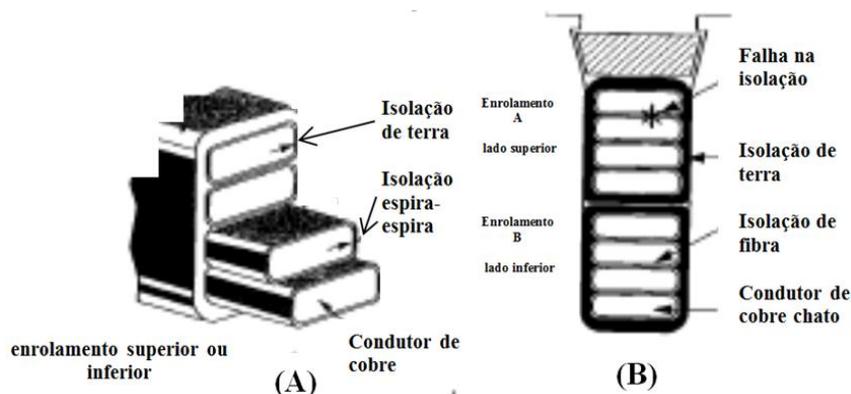


Figura 6.2 - (A) Vista de seção transversal de um elemento de espira de enrolamento de 4kV, consistindo de 4 voltas trançadas; (B) Seção transversal de ranhura de enrolamento com dois enrolamentos de 4 voltas da figura (A), onde a falha de isolação causa um curto entre espiras, resultando numa falta espira-espira no enrolamento da máquina (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Em motores de BT as espiras são geralmente enroladas, volta por volta, usando-se um fio isolado e um gabarito como guia. A isolação espira por espira necessita suportar somente alguns volts, que é a diferença de tensão entre duas espiras ou voltas adjacentes. Entretanto, esta tensão pode alcançar centenas de volts durante a chegada de um surto com alta inclinação de frente de onda, como é o caso dos surtos atmosféricos, ou devido às operações de manobra, conforme ilustrado na figura 6.1. A espira que recebe a onda de surto com alta inclinação ($\Delta V_1/\Delta T$) é a do lado da alimentação da fase, enquanto que a onda é dissipada, através do efeito capacitivo das espiras com a terra da estrutura do estator, resultando numa onda de menor intensidade e de menor inclinação ($\Delta V_2/\Delta T$) no lado do neutro, ou final do respectivo enrolamento.

A ranhura da espira é feita com perfuração idêntica de material laminado de aço magnético, empilhado, de baixas perdas. Os campos magnéticos rotativos nestas ranhuras induzem pequenas tensões nas finas camadas isolantes sobre as chapas laminadas. A integridade desta isolação entre chapas laminadas é crítica para minimizar as perdas e o calor gerado pelas correntes de Foucault em cada ranhura.

O calor gerado por uma falta fase-terra proveniente de qualquer espira ao núcleo do estator poderia romper a película de isolação das chapas laminadas. O curto-circuito entre duas ou mais chapas laminadas, sob o efeito dos fluxos magnéticos da máquina girante, causam um aumento das correntes de Foucault, que irão aumentar ainda mais o sobreaquecimento localizado no material do núcleo. A soldagem entre várias chapas laminadas também pode ocorrer. O efeito cumulativo de aquecimento resulta em sérios danos à isolação dos enrolamentos e das chapas laminadas.

No final de cada ranhura, na parte externa, as espiras ficam soltas. E uma isolação de resina epóxi é usada para reforçar esta parte dos enrolamentos que ficam sujeitos ao estresse eletromecânico devido às forças tangenciais e radiais especialmente críticas durante a partida do motor. Estas forças também podem ser críticas durante os transitórios elétricos que resultam em altas correntes, tais como aquelas correntes devidas aos curto-circuitos, mesmo que apropriadamente eliminadas no tempo correto, ou aquelas correntes resultantes da re-energização fora de fase do motor (“*out of*

phase reclosing”). A parte das espiras terminais sofre os maiores estresses, enquanto que as espiras próximas ao neutro sofrem bem menos.

As falhas da isolação das máquinas girantes podem ser classificadas como faltas do tipo condutor por condutor, espira por espira, e espira à terra. Para um material isolante se avariar o seu composto químico deve se tornar carbonizado. O processo de conversão do composto para o elemento não metálico carbono é bastante complexo, e é ocasionado pelo sobreaquecimento da isolação do motor feita, em geral, por compostos orgânicos e inorgânicos. O material isolante carbonizado é também semicondutor e se forma em função do tempo de exposição às temperaturas que estão além do seu valor nominal. Outras causas de carbonização do material isolante são as seguintes:

- Fatores térmicos, devidos às operações de partida e operações sob sobrecarga de longa duração;
- Fatores elétricos devido a surtos atmosféricos e de manobra, bem como corona, que é um processo associado às descargas parciais no ar sob grande estresse no dielétrico;
- Fatores ambientais, relacionados às condições de operação excessiva, como temperatura ambiente, vapor d'água, partículas abrasivas, pó condutivo e fumaça química;
- Fatores mecânicos, relacionados à frequência das partidas, particularmente estressante para as partes terminais das espiras, dependendo da qualidade das braçadeiras de suporte;

6.3 NATUREZA DE FALHAS CARBONIZANTES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

A falta fase-terra sólida, em comparação com a falta não sólida, é a melhor do ponto de vista de que não produz chamas, fogo, ou explosão. Além disso, correntes suficientes fluem para sensibilizar os relés de falta à terra. É bem diferente do que acontece com as faltas à terra nas falhas de isolação dos dielétricos de enrolamentos de um motor. As faltas em motores produzem, em geral fumaça, são flamejantes e desordenadas. Todo motor sujeito ao sobreaquecimento sofre um processo gradual de carbonização. Neste processo pequenas cavidades são formadas e preenchidas com material de isolação carbonizado. Sob o estresse, este material de isolação degradado é instável,

mudando erráticamente de um estado de isolante ao estado semiconductor, ou mesmo ao estado condutivo. Isto resulta numa corrente de falta do tipo “carbonizante” e variável.

A falha de isolação de espira para espira é um curto entre espiras que geralmente apresenta uma baixa corrente de defeito interno, e é a mais vulnerável, especialmente na parte terminal da espira, onde a espira sai da ranhura, por sofrer maior estresse mecânico neste ponto. É também a mais vulnerável porque a sua isolação, nas primeiras espiras ligadas à alimentação de fase, recebe a chegada das ondas de surtos de alta inclinação (ΔV_1 mostrado anteriormente na figura 6.1), ou as correntes transientes e de rotor bloqueado. As espiras que não estão tão bem amarradas sofrem mais durante a partida do motor através dos esforços mecânicos. A falha espira para espira apresenta uma espira curto-circuitada em que o fluxo magnético variável induz correntes de alta magnitude, semelhantes às correntes de rotor bloqueado. Isto causa aquecimento nesta espira e estende os seus efeitos às espiras vizinhas e à isolação de terra. Assim, muitas falhas de isolação do enrolamento à terra, originam-se de falhas de isolação de espira para espira nos pontos de sobreposição de uma sobre a outra. Portanto, o processo de deterioração de uma isolação à terra pode ser iniciado por uma falha de isolação de espira para espira. Relés de sobrecorrente, geralmente, não são capazes de sentir uma falta de espira para espira (ou espira curto-circuitada), mesmo em estágio avançado, particularmente se o motor tiver um carregamento leve. Não há proteção eficiente para a falha de espira para espira, nem mesmo para os relés de desbalanceamento de corrente. O calor gerado cumulativamente no ponto de falta gera uma evolução da falta, pelo efeito da carbonização, para uma falta de arco entre espiras e entre espira e a terra. A carbonização, assim, é acelerada causando faltas de corrente altamente variável e intermitente, provavelmente ainda sem elevar a corrente eficaz a ponto de atingir o “pick-up” do relé de falta à terra. No seu processo de degradação final da isolação, haverá corrente suficiente para sensibilizar o relé, porém, ao custo de severa queima do núcleo do motor.

6.4 SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO, FALHAS À TERRA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO DE TERRA

A queima do núcleo do motor depende da magnitude e duração da corrente de falta à terra, do tipo de conexão do enrolamento, e da localização da espira defeituosa ao longo do enrolamento de fase.

As falhas de isolamento de espira à terra também podem ser explicadas pelo ciclo térmico e pela fadiga mecânica impostos pelos estresses desenvolvidos pelas correntes de “*inrush*” durante a partida do motor. Este estresse mecânico é piorado nos pontos de entrada e de saída das ranhuras onde as espiras ficam mais soltas.

A magnitude da corrente de falta é também maior próximo aos terminais da espira como pode ser visualizado na figura 6.3.

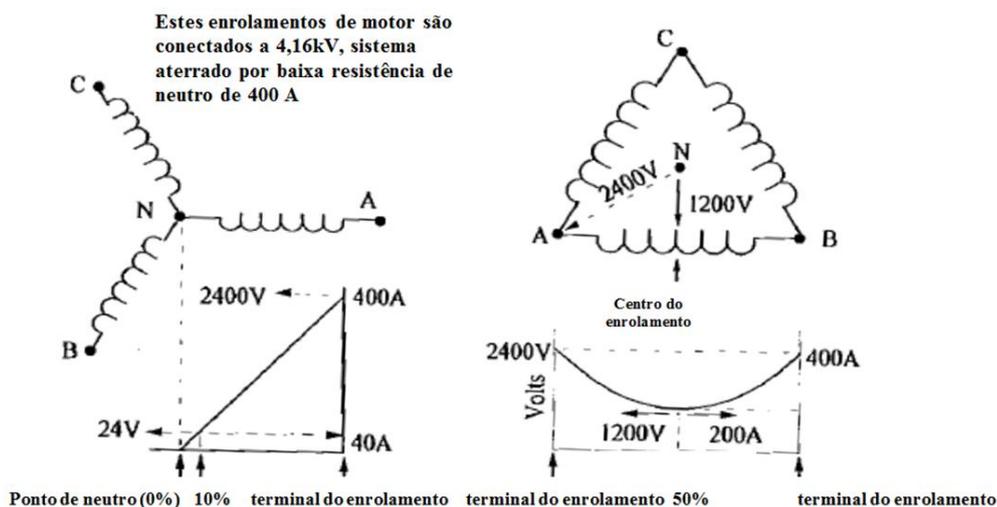


Figura 6.3 – Tensão aproximada e corrente de falta à terra em função da localização da falta ao longo do enrolamento do motor, para as conexões Y e Δ (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Na forma de ligação em Y, comum para as máquinas girantes, a tensão próxima aos terminais do enrolamento energizado chega à tensão nominal enquanto que, no neutro (isolado), é zero. Por esta razão há maior estresse de tensão nas espiras mais próximas aos terminais do que no neutro. Notar que, se o sistema tiver o neutro aterrado por resistor de 400 A, por exemplo, 10% disto, ou seja, 40 A, é o ajuste normalmente utilizado pelas proteções de terra para sistemas aterrados por baixa resistência. Como a sensibilidade do relé é de 10% de fundo de escala da corrente de falta à terra (de 400 A), 10% do enrolamento, próximo ao neutro, ficariam desprotegidos no caso do motor em Y. Se usarmos um TC 200- 5 A, ao invés de 400- 5

A, pode-se conseguir proteger mais 5%, isto é, 95% do enrolamento, através de um relé de sobrecorrente. Há uma certa aceitação geral de que não seria um risco sério deixar os últimos 10% do enrolamento desprotegido, do lado mais próximo do neutro contra as faltas à terra, pois constatou-se que esta parte do enrolamento está mais protegida contra os surtos, contra os transientes eletromecânicos devidos ao “*inrush*” de partida, e contra o estresse de tensão (pois não mais do que 10% da tensão de linha-neutro, ou 240V num motor de 4,0kV, recairiam sobre esta parte de 10% do enrolamento). Observar que, para enrolamentos de motores ligados em delta, a tensão mínima ocorre no meio do enrolamento (ponto de menor estresse de tensão) onde a tensão é 50% em relação aos dois pontos terminais. Sobre a isolação do enrolamento, a tensão à terra no ponto médio do enrolamento é a metade da tensão nos terminais do mesmo. Portanto, o relé pode ser ajustado para $\leq 50\%$ da corrente de curto fase-terra (que, neste exemplo, é de 200 A) para conseguir proteger todo o enrolamento para motores em Δ .

Os testes ainda limitados (Dunki-Jacobs, et al., 2007) sobre falhas em enrolamentos indicam que, em sistemas de 2,4kV e 4,16kV de neutro aterrado por alta resistência, correntes de falta à terra de até 8 A, ou até 10 A, não dissipam energia suficiente para provocar a carbonização dos enrolamentos nas máquinas girantes e, conseqüentemente, não conseguem provocar o arco de carbono (“*carbonous fault*”) e a sua conseqüente escalada ou evolução para causar a fundição apreciável das chapas laminadas do núcleo do motor.

Em sistemas de BT com o neutro solidamente aterrado, não protegidos usualmente por um relé de falta à terra dedicado, o calor desenvolvido na falta à terra de uma espira terminal causa severos danos. E, mais grave ainda, se a falha ocorrer na parte mais interna do enrolamento, mais próximo ao terminal de neutro em enrolamentos conectados em Y, ou no ponto médio dos enrolamentos de motores conectados em delta, mesmo com a evolução para as faltas fase-terra, os relés de terra são menos ou nada sensíveis para curtos do enrolamento.

Porém, se a espira terminal defeituosa do motor estivesse num sistema de MT com o neutro aterrado por baixa resistência, protegida por um relé 50GS, a experiência

mostra que a falta seria removida rapidamente sem causar o dano de queima à espira e à isolamento, evitando-se também o dano ao núcleo do motor.

Se, porém, a espira terminal defeituosa do motor estivesse num sistema de neutro aterrado por alta resistência, o prolongado aquecimento desenvolvido pela falta espira para espira (curto entre espiras) seria direcionada para:

- o núcleo do motor que provocaria a evolução para uma falta fase-terra que ativaria um alarme. A falta seria permitida para subsistir por tempo indeterminado, tal como deve ser permitido para o sistema de neutro com alta-resistência;
- uma espira adjacente, o que não ativaria um alarme, até que a escalada da falta entre espiras se transformasse numa falta fase-fase entre espiras de diferentes enrolamentos, resultando numa falta de alta magnitude, o que forçaria os relés de sobrecorrente de fase a operar, mas não antes de haver causado um considerável dano ao estator.

Por esta razão, especialmente na MT, estes riscos de danos em motores são consideráveis e é um forte motivo para se usar preferencialmente os sistemas de neutro aterrado por baixa resistência ou por alta resistência. Por outro lado, o sucesso do sistema de aterramento de alta resistência depende principalmente da remoção rápida do motor que apresentar uma falta à terra, pois mesmo assim, um dano já considerável pode ter acontecido ao mesmo. Neste aspecto, os sistemas com o neutro aterrado por alta resistência em 480V têm apresentado resultados mais favoráveis. Em 2,4 e em 4,16kV (supondo $3I_{C0} \leq 5,5$ A) os usuários reportam uma satisfação média (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

A proteção de terra de motores de MT, com o neutro aterrado por baixa resistência, usa-se o 50GS ou o 51GS, que oferecem excelente proteção contra faltas à terra. A presença de “RTDs” (“Resistance Temperature Detectors”) em algumas ranhuras do estator não é considerada como fator contribuinte importante para a efetiva proteção de falta à terra.

Um esquema de proteção de falha à terra típico é mostrado na figura 6.4. trata-se de um sistema de neutro de baixa resistência, com um resistor de 150 A, 10 segundos. O TC é selecionado para a metade da corrente nominal do resistor de neutro, o que

proporciona 95% de proteção à terra nos enrolamentos do motor conectado em Y. O 51TN é ajustado em 15 A, 0,5 segundo, neste exemplo, para proteger o resistor contra uma corrente de falta à terra de 15 A que circule continuamente e também seletivo com o 50GS, do lado do motor, ajustado em 15 A primários, instantâneo. O 51TN também é retaguarda em relação às proteções principais de terra, à jusante (“downstream”), e poderá comandar diretamente o disjuntor do secundário (não mostrado na figura 6.4) e também promover a abertura do disjuntor do primário do transformador.

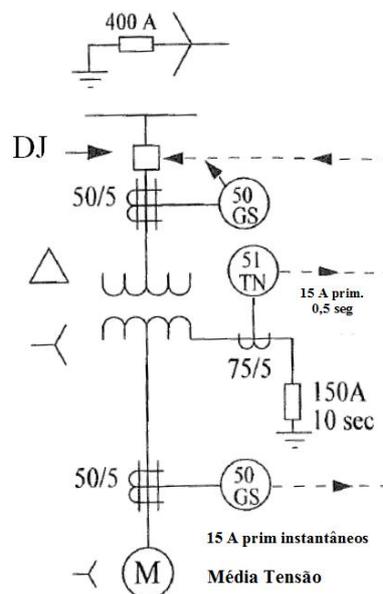


Figura 6.4 – Proteção de falta de terra, de dois níveis

No caso dos motores de MT em sistemas aterrados por baixa resistência, a experiência mostra (Dunki-Jacobs, et al., 2007) que os motores protegidos pelo 50GS têm a falta de terra eliminada instantaneamente e, assim, os danos de queima ficam mais limitados nos enrolamentos e na isolação, evitando o custoso re-empilhamento das laminações do núcleo. Pode-se usar também a proteção diferencial percentual, e a diferencial autobalanceada.

Como os motores são mais sensíveis aos danos causados por faltas à terra e como estas faltas são as mais comuns, o princípio de proteção pelo “ground-sensor” é o preferido. A tendência atual dos fabricantes de motores é a proteção diferencial autobalanceada mostrada na figura 6.5 que permite uma redução na quantidade de transformadores de corrente de seis para três. Estes TCs já são fornecidos, em geral, pelo fabricante junto com o motor, na caixa de acessório do motor. Os relés 50GS são

equivalente à função 87GS com um TC 50-5A para cada enrolamento. A saída do alimentador pode ter um relé 50GS para motor, ou 51GS para gerador com toroide de 50-5 A ou de 100-5 A.

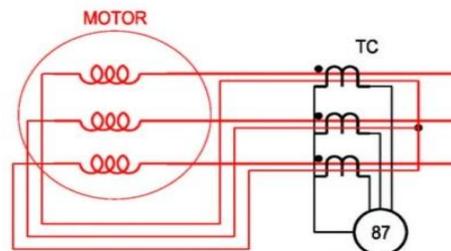


Figura 6.5 – Proteção diferencial autobalanceada em motores de MT ou geradores usando relés 50GS, equivalentes à função 87GS

Neste tipo de proteção utiliza-se um só transformador de corrente por fase para medir a corrente diferencial. Pelo transformador de corrente toroidal, cada fase entra e sai antes de fechar o centro estrela do motor. Assim a corrente diferencial será medida por um único TC por fase. Neste esquema não há erro de medição, pois se usa um único TC por fase e este TC pode ser de corrente primária mais baixa, pois não depende da corrente nominal do motor. Geralmente estes TCs têm relação 50- 5, e devem ter uma classe de exatidão compatível com o “burden” representado, principalmente, pela fiação entre o relé, que está na subestação, e os TCs que estão junto ao motor, em geral, a centenas de metros de distância.

A tabela 6.1 apresenta o conjunto de proteções para motores de BT com relés, devendo-se escolher, no mínimo, um dispositivo dentro de cada categoria.

Tabela 6.1 – Reprodução da tabela 4 do *IEEE Guide for AC Motor Protection*, referente à proteção de motores de BT com relés

Tipo de dispositivo de proteção de estator	Quantidade	Número de função ANSI/ de dispositivo padrão	Designação NEMA
Sobrecarga			
Dispositivos de “trip” estáticos	3	51	---
Relé térmico de sobrecorrente	3	49	---
Relé de sobrecorrente temporizado (“TOC”)	3	51	---
Curto-Circuito			
Fusíveis	3	---	FU
Dispositivos de “trip” estáticos	3	50	--
Relé de sobrecorrente instantâneo (“IOC”)	3	50	--
Falta à Terra			
Relé de sobrecorrente temporizado	3	51N	--

(“TOC”), conexão residual			
Relé de sobrecorrente temporizado (“TOC”) com TC toroidal,	1	---	GP
Subtensão: relé temporizado de subtensão de ação direta	1	27	--

Para a categoria de falta à terra (“*Ground Fault*”, na 1ª coluna, 3ª linha), recomenda-se o relé de sobrecorrente temporizado na conexão residual (51N), denominado como dispositivo de proteção “*TOC – Time-Overcurrent Relay, Residual Connection*”; ou o relé de sobrecorrente temporizado com TC toroidal (“*GP - Ground Protection*”), denominado como dispositivo de proteção “*TOC – Time-Overcurrent Relay, with toroidal CT*”). As proteções de terra através da conexão residual de TCs de fase é geralmente utilizada em sistemas de neutro solidamente aterrado, e o TC toroidal é utilizado em sistemas RBV e RAV. A proteção de terra (50GS/51GS) com TCs toroidais pode ser também utilizada em sistemas solidamente aterrados desde que o conjunto TC/“*ground-sensor*” seja capaz de operar sob altos níveis de curto F-T. Em geral, a proteção “*ground-sensor*” com TCs de núcleo de ferro não deve ser usada em sistemas solidamente aterrados porque a sua sensibilidade inerente não é necessária, e também porque os testes de TCs de núcleo de ferro e relés acoplados é geralmente limitada e bem abaixo dos valores das faltas F-T de 10 a 50kA normalmente encontrados nos sistemas elétricos industriais. Há, porém, tecnologias recentemente desenvolvidas de TCs de núcleo não magnéticos (Mardegan, 2012), (Schweitzer Engineering Laboratories), que possibilitam a inclusão de proteções de terra eficientes com TCs toroidais nos sistemas solidamente aterrados e que seriam particularmente úteis no caso de proteção de motores de BT em sistemas com altas magnitudes de curto F-T, evitando-se o problema de saturação de TC.

6.5 FALHAS EM TRANSFORMADORES, INFLUÊNCIA DO TIPO DE ATERRAMENTO DE NEUTRO E IMPLICAÇÕES NA PROTEÇÃO

Os transformadores são elementos críticos e dispendiosos de um sistema de potência. Devido ao longo tempo de reparo de um transformador, o objetivo principal da proteção é limitar o dano. O tipo de proteção para um determinado transformador varia dependendo do tipo de aplicação e da importância do mesmo. Os transformadores são protegidos, em geral, contra faltas e sobrecargas, de forma a minimizar o tempo de desconexão para as faltas de dentro e de fora do transformador, e a reduzir o risco de falha catastrófica, simplificando um eventual reparo. Qualquer operação sob condições

anormais de faltas ou sobrecargas compromete a vida útil do transformador, o que requer proteções adequadas. À medida que os transformadores se tornam envelhecidos, a probabilidade de falha aumenta, pois a isolamento tende a se deteriorar. A sobreexcitação e as faltas de curto-circuito externas (passantes) são mais danosas à vida útil do transformador do que o envelhecimento causado pela carga (Mozina, 2011). Por esta razão, as faltas de curto-circuito passante foram a principal preocupação da indústria durante o final da década de 70 e anos 80. Como resultado, o comitê do *IEEE* para transformadores desenvolveu o documento C57.12.00-2000 onde se considera a duração e a frequência das faltas passantes (*IEEE Transformer Committee, 2000*) através das categorias: categoria I (5- 500kVA monofásico, ou 15-500kVA trifásico); categoria II (501-1667kVA monofásico, ou 501-5.000kVA trifásico); categoria III (1.668-10.000kVA monofásico, ou 5.001- 30.000kVA, trifásico); e categoria IV (acima de 10MVA monofásico, ou acima de 30MVA trifásico). O relatório C57.12.00 apresenta dois conjuntos de curvas: uma para faltas frequentes e, outra, para faltas não frequentes. Esta diferenciação foi necessária para o projeto correto de transformadores de aplicação na distribuição de energia que estão sujeitos às faltas passantes mais frequentes devido às múltiplas tentativas de reenergização automática de linhas de distribuição sob falta. Os efeitos de faltas passantes que podem causar danos aos transformadores industriais são, no entanto, menores porque os sistemas de aterramento de neutro industriais limitam as correntes de falta à terra de 200 a 400 A através de resistores de neutro.

As falhas em transformadores podem ser classificadas da seguinte forma (*General Electric, 2007*):

- Falhas em enrolamento devidas aos curto-circuitos (curto espira-espira, faltas F-F, faltas fase-terra, e abertura de enrolamento);
- Faltas no núcleo (falha de isolamento do núcleo, curto-circuito no núcleo laminado);
- Falhas nos terminais (terminal aberto, conexões soltas, curto-circuito);
- Falhas no “*OLTC*” – “*On-Load TAP Changer*” (mecânicas, elétricas, curto-circuito, sobreaquecimento);
- Condições de operação anormal (sobrefluxo, sobrecarga, sobretensão);
- Faltas externas.

As filosofias de proteção contra as falhas enumeradas são aquelas mostradas na tabela 6.2 (General Electric, 2007).

Tabela 6.2 – Falhas em transformadores e a filosofia de proteção geralmente adotada (General Electric, 2007)

Condição	Filosofia de Proteção
Faltas Internas	
Faltas F-F entre enrolamentos e faltas F-T	Diferencial de fase (87T), sobrecorrente (51, 51N), diferencial de falta à terra restrita (87RGF), também denominada por diferencial de terra (87G) ou “REF”
Faltas entre espiras do enrolamento	Diferencial de fase (87T), relé Buchholz
Falha de isolamento do núcleo (curto-circuito na laminação)	Diferencial de fase (87T), relé Buchholz, relé de pressão súbita
Faltas no tanque	Diferencial de fase (87T), relé Buchholz e proteção de terra do tanque
Sobrefluxo	Proteção Volts/Hz (24)
Faltas Externas	
Sobrecargas	Imagem Térmica (49)
Sobretensão	Sobretensão (59)
Sobrefluxo	Proteção Volts/Hz (24)
Curto-circuitos externos do sistema elétrico	Sobrecorrente temporizado (51, 51G), sobrecorrente instantâneo (50, 50G)

As proteções influenciadas diretamente pela forma de aterramento de neutro são as proteções que irão detectar as faltas à terra, cujo caminho de retorno da corrente de fuga à terra envolve o neutro do transformador. Estas proteções são as diferenciais (87T) de fase, e as diferenciais de falta à terra restrita (87RGF ou 87G). As proteções diferenciais fornecem uma boa proteção geral ao transformador no sistema de neutro aterrado por baixa resistência (RBV), porém, no caso de sistemas isolados ou de neutro aterrado por alta resistência (RAV) a proteção diferencial não funciona, ou tem a

sua sensibilidade reduzida, porque pode não haver corrente de fuga à terra suficiente para sensibilizar a proteção diferencial. A proteção diferencial em sistemas industriais é geralmente utilizada em transformadores de potência igual ou maior do que 10MVA, dependendo ainda da sua importância para manter a continuidade operacional do processo produtivo. Para a proteção de curto entre espiras, a tabela 6.2 apresenta as proteções diferencial de fase (87T) e a detecção tradicionalmente feita pelos relés de súbita pressão (função ANSI 63). Pode haver a complementação mais eficiente com uma proteção diferencial de sequência negativa para as faltas de espira a espira dentro do enrolamento (Fundamentals of Short-Circuit Protection for Transformers, 2010-12).

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma descrição da natureza das falhas de isolação em máquinas elétricas girantes e a natureza das falhas carbonizantes, que são essencialmente faltas à terra e, conseqüentemente, apresentam implicações importantes nas proteções de terra e que mantêm, portanto, uma importante relação com o tipo de aterramento de neutro.

