

Capítulo VIII

Aterramento híbrido para geradores e fatores de influência na escolha do tipo de aterramento

Por Cláudio Mardegan*

ATERRAMENTO HÍBRIDO PARA GERADORES

Historicamente, o aterramento de turbo-geradores através de resistência de alto valor era a maneira mais confiável. Entretanto, registros de ocorrências relataram que muitos geradores queimavam o rotor para faltas à terra quando o curto-circuito ocorria entre o gerador e o primeiro disjuntor após o gerador e quando a falta à terra era limitada a um valor acima de 10 A. Essas observações foram realizadas pelo meu amigo e engenheiro americano David Shipp, o qual é o Chairman do Grupo de Trabalho sobre aterramento híbrido para geradores.

A Figura 1 seguinte ilustra o princípio de funcionamento deste tipo de aterramento.

O aterramento híbrido é composto pela associação em paralelo de um sistema aterrado por resistência de baixo valor com um sistema aterrado por resistência de alto valor. Obviamente, nesta condição, o sistema é aterrado por resistência de baixo valor, pois na associação em paralelo de duas impedâncias, a impedância resultante será menor que a menor delas, que no caso é a resistência de baixo valor. Quando ocorre um curto-circuito entre o gerador e o disjuntor, a proteção diferencial de terra 87 GN irá promover o desligamento instantâneo do disjuntor do gerador, porém, o curto-circuito fase-terra não é eliminado até que a máquina primária (turbina, motor) desligue o sistema. É neste intervalo que o rotor das máquinas queimava. Neste esquema, a proteção 87 GN, além de desligar o disjuntor, desliga também o contator que fica em série

