

Capítulo VII

Sistemas aterrados por resistência de alto valor

Por Cláudio Mardegan*

Em continuidade ao capítulo anterior, este artigo trata de sistemas aterrados por resistência de alto valor (RAV), ou seja, todo sistema que possui a maior resistência possível conectada no neutro do sistema.

c4) TCs e TPs

As tabelas 1 e 2 são baseadas na norma ANSI C37.011-1979 e mostram as faixas dos valores de capacitância de charging de TPs e TCs, respectivamente.

Tabela 1 – TPs

Tensão kV	Entre Fases		Fase-Terra	
	Cmin [pF]	Cmáx [pF]	Cmin [pF]	Cmáx [pF]
15	260	260	-	-
25	250	440	270	800
34.5	310	440	270	900
46	350	430	300	970
69	360	440	340	1300
115	470	520	480	610
138	490	550	530	660
161	510	580	510	700
196	-	-	580	820
230	600	680	600	810
345	-	-	920	920

ANSI C37.011-1979 (Tabela 3)

Tabela 2 – TCs

Tensão kV	Fase-Terra	
	Cmin [pF]	Cmáx [pF]
15	-	-
25	180	260
34.5	160	250
46	170	220
69	170	260
115	210	320
138	-	-
161	310	380
196	330	390
230	350	420
345	-	-

ANSI C37.011-1979 (Tabela 3)

(c5) Protetores de surto

A tabela 3 apresenta os valores das capacitâncias típicas de protetores de surto, por nível de tensão.

Tabela 3 – Protetores de surto

Tensão [V]	3Ico [A]	Co [μF]
480	0.313	1
600	0.392	1
2400	0.784	0.5
4160	1.358	0.5
6900	2.253	0.5
13800	2.253	0.25

(c6) Buchas

Na tabela 4 são apresentados os valores de capacitância para a terra de buchas externas.

Tabela 4 – Valores de capacitância para buchas externas

Tensão [V]	Corrente [A]	Capacitância [μF]	Tensão [V]	Corrente [A]	Capacitância [μF]
15	600	160 a 180	115	800	250 a 450
	1200	190 a 220		1200	250 a 420
23	400	200 a 450	138	1600	250 a 430
	600	280		800	250 a 450
	1200	190 a 450	161	1200	250 a 420
	2000	280 a 650		1600	250 a 460
	3000	370 a 560	34.5	800	260 a 440
	4000	500 a 620		1200	260 a 440
34.5	400	200 a 390	196	1600	260 a 440
	600	150 a 220		800	350 a 550
	1200	170 a 390	330	1200	350 a 550
	2000	240 a 360		1600	350 a 550
	3000	350 a 620		1600	530
46	400	180 a 330	345	800 A 2000	550
	600	150 a 280		BIL 1050kV	
	1200	170 a 330		BIL 1175kV	
	2000	200 a 330		BIL 1300kV	
69	400	180 a 270	500	800 A 2000	500
	600	250		BIL 1425kV	
	1200	160 a 290		BIL 1550kV	
	2000	210 a 320		BIL 1675kV	

(c7) Barramentos

Apresentam-se na tabela 5 as capacitâncias de fase de barramentos.

Tabela 5 – Capacitância dos barramentos de fase

Corrente [A]	BARRA DE FASE ISOLADA		BARRA DE FASE SEGREGADA			
	Classe 15 kV BIL 110 kV [pF / m]	Classe 23 kV BIL 150 kV [pF / m]	Classe 15 kV BIL 110 kV [pF / m]			
1200	29.2	46.9	26.2	40.7	32.8	
2000	33.5	46.9	29.5	40.7	32.8	33.5
2500	33.5	46.9	29.5	40.7		
3000	33.5	46.9	29.5	40.7	32.8	33.5
3500	33.5	46.9	29.5	40.7		
4000	45.9	46.9	40.7	44.3	32.8	41.3
4500	45.9	46.9	41.7	44.3		
5000	45.9	62.3	41.7	51.8	41.0	48.9
5500	45.9	62.3	41.7	51.8		
6000	45.9	62.3	44.3	51.8	49.2	56.1
6500	45.9	62.3	44.3	51.8		
7000	56.8	74.1	47.2	57.7	56.1	
7500	56.8	74.1	47.2	57.7		
8000	71.2		57.7			
9000	71.2		59.4			
10000	71.2		59.4			
11000	77.8		67.3			
12000	77.8		67.3			

(c8) Cabos

A capacitância dos cabos, sempre que possível, deve ser obtida junto aos fabricantes. Na falta dessa informação, as equações a

seguir apresentadas podem ser utilizadas para a sua determinação.