Os aspectos construtivos das máquinas elétricas girantes foram analisados no tocante aos pontos de maior estresse no dielétrico sob o efeito de surtos atmosféricos e de forças centrípetas advindas da própria rotação da máquina. O processo gradual de carbonização é descrito mostrando a degradação, sob o estresse já mencionado, do material de isolação.

Os tipos de falhas de isolação de máquinas elétricas são analisados: a falha espira para espira, e de espira à terra. Muitas falhas de isolação do enrolamento à terra originam-se de falhas de isolação de espira para espira nos pontos de sobreposição de uma sobre a outra. Portanto, o processo de deterioração de uma isolação à terra pode ser iniciada pela geração de calor de uma falha de isolação de espira para espira. Os relés de sobrecorrente geralmente não são capazes de sentir uma falta de espira para espira (ou espira curto-circuitada), mesmo em estágio avançado, particularmente se o motor tiver um carregamento leve. Não há proteção eficiente para a falha de espira para espira, nem mesmo para os relés de desbalanceamento de corrente. Porém, na literatura mais recente, menciona-se a proteção diferencial de sequência negativa para as faltas de espira a espira dentro do enrolamento, que pode complementar as

proteções diferenciais de fase (87) em máquinas elétricas e transformadores, e o relé de súbita pressão (63) em transformadores para detecção destes tipos de faltas.

O calor gerado cumulativamente no ponto deste tipo de falta gera uma evolução da falta, pelo efeito da carbonização, para uma falta de arco entre espiras e entre espira e o terra. A carbonização, assim, é acelerada causando faltas de corrente altamente variáveis e intermitentes, provavelmente ainda sem elevar a corrente eficaz no patamar de “*pick-up*” do relé de falta à terra. No seu processo de degradação final da isolação, haverá corrente suficiente para sensibilizar o relé, porém, ao custo de severa queima do núcleo do motor. Por esta razão, especialmente na MT, estes riscos de danos em motores são consideráveis e é um forte motivo para se usar os sistemas de neutro aterrado por baixa resistência ou, ainda melhor, os sistemas de neutro de alta resistência, com proteções do tipo “*ground-sensor*” (50GS/51GS).

Para os transformadores, as proteções influenciadas diretamente pela forma de aterramento de neutro são as proteções que irão detectar as faltas à terra, cujo caminho de retorno da corrente de fuga à terra envolve o neutro do transformador. Estas proteções são as diferenciais (87T) de fase, e as diferenciais de falta à terra restrita (87RGF ou 87G) e que funcionariam idealmente quanto maior for a corrente diferencial, própria de sistemas solidamente aterrados que apresentam altas correntes de falta F-T, e com certa restrição de cobertura dos enrolamentos, no caso dos sistemas RBV. A proteção diferencial é geralmente utilizada em transformadores de potência igual ou maior do que 10MVA, dependendo ainda da importância dos mesmos na planta e da existência de sistemas de aterramento RBV. As proteções diferenciais fornecem uma boa proteção geral ao transformador, porém, no caso de sistemas isolados ou de neutro aterrado por alta resistência (RAV), a proteção diferencial não é recomendada porque pode não haver corrente de fuga à terra suficiente para sensibilizar a proteção diferencial, principalmente próximo ao neutro. Neste caso, em sistemas RAV, pode-se utilizar a proteção 50GS e com ajustes bem mais sensíveis, tal como se poderia utilizar para os motores, ou a utilização da proteção 59GN com detecção de tensão via delta aberto, dispensando-se a proteção diferencial 87RGF ou 87G, em favor da 50GS ou 59GN, no RAV.

7 IMPLICAÇÕES DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO NAS SOBRETENSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para se analisar as implicações dos sistemas de aterramento de neutro nas sobretensões transitórias, os sistemas isolados devem ser primeiramente estudados, pois estes apresentam altos níveis de sobretensões transitórias quando submetidos a faltas, especialmente, quando estas forem causadas por faltas à terra do tipo transitório, ou seja, causadas por ressonância, ou por faltas à terra intermitentes. As faltas à terra também podem ser do tipo sustentadas ou sólidas, e estas causam diferentes níveis de sobretensões denominadas por sobretensões permanentes, e apresentam comportamentos distintos em função do tipo de sistema de aterramento de neutro. As sobretensões permanentes podem ser suprimidas ou controladas, de forma total ou parcial, dependendo do método de aterramento de neutro a ser adotado. Neste contexto, será apresentado neste capítulo uma análise das sobrecorrentes e sobretensões permanentes e transitórias máximas características para cada tipo de aterramento de neutro avaliado. Os resultados da classificação do grau de aterramento em função de sobrecorrentes e sobretensões permanentes são confrontados com as classificações usuais existentes. Também são apresentados os critérios gerais de classificação do grau de aterramento em função do fator $K=Z_0/Z_1$, real e complexo, e sua consequência nas sobretensões permanentes máximas devido às faltas à terra.

7.2 ANÁLISE DE SISTEMA ISOLADO EM REGIME NORMAL

Os sistemas não aterrados são, na verdade, “fracamente” aterrados através de várias formas de capacitâncias, tipo “shunt”, fases-terra, associadas a motores, geradores, cabos, para-raios e certos tipos de capacitores para correção do FP conforme mostrado na figura 7.1. Observa-se que as capacitâncias distribuídas fase-fase e fase-terra equivalentes de equipamentos são representadas por parâmetros concentrados das capacitâncias distribuídas nas conexões em delta e estrela da figura 7.1. O conjunto de capacitâncias na conexão em delta tem pouca influência nas características de aterramento do sistema e estão, portanto, fora de consideração. Sob condições normais, as correntes de carga capacitiva fase-neutro i_{ac} , i_{bc} e i_{cc} , também denominadas por “*charging currents*” (I_{C0}), ou por $3I_{C0}$ que é o valor da corrente total de “*charging*” do sistema, formam um conjunto balanceado (simétrico) de correntes

com 120° de deslocamento de fase entre si, e com o neutro no potencial de terra. A soma fasorial, neste caso, vale: $i_{ac} + i_{bc} + i_{cc} = 0$.

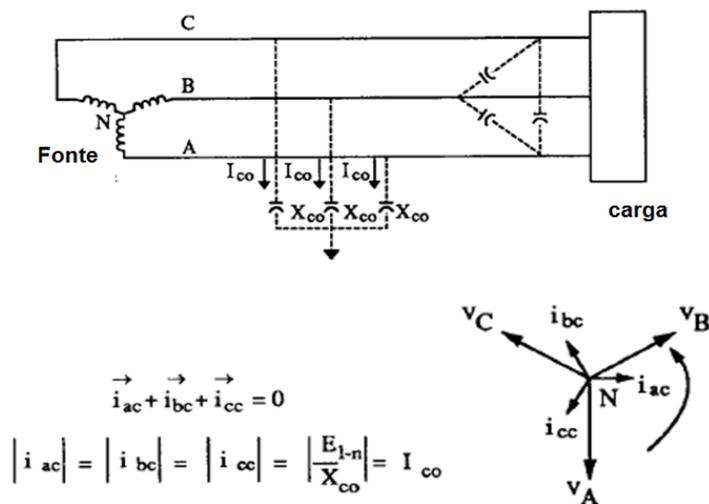
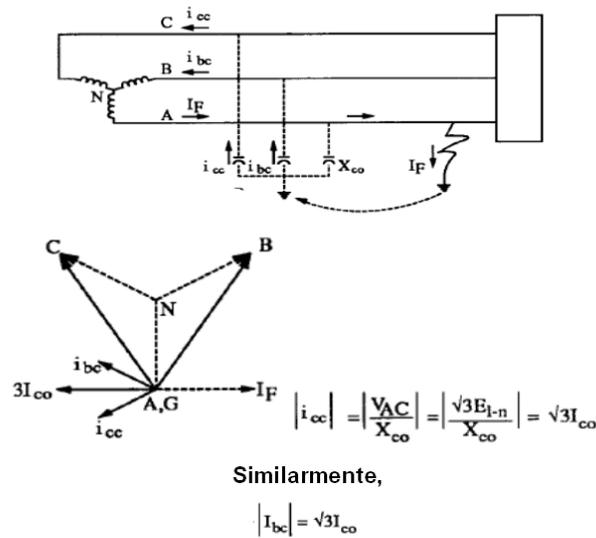


Figura 7.1- Representação de um sistema isolado e as correntes de carga capacitivas em situação normal (Paul, et al., 1991)

7.3 ANÁLISE DE SISTEMA ISOLADO COM FALTA SUSTENTADA À TERRA

Um curto fase-terra na fase A representa um curto-circuito à terra na capacitância da fase A, fazendo com que a corrente através desta capacitância seja zero, ou seja, $i_{ac} = 0$. Exceto por uma pequena queda de tensão na impedância X_L ao longo da fase A, a tensão fase-terra V_{ag} na fase A é forçada a zero. As tensões V_a , V_b e V_c do sistema são fixas em magnitude e fase. A corrente de curto I_F tem duas componentes: i_{bc} e i_{cc} . As tensões responsáveis por i_{bc} e i_{cc} são respectivamente, V_{AB} e V_{AC} e desde que a impedância seja predominantemente capacitiva, as correntes estão avançadas em relação às respectivas tensões cerca de 90° conforme o diagrama fasorial mostrado na figura 7.2. A corrente i_{bc} está 90° adiantada em relação a V_{ab} , e a corrente i_{cc} está 90° adiantada em relação a V_{ac} , o que faz com que o ângulo entre i_{bc} e i_{cc} seja de 60°. Tem-se que, $i_{cc} = V_{ac}/X_{C0} = \sqrt{3}V_{FN}/X_{C0} = \sqrt{3}I_{C0}$ e, similarmente, $i_{bc} = \sqrt{3}I_{C0}$. Portanto, pela lei dos cossenos, $I_F = i_{bc} \cdot \cos 30^\circ + i_{cc} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{C0} \cdot \cos 30^\circ + \sqrt{3}I_{C0} \cdot \cos 30^\circ = 2\sqrt{3} \cdot I_{C0} \cdot (\sqrt{3}/2) = 3I_{C0}$ (Paul, et al., 1991). A validade geral deste resultado, em função do deslocamento de neutro, será analisada mais adiante.



A corrente resultante na fase A é I_F , o vetor soma de i_{cc} e i_{bc}

$$\therefore I_F = i_{cc} + i_{bc} = 2 \cdot \sqrt{3} I_{co} \cos 30^\circ = 3 I_{co}$$

Figura 7.2 – Sistema isolado com falta à terra na fase A, a configuração das correntes e o deslocamento de neutro através da tensão V_{NG} (Paul, et al., 1991)

Como $I_F = 3I_{co}$, isto significa que o valor de curto-circuito fase-terra num sistema isolado é igual, em módulo, à corrente total de “charging” das três fases do sistema antes da falta e que esta corrente de “charging” é também numericamente igual a mesma corrente produzida após o curto fase-terra através das capacitâncias distribuídas do sistema elétrico nas duas fases sãs. Isto sugere um meio direto de medir a corrente de carga capacitiva em sistemas não aterrados, conforme mostrado na figura 7.3, baseado num curto F-T intencionalmente provocado no sistema (I-Gard).

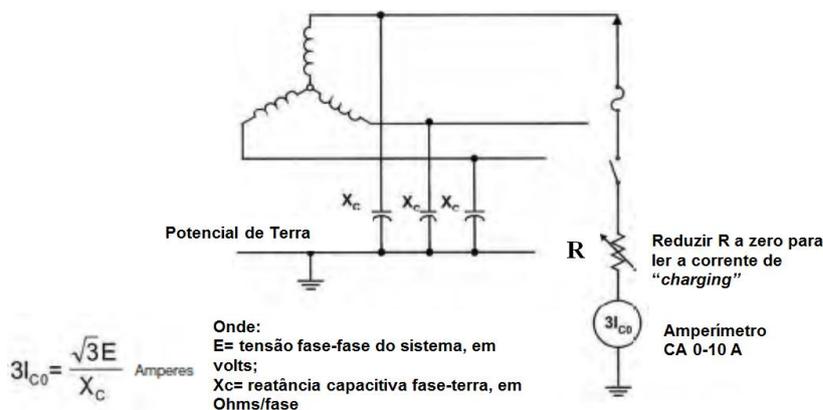


Figura 7.3 - Procedimento para medição da corrente de carga capacitiva do sistema ($3I_{co}$) (I-Gard)

Para realizar este teste, o sistema inteiro deve ser energizado na tensão nominal, de forma que todos os componentes possam contribuir à corrente capacitiva (“charging”

current”). Com a resistência ajustada ao máximo, a corrente deve ser limitada à metade da corrente capacitiva (“*charging current*”) estimada, ou seja, $R = (2E/\sqrt{3}) * (3I_{C0})$ [Ω], onde $(3I_{C0})$ é a corrente capacitiva estimada para o sistema elétrico (I-Gard). Normalmente a corrente de capacitiva do sistema é estimada em 1 A para cada 2.000kVA de capacidade da instalada no sistema em 480V, portanto, $R = (2E/\sqrt{3}) * (3I_{C0}) = (2 * 480/\sqrt{3}) * (1) = 554,3$ [Ω].

A resistência R do circuito de teste, mostrada na figura 7.3, deve estar no ponto máximo, isto é, em $R = 554$ [Ω], antes de se fechar a chave, devendo-se reduzir a resistência R a zero. Neste momento, o amperímetro indicará uma corrente correspondente a $(3I_{C0})$ estimada inicialmente como sendo da ordem de 1 A. Após a leitura de $(3I_{C0})$ no amperímetro, a sequência de procedimento é invertida. Aumenta-se R ao máximo e abre-se a chave. No entanto, a literatura (Dunki-Jacobs, et al., 2007) recomenda que a tensão V_{ng} não exceda em 20 a 25% da tensão fase-neutro do sistema, V_{an} , para evitar o estresse excessivo nas isolações com as tensões elevadas. Nestas condições, a corrente de capacitiva (“*charging current*”) $3I_{C0}$, que corresponde à plena tensão do sistema, pode ser calculada pela equação (7.1):

$$3I_{C0} \text{ (calculada para tensão } V_{an}) = (V_{an}/V_{ng}) * (3I_{C0} \text{ medida sob tensão } V_{ng}) \quad (7.1)$$

Onde:

- V_{ng} é a tensão sob a qual a medição é feita;
- V_{an} é a tensão nominal do sistema.

Caso não seja viável medir-se a corrente capacitiva (“*charging current*”) do sistema, pode-se estimá-la através da tabela 7.1 obtida de catálogos de fabricantes (I-Gard)

Tabela 7.1- Estimativa da corrente capacitiva do sistema em função da potência instalada (I-Gard)

Tensão Fase-Fase do sistema	Corrente capacitiva estimada/ capacidade do sistema em kVA, sem supressores	Corrente adicional para cada conjunto de supressores de surto
600 V	1 A / 2.000 kVA	0,5 A
2.400 V	1 A / 1.500 kVA	1,0 A
4.100 V	1 A / 1.000 kVA	1,5 A

7.4 CAUSAS DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM SISTEMAS ISOLADOS

As sobretensões de natureza transiente ou transitória podem ocorrer devido às faltas fase-terra através de ressonância ou através de faltas à terra intermitentes.

7.4.1 SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM SISTEMAS ISOLADOS: EFEITOS DE RESSONÂNCIA E FERRORESONÂNCIA

Um dos mecanismos que causam as sobretensões transitórias em sistemas isolados está também associado às faltas sólidas fase-terra, através de uma impedância altamente indutiva que, em série com a reatância capacitiva do sistema ($X_{C0}/3$), entra em ressonância, ou em quase ressonância. Esta indutância pode ser introduzida no sistema por uma reatância linear (X_L), mas quando um núcleo de ferro estiver envolvido, a sobretensão gerada pode advir do efeito de ferroressonância.

O circuito de Thevenin equivalente da figura 7.4 mostra a falta fase-terra num sistema isolado, nas três hipóteses de tipos de falhas: (A) falta resistiva; (B) falta indutiva; e (C) falta capacitiva. A tensão fase-terra E_{ag} é deduzida para os 3 casos, em função do tipo de falta, e calculada para o caso particular de a impedância de falta ser 2 vezes $X_{C0}/3$, que é um caso de quase ressonância.

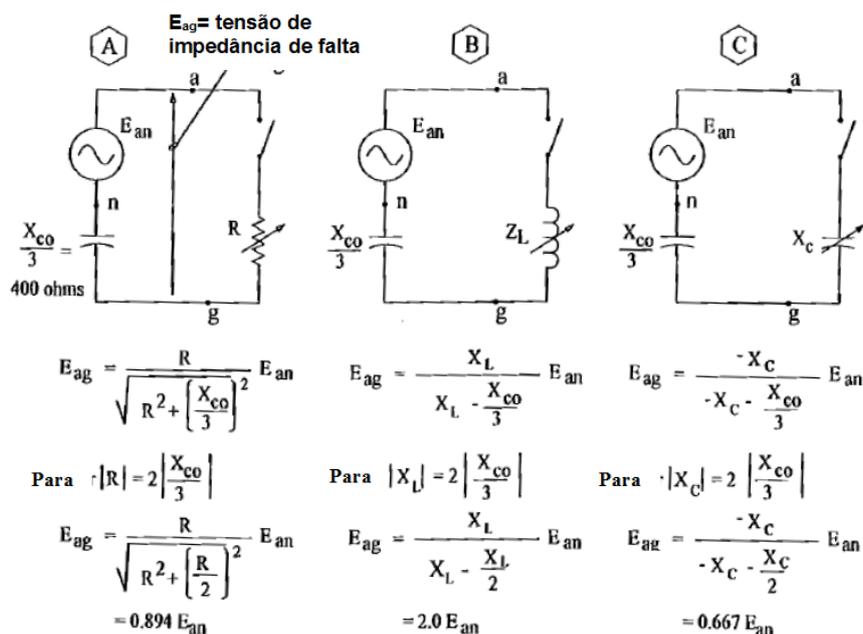


Figura 7.4 - Equivalente de Thevenin e equações que expressam E_{ag} no sistema isolado devido a uma falta à terra através de uma impedância Z_F do tipo: (A) falta resistiva; (B) falta indutiva; (C) falta capacitiva (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Em teoria, apenas as faltas indutivas são capazes de provocar sobretensões transitórias como mostrado na figura 7.4 (B) e na figura 7.5, principalmente quando forem de valor de reatância indutiva igual a duas vezes a reatância capacitiva do sistema. Esta situação é de ressonância perfeita, isto é, apresenta sobretensões de magnitude infinita. No entanto, deve-se lembrar que toda falta deve incluir algum valor resistivo que reduz a magnitude de sobretensão a algum valor prático limitado de 10 a 20 vezes a tensão normal (Dunki-Jacobs, et al., 2007). Todavia, este valor de sobretensão transitória estará presente em todo o sistema elétrico, de forma permanente, estressando a isolação de todos equipamentos, especialmente dos motores elétricos.

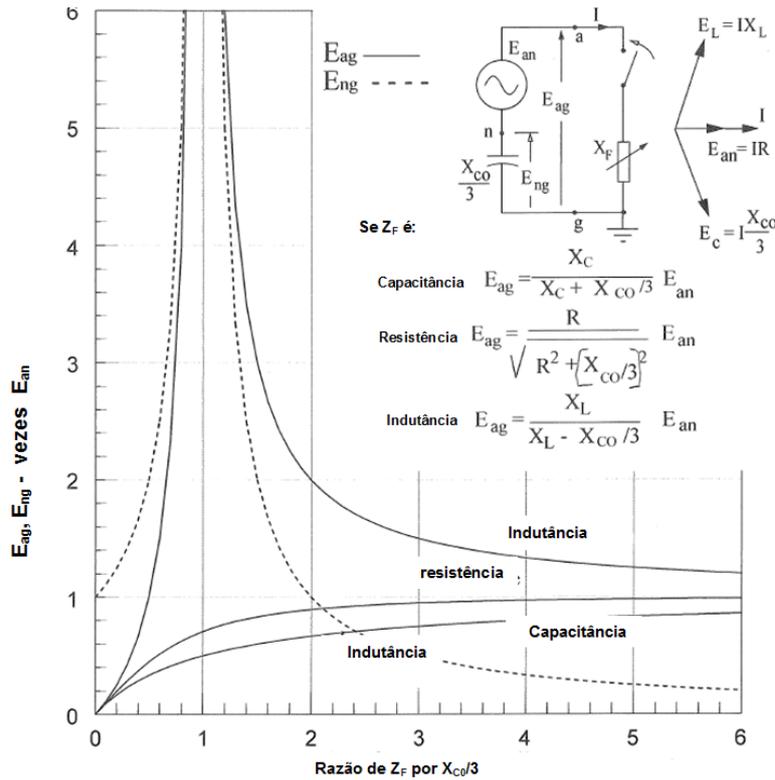


Figura 7.5 - Tensões E_{ag} de F-T e E_{ng} de neutro-terra, provocadas por faltas à terra de vários tipos de impedâncias, em sistemas isolados. A impedância Z_F é expressa por unidade de $X_{CO}/3$ (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

Cálculos semelhantes para outras razões de $Z_F/(X_{CO}/3)$ permitem plotar um conjunto de curvas mostradas na figura 7.5. Observa-se que a ressonância perfeita nem é necessária para provocar sobretensões excessivas, pois indutâncias de falta de duas vezes a reatância capacitiva do sistema já podem causar uma sobretensão fase-terra de duas vezes a tensão fase-neutro do sistema nas fases sãs.

A conexão não intencional de uma reatância indutiva entre o condutor de fase e à terra pode ocorrer de diversas formas, três das quais estão ilustradas na figura 7.6 (Beeman, 1955). O primeiro caso da figura 7.6 ocorre quando um enrolamento (indutivo) se conecta acidentalmente entre uma fase e o terra. O segundo caso ocorre quando o fusível se abre devido a uma falta à terra num transformador deixando uma reatância T2 e T3 do transformador em paralelo entre a fase e a terra. O terceiro caso ocorre quando uma fase da linha se abre e é aterrada no lado da carga, conectando as reatâncias T2 e T3 do transformador em paralelo entre a linha e a terra.

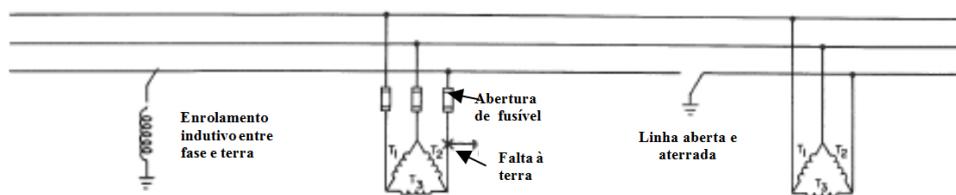


Figura 7.6 - Exemplos de acoplamentos não-intencionais altamente indutivos entre a linha e o terra que podem causar sobretensões em sistemas isolados devido ao fenômeno de ressonância ou ferroressonância (Beeman, 1955)

A bobina de um contator usado para a partida de motor pode ser conectada inadvertidamente entre uma fase e a terra por um curto à terra no fio de controle da botoeira, ou o esquecimento de uma chave de fenda pelo pessoal de manutenção, conforme mostrado na figura 7.7. A qualquer momento o valor da reatância indutiva, que se conecta de uma fase à terra, cair na região de perigo (Z_F indutivo próximo a $X_{C0}/3$) indicada na figura 7.5, mostra a curva de ressonância com sobretensões perigosas em relação à terra e que serão produzidas e transmitidas sobre todo o condutor metálico do sistema daquela tensão de operação.

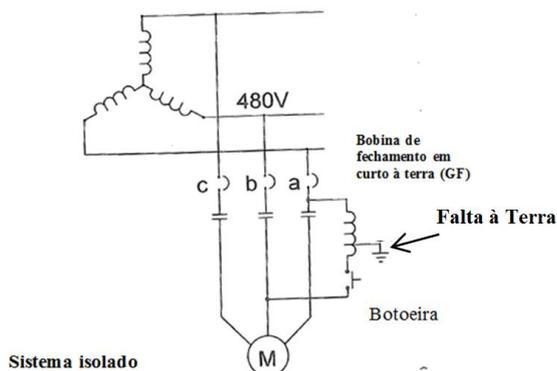


Figura 7.7 – Exemplo de acoplamento não-intencional altamente indutivo entre linha e terra podendo causar sobretensões em sistemas isolados devido ao fenômeno de ressonância ou ferroressonância (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

A figura 7.5, ilustrando a ressonância, não evidenciou o fato de que a reatância possa ser não linear, devido à possível saturação do núcleo. Sob esta condição, a reatância efetiva do circuito indutivo pode se tornar muito mais baixa, e a tensão poderá oscilar ou excursionar automaticamente entre limites de tensão que causam a efetiva reatância indutiva a combinar com o valor da reatância capacitiva, facilitando a ocorrência da própria ressonância. Este fenômeno, que envolve os núcleos de ferro, é denominado por ferroressonância e, por esta razão, classifica-se a sobretensão causada pela ferroressonância como sobretensão transitória.

Outro exemplo é quando a fase A for aterrada através de uma indutância como, por exemplo, um aterramento dentro das espiras de um transformador de potencial, o qual insere, entre a fase e à terra, uma reatância indutiva igual à reatância capacitiva da fase aterrada, o circuito pode apresentar uma ressonância série e produzir transientes com altas sobretensões. Para valores de $X_L/(1/3 X_{CO})$ maiores do que 2, as sobretensões parecem ser mais suaves se a frequência for 60Hz, mas componentes harmônicas de ordem superior também podem apresentar casos de ressonância. Sobretensões deste tipo, por ressonância, podem ser completamente suprimidas por uma pequena resistência no neutro do sistema elétrico. Um resistor, de cerca de mesmo valor ôhmico, ou maior, correspondente à corrente de carga total da capacitância do sistema à terra, é o suficiente para eliminar este tipo de sobretensão por ressonância, como será analisado mais adiante.

7.4.2 SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DEVIDAS ÀS FALTAS À TERRA DO TIPO INTERMITENTE EM SISTEMAS ISOLADOS

Faltas fase-terra, do tipo intermitente (ou faltas a arco) apresentam um problema singular: a possibilidade de sobretensões transientes muito superiores àquelas apresentadas pelos curto-circuitos fase-terra sustentados.

Sobretensões transitórias muito altas podem ocorrer em sistemas não aterrados (ou isolados) devido às conexões intermitentes de falta à terra. O caráter intermitente do caminho do curto-circuito pode ser o resultado de uma vibração que faz com que um condutor tenha contatos intermitentes e periódicos com à terra, ou de um espalhamento de partículas derretidas de um condutor metálico que, de forma intermitente, estabelece um caminho condutor à terra, ou de um espaço de separação entre um condutor e o terra que, sucessivamente, se fecha e se abre.

As condições de falta à terra intermitentes em sistemas não-aterrados na BT têm ocasionado sobretensões de 5 a 6 vezes a tensão nominal em apenas 1 ciclo (Beeman, 1955), sendo responsável pela queima de uma grande quantidade de equipamentos e motores alimentados pelo circuito no qual a falta à terra do tipo intermitente apareceu.

Sistemas elétricos aterrados por impedância muito alta também podem estar sujeitos às sobretensões por este mesmo mecanismo numa forma um pouco diferente.