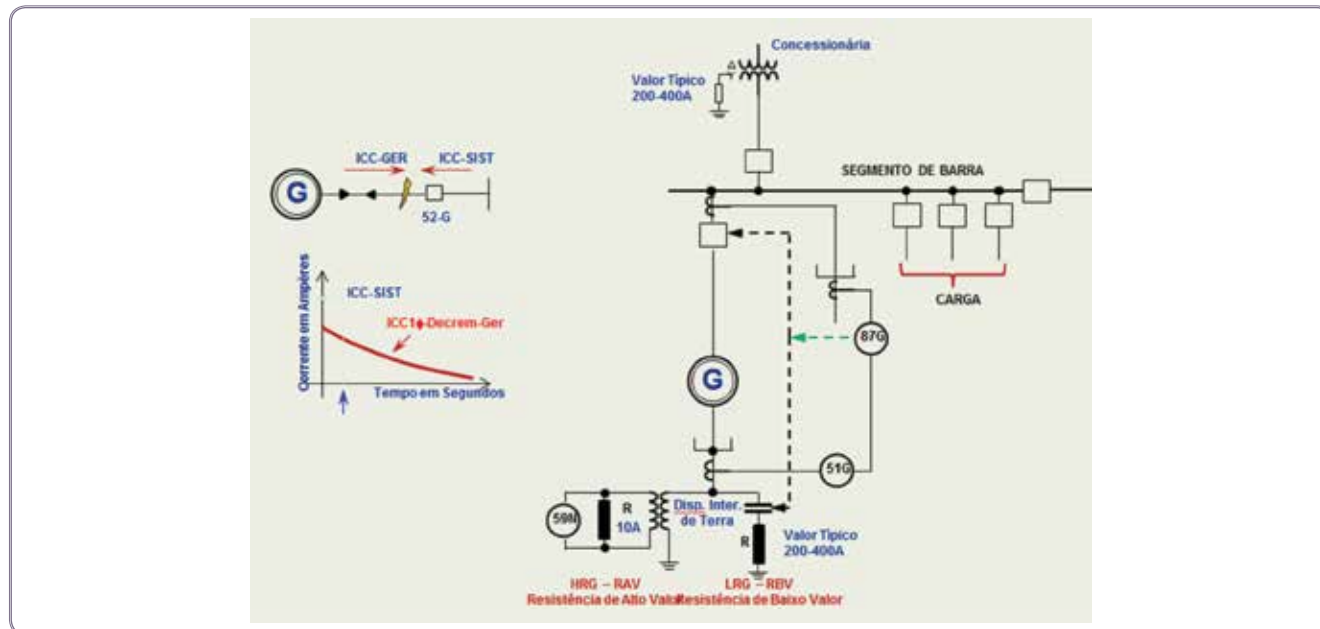


Figura 1 – Aterramento híbrido de gerador.

com o resistor de baixo valor, ou seja, o sistema fica apenas com o aterramento de alto valor, limitando o curto-circuito fase-terra em 10 A, evitando, desta maneira, a queima do rotor. Este sistema tem a vantagem, também, de ficar mais sensível para faltas mais distantes do gerador, uma vez que a contribuição do gerador para uma corrente de falta à terra à frente do disjuntor do gerador terá valor maior, no entanto, limitado pelo resistor de baixo valor do gerador.

FATORES DE INFLUÊNCIA NA ESCOLHA DO TIPO DE ATERRAMENTO

Nenhum dos métodos é perfeito e os fatores que interferem na escolha são:

- ▶ Nível de tensão do sistema;
- ▶ Possibilidades de tensões transitórias;
- ▶ Tipos de equipamentos instalados no sistema;
- ▶ Continuidade operacional;
- ▶ Métodos utilizados no sistema existente;
- ▶ Disponibilidade de ponto de aterramento conveniente;
- ▶ Prescrições normativas;
- ▶ Custo dos equipamentos (incluindo manutenção e dispositivos de proteção);
- ▶ Segurança (incluindo risco de choque e incêndio);

- ▶ Níveis de danos toleráveis devido às faltas;
 - ▶ Efeitos dos afundamentos de tensão durante as faltas.
- Para um aprofundamento no assunto, recomenda-se consultar IEEE Std 142.

RESUMO

(a) Sistema solidamente aterrado

Este método é utilizado em sistemas de distribuição, pois além facilitar a localização da falta, não diminui o valor da corrente de falta à terra.

(b) Sistema aterrado por resistência de baixo valor

Este método é utilizado quando existem máquinas girantes no nível de tensão e assim, num curto entre-espiras, a energia liberada não afeta a chaparia das máquinas. É usado também em média tensão para a proteção da blindagem dos cabos, na ocorrência de uma falta à terra.

(c) Sistema aterrado por resistência de alto valor

É utilizado este método quando se deseja um alto grau de confiabilidade, ou seja, disponibilidade de energia. É importante frisar que valores de resistência de aterramento muito elevados (corrente limitada a 50 A ou menos), em média tensão, dificulta



www.romagnole.com.br

SUBESTAÇÃO UNITÁRIA COMPACTA

SOLUÇÃO SIMPLES E VANTAJOSA



- Equipamentos integrados e prontos para conexão em campo;
- Baixo custo e tempo reduzido de instalação/start-up;
- Ocupação de espaço reduzido e eficiente;
- Transformadores dentro do PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem);

- Testes em fábrica;
- Baseado no conceito Plug and Play;
- Garantia de funcionamento do conjunto.



