

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo IV

Cálculo de Energia Incidente – Modelo IEEE 1584 edição 2018 para média tensão Parte 2

PARTE PRÁTICA :

Vamos ilustrar o procedimento usando o seguinte exemplo:

Painel de Média Tensão – VCB (eletrodos verticais enclausurados)

Tensão nominal – 13800 V

Corrente de curto-circuito – 31 kA

Tamanho do compartimento – 914,4 x 914,4 x 914,4 mm (36' x 36' x 36')

Tempo de eliminação do arco – deverá ser confirmado após o cálculo da corrente de arco mínima

Gap – 153 mm

Distância de trabalho – 910 mm

1) Cálculo da energia incidente passo a passo

Calcular a corrente de arco:

Na faixa de 600 V

$$I_{a600} = 10^{(k1+k2\log\log(I_{bf})+k3\log\log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf}^1 + k10)$$

Valores utilizados da Tabela 2 (VCB 600V)

k1	k2	k3	k4	k5
-0.04287	1.035	-0.083	0	0

k6	k7	k8	k9	k10
-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092

$$I_{a600} = 21,35 \text{ kA}$$

Na faixa de 2700 V

$$I_{a2700} = 10^{(k1+k2\log\log(I_{bf})+k3\log\log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf}^1 + k10)$$

Valores utilizados da Tabela 2 (VCB 2700V)

k1	k2	k3	k4	k5
0.0065	1.001	-0.024	-1.557E-12	4.556E-10

k6	k7	k8	k9	k10
-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729

$$I_{a2700} = 25,87 \text{ kA}$$

Na faixa de 14300 V

$$I_{a14300} = 10^{(k1+k2\log\log(I_{bf})+k3\log\log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf}^1 + k10)$$

Valores utilizados da Tabela 2 (VCB 14300V)

k1	k2	k3	k4	k5
0.005795	1.015	-0.011	-1.557E-12	4.556E-10

k6	k7	k8	k9	k10
-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729

$$I_{a14300} = 24,93 \text{ kA}$$

2) Calcular a corrente de arco na tensão estipulada

$$I_{arc1} = \frac{I_{a2700} - I_{a600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + I_{a2700}$$

$$I_{arc2} = \frac{I_{a14300} - I_{a2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + I_{a14300}$$

$$Iarc_3 = \frac{Iarc_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{Iarc_2(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

Iarc1 = 49,78 kA

Iarc2 = 28,80 kA

Iarc3 = -82,09 kA

Quando a tensão for maior que 2700 V e menor que 15000 V:

Iarc = Iarc2 = 28,80

3) Estimar a variação de corrente

$$VarCf = k1 Voc^6 + k2 Voc^5 + k3 Voc^4 + k4 Voc^3 + k5 Voc^2 + k6 Voc^1 + k7$$

$$Cf = 1 - 0,5 \cdot VarCf$$

Valores obtidos da Tabela 3 (VCB).

k1	k2	k3	k4
0	-0.0000014269	0,000083137	-0.0019382

k5	k6	k7
0,022366	-0.12645	0,30226

VarCf = 0,0239

Cf = 0,9888

Mínima corrente de arco elétrico

$$Iarc_{min} = Cf \times Iarc$$

Iarc_min = 28,47 kA

4) Correção do tamanho do compartimento

Os valores da dimensão do invólucro:

Height = 914,4 mm

Width = 914,4 mm

$$Width1 = \frac{660,4 + (Width - 660,4) \cdot \left(\frac{Voc + A}{B}\right)}{25,5}$$

Height1 = Height . 0,03937

Height1 = 36'

Width1 = 34,90'

$$EES = \frac{Height1 + Width1}{2}$$

EES = 35,45 in

$$CF = b1 \cdot EES^2 + b2 \cdot EES + b3$$

b1	b2	b3
-0.000302	0,03441	0,4325

Valores obtidos da Tabela 5 (VCB).

CF = 1,2728

5) Determinar o tempo de atuação da proteção

Para obtenção do tempo de eliminação do arco elétrico foi consultado o gráfico I x t Figura 1 fornecido pelo estudo de seletividade implantado.

O tempo é definido pela corrente de arco mínima para garantir uma margem de segurança.

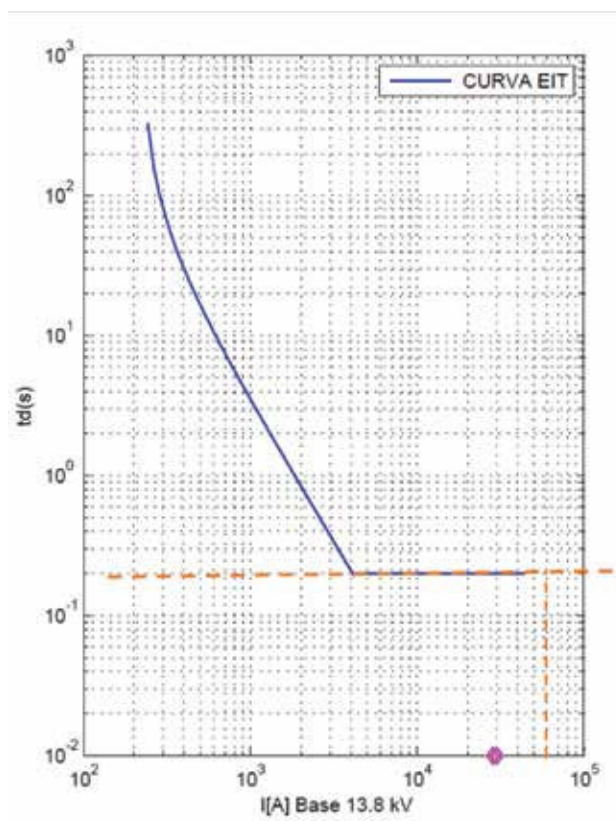


Figura 1 – Curva de Tempo X Corrente.

