

Capítulo VI

Transformadores de aterramento Parte II

Paulo Fernandes Costa*

Nos capítulos anteriores, foram tratados os aspectos relativos ao aterramento do neutro em sistemas elétricos industriais, sendo que, especialmente no último, foram abordadas as situações em que os transformadores de aterramento aplicam seus tipos principais e a forma de se calcular suas potências instantâneas e de curto tempo. No presente artigo serão fornecidas informações adicionais sobre o transformador de aterramento na conexão “zigue-zague”, o mais utilizado na atualidade, bem como será vista a metodologia de cálculo de sua reatância, parâmetro este que, senão for fornecido ao fabricante, inviabiliza o seu projeto e fabricação.

Com este artigo encerramos uma sequência prevista de seis capítulos, nos quais foram discutidos aspectos do aterramento do neutro, principalmente de sistemas elétricos industriais. Devido à vastidão e à importância deste tema, não consideramos, de forma alguma, que ele foi esgotado. Pelo contrário, muitos aspectos importantes ainda necessitam ser tratados, mormente se saltarmos para aplicações em outros sistemas elétricos, como os de distribuição e de potência. Àqueles que desejarem aprofundar um

pouco mais sugerimos a leitura das indicações nas referências bibliográficas.

Funcionamento do transformador de aterramento “zigue-zague”

O transformador de aterramento “zigue-zague” é constituído por um núcleo magnético de três colunas, sendo que em cada coluna existem dois enrolamentos iguais, indicados na Figura 1A. O diagrama vetorial da Figura 1B mostra os vetores das bobinas individuais das três colunas, considerando tratar-se de um sistema trifásico. Observa-se neste diagrama que os vetores acompanham as respectivas polaridades estabelecidas para as bobinas, conforme marcado na Figura 1A.

Na conexão da Figura 1A, a primeira bobina do primeiro núcleo é ligada com a segunda bobina do segundo núcleo, sendo esta com a polaridade trocada. A primeira bobina do segundo núcleo é ligada com a segunda bobina do terceiro núcleo, sendo esta de polaridade trocada. Finalmente, a primeira bobina do terceiro núcleo é ligada com a segunda bobina do primeiro núcleo, sendo esta de polaridade trocada.

Quando o transformador é ligado ao sistema trifásico sem falta à terra, forma-se então o diagrama vetorial da Figura 1C, em que as tensões AA1, BB1, CC1, são as tensões

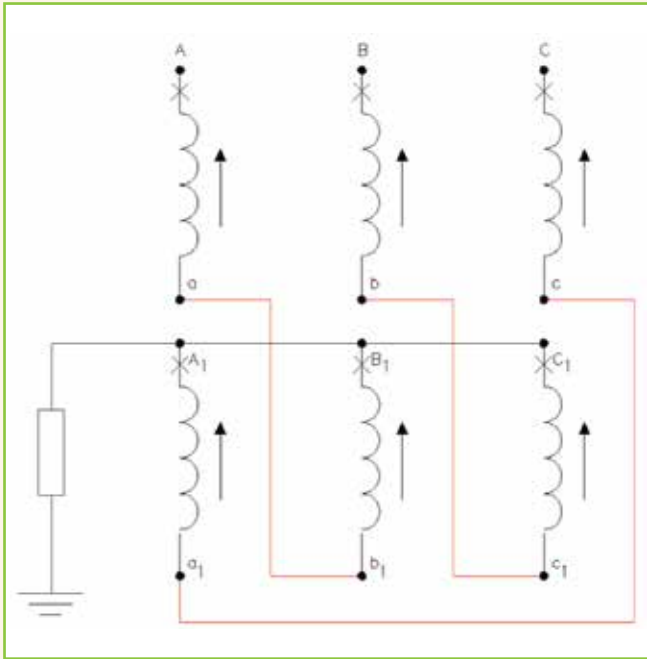


Figura 1A – Diagrama de conexão das bobinas do transformador zig-zague.

de fase para neutro. Pode ser verificado que o transformador funciona na realidade como um reator de alta impedância, pois não existe enrolamento secundário, sendo absorvida somente uma pequena corrente de excitação. As formas de conexão das bobinas e do diagrama vetorial sugerem o nome escolhido de “conexão zig-zague”.

