

# 铝合金芯铝绞线载流量简化计算的研究

叶 芳

(天津市电力公司电力科学研究院,天津 300384)

**摘要:** 针对铝合金芯铝绞线载流量计算复杂的特点,提出了一种铝合金芯铝绞线载流量的简化算法。首先研究了计算导线载流量的理论方法,根据钢芯铝绞线和铝合金芯铝绞线的特点分析两者在载流量计算中的差异,提出铝合金芯铝绞线载流量的简化算法,并使用该简化算法计算了某种铝合金芯铝绞线在不同环境温度下的载流量值。然后对该种导线进行载流量试验记录载流量实测值,对比载流量计算值与实测值,分析简化算法产生误差的原因。试验结果表明,该简化算法计算量小且计算精度满足工程要求,为铝合金芯铝绞线载流量的分析提供参考。

**关键词:** 铝合金芯铝绞线; 钢芯铝绞线; 载流量; Morgan 公式

**Key words:** Aiming at the complicated calculation of the current-carrying capacity of aluminum conductor alloy reinforced, a simplified method for calculating its current-carrying capacity is proposed. Firstly, the theoretical method for calculating the current-carrying capacity is studied, and the differences in current-carrying calculation are analyzed according to characteristics of aluminum conductor steel reinforced and aluminum conductor alloy reinforced. Then the simplified calculation method is proposed for the current-carrying capacity of aluminum conductor alloy reinforced, and the carrying-current capacity of an aluminum conductor alloy reinforced in different ambient temperature is calculated by the proposed simplified method. The test values are recorded and compared with the calculated values, and the reasons for the errors of simplified calculation method are analyzed. The test results show that the simplified method has small calculating work and the satisfied calculation accuracy for the engineering, which provides a reference for the current-carrying capacity analysis of aluminum conductor alloy reinforced.

**Abstract:** aluminum conductor alloy reinforced; aluminum conductor steel-reinforced; current-carrying capacity; Morgan formula

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0083-04

## 0 引 言

铝合金芯铝绞线采用53% IACS的高强度铝镁硅铝合金替代普通钢芯铝绞线中的钢芯和部分铝线,导线外部铝线与普通钢芯铝绞线的铝线相同。铝合金芯铝绞线因为具有电阻损耗低、弧垂性能好、无磁滞损耗、过载性能好、机械性能稳定等特点在近年来得到大规模推广运用<sup>[1]</sup>,但其载流量计算一直是工程难点。

载流量计算是确定架空线路输送容量的理论基础,传统计算载流量的方法复杂,不利于工程实际,因此一般钢芯铝绞线的载流量是通过试验获得的交直流电阻等参数再根据导线服役的环境参数进行计算,针对不同型号不同环境温度下的钢芯铝绞线载流量均有参考值,方便工程应用。但是对于铝合金

芯铝绞线来说,其载流量计算没有交直流电阻等试验参数和参考载流量表,而且传统载流量计算方法计算复杂,因此下面利用导体的稳态热平衡方程和Morgan公式<sup>[2]</sup>推导铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系,通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算铝合金芯铝绞线的载流量。

## 1 导线载流量计算方法

影响导线实际载流量的因素主要有两个方面:外界环境条件(如风速、环境温度、环境湿度、日照强度等)、导线性能和尺寸(如导线的吸热系数、辐射系数、导线允许温度、导线直径等)。

架空导线载流量的计算是由导线的发热和散热的热平衡推导出来的,即导线中没有通过电流时,其温度于周围介质温度相等;当通过电流时,其内部产

生的热量一部分使导体本身的温度升高,另一部分散失到周围介质中,他们之间呈动态分配,直至导体发热过渡到稳态<sup>[3]</sup>。

导体的稳态热平衡方程如下。

$$P_c + P_r = P_s + I^2 R_T \quad (1)$$

对已知环境温度和给定的导体工作温度下的最大稳态电流  $I$ , 即导体载流量计算公式如式(1)所示, 载流量取决于导体类型、电阻、允许最高工作温度和环境参数(如环境温度等)<sup>[4]</sup>。

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_T}} \quad (2)$$

式中  $P_r$  为辐射热损耗, W/m;  $P_c$  为对流散热损耗, W/m;  $P_s$  为太阳辐射热, W/m;  $R_T$  为工作温度下的导体单位长度交流电阻,  $\Omega/m$ 。