A compreensão deste fenômeno causado por uma conexão elétrica descontínua e que pode causar estas sobretensões pode se dar através do caso de uma falta à terra intermitente (*"intermittent ground fault"*) num sistema isolado conforme mostrado na figura 7.8, *Industrial Power System Handbook*, (Beeman, 1955) e (Dunki-Jacobs, et al., 2007). A figura 7.8, caso 1, descreve o padrão dos vetores de tensão num sistema trifásico operando numa condição normal e equilibrada. Os fasores de tensão E_a , E_b e E_c giram ao redor do neutro na velocidade síncrona. O neutro é um ponto central e permanece constante no potencial de terra se os fasores de tensão individuais forem ondas de frequência fundamental, sem harmônicas. Caso o condutor da fase A fique aterrado, o triângulo de tensões do sistema se desloca conforme ilustrado em (2) na figura 7.8.

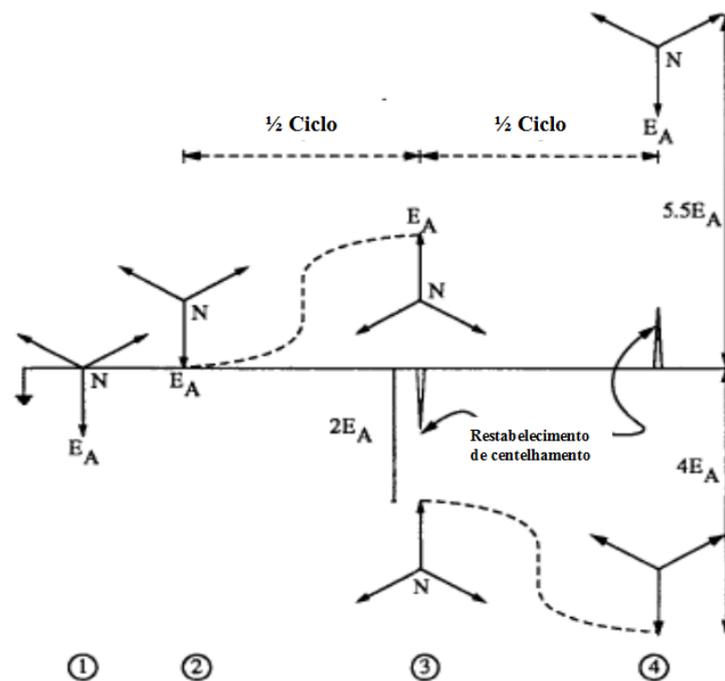


Figura 7.8 - Sobretensões transientes devidas à uma falta à terra intermitente (Paul, et al., 1991)

Nesta posição, a tensão na fase A está em seu valor máximo enquanto que a corrente capacitiva (*"charging current"*) do sistema está passando por zero, 90° em avanço em relação à tensão. No caso em que o curto contenha um pequeno *"gap"* ou um arco, a corrente de arco se extinguiria neste ponto, enquanto que a carga armazenada na capacitância fase-terra tenderia a manter o triângulo de tensão na mesma posição deslocada. Em outras palavras, o potencial de neutro tenderia a permanecer num potencial CC igual ao valor de crista da onda de tensão AC. Durante o próximo meio ciclo, entretanto, as tensões AC geradas mudarão de polaridade (os fasores irão girar em 180°), o que fará que os fasores de tensão assumam a posição superior mostrada

na figura 7.8 em (3). Durante este intervalo de meio ciclo, o potencial da fase A foi progressivamente aumentado de zero a cerca de duas vezes a tensão de pico fase-terra, em relação ao potencial de terra. Este valor do potencial da fase A à terra pode ser suficiente para romper a isolação do “gap” do circuito de falta à terra. Se isto ocorrer, o potencial da fase A tenderá a ser empurrado repentinamente ao potencial de terra. Haverá inevitavelmente uma reatância do sistema entre a fase A ao ponto de curto-circuito à terra que resultará numa oscilação do potencial da fase A. Se o curto-circuito consiste de uma conexão metálica sólida, esta oscilação decai a zero, deixando a fase A no potencial de terra. Nesta oscilação transitória de alta frequência está associada à corrente transitória capacitiva. Esta corrente capacitiva transitória, ou corrente de reignição, alcançará novamente o valor zero quando a tensão do sistema oscilar na máxima excursão na direção negativa, conforme mostrado na parte inferior de (3) da figura 7.8. Então, uma oportunidade é oferecida ao “gap” no curto-circuito fase-terra para abrir. Se a abertura realmente ocorrer, uma carga é novamente retida na capacitância do sistema que tenderia a manter um potencial constante CC em relação à terra no neutro do sistema. No curso do próximo meio ciclo, o sistema de fasores de tensão rotacionará novamente 180° , causando uma elevação do potencial da fase A em relação à terra, conforme indicado na figura 7.8, na transição da parte inferior (3) da figura 7.8, para a parte inferior de (4). Este aumento de tensão através do “gap” de curto-circuito pode novamente resultar numa re-ignição, que neste caso faria com que o triângulo de tensão tendesse a ser jogado na direção positiva na forma de uma oscilação de alta frequência a qual, na presença de uma sólida conexão metálica, decairia gradualmente a zero. Na explicação precedente, todas as condições foram as mais favoráveis no aparecimento da reignição de tensão a mais alta possível e no menor tempo possível (se o tempo de ignição do curto intermitente for muito grande, o curto ficará mais próximo a um curto sólido, o qual não permite que os fasores de tensão excursionem livremente). Assumiu-se que a reignição ocorra no ponto de retorno de tensão máxima, mas não antes. Assumiu-se também que a extinção ocorra na passagem da corrente em zero após a reignição. Sob estas condições, um potencial fase-terra de 5,5 vezes o potencial normal foi desenvolvido num único ciclo, conforme a figura 7.8. Na prática, a reignição pode ocorrer antes que a tensão máxima seja atingida, e diversos ciclos de oscilação transitória serão necessários para que o curto-circuito abra naquele mesmo nível de tensão. Na teoria é possível que a tensão fase-terra aumente progressivamente por sucessivas reignições sem limite até o

rompimento do dielétrico. Porém, medições em sistema reais indicaram que os níveis de tensão raramente excedem 5 a 6 vezes a tensão normal (Beeman, 1955). Acredita-se que os danos provocados pelas sobretensões de origem de reigitação repetitiva sejam muito comuns em sistemas não aterrados ocasionando a queima rápida da isolação de diversos equipamentos elétricos, quase que simultaneamente, sem que haja tempo de se detectar e localizar o ponto de falta intermitente. O efeito de sobretensão deste tipo de falta intermitente pode ser totalmente eliminado pelo aterramento efetivo do neutro, desde que a resistência de neutro tenha um valor igual ou acima da corrente capacitiva (*“charging current”*) do sistema.

7.4.3 CONTROLE DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DEVIDO ÀS FALTAS À TERRA POR CURTOS INTERMITENTES E POR RESSONÂNCIA EM SISTEMAS ISOLADOS

A capacitância à terra do sistema elétrico aparece no circuito de sequência zero como um capacitor (Beeman, 1955), enquanto que os circuitos de sequência positiva e negativa para uma falta à terra são colocados em série com o circuito de sequência zero. Os circuitos de sequência positiva e negativa para uma falta à terra do tipo intermitente podem ser representados por impedâncias equivalentes do tipo "reatâncias". As impedâncias de sequência positiva e negativa, em comparação com a de sequência zero, não são significativas. Quando se coloca uma resistência para prover um caminho para a corrente de falta, de modo que esta corrente de falta resistiva (I_{r0}) seja igual ou maior do que a corrente capacitiva de sequência zero, obtém-se a condição de curto em (7.2) (Nelson, 2002).

$$I_{r0} \geq I_{c0} \quad (7.2)$$

O circuito de sequência zero, que representa a descarga da capacitância, é mostrado na figura 7.9 (Nelson, 2002).



Figura 7.9 - Circuito de sequência zero mostrando a descarga da capacitância do sistema

A resistência R_0 irá permitir que a tensão decaia exponencialmente segundo uma constante de tempo. Desta forma, nota-se que as sobretensões transientes são limitadas pela resistência e, quanto menor a resistência, mais rápida e maior é a

drenagem da corrente capacitiva e, conseqüentemente, menor é a sobretensão transiente.

A experiência mostra que sobretensões transientes originadas por curtos intermitentes são limitadas a aproximadamente 2,5PU, se $I_{r0} \geq I_{C0}$ (Nelson, 2002). A prática padrão para aterramentos de baixa resistência estabelece, então, que as sobretensões transientes devem ser limitadas a 250% de V_{LN} (fase-neutro), ou seja, $V_{FT} = 2,5 \cdot V_{FF} / \sqrt{3} = 1,44 \cdot V_{FF}$. O efeito do resistor de neutro nas sobretensões em função da reatância capacitiva do sistema é mostrado na figura 7.10 (Paul, et al., 1991).

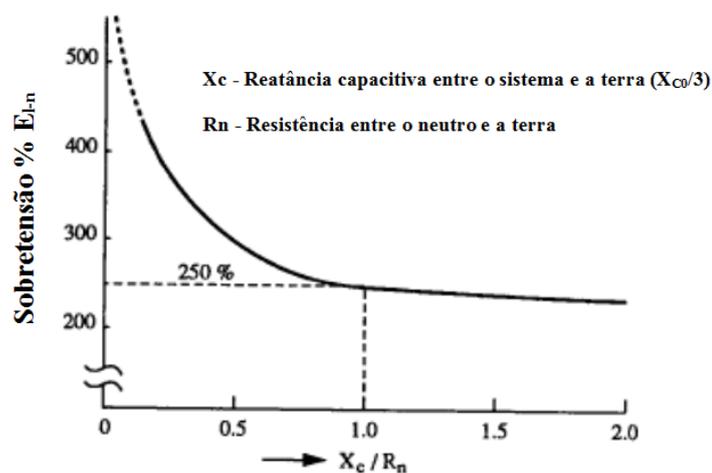


Figura 7.10 - Efeito do resistor no ponto de neutro para limitar as sobretensões transientes devidas aos curtos fase-terra intermitentes (Paul, et al., 1991)

Portanto, para evitar as sobretensões transientes originadas por curtos intermitentes em sistemas com o neutro aterrado por resistência, esta resistência deve ser capaz de drenar a corrente capacitiva entre os arcos sucessivos de meio ciclo e, para isso, basta, que $I_{r0} \geq I_{C0}$, conforme mostrado na figura 7.10.

Considere-se o sistema com o neutro aterrado por resistência R_N genérica conforme o circuito equivalente foi mostrado figura 7.11. Aplicando-se o teorema de Thevenin ao sistema (A), tem-se o seu circuito equivalente em (B) com o resistor de aterramento R_N inserido em paralelo com $X_{C0}/3$ entre o neutro e a terra. Em (C): o mesmo que (B), após a obtenção do circuito série equivalente.

Comparando-se este circuito de Thevenin (Dunki-Jacobs, et al., 2007) com aquele apresentado para o sistema isolado, constata-se que este apresenta as três capacitâncias X_{C0} em paralelo, junto com R_N , enquanto que no sistema isolado havia o equivalente monofásico, com apenas uma capacitância de uma fase $X_{C0}/3$. Agora, a

indutância da falta está em série com a combinação paralela do resistor de neutro e a capacitância efetiva do sistema.

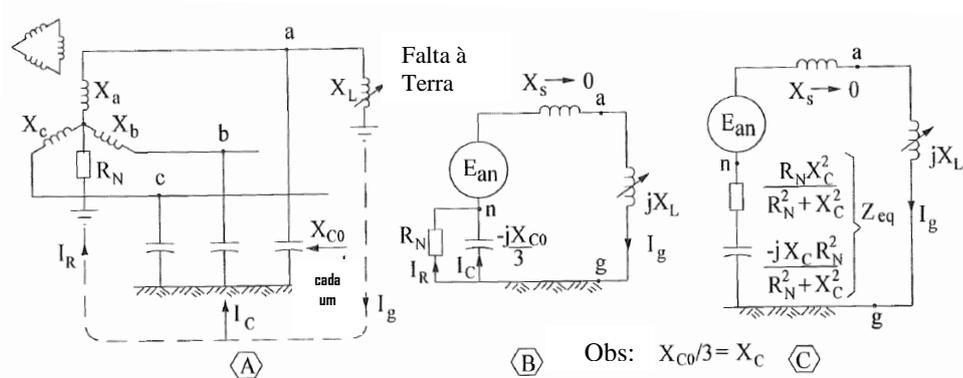


Figura 7.11 - Análise do efeito de falta à terra de indutância variável X_L num sistema descarregado e aterrado por resistência R_N (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

O projeto do sistema pode escolher um valor de R_N para assegurar determinados objetivos, tais como: um valor relativamente alto de corrente máxima de falta à terra ($R_N \ll X_{C0}/3$), ou um pequeno valor de mínima corrente de falta à terra de forma que a corrente no resistor de neutro R_N , durante uma falta sólida à terra, permita passar uma corrente igual à corrente capacitiva (“charging current”) do sistema ($R_N = X_{C0}$).

Portanto, seguindo-se a regra geral para controle das sobretensões, tem-se que $R_N \leq X_{C0}/3$ (ou $R_N \leq X_C$, onde $X_C = X_{C0}/3$).

Desenvolvendo-se o circuito equivalente mostrado na figura 7.11 (A), obtém-se o circuito 7.11 (B) onde os ramos paralelos entre “n” e “g” apresentam o circuito com o resistor de neutro R_N em paralelo com a capacitância do circuito X_{C0} e cuja expressão de impedância Z_{eq} de circuito equivalente destes dois ramos em paralelo mostrados na figura (7.11) (B) vale conforme (7.3).

$$Z_{eq} = \frac{R_N * (-jX_C)}{R_N - jX_C} \tag{7.3}$$

A figura 7.11 (C) é obtida a expressão para Z_{eq} , porém, considerando-se $X_{C0}/3$ substituído por X_C por conveniência. A expressão de Z_{eq} na figura 7.11 (C) é o equivalente série para R_N e $X_{C0}/3$ (ou X_C) correspondente ao circuito paralelo da figura 7.11 (B). Portanto, há a possibilidade de uma ressonância assumindo-se algum valor de indutância de falta à terra X_L . Esta condição de ressonância ocorre quando a

magnitude de X_L se igualar à parte imaginária de Z_{eq} da figura 7.11 (C) (parte da capacitância equivalente série), ou seja, que a relação (7.4) ocorra.

$$X_L = \frac{(R_N^2) \cdot X_C}{R_N^2 + X_C^2} \quad (7.4)$$

A expressão (7.4) possui ainda a resistência R_N . Utilizando-se a regra de que o controle de sobretensão é restringida através de $R_N \leq X_{C0}/3$, para o caso limite onde $R_N = X_{C0}/3$, obtém-se a equação (7.5).

$$Z_{eq} = \frac{R_N \cdot (-jX_C)}{R_N - jX_C} \Rightarrow \frac{R_N \cdot (X_C^2)}{R_N^2 + X_C^2} = \frac{R_N^3}{R_N^2 + R_N^2} = \frac{R_N^3}{2R_N^2} = \frac{R_N}{2} \quad (7.5)$$

Isto é, para uma possível situação de ressonância, ainda permanece no circuito de falta à terra uma impedância efetiva total (resistiva) de $\frac{1}{2}R_N$. Neste caso, o valor máximo da falta à terra é calculado, sabendo-se que $I_{C0} = V_{an} / X_{C0}$, de acordo com a equação (7.6) (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

$$I_g = \frac{V_{an}}{R_N/2} = \frac{2V_{an}}{R_N} = \frac{2V_{an}}{X_{C0}/3} = \frac{6V_{an}}{X_{C0}} = 6I_{C0} \quad (7.6)$$

Ao interpretar a equação (7.6), esta significa que, no caso de uma ressonância, a corrente de neutro I_g vale $6 \cdot I_{C0}$, isto é, $2 \times (3I_{C0})$, ou seja, duas vezes a corrente de “charging”, num sistema trifásico com o neutro aterrado através de uma resistência $R_N = X_{C0}/3$. Como em sistemas de BT a corrente de “charging” $3I_{C0}$ normalmente não passa de 1 A, para o controle de sobretensões transientes devido ao fenômeno de ressonância na BT a corrente de neutro I_g não excederia correntes maiores do que 6 A (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

A resistência de neutro de também serve ao objetivo de descarregar as cargas capacitivas, de forma a controlar as sobretensões transientes devido aos curtos intermitentes que devem ficar em torno de 250%. Como será visto mais adiante, uma simples escolha de $R_N = X_{C0}/3$ resolve também o problema de sobretensões provocadas por curtos intermitentes, controlando as sobretensões em 250%.

A tensão V_{ag} , quando $I_g = 6 \cdot I_{C0}$, é descrita pela equação (7.7).

$$V_{ag} = 6I_{C0} \cdot X_L \quad (7.7)$$

Ao variar X_L , de modo que este fique numericamente igual à capacitância série efetiva, V_{ag} pode ser obtida pela equação (7.8).

$$V_{ag} = \frac{6I_{C0}*(R_N^2*X_C)}{R_N^2+X_C^2} \quad (7.8)$$

Adotando-se $R_N = X_C$ e $I_{C0} = V_{an}/X_{C0}$ em (7.8), obtém-se (7.9).

$$V_{ag} = \frac{6V_{an}R_N^3}{2X_{C0}R_N^2} \quad (7.9)$$

Adotando-se ainda $R_N = X_C = X_{C0}/3$ em (7.9), obtém (7.10).

$$V_{ag} = \frac{2V_{an}R_N^3}{2R_N^2(X_{C0}/3)} = \frac{2V_{an}R_N^3}{2R_N^2R_N} = V_{an} \quad (7.10)$$

Portanto, para um sistema aterrado por resistência $R_N = X_{C0}/3$, a condição de ressonância série do circuito não provoca sobretensão na fase sob falta, o que contrasta com a sobretensão infinita do sistema isolado. Basta somente adicionar uma resistência de neutro capaz de descarregar a carga capacitiva do sistema para evitar o fenômeno de ressonância.

Uma análise mais aprofundada mostra que, para valores de $R_N < (X_{C0}/3)$, a corrente de ressonância aumenta com a redução de R_N , como era esperado, pois R_N é a única impedância efetiva do circuito equivalente, já que $X_L = X_C$ na condição de ressonância.

Por outro lado, as sobretensões transitórias de pico causadas por curtos intermitentes foram estudadas por analisadores de transitórios por meio de “TNAs” na década de 40 com o intuito de validar os sistemas RAV. Então, para os diversos valores da variável $\left(\frac{X_{C0}}{R_N}\right)$, tem-se a curva de máxima sobretensão transitória no caso de falta à terra intermitente simulada através de centelhamentos nos contatos de um disjuntor no momento de sua operação, conforme o gráfico da figura 7.12 (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

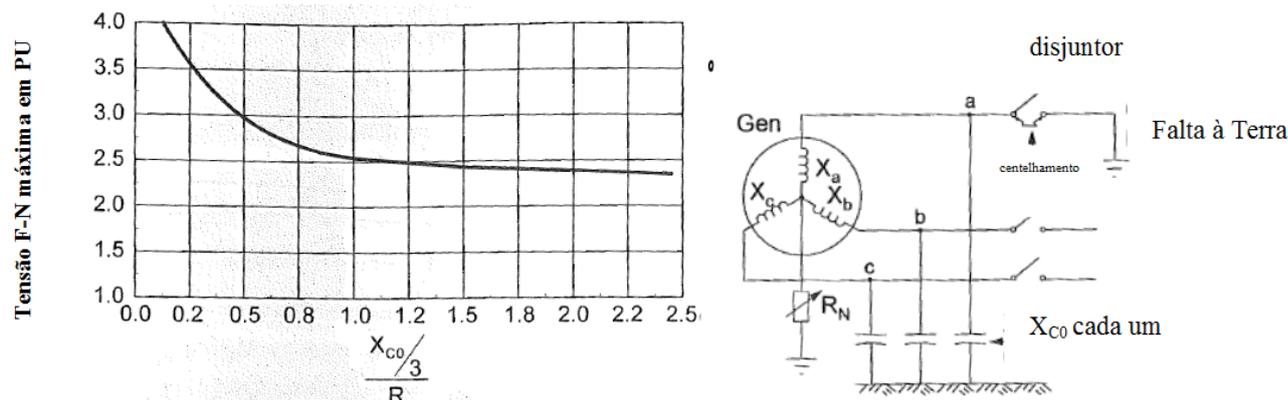


Figura 7.12 - Máxima sobretensão transitória fase-neutro em PU como função de $(X_{C0}/3)/R_N$ para faltas à terra intermitentes simuladas por centelhamentos através dos contatos do disjuntor (Dunki-Jacobs, et al., 2007); *IEEE Std C62.92.2, 2005* (IEEE, 2005)

Nota-se que, para $\left(\frac{X_{C0}}{3}\right)/R_N$ tendendo a zero, isto é o mesmo que R_N tendendo ao infinito,

o que também significa o mesmo que um sistema isolado, V_{an} tende ao infinito, no caso

de curtos intermitentes. A partir de $\left(\frac{X_{C0}}{3}\right)/R_N = 0,5$ (isto é, R_N deixa ainda de drenar metade

da corrente capacitiva do sistema), já há uma significativa redução nas sobretensões

das fases que chegam a, no máximo, 3,0 vezes (ou 300%) a tensão V_{an} . Para

resistores de neutro que drenam exatamente a corrente de charging $X_{C0}/3$, isto é, para

$R_N = X_{C0}/3$, por exemplo, a abcissa que indica esta situação na figura (7.12) vale

$\left(\frac{X_{C0}}{3}\right)/R_N = 1,0$ e o gráfico mostra que a sobretensão transitória máxima vai para 2,5PU

ou 250%, para as fases sãs em relação a V_{an} , ou seja, $V_{FT} = (2,5) \cdot \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} = (1,44) \cdot V_{FF}$. É

por esta razão que o critério de aterramento do neutro por alta resistência foi

estabelecido de forma a permitir um valor mínimo de corrente de falta à terra, que é de

$I_g \geq 3I_{C0}$, ou $R_N \leq X_{C0}/3$, mostrando que o resistor de neutro drena a corrente capacitiva

("charging current") e controla as sobretensões fase-terra, tanto de origem de curtos

intermitentes, como também provenientes de ressonâncias. Para $R_N \leq X_{C0}/3$ as

sobretensões transitórias ficam limitadas a 2,5PU conforme estabelecido em *IEEE Std*

C62.92.2, 2005 (IEEE, 2005), e em (Dunki-Jacobs, et al., 2007). Neste caso, fica

implícito o aceite de uma sobretensão transitória de fase máxima de 250% em relação

à tensão fase-neutro ou 144% em relação à tensão fase-fase. Esta forma de

aterramento de alta resistência é aplicada onde se deseja limitar as sobretensões

(transitórias) e se conviver com o primeiro curto fase-terra, de modo a garantir a

continuidade de fornecimento de energia, sem a perda de produção. A análise

apresentada valida a utilização de aterramento de neutro feito por resistor para o controle das sobretensões transitórias.

Os curtos intermitentes têm uma natureza transiente e evoluem para um curto sólido, que provoca uma sobretensão (permanente) de somente $\sqrt{3}$ vezes a tensão fase-terra. As sobretensões causadas por este tipo de curto exigem que a especificação para a isolação do sistema elétrico seja de 250% para sobretensões transitórias, enquanto houverem os curtos intermitentes, se o sistema for conviver com este curto de forma permanente, e desde que os sistemas sejam aterrados por alta resistência, ou seja, $R_N \leq X_{C0}/3$. Com esta resistência de neutro, a ressonância tampouco provocará sobretensões transitórias maiores do que 250%. Portanto, a especificação da isolação dos sistemas de alta resistência de neutro com $R_N \leq X_{C0}/3$ deve ser para 250% em relação à tensão fase-neutro, ou $V_{FT} = (2,5) \cdot \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} = (1,44) \cdot V_{FF}$, ou 144% em relação à tensão de linha.

Esta forma de aterramento de alta resistência é aplicável em sistemas de tensões nominais de 480V, 2,4kV, e 4,16kV, mas somente onde a corrente de “*charging*” total do sistema for menor do que 5,5 A, ou seja, $I_{C0} \leq 5,5$ A, que é o limite de corrente I_{C0} para as máquinas elétricas de modo a preservar os enrolamentos contra a dissipação térmica devido a esta corrente circulante que pode fluir de forma contínua nas falhas carbônicas.

A análise ora apresentada não levou em consideração os efeitos de saturação dos núcleos de ferro devido às tensões mais altas que podem ocorrer durante as condições de operação indicadas.

Portanto, basta um resistor de aterramento de neutro de $R_N \geq X_{C0}/3$, que ambos os fenômenos, de curtos intermitentes e de ressonância, tenham as sobretensões controladas e limitadas em 250%.

7.4.4 CONTROLE DE SOBRETENSÕES ATRAVÉS DE NEUTRO ATERRADO POR INDUTÂNCIA SINTONIZADA (BOBINA DE PETERSEN)

Uma outra opção para estabilizar o neutro é através do uso de uma indutância no neutro. O procedimento é o de combinar o valor ôhmico da indutância de neutro com o valor ôhmico relativamente alto de $X_{C0}/3$ da reatância capacitiva à terra do sistema. Nesta condição de $I_N = X_{C0}/3$, a indutância de neutro está em sintonia com a

capacitância do sistema $X_{C0}/3$ no circuito paralelo do equivalente de Thevenin mostrado na figura 7.13 (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

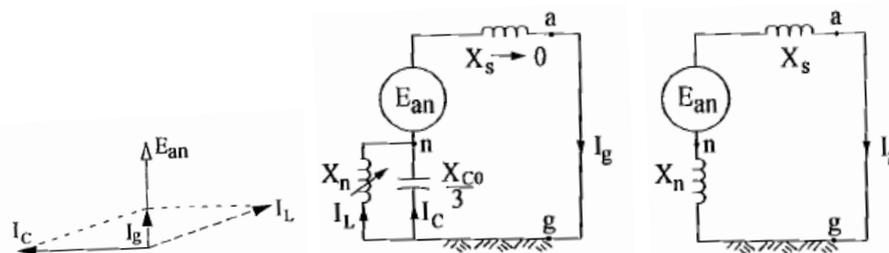


Figura 7.13 - Alternativas de aterramento do neutro através de reatâncias:

- (A) Bobina de Petersen sintonizada: $X_N = X_{C0}/3$; (B) Circuito sintonizado: $X_L = X_{C0}/3$; (C) Circuito dessintonizado: $I_g \geq 0,25 \cdot I_{3-FASE}$ (Dunki-Jacobs, et al., 2007)

A reatância do sistema X_S é considerada muito pequena e é desprezada. Sob uma falta à terra, o casamento de impedâncias produz a ressonância paralela em 60Hz, resultando numa corrente I_g de falta à terra muitíssimo pequena e que corresponde somente a uma pequena mudança na tensão neutro-terra durante esta falta. O aterramento de neutro pela bobina de Petersen é particularmente apropriado para as aplicações em sistemas de transmissão e distribuição (construídos em linhas aéreas), que não estão sujeitas a chaveamentos frequentes que afetem a magnitude de $X_{C0}/3$. Além disso, a pequena corrente de falta à terra não operaria os relés de fase e, que ainda seriam frequentemente auto-extinguíveis na primeira passagem da corrente por zero nas faltas de terra causadas por arcos sobre os isoladores de linha, ou por um contato entre linhas causado por ventos, ou por outros mecanismos transitórios.

A bobina de Petersen não é apropriada para a aplicação industrial, pois o valor de $X_{C0}/3$ se modifica em função da modificação das cargas da planta, do rearranjo de circuitos (abertura e fechamento de disjuntores de interligação de barras), de esquemas de trabalho, etc. A necessidade de uma contínua sintonização levou ao pouco uso do princípio da bobina de Petersen na indústria. No entanto, há trabalhos que indicam a possibilidade de sua utilização na indústria dentro de certas condições (Costa, 1995).