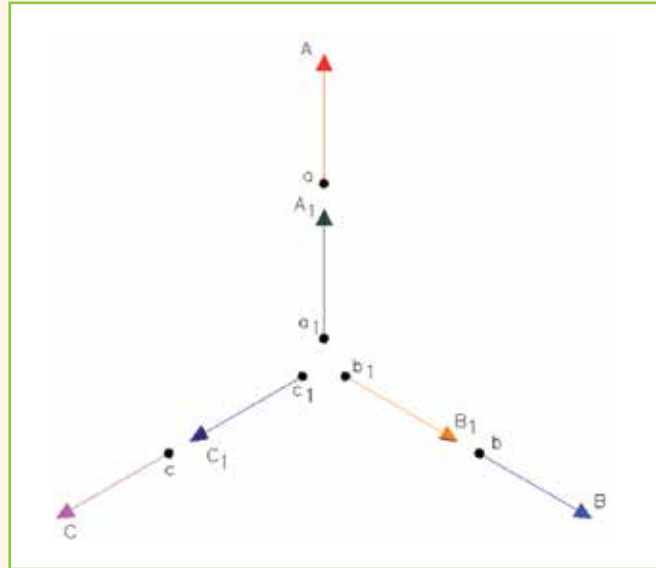


Figura 1B – Diagrama vetorial com as bobinas desconectadas.

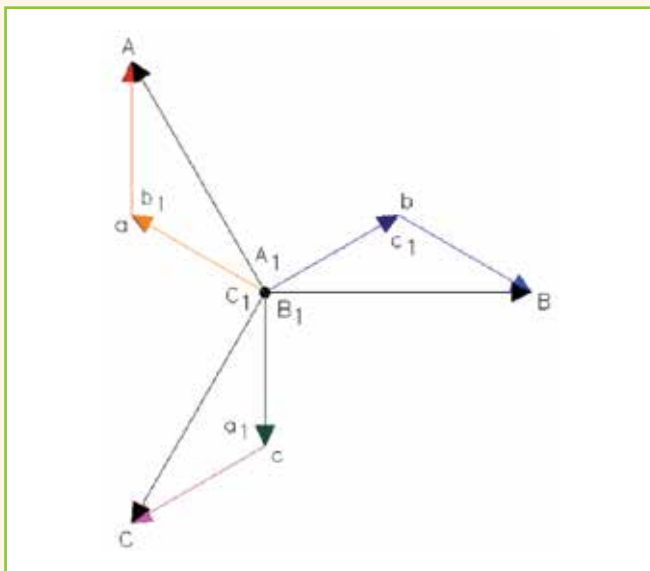


Figura 1C – Diagrama vetorial da conexão da Figura 1A.

Quando ocorre um curto fase-terra no sistema, a situação modifica-se, pois a corrente de falta fase-terra é constituída de três vezes a corrente de sequência zero, isto é, $I_{FT} = 3I_0$. Considerando que as correntes de sequência zero se distribuem como na Figura 2, pode ser visto que em cada coluna do núcleo magnético, o fluxo total, e também o de dispersão, é praticamente nulo, pois as bobinas de uma mesma coluna, que possuem polaridade contrária, são percorridas por correntes iguais em módulo e ângulo.

Esta configuração conduz a um baixo valor de reatância de dispersão, que essencialmente forma a impedância do transformador de aterramento e dos transformadores em

geral. Esta reatância é a reatância de sequência zero do transformador (X_{0T}).

Existem técnicas construtivas que permitem alterar a reatância do transformador de aterramento, de forma que se pode aplicá-lo com baixa ou alta reatância.

Por exemplo, quando se utiliza o neutro do transformador de aterramento aterrado por meio de resistor, deseja-se baixa reatância de sequência zero, para que ela não interfira no nível de curto limitado pelo resistor. Quando o referido neutro é solidamente aterrado, deseja-se obter uma reatância compatível com o nível de curto fase-terra preestabelecido pelo projetista, o qual deve seguir os princípios discutidos no próximo item.

Determinação da reatância de sequência zero do transformador de aterramento

Considerações

Os sistemas trifásicos são suscetíveis de sofrer sobretensões durante períodos de falta à terra, que podem ser classificadas em sobretensões transitórias e sobretensões temporárias.