TABELA 1 – DEFINIÇÃO DOS DIVERSOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Classes de Formas de Aterramento	Relações de Parâmetros de Corrente de Falta Fase-Terra					
	Componentes Simétricas (Nota 1)			(%) (Nota 2)	Transitória PU (Nota 3)	Referência
A - Efetivamente (Nota 4)	$X_0/X1$	$R_0/X1$	R_0/X_0			
1 - Efetivamente	0 a 3	0 a 1	-	> 60	≤ 2	B3
2 - Muito Efetivamente	0 a 1	0 a 0.1	-	> 95	< 1.5	
B - Não Efetivamente						
1- Indutância						
Baixa Indutância	3 a 10	0 a 1	-	> 25	< 2.3	B3
Alta Indutância	> 10		< 2	< 25	≤ 2.73	B3
2 - Resistência						
Baixa Resistência	0 a 10		≥ 2	< 25	< 2.5	
Alta Resistência (Nota 8)		> 100	≤ (-1)	< 1	≤ 2.73	B7, B17
3 - Indutância e Resistência	> 10	-	> 2	< 10	≤ 2.73	
4 - Ressonante (Nota 5)		-	-	< 1	≤ 2.73	
5 - Capacitância não aterrada						
Faixa A (Nota 6)	-∞ a -40	-	-	< 8	≤ 3	B6, B20
Faixa B (Nota 7)	-40 a 0	-	-	> 8	> 3	B6, B20

Notas:

- 1 - Na referência [126] são apresentadas os valores do COG para várias relações diferentes de $R1/X1$. O COG afeta a especificação dos Pára-raios.
- 2 - Corrente de falta fase-terra em porcento do valor da corrente de curto-circuito trifásica.
- 3 - Tensão transitória fase-terra, que ocorre logo após uma falta, em pu de crista da tensão de operação pré-falta fase-terra.
- 4 - Em circuitos lineares, a Classe A1 limita o valor da tensão fase-terra fundamental nas fases sãs a 138% da tensão pré-falta. Na classe A2 estão limitadas a menos de 110%.
- 5 - Veja Wilhelm e Waters e as precauções prescritas no IEEE Std C62.92.2-1989, C6292.3-1993, C62.92.4-1991 e C62.92.5-1992.
- 6 - Sistema com neutro normalmente isolado (não aterrado), para o qual a reatância de sequência zero é capacitiva (negativa).
- 7 - Refira ao item 7.6 da norma IEEE Std C62.92.1. Cada caso deve ser avaliado individualmente.
- 8 - Em sistemas aterrados por resistência de alto valor, os valores de R_s , X_s e X_n são desprezíveis comparados com R_n e X_{cg} .

muito a seletividade cronológica. É usado também em média tensão para a proteção da blindagem dos cabos, na ocorrência de uma falta à terra.

(d) Sistema de aterramento híbrido para geradores

Este método é normalmente utilizado para máquinas de potência a partir de 5 MVA devido ao seu valor. O sistema funciona como um sistema aterrado por resistência de baixo valor (LRG) para faltas à terra a partir do disjuntor do gerador e funciona como um sistema aterrado por resistor de alto valor (HRG) para faltas à

terra entre o gerador e o primeiro disjuntor, neste caso, a corrente é limitada a 10 A para garantir a proteção do gerador.

A definição dos diversos tipos de sistemas de aterramento em função dos parâmetros dos circuitos de sequência, segundo a norma Americana IEEE Std C62.92.1, é apresentada na Tabela 1.

Para uma melhor visualização dos tipos de sistemas de aterramento em função dos parâmetros dos circuitos de sequência, veja a Figura 2.

CRIAÇÃO DE UMA REFERÊNCIA DE TERRA EM UM SISTEMA NÃO ATERRADO

Quando se deseja criar uma referência de terra em um sistema não aterrado, as duas formas mais comumente utilizadas são: (a) Utilização de um autotransformador zigue-zague de aterramento e (b) Utilização de um transformador com o primário em estrela com neutro acessível.

