

考虑非绝热效应的允许短路电流计算

IEC 949(1988)

引言

电缆中任一载流部分，其额定短路电流的计算方法，通常假设在短路持续期间，热量保持在载流体内部（即绝热受热）。实际上在短路时，一些热量会传入邻近的材料中去，这就有利于对短路电流的计算。在计算短路电流时，为使不同的设计者得到相同的额定短路电流值，本标准给出一个包括非绝热效应在内的简单计算方法。当然知道可采用复杂的计算技法，其对计算精确度并无明显影响，这可对标准化就太繁复了。

公式中包含许多随电缆中使用的材料而变化的量，其数值已在表中列出。这些数值既有国际标准化的，例如电阻率、电阻温度系数，也有在实际应用中被普遍接受的，如比热。

为了能取得一致和可对比的结果，额定短路电流的计算应使用本标准提出的方法和数值。当然，常识可知，材料常数的另一些数值也许比当前采用的数值更合适，如采用不同的数值时，则相应的额定短路电流应另行宣布。

本标准已假定了最恶劣的计算条件，当然额定短路电流的计算结果是偏安全的。

在短路持续全过程，非绝热法是有效的。与绝热法相比，采用非绝热法计算，屏蔽层、护层和小于 10mm^2 的导体（特别是用作屏蔽线），其允许短路电流有很大的增加。对通常规格的电力电缆导体，5%对短路电流只是极少增加，当然可能也有其实用意义。为此，短路持续时间与导体截面比 $< 0.1\text{s}/\text{mm}^2$ 时，短路电流的增加可以忽略，即可采用绝热法。这点包括了很多实际情况。

本标准设定的计算步骤为：

- a) 计算绝热的短路电流；
- b) 考虑非绝热热效应，计算修正系数；
- c) 将 a) 和 b) 相乘，得到允许短路电流。

1 符号

A——考虑到四周或邻近材料的热性能常数， $(\text{mm}^2/\text{s})^{1/2}$

B——考虑到四周或邻近材料的热性能常数， (mm^2/s)

C_1 ——导体和间隔铜丝屏蔽采用非绝热公式计算的常数， mm/m

C_2 ——导体和间隔铜丝屏蔽采用非绝热公式计算的常数， $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{J}$

D_{it} ——与皱纹护套内 面相切的假设同心圆柱体直径， mm

D_{oc} ——与皱纹护套内凸面相切的假设同心圆柱体直径， mm

F——考虑不完善的热接触因素

I——允许短路电流（整个短路期间有效值），A

I_{AD} ——在绝热基础上计算的短路电流（整个短路期间有效值），A

I_{sc} ——已知最大短路电流（整个短路期间有效值），A

K——取决于载流体材料的常数， $\text{As}^{1/2}/\text{mm}^2$

M——热接触因素， $\text{S}^{-1/2}$

S——载流体几何截面， mm^2

X——导体和分隔单线屏蔽的简化公式中使用的常数， $(\text{mm}^2/\text{S})^{1/2}$

Y——导体和分隔单线屏蔽的简化公式中使用的常数， mm^2/S

d——护层、屏蔽层或铠装层平均直径， mm

n——包带层数或单线根数

t——短路持续时间，s

- ω ——带宽, mm
- β ——在 0°C 时电阻温度系数的倒数, K
- δ ——护层、屏蔽层或铠装层厚度, mm
- ε ——考虑热量损失在邻近层的因素
- θ_f ——最终温度, $^{\circ}\text{C}$
- θ_i ——起始温度, $^{\circ}\text{C}$
- ρ_1 ——周围或邻近非金属材料热阻, $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
- ρ_2, ρ_3 ——在护层、屏蔽层或铠装层四周媒体质热阻, $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
- ρ_{20} —— 20°C 时载流体电阻, $\Omega \cdot \text{m}$
- σ_c —— 20°C 时载流体比热, $\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^3$
- σ_i ——周围或邻近非金属材料比热, $\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^3$
- σ_1 ——屏蔽层、护层或铠装层比热, $\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^3$
- σ_2, σ_3 ——屏蔽层、护层或铠装层四周媒体质比热, $\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^3$

2 允许短路电流

允许短路电流公式如下:

$$I = \varepsilon \times I_{AD}$$

式中 I ——允许短路电流

I_{AD} ——在绝热基础上计算的短路电流

ε ——考虑热量损失在邻近层的因素 (见第 5 和第 6 条)。绝热计算时 $\varepsilon = 1$

3 绝热短路电流计算

在任何起始温度条件下, 绝热的温升计算通式如下:

$$I_{AD}^2 t = K^2 S^2 \ln \left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta} \right)$$