Quando ocorre um curto fase-terra em uma das fases de um sistema trifásico com neutro isolado, conforme a Figura 3, as correntes resultantes são de natureza capacitiva, que circulam também pelos enrolamentos do transformador, formando um circuito LC. Devido ao baixo valor da corrente capacitiva, esta em geral é intermitente, gerando pequenos

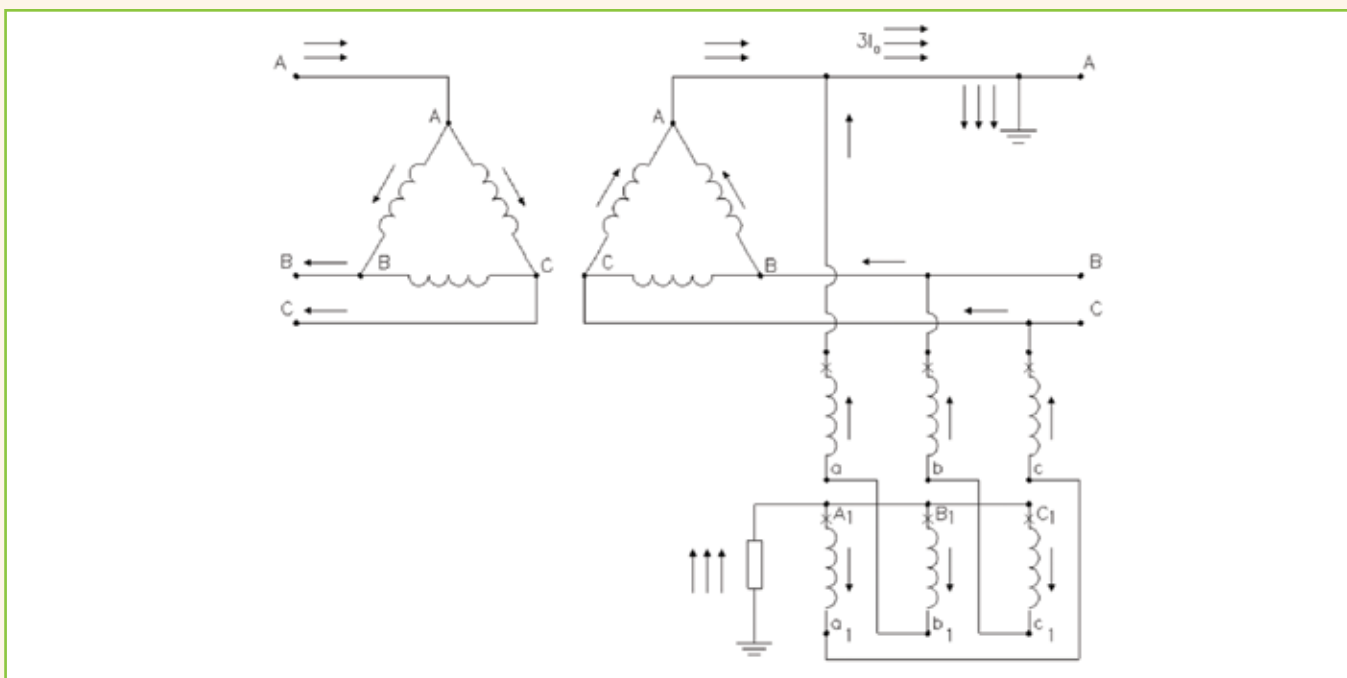


Figura 2 – Circulação das correntes de sequência zero na conexão “zigue-zague”.

arcos elétricos que são de natureza não linear. A corrente gerada possui harmônicas de alto espectro de frequência, que podem então excitar o circuito LC, levando-o à ressonância. As tensões são então amplificadas nas capacitâncias de fase para terra das fases sãs e nas bobinas do transformador.