Cabos unipolares blindados, não blindados em conduítes metálicos, tripolares com blindagem individual de cada condutor:

$$C_o = \frac{0.02411}{\log\left(\frac{D}{d_c}\right)} \times \epsilon_r \left[\frac{\mu F}{km} / cond \right]$$

Em que:

C_o = Capacitância em $\mu F / km / Cond$;

D = Diâmetro sobre a isolamento para condutores não blindados, ou diâmetro sobre a blindagem para cabos com blindagem [mm];

d_c = Diâmetro do condutor [mm];

ϵ_r = Constante dielétrica do meio isolante.

Cabos tripolares não blindados, armados ou revestidos com chumbo:

$$C_o = \frac{0.02736}{\log\left(\frac{D_1}{d_c}\right)} \times \epsilon_r \left[\frac{\mu F}{km} / cond \right]$$

Em que:

$D_1 = 3.e_1 + d_c + b$;

e_1 = Espessura da isolamento em [mm];

d_c = Diâmetro do condutor [mm];

b = Espessura da capa de isolamento;

ϵ_r = Constante dielétrica do meio isolante.

A Tabela 6 apresenta os valores típicos da constante dielétrica por tipo de material isolante.

Tabela 6 – Constantes dielétricas ϵ_r [em 60 Hz]

Material	Faixa	Valor Típico
PVC	4.0 a 6.0	5.0
EPR	3.0 a 4.0	3.2
XLPE		3.0
PE		2.3
Borracha Butílica		4.0
Papel		3.7
Óleo		3.5
Gás		3.5
Ar		1.0

(c9) Cálculo da corrente de Charging

Em sistema não aterrado

A corrente em cada capacitância é igual a:

$$I_{co} = \frac{V_{FT}}{X_{Co}} = \frac{V_{FT}}{\frac{1}{\omega C_o}} = V_{FT} \times \omega C_o$$

Em condições de regime, essas correntes ficam defasadas de 120° entre si, cuja resultante é praticamente nula. Entretanto, na ocorrência de uma falta à terra, a tensão resultante será três vezes a tensão fase-terra. Assim, a corrente que aparecerá será:

$$3I_{co} = \frac{3V_{FT}}{X_{Co}} = \frac{3V_{FT}}{\frac{1}{\omega C_o}} = 3V_{FT} \times \omega C_o = 3 \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \times \omega C_o = \sqrt{3} \times V_{FF} \times \omega C_o$$

Em sistema aterrado por resistor de alto valor

Nestas condições, a corrente de falta à terra irá circular, conforme mostrado na Figura 1.

A Figura 2 mostra o diagrama fasorial das tensões e corrente de I_C , $3I_{co}$ e I_R .

(d) Aterramento do neutro de gerador por transformador de aterramento e resistor no secundário

Este método nada mais é do que o método de aterramento por

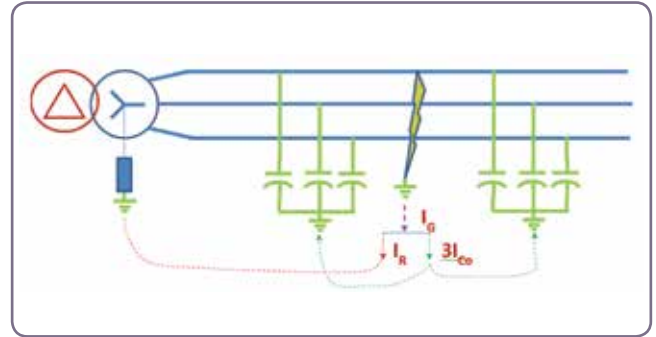


Figura 1 – Corrente de falta I_G , circulando pela resistência e capacitâncias do sistema.

resistência de alto valor. Assim, existem duas condições que devem ser seguidas:

- ▶ A corrente primária deverá ser maior do que a corrente de charging (que circula pelas capacitâncias próprias) multiplicada por três a fim de evitar a sobretensão transitória;
- ▶ Definição da potência do transformador, a partir da corrente $3I_{co}$.