式中 I_{AD} ——在绝热基础上计算的短路电流 (整个短路期间有效值), A

t ——短路持续时间, s

K ——取决于载流体材料的常数, $\text{AS}^{1/2}/\text{mm}^2$ 。见表 1

$$K = \sqrt{\frac{\sigma_c (\beta + 20) \times 10^{-12}}{\rho_{20}}}$$

S ——载流体几何截面, mm^2 。对 IEC 228 所规定的导体, 采用其标称截面就已满足

θ_f ——最终温度, $^{\circ}\text{C}$

θ_i ——起始温度, $^{\circ}\text{C}$

β —— 0°C 时载流体电阻温度系数的倒数, K。见表 1

\ln —— \log_e

σ_c —— 20°C 时载流体比热, 见表 1

ρ_{20} —— 20°C 时载流体电阻, $\Omega \cdot \text{m}$ 见表 1

表 1

材料	1) $k(As^2/mm^2)$	2) $\beta(K)$	3) $\sigma_c(J/K \cdot m^3)$	2) $\rho_{20}(\Omega \cdot m)$
a)导体：铜	226	234.5	3.45×10^6	1.7241×10^{-8}
铝	143	228	2.5×10^6	2.8264×10^{-8}
b)护层，屏蔽和铠装层：				
铅或铅合金	41	230	1.45×10^6	21.4×10^{-8}
钢	78	202	3.8×10^6	13.8×10^{-8}
青铜	180	313	3.4×10^6	3.5×10^{-8}
锡	148	228	2.5×10^6	2.84×10^{-8}

注：1) 数值从第 3 条公式中得到。

2) 数值摘自 IEC 287 (表 1)。

3) 数值摘自 Electra No.24 October 1972,p.91.

4 短路温度计算

有些情况下（即阻抗接地系统），最大故障电流是知道的，导体的最终短路温度可由下式决定：

$$I_{AD} = I_{SC} / \varepsilon$$

$$\theta_f = (\theta_i + \beta) \exp\left[\frac{I_{AD}^2 t}{K^2 S^2}\right] - \beta$$

式中 I_{SC} ——已知短路电流（整个短路期间有效值）

5 导体和分隔单线屏蔽非绝热因素的计算

5.1 概述

非绝热因素的经验等式的一般形式如下：

$$\varepsilon = \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 B \left(\frac{t}{S}\right)}$$

式中 F ——在导体或单线和四周或邻近非金属材料之间，考虑热性不完善接触因素，推荐取 0.7(充油电缆取 1.0)

A, B ——以四周或邻近非金属材料热性为基础的经验常数

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\rho_1}} \quad (\text{mm}^2/\text{S})^{1/2} \quad \text{此处} \quad C_1 = 2464 \text{mm/m}$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\rho_1}\right) (\text{mm}^2/\text{S}) \quad \text{此处} \quad C_2 = 1.22 \text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^2/\text{J}$$

- σ_c ——载流体比热, $J/K \cdot m^3$
 σ_1 ——四周或邻近非金属材料比热, $J/K \cdot m^3$
 ρ_1 ——四周或邻近非金属材料热阻, $K \cdot m/W$

(这些材料常数的推荐值见表 2)

表 2 材料热性常数

材 料	热阻 $\rho^{1)}$ ($K \cdot m/W$)	比热 $\sigma^{2)}$ ($J/K \cdot m^3$)
绝缘材料:		
粘性电缆用油纸	6.0	2.0×10^6
充油电缆用 渍纸	5.0	2.0×10^6
油	7.0	1.7×10^6
聚乙烯	3.5	2.4×10^6
交联聚乙烯	3.5	2.4×10^6
聚氯乙烯 3kV 及以下电缆	5.0	1.7×10^6
3kV 及以上电缆	6.0	1.7×10^6
乙丙橡胶 3kV 及以下电缆	3.5	2.0×10^6
3kV 及以上电缆	5.0	2.0×10^6
丁基橡胶	5.0	2.0×10^6
天然橡胶	5.0	2.0×10^6
防护层:		
麻混合物和纤维材料	6.0	2.0×10^6
夹层橡皮保护层	6.0	2.0×10^6
氯丁橡胶	5.5	2.0×10^6
聚氯乙烯 3kV 及以下电缆	5.0	1.7×10^6
3kV 及以上电缆	6.0	1.7×10^6
聚氯乙烯涂于皱纹铝套的沥青	6.0	1.7×10^6
聚乙烯	3.5	2.4×10^6
其它材料混合物:		
半导体交联聚乙烯和聚乙烯 ³⁾	2.5	2.4×10^6
半导体乙丙橡胶	3.5	2.1×10^6

- 注: 1) 数值摘自 IEC 287 (表 4)
 2) 数值摘自 Electra No.24 Oct. 1972,p.91.
 3) 数值摘自 EPRI Report No.EL-3014.