Devido à intermitência do curto, as tensões amplificadas sofrem um processo de aumento sucessivo, denominado “escalamento”. As tensões amplificadas são as de fase-terra nas fases sãs (fases a, b, na Figura 3, em que o curto fase-terra foi estabelecido na fase c). Quando no processo de escalamento as tensões fase-terra nas fases sãs atingem valores da ordem de 5-6 P.U, ocorre a ruptura da isolação de uma ou das duas para terra (em pontos e equipamentos, tais como motores, cabos isolados, transformadores e outros componentes), que resultam em duplo ou triplo curto à terra, cuja consequência é o desligamento do sistema pela proteção. As tensões geradas no processo de escalamento são denominadas sobretensões transitórias.

O controle das sobretensões transitórias, devido à ocorrência de faltas à terra, é realizado por meio do aterramento do neutro. Com aplicação de resistores no neutro dimensionados conforme teoria exposta nos artigos anteriores, as sobretensões de fase-terra nas fases sãs são controladas de forma que atingem no máximo o valor da tensão de fase-fase, isto é se elevam de $\sqrt{3}$, pois, em regime normal, sem curto fase-terra, estas tensões são iguais em módulo, à tensão fase-neutro.

Os resistores no neutro amortecem o circuito LC considerado anteriormente, de forma que a ressonância é evitada.

Se o neutro é solidamente aterrado, existe um

controle ainda mais efetivo das sobretensões transitórias, e dependendo dos parâmetros do circuito, as tensões das fases sãs para terra não ultrapassam de 80% da tensão fase-fase, no momento do curto fase-terra.

As sobretensões das fases sãs para a terra, que ocorrem no momento de um curto fase-terra em sistemas que possuem o neutro aterrado, de forma a controlar as sobretensões transitórias, são denominadas “sobretensões temporárias”.

Bases para dimensionamento da reatância dos transformadores de aterramento

Tendo em vista o que foi exposto, para que um sistema elétrico trifásico sobreviva durante um curto fase-terra, é necessário no mínimo controlar as sobretensões transitórias.

Com resistor no neutro dimensionado adequadamente, as sobretensões transitórias são eliminadas e as tensões de fase-terra nas fases sãs são controladas e atingem no máximo o valor fase-fase. Nestes sistemas os para-raios utilizados das fases para terra devem ser de tensão nominal fase-fase (tensão plena), denominados “para-raios 100%”.

Quando o neutro é solidamente aterrado, pode-se conseguir que as tensões das fases sãs para terra atinjam no máximo 80% da tensão fase-fase. O sistema é denominado então “efetivamente aterrado” e os para-raios são denominados “para-raios 80%”.

As condições para controlar as sobretensões transitórias, mas utilizando para-raios 100% podem ser resumidas na Tabela 1 a seguir. A demonstração das condições indicadas na tabela pode ser encontrada, por exemplo, na referência [6].