7.5 SOBRECORRENTES E SOBRETENSÕES PERMANENTES DURANTE FALTAS À TERRA SÓLIDAS E EFEITO DA RAZÃO Z_0/Z_1

7.5.1 ASPECTOS GERAIS DOS MÉTODOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO

De forma geral, o método de aterramento do neutro não possui nenhuma influência durante a operação normal do sistema elétrico, mas é de importância fundamental quando ocorre uma falha na qual a terra é inserida no circuito.

Do ponto de vista estatístico, de 70% a 90% dos curto-circuitos são do tipo fase-terra, e os curto-circuitos entre duas ou três fases, em geral, são iniciados por um curto fase-terra, o qual provoca ionizações ou sobretensões que propiciam a evolução do defeito. Portanto, o estudo da forma de aterrar o neutro requer considerações cuidadosas, pois o sistema elétrico deve ser projetado a suportar as sobretensões permanentes e transitórias, e as correntes do defeito fase-terra e, na maioria das vezes, o sistema de proteção deve ser capaz de detectar e isolar a falta em tempo hábil. A designação sobretensão “permanente” ou de “natureza permanente” para os curtos sólidos, aqui, não deve ser vista como uma sobretensão de longa duração, a qual pode, na verdade, ser de curtíssima duração devido a uma falha de isolamento que sensibiliza as proteções de fase que isolam aquele circuito com a falta original.

Os níveis de sobretensões permanentes e transitórias e o valor das correntes que surgem durante uma falta à terra são profundamente influenciados pelo método de aterramento do neutro. De um modo geral, se o sistema é diretamente aterrado ou aterrado através de baixa impedância, a corrente de falta à terra é alta. Conseqüentemente, a destruição e os inconvenientes causados no local de falta são consideráveis. Por outro lado, as sobretensões permanentes das fases sãs à terra são reduzidas e completamente suportáveis.

Se o sistema possui o neutro isolado ou aterrado através de impedância de alto valor, a corrente de falta à terra é reduzida, mas as tensões das fases sãs para à terra podem atingir valores perigosos ou, mesmo, insuportáveis. Isto pode resultar em evolução do curto para as outras fases se não forem adotadas precauções especiais.

Para os sistemas de neutro isolado ou aterrado por impedância de alto valor (resistência ou reatância não sintonizada) são utilizados geralmente nas classes de baixa tensão (até 1.000V) e média tensão (até 36 kV) que podem, tipicamente, ser

sistemas de 2,4 e 4,16kV. Nestas tensões, o custo na isolação dos componentes do sistema não é tão crítico, de forma que o mesmo pode ser isolado e suportar as sobretensões transitórias de até 250% em relação à tensão V_{LN} , conforme explicado no item 7.4, devido aos efeitos de ressonância ou ferroressonância.

Por outro lado, para sistemas de alta e extra alta tensão, o custo para fornecer a isolação necessária torna-se proibitivo e estes sistemas são normalmente do tipo solidamente aterrados.

Pelo exposto, verifica-se que é possível utilizar uma variedade de métodos de aterramento, desde que sejam considerados os aspectos do valor da corrente do curto fase-terra, as tensões normais e transitórias que surgem durante este defeito, as facilidades de detecção do defeito e de seu local de ocorrência, a possibilidade de obtenção de seletividade, e outros aspectos inerentes a cada classe de tensão e da natureza do sistema elétrico em questão. Os sistemas industriais têm critérios e métodos de aterramento completamente diferentes dos sistemas de geração, transmissão e distribuição das concessionárias de energia. Também para uma mesma classe de sistema, de distribuição, por exemplo, os métodos de aterramento podem ser diferentes em cada país e com desempenho aceitável. Não existe, portanto, um método ideal de aterramento, sendo de responsabilidade do engenheiro projetista decidir o método mais conveniente em cada situação.

7.5.2 CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA

A expressão geral da corrente de falta à terra I_{F-T} num sistema trifásico é dada em função de parâmetros de componentes simétricas conforme a equação (7.11).

$$I_{F-T} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_g} \quad (7.11)$$

Onde:

E = tensão fase-neutro;

Z_1 = impedância de sequência positiva;

Z_2 = impedância de sequência negativa;

Z_0 = impedância de sequência zero;

Z_g = impedância de retorno de terra.

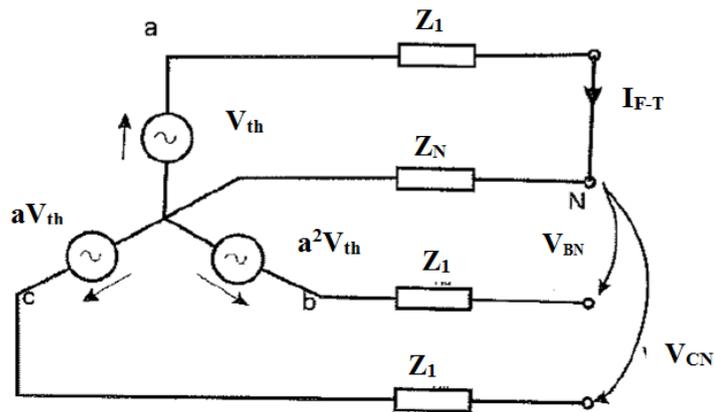
As impedâncias de sequência positiva e negativa, Z_1 e Z_2 , respectivamente, estão somente associadas com a fonte e a impedância de fase de equipamentos contribuindo para a corrente de falta, pois as correntes destas duas seqüências positiva e negativa combinam-se em zero no ponto de falta à terra. As impedâncias Z_1 e Z_2 são iguais entre si para os equipamentos envolvidos (transformadores, barramentos, cabos) e têm os mesmos valores normalmente utilizados em cálculos de faltas trifásicas.

O sistema de impedância de sequência zero, entretanto, envolve correntes em fase em cada um dos três circuitos trifásicos onde cada circuito consiste de fonte e condutores de fase dos equipamentos ao ponto de falta. As impedâncias à terra para esta rede podem ser identificadas como de sequência zero Z_0 . A soma das correntes de sequência zero nos condutores de fase, $3I_0$, deve então retornar à fonte de alimentação via o caminho de retorno identificado por Z_g . Este caminho consiste de estruturas metálicas de prédios, eletrodutos, condutores de aterramento, condutores de neutro aterrado, barramentos de terra, hastes de aterramento, terra, invólucros metálicos de equipamentos, etc. O caminho de retorno à terra resulta numa queda de tensão adicional através destas impedâncias de $3I_0 \cdot Z_g$. Considerando-se o termo de queda de tensão, $3I_0 \cdot Z_g$, como o produto de $3Z_g$ e I_0 , torna-se claro que a expressão (7.11) deve considerar a impedância $3Z_g$ à rede de impedância de sequência zero conforme mostrado em (7.11). Então, a rede de impedância equivalente de sequência zero vale $(Z_0 + 3Z_g)$, e cada termo não precisa ser medido independentemente (que seria mais difícil), mas pode-se obter um valor para o termo total $(Z_0 + 3Z_g)$. Este termo total também é apresentado sob a forma da razão $(Z_0 + 3Z_g)/Z_1$ para alguns componentes do sistema, tais como, cabos, e podem ser tabulados de forma conveniente.

Assumindo-se $Z_1 = Z_2$, e supondo-se a ausência de arco e saturação, a equação (7.11) do curto fase-terra I_{F-T} fica desenvolvida na forma da equação (7.12), substituindo-se ainda E pela tensão do equivalente de Thevenin V_{TH} da fonte de alimentação e denominando-se o termo $(Z_0 + 3Z_g)$ simplificadamente por Z_N , porém, lembrando-se que Z_N contém a impedância $3Z_g$ do caminho de retorno conforme esclarecido.

$$I_{F-T} = \frac{3V_{TH}}{2Z_1 + Z_N} \quad (7.12)$$

Supondo a fase A em curto F-T, a figura 7.14 permite a análise do circuito.



7.14 – Circuito equivalente no ponto de falta

Pelas quedas de tensões na malha do circuito BN, onde a tensão em seus terminais é V_{BN} , tem-se: $V_B - a^2 \cdot V_{TH} + Z_N \cdot I_{F-T} = V_N$, e considerando $Z_0 = Z_1 + 3Z_N$, ou seja, $Z_N = (1/3)(Z_0 - Z_1)$, portanto, (7.12) torna-se em (7.13).

$$V_B = V_{TH} \left[a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 - 2Z_1} \right]$$

Ou,

$$V_B = V_{BN} = V_{TH} \left[a^2 - \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{Z_0}{Z_1} + 2} \right] \tag{7.13}$$

De forma análoga à equação (7.13), tem-se o desenvolvimento da equação (7.14) para a outra fase C.

$$V_C = V_{CN} = V_{TH} \left[a - \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{Z_0}{Z_1} + 2} \right] \tag{7.14}$$

Analisam-se os dois casos particulares nos itens 7.5.3 e 7.5.4, utilizando-se as equações (7.13) e (7.14).

7.5.3 CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA CONSIDERANDO RESISTÊNCIAS DESPREZÍVEIS

Denominando-se Z_0/Z_1 por K (real) conforme (7.15).

$$\frac{Z_0}{Z_1} = \frac{X_0}{X_1} = K \tag{7.15}$$

E substituindo-se K de (7.15) na equação (7.13), vem a equação (7.16).

$$V_B = V_{TH} \left[- \left(\frac{1}{2} + \frac{K-1}{K+2} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \tag{7.16}$$

Ou, melhor, a magnitude escalar de V_B da equação fasorial (7.16) fica conforme (7.17).

$$V_B = V_C = V_{TH} \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{K-1}{K+2}\right)^2 + \frac{3}{4}} \tag{7.17}$$

Se $V_{TH} = 1,0PU$, tem-se a seguintes valores dados pela tabela 7.2 (Hermeto, et al., 2010), de sobretensões calculadas pela equação (7.19) em função de K real.

Tabela 7.2 – Valores de sobretensões permanentes em função de K real

K (real)	1,0	2,0	3,0	4,0	10	∞
V_{PU}	1,0	1,145	1,25	1,32	1,52	1,73

Para um curto fase-terra sólido, num sistema isolado, sob a hipótese de resistências desprezíveis, as maiores sobretensões fase-terra nas fases sãs ocorrem para os valores de K mais elevados (K ou K_0 é a relação de reatância X_0 sobre X_1 , isto é, o curto passa por X_1 mas, no retorno por X_0 , gera maiores quedas de tensão, pois X_0 é relativamente muito maior do que X_1).

O limite da sobretensão permanente máxima nas fases sãs em relação à terra é de 1,73 ou $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase para um sistema isolado. E o neutro se desloca ao longo do eixo vertical de forma que, se o curto sólido ocorre na fase A, nos terminais do gerador ou fonte, todo o triângulo de fasores de tensões se desloca ao máximo em relação à linha de terra. E se o curto sólido na fase A ocorresse distante do local da fonte, o triângulo de fasores se deslocaria menos em relação à linha de terra, provocando menores sobretensões nas fases sãs. Isto significa que as sobretensões nas fases sãs devidas a um curto fase-terra num sistema isolado e que dependem da localização da falta, e da localização do ponto de medição das sobretensões, conforme mostrado na figura 7.15.

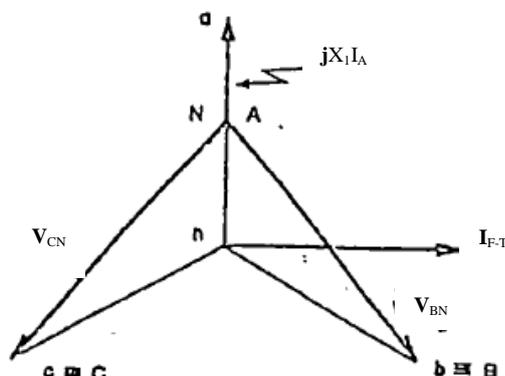


Figura 7.15 – Deslocamento do neutro e sobretensões permanentes nas fases sãs (Hermeto, et al., 2010)

7.5.4 CORRENTES E TENSÕES DURANTE FALTAS SÓLIDAS FASE-TERRA CONSIDERANDO RESISTÊNCIA CONFINADA À SEQUÊNCIA ZERO

A simplificação usada no estudo anterior desenvolvido no item 7.5.3 não é capaz de mostrar os valores corretos das sobretensões permanentes, pois as relações entre as impedâncias equivalentes sequenciais e as sobretensões nas fases são apresentadas considerando K real e dependente apenas de X_0/X_1 (Hermeto, et al., 2010). Considerando-se, porém, a componente real e imaginária das impedâncias sequenciais, isto é, K é complexo, conforme equação (7.18).

$$\begin{aligned} K &= \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{(R_0 + jX_0)}{(R_1 + jX_1)} = \frac{(R_0 + jX_0)(R_1 - jX_1)}{(R_1 + jX_1)(R_1 - jX_1)} = \\ &= \frac{[R_0R_1 + X_0X_1 + j(R_1X_0 - R_0X_1)]}{(R_1^2 + X_1^2)} = \\ &= \frac{R_0R_1 + X_0X_1}{\frac{[(R_1^2 + X_1^2) + j(R_1X_0 - R_0X_1)]}{(R_1^2 + X_1^2)}} \end{aligned} \quad (7.18)$$

Assumindo $R_1 \rightarrow 0$ na equação (7.18) para fins de simplificação do estudo de sobretensões devidas ao curto-circuito fase-terra, pois a resistência é pequena diante das reatâncias do sistema elétrico e o que é especialmente válido para os sistemas de média tensão, o fator K (complexo) pode ser expresso por (7.19).

$$K \approx \frac{X_0}{X_1} - j \frac{R_0}{X_1} \quad (7.19)$$

O estudo fica mais completo, então, considerando-se a resistência de sequência zero conforme as equações (7.20) e (7.21).

$$Z_1 = jX_1 \quad \text{e} \quad Z_0 = r_0 + jX_0$$

$$V_B = V_{TH} \left[a^2 - \frac{\frac{r_0 + jX_0}{jX_1} - 1}{\frac{r_0 + jX_0}{jX_1} + 2} \right] \quad (7.20)$$

$$V_C = V_{TH} \left[a - \frac{\frac{r_0 + jX_0}{jX_1} - 1}{\frac{r_0 + jX_0}{jX_1} + 2} \right] \quad (7.21)$$

Supondo X_0 e X_1 fixos, e r_0 variável, tem-se no modelo $r_0 = 3R_N$ e $X_0 = X_1 + 3X_N$

O lugar geométrico descrito pelo ponto de neutro é a semi-circunferência mostrada na figura 7.16 (Hermeto, et al., 2010).

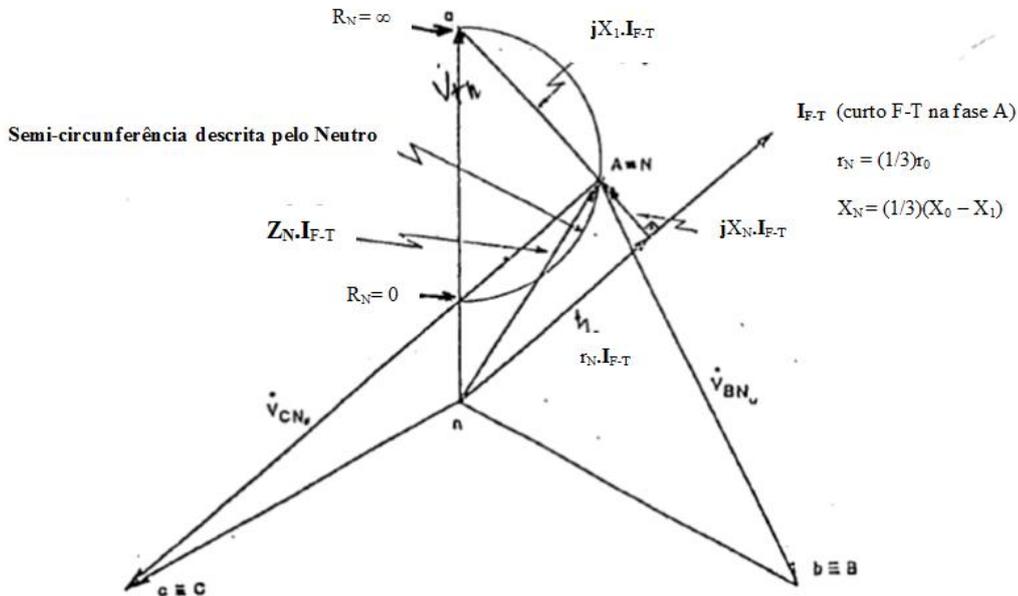


Figura 7.16 – Lugar geométrico descrito pelo neutro ao longo da semi-circunferência, de $R_N = 0$ a $R_N \rightarrow \infty$ (Hermeto, et al., 2010)

Ao se considerar as resistências no modelo, o ângulo da corrente de falta deixa de ser 90° em relação à tensão de fase em curto. Disto resulta que o deslocamento de neutro fica fora de fase. Durante o curto, o neutro percorre uma semi-circunferência do ponto $R_N = 0$ ao ponto $R_N \rightarrow \infty$ em função das combinações de valores de r_0 e de X_0 , isto é, em função do ponto de curto-circuito e do ponto de referência considerado no sistema elétrico para efeito de sobretensão permanente. As sobretensões permanentes fase-terra em uma das fases são um pouco maiores do que $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase, sob certas condições de resistência e de reatância de sequência zero. Pelo fato de que o ponto de neutro descreve uma semi-circunferência, fica justificado o resultado no qual as sobretensões permanentes das fases são diferentes entre si, conforme calculado na tabela 7.3 para os casos de X_0/X_1 e R_0/X_1 mostrados e, inclusive, maiores que 173% da tensão de fase, considerando-se K complexo. Isto significa que, geometricamente, o triângulo de fasores das tensões não corresponde exatamente àquele mostrado na figura 7.17 (b). No caso de curto F-T nos terminais da fonte a figura 7.17 (b) representa corretamente o fato de a fase aterrada estar exatamente no potencial de terra, enquanto que as duas fases são estão a 173% de potencial em relação à terra. Caso o curto F-T fosse distante, supondo ainda K real, a

queda de tensão ao longo do caminho de retorno faria que a fase aterrada não esteja exatamente sob o potencial de terra, isto é, o triângulo de tensões poderia estar deslocado com uma das fases, aquela sob curto à terra, abaixo da linha de terra, enquanto que as duas fases sãs estariam sob um mesmo potencial menor que 173% em relação à terra. O fato de K ser complexo altera este modelo pois, para uma dada localização do curto F-T distante da fonte, em função dos diversos pontos de referência do ponto de falta até a fonte, o triângulo das tensões descreve a semi-circunferência da figura 7.16, o que mostra geometricamente que podem haver sobretensões permanentes nas fases sãs maiores que 173%.

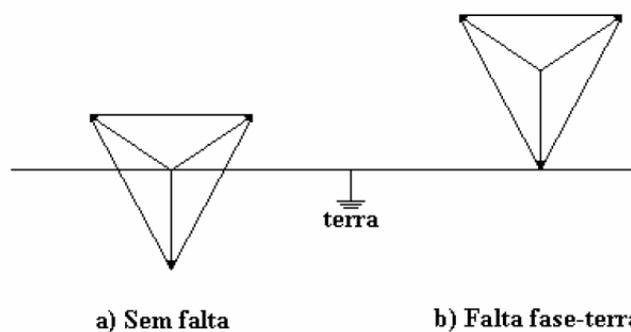


Figura 7.17 - Tensões durante uma falta à terra em um sistema com neutro isolado

Considerando-se um sistema como sendo efetivamente aterrado definido de forma que, em todos os seus pontos, as condições estabelecidas em (7.22) sejam satisfeitas.

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad e \quad \frac{r_0}{X_1} \leq 1 \tag{7.22}$$

Tais condições somente serão alcançadas se a maior parte dos equipamentos estiver solidamente aterrada. Neste caso, as expressões das tensões das fases sãs do modelo completo são dadas pelas equações (7.20) e (7.21).

A título de exemplificação, suponha-se que $V_{Th} = 1,0/0^\circ$, $X_0/X_1 = 3,0$ e $R_0/X_1 = 1,0$. Aplicando-se estas relações nas equações (7.20) e (7.21), obtém-se os resultados das tensões V_B e V_C dadas por (7.23) e (7.24) respectivamente.

$$V_B = a^2 - \frac{(-j1 + 3 - 1)}{(-j1 + 3 + 2)} \Rightarrow V_B = 1,38PU \tag{7.23}$$

$$V_C = a^2 - \frac{(j1 + 3 - 1)}{(-j1 + 3 + 2)} \Rightarrow V_C = 1,19PU \tag{7.24}$$

Observa-se que o pior caso é a sobretensão da fase B, dada pela expressão (7.23), onde: $V_B = 1,38\text{PU}$, bem acima de $1,25\text{PU}$ indicado na tabela 7.2 para $K = 3,0$ (K real).

Aplicando-se a equação (7.12), a corrente de curto fase-terra I_{F-T} neste caso, fica conforme (7.25).

$$I_{FT} = \frac{3V_{TH}}{2X_1 + X_0}, \quad \text{onde: } 3X_0 = 3X_1$$

$$I_{FT} = \frac{3V_{TH}}{2X_1 + 3X_1} = \left(\frac{3}{5}\right) \cdot \frac{V_{TH}}{X_1} = \left(\frac{3}{5}\right) \cdot I_{3F} = (0,6) \cdot I_{3F} \quad (7.25)$$

Por esta razão, a definição de um sistema efetivamente aterrado pode ser, alternativamente, dada ao se considerar as relações (7.23) e (7.25), isto é:

“Um sistema efetivamente aterrado apresenta a corrente de curto fase-terra de, no mínimo, 60% da corrente de curto trifásica. Neste caso, o sistema efetivamente aterrado é definido para $(X_0/X_1) \leq 3,0$ e $(R_0/X_1) \leq 1,0$, e a sobretensão permanente fica limitada a $V \leq 1,38 \approx 1,4\text{PU}$. Isto é, no caso de um curto fase-terra num sistema efetivamente aterrado, a sobretensão máxima nas fases sãs estão limitadas a $1,4\text{PU}$ ”.

A tabela 7.3 apresenta os valores de sobretensões (permanentes) considerando-se K complexo, ou seja, $K = X_0/X_1 - jR_0/X_1$, e foi determinada para os seguintes valores de: $(X_0/X_1) = 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 10$ e ∞ (infinito), e de $(R_0/X_1) = 0; 0,2; 0,5; 1,0$ e $2,0$. A primeira linha da tabela 7.3 com as sobretensões calculadas para os casos particulares onde $R_0/X_1=0$, corresponde aos valores de K real considerados pela tabela 7.2.

Tabela 7.3 – Investigação de sobretensões permanentes nas fases sãs devido a um curto fase-terra sólido considerando-se $K = Z_0/Z_1$ complexo.

$K = Z_0/Z_1$ $= X_0/X_1 - jR_0/X_1$	$X_0/X_1 = 1,0$	$X_0/X_1 = 2,0$	$X_0/X_1 = 3,0$	$X_0/X_1 = 4,0$	$X_0/X_1 = 10$	$X_0/X_1 \rightarrow \infty$
	$R_0/X_1 = 0$	1,0	1,15	1,25	1,32	1,52
$R_0/X_1 = 0,2$	1,02	1,12	1,27	1,33	1,50	1,73
$R_0/X_1 = 0,5$	0,85	1,22	1,29	1,41	1,53	1,73
$R_0/X_1 = 1,0$	1,31	1,35	1,38	1,82	1,53	1,73
$R_0/X_1 = 2,0$	1,36	1,47	1,45	1,46	1,55	1,73
	1,03	1,06	1,18	1,27	1,50	1,73

Sistemas efetivamente aterrado, definidos por $X_0/X_1 \leq 3,0$ e $R_0/X_1 \leq 1,0$, apresentam a maior sobretensão de 1,38pu numa das fases sãs

Maior sobretensão de 1,82pu encontrada numa das fases sãs, enquanto que a outra fase sã apresenta uma menor sobretensão (1,66pu) na área entre os sistemas efetivamente aterrados e os de alta resistência de neutro

Verifica-se que, dentro da precisão escolhida para as variações e valores escolhidos de X_0/X_1 e de R_0/X_1 , entre $1,0 \leq X_0/X_1 \leq 3,0$ e entre $0 \leq R_0/X_1 \leq 1,0$, e pela simplificação de cálculo onde se adotou $R_1 \ll X_1$, ou seja, $R_1/X_1 \rightarrow 0$, não há sobretensões maiores do que 1,38PU para os sistemas definidos como efetivamente aterrados. Fora desta área, os fatores de sobretensão podem chegar a 1,82PU conforme assinalado na tabela 7.3, porém, somente para os sistemas que não são efetivamente aterrados, e até 1,73PU para sistemas isolados ou aterrados por alta resistência. Observa-se que os valores de sobretensões das duas últimas colunas estão mais estabilizados e constantes em relação às duas tensões das fases sãs. É importante notar que a sobretensão, devido ao curto fase-terra sólido, de até 1,82PU, não ocorre para sistemas isolados ou aterrados por alta resistência e, sim, para os sistemas com baixa resistência.

Se $X_0/X_1 \leq 3$ e $R_0/X_1 \leq 1$, deverá ser considerado o maior fator de sobretensão que, conforme a tabela 7.3, é de 1,4 e, portanto, a sobretensão máxima durante uma falta à terra será:

$V_{\max F-T} = 1,4 \cdot V_{FN}$ e em relação à tensão nominal fase-fase tem-se que:

$$V_{\max F-T} \% = \frac{V_{\max F-T}}{V_{FF}} \cdot 100 = \frac{1,4 \cdot V_{FN}}{V_{FF}} \cdot 100 = \frac{1,4 V_{FF}}{V_{FF} \sqrt{3}} = 80\%$$

Portanto,

$$V_{\max F-T} \% = 80\% \cdot V_{FF} \quad (7.26)$$

Esta constatação definida pela relação (7.26) dá origem a mais um conceito alternativo de “sistema efetivamente aterrado”, definido através da sobretensão nas fases sãs:

“Sistema efetivamente aterrado é aquele no qual, na ocorrência de uma falta à terra sólida em uma fase, a tensão das outras duas fases sãs para a terra não ultrapassa 80% do valor fase-fase”.

Os únicos sistemas com possibilidade de serem classificados como efetivamente aterrados são aqueles com o neutro solidamente aterrado ou aterrado com baixa reatância ou baixíssima resistência. No entanto, a recíproca não é verdadeira, isto é, sistemas solidamente aterrados, dependendo dos seus parâmetros, podem não ser efetivamente aterrados.

Nota-se pela tabela 7.3, como era esperado, que as primeiras duas linhas referentes a $R_0/X_1 = 0$ apresentam $V_b = V_c$, pois K é real. Para todas as outras linhas ($R_0/X_1 > 0$), onde K é complexo, tem-se que $V_b \neq V_c$ e deve ser considerado o pior caso de sobretensão, ou seja, o maior valor entre V_b e V_c .

Outro ponto a ser lembrado é que estas sobretensões persistem enquanto persistir o curto fase-terra. Isto significa que, quanto maior a resistência de neutro, ou mesmo para o caso de um sistema isolado, as sobretensões podem ter caráter permanente, se for definido o convívio permanente com a primeira falta fase-terra, e as sobretensões

fase-terra nestes casos, para $X_0/X_1 \geq 10$ (sistema isolado), estão limitadas a 1,73 ou $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase.