A Figura 3 ilustra uma configuração típica.

A corrente de charging é obtida a partir da soma das correntes de todas as capacitâncias próprias.

Da Figura 3, pode-se concluir que a capacitância total C_0 -TOTAL é calculada como segue:

$$C_{0-TOTAL} = 2 C_g + C_s + C_c + 2 C_T$$

Em que:

- C_g = Capacitância própria do gerador em micro-Farad;
- C_s = Capacitância do capacitor de surto em micro-Farad;
- C_c = Capacitância própria do cabo em micro-Farad;
- C_T = Capacitância própria do transformador em micro-Farad.

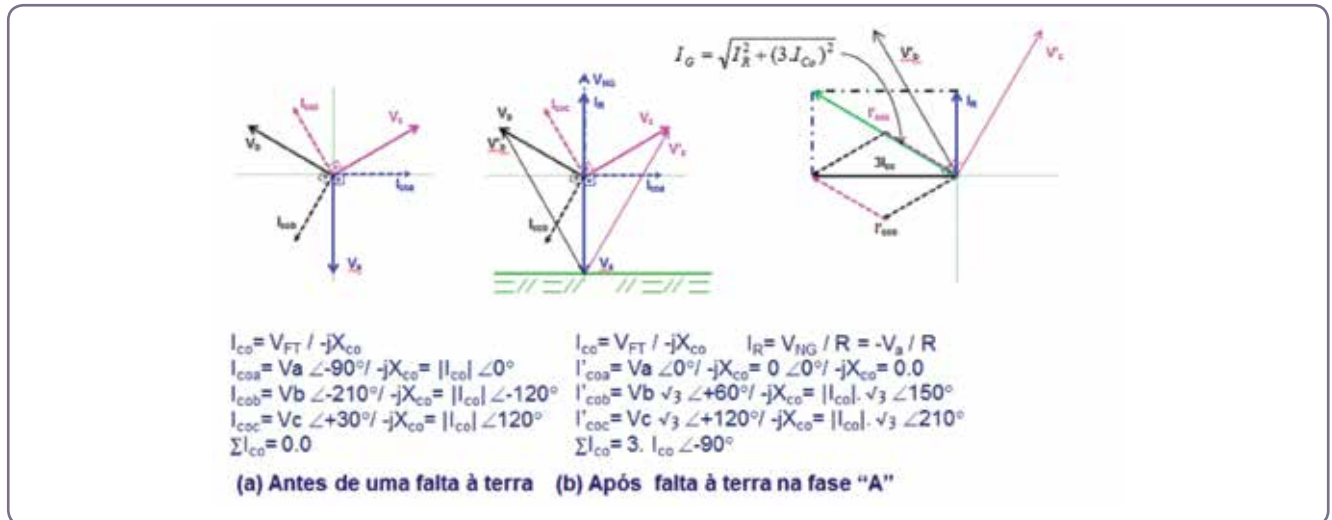


Figura 2 – Diagrama vetorial em um sistema aterrado por resistência de alto valor.