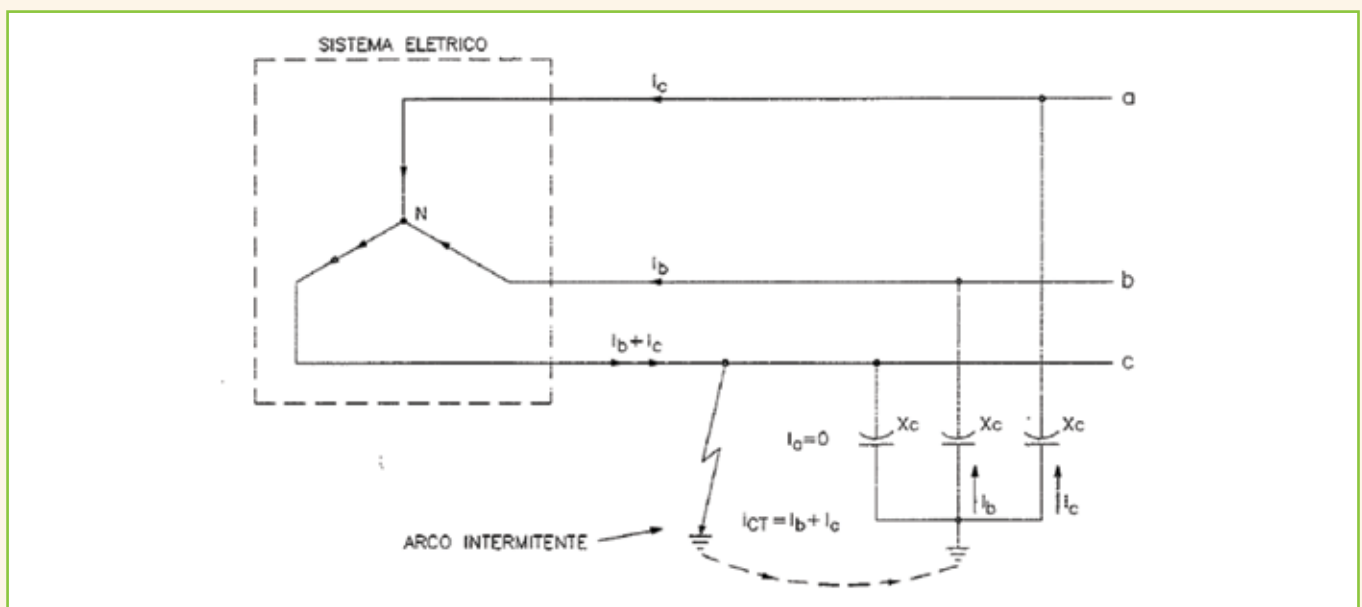


Figura 3 – Circuito de circulação da corrente fase-terra em sistema com neutro isolado.

TABELA 1 – CONDIÇÕES PARA ELIMINAÇÃO DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS UTILIZANDO PARA-RAIOS 100%

MÉTODO DE ATERRAMENTO	CRITÉRIO PARA LIMITAÇÃO DA SOBRECORRENTE TRANSITÓRIA	
	X_0 / X_1	R_0 / X_0
Sólido	≤ 10	Qualquer
Por Resistor	Qualquer	≥ 2
Resistor	≤ 10	Qualquer

As condições para controlar as sobretensões transitórias e ainda utilizar para-raios 80% somente são atingidas em sistemas solidamente aterrados e efetivamente aterrados. Os parâmetros do sistema possuem as relações indicadas na Tabela 2.

TABELA 2 – CONDIÇÕES PARA ELIMINAÇÃO DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS UTILIZANDO PARA-RAIOS 80%

MÉTODO DE ATERRAMENTO	CRITÉRIO PARA LIMITAÇÃO DA SOBRECORRENTE TRANSITÓRIA	
	X_0 / X_1	R_0 / X_1
Sólido	≤ 3	≤ 1

Nas Tabelas 1 e 2 anteriores, os parâmetros X_1 , X_0 , R_0 são as reatâncias de sequência positiva, reatância de sequência zero e resistência de sequência zero, respectivamente, as quais são parte integrante das impedâncias de sequência positiva (Z_1), e zero

(Z_0) que, juntamente com a impedância de sequência negativa (Z_2), são utilizadas para cálculos da corrente de falta à terra e das tensões fase-terra. Z_1 , Z_2 , Z_0 são impedâncias equivalentes de Thévenin, vistas do ponto de falta, que podem ser escritas como:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 ; Z_2 = R_2 + j X_2 ; Z_0 = R_0 + j X_0$$

Nos sistemas de potência (SEP), pode-se considerar $Z_1 = Z_2$ e $R_1 = R_2 = 0$

Exemplo de dimensionamento de transformador de aterramento

Para ilustrar o cálculo da reatância e da potência de um transformador de aterramento, vamos utilizar um sistema de potência, com potência de curto-circuito de 1.000 MVA, na tensão de 138 kV, alimentando um transformador de 20 MVA, 138/69 KV, $Z\% = 8,5\%$, conexão delta-delta, que alimenta uma linha de transmissão de 69 kV com as seguintes características:

$$X_1 = X_2 = 10 \text{ Ohms}$$

$$R_{0L} = 2 \text{ Ohms}$$

$$X_{0L} = 35 \text{ Ohms}$$

Deverá ser instalado um transformador de aterramento na barra de 69 kV do secundário do transformador, barra esta que alimenta a linha de transmissão. O transformador de aterramento será solidamente aterrado e deverá ser dimensionado de forma que possam ser instalados para-raios 100% no final da LT, como primeira solução e para-raios 80%, como segunda solução.

Soluções

Utilizaremos o método P.U., considerando a potencia base de 100.000 kVA (100 MVA), e as tensões nominais em kV dos lados primários e secundário como tensões bases.