(a) Autotransformador de aterramento Zigue-zague

Emprego

O autotransformador de aterramento destina-se unicamente para conduzir a corrente de sequência zero para a terra, objetivando diminuir o deslocamento de neutro através da diminuição da impedância de sequência zero como também o fornecimento de

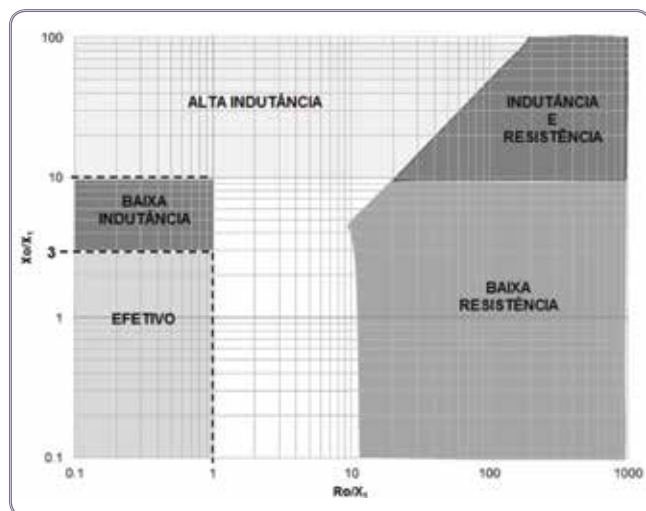


Figura 2 - Definição gráfica dos vários sistemas de aterramento.

uma referência de terra em sistemas não aterrados.

Princípio de funcionamento

O autotransformador de aterramento Zigue-zague possui dois enrolamentos em cada perna do núcleo, no entanto, apenas um enrolamento de cada fase fica em uma perna e o outro fica em outra perna do núcleo. A Figura 3 ilustra o exposto.

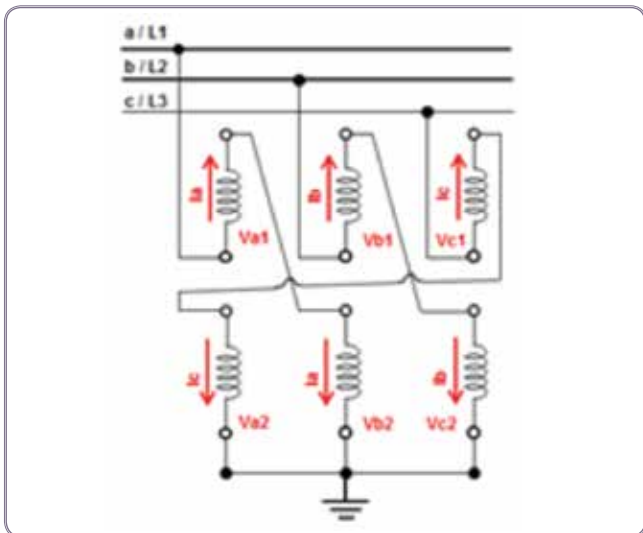


Figura 3 – Autotransformador de aterramento: princípio de funcionamento.

Em condições normais de operação, a única corrente que flui pelo transformador é a corrente de magnetização, necessária para manter as tensões, como indicado na Figura 4. Em outras palavras, a impedância de sequência positiva e negativa são iguais à impedância de magnetização, e em condições normais são muito maiores que as impedâncias do sistema. No diagrama de sequência positiva e negativa, estas impedâncias são, desta forma, consideradas como sendo infinitas.

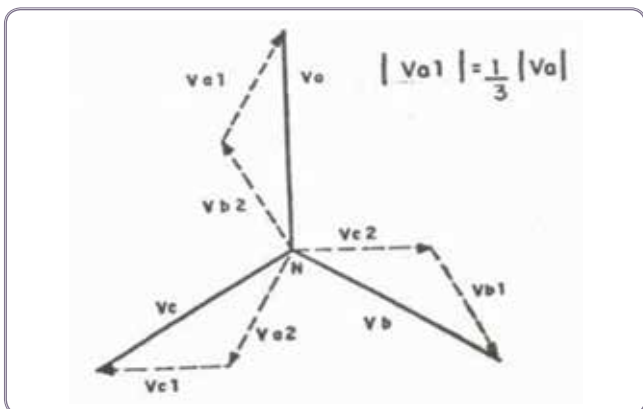


Figura 4 – Diagrama vetorial das tensões de sequência num autotransformador Zigue-zague em regime.