### (1) 辐射热参数的计算

导体表面向周围空间辐射热损耗由式(3)计算。

$$P_r = s \times \pi \times D \times k_e (T_c^4 - T_o^4) \quad (3)$$

由于自然风的存在, 强迫对流散发出的热损耗由式(4)可知。

$$P_c = \lambda \times N_u \times D \times \pi (T_c - T_o) \quad (4)$$

导体吸收的太阳辐射热由式(5)计算。

$$P_s = \lambda \cdot D \cdot S_i \quad (5)$$

### (2) 交流电阻的计算

交流电阻  $R_i$  总是以直流电阻  $R_d$  乘以交直流电阻比  $\beta$  表示, 即

$$R_i = \beta \cdot R_d \quad (6)$$

①直流电阻: 计算直流电阻时忽略铝合金芯和钢芯的导电性, 则铝导体 20℃ 的直流电阻计算式如式(7)。

$$R_{20} = \frac{4\rho_{20} \cdot \lambda_{am}}{\pi \cdot d^2 \cdot N} \quad (7)$$

工作温度下导体的直流电阻如式(8)所示。

$$R_d = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_c - 20)] \quad (8)$$

式中  $d$  为铝单线直径, mm;  $\rho_{20}$  为铝单线的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $N$  为铝线总根数;  $\alpha$  为温度系数,  $1/^\circ C$ ;  $\lambda_{am}$  为铝线平均绞入率, 按各层铝线平均节距比计算。

②交直流电阻比: 直流电阻与其总增量(由涡流和磁滞损耗引起的电阻增量和由集肤效应引起的电阻增量之和)之和相对于直流电阻之比率即交直流电阻比, 采用 Morgan 公式计算, 如式(9)所示。

$$\beta = 1 + \frac{\Delta R_1}{R_d} + \frac{\Delta R_2}{R_d} \quad (9)$$

式中  $\Delta R_1$  是涡流和磁滞引起的电阻增量, 由式(10)计算<sup>[5]</sup>。

$$\Delta R_1 = \frac{8\pi^2 a \cdot f \left( \sum_{m=1}^m \frac{n_m}{l_m} \right)^2 \times 10^{-7}}{N^2} \cdot \mu \cdot \tan\delta \quad (10)$$

式中  $a$  为钢芯截面,  $mm^2$ ;  $m$  为铝线层数;  $n_m$  为第  $m$  层铝线根数;  $l_m$  为第  $m$  层铝线节距长, mm;  $N$  为导线中铝线总根数;  $\mu$  为钢芯复合导磁率;  $\tan\delta$  为磁损耗角正切。

$\Delta R_2$  是集肤和邻近效应引起的电阻增量。由于导线的集肤效应, 将铝合金芯和钢芯导电性近似为零, 集肤和邻近效应引起的相对电阻增量由式(11)计算。

$$\frac{\Delta R_2}{R_d} = Y_s \cdot (1 - \phi)^{-1/2} - 1 \quad (11)$$

式中  $Y_s$  为由集肤效应引起的相对电阻增量, 见式(12)。

$$Y_s = 1 + a(z) \cdot \left[ 1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] \quad (12)$$

$\phi$  为由邻近效应引起的相对电阻增量, 如式(13)~式(21)所示。

$$\phi = \lambda \cdot y^2 \left[ \frac{z^2(2-\beta)^2}{z^2(2-\beta)^2 + 16\beta^2} \right] \quad (13)$$

$$\lambda = 1 - \beta \left( 1 + \frac{z^2}{4} \right)^{-1/4} + \frac{10\beta^2}{20 + z^2} \quad (14)$$

$$a(z) = \frac{7z^2}{(315 + 3z^2)} \quad (0 < z < 5) \quad (15)$$

$$b(z) = \frac{56}{(211 + z^2)} \quad (0 < z < 5) \quad (16)$$

$$z = 8\pi^2 \left[ \frac{D - d_s}{2} \right]^2 f \cdot r \quad (17)$$

$$\beta = \frac{(D - d_s)}{D} \quad (18)$$

$$y = \frac{D}{s} \quad (19)$$

$$r = \frac{1}{(A \cdot R \times 10^9)} \quad (20)$$

$$A = \pi \frac{D^2 - d_s^2}{4} \quad (21)$$

其中  $D$  为导线直径, mm;  $d_s$  为铝合金芯或钢芯直径, mm;  $s$  为导线之间距离, mm。

表1 导线主要技术参数对比

导线型号	外径 $D/mm$	铝单线直径 $/mm$	铝线总根数	各层铝线 平均节径比	铝合金芯、钢芯直径/ $mm$
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	33.75	3.75	2	12.1	16.15
铝合金芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7	29.3	3.26	4	16.5	9.77

