

# 电缆群邻近效应的计算和优化排列

梁永春<sup>1,2</sup>, 孟凡凤<sup>1</sup>, 王正刚<sup>3</sup>, 李忠魁<sup>3</sup>, 李彦明<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 河北科技大学, 河北 石家庄 050054;  
3. 郑州电业局, 河南 郑州 450006)

**摘要:** 在计算电缆群载流量时, 交流电阻是一个重要的参数, 其中邻近效应是计算交流电阻的一部分。IEC-60287 和 JB/T10181-2000 仅给出了单回路情况下的邻近效应计算公式, 且有一定的限制条件。本文利用电磁场理论和贝塞尔函数计算任意电缆群的邻近效应, 给出了不同相位排列方式下的结果, 并给出了电缆邻近效应最小时的相位排列方式。

**关键词:** 载流量; 交流电阻; 邻近效应; 贝塞尔函数

中图分类号: TM154

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2006)02-0039-03

## 1 概述

在高压电力电缆载流量计算中, 导体的发热量与导体的交流电阻有密切关系。在电缆散热参数和电压等级确定以后, 导体的交流电阻越大, 电缆的载流量越小。因此, 准确确定电力电缆导体的交流电阻对计算载流量具有重要的意义。

导体的集肤效应和邻近效应是影响交流电阻的重要因素。在计算出导体的直流电阻、集肤效应和邻近效应系数后, 导体的交流电阻可由下式给出。

$$R = R_0(1 + Y_s + Y_p)$$

式中  $R_0$  为导体允许工作温度下直流电阻值,  $Y_s$  为集肤效应系数,  $Y_p$  为邻近效应系数。IEC-60287 给出了  $Y_s$  和  $Y_p$  的计算公式<sup>[1]</sup>,  $Y_s$  的计算公式可以满足大多数场合的要求,  $Y_p$  的计算公式是单回路的<sup>[2]</sup>。目前工程实际中, 往往是多个回路敷设在一起, 回路间的邻近效应是不能忽略的。

电缆群邻近效应的计算可以通过有限元、边界元等数值计算的方法求出<sup>[3-5]</sup>, 但为了实时计算电缆群的邻近效应, 满足工程实际计算电缆载流量的需要, 本文根据电磁场理论和贝塞尔函数给出了计算电缆群邻近效应的公式, 同时对几种多回路、不同相位的排列方式下的邻近效应进行了计算, 并给出了

邻近效应最小的排列方式。

## 2 公式推导

设电缆群由多根单芯交联聚乙烯电力电缆组成。根据电缆结构和电磁场特性, 每一根电缆区域可以分为四个部分, 第一部分为导体; 第二部分为绝缘层; 第三部分为金属套; 第四部分为电缆外区域, 如图1所示。

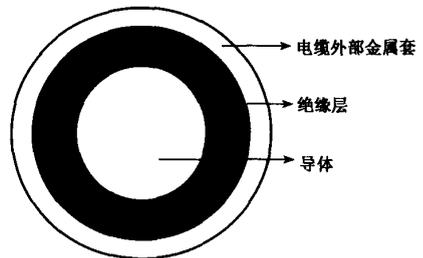


图1 电缆结构示意图

Fig.1 Structure diagram of cable

根据电磁场理论和矢量磁位的定义, 可得各个区域矢量磁位的表达式如下<sup>[6]</sup>。

导体区域:  $\nabla^2 \vec{A}_1 = -\mu_0 \vec{j}_c$ ,  $\vec{j}_c$  为导体区域电流密度。

绝缘层区域:  $\nabla^2 \vec{A}_2 = 0$

金属套区域:  $\nabla^2 \vec{A}_3 = -\mu_0 \vec{j}_s$ ,  $\vec{j}_s$  为金属套区域

收稿日期: 2005-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50277028); 河北省自然科学基金资助项目 (F2005000422)

作者简介: 梁永春 (1971-), 男, 河北籍, 讲师, 在职博士生, 主要研究方向为电力设备在线监测;

李彦明 (1946-), 男, 河南籍, 教授, 博导, 主要研究方向为电力设备试验、检测与故障诊断技术。

电流密度。

电缆外部区域:  $\nabla^2 A_4 = 0$

四个方程均为贝塞尔函数的标准形式。若以柱坐标表示,则矢量磁位的解为:

导体区域:

$$A(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n I_n(m_1 r) \cdot \cos(n\theta) \quad 0 \leq r \leq r_1$$