Em condições de falta à terra (uma das fases vai à terra), a corrente de sequência zero será igual e contrária em cada um dos enrolamentos de uma mesma perna e, assim, aparecerá uma impedância de dispersão entre cada dois enrolamentos de uma mesma perna. Veja a Figura 5.

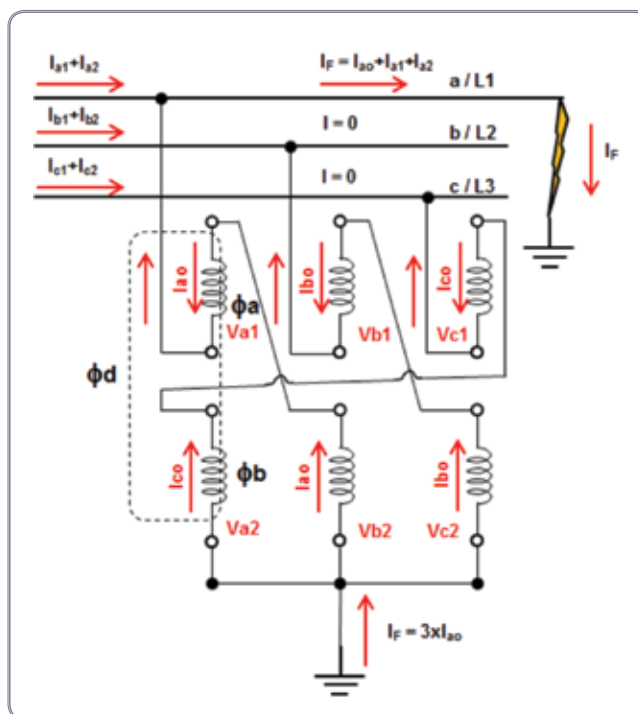


Figura 5 - Autotransformador de aterramento Zigue-zague sob falta.

Conforme observado na Figura 5, somente a corrente de sequência zero encontra caminho através do autotransformador de aterramento. A corrente de falta será:

$$I_F = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

Sabe-se ainda que para a condição de falta à terra:

$$|I_{a0}| = |I_{a1}| = |I_{a2}|$$

As componentes de corrente de sequência positiva e negativa têm seu caminho através do sistema e anulam nas fases sem defeito.

Nas fases sem defeito:

$$\begin{aligned} I_b &= 0 & I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} = 0 & I_{b1} + I_{b2} &= -I_{b0} = -I_{a0} \\ I_c &= 0 & I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} = 0 & I_{c1} + I_{c2} &= -I_{c0} = -I_{a0} \end{aligned}$$

Cálculo da corrente de falta à terra com autotransformador de aterramento

O valor da corrente de falta à terra com o autotransformador de aterramento é feito utilizando-se a equação a seguir.

$$I_F = \frac{3E}{Z_{1S} + Z_{1S} + Z_0}$$

Em que:

- IF = Corrente de falta à terra;
- E = Tensão fase-terra do sistema;
- Z_{1S} = Impedância de sequência positiva do sistema;
- Z_{2S} = Impedância de sequência negativa do sistema;

Z_{0S} = Impedância de sequência zero do sistema;
 Z_{0T} = Impedância de sequência zero do autotransformador zig-zague;
 R_G = Resistência do neutro do autotransformador zig-zague.