## 2 铝合金芯铝绞线载流量的简化计算

导线载流量计算方法复杂,在工程中不利于操作,但钢芯铝绞线载流量计算已经很成熟,针对不同截面、不同工作温度的钢芯铝绞线均有载流量表作为参考。下面从载流量计算方法上寻找铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线的差别,以期通过钢芯铝绞线载流量推算出铝合金芯铝绞线载流量数值。以铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 为例进行计算,先将两种导线主要计算参数列于表1。

由公式(3)~公式(5)可以看出,热损耗部分与导体直径和环境参数有关,相同环境条件下的铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线环境参数均相同,因此根据公式(3)~公式(5)可知,两者的辐射热参数之比即两者外径比如下。

$$\frac{P_{LH}}{P_G} = \frac{D_{LH}}{D_G} \quad (22)$$

$$\text{即 } P_{LH} = 1.152P_G \quad (23)$$

根据公式(7)、公式(8)可知,铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 的直流电阻比为

$$\frac{R_{dLH}}{R_{dG}} = \frac{\lambda_{amLH}}{d_{LH}^2 N_{LH}} \cdot \frac{d_G^2 N_G}{\lambda_{amG}} \quad (24)$$

$$\text{即 } R_{dLH} = 0.73R_{dG} \quad (25)$$

铝合金芯铝绞线是铝基体材质<sup>[6]</sup>,可避免由于涡流、磁滞损耗带来的电能损失,因此铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 无涡流和磁滞引起的电阻增量  $\Delta R_1$ 。

由于铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 的导线间距离  $S$  相差不大可以忽略,仅将导线直径  $D$ 、铝合金芯或钢芯直径代入公式(17)~公式(21)进行计算,得到以下数据。

$$A_{LH} = 1.151A_G \quad (26)$$

$$r_{LH} = 0.754r_G \quad (27)$$

$$y_{LH} = 1.152y_G \quad (28)$$

$$\beta_{LH} = 0.782\beta_G \quad (29)$$

$$z_{LH} = 0.6125z_G \quad (30)$$

将上述结论代入公式(12)~公式(16),将非线性部分进行线性拟合,推导出集肤和邻近效应引起的电阻增量,得出铝合金芯铝绞线和钢芯铝绞线交流电阻比的关系:  $\beta_{LH} = 0.782\beta_G$ ,进而算出两导线交流电阻比的关系如下。

$$R_{TLH} = 0.571R_{TG} \quad (31)$$

将式(23)、式(31)代入公式(2)中,得到

$$I_{LH} = 1.42I_G \quad (32)$$

因为钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 载流量已知,从而铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量可由钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7 载流量和式(32)计算出,计算结果如表2所示。

表2 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量计算结果

导线型号	工作温度 / $^{\circ}C$			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	552	869	1 083	1 250
钢芯铝绞线 JL/G1A-450/60-54/7	389	612	763	880

## 3 实验验证

对铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 进行试验,测量其载流量值,以此验证表2中计算结果。

采用环境参数值为<sup>[7,8]</sup>: 风速  $v = 0.5$  (m/s); 日照强度  $S_i = 1\ 000$  (W/m<sup>2</sup>); 吸热系数  $r = 0.45$ ; 黑体辐射系数  $K_e = 0.45$ ; 导体温度  $\theta_c$  在  $60^{\circ}C \sim 90^{\circ}C$ ; 环境温度  $\theta_0 = 45^{\circ}C$ 。

利用实验测得铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 的载流量数值列于表3。

表3 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19  
载流量试验值结果

导线型号	工作温度 /℃			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	567	879	1 085	1 246