Para os sistemas aterrados por baixa resistência, onde $3 \leq (X_0/X_1) \leq 10$ e $0 \leq (R_0/R_1) \leq 2,0$, as sobretensões fase-neutro até chegam a 1,82PU, isto é, a valores pouco maiores do que 1,73PU mas, supondo que as proteções devam atuar instantaneamente para correntes de falta à terra limitadas, mas ainda relativamente altas (de 400 A a 1.000 A, por exemplo), o caráter destas sobretensões pode também ser considerado transitório e poderia não provocar dano aos equipamentos, caso estes fossem especificados mesmo para a tensão nominal de fase-fase. Por segurança, em sistemas industriais aterrados por baixa resistência, costuma-se especificar a isolação do sistema de cabos para 1,73PU ou $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase-neutro (que está um pouco abaixo do valor máximo de 1,82PU que se encontrou na tabela 7.3), e esta mesma especificação poderia ser também aplicável para um sistema quase isolado ou de alta resistência, e com melhor folga pois, neste caso, as sobretensões estão limitadas a 1,73. Ressalta-se ainda que muitos equipamentos de MT têm a capacidade de suportar, por exemplo, duas vezes a tensão de fase-neutro, durante 1 minuto, devido às exigências de testes de tensão aplicada. Estes testes são somente para verificação da isolação do dielétrico, e se aplicam a motores, contadores, disjuntores, conjuntos de manobra, transformadores, capacitores, etc.

Para o caso de suportabilidade contra sobretensões para os cabos de potência, há a classificação de nível de sobretensão versus tempo: nível de isolação 100% para um tempo de eliminação de falta de terra que não exceda 1 minuto (equivalente à classificação de Categoria A para cabos de potência de MT, pela NBR-6251); nível de isolação 133% para um tempo de eliminação de falta de terra que exceder 1 minuto, mas não exceder 1 hora (equivalente à classificação de Categoria B para cabos de potência de MT, pela NBR-6251); e nível de isolação 173% quando o tempo de eliminação de falta fase-terra exceder 1 hora (equivalente à classificação de Categoria C, para cabos de potência de MT, pela NBR-6251). O nível 100% pode ser usado em qualquer sistema, seja ele solidamente aterrado ou aterrado por resistência, contanto que as faltas fase-terra sejam eliminadas no tempo especificado. Os níveis de 133% e de 173% se aplicam principalmente aos sistemas isolados ou aterrados por alta resistência. A escolha entre os níveis de isolação de 133% e 173% são determinados

em função do tempo de identificação do ramal sob falta para ser efetuado o desligamento programado.

Não há na literatura menção de quanto de vida útil poderia ser perdida devido a estas sobretensões, especialmente para os motores. Ao longo da vida útil destes equipamentos, as exposições às sobretensões, originadas pelos curtos fase-terra sólidos, são extremamente rápidas (da ordem de ciclos) nos sistemas aterrados por baixa resistência, e de um tempo limitado (da ordem de horas ou dias) nos sistemas aterrados por alta resistência.

Porém, o efeito do esquema de aterramento e, conseqüentemente, as sobretensões, devidas aos curtos fase-terra sólidos, nos para-raios, são de uma natureza diferente. Os para-raios são especificados para a tensão máxima a 60Hz na qual eles devem ser capazes de interromper o centelhamento. Em sistemas aterrados por resistência, esta tensão é a tensão plena fase-fase. Portanto, o para-raio apropriado é aquele no seu valor de tensão nominal mais baixo que estiver acima da tensão fase-fase do sistema e é denominado por para-raio 100%. Sistemas solidamente aterrados impedem o deslocamento de neutro associado com as faltas fase-terra de forma que os para-raios 80% podem ser usados. Os sistemas de aterramento de alta resistência (RAV) e de baixa resistência (RBV) são afetados igualmente pelas sobretensões de regime permanente e, na proteção contra surtos, utilizam para-raios tipo 100% nos sistemas RBV e RAV, enquanto que os sistemas solidamente aterrados são melhor protegidos contra surtos através de para-raios tipo 80%. Ressalta-se, porém, que foi encontrada uma sobretensão de 182% (e, não, 173%) para certos sistemas aterrados por baixa resistência (RBV), e este fato poderia afetar o desempenho de para-raios do tipo 100% que são normalmente especificados nestes sistemas. Por esta razão, uma pesquisa mais detalhada poderia ser feita para determinar quais seriam as características de sobretensões num sistema aterrado por baixa resistência (RBV) que necessitaria de para-raios de 100%, ou um pouco mais alto ainda, de 105%, devido às sobretensões de regime permanente calculadas neste trabalho, e se isto vem a ser uma diferença significativa para o desempenho de para-raios.

Para os sistemas aterrados por alta resistência, nota-se que as sobretensões se aproximam muito mais do caso de sistema isolado para qualquer valor de R_0/X_1 , onde todas as sobretensões estão bem mais comportadas e limitadas a 1,73. Porém, aqui, o

sistema pode necessitar de conviver com esta sobretensão de forma permanente, por horas ou dias.

Em resumo, as sobretensões permanentes máximas devidas aos curtos fase-terra sólidos são apresentadas na tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Resumo das Sobretensões Permanentes Máximas Devido aos Curtos Fase-Terra Sólidos

Tipo de Aterramento de Neutro do Sistema	Resumo das Sobretensões Permanentes Máximas Devido aos Curtos Fase-Terra Sólidos
Isolado	173%.V _{LN} ou 1,0.V _{LL} Caráter de regime permanente, se a causa persistir, até ser eliminada em horas ou dias
Aterrado por Alta Resistência	173%.V _{LN} ou 1,0.V _{LL} Caráter de regime permanente, se a causa persistir, até ser eliminada em horas ou dias
Aterrado por Baixa Resistência	173%.V _{LN} (ou 1,0.V _{LL}), e até 182%.V _{LN} (ou 1,05.V _{LL}) sob determinadas circunstâncias de X ₀ /X ₁ Caráter de regime permanente, enquanto a causa persistir, até ser eliminada pela proteção em ciclos
Efetivamente Aterrado	138%.V _{LN} ou 0,80.V _{LL} Caráter de regime permanente, enquanto a causa persistir, até ser eliminada pela proteção em ciclos

O grau de aterramento pode ser, em resumo, definido da seguinte maneira para todos os pontos do sistema conforme as relações (7.27):

- Para $0 < (Z_0/Z_1) \leq 3$, e para $R_0/X_1 \leq 1 \Rightarrow$ sistema solidamente aterrado (efetivamente aterrado)
- Para $3 < (Z_0/Z_1) \leq 10 \Rightarrow$ sistema aterrado por resistência (baixa e alta resistência)
- Para $(Z_0/Z_1) > 10 \Rightarrow$ sistema isolado (7.27)

O American AIEE Standard no. 32, May, 1947, também define de forma similar um sistema efetivamente aterrado como aquele no qual as relações X_0/X_1 e R_0/X_1 valem conforme apresentadas em (7.28):

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \text{e} \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad (7.28)$$

onde:

- X₀ = reatância de sequência zero vista do ponto de defeito;
- X₁ = reatância de sequência positiva vista do ponto de defeito;
- R₀ = resistência de sequência zero vista do ponto de defeito.

Como se constatou anteriormente, as condições mínimas para eliminar de sobretensões de natureza permanente, desprezando-se as resistências de sequência positiva e negativa, são representadas pela adoção do sistema solidamente aterrado, ou do sistema aterrado por resistor RBV ou RAV de forma que, segundo a tabela 7.3, tem-se as condições conforme as relações (7.29):

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 10 ; \frac{R_0}{X_1} = \text{qualquer} \quad (7.29)$$

Para a limitação da sobretensão permanente em sistemas solidamente aterrados (R_0 desprezível), segue, pela relação (7.29) ou pela tabela 7.3 que $\frac{X_0}{X_1} \leq 10$. E, considerando a equação (7.12) para o curto I_{F-T} , assumindo-se o valor limite $\frac{X_0}{X_1} = 10$, tem-se que I_{F-T} em função de I_{3F} vale conforme (7.30):

$$I_{F-T} = \frac{3}{1+1+10} \cdot I_{3F} \Rightarrow I_{F-T} = \frac{I_{3F}}{4}$$

$$I_{F-T} \geq 25\% \cdot I_{3F} \quad (7.30)$$

Isto é, a equação (7.30) significa que,

“Para que seja eliminada a sobretensão permanente em um sistema solidamente aterrado, a corrente de curto fase-terra sólida deve ser maior ou igual a 25% da corrente de curto trifásica”.

Este resultado também é encontrado na pg. 15 do Green Book - *IEEE-142* (IEEE, 2007).

Todas estas características e definições de níveis de aterramento em função de X_0/X_1 , R_0/X_1 e R_0/X_0 podem também ser encontradas, de forma um pouco mais completa, no resumo dado pela tabela 7.5 retirada da referência *IEEE Std C62.92.2* (IEEE, 2005).

Tabela 7.5 – Características de Aterramento (IEEE, 2005)

Tipos de aterramento de neutro	Razões de parâmetros de componente simétrica			Corrente percentual de falta	Tensão transiente F-T em PU
	X_0/X_1	R_0/X_1	R_0/X_0		
A. Efetivamente aterrado					
1. Efetivamente	0 - 3	0 - 1	---	> 60	≤ 2
2. Muito efetivamente	0 - 1	0 - 0,1	---	> 95	< 1,5
B. Não efetivamente aterrado					
1. Indutância					
Baixa indutância	3 - 10	0 - 1	--	> 25	< 2,3
Alta indutância	> 10		< 2	< 25	≤ 2,73
2. Resistência					
Baixa resistência	0 - 10		≥ 2	< 25	< 2,5
Alta resistência		> 100	≤ (-1)	< 1	≤ 2,73
3. Indutância e resistência	>10	--	> 2	< 10	≤ 2,73
4. Ressonante		--	--	< 1	≤ 2,73
5. Capacitância não aterrada					
Faixa A	-∞ até -40	--	--	< 8	≤ 3
Faixa B	-40 até 0	--	--	> 8	> 3

Pela tabela 7.5, o sistema efetivamente aterrado é definido por $\frac{X_0}{X_1} \leq 3$ e $\frac{R_0}{X_1} \leq 1$, e apresenta $\frac{I_{FT}}{I_{3F}} > 60\%$, conforme foi anteriormente analisado. Os sistemas “muito efetivos” (“*very effective*”) representam uma definição “nova” e são definidos para as condições mais restritas do sistema: $\frac{X_0}{X_1} \leq 1$ e $\frac{R_0}{X_1} \leq 0,1$, e apresentam $\frac{I_{FT}}{I_{3F}} > 95\%$. Os sistemas aterrados por baixa resistência têm uma definição um pouco modificada: $\frac{X_0}{X_1} \leq 10$ e $\frac{R_0}{X_1} \geq 2$, e apresentam $\frac{I_{FT}}{I_{3F}} < 25\%$. E, os sistemas aterrados por alta resistência apresentam $\frac{I_{FT}}{I_{3F}} < 1\%$.

7.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando o neutro de um sistema trifásico não for solidamente aterrado, a ocorrência de qualquer caminho condutivo à terra, de uma ou mais fases, como aquele produzido por uma falta à terra ou por algum contato acidental devido ao teste ou procedimento de manutenção, forçará o deslocamento de neutro em relação ao potencial de terra. Este fenômeno é também denominado por instabilidade de neutro e pode resultar em sobretensões à terra de natureza transiente. A instabilidade de neutro pode causar estresse na isolação fase-terra em enrolamentos de máquinas elétricas, cabos, etc. Porém, se o fenômeno de deslocamento de neutro não resultar em rompimento da

isolação fase-terra, ele não afetará as tensões normais entre as fases do sistema, somente modificará as tensões fase-terra.

Os resultados das sobretensões máximas devido às faltas à terra sólidas, intermitentes e por ressonância, sob os diversos métodos de aterramento de neutro, estão apresentados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Resumo das Sobretensões Máximas Devidas às Faltas à Terra Sólidas, Intermitentes e por Ressonância, sob os diversos Métodos de Aterramento de Neutro

Tipo de Aterramento de Neutro do Sistema	Resumo das Sobretensões Máximas		
	Curto Fase-Terra Sólido	Curto Intermitente	Ressonância
Isolado	173%.V _{LN} ou 1,0.V _{LL} Caráter de regime permanente, se a causa persistir, até ser eliminada em horas ou dias	550%.V _{LN} ou 3,18.V _{LL} (*) Caráter transitório até evoluir para o curto fase-terra sólido, quando fica em 173%.V _{LN} ou 1,0*.V _{LL}	10 a 20V _{LN} ou 5 a 10V _{LL} (*) Caráter transitório, se a causa persistir, até evoluir para o curto fase-terra sólido, quando fica em 173%.V _{LN} ou 1,0*.V _{LL}
Aterrado por Alta Resistência	173%.V _{LN} ou 1,0.V _{LL} Caráter de regime permanente, se a causa persistir, até ser eliminada em horas ou dias	250%.V _{LN} ou 1,44.V _{LL} para R _N = X _{CO} /3 (***) Caráter transitório, até ser eliminada em horas ou dias	250%.V _{LN} ou 1,44.V _{LL} para R _N = X _{CO} /3 (***) Caráter transitório, até ser eliminada em horas ou dias
Aterrado por Baixa Resistência	(**) 173%.V _{LN} ou 1,0.V _{LL} , e 182%.V _{LN} ou 1,05.V _{LL} , sob determinadas valores de X ₀ /X ₁ Caráter de regime permanente, enquanto a causa persistir, até ser eliminada pela proteção em ciclos	Não há	Não há
Efetivamente Aterrado	(**) 138%.V _{LN} ou 0,80.V _{LL} Caráter de regime permanente, enquanto a causa persistir, até ser eliminada pela proteção em ciclos	Não há	Não há

(*) Valores práticos encontrados, pois na teoria, são infinitos ou indefinidamente altos.

(**) Vide desenvolvimento no item 7.5.3.

(***) A sobretensão máxima é de 250%, devido aos curtos intermitentes e ao efeito de ressonância, se R_N = X_{CO}/3, ou menos, se R_N > X_{CO}/3 (a figura 7.12 apresenta o gráfico de variação de (X_{CO}/3)/R_N onde, fazendo-se $\left(\frac{X_{CO}}{3}\right) / R_N = 1,0$, nota-se que as sobretensões ainda ficam muito próximas a 2,5PU ou 250% independentemente de R_N ser R_N = X_{CO}/3, ou se R_N for pouco maior, isto é, R_N ≥ X_{CO}/3). Escolhido, portanto, a isolação em 250%, o sistema de alta resistência pode também suportar facilmente as sobretensões originadas durante os curto-circuitos fase-terra sólidos de 173%.

Observa-se que em sistemas aterrados por baixa resistência as sobretensões de regime permanente causadas nas fase sãs, pelas faltas sólidas à terra, podem chegar até 1,82PU (pouco acima de 1,73PU). Observa-se também que este nível de

sobretensão não ocorre para os sistemas aterrados por alta resistência, onde as sobretensões de regime permanente se estabilizam mais próximas, e mesmo um pouco menores do que 1,73PU. Assim, o fator de sobretensão de 1,73PU, devido aos curtos fase-terra sólidos para os sistemas aterrados por alta resistência, está bem selecionado (exceto para as sobretensões transitórias causadas pelos curtos intermitentes e por ressonância).

As sobretensões transitórias devidas aos curtos intermitentes e à ressonância, em sistemas de alta resistência, chegam a atingir $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, que é o pior caso. Portanto, os sistemas de alta resistência devem ter os equipamentos especificados para $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, lembrando que esta constatação implica em $2,5 \times 480V = 1.200V$ para a isolação dos cabos e equipamento em sistemas de BT de 480V. Os curtos intermitentes, por exemplo, provocam as sobretensões de 250% numa fração de semi-ciclo nos sistemas RAV, porém, não há até o momento nenhuma fonte na literatura que indique o efetivo estresse desta sobretensão sobre os equipamentos.

Sistemas de baixa resistência costumam ter a mesma especificação dos equipamentos, quanto às sobretensões, em relação aos dos sistemas de alta resistência, mesmo que a proteção elimine a falta rapidamente. Porém, observa-se que as sobretensões nos sistemas aterrados por baixa resistência podem ser até 5% maiores do que o considerado. O correto seria considerar $182\% \cdot V_{LN}$ ou $1,05 \cdot V_{LL}$ de sobretensão nos sistemas de baixa resistência, ao invés de $173\% \cdot V_{LN}$ ou $1,0 \cdot V_{LL}$.

Finalmente, os equipamentos dos sistemas solidamente (efetivamente) aterrados devem suportar sobretensões de $138\% \cdot V_{LN}$ ou $0,80 \cdot V_{LL}$.

Os sistemas isolados são, portanto, desaconselhados na indústria porque, no caso de curtos intermitentes, as sobretensões transitórias podem chegar a $550\% \cdot V_{LN}$ (Beeman, 1955), ou $3,18 \cdot V_{LL}$, ou até romper a isolação antes disso, principalmente nos pontos mais fracos, que são os enrolamentos dos motores elétricos, podendo ocasionar múltiplas falhas nas isolações. As sobretensões transitórias causadas por ressonância chegam de 10 a $20V_{LN}$ (Dunki-Jacobs, et al., 2007), ou seja, mais de $5V_{LL}$ a $10V_{LL}$, podendo também ocasionar múltiplas falhas nas isolações de todo o sistema. As sobretensões permanentes de $173\% \cdot V_{LN}$ ou $1,0 \cdot V_{LL}$ nas fases sãs, devido aos curtos fase-terra sólidos, acabam sendo um evento de menor importância diante da

possibilidade de sobretensões transitórias que são muito maiores. Esta recomendação de não se utilizar o sistema de neutro isolado, no entanto, não se aplica para o caso de instalações não industriais ou que têm características e requisitos especiais, tais como aquelas de centros cirúrgicos em hospitais, minas, etc, e que estão fora do escopo deste trabalho.

O grau de aterramento pode, então, ser definido da seguinte maneira para todos os pontos Z_0/Z_1 do sistema, com as respectivas características de sobretensões e níveis de correntes de curto fase-terra:

- Para $0 < (Z_0/Z_1) \leq 3$, e para $R_0/X_1 \leq 1 \Rightarrow$ sistema solidamente aterrado (efetivamente aterrado); sobretensões (permanentes) devidas aos curtos sólidos $\leq 80\% \cdot V_{FF}$ (ou $1,40 \cdot V_{FN}$); $I_{F-T} \geq 60\% \cdot I_{3F}$ para ser um sistema efetivamente aterrado; $I_{F-T} \geq 95\% \cdot I_{3F}$ para ser um sistema muito efetivamente aterrado;
- Para $3 < (Z_0/Z_1) \leq 10 \Rightarrow$ sistema aterrado por resistência (baixa e alta resistência); sobretensões (permanentes) devidas aos curto sólidos $\leq 105\% \cdot V_{FF}$ (ou $\leq 182\% \cdot V_{FN}$) para determinados valores de X_0/X_1 , no ponto de falta, para sistemas RBV; e sobretensões devidas aos curtos sólidos $\leq 100\% \cdot V_{FF}$ (ou $\leq 173\% \cdot V_{FN}$) para sistemas RAV, e para RBV para determinados valores de X_0/X_1 , no ponto de falta; sobretensões devidas aos curtos intermitentes e por ressonância $\leq 250\% \cdot V_{FF}$ (ou $\leq 1,44 \cdot V_{FF}$) exclusivamente para os sistemas RAV; $I_{F-T} \leq 25\% \cdot I_{3F}$ nos sistemas RBV em função da resistência de neutro escolhida entre 200 e 400 A (depende da resistência de neutro do sistema RBV); $I_{F-T} \leq 1\% \cdot I_{3F}$ nos sistemas RAV (aproximadamente $I_{F-T} = 5$ A que depende da resistência de neutro escolhida do sistema RAV);
- Para $(Z_0/Z_1) > 10 \Rightarrow$ sistema isolado; sobretensões (transitórias) devidas aos curtos intermitentes e por ressonância fora de controle;

8 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo compara os sistemas de aterramento de neutro, utilizando os resultados e desenvolvimentos dos capítulos precedentes, e ainda sob os aspectos (adaptado e baseado em (Dunki-Jacobs, et al., 2007) de:

- controle de sobretensões transitórias e permanentes;
- continuidade de serviço;
- probabilidade de uma falta com arco F-T sustentado;
- evolução de falta com arco F-T em painéis;
- risco de arco elétrico F-T;
- risco de correntes de falta F-T dispersas e de arcos ao longo do caminho de retorno;
- limitação de danos devido às correntes de falta F-T;
- facilidade de localização de falta F-T; e
- atendimento às cargas monofásicas.

8.2 CONTROLE DE SOBRETENSÕES F-T TRANSITÓRIAS E PERMANENTES

Exceto para os sistemas de neutro isolado, todos os métodos de aterramento de neutro resolvem o problema de sobretensões transitórias. As sobretensões transitórias devidas aos curtos intermitentes e ao fenômeno ressonância, em sistemas RAV, apresentam as maiores sobretensões, de $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, que são os piores casos entre todos os métodos de aterramento de neutro. Portanto, os sistemas RAV devem ter os equipamentos especificados para uma isolação de $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, se o resistor de neutro for projetado para $I_R = 3I_{C0}$.

As sobretensões permanentes devidas aos curtos F-T sólidos apresentam níveis da ordem de 173% para os sistemas RBV e RAV. Como uma falta fase-terra deve ser interrompida instantaneamente em sistemas RBV, a isolação dos equipamentos pode ser igual ao nível de isolação dos sistemas efetivamente aterrados exceto, porém, para os para-raios, que devem ser especificados para 173%, ou mesmo um pouco maiores pelas razões já descritas anteriormente. Muitas vezes, a isolação dos

equipamentos e dos circuitos é comumente adotada, em geral, em 173% mesmo que a proteção elimine a falta em questão de ciclos. Por outro lado, constatam-se, através de cálculos, que as sobretensões nos sistemas RBV podem ser, dentro de determinadas relações de $K=Z_0/Z_1$ complexo, até 5% maiores do que o normalmente considerado na literatura. Consta-se que o correto seria considerar 182% de V_{LN} ou $1,05 \cdot V_{LL}$ de sobretensão (permanente) nos sistemas RBV, isto é, pouco acima do valor usualmente considerado de 1,73PU de V_{LN} ou $1,0 \cdot V_{LL}$. Esta sobretensão de 182% também não resulta em maiores consequências, pois as faltas à terra são eliminadas rapidamente pela proteção de sobrecorrente. Porém, esta sobretensão de 182% deve ser analisada quanto ao desempenho e a especificação de certos equipamentos, tais como, os para-raios. Para os sistemas RAV as sobretensões se estabilizam mais próximas e para ambas fases são, de forma igual, e mesmo um pouco menores do que 173%. Por outro lado, os sistemas elétricos concebidos com o sistema RAV podem ter que conviver por um longo período de tempo sob estas sobretensões, diferentemente dos sistemas RBV que devem atuar imediatamente após a ocorrência da primeira falta F-T.

Portanto, cada tipo de aterramento de neutro define um certo nível de sobretensão (controlada) que recai sobre o sistema elétrico, seja de origem transitória, ou permanente. Como consequência, cada tipo de aterramento de neutro tem sua influência na especificação de isolamento de cabos, motores, transformadores, supressores de surtos, etc.

8.3 CONTINUIDADE DE SERVIÇO

Em todos os métodos de aterramento de neutro as faltas são eliminadas o mais rapidamente possível, exceto nos sistemas isolados ou de alta resistência que podem conviver com uma primeira falta fase-terra. Em plantas de processos contínuos a garantia de continuidade é importante. Desta forma, se o sistema de aterramento de neutro escolhido é o de alta resistência (RAV), o limite das correntes de neutro fica da ordem de 2 A em sistemas de 480V ($3I_{C0} < 1$ A), e em 8 A para sistemas de 2,4 e 4,16kV ($3I_{C0} < 5$ A). Em 13,8kV o método de alta resistência de neutro não deve ser utilizado, pois $3I_{C0} > 20$ A (usualmente, de 20 A a 50 A), e estes valores estão acima de 8 a 10 A tomados como o limite para o desenvolvimento do arco carbono em enrolamentos de máquinas elétricas girantes. Para reduzir a

probabilidade de ocorrência de uma segunda falta F-T, é necessário haver um esforço para se localizar e isolar o local da primeira falta à terra o mais rapidamente possível.

8.4 PROBABILIDADE DE UMA FALTA COM ARCO F-T SUSTENTADO

Os sistemas solidamente aterrados e os aterrados por reatância (em geradores) podem produzir correntes de falta à terra muito altas, da mesma ordem de grandeza do curto trifásico. Uma falta à terra com arco elétrico num equipamento causa consideráveis pressões e gases que, se mantidos, podem ocasionar queimas devastadoras por arco. Além disso, os dispositivos de proteção podem não estar ajustados para responder às correntes normalmente baixas e não senoidais do arco elétrico. A utilização de isolamento de barramentos em painéis (para atrasar a evolução do arco), a proteção de terra instantânea, e a utilização do sistema RAV (e, em menor grau, o sistema RBV) podem tornar a queima ou o dano causado pelo arco F-T uma ocorrência improvável.

8.5 EVOLUÇÃO DE FALTA COM ARCO F-T EM PAINÉIS

A probabilidade de escalada de uma falta com arco elétrico F-T para uma falta com arco F-F-T ou F-F-F-T num barramento é aumentada quando a falta inicial com arco F-T produzir um arco considerável que ioniza as adjacências dos barramentos. Barramentos nus são mais vulneráveis, pois o arco pode se movimentar mais rapidamente e encontrar uma barreira ou obstáculo, onde permanece parado, ionizando o ar nas suas adjacências e, conseqüentemente, aumentando a possibilidade de sua evolução devido ao plasma. Isto leva ao rompimento da isolamento de ar e à escalada da falta com arco F-T num tempo de 1 a 2 ciclos tornando as proteções de terra ineficazes, e causando grande dissipação de calor e destruição nos equipamentos. Portanto, a rápida eliminação da falta com arco F-T é importante para impedir a escalada do arco elétrico nos sistemas solidamente aterrados e por reatância (em geradores).

8.6 RISCO DE ARCO ELÉTRICO F-T

O fenômeno de falta com arco coloca riscos reais às pessoas pelo seu caráter explosivo, a menos que seja devidamente controlado através de um aterramento de neutro com resistência adequada, com a construção de painéis dotados de

barramentos isolados, dutos exaustores de gases e projeto de painel resistente ao arco elétrico, e ainda com uma proteção efetiva de terra como medida coadjuvante, isto é, sem prescindir de proteções específicas contra o arco elétrico. A escolha do sistema RBV torna baixa a probabilidade de formação e de auto-sustentabilidade do arco F-T, e ainda muito mais baixa é esta probabilidade para o risco de formação e auto-sustentabilidade do arco F-T em sistemas RAV.

8.7 RISCOS DE CORRENTES DE FALTA À TERRA DISPERSAS E ARCOS AO LONGO DO CAMINHO DE RETORNO

O caminho de volta (ou circuito de retorno) deve estar em proximidade ao circuito de alimentação de potência (ou circuito de ida), pois é importante para garantir a sua baixa impedância, especialmente para os sistemas de neutro solidamente aterrado. Esta é uma das formas de se minimizar a impedância de retorno Z_0/Z_1 e, assim, maximizar a corrente de falta F-T garantindo a sensibilização da proteção de terra. Além disso, com um projeto de instalação adequado, com interligação entre as malhas de aterramento, e com circuitos de retorno em proximidade aos circuitos de fase, os choques devidos aos potenciais de passo e de toque são também minimizados. As práticas de construção e instalação inadequadas podem provocar ainda a descontinuidade deste caminho de retorno das altas correntes de curto fase-terra, causando faíscas durante as faltas F-T nas junções resistivas e, eventualmente, incêndios e explosões em atmosferas de risco. A detecção rápida e a remoção destas faltas à terra também reduzem o risco das correntes dispersas. Como os sistemas RBV têm uma corrente de falta F-T menor, este risco de correntes dispersas e suas consequências é diminuído e, ainda mais, para os sistemas RAV, que praticamente suprimem as consequências destas correntes dispersas de falta F-T.