金属套区域:

$$A(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} [B_n \cdot I_n(m_2 r) + C_n \cdot K_n(m_2 r)] \cdot \cos(n\theta) \quad r_2 \leq r \leq r_3$$

式中  $A_n$ 、 $B_n$  和  $C_n$  为系数,由边界条件决定。 $I_n$  和  $K_n$  是贝塞尔函数第一类和第二类展开式,  $m_1 = \sqrt{j\omega\mu_1 g_1}$ ,  $m_2 = \sqrt{j\omega\mu_2 g_2}$ ,  $g_1$  和  $g_2$  分别是导体和金属套的电阻率,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  是磁导率,  $r_1$ 、 $r_2$  和  $r_3$  分别是导体外半径、金属套的内半径和金属套的外半径,  $\theta$  是场内某点对参考轴的角度<sup>[7]</sup>。

由此可得电流密度的计算公式

$$\mathbf{j} = -j\omega\mu g \cdot \dot{A}$$

根据电流密度和导体电阻率可以计算出导体的损耗,同时导体损耗也可以由下式计算:

$$P_c = \frac{I_c^2}{\pi g_1 r_1^2} \cdot (1 + Y_s + Y_p)$$

由于两者应该相等,可得邻近效应的计算公式:

$$Y_p = \frac{I_c^2}{I_c^2} \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_M \cdot \left(\frac{r_1}{b}\right)^{2n} \cdot \frac{x_1 [ber_n(x_1) \cdot bei'_n(x_1) - bei_n(x_1) \cdot ber'_n(x_1)]}{ber_{n-1}^2(x_1) + bei_{n-1}^2(x_1)}$$

$$|Z_n|^2$$

式中

$$\Phi_M = \frac{1}{I^2} \left[ \sum_{k=1}^M \frac{I_k^2}{\alpha_k^{2n}} + \sum_{k=1}^{M-1} \frac{I_k}{\alpha_k} \left\{ \sum_{j=k+1}^M \frac{I_j}{\alpha_j} \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_j) \cdot \cos n(\alpha_k - \alpha_j) \right\} \right]$$

$$Z_n = \frac{W_n}{D'_n} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{n-1}$$

$$D'_n = D_n - \Delta_n \cdot E_n$$

$$W_n = K_{n+1}(x_2) I_{n-1}(x_2) - I_{n+1}(x_2) K_{n-1}(x_2)$$

$$D_n = K_{n+1}(x_2) I_{n-1}(x_3) - I_{n+1}(x_2) K_{n-1}(x_3)$$

$$E_n = K_{n+1}(x_2) I_{n-1}(x_3) - I_{n-1}(x_2) K_{n-1}(x_3)$$

$$\Delta_n = \frac{I_{n+1}(x_1)}{I_{n-1}(x_1)} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{2n}$$

$$x_1 = m_1 r_1, x_2 = m_2 r_2, x_3 = m_2 r_3$$

$\varphi$  为电流相位,  $\alpha$  为针对参考轴的位置角。

### 3 实例

以 110kV 800mm<sup>2</sup> YJY 型交联聚乙烯电力电缆为例,导体线芯为紧压圆形绞合导体,其各部分参数如表 1 所列。

表 1 电缆结构参数

Tab.1 Parameters of cable structure

电缆结构	参数
导体外径	34.23mm
内屏蔽层厚度	1.5mm
绝缘厚度	16mm
外屏蔽层厚度	1.0mm
疏绕铜丝屏蔽截面	95 mm <sup>2</sup>
外护套厚度	3.8mm
电缆外径	86.9mm

利用上述公式分别计算了双回路上下两层排列、双回路水平排列及三回路上下三层排列三种敷设方式下、不同相位排列方式时的邻近效应系数,如表 2、表 3 和表 4 所列。工程实际应用中,应优先按照备注中给出的邻近效应最小方案进行电缆的敷设。电缆间距为 0.25 厘米。

表 2 双回路上下两层邻近效应

Tab.2 Proximity effect of two circuits in two levels

排列方式	邻近效应最大相及其值	备注
方案一	A1 B1 C1 A2 B2 C2	方案二邻近效应最小
方案二	A1 B1 C1 B2 A2 C2	
方案三	A1 B1 C1 B2 C2 A2	
	B1 0.237	
	B1 0.211	
	B1 0.264	