将表2、表3中的数据作对比,如图1所示。

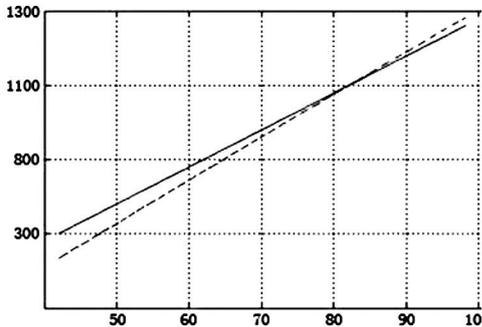


图1 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19  
载流量计算值与试验值的对比

图1中虚线表示铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量的试验结果,实线表示该导线载流量的计算结果。可以看出,当工作温度高载流量大时,计算结果与试验结果很接近,误差较小,而工作温度较低载流量小时,计算结果与试验结果偏差增大。产生此现象的原因是由于 Morgan 公式不是纯线性公式,而在计算过程中为了简化计算,使相应型号的铝合金芯铝绞线载流量和钢芯铝绞线载流量关系直观明了,利用了线性拟合,因此舍去的非线性部分造成了误差出现。该舍去部分在载流量大时所占比重很小,误差不明显,但是随着载流量的减小,误差逐渐增大;但是通过上述结论可知,利用载流量简化计算方法造成的误差最大仅为 2.6%,可以满足工程需要,而且大大缩短了计算时间。

===== (上接第46页) =====

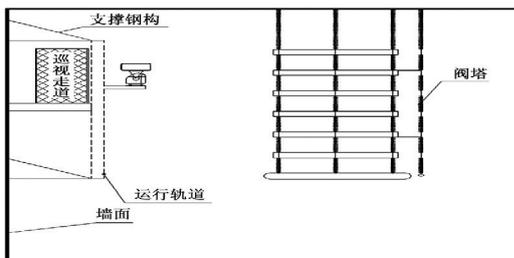


图5 阀厅轨道式监测仪采集点立面布置

参考文献

[1] 王志滨,张望平. 高压直流输电换流站晶闸管阀冷却系统阀厅温度控制探究[C]. 2011年中国电机工程学

4 结 论

利用理论公式推导了铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系,通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算出铝合金芯铝绞线的载流量,并通过实际条件下的试验对该方法进行了验证,验证结果表明该简化方法数据可靠,计算简单,可以运用到工程实践中,其计算的快捷有效性保证了在输电线路安全可靠运行条件下最大限度地提高线路的输送容量。

参考文献

[1] 张瑞永,赵新宇,李明,等. 输电线路新型节能导线的推广应用[J]. 电力建设,2012,33(6):89-92.  
 [2] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
 [3] 张辉,韩学山,王艳玲. 架空输电线路运行载流量分析[J]. 电网技术,2008,32(14):31-35.  
 [4] 陆鑫淼,曾奕,盛戈峰,等. 基于导线温度模型的线路动态容量误差分析[J]. 华东电力,2007,35(12):47-49.  
 [5] 韩晓燕,黄新波,赵小惠,等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(5):92-96.  
 [6] 韩晓燕,张虹. 架空导线摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 河南电力,2010,1:33-49.  
 [7] 韩芳,徐青松,侯炜,等. 架空导线动态载流量计算方法的应用[J]. 电力建设,2008,29(1):39-43.  
 [8] 林玉章. 高压架空输电线路载流量和温度计算[J]. 南方电网技术,2012,6(4):23-27.

作者简介:

叶芳(1986),助理工程师,硕士研究生,从事线路运行分析及故障研究。

(收稿日期:2014-08-04)

===== 会年论文集 2011. =====

[2] 王晓文,赵宗贵,汤磊. 一种新的红外与可见光图像融合评价方法[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(5):871-875.  
 [3] 许峰,于春雨,徐放. 视频烟雾火灾探测技术研究趋势[J]. 消防科学与技术,2012,31(11):1185-1188.  
 [4] 律方成,戴日俊,金虎,等. 特高压输变电系统绝缘子紫外放电数据管理及故障诊断系统设计[J]. 高压技术,2012,38(2):273-279.

作者简介:

丁志林(1978),工学学士,工程师,从事高压直流输电系统工程与研究;

王超(1976),工学硕士,高级工程师,从事电力系统自动化装备、高压直流输电系统工程与研究。

(收稿日期:2014-11-17)