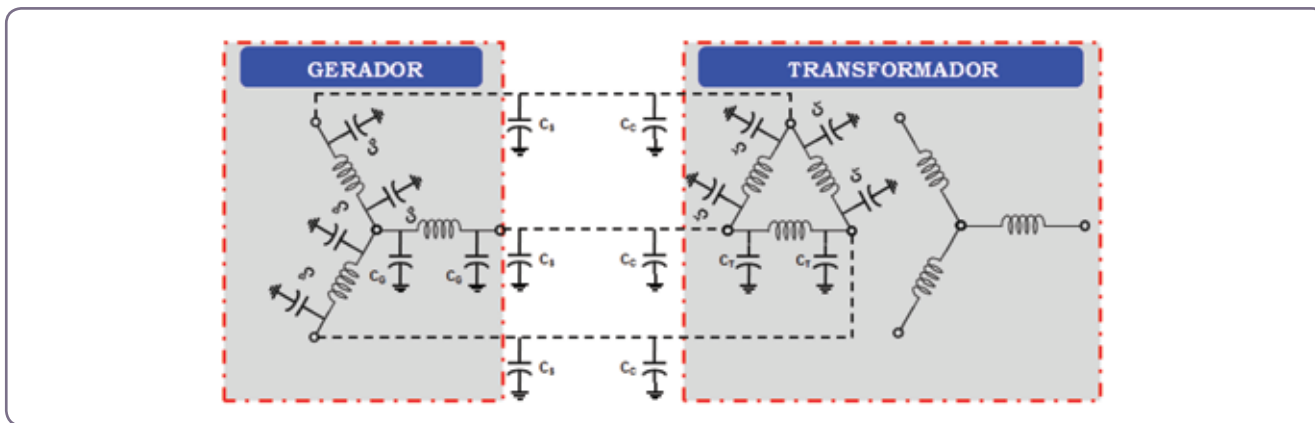


Figura 3 – Capacitâncias próprias em um circuito típico de gerador.

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega \times C_{0-TOTAL}} = \frac{1}{2\pi f \times C_{0-TOTAL}}$$

$$I_0 = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3} X_{C0}}$$

$$3I_0 = \frac{3 \times V_{FF}}{\sqrt{3} X_{C0}} = \frac{\sqrt{3} \times V_{FF}}{X_{C0}}$$

Os valores das capacitâncias de charging, sempre que possível, devem ser obtidas dos fabricantes dos respectivos equipamentos. Quando isto não ocorrer, estas informações podem ser obtidas nas literaturas pertinentes (como, por exemplo, o IEEE Std C37.011).

Assim, a corrente limitada no primário é calculada com base na seguinte equação:

$$I_F = 3 \times I_0 = \frac{E_{FT}}{R_{ATERRAMENTO-SEC-REF-PRIMÁRIO}}$$

$$R_{ATERRAMENTO-SEC-REF-PRIMÁRIO} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \times R_{ATERRAMENTO-SECUNDÁRIO}$$

A sequência para dimensionar a potência do transformador de aterramento é a seguinte:

- ▶ Cálculo da corrente de charging (I_{C0}) e consequentemente $3I_{C0}$;
- ▶ Definição da tensão nominal entre fases do sistema (V_{FF});
- ▶ Cálculo da tensão fase-neutro do sistema ($V_{FN} = V_{FF} / \sqrt{3}$);
- ▶ Determinação dos kVAs capacitivos = $V_{FN} \times (3I_{C0})$;
- ▶ Definição da tensão primária V_1 do transformador de aterramento;
- ▶ Definição da tensão secundária V_2 do transformador de aterramento;
- ▶ Cálculo da relação de transformação do transformador de aterramento $K = V_1/V_2$;
- ▶ Determinação da tensão real no secundário ($V_{2R} = V_{FN} / K$);
- ▶ Cálculo da corrente do resistor secundário $I_{RESISTOR} = V_{FN} \times (3I_{C0}) / V_{2R}$;
- ▶ Cálculo do valor do resistor: $R = V_{2R} / I_{RESISTOR}$;
- ▶ Determinação da potência de curta duração $kVA_{TEMPO} = V_{FF} \times (3I_{C0}) / FS$ (obtido da Tabela 7).

Tabela 7 – Fator de sobrecarga para dimensionar transformador do neutro gerador

Fator de sobrecarga	
Tempo	Fator
1 minuto	4.7
5 minutos	2.8
30 minutos	1.8
1 hora	1.6
2 horas	1.4

Exemplo

Um gerador de 13.8 kV (entre fases) possui uma corrente $3I_{C0} = 4.39$ A. Calcule a potência do transformador para um tempo de eliminação de falta de até duas horas.

Solução

Seguindo-se os passos mostrados anteriormente, tem-se:

$3I_{C0} =$	4.39	A
$kVFF-n =$	13.8	kV
$kVFT-n =$	7.967434	kV
$kVAcap =$	34.97703	kVA
$V1 \text{ trafo} =$	7967.434	V
$V2 \text{ trafo} =$	500	V
$Relação =$	15.93487	
$V2 \text{ real} =$	500	V
$I \text{ Resistor} =$	69.95407	A
$R-Sec. =$	7.147547	Ohms
$kVA-Duty =$	60.582	
Tempo =	2	horas
FS =	1.5	Tabela 1.3.1
$kVA-Trafo =$	43.27286	kVA
$kVA-Escolhido =$	50	kVA

*Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro electricista 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