表 3 双回路水平排列邻近效应

Tab.3 Proximity effect of two circuits in flat formation

排列方式	邻近效应最大相及其值	备注
方案一	A1 B1 C1 A2 B2 C2	方案四邻近效应最小
方案二	A1 B1 C1 B2 A2 C2	
方案三	A1 B1 C1 B2 C2 A2	
方案四	A1 B1 C1 C2 B2 A2	
	C1 0.150	
	C1 0.173	
	C1 0.165	
	C1 0.120	

根据电磁场理论,邻近效应与相邻电缆电流的相位和距离关系密切。由于中间的电缆与其他电缆

距离均比较近,邻近效应最明显。此外,当同相位的电缆分别位于两侧时,可以抵消大部分影响,有利于减小邻近效应的影响。表 2、3、4 备注中指明的方案均符合这种情况,因此邻近效应最小。

表 4 三回路上下三层排列邻近效应

Tab.4 Proximity effect of three circuits in three levels

排列方式		邻近效应最大相及其值	备注
方案一	A1 B1 C1	B2 0.383	方案一或方案二邻近效应最小
	A2 B2 C2		
	A3 B3 C3		
方案二	A1 B1 C1	B2 0.383	
	C2 B2 A2		
	A3 B3 C3		
方案三	B1 C1 A1	B2 0.397	
	A2 B2 C2		
	C3 B3 A3		
方案四	B1 C1 A1	B2 0.436	
	A2 B2 C2		
	B3 C3 A3		

#### 4 结论

根据电磁场理论和贝塞尔函数推出的计算公式比 IEC-60287 给定的公式具有更普遍的意义,可以用于实际工程中载流量的计算。当电缆多回路敷设时,不同相位排列方式,电缆的邻近效应不同,计算出的载流量也不同。通过对电缆相位进行优化排列,可以降低邻近效应的影响,从而提高电缆的载流量。

#### 参考文献 (References):

- [1] 马国栋 (Ma Guodong). 电线电缆载流量 (Ampacity of wire and cable) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2003.
- [2] 吴命利, 范瑜 (Wu Mingli, Fan Yu). 圆导线内阻抗的数值计算 (Numerical calculation of internal impedance of cylindrical conductors) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electrotechnical Society), 2004, 19(3): 52-58.
- [3] 王世山, 汲胜昌, 李彦明 (Wang Shishan, Ji Shengchang, Li Yanming). 变压器束绞圆导线线圈中涡流损耗的研究 (Numerical analysis of eddy current losses for power transformer windings with round stranded conductors) [J]. 高电压技术 (High Voltage Eng.), 2003, 29(5): 7-10.
- [4] 王世山, 傅晨钊, 汲胜昌, 等 (Wang Shishan, Fu Chenzhao, Ji Shengchang, et al.). 电缆线圈功率损耗的数值计算 (Numerical calculation of power losses on cable coil) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2002, 21(4): 33-36.
- [5] 郭航, 冯之鑫, 韩朔 (Guo Hang, Feng Zhixing, Han Shuo). 轴对称恒定电磁场的标量边界元法 (Scalar potential boundary element method for axis-symmetric static electromagnetic field) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 1994, 13(3): 8-15.
- [6] 倪光正 (Ni Guangzheng). 工程电磁场原理 (Principles of electro-magnetic fields) [M]. 北京: 高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2002.
- [7] K Ferkal, M Poloujadoff, E Dorison. Proximity effect and eddy current losses in insulated cables [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1171-1178.

### Proximity effect and optimized arrangement of cable bundles

LIANG Yong-chun<sup>1,2</sup>, MENG Fan-feng<sup>1</sup>, WANG Zheng-gang<sup>3</sup>, LI Zhong-kui<sup>3</sup>, LI Yan-ming<sup>1</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China;

3. Zhengzhou Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** AC resistance of cable conductor is an important factor to calculate the ampacity of cable bundles, and proximity effect factor is an important parameter to affect AC resistance. IEC-60287 and JB/T10181-2000 give only a formula to calculate the proximity effect of single loop cable conductor, and there are some limiting prerequisites to use the formula. On the basis of electric and magnetic field theory, the paper presents a common calculation formula which can be used to calculate the proximity effects of any cable bundles. This formula is obtained by solving the magnetic vector equation with Maxwell equation and Bessel function. As examples, the paper calculates the proximities of different phase arrangement and gives a phase arrangement which proximity is the least in three laying modes.

**Key words:** ampacity; AC resistance; proximity effect; Bessel function