Nestas condições as relações básicas para trabalho são as seguintes:

$$kVA_B = \sqrt{3} \text{ kV } I_B; \quad I_B = kVA_B / \sqrt{3} \text{ kV}_B; \quad Z_B = 1.000 kV_B / \sqrt{3};$$

$$I_B = KV_B^2 / MVA_B$$

$$Z_{P.U.} = Z_{Ohm} MVA_B / kV_B^2; \quad Z_{Ohm} = Z_{P.U.} KV_B^2 / MVA_B$$

As impedâncias percentuais dos transformadores são transformadas em P.U ($Z_{T,P.U.}$) pela relação:

$Z_{T,P.U.} = Z\% / MVA_T$, em que MVA_T é a potência do transformador em MVA e $Z\%$ é sua impedância percentual.

A impedância da fonte em P.U ($Z_{F,P.U.}$), é diretamente obtida da relação:

$Z_{F,P.U.} = MVA_B / P_{CCF}$, em que P_{CCF} é a potência de curto-circuito da fonte em MVA.

Caso 1 – Uso de para-raios 100% no final da LT

Aplicando as relações acima e considerando ainda que $Z_1 = Z_2$ e $R_1 = R_2 = 0$ para a fonte e para o transformador, teremos os seguintes valores em P.U.:

Fonte: $X_{1F} = X_{2F} = 100 / 1.000 = 0,1$

Transformador: $X_{1T} = X_{2T} = 8,5 / 20 = 0,425$

Para a LT de 69 kV:

$$X_{1L} = X_{2L} = 10 \times 100 / 69^2 = 0,21$$

$$R_{OL} = 2 \times 100 / 69^2 = 0,042$$

$$X_{OL} = 35 \times 100 / 69^2 = 0,74$$

As impedâncias equivalentes de Thévenin vistas do final da linha são:

$$X_1 = X_{1F} + X_{1T} + X_{1L} = 0,1 + 0,425 + 0,21 = 0,735$$

$$X_O = X_{OL} + X_{OT} = 0,74 + X_{OT}$$

Porém, na primeira hipótese, de utilizarmos para-raios 100%, a condição é:

$$X_O = 10 X_1 = 10 \times 0,735 = 7,35$$

$$X_{OT} = 7,35 - 0,74 = 6,61$$

$$X_{OT(Ohms)} = 6,61 \times 69^2 / 100 = 315 \text{ Ohms}$$

O curto fase-terra, em P.U., no final da linha, valerá:

$$I_{FT} = 3 / (R_O + jX_O + j2X_1) = 3 / (R_O + j10X_1 + j2X_1) = 3 / (R_O + j12X_1)$$

$$I_{FT} = 3 / (0,042 + j12 \times 0,735) = 0,34 \text{ P.U.}$$

$$I_B = 100.000 / \sqrt{3} \times 69 = 837 \text{ A}$$

$$I_{FT} = 0,34 \times 837 = 285 \text{ A}$$

Para calcular a potência do transformador de aterramento, devemos considerar o curto fase terra que ocorre na barra de 69 kV, que apresenta valor superior ao que ocorre no final da linha.

Denominando este curto de I_N , seu valor em P.U será:

$$I_N = 3 / [X_{OT} + 2(X_{1S} + X_{1T})] = 3 / [6,61 + 2 \times (0,1 + 0,425)]$$

$$I_N = 0,39 \text{ P.U.}$$

$$I_N = 0,39 \times 837 = 326 \text{ A}$$

A potência instantânea do transformador de aterramento $P_{TAT(INST)}$ de acordo com o artigo anterior, vale:

$$P_{TAT(INST)} = 326 \times 69 / \sqrt{3} = 12987 \approx 13.000 \text{ kVA}$$

A potência de curto tempo, 10 segundos, $P_{TAT(10S)}$ será:

$$P_{TAT(10S)} = 13.000/10 = 1.300 \text{ kVA}$$

Caso 2 – Uso de para-raios 80% no final da LT

Neste caso, deve ser utilizada a relação da Tabela 2, isto é, $X_0 = 3X_1$. Refazendo os cálculos, segue que:

$$X_0 = 3 X_1 = 3 \times 0,735 = 2,21$$

$$X_{OT} = 2,21 - 0,74 = 1,47$$

$$X_{OT(Ohms)} = 1,47 \times 692 / 100 = 67 \text{ Ohms}$$

O curto fase-terra no final da linha será recalculado da seguinte forma:

$$I_{FT} = 3 / (R_0 + jX_0 + j2X_1) = 3 / (R_0 + j3X_1 + j2X_1) = 3 / (R_0 + j5X_1)$$

$$I_{FT} = 3 / (0,042 + j5 \times 0,735) = 0,776 \text{ P.U}$$

$$I_B = 100.000 / \sqrt{3} \times 69 = 837 \text{ A}$$

$$I_{FT} = 0,776 \times 837 = 650 \text{ A}$$

O curto fase-terra na barra de 69 kV para cálculo da potência do transformador de aterramento vale:

$$I_N = 3 / [X_{OT} + 2(X_{1S} + X_{1T})] = 3 / [1,47 + 2 \times (0,1 + 0,425)]$$

$$I_N = 1,19 \text{ P.U}$$

$$I_N = 1,19 \times 837 = 996 \text{ A}$$

A potência instantânea do transformador de aterramento $P_{TAT(INST)}$, de acordo com o capítulo anterior, vale:

$$P_{TAT(INST)} = 996 \times 69 / \sqrt{3} \approx 39.678 \text{ kVA} \approx 40.000 \text{ kVA}$$

A potencia de curto tempo, 10 segundos, $P_{TAT(10S)}$ será:

$$P_{TAT(10S)} = 40.000/10 = 4.000 \text{ kVA}$$

Conclusão

Neste artigo foram fornecidas informações para transformar um sistema com neutro isolado em neutro

solidamente aterrado, de forma a controlar as sobretensões transitórias e utilizar para-raios 100% ou para-raios 80%. Foi fornecida a metodologia para cálculo dos transformadores de aterramento necessários. Quando é desejado incluir um resistor no neutro do transformador de aterramento a metodologia de calculo deve ser alterada, utilizando as informações da Tabela 1.

O autor agradece aos leitores que leram algum ou todos os artigos da série publicada e se sente feliz em receber comentários.

Referências bibliográficas

- [1] Costa, P.F; “Capitulo I – Aspectos importantes da escolha do tipo de resistor de aterramento do neutro nos sistemas elétricos industriais” Revista Setor Elétrico, Julho 2014.
- [2] Costa, P.F; “Capitulo II - Avanços na especificação e aplicação dos resistores de aterramento do neutro dos sistemas elétricos industriais em média tensão” Revista Setor Elétrico, Agosto 2014.
- [3] Costa, P.F; “Capitulo III - Avanços na especificação e aplicação dos resistores de aterramento do neutro dos sistemas elétricos industriais em baixa tensão”, Setembro 2014.
- [4] Costa, P.F; “Capitulo IV- Aterramento de sistemas elétricos industriais de média tensão com a presença de cogeração”, Revista Setor Elétrico, outubro de 2014.
- [5] Costa, P.F; “Capitulo V- Transformadores de aterramento parte I”, Revista Setor Elétrico, novembro de 2014.
- [6] Costa, P.F; Dissertação de Mestrado “Aterramento do Neutro dos Sistemas de Distribuição Brasileiros: Uma Proposta de Mudança”, UFMG 1995.

*PAULO FERNANDES COSTA é Engenheiro Eletricista e Msc pela Universidade Federal de Minas Gerais, professor aposentado dos cursos de engenharia elétrica da UFMG e CEFET-MG e diretor da Senior Engenharia e Serviços LTDA, Belo Horizonte-MG. É palestrante e autor de vários artigos na área de aterramento, proteção, segurança, qualidade de energia e sistemas elétricos industriais em geral. Atua como consultor, bem como na área de desenvolvimento tecnológico, com experiência de mais de 40 anos. E-mail: pcosta@seniorengenharia.com.br.

FIM

Acesse este e outros capítulos do fascículo “Aterramento do neutro”, em formato PDF, no site www.osetoreletrico.com.br. Dúvidas e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atituedeeditorial.com.br