Condições particulares de Z0

- a1) Sistemas não aterrados → $Z_0 = Z_{0T}$
- a2) Sistemas aterrados → $Z_0 = (Z_{0S} \times Z_{0T}) / (Z_{0S} + Z_{0T})$
- a3) Resistência no neutro do autotransformador de aterramento
 → $Z_0 = 3.R_G + j X_{0T}$

Especificação do autotransformador de aterramento Zig-zague

Para a especificação do autotransformador de aterramento, duas informações são necessárias:

- a1) Corrente de curto-circuito fase-terra desejada
- a2) Nível máximo de sobretensão nas fases sem defeito

Especificação da impedância de sequência zero do autotransformador de aterramento

- a1) Corrente de curto-circuito fase-terra desejada

A impedância Z_{0T} sai da equação abaixo:

$$Z_{0T} = \frac{3E}{Z_F} - 2 \times Z_{IS}$$

- a2) Nível máximo de sobretensão nas fases sem defeito

Para esta condição, a sobretensão máxima na fase sem defeito é obtida da equação abaixo:

$$V_{FT} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \times FS$$

$$FS = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{K-1}{K+2}\right)^2 + \frac{3}{4}}$$

$$K = \frac{X_0}{X_1}$$

TABELA 2 – FATORES DE SOBRETENSÃO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO X_0/X_1

$K = (X_0/X_1)$		FS
1	*	1.0000
2	*	1.1456
3	*	1.2490
4		1.3229
10		1.5207
20		1.6154
INFINITO		1.7321

* Sistema eficazmente aterrado, desde que: $R_0/R_1 \leq 1$

Assim, a partir do fator de sobretensão, acha-se K. Como se conhece X_1 , obtém-se X_0 .



Especificação básica do autotransformador

Z_{0T} = Impedância do transformador expressa em Ω / fase;

I_0 = Corrente de sequência zero do autotransformador de aterramento, expresso em A/fase, lembrando que $I_0 = I_F / 3$;

R_G = Resistência de aterramento autotransformador expressa em Ω ;

kVA_{CC} = Potência de curto-circuito do autotransformador zigue-zague, sendo:

$$KVA_{CC} = \sqrt{3} \times E \times I_0$$

$$KVA_{CC} = 3 \times E_{FT} \times I_0$$

$$KVA_{CC} = E_{FT} \times I_F$$

kVA = Potência nominal equivalente do autotransformador de aterramento. Esta potência faz a equivalência do autotransformador de aterramento com os transformadores de dois enrolamentos comuns. Como os autotransformadores de aterramento são construídos para suportarem a condição de curto-circuito por curto período de tempo (de dez segundos a cinco minutos), os kVA s nominais do autotransformador não precisam ser iguais ou próximos aos kVA_{CC} .

$$kVA = k3 \times KVA_{CC} \text{ (autotransformador • zigue-zague • trifásico)}$$

$$kVA = k1 \times KVA_{CC} \text{ (banco de transformadores • zigue-zague • monofásico)}$$

Apresentam-se na Tabela 3 os valores de $k1$ e $k3$.

A norma ABNT NBR 5119 indica a Tabela 4, a qual não diferencia, nem o nível de tensão, nem a conexão e nem se o reator é trifásico ou banco composto de unidades monofásicas

TABELA 4 – CORRENTE NOMINAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE FUNCIONAMENTO NOMINAL

Tempo de funcionamento nominal	Corrente nominal, em regime contínuo, em porcentagem da corrente nominal de curta duração
10s	3
1 minuto	7
10 minutos	30
tempo prolongado	30

O método do Transmission and Distribution Reference Book é mais conservativo do que o método da ABNT NBR 5119, para 10 s e para 1 min em unidades trifásicas. A norma é mais conservativa para 1 min em unidades monofásicas. Para os demais tempos não se pode traçar um paralelo.

Exemplo

Especificar um autotransformador zigue-zague de aterramento para um sistema de 13.8 kV, cuja corrente de curto-circuito seja de 21 kA, para que mantenha uma sobretensão fase-terra nas fases sem defeito de, no máximo, 1.6 vezes a tensão nominal fase terra. O autotransformador de aterramento deverá suportar a falta por 10 segundos.