8.8 SEGURANÇA CONTRA CHOQUES DEVIDO ÀS CORRENTES DE FALTA À TERRA DISPERSAS

A eventual falta F-T através de um caminho de retorno contínuo em sistemas solidamente aterrados resulta num fluxo de correntes de dispersão através de estruturas metálicas de prédios, tubulações, etc. Nestes pontos, onde a corrente atravessar, as quedas de tensão através de contatos resistivos podem aumentar a centenas de volts. Pessoas andando ao longo destes contatos resistivos podem

sofrer choques perigosos. O neutro aterrado por alta resistência (RAV) suprime estas correntes de terra e, portanto, diminui o risco de choque durante uma falta F-T. Além disso, pode-se dotar o sistema elétrico de proteções mais sensíveis (50GS) com ajustes adequados para a proteção contra choque e contra incêndio.

8.9 LIMITAÇÃO DE DANOS DEVIDO ÀS CORRENTES DE FALTA À TERRA

Os danos de faltas à terra aos equipamentos são geralmente causados pelo aquecimento ($R.i^2$) gerado no ponto da falta e que é limitado em razão direta do valor da impedância de aterramento de neutro. O tempo de eliminação da falta é também um fator decisivo e depende também do sistema de proteção. Para um mesmo tempo de seccionamento de circuito pela proteção, a energia dissipada durante a falta F-T e o dano causado são maiores nos sistemas solidamente aterrados do que nos sistemas RBV. Far-se-á, a seguir, uma comparação da energia ($I^2.t$) dissipada durante uma falta à terra sólida para vários tipos de aterramento do neutro. Considera-se um sistema de 480V, alimentado por um transformador de 1.000kVA, $Z= 6\%$, supondo barra infinita à montante do transformador, a corrente de curto-circuito trifásica nos terminais do secundário (480V) será conforme a relação (8.1).

$$I_{cc\ 3F} = \frac{1.000\ kVA}{\sqrt{3} * 0,48\ kV * 0,06} \approx 20.000\ A \quad (8.1)$$

Supondo-se que, para todos os casos, o disjuntor abra em $t = 1$ segundo, calcula-se a energia dissipada na falta sólida F-T durante um segundo para cada um dos três tipos de sistemas de aterramento de neutro. A ordem de grandeza da corrente de curto-circuito F-T é da mesma ordem de grandeza do curto trifásico para o caso de uma falta F-T próxima ao transformador num sistema solidamente aterrado, ou seja, $I_{F-T\ máx} \approx I_{cc\ 3F}$.

Para $t = 1$ seg, o valor da energia dissipada em calor $I^2.t$ vale conforme (8.2).

$$I^2.t = (20.000)^2.(1) = 400.000.000\ A^2.s \quad (8.2)$$

Para o caso de sistemas de neutro aterrado por baixa resistência (RBV) através de um resistor de 400 A, tem-se que $I_{F-T\ máx} = 400\ A$, e a energia dissipada pela corrente

de falta à terra para o tempo $t = 1$ seg, apresenta o valor de $I^2.t$ conforme mostrado em (8.3).

$$I^2.t = (400)^2.(1) = 160.000 \text{ A}^2.s \quad (8.3)$$

Para um sistema aterrado por resistor de alto valor, tipicamente de 5 A, a corrente de falta à terra máxima é $I_{F-T \text{ máx}} = 5$ A. Para $t = 1$ seg, o valor da energia dissipada $I^2.t$ vale conforme (8.4).

$$I^2.t = (5)^2.(1) = 25 \text{ A}^2.s \quad (8.4)$$

Comparando-se as energias dissipadas na falta sólida fase-terra durante um segundo em função do tipo de aterramento de neutro, dadas pelos valores calculados em (8.2), (8.3) e (8.4), tem-se os valores de energia dissipada apresentados na tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Energia dissipada em função do tipo de aterramento de neutro

Tipo de sistema de aterramento de neutro	energia dissipada $I^2.t$
Solidamente aterrado	400.000.000 $\text{A}^2.s$
RBV	160.000 $\text{A}^2.s$
RAV	25 $\text{A}^2.s$

Conclui-se:

- O sistema solidamente aterrado libera 2.500 vezes mais energia que o sistema aterrado por resistência de baixo valor (400 A);
- O sistema solidamente aterrado libera 16.000.000 vezes mais energia que um sistema aterrado por resistência de baixo valor (5 A).

No caso do arco elétrico F-T, toda a energia dissipada fica mais concentrada no ponto do arco, em geral, dentro dos painéis de BT e MT. A escolha de um sistema de neutro aterrado por resistência (RBV e RAV) mostra, portanto, as vantagens de uma menor energia dissipada no caso de um arco fase-terra sustentado. A escolha deste tipo de aterramento de neutro (RBV e RAV) também pode diminuir muito o risco de ocorrência de uma falta a arco fase-terra, pois o arco F-T pode nem ter a energia necessária para se auto-sustentar e, inclusive, impede-se a sua rápida

evolução para faltas com arco F-F-T ou F-F-F-T. Porém, como existe uma possibilidade de que o arco já se inicie como trifásico, ou fase-fase, sempre existe o risco de ocorrer um arco elétrico com dissipação de altas energias, mesmo nos sistemas de neutro de alta resistência.

8.10 FACILIDADE DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA À TERRA

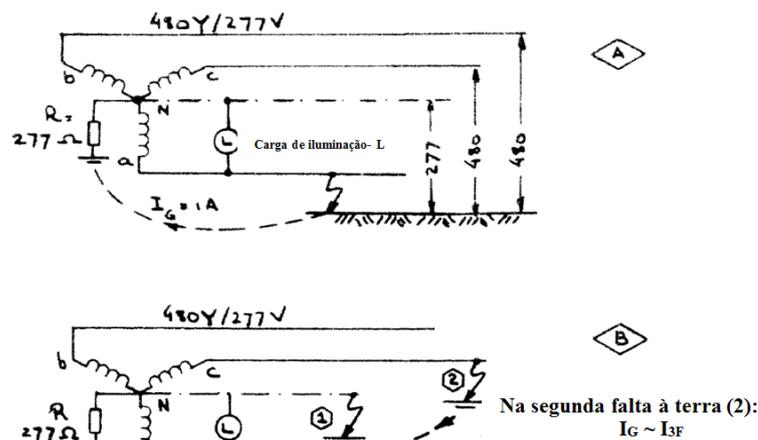
Todos os sistemas de aterramento de neutro por baixa resistência (RBV) e os sistemas de neutro solidamente aterrado permitem esta característica pela simples desconexão do circuito sob falta através da proteção. Como os sistemas RAV podem conviver com uma primeira falta à terra, o sistema RAV pode ser dotado de um sistema de localização de falta à terra para alarmar os operadores. Sistemas RAV podem ser equipados com sistemas de detecção e localização de uma primeira falta à terra indicando o circuito sob falta com maior ou menor precisão. Para este fim, o resistor de aterramento é projetado de forma a ser parcial e intermitentemente curto-circuitado para produzir um sinal pulsante, facilmente detectável e localizável, em todo o sistema elétrico.

8.11 ATENDIMENTO ÀS CARGAS MONOFÁSICAS ENTRE FASE E NEUTRO

Sistemas que usam o neutro como meio de alimentação de cargas monofásicas jamais podem ser aterrados por qualquer elemento, isto é, estes sistemas devem ser exclusivamente do tipo “solidamente aterrado”. Conforme mostrado na figura 8.1, uma fase do transformador poderia alimentar não somente uma carga trifásica, mas também uma carga fase-fase, ou uma carga fase-neutro (indicada por “L” na figura 8.1). Para uma carga trifásica ou fase-fase, não há uma corrente de neutro. Somente para cargas fase-neutro é que as correntes de neutro aparecem. Para operações balanceadas nenhuma corrente flui do neutro à terra, e o potencial de neutro é zero em relação à terra. Tais sistemas poderiam operar satisfatoriamente se não fosse pelo fato de uma ocorrência de falta fase-terra.

Na figura 8.1, em (A), supõe-se um curto fase-terra na fase “a”. Supondo ainda que o resistor de neutro seja de 277 ohms, o que faz com que a corrente de neutro seja de 1 A durante o curto, e o que força o neutro a operar em 277 V acima potencial do terra. As fases “b” e “c” agora operam a 480V em relação à terra, enquanto que a tensão destas cargas monofásicas deve suportar uma sobretensão de, no máximo,

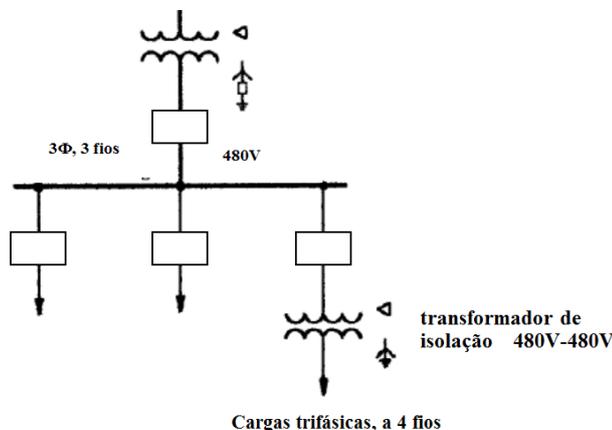
10% acima de sua tensão nominal, ou seja, $277 + 10\% = 305V \ll 480V$. Outra situação é mostrada na mesma, porém em (B), supõe-se que o condutor de neutro for aterrado acidentalmente (uma falta neutro-terra), esta conexão curto-circuitará o resistor de neutro, o que transforma o sistema em solidamente aterrado, enquanto não for detectado o neutro aterrado. Vale destacar que a detecção do aterramento do neutro é praticamente impossível.



Uma primeira falta à terra (1) aterrada solidamente o neutro (e sem aviso)

Figura 8.1 – Ilustração mostrando porque os sistemas trifásicos a 4 fios (480 Y/277 V) não podem ser aterrados por resistência

Para resolver este problema, as cargas trifásicas a 4 condutores podem ser segregadas por um transformador isolador como mostrado na figura 8.2, caso o sistema principal necessite ser do tipo aterrado por resistência. Desta forma, o sistema elétrico, por causa de algumas cargas monofásicas, tem uma alimentação exclusiva através do transformador de isolação com o neutro solidamente aterrado.



Cargas trifásicas, a 4 fios

Figura 8.2 – Sistema principal de neutro aterrado por alta resistência com cargas de iluminação trifásicas a 4 condutores (sistema solidamente aterrado), separadas por um transformador isolador (Nelson, et al., 1999)

8.12 RESUMO COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE ATERRAMENTO DE NEUTRO

A comparação qualitativa dos modos de aterramento de neutro na indústria e as respectivas características e implicações na proteção estão resumidas na tabela 8.2 adaptada da literatura (Dunki-Jacobs, et al., 2007).

Tabela 8.2 - Comparação qualitativa dos métodos de aterramento de neutro

Modo de Aterramento de Neutro	Alta Resistência (RAV)	Baixa resistência (RBV)	Solidamente Aterrado
Corrente Máxima de Falta à Terra	$> 3I_{C0}$	1.000 A	$\approx I_{3\phi}$
Faixa de Corrente de Falta à Terra	0,5 a 8,0 A	200 a 400 A	5 a 50kA
Tensão Nominal do Sistema	0,480 a 4,16kV	2,4 a 36kV	$\leq 480V$, e $>15kV$ (em MT, em sistemas de distribuição industriais)
Características:			
8.2- Controle de Sobretensões F-T Transitórias e Permanentes	Atende	Atende	Atende
8.3- Continuidade de Serviço	Atende	Não atende	Não atende
8.4- Probabilidade de uma Falta com Arco F-T Sustentado	Baixíssima probabilidade	Baixa probabilidade	Alta probabilidade
8.5- Evolução de Falta com Arco F-T em Painéis	Baixo risco de evolução	Baixo risco de evolução	Alto risco de evolução
8.6- Risco de Arco Elétrico F-T	Baixíssimo risco	Baixo risco	Alto risco
8.7- Riscos de Correntes de Falta F-T Dispersas e Arcos ao Longo do Caminho de Retorno	Baixo risco	Baixo/alto risco	Alto risco
8.8- Segurança contra Choques devido às Correntes de Falta à Terra Dispersas	Atende	Atende/ Não atende	Não atende
8.9- Limitação de Danos devido às Correntes de Falta à Terra	Atende	Atende	Não atende
8.10- Facilidade de Localização da Falta à Terra	Vide item 8.10	Atende	Atende
8.11- Atendimento às Cargas Monofásicas entre Fase e Neutro	Não atende	Não atende	Atende

Na tabela 8.2, linhas (8.7) e (8.8), as expressões “Alto/baixo risco” ou “Atende/ Não atende” para os sistemas de baixa resistência (RBV) indicam que estes sistemas, na faixa mais baixa de corrente de falta à terra, apresentam um risco que começa a ser condicionalmente aceitável.

8.13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não existe um único tipo de aterramento de neutro que satisfaça todos os requisitos de instalação e operação de um dado sistema elétrico, levando ainda em consideração a legislação, a existência de máquinas rotativas de MT, o custo de cabos isolados, o risco de incêndio, a segurança de pessoal, a existência de pessoal capaz de realizar uma manutenção qualificada, os problemas e consequências advindos de sobretensões e de intensidade de correntes devidas aos curtos fase-terras e o controle de sobretensões transitórias e permanentes, a continuidade de serviço, a probabilidade de uma falta com arco F-T sustentado, a evolução de falta com arco F-T em painéis, o risco de arco elétrico F-T, o risco de correntes de falta F-T dispersas e de arcos ao longo do caminho de retorno, a limitação de danos devido às correntes de falta F-T, a facilidade de localização de falta F-T, e o atendimento às cargas monofásicas.

A falta com arco elétrico é uma falta caracterizada por alta resistência entre condutores, ou entre condutor(es) e a terra. Por ser de alta resistência, as correntes de arco são baixas, e os disjuntores à montante frequentemente falham em reconhecer a existência do arco, pois as correntes podem não sensibilizar as proteções de sobrecorrente. O rápido aquecimento do ar, e a sua consequente expansão de metal ou de partes metálicas vaporizadas em gás, cria uma forte onda de pressão mecânica que pode explodir partes do cubículo e dos equipamentos de manobra. O que destrói os equipamentos é a escalada quase instantânea, de 1 a 2 ciclos, da falta com arco fase-terra para a falta com arco trifásica, que torna as proteções de terra ineficazes. Isto mostra a necessidade de relés de corrente de fase instantâneos para a proteção de barras e que sejam ajustados em valores suficientemente baixos para detectar faltas com arco multifases rapidamente. Porém, somente as proteções diferenciais de barra (87B), que são muito caras, complexas e que são raramente utilizadas em aplicações industriais, teriam este curto tempo de resposta de até 2 ciclos para detecção e operação do relé. Ressalta-se também que a origem do arco não é somente através de um arco fase-terra inicial, mas pode ser através de um arco bifásico (ocasionado, por exemplo, por uma ferramenta caindo sobre dois barramentos de fase), o que não garante a eficiência de nenhuma proteção de relé de terra ou de relé diferencial contra o arco elétrico. Pelo fato de

que o cálculo de energia incidente pela (IEEE-1584, 2004) considerar somente o curto trifásico, a adoção de resistor de neutro de alto valor (RAV), por exemplo, tem pouca influência no resultado dos cálculos de energia incidente (e, conseqüentemente, no grau de proteção das roupas ou EPIs, na própria necessidade de painéis à prova de arco interno, etc). Desta forma, o uso de alta resistência de neutro se reflete somente na “baixa probabilidade de ocorrência” e na “baixa probabilidade de auto-sustentabilidade” do arco elétrico que é melhor proporcionado pelos sistemas RAV e, em menor grau, também pelos sistemas RBV. Esta probabilidade seria zero se todos os arcos se iniciassem exclusivamente por uma falta fase-terra, que é de longe a mais comum. Desta forma, a adoção de um sistema RAV está mais de acordo com as diretrizes gerais de projeto da NR-10 (Ministério do Trabalho, NR-10) não proporcionando, porém, a esperada economia de projeto de painéis e a dispensa de EPIs especiais.

A proteção “*ground-sensor*”, normalmente utilizada em sistemas RBV e RAV, deve ser evitada em sistemas industriais solidamente aterrados porque as correntes de falta à terra são muito altas e saturam facilmente os TCs “*ground-sensors*”, tipicamente de núcleo de ferro, além do efeito de saturação localizada no toroide, ou a influência de curtos em circuitos adjacentes, ainda mais pronunciados devido aos altos curtos fase-terra que são típicos de um sistema solidamente aterrado. Os testes de fabricantes de TCs toroidais de núcleo de ferro geralmente são limitadas a 3.500 A (Dunki-Jacobs, et al., 2007), ou bem menos, dependendo do modelo e do fabricante, o que está muito abaixo das altas correntes de falta à terra encontradas na indústria (de 10 a 50kA) nos sistemas de neutro solidamente aterrados em BT. Desta forma, como consequência, os sistemas solidamente aterrados prescindem de uma eficiente proteção de terra, o que tornam especialmente os motores (de BT) vulneráveis. Motores de BT em sistemas solidamente aterrados são protegidos normalmente contra faltas de terra somente pelos dispositivos magnéticos das proteções de fase instantâneas.

Em sistema de neutro solidamente aterrado na BT, sob a circunstância de que os motores de BT sejam considerados importantes e não descartáveis, poderia ser utilizado o sistema de neutro aterrado por baixa resistência (ex: de 200 a 400 A), tal como é feito normalmente na MT (geralmente, com resistor de neutro de 400 A), ou

mesmo ainda avaliar a alternativa de utilização de proteção de terra tipo “*ground-sensor*”, porém, com TCs que não se saturem sob as altas correntes de falta à terra (ex: utilizando-se TCs com bobina de *Rogowski*), ou a alternativa de um sistema RAV. Esta opção de sistema RBV na BT, ou mesmo mantendo-se o sistema solidamente aterrado, porém com “*ground-sensors*” dotados de TCs de bobina de *Rogowski*, não são soluções ainda normalmente utilizadas, pois a proteção de terra em sistemas solidamente aterrados é deixada exclusivamente para os fusíveis ou proteções instantâneas de fase, que são muito mais baratas do que os “*ground-sensors*”, caso estes tivessem que ser colocados em todos os ramais de saída de motores de BT. O RAV na BT é justificado economicamente mais para a proteção dos circuitos alimentadores de painéis de distribuição de força e iluminação, e para os CCMs. Ressalta-se que, na eventual escolha de um sistema de neutro de baixa resistência, a corrente de curto fase-terra se torna relativamente baixa para poder operar as unidades de proteção de fase ou os fusíveis, e há um alto custo em dotar todos os circuitos de BT com proteção 50GS.

Também não é possível usar fusíveis de proteção no lado primário contra as faltas externas F-T do lado secundário de transformadores em muitos sistemas RBV, tal como se utiliza normalmente em sistemas de neutro solidamente aterrado, pois a corrente no primário, devida ao curto fase-terra no secundário, pode ficar abaixo do valor de operação do fusível. Neste caso, há a necessidade de se usar relés de proteção, ou mais precisamente, relés diferenciais ou proteções “*ground-sensor*”, que são bem mais sensíveis do que as proteções de fase para detectar as faltas F-T em sistemas de neutro aterrado por baixa resistência (RBV).

Para os transformadores, motores ou geradores, as proteções influenciadas diretamente pela forma de aterramento de neutro são as proteções que irão detectar as faltas à terra, cujo caminho de retorno da corrente de fuga à terra envolve o neutro do transformador. Estas proteções são as diferenciais (87) de fase, e as diferenciais de falta à terra restrita (87RGF ou 87G) e que funcionam idealmente quanto maior for a corrente diferencial (tal como seria o caso das altas correntes de falta F-T dos sistemas solidamente aterrados). Portanto, há sempre uma certa restrição de cobertura dos enrolamentos, no caso dos sistemas RBV, embora esta seja bem menor com a proteção diferencial de terra (87G ou 87RGF) em relação à

proteção diferencial de fase (87). As proteções diferenciais fornecem uma boa proteção geral ao transformador, porém, no caso de sistemas isolados ou de neutro aterrado por alta resistência (RAV), a proteção diferencial não é recomendada porque pode não haver corrente de fuga à terra suficiente para sensibilizar a proteção diferencial, principalmente próximo ao neutro. Neste caso, em sistemas RAV, pode-se utilizar a proteção 50GS e com ajustes bem mais sensíveis, tal como se poderia utilizar para os motores, ou a utilização da proteção de sobretensão 59GN com detecção de tensão via TPs com delta aberto ao invés da detecção de corrente, dispensando-se a proteção diferencial no sistema RAV.

A alta intensidade da falta à terra em sistemas de neutro solidamente aterrados pode ocasionar tensões de contato perigosas devidas aos gradientes de tensão no solo, danos aos equipamentos, risco de explosões e incêndios, perturbações em sistema telefônicos e de comando, e paralisação do sistema elétrico. Estas consequências recomendam o trabalho com níveis reduzidos de corrente de falta à terra, introduzindo-se para isso uma impedância de neutro.

A impedância de neutro pode ser suficientemente pequena para controlar as sobretensões transitórias permitindo circular uma corrente de curto fase-terra de, no mínimo, 25% da corrente de curto trifásica, segundo o critério baseado na descrição do grau de aterramento. Para que seja eliminada a sobretensão transitória em um sistema solidamente aterrado, portanto, a corrente de curto fase-terra sólida deve ser maior ou igual a 25% da corrente de curto trifásica que, neste caso, corresponderia a $X_0/X_1 = 10$, sendo ainda preferível ficar até, no máximo, a 60% da corrente de curto trifásica. Por outro lado, pode-se utilizar uma impedância elevada caso o objetivo seja reduzir a corrente de falta à terra a valores bem baixos de forma a se conviver com o primeiro curto fase-terra e a manter a instalação em serviço. Como existe uma incompatibilidade entre os dois critérios, isto é, quando se utiliza um sistema solidamente aterrado ou aterrado por baixa resistência, controlam-se de certa forma as sobretensões, mas são produzidas correntes elevadas que necessariamente devem provocar o desligamento do sistema. Ao se isolar o neutro, ou utilizar altos valores de resistores de neutro, têm-se baixas correntes de curto fase-terra e elevadas sobretensões. Entre estes dois extremos, o projeto pode variar os valores dos resistores no neutro que limitam as correntes de curto-circuito fase-

terra. A resistência de aterramento de neutro pode limitar os danos causados no ponto de falta, eliminar as sobretensões transientes, reduzir o risco de arco elétrico, limitar a exposição de tensão aos agentes de operação e de manutenção do sistema elétrico, e fornecer níveis adequados de “disparo” para detecção seletiva de faltas à terra e obter a seletividade da proteção. Mas não existe uma solução que atenda a todos os problemas de forma simultânea.

Um critério muito importante atualmente é o da continuidade de serviço associado aos programas de modernização das indústrias com forte ênfase no alto desempenho, na continuidade de serviço, na redução de paradas, na confiabilidade, na segurança, na qualidade da energia, etc. O aterramento de neutro está, então, ligado a duas categorias de aterramento de neutro: (a) instalações elétricas cujo aterramento de neutro permite manter o sistema funcionando durante a primeira falta à terra; e (b) instalações elétricas cujo aterramento do neutro obriga o desligamento na ocorrência de uma falta à terra. Com base em comparações nas formas de aterramento do neutro, conclui-se que em sistemas de BT, e alguns de MT (até 4,16kV), o mais adequado é fazer o aterramento RAV, se levar em consideração os aspectos de segurança de pessoal, bem como o da continuidade de serviço.

Para um sistema de MT, o aterramento RBV apresenta um bom desempenho, que limita a corrente de curto a níveis seguros para a instalação e capazes de garantir a seletividade do sistema de proteção. Hoje, o método de aterramento RBV tornou-se uma preferência universal para os sistemas de MT servindo a maioria das plantas industriais que tipicamente têm um grande número de motores. Portanto, o aumento de uso de motores maiores e, conseqüentemente, mais caros, que requerem tensões de 2,4 e 4,16kV, por exemplo, criaram na indústria a necessidade de sistemas de aterramento com uma resistência limitadora de curto circuito fase-terra em MT, na faixa de 200 a 400 A. Mas nada impede que estes sistemas também possam ser projetados como sistemas RAV, que também demonstram uma alta eficiência para a proteção de terra de motores superior, inclusive, em relação à eficiência dos sistemas RBV.

Os sistemas RAV são utilizados geralmente nas classes de baixa tensão para proteção de CCMs e painéis de distribuição de força e iluminação, e de média

tensão, até 4,16kV, onde as correntes de “*charging*” devem ser menores do que 10 A, para a proteção de motores e de painéis e CCMs. Nestas tensões o custo da isolamento dos componentes do sistema é alto. A sobretensão a ser considerada é de 250% devida aos curtos intermitentes (“*intermittent ground faults*”) e ao fenômeno de ressonância. Neste caso, o sistema de alta resistência também suporta facilmente as sobretensões menores, originadas durante os curto-circuitos fase-terra sólidos, de 173%. É possível, portanto, utilizar uma variedade de métodos de aterramento, desde que sejam considerados os aspectos do valor da corrente de curto fase-terra, as tensões normais e transitórias que surgem durante este defeito, as facilidades de detecção do defeito e de seu local de ocorrência, a possibilidade de obtenção de seletividade, e outros aspectos inerentes a cada classe de tensão e da natureza do sistema elétrico em questão. Não existe um método ideal de aterramento sendo de responsabilidade do engenheiro projetista decidir o método de aterramento mais conveniente.

Quando os circuitos são energizados, em ambiente industrial, há também as correntes transitórias causadas por motores e transformadores, e por correntes permanentes causadas pela capacitância de carga dos cabos em relação à terra, por inversores de frequência que geram correntes de fuga de alta frequência e, por esta razão, os dispositivos de proteção residual necessitam de filtros e de medições de corrente eficaz das correntes de fuga para otimizar a proteção do ser humano e do patrimônio, filtrando os sinais espúrios e mantendo a continuidade do serviço. E estes filtros têm características específicas para cada fabricante. Além dos filtros, as bobinas toroidais podem necessitar de enrolamentos especiais para evitar a interferência eletromagnética das correntes dos condutores próximos, como acontece nas aplicações industriais mas, com mais razão, nas instalações de hospitais e minas, onde o sistema de aterramento do neutro limita os níveis de curto fase-terra a valores baixíssimos. Nestas aplicações não industriais, que estão fora do escopo deste trabalho, o ajuste das proteções de sobrecorrente poderia estar na ordem de 1mA, que é o limite máximo permitido, por norma, para as salas cirúrgicas e, concomitantemente, também protegendo o ser humano contra o contato direto, ou mesmo podendo evitar centelhamentos em outros tipos de instalação, como nas áreas industriais sujeitas à explosão. Por outro lado, estes sistemas de baixíssimas correntes de curto fase-terra sofrem altas sobretensões, que devem ser

cuidadosamente calculadas, pois um resistor de neutro de 700mA (Paulson, G.E.; Dudiak, J.J., 1995); (Novak, 2001) usado em minas, por exemplo, está longe de conseguir drenar a corrente de “*charging*” do sistema, o ($3I_{C0}$) do sistema elétrico, no caso de uma falta fase-terra. A literatura apresenta alguns relés sensíveis de falta à terra com capacidades de direcionalidade (Mayer, Bruce, 2004), por exemplo, para aplicações não industriais, mas que poderiam ser também empregados na indústria em determinados casos a serem ainda investigados.