Desta forma o tempo da proteção utilizado será de 280 ms.

O tempo de eliminação considerado é o tempo de ajuste da unidade ANSI-50 de 200 ms e acrescido o 80 ms de abertura do disjuntor por informação do fabricante.

6) Cálculo da energia incidente

Faixa de 600V

$$E_{600} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc600}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{12} \log \log(D) + k_{13} \log \log(I_{arc}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (600V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09

k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957

$$E_{600} = 27,50 \text{ J/cm}^2$$

Cálculo da energia incidente na faixa de 2700 V.

$$E_{2700} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc2700}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{12} \log \log(D) + k_{13} \log \log(I_{arc}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (2700V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6
2,40021	0,165	0,354202	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08

k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
8,346E-07	5,482E-05	-0,003191	0,9729	0	-1,569	0,9778

$$E_{2700} = 35,12 \text{ J/cm}^2$$

Cálculo da energia incidente na faixa de 14300 V.

$$E_{14300} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc14300}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{12} \log \log(D) + k_{13} \log \log(I_{arc}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (14300V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09

k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957

$$E_{14300} = 38,39 \text{ J/cm}^2$$

Com o resultado da energia incidente por faixas deve -se calcular os valores interpolados.

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + E_{2700}$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + E_{14300}$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

$$E_1 = 78,15 \text{ J/cm}^2$$

$$E_2 = 40,21 \text{ J/cm}^2$$

$$E_3 = -160,38 \text{ J/cm}^2$$

Para tensões maiores que 2700 V e menores que 15000 V:

$$E_i = E_2 = 40,21 \text{ J/cm}^2 \text{ ou } 9,62 \text{ cal/cm}^2$$

7) Cálculo da distância de segurança para arco elétrico

Faixa de 600 V:

$$AFB_{600} = 10^{\frac{(A+B+F)}{-k_{12}}}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc600}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$F = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{13} \log \log(I_{arc600}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (600V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09

k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957

$$AFB_{600} = 2698 \text{ mm}$$

Faixa de 2700 V:

$$AFB_{2700} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-k_{12}}\right)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc2700}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$F = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{13} \log \log(I_{arc2700}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (2700V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6	
2.40021	0.165	0.354202	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	
k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.569	0.9778

$$AFB_{2700} = 3217 \text{ mm}$$

Faixa de 14300 V:

$$AFB_{14300} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-k_{12}}\right)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc14300}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$F = k_{11} \log \log(Ibf) + k_{13} \log \log(I_{arc14300}) + \log \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

Valores das constantes obtidos na Tabela 6 (14300V - VCB).

k1	k2	k3	k4	k5	k6	
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4.783E-09	
k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
0,000001962	-0.000229	0,003141	1,092	0	-1.598	0,957

$$AFB_{14300} = 3438 \text{ mm}$$

Fazendo as interpolações:

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700}$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300}$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

$$AFB_1 = 5959 \text{ mm}$$

$$AFB_2 = 3430 \text{ mm}$$

$$AFB_3 = -9945 \text{ mm}$$

Para tensões maiores que 2700 V e menores que 15000 V:

$$AFB = AFB_2 = 3430 \text{ mm}$$

Com fins didático vamos estimar a energia incidente pelo método de 2002 e para a posição de eletrodo HCB versão 2018 nas mesmas condições.

VCB 2002 unground	VCB 2002 ground	VCB 2018	HCB 2018
15,13 cal/cm ²	11,66 cal/cm ²	9,62 cal/cm ²	24,10 cal/cm ²

No caso para a distância de segurança em relação ao arco elétrico:

VCB 2002 unground	VCB 2002 ground	VCB 2018	HCB 2018
12306 mm	9418 mm	3430 mm	5561 mm

Na metodologia da IEEE 1584 de 2002 os valores de energia incidente calculada são mais conservativos do que em 2018 na configuração VCB.

A mudança drástica se dá na posição dos eletrodos, na qual de VCB para HCB a energia é muito superior.

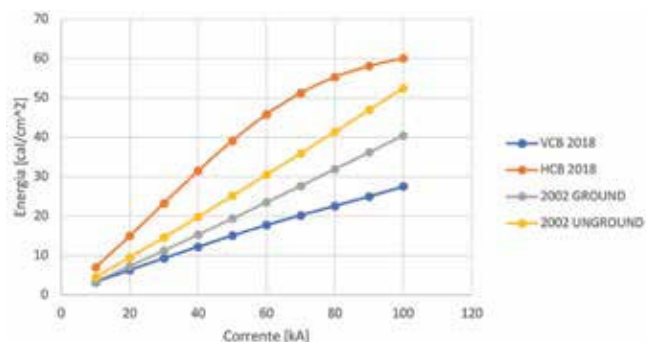


Figura 2 – Comparativo da energia incidente X corrente de curto circuito.

Tomando como exemplo o caso calculado pode -se observar que os valores de energia incidente da versão de 2002; independente da configuração do sistema de aterramento; ficam entre os valores da versão de 2018 entre VCB como valor inferior e HCB como valor superior.

No próximo volume iremos abordar o cálculo da energia incidente para instalação de média tensão acima de 15 kV até 40,5 kV.

*Luiz Carlos Catelani Junior é engenheiro eletricista pela Unicamp, com ampla experiência em proteção de sistemas elétricos, subestações AT, linhas de transmissão elétrica e plantas industriais. Ao longo de sua carreira, tem desenvolvido atividades ligadas à geração de fontes renováveis, sendo, atualmente, um dos principais especialistas do país em análise de energia incidente de média e alta tensão – ATPV e Arc Flash.