Solução

O valor da impedância de sequência positiva será:

TABELA 3 – FATORES $k3$ E $k1$ PARA A DETERMINAÇÃO DOS kVA s PARA TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

<i>k3 para Unidades Trifásicas</i>						
Tempo Especificado	Conexão YD	Conexão ZIG-ZAG				
		2.4 a 13.8kV	23 a 34.5kV	46kV	69kV	92kV
10s	-	0.064	0.076	0.08	0.085	0.092
1 minuto	0.17	0.104	0.11	0.113	0.118	0.122
2 minutos	0.24	0.139	0.153	0.16	0.167	0.174
3 minutos	0.295	0.17	0.187	0.196	0.204	0.212
4 minutos	0.34	0.196	0.216	0.225	0.235	0.245
5 minutos	0.38	0.22	0.242	0.253	0.264	0.275
<i>k1 para Unidades Monofásicas</i>						
1 minuto	0.057	0.033	0.037	0.04	0.043	0.046
2 minutos	0.08	0.046	0.051	0.055	0.06	0.064
3 minutos	0.098	0.057	0.064	0.068	0.074	0.08
4 minutos	0.113	0.065	0.073	0.078	0.084	0.091
5 minutos	0.127	0.073	0.082	0.088	0.095	0.102

Nota: Os valores da tabela acima foram calculados tomando-se como base uma temperatura inicial não superior a 75° C, que as perdas de carga estão todas armazenadas no transformador e que a temperatura final não irá exceder o máximo permitido pelas normas.

$$Z_{1S} = X_{1S} = \frac{13,8}{\sqrt{3} \cdot 21} = 0,3794 \Omega$$

$$X_{2S} = X_{1S} = 0,3794 \Omega$$

$$K = X_{0T} / X_{1S}$$

Para um fator de sobretensão de 1.6 o valor de K = 17.395, logo:

$$X_{0T} = K \times X_{1S} = 6,5997 \Omega$$

A corrente de falta à terra será:

A partir da corrente de sequência zero podem-se calcular os kVAcc.

$$I_F = X_{1S} = \frac{3E}{Z_{1S} + Z_{2S} + Z_0} = \frac{3 \times \frac{13800}{\sqrt{3}}}{0,3794 + 0,3794 + 6,5997} = \frac{23902,3}{7,3585} = 3248,3A$$

$$I_0 = X_{1S} = \frac{I_F}{3} = \frac{3248,3}{3} = 1082,8A$$

$$KVA_{CC} = \sqrt{3} \times 13,8 \times 1082,8 = 25880 [kVA]$$

$$k3 = 0,064 (13,8kv - 10s)$$

$$kVA = k3 \times kVA_{CC} = 0,064 \times 25880 = 1656 kVA$$

A especificação do autotransformador de aterramento será:

$$X_{0T} = 6,6 \Omega / fase$$

$$I_0 = 1083 A / fase$$

$$kVA_{CC} = 25880 A$$

$$kVA_N = 1656 kVA$$

$$t = 10 segundos$$

$$V_N = 13,8 kV (entre fases)$$

*Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro eletricista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia, com experiência de mais de 35 anos nesta área. É autor do livro "Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais", patrocinado pela Schneider, e coautor do "Guia O Setor Elétrico de Normas Brasileiras". É membro sênior do IEEE e participa também dos Working Groups do IEEE que elaboram os "Color Books". É Chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Fault Protection e também participa de Forensics.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br



VENDEMOS SOLUÇÕES
Seu problema é nosso desafio

Luminárias a Prova de Explosão

Fabricação própria

Lâmpada ou LED



ATENDE A NR-33

- Ex-d IIB T6 Gb
- Grau de proteção IP66
- LED com potência de 10W a 50W
- Alimentação do LED 30 Vcc
- Corpo em alumínio fundido
- Visor em cristal temperado
- Pintura cinza munsell N6,5

11 4991 1999

vendas@renetec.com.br
www.renetec.com.br

Rua dos Coqueiros, 1250 - Santo André - SP - CEP.: 09080 010
Empresa com S.G.Q. ISO 9001:2008