Os métodos de aterramento de neutro para geradores, ou um conjunto deles em operação isolada ou em conjunto com a alimentação normal da rede industrial, apresentam peculiaridades próprias, pois um número muito grande de geradores em paralelo apresenta também um igual número de resistores de neutro em paralelo, o que pode aumentar muito o nível de curto fase-terra, ou há também a possibilidade oposta, que é a de termos um sistema isolado, sem o neutro de aterramento em determinadas situações em que determinados geradores não têm o seu neutro aterrado. Para grandes geradores, foi apresentado o sistema híbrido de aterramento que é uma das últimas tendências do mercado devido às recentes constatações de que os graves danos internos de geradores são provocados pelo próprio gerador, enquanto ele mesmo é desconectado e desacelerado, realimentando a sua própria falha interna de terra por um tempo excessivo, até que o mesmo fique efetivamente parado. Desta forma, foram desenvolvidos sistemas híbridos de aterramento de neutro (RBV e RAV), associados com as suas respectivas proteções reconfiguráveis conforme seja o tipo de aterramento de neutro, que funcionam separadamente durante a operação conjunta dos geradores em paralelo, ou durante a operação isolada de um gerador desconectado do sistema, enquanto este aguarda a sua parada total, devida a uma falha à terra interna.

9 CONCLUSÕES

A apresentação das conclusões foi organizada para cada tipo de sistema de aterramento de neutro (solidamente aterrado, RBV, RAV, e neutro isolado), seguido pelas sugestões para desenvolvimentos futuros, e pelas publicações obtidas com o desenvolvimento da dissertação.

9.1 SISTEMAS DE NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO

Motores operando na BT em sistemas solidamente aterrados são geralmente protegidos contra faltas à terra pelos elementos magnéticos instantâneos de proteção de fase ou por fusíveis, apresentando a possibilidade de danos internos consideráveis à medida que a potência do motor for maior. Se não houver proteção de falta à terra, supõe-se que o motor seja descartável e sem importância. Sob a circunstância de que os motores de BT sejam considerados importantes e não descartáveis, pode-se utilizar a proteção de terra tipo “*ground-sensor*”, porém, com TCs que não se saturem sob as altas correntes de falta à terra, tais como os TCs com bobina de Rogowski, que são elementos de proteção mais caros do que as proteções de fase.

Por causa dos efeitos de saturação dos “*ground-sensors*”, com TCs de núcleo de ferro, e suas limitações para detectar altas correntes fase-terra, próprias de sistemas solidamente aterrados, fica difícil haver uma proteção de terra eficiente baseada em “*ground-sensors*”. Restam as proteções com relés 50N/51N e as proteções “*ground-return*” (51TN). As proteções com relés 50N/51N acoplados aos TCs conectados na forma residual não são tão eficientes, especialmente para o caso de motores, pois são proteções geralmente temporizadas e que perdem sensibilidade à medida que os TCs de fase sejam projetados para altas correntes de fase. E as proteções de retaguarda “*ground-return*” (51TN) também não são eficientes para os motores, pois são sempre temporizadas. A proteção de falta à terra residual (50N/51N) encontra ampla aplicação nos sistemas com o neutro solidamente aterrado, onde as correntes de falta F-T são altas, da mesma grandeza das faltas trifásicas. No entanto, há tecnologias recentemente desenvolvidas de TCs de núcleo de ar, conforme mencionadas anteriormente, do tipo bobina de Rogowski, que possibilitam a inclusão de proteções de terra eficientes nos sistemas solidamente aterrados, do tipo 50GS, sendo úteis no caso de proteção de motores de BT. Estes sistemas ainda são restritos a poucos fabricantes e a sua viabilidade técnica e econômica deve ser avaliada em cada projeto em função

da importância de cada motor, da potência do motor, dos níveis de curto fase-terra, e dos danos potenciais que as laminações dos motores podem sofrer.

Os sistemas de neutro solidamente aterrado têm sido tipicamente aplicados na BT na indústria e como qualquer falta deve ser eliminada instantaneamente, estes sistemas não podem priorizar a continuidade operacional. Eles têm ainda, como consequência, implicações importantes na proteção, tais como: a proteção do transformador para faltas passantes fase-terra com a curva ANSI do transformador 58% deslocada, os problemas de seletividade com os dispositivos de proteção à jusante do transformador devido à curva ANSI deslocada, e a proteção do ponto NEC. Para a proteção do lado primário contra as faltas do lado secundário, inclusive aquelas internas aos enrolamentos do secundário, a curva ANSI (*“through-fault protection curve”*) deslocada de 58% pode exigir curvas de proteção com características extremamente inversas ou fusíveis para a proteção da curva ANSI para faltas passantes.

Para a proteção principal de terra de circuitos terminais típicos de motores de BT, utilizam-se o tradicional sistema de detecção de corrente de terra através da conexão residual dos 3 TCs de fase conforme já mencionado, e também o sistema do relé de fuga à terra (função 64) de alta impedância, bem menos conhecido neste tipo de aplicação, e o seu sensor de corrente toroidal, envolvendo todas as fases mais o neutro (se o neutro existir), que formam um “par casado” relé/TC e que transformam a corrente de sequência zero em uma tensão proporcional à mesma e de nível adequado para a sensibilização do relé. Quando esta tensão atingir o valor pré-ajustado correspondente, o relé opera de forma instantânea ou temporizada, conforme o projeto. O sistema de detecção de falta à terra pode utilizar um TC no neutro do transformador como o circuito de retorno da falta à terra (esquema *“ground-return”*, 51TN), como proteção de retaguarda, com o TC de relação de corrente de plena carga próxima à relação dos TCs de fase. Qualquer corrente de terra, retornando ao neutro do transformador, indica que a falta pode estar na barra à jusante, no enrolamento secundário do próprio transformador, ou em qualquer circuito terminal à jusante. Para proporcionar uma proteção segura, o relé deve operar o disjuntor principal do secundário do transformador e, se a falta persistir, indica que se trata de um curto fase-terra no próprio enrolamento secundário do transformador, e um sinal temporizado deve operar o disjuntor principal do primário do transformador.

Não se utiliza o sistema de neutro solidamente aterrado na MT por causa da alta energia dissipada num curto fase-terra e que pode inutilizar equipamentos e motores.

No caso de um curto fase-terra num sistema efetivamente aterrado, a sobretensão (permanente) máxima nas fases sãs está limitada a aproximadamente 1,40PU (tensão fase-neutro), o que significa 80% da tensão fase-fase ou $0,80 \cdot V_{LL}$, e a corrente de curto fase-terra é de, no mínimo, 60% da corrente de curto trifásica. Os equipamentos dos sistemas efetivamente aterrados devem ser especificados para suportar, portanto, sobretensões de $138\% \cdot V_{LN}$ ou $0,80 \cdot V_{LL}$.

9.2 SISTEMAS DE NEUTRO ATERRADO POR BAIXA RESISTÊNCIA - RBV

O neutro aterrado por uma baixa resistência, em geral, de 200 a 400 A, é usado mais frequentemente na MT para limitar os danos causados pelos curtos fase-terra e, conseqüentemente, os danos de dissipação térmica nas máquinas de MT, e para controlar as sobretensões e as altas correntes de curtos fase-terra. Tal como o sistema solidamente aterrado, o sistema RBV deve eliminar as faltas rapidamente. Por isso os sistemas RBV também não podem priorizar a continuidade operacional. A proteção de falta à terra residual, normalmente utilizada nos sistemas de neutro solidamente aterrado, deve ser evitada nos sistemas RBV dado que a razão dos TCs de fase são geralmente muito altas, o que afeta a sensibilidade do relé para detectar as faltas à terra, além do fato de que os relés são temporizados. Este problema é melhor resolvido no sistema RBV através do uso do princípio “*ground-sensor*”. A proteção “*ground sensor*” é obtida através de um TC do tipo janela ou toroide, que envolve todos os condutores, acoplado a um relé especialmente casado com este TC, com características instantâneas ou temporizadas. A proteção “*ground-sensor*” (50GS/51GS) substitui com vantagem a proteção 51N (do esquema de proteção denominada por proteção de falta residual à terra, utilizada nos sistemas solidamente aterrados), nas aplicações em sistemas RBV. Além disso, a proteção 51N, na conexão residual de TCs opera, geralmente, com temporização para evitar as altas correntes transitórias de “*inrush*” entre as fases, o que provocaria um dano ainda maior aos equipamentos por causa desta temporização. A alta sensibilidade e velocidade de operação do 50GS contribui para reduzir os danos de queimas devido às faltas à terra, em especial, no controle de danos de queima em núcleos de máquinas elétricas de MT. Como o TC é normalmente especificado para a metade da corrente nominal do resistor de neutro, os enrolamentos em estrela (Y) dos motores ficam protegidos em 95%. Os

5% restantes do enrolamento em Y, próximos ao neutro do motor, ficam desprotegidos e este fato é bem tolerado para os motores, pois os pontos mais sujeitos ao estresse são as espiras próximas aos seus terminais. Desta forma, em sistemas RBV os motores são protegidos pelo relé 50GS que elimina a falta à terra instantaneamente e, assim, os danos de queima ficam mais restritos aos enrolamentos e à isolação, evitando o custoso re-empilhamento das laminações do núcleo. Não é possível usar fusíveis de proteção no lado primário do transformador contra as faltas externas F-T do lado secundário em muitos sistemas RBV, pois a corrente no primário, devida ao curto fase-terra no secundário, pode ficar abaixo do valor de operação do fusível.

Outra alternativa de proteção adequada a trabalhar no sistema RBV é usar relés de proteção, ou mais precisamente, relés diferenciais, que são mais sensíveis do que as proteções de fase para detectar as faltas F-T. Pode-se usar não somente a proteção diferencial (87), mas também a diferencial autobalanceada em sistemas RBV, para a proteção de motores, transformadores e geradores. Para os transformadores, as proteções influenciadas diretamente pela forma de aterramento de neutro são as proteções que irão detectar as faltas à terra, cujo caminho de retorno da corrente de fuga à terra envolve o neutro do transformador. Estas proteções são as diferenciais (87T) de fase, e as diferenciais de falta à terra restrita (87RGF ou 87G), e que funcionariam idealmente quanto maior for a corrente diferencial, e sempre com certa restrição de cobertura dos enrolamentos no caso dos sistemas RBV, pois estes restringem a magnitude do curto F-T através do valor do resistor de neutro. A proteção diferencial é geralmente utilizada em transformadores mais importantes, ou de potência igual ou maior do que 10MVA. As proteções diferenciais fornecem uma boa proteção geral ao transformador nos sistemas RBV.

O ajuste da proteção diferencial (de fase, 87T) para transformadores, por restrição percentual através de uma reta de inclinação de 20%, por exemplo, deixa uma grande parte do enrolamento em Y próximo ao neutro desprotegido pela proteção diferencial de fase. Além disso, devido ao fato de que o RBV adotado estar usualmente na faixa de 200 a 400 A, há também uma restrição inerente de cobertura devido à limitada corrente de falta F-T. Portanto, há a necessidade da proteção diferencial de falta à terra (87G) para aumentar a sensibilidade de detecção de faltas à terra e também aumentar o percentual do enrolamento protegido do transformador. A proteção diferencial de terra (87G) tem uma sensibilidade bem melhor em relação à proteção diferencial de

fase (87T), podendo ser também aplicada aos enrolamentos do estator de geradores e em grandes motores.

Os geradores apresentam ainda, em relação aos motores e transformadores, a vantagem de poder empregar técnicas de detecção de 3ª harmônica com proteção de 100% do enrolamento.

Os TCs toroidais economicamente viáveis e que podem ter uma janela de dimensão razoável para envolver os circuitos e caber dentro de painéis são geralmente de relação baixa, de 50- 5 A ou 100- 5 A. Assim, mesmo sob correntes de falta fase-terra relativamente baixas, a precisão destes TCs é baixa, devido ao alto nível de saturação. O efeito de saturação pode também ser analisado considerando-se que a corrente secundária do TC é absorvida na forma de corrente de excitação através do ramo magnetizante, o que tende a proteger o relé contra altas correntes de curto-circuito, porém, deixando uma resposta bastante fraca para sensibilizá-lo.

Para sistemas RBV, a corrente de falta fase-terra é projetada para estar entre 5% a 20% do valor de curto trifásico. Como uma falta fase-terra deve ser interrompida rapidamente, a isolação dos equipamentos pode ser igual ao nível de isolação dos sistemas efetivamente aterrados exceto, porém, para os para-raios, que devem ser especificados para 173%. Muitas vezes, a isolação dos equipamentos e dos circuitos é adotada, em geral, em 173% mesmo que a proteção elimine a falta em questão de ciclos. Por outro lado, constatam-se, através de cálculos, que as sobretensões nos sistemas aterrados por baixa resistência podem ser, dentro de determinadas relações de $K=Z_0/Z_1$ complexo, até 5% maiores do que o normalmente considerado na literatura. Constata-se que o correto seria considerar $182\% \cdot V_{LN}$ ou $1,05 \cdot V_{LL}$ de sobretensão (permanente) nos sistemas RBV, isto é, pouco acima do valor usualmente considerado de 1,73PU ou de $173\% \cdot V_{LN}$ ou $1,0 \cdot V_{LL}$. Esta sobretensão de 182% também não impactaria em maiores consequências, pois as faltas à terra são eliminadas em curto espaço de tempo. Porém, esta sobretensão de 182% deve ser analisada quanto ao desempenho e a especificação de certos equipamentos, tais como, os para-raios.

9.3 SISTEMAS DE NEUTRO ATERRADO POR ALTA RESISTÊNCIA - RAV

Os sistemas de alta resistência de neutro (RAV) podem ser aplicados na BT, na MT até 4,16kV com as ressalvas discutidas, e em 13,8kV no caso de geradores unitários e também sob determinadas condições e, inclusive, no aterramento de neutro híbrido. Na

MT os sistemas RAV podem proteger cada motor individualmente, que são mais caros, além dos ramais alimentadores de CCMs e de painéis de distribuição em geral. Na BT as proteções de terra e o RAV são economicamente viáveis na proteção das entradas de painéis de força e iluminação, e de CCMs abrangendo um conjunto de motores. Não é economicamente viável a colocação de 50GS para cada motor de BT, a menos da importância de algum determinado motor. O fato de o RAV ser ainda pouco utilizado na MT (4,16kV) não significa que ele não deva ser utilizado nesta classe de tensão, pois é justamente neste caso que o RAV pode contribuir de forma decisiva para a proteção dos motores de MT, evitando a queima nas laminações do núcleo do estator.

Se o sistema possui o neutro isolado ou aterrado através de resistor de alto valor, a corrente de falta à terra é reduzida, mas as tensões das fases sãs à terra podem atingir valores perigosos. O neutro aterrado por alta resistência, em geral, de 5 A na BT, ou entre 5 a 10 A em sistemas de MT até 4,16kV, ou de 5 a 10 A em aplicações de gerador unitário de 13,8kV, isolado por transformador, controla as altas correntes de curto fase-terra, porém, permite sobretensões (transitórias) controladas desde que o resistor de neutro seja projetado para descarregar as correntes de “*charging*” do sistema elétrico durante a falta fase-terra.

No caso de sistemas isolados ou de sistemas RAV, as proteções diferenciais de fase e de terra não são adequadas porque pode não haver corrente de fuga à terra suficiente para sensibilizar a proteção diferencial, principalmente próximo ao neutro. Neste caso, em sistemas RAV, as proteções diferenciais não são utilizadas em favor da proteção 50GS com ajustes bem mais sensíveis, tal como se poderia utilizar para os motores de MT, ou a utilização da proteção 59GN com detecção de tensão via TPs em delta aberto, dispensando-se as proteções diferenciais no sistema RAV para proteção contra falta à terra.

A detecção de faltas à terra em sistemas de neutro aterrado por alta resistência é feita através dos TPs em delta aberto (“*broken delta*”), para detectar baixas correntes, da ordem de 2,5 a 6 A. Nos sistemas de neutro de alta resistência a detecção de falta à terra, por causa dos baixos níveis de corrente, é geralmente fornecida pela medida de tensão de sequência zero (“*broken-delta*”) e, portanto, o desempenho do TC não está envolvido. Conforme já citado, o limite máximo para as correntes de falta à terra é de 8 a 10 A, o qual está relacionado ao limite aceitável para evitar a evolução das falhas em

enrolamentos de máquinas girantes em sistemas de 2,4kV e 4,16kV, isto é, para evitar a carbonização dos enrolamentos e o conseqüente arco de carbono, cuja evolução pode causar a fundição apreciável das chapas laminadas do núcleo do motor. Há também a necessidade de detecção de correntes bem mais baixas, da ordem de 300 a 500mA, para uma maior proteção ou cobertura dos enrolamentos de máquinas elétricas girantes de MT em seus respectivos ramais, o que garante a cobertura de 90% dos enrolamentos. Esta faixa de corrente de alta sensibilidade também protege os equipamentos contra o risco de incêndio, atendendo a *IEC-60364* ("*Electrical Installations of Buildings*") e a NBR-5410, que são aplicáveis na BT. Também atende parcialmente a proteção do ser humano contra choque ou contato direto na BT, isto é, não de uma forma tão eficiente como seria se um ajuste de 30mA fosse possível conforme estipulado pela *IEC-60479*, mas é a última barreira de segurança proporcionada exclusivamente pelos sistemas RAV. Correntes residuais que fluem durante a operação normal podem limitar a aplicação da proteção "*ground-sensor*" em aplicações sensíveis, especialmente se a proteção não for dotada de características de detecção com filtragem de harmônicas em aplicações com cargas geradoras de harmônicas, e de detecção de direcionalidade, que também pode ser útil para auxiliar na filtragem de correntes residuais normais do sistema. Além disso, o ajuste deve estar acima das correntes de "*charging*" devido aos curtos em outros circuitos.

O sistema RAV oferece a vantagem de continuidade de serviço sob a condição de uma primeira falta à terra, o que é crítico para muitas indústrias, como aquelas do ramo de petróleo, químico, minas, têxtil, cimento, papel e celulose, alimentos, vidros, etc. É esta vantagem, a de continuidade de serviço, a principal condição norteadora para a escolha do sistema de aterramento de neutro por alta resistência. Entretanto, o sistema RAV deve ser avaliado em todos os outros quesitos apresentados neste trabalho para análise de sua viabilidade técnica e econômica.

Nos sistemas RAV constata-se que os níveis de sobretensão (permanente) devido aos curtos F-T sólidos não são maiores do que 173%, diferentemente do que pode ocorrer em sistemas RBV. Nos sistemas RAV as sobretensões (permanentes) se estabilizam mais próximas e para ambas fases são, de forma igual, e mesmo um pouco menores do que 1,73PU. Por outro lado, os sistemas elétricos concebidos com o sistema RAV podem ter que conviver por um longo período de tempo sob estas sobretensões, diferentemente dos sistemas RBV que devem desconectar a falta F-T imediatamente.

As sobretensões (transitórias) devidas aos curtos intermitentes e ao fenômeno ressonância, em sistemas RAV, apresentam as maiores sobretensões, da ordem de $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, que é o pior caso entre todos os métodos de aterramento de neutro. Portanto, os sistemas RAV devem ter os equipamentos especificados para uma isolação de $250\% \cdot V_{LN}$ ou $1,44 \cdot V_{LL}$, se o resistor de neutro for projetado para $I_R = (3I_{C0})$.

9.4 SISTEMAS DE NEUTRO ISOLADO

As correntes de falta à terra são muito baixas e causam um dano mínimo, porém, as tensões podem aumentar muito durante a falta, podendo causar dano nas isolações do sistema elétrico e nos equipamentos. Os sistemas isolados não são recomendados na indústria, porque estão sujeitos ao fenômeno de instabilidade de neutro, responsável pelas eventuais sobretensões (transitórias) devidas aos efeitos de ressonância e de curtos intermitentes. Esta recomendação não se aplica para o caso de instalações não industriais ou que têm características e requisitos especiais, tais como aquelas de centros cirúrgicos em hospitais, minas, etc. Nestes sistemas, é importante a detecção de correntes de falta à terra extremamente baixas através de relés de terra sensíveis e com características especiais, tais como, a detecção de direcionalidade da falta (Mayer, Bruce, 2004), (Basar, 2004). Desta forma, evita-se mais facilmente o “*sympathetic tripping*”, isto é, o relé ignora a corrente reversa de faltas em outros alimentadores e opera somente para as faltas do próprio alimentador. Esta característica do relé também pode auxiliar nas aplicações industriais de neutro isolado e no sistema RAV, porém, não está claro, na literatura, quando e como certas características como esta seriam desejáveis ou economicamente factíveis nas aplicações industriais, ou mesmo se tornariam as aplicações de neutro isolado na indústria algo aceitável. Em geral, os detectores de fuga à terra são apresentados como soluções para sistemas isolados já existentes, ou que este tipo de projeto de neutro isolado já tenha sido escolhido.

A apresentação do aterramento com o neutro isolado é também útil para delinear os piores aspectos de sobretensões devidos aos curtos fase-terra sólidos (permanentes) e aos curtos intermitentes (transitórios), e como estas sobretensões ficam limitadas e controladas nos outros tipos de sistemas de aterramento de neutro e, em especial, como as sobretensões transitórias são controladas no sistema RAV. Teoricamente, as sobretensões transitórias causadas por ressonância em sistemas isolados são limitadas somente pela resistência ôhmica do circuito ressonante. Na prática, as sobretensões transitórias podem atingir de 10 a 20 vezes a tensão de fase, ou até o

rompimento da isolação, o que provoca um curto sólido fase-terra, ou outro tipo qualquer de curto-circuito sólido, extinguindo-se a instabilidade de neutro, porém, deixando-se a sua consequência, que é o rompimento da isolação numa ou, simultaneamente, em várias partes do sistema elétrico. O limite para as sobretensões transitórias causadas pelos curtos intermitentes também não tem um limite teórico, pois as sobretensões transitórias podem ser tanto maiores quanto mais carregada for a capacitância das fases do sistema elétrico. Na prática, as sobretensões devidas aos curtos intermitentes em sistemas isolados podem chegar a 5,5 vezes a tensão de fase, ou até romper a isolação que, em particular, atinge primeiramente os pontos mais fracos do sistema, tais como, os enrolamentos de motores elétricos, tal como acontecia na queima simultânea de vários motores observada na década de 40. A solução mais simples para limitar estas sobretensões transitórias é o aterramento do neutro, tanto pela forma solidamente aterrada, como através de uma impedância (alta ou baixa). Mas a tecnologia de detecção de sobretensões transitórias evoluiu e apresenta novos equipamentos que poderiam viabilizar, no futuro, o sistema de neutro isolado também para a indústria, mantendo as sobretensões bem mais controladas.

Tradicionalmente, a detecção de uma primeira falta à terra sólida é possível se o sistema isolado se tornar temporariamente num sistema de neutro de alta resistência, através de uma conexão de um transformador de aterramento de neutro artificial dotado de um circuito de pulsos ou através do aterramento do neutro do sistema, se este estiver disponível. Através do sistema de detecção da falta à terra, por pulsos, pelo mesmo procedimento feito para o sistema de alta resistência, o ponto de defeito pode ser localizado, combinando-se a detecção por circuitos localizadores fixos e a detecção mais detalhada por detectores móveis manuais. Caso o sistema isolado não tenha sido projetado para ter um sistema de detecção fixo de falta à terra que, normalmente, existiria num sistema de alta resistência especialmente projetado para este fim, a procura e a localização do defeito teria que ser feita por uma forma inteiramente manual, seguindo-se os sinais de frequência não fundamental injetados no sistema elétrico através de equipamentos especiais.

Finalmente, para concluir, não existe um único tipo de aterramento de neutro que satisfaça a todos os requisitos de instalação e operação de um dado sistema elétrico. Quando for definido o sistema de aterramento de neutro, o projetista deve avaliar

diversos quesitos: supressão ou controle de sobretensões; continuidade de serviço não afetada por uma primeira falta à terra; custo de isolamento para cabos, motores, e equipamentos; existência de pessoal capaz de realizar uma manutenção qualificada; risco de arco elétrico; segurança de pessoal contra choque elétrico; risco de choque devido às correntes de falta à terra dispersas; risco de incêndio; limitação de danos aos equipamentos; facilidade de localização da falta à terra; problema de alimentação de cargas monofásicas; e eficiência e nível de cobertura da proteção de terra para as máquinas elétricas girantes, transformadores e painéis.

9.5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dentre os assuntos pesquisados que podem merecer algum aprofundamento em pesquisas futuras, destacam-se:

Nos sistemas RAV:

- Investigação de dispositivos inteligentes para detecção e localização de curtos intermitentes e de faltas invertidas;
- Investigação de dispositivos de proteção de sobrecarga inteligente para motores menores do que 15HP capazes de detectar a diferença entre baixas correntes de sobrecarga e baixas correntes de um curto F-T;
- Análise da influência de certas cargas, tais como os inversores, para se avaliar diferentes tecnologias e sua interação com os sistemas de aterramento de neutro;
- Investigação de sistemas de detecção e filtragem de correntes harmônicas de terceira ordem e de suas múltiplas, com detecção de direcionalidade e de correntes de ordem de magnitude de $3I_{C0}$ nos relés de terra;
- Análise de sobretensões transitórias de $250\%*V_{LN}$ ou $1,44*V_{LL}$ e suas consequências na especificação de isolamento de equipamentos, tais como, cabos, motores, CCMs, barramentos, contadores, para-raios, etc, ao invés dos 173% de sobretensão normalmente considerada pela literatura em geral;
- Análise do limite de corrente de 8 a 10 A de auto-sustentabilidade e de evolução do arco carbonizante, ou o nível de corrente de arco carbonizante abaixo do qual a corrente poderia circular durante horas através de uma máquina elétrica, sem causar danos ou evoluir para danificar os enrolamentos e causar a fusão das laminações do estator de uma máquina elétrica;

- Avaliação da necessidade de se desenvolver sistemas de proteção de falta à terra, tais como, a seletividade para uma 2ª falta à terra, e a melhoria de vários detalhes na operação deste sistema com avaliação e testes em campo. Investigação estatística que corrobore com esta suposta necessidade através de levantamento de dados estatísticos e avaliação da probabilidade de vir a ocorrer uma 2ª falta à terra, logo após a primeira.