5.2 导体（实心或绞线）

对通用结构可简化成如下通式：

$$\varepsilon = \sqrt{1 + X \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \left(\frac{t}{S}\right)}$$

式中，综合考虑热接触因素为 0.7（充油电缆为 1.0）X 和 Y 列于表 3 中。

表 3 导体和分隔单线屏蔽简化公式计算用常数
（热接触因素=0.7，充油电缆则采用 1.0）

绝 缘	铜导体用常数		铝导体用常数	
	X[(mm ³ /s) ^{1/2}]	Y(mm ³ /s)	X[(mm ³ /s) ^{1/2}]	Y(mm ³ /s)
聚氯乙烯：≤3kV	0.29	0.06	0.40	0.08
>3kV	0.27	0.05	0.37	0.07
交联聚乙烯	0.41	0.12	0.57	0.16
乙丙橡胶：≤3kV	0.38	0.10	0.52	0.14
>3kV	0.32	0.07	0.44	0.10
纯绝缘：充油	0.45	0.14	0.62	0.20
其它	0.29	0.06	0.40	0.08

5.3 分隔屏蔽单线

5.3.1 全嵌入式

分割屏蔽单线采用的公式中考虑单线分开至少相隔一根单线直径，并全部嵌入非金属材料中，且忽略薄的螺旋绕包等宽铜带的影响。对通常的产品结构可用第 5.2 条中简化公式，其它结构形式必须采用第 5.1 条中公式并取 F=0.7。电流按每根单线计算，乘以单线根数 n 可得到总的短路电流。因此在所有的公式中均使用单线截面。

5.3.2 非全嵌入式

此法用于分割屏蔽单线，它们置于管状挤出物之下，且单线间存在着空隙，忽略薄的螺旋绕包等宽铜带的影响。可采用第 5.1 条中通式，取 F=0.5。由于单线处于两种不同材料之间，应采用两种材料的热阻和比热的算术平均值计算。电流按每根单线计算，并乘以单线根数可得到总的短路电流值。因此在所有的公式中均使用单线截面。

6 护层、屏蔽层和多根单线非绝热因素计算

注：在绝热公式中使用的护层或屏蔽层的选择是很重要的，相应地包括在下列有关条文中。

6.1 概述

护层、屏蔽层和铠装层的 ε 因素由下面公式决定：

$$\varepsilon = 1 + 0.16M \sqrt{t} - 0.069(M \sqrt{t})^2 + 0.043(M \sqrt{t})^3$$

因素 M 计算如下：

$$M = \frac{\sqrt{\sigma_2 / \rho_2} + \sqrt{\sigma_3 / \rho_3}}{2\sigma_1 \delta \times 10^{-3}} F(\varepsilon^{-1/2})$$

式中 σ_2, σ_3 ——屏蔽层、护层和铠装层四周媒质比热, $J/K \cdot m^3$
 ρ_2, ρ_3 ——屏蔽层、护层和铠装层四周媒质热阻, $J/K \cdot m/W$
 σ_1 ——屏蔽层、护层和铠装层四周媒质比热, $J/K \cdot m^3$
 δ ——屏蔽层、护层和铠装层厚度, mm

表 2 为各种材料热性能常数的建议值。

除非金属层和其邻近层有一面完全紧粘者可取用 $F=0.9$ 外, 一般推荐值 $F=0.7$ 。

也可选用另一种方法, 一旦 $M\sqrt{t}$ 值计算好后, ε 可从图 1 中得到。

6.2 管形护层

在绝热公式中使用的截面计算如下:

$$S = \pi d \delta$$

式中 d ——护层平均直径, mm

注: 皱纹护层的直径 $d = (D_{it} + D_{oc})/2$

δ ——护层厚度, mm

此处能预料热性接触是紧密的, 热接触因素 F 可看作为均一的。

6.2 包带

6.3.1 纵向绕包

假如纵向搭盖不大于带宽的 10%, 在绝热公式中所使用的截面为包带横截面。

$$S = \omega \delta$$

式中 ω ——包带宽度, mm δ ——包带厚度, mm

6.3.2 螺旋绕包

卷绕包带和包带间的接触不能认为是完善的, 特别在运行一段时间后更是如此, 为此推荐的电流流动方向假设是沿螺旋方向流动的, 为此包带总截面(即 $n \times \text{宽} \times \text{厚}$)可用下式计算:

$$S = n \omega \delta$$

式中 n ——包带层数 ω ——包带宽度, mm δ ——包带厚度, mm

6.4 相互接触的单线

这些单线的总截面应是在绝热公式中使用的面积。 δ 即为单根单线的直径。

6.5 铜编织带

铜丝编织带截面考虑为编织带中铜丝的总根数乘单根铜丝的截面, δ 为编织铜丝直径的 2 倍。