Nos sistemas RBV:

- Critérios e determinação mais precisa do valor ideal do resistor RBV, otimizando o desempenho dos relés de proteção diferencial 87G com o valor de resistor de neutro, de modo a obter a máxima cobertura de proteção dos enrolamentos de transformadores, motores e geradores, e minimizar os danos causados pela dissipação térmica devido aos curto-circuitos fase-terra, inclusive considerando o caso de danos às laminações de motores;
- Consequências de $182\% \cdot V_{LN}$ ou $1,05 \cdot V_{LL}$ de sobretensão (permanente), ao invés de 173% de sobretensão considerada pela literatura em geral, devido aos curtos sólidos nos sistemas RBV e sob determinados valores de X_0/X_1 , para a especificação de para-raios e outros equipamentos;
- Análise e avaliação da eficiência de proteções de faltas entre espiras;
- Desenvolvimento de técnicas e algoritmos para relés digitais, ou avaliação dos relés e algoritmos existentes, com capacidade para ajustes baixos de inibição de operação para o caso de “*inrush*” e saturação de TCs (baixos níveis de 2ª e 4ª harmônicas), visando aplicações nos modernos transformadores que tipicamente têm baixas perdas de núcleo;
- Investigação sobre formas e métodos de análise de desempenho do conjunto relé digital e TCs de núcleo de ferro toroidal, economicamente viáveis, de baixas relações de espiras e de tamanho reduzido, para emprego dentro de painéis diante de curto-circuitos máximos especificados.
- Análise de desempenho de TCs especiais e relés de terra quanto às limitações técnicas e econômicas, especialmente nas aplicações da proteção diferencial em sistemas RBV e nas aplicações de “*ground-sensors*” em sistemas solidamente aterrados, e desenvolvimento de alternativas tecnológicas para o problema da

saturação de TCs de núcleo de ferro, como o uso de TCs com “*gaps*” de ar, bobinas de *Rogowski*, sensores óticos de corrente, etc;

Nos sistemas de neutro solidamente aterrado:

- Análise da faixa de potência máxima de motor dentro da qual os danos, devidos aos curtos F-T, ficam restritos somente aos enrolamentos, isto é, fora das chapas laminadas do estator, sob determinados níveis máximos de curto F-T, e considerando que os motores sejam protegidos contra faltas à terra exclusivamente pelos elementos magnéticos instantâneos de proteção de fase, e também com os TCs de fase na conexão residual (50N/51N). Investigação de custo/benefício e de tecnologia para que o 50N/51N possa ser instantâneo e com filtro de “*inrush*”;
- Investigação da eficiência e resposta do sistema de relé de fuga à terra (função 64) de alta impedância e o seu sensor de corrente toroidal que transforma a corrente de sequência zero em tensão proporcional em relação aos curtos F-T, investigação de disponibilidade de filtros para evitar os transitórios de partida de motores, ou se deve ser temporizado.

Nos sistemas isolados

- Embora os sistemas isolados não sejam recomendados na indústria, porque estão sujeitos ao fenômeno de instabilidade de neutro, responsável pelas eventuais sobretensões transitórias devidas aos efeitos de ressonância e de curtos intermitentes, esta recomendação deveria ser investigada diante de novas tecnologias de detecção sensível de baixíssimas correntes de falta à terra, com filtros e características de direcionalidade, já aplicadas em áreas não industriais, investigando-se o seu desempenho para detecção de curtos intermitentes e por ressonância, e a sua capacidade de eliminar e controlar melhor as sobretensões transitórias nos sistemas industriais.

9.6 PUBLICAÇÕES

Como resultado do desenvolvimento da presente dissertação, foram publicados e apresentados dois artigos técnicos em conferências, o que confirma a relevância do tema escolhido, sendo eles:

- Bernardi, G. de A. F., e Carvalho Filho, J. M.; “A Evolução do Aterramento de Neutro em Sistemas Elétricos Industriais” – XII IEEE/IAS International Conference

on Industry Applications - INDUSCON, de 05 a 07 de Novembro de 2012, em Fortaleza, CE;

- Bernardi, G. de A. F., e Carvalho Filho, J. M.; *“High-Resistance Neutral Grounding in Industrial Systems and the Ground-Fault Protection”* - XII Brazilian Power Electronics Conference - COBEP 2013, de 27 a 31 de Outubro de 2013, em Gramado, RS.

REFERÊNCIAS

- ABNT.** Instalações Elétricas de Baixa tensão. *ABNT- NBR-5410.*
- Add Trip Security to Arc-Flash Detection for Safety and Reliability/IEEE/Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference.* **Zeller, Mark e Scheer, Gary.** **10-13 March, 2009.** Clemson, SC, USA : IEEE, 10-13 March, 2009. IEEE Power Systems Conference, 2009 PSC'09. pp. 1-8.
- Alstom Guide.** Network Protection & Automation Guide.
- ANSI/IEEE. 2006.** IEEE Guide for Generator Ground Protection. *IEEE C37.101.* 2006.
- Arcing-Fault Models for Low-Voltage Power Systems.* **Gammon, T. e Matthews, J.** **2000.** Clearwater, Florida - USA : The 2000 IEEE Annual Meeting, 2000. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. pp. 119-126.
- Baker, David. 1979.** Charging Current Data for Guesswork-Free Design of High-Resistance Grounded Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol 1A-15, no. 2.* March/April de 1979.
- Baldwin, Thomas. 2003.** Directional Ground-Fault Indicator for High-Resistance Grounded Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol 39, no.2.* March/April de 2003.
- **2001.** Fault Locating in Ungrounded and High-Resistance Grounded Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications.* July/August, vol 37, no. 4 de 2001.
- Basar, Joseph J. 2004.** Improvement of Ground-Fault Relaying Selectivity Through The Application of Directional Relays to High-Voltage Longwall Mining Systems. *Master of Science Dissertation.* s.l., USA : Virginia Polytechnic Institute & State University, 26 de April de 2004.
- Beeman, D. 1955.** *Industrial Power Systems Handbook.* s.l. : Mc Graw-Hill, 1955.
- Bridger, Baldwin. 1997.** Operation of Ground Sensor Relays Under Conditions of Partial CT Saturation. *IEEE Transactions on Industry Applications.* July/August, vol 33, no. 4 de 1997.
- C37.102, IEEE Standards Board. 1995.** IEEE Guide for AC Generator Protection, C37.102. s.l., USA : IEEE, 1995.
- Calvas, Roland - Schneider Electric - Cahier Technique 114. 1998.** Residual Current Devices in LV. 1998.

Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers. **Girgis, Ramsis S. (ABB), e teNyenhuis, Ed G. (ABB).** 2007. Tampa, FL, USA : IEEE, 2007. IEEE Power Engineering Society General Meeting. pp. 1-6.

Chiesa, Nicola. 2011. Power Transformer Modelling for Inrush Calculation. *Thesis for the degree of PhD.* Trondheim, Norway : Norwegian University of Science and Technology, June de 2011.

Cooper, Scott. Hands-on Relay School - Transformer Protection Open Lecture.

[Online] Manta Test Systems.

https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/d07be2ff259914fdbfafa22d7189eba3_TransformerProtection.pdf.

Cossé, R. E. Jr, Dunn, D. G. e Spiewak, R.M. 2007. CT Saturation Calculation: Are They Applicable in the Modern World? – Part I: The Question. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 43, no. 2. March/April de 2007.

Costa, Paulo Fernandes. 1995. Aterramento do Neutro dos Sistemas de Distribuição Brasileiros: Uma Proposta de Mudança. s.l. : UFMG, Dissertação de Mestrado, 1995.

Cutler-Hammer. 2001. High Resistance Pulsing Ground Systems (C-HRG) Low Voltage, F1-1. [Online] Maio de 2001.

Dunki-Jacobs, J. R. 1972. The Effects of Arcing Ground Faults on Low-Voltage System Design. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May/June, vol 1 A-8, no. 3 de 1972.

—. 1986. The Escalating Arcing Ground-Fault Phenomenon. *IEEE Transactions on Industry Applications*. November/December, vol 1 A-22, no. 6 de 1986.

Dunki-Jacobs, J.R., Shields, F. J. and St. Pierre, Conrad. 2007. *Industrial Power System Grounding Design Handbook*. s.l. : Thomson-Shore, 2007.

Evaluation of Sympathetic Nuisance Tripping Involving Instantaneous Ground Fault Relays and General Considerations for Ground Fault Protection of Industrial Power Systems. **Ventruella, Del J.** 1998. Portland : IEEE, 1998. IEEE Pulp and Paper Industry Conference.

Fundamentals of Short-Circuit Protection for Transformers. **Kasztenny, Bogdan et al.** 2010-12. s.l. : IEEE, 2010-12. A & M Conference for Protection Relay Engineers.

GE Electrical Distribution & Control, GEI-72116 . GEI-72116: High Resistance Pulsing Ground Detection System . *site da General Electric (GE).* [Online]

- General Electric. 2007.** Transformer Protection Principles. *General Electric Digital Energy*. [Online] 2007. www.gedigitalenergy.com/smartgrid/Mar07/article5.pdf.
- Hermeto, A. E., et al. 2010.** Apostilas do Curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos – CEPSE 5ª edição, Módulo I - Análise de Falhas em Sist. Elétricos; Módulo III – Introd. Sist. de Proteção; Módulo IV - Prot. Equipam.; Módulo V – Prot. Sist. Industriais e de Distrib. s.l. : UNIFEI, 2010.
- Hou, Daqing. 2006.** Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems. *Schweitzer Engineering Laboratories*. [Online] 2006.
- IEC.** Low-Voltage Electrical Installations – Part 1: Fundamental Principles, Assessment of General Characteristics, Definitions. *IEC 60364*.
- IEC-60479.** Effects of Current on Human Beings and Livestock Part 2: Special Aspects. *IEC-60479*.
- IEEE. 2005.** IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems. *IEEE Std C62.92.2 e C62.92.3*. 2005.
- .** 2007. IEEE-142 – Grounding of Industrial and Commercial Power Systems – Green Book. 2007.
- IEEE PSRC Committe. 2001 e 1996.** C37.110 - Theory for CT SAT Calculator (PSRC) e IEEE Guide for Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. [Online] 2001 e 1996.
- IEEE PSRC. 2010.** *Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying*. 2010.
- IEEE Std 242. 2001.** Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial. *IEEE Std 242*. s.l. : IEEE, 2001.
- IEEE Transformer Commitee. 2000.** C57.12.00-2000 - IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. s.l., USA : IEEE, 2000.
- IEEE/IAS Working Group Report. 2009.** *Switching Transient Analysis and Specification for Practical Hybrid High Resistance Grounded Generator Applications*. s.l. : IEEE, 2009.
- IEEE-1584. 2004.** IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. 2004.
- I-Gard, IPC.** Application guide: A Guide to High Resistance Grounding and Ground Fault Protection on Ungrounded and High Resistance Grounded System. *site da IPC - I-Gard*. [Online] www.i-gard.com.

Impact of Transformer Inrush Currents on Sensitive Protection Functions – How to Configure Adjacent Relays to Avoid Nuisance Tripping. **Kasztenny, Bogdan. 2006.** 2006, IEEE 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers.

Jamil, Shahid, Jones, R.A. e McClung, L.B. 1997. Arc Flash Burn Hazards at Various Levels of an Electrical System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 33, no. 2. March/April de 1997.

Khan, Shoab. 2008. *Industrial Power Systems*. s.l. : CRC Press, 2008.

Labuschagne, Casper; Merwe, Izak van der. 2007. A Comparison Between High-Impedance and Low-Impedance Restricted Earth-Fault Transformer Protection. *Schweitzer Engineering Laboratories and Eskom Enterprises*. [Online] 2007. www.selinc.com.

Lee, Ralph. 1982. The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May/June, vol 1 A-18, no. 3 de 1982, p. 246.

Lee, Wei-Jen. 2009. A Novel Approach for Arcing Fault Detection for Medium/Low-Voltage Switchgear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45 - No 4. July/August de 2009.

Linders, John. 1995. Relay Performance Considerations with Low-Ratio CT's and High-Fault Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March/April, vol 31, no. 2 de 1995.

Littelfuse, Inc. 2012. Ground-Fault Protection in Variable Frequency Drives. *Site da Littelfuse Inc*. [Online] February de 2012. www.littelfuse.com.

Locker, Antony S. e Scarborough, Mark S. 2009. Advancements in Technology Create Safer & Smarter HRG Systems. *IEEE Paper no. ESW2009-27, 2009*. 2009.

Malmedal, Keith e Sen, P. K. 2000. Arcing Fault Current and the Criteria for Setting Ground Fault Relays in Solidly Grounded Low Voltage Systems. *IEEE Annual Meeting, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, FL., USA*. 2000.

Mardegan, Cláudio. 2012. *Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais*. s.l. : Atitude Editorial, 2012.

Mayer, Bruce. 2004. Directional Ground and Sensitive Ground Fault Settings, Cooper Form 5 and Form 6 Controls and Idea Relay, Three-Wire Distribution Systems. *site da Cooper Power Systems, Cooper Industries, Inc*. [Online] 2004. www.cooperpower.com.

Merlin Gerin. Protection of Property: Fire Hazards. [Online]

Ministério do Trabalho, NR-10. NR-10 - Norma Regulamentadora 10, de Segurança e Saúde no Trabalho.

Mozina, Charles. 2009. *15 Years of Experience with 100% Generator Stator Ground Fault Protection - What Works, What Doesn't and Why.* Austin, Texas : IEEE, 2009. pp. 92-106.

Mozina, Charles J. 2011. *Improvements in Protection and Commissioning of Digital Transformer Relays at Medium Voltage Industrial Facilities.* Baltimore : IEEE, 2011. pp. 1-10.

Nelson, John P. e Sen, Pankaj K. 1999. High-Resistance Grounding of Low-Voltage Systems: A Standard for the Petroleum and Chemical Industry. *IEEE Transactions on Industry.* July/August de 1999, pp. 941-948.

Nelson, John P. 2002. System Grounding and Ground-Fault Protection in the Petrochemical Industry: A Need for a Better Understanding. *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, No.6.* November/December de 2002.

NFPA-70. 2004. NFPA-70 - Standard for Electrical Safety in the Workplace. 2004.

Novak, Thomas. 2001. The Effects of Very-High-Resistance Grounding on the Selectivity of Ground-Fault Relaying in High-Voltage Longwall Power Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications.* March/April de 2001, pp. 398-406.

Novak, Thomas, Morley, Lloyd A. e Trutt, Frederick C. 1988. Sensitive Ground-Fault Relaying. *IEEE Transactions on Industry Applications.* September/October de 1988, pp. 853-861.

Owen, Edward L. 1997. The Historical Development of Neutral-Grounding Protection. March/April de 1997.

Panetta, Sergio e Shipp, David D. 2009. Addressing Ground Faults on MV Generators – A hybrid grounding system design allows flexibility. *EC&M - Electrical Construction and Maintenance Magazine.* July de 2009.

Paul, Dev and Venigopalan, S. I. 1991. Low-Resistance Grounding Method for Medium Voltage Power Systems. *IEEE.* 1991, pp. 1571-1578 vol 2.

Paulson, G.E.; Dudiak, J.J. 1995. Ground-Fault Protection and Ground-Conductor Monitoring for Portable Mine-Power Cables. *site da Littelfuse Startco Inc.* [Online] 1995. www.littelfuse.com.

Paulson, Garry E. e Savostianik, Mervin J. 2003. Monitoring Neutral-Grounding Resistors - Un Update. *Littelfuse Startco.* [Online] July de 2003.

- Pillai, Prafulla e al, et. 2003.** *Grounding and Ground Fault Protection of Multiple Generator Installations on Medium-Voltage Industrial and Commercial Power Systems – Part 3: Protection Methods.* s.l. : IEEE/IAS Working Group Report, 2003.
- Power Transformer Characteristics and Their Effect on Protective Relays.* **Mekic, Fahrudin et al. 2006.** s.l. : ABB, 2006. 33rd Western Protective Relay Conference.
- Rocha, Geraldo. 2011.** Arc-Flash Protection for Low- and Medium-Voltage Panels. *Paper no. PCIC-2011-25 – IEEE.* 2011.
- Savostianik, M. 2000.** Lowering the Limits for Earth-Fault Detection. *Littelfuse Startco.* [Online] 2000.
- Schneider Electric. 2008.** Low Voltage VIGIREX – Residual-Current Protection Relays. *Vigirex.* [Online] 2008.
- Schweitzer Engineering Laboratories. SEL-849.** *Schweitzer Engineering Laboratories.* [Online] www.selinc.com.br/produtos/SEL-849.aspx.
- Senior Engenharia Ltda.** Limitação e Supervisão de Correntes de Curto-Circuito Fase-Terra em BT e MT - Senior Engenharia Ltda. [Online] www.seniorengenharia.com.br.
- Shipp, David. 2010.** State-of-the Art Medium Voltage Generator Grounding and Ground Fault Protection of Multiple Generator Installations. s.l. : Eaton Electrical, 08 de 06 de 2010.
- Smith, L. Robert. 1982.** Practical Low Voltage Equipment Ground fault Protection for Solidly Grounded Systems with Wye-Connected Source Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications.* March/April de 1982, pp. 93-103.
- Taj, B. Nim. 1991.** Comparison of Low-Impedance Restricted Earth Fault Protection in Power Transformer Numerical Relays. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences.* 1991.
- Tripping with the Speed of Light: Arc Flash Protection.* **Wilson, Robert A. et al. (ABB Inc.). 2007.** College Station, TX, USA : IEEE, 2007. IEEE Protective Relay Engineers, 60th Annual Conference for. pp. 226-238.
- Turner, Steve. 2011.** Protecting Large Machines from Arcing Faults. 2011.
- Valdes, Marcelo, Papallo, Tom e Premerlani, Bill. 2007.** Ground Fault Location in Low-Voltage High-Resistance Grounded Systems Via the Single-Processor Concept for Circuit Protection. *IEEE Industry Application Magazine.* September/October de 2007.

Yu, Luke. 1991. Selection of System Neutral Grounding Resistor and Ground Fault Protection for Industrial Power Systems. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Application Society, 38th Annual Meeting, Toronto, ON, Canada.* 9-11 de September de 1991, pp. 147-153.

Zocholl, Stanley E. 2004. *Análise e Aplicação de Transformadores de Corrente.* s.l. : Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 2004.

ANEXO – LISTA E SIGNIFICADO DE TERMOS TÉCNICOS

<i>Arc-Flash</i> ou <i>Arc</i>	Arco Elétrico
<i>Arcing Fault</i>	Falha por Arco Elétrico
<i>Backup protection</i>	Proteção de retaguarda
<i>Bolted Ground Fault</i>	Falta Sólida ou Sustentada à Terra
<i>Bolted Short-Circuit</i>	Curto-Circuito Sólido
<i>Bonding</i>	Junção ou conexão elétrica entre duas peças metálicas (de equipamentos) que necessitam ser eletricamente contínuas, mas que não necessariamente transportam corrente (vide “ <i>earth conductor</i> ”) em operação normal, mas garantem a condução segura de qualquer corrente imposta devido a uma operação anormal do sistema elétrico
<i>Broken Delta</i>	Delta Aberto (usado, aqui, para TPs conectados em delta)
<i>Burden</i>	Carga ou impedância ligada ao secundário de um transformador de corrente ou de potencial representada pelos relés, medidores e fiação e expresso em ohms ou volt-ampere
<i>Transformer Differential Protection</i>	Proteção diferencial de transformador baseado na medição das correntes de entrada e saída que, no caso de desequilíbrio, opera um relé diferencial (ANSI 87T)
<i>Carbonous Fault</i>	Falta de arco carbonizante (aqui: em enrolamento de máquinas elétricas girantes)
<i>Charging Current</i>	Corrente de Carga Capacitiva do sistema elétrico (no contexto deste trabalho). Corrente que flui num capacitor quando uma tensão é primeiramente aplicada
<i>Circuit breaker (CB)</i>	Disjuntor
Corrente de “ <i>Charging</i> ” Total	Corrente capacitiva total ($3I_{C0}$) em relação ao terra de um sistema não aterrado
Corrente de Fuga (à Terra)	Corrente que flui das partes vivas da instalação para terra na ausência de uma falha de isolamento (“ <i>Leakage Current</i> ”, “ <i>Courant de Fuite</i> ”)
Correntes Dispersas	Parcela das correntes de retorno que, pelo menos em parte do seu percurso, flui por outros meios que não são aqueles do circuito de retorno, tais como tubulações e blindagens (“ <i>stray currents</i> ”, “ <i>courants vagabonds</i> ”)
Corrente Residual	Valor eficaz da soma vetorial das correntes que fluem pelo circuito principal de um dispositivo diferencial-residual (“ <i>residual current</i> ”, “ <i>courant résiduel</i> ”)
<i>Downstream</i>	À Jusante
<i>Earthing</i>	Aterramento que garante a segurança e proteção de equipamentos e seres humanos através da descarga de energia elétrica à terra
<i>Earth Conductor</i>	Condutor que fornece uma conexão elétrica entre partes

	metálicas de equipamentos que não servem normalmente para transportar corrente elétrica à terra, mas que podem eventualmente conduzir uma corrente de falta de forma segura à malha de terra, de forma a proporcionar proteção ao ser humano
<i>Effectively Grounded</i>	Efetivamente aterrado (através de uma baixa resistência de forma que uma falta à terra não produza tensões elevadas)
<i>Electromagnetic Compatibility</i>	“ <i>Electromagnetic Compatibility</i> ”, ou CEM – Compatibilidade Eletromagnética: definida como a aptidão de um dispositivo, de um aparelho ou um sistema, de funcionar em seu ambiente eletromagnético de modo satisfatório e sem produzir ele próprio, perturbações eletromagnéticas que possam criar problemas graves no funcionamento dos aparelhos ou dos sistemas situados em seu ambiente
<i>Equipment Ground(ing)/Earthing</i>	Conexão à terra de equipamento
<i>Fault</i>	Falta; aqui: uma falha parcial ou total no isolamento de um condutor elétrico ou perda da continuidade de um circuito entre duas ou mais fases ou entre uma fase e a terra
<i>Gap (between busbars)</i>	Distância ou espaçamento de separação (entre barramentos)
<i>Generator Step-Up Transformer (GSU):</i>	Transformador que aumenta a tensão do gerador ao nível de tensão do sistema elétrico
<i>Grounding Conductor</i>	Condutor de aterramento de um circuito ou de um sistema, intencionalmente aterrado a uma malha de terra, através de um condutor de neutro, ou através do circuito de retorno de neutro, ou através de condutor de aterramento de um equipamento
<i>Ground Fault (GF)</i>	Falta à Terra
<i>Ground Fault Neutralizer</i>	Neutralizador de falta à terra, que provê uma componente indutiva da corrente de falta à terra que é igual à componente capacitiva da corrente de falta à terra, tornando assim o sistema aterrado por ressonância
<i>Ground Grid</i>	Malha de Terra (igual a “ <i>Grid Mat</i> ”, “ <i>Earth Mat</i> ”, “ <i>Earth Grid</i> ”)
<i>Ground Protective Relay ou Ground Fault Relay (“GFR”):</i>	Relé de Proteção de Terra (igual a “ <i>Earth Protective Relay</i> ”)
<i>Ground-Return</i>	Esquema de proteção de retaguarda em relação às proteções principais de fase ou de terra à jusante, utilizado nos sistemas solidamente aterrados através de um relé de sobrecorrente temporizado (51N) acoplado a um TC no neutro do secundário de um transformador
<i>Ground-Sensor (GS ou GSR)</i>	Proteção de Terra que envolve todos os condutores, através de acoplamento magnético, conhecida também por “ <i>zero sequence sensor (ZSTCs)</i> ”, “ <i>core balance zero sequence CT</i> ”, ou por “ <i>core balance CTs</i> ”
<i>Grounding</i>	Aterramento (de neutro, ou do caminho de retorno) de parte viva do sistema elétrico à terra ou ao neutro do transformador de potência, fornecendo um potencial de referência, que não

	é necessariamente o potencial de terra
<i>Grounding Transformer</i>	Transformador de Aterramento usado para prover um ponto de neutro para fins de aterramento
<i>Incident Energy</i>	Energia Incidente (sobre o operador devida ao risco de arco elétrico)
<i>Inverter</i>	Inversor (de frequência), também denominado por “ASD” ou “VFD”
<i>Inrush Current</i>	Corrente de magnetização (aqui: corrente de energização de transformador, ou de motor)
<i>Instantaneous Relay</i>	Relé Instantâneo
<i>Intermittent Ground Fault</i>	Falta à Terra Intermitente, caracterizada por uma corrente de falta à terra descontínua devida aos contatos de fase à terra repetitivos possivelmente devido à vibração. O contrário deste tipo de falta é a “falta à terra sólida ou sustentada” (“ <i>bolted ground fault</i> ”)
<i>Leakage Current</i>	vide “Corrente de Fuga (à Terra)”
<i>Let-Through Current</i>	É a corrente a que está sujeito o equipamento (corrente nominal de suportabilidade do equipamento) e que passa através do dispositivo de proteção, enquanto o mesmo estiver interrompendo a falta, medida pela corrente de pico (“ <i>peak let-thru current</i> ”, I_p) e pela energia joule I^2t
<i>Neutral Grounding (Resistor)</i>	(Resistor de) Aterramento de Neutro (“NGR”)
<i>Nuisance Tripping</i>	Disparo Intempestivo
<i>Overcurrent Relay</i>	Relé de Sobrecorrente (51)
<i>Overvoltage</i>	Sobretensão
<i>Out-of-Phase Reclosing</i>	Re-energização fora de fase (do motor)
Par casado (“TC/relé”)	Denominação usada (aqui) para projeto de TC toroidal e de relé de terra associado, de forma que o conjunto seja projetado e testado para responder, de forma eficiente, aos curtos F-T especificados, e desde que as condições de instalação sejam obedecidas
<i>Pick-up current</i>	Corrente de operação ou disparo do relé
<i>Relay Coordination</i>	Seletividade entre relés de proteção
<i>Residually-Connected Ground-Fault Relay:</i>	Relé Residual de Terra conectado ao secundário através de 3 TCs e que vê somente a corrente residual de desequilíbrio decorrente de uma falta à terra
<i>Restricted Earth Fault (REF) Protection:</i>	Proteção (Diferencial) de Falta à Terra Restrita
<i>Rectifier</i>	Retificador
<i>Retrofit</i>	Adequação de equipamentos e do sistema elétrico diante de novas exigências e condições de projeto
<i>Slope</i>	Declividade ou inclinação (de uma reta)
<i>Stray Currents</i>	vide: “Correntes Dispersas”
<i>Stress Shield</i>	Blindagem anti-estresse (de campo eletromagnético)

<i>Sympathetic Tripping</i>	Disparo Solidário
<i>Through-Fault Current</i>	Num dispositivo de proteção: corrente detectada pelo dispositivo devida a uma falta à jusante dentro de sua zona de proteção na qual não deve responder, exceto numa base de temporização ou como função de retaguarda; Num dispositivo de proteção diferencial: corrente detectada pelo dispositivo devida a uma falta externa em relação à sua zona de proteção, na qual o dispositivo não deve responder
<i>Through-fault protection curves (for transformers):</i>	Curvas de limite térmico (de transformadores) para suportar os efeitos térmicos e dinâmicos de curto-circuitos à jusante, evitando danos ou diminuição considerável de sua vida útil
<i>Time Delay Relay</i>	Relé Temporizado
<i>Tracking Current</i>	Corrente de “arvoreamento”, ou de fuga superficial (à terra)
<i>Transformer Gap</i>	Entreferro de Transformador
<i>Transformer Through-Fault Curves</i>	Curvas de suportabilidade térmica e mecânica de transformadores para as correntes de sobrecarga e de curto-circuito e que devem ser comparadas com as curvas dos dispositivos de proteção (“ <i>through-fault protection curves</i> ”)
<i>Trip, tripping</i>	Disparo ou operação do disjuntor motivado pela operação de um comando ou por um relé de proteção
<i>Toroid</i>	Toroide (aqui: TC toroidal)
<i>Treeing</i>	“Arvoreamento” ou condução superficial de corrente através de uma superfície que se tornou condutiva devido à deposição de poeira ou agentes contaminantes, ou devido à falhas no corpo do isolador (“ <i>Cracking</i> ”)
<i>Ungrounded System</i>	Sistema (de neutro) Isolado ou Não Aterrado
<i>Upstream</i>	À Montante
<i>UV detector</i>	Detector de luz ultra-violeta (aqui, para detecção de arco elétrico)
<i>Window CT</i>	TC (Transformador de Corrente) tipo janela (“ <i>ring-type CT</i> ”)