

换流站导体载流量计算方法比较与研究

韩毅博,马亮,王刚

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北武汉 430071)

摘要:导体载流量计算是直流换流站设计的重要组成部分,目前国内尚无规程规范规定直流换流站导体载流量的计算方法。鉴于直流换流站导体承受的电流应力较为复杂,根据载流量计算的基本原理给出了换流站中不同载流工况下导体载流量计算的基本原则,确定了适用于换流站导体载流量计算的修正的热平衡方程。在载流量计算方法方面,综合分析比较了《电气一次设计手册》、DL/T 5222—2005、IEEE 738-2012、IEEE 605-2008、IEC 61597-1995等5个规程规范给出的交流导体载流量计算方法及其计算结果,重点对比了不同的对流散热功率计算方法。建议采用修正的《电气一次设计手册》计算方法计算换流站户外导体载流量;可根据不同导体外径分别采用IEEE 738-2012推荐方法和DL/T 5222—2005实际采用的方法计算换流站内导体载流量。

关键词:换流站;导体载流量;自然对流散热;强迫对流散热

中图分类号:TU 997 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0050-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210410

Comparison and Research on Ampacity Calculation Methods of Conductor in Converter Station

Han Yibo, Ma Liang, Wang Gang

(CPECC Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.,
Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract:The calculation of conductor ampacity is an important part of the design of DC converter station. At present, there is no code for calculating the conductor ampacity of DC converter station. In view of the complexity of current stress on the conductor of DC converter station, the basic principle of conductor ampacity calculation under different current-carrying conditions in converter stations is given according to the basic principles of current-carrying capacity calculation, and the modified heat balance equation suitable for the conductor ampacity calculation in converter station is determined. In terms of current-carrying capacity calculation method, the calculation methods and their results of current-carrying capacity of AC conductor given by five codes and specifications, including electrical primary design manual, DL/T 5222-2005, IEEE 738-2012, IEEE 605-2008 and IEC 61597-1995, are comprehensively analyzed and compared, and different calculation methods of convection heat dissipation power are emphatically compared. It is suggested to use the modified calculation method of primary electrical manual to calculate the outdoor conductor ampacity in converter stations, and according to the different outer diameter of conductors, the recommended method by IEEE 738-2012 and the actual method by DL/T 5222-2005 can be used to calculate indoor conductor ampacity of converter station.

Key words:converter station; conductor ampacity; natural convection; forced convection

0 引言

导体载流量计算是直流换流站设计的重要组成

部分。目前,国内直流换流站导体选择设计时,一般采用电气设计手册中的公式^[1]计算或直接引用现行DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》^[2]附录中的有关结果。然而,直流换流站导体

承受的电流应力较为复杂:直流侧导体主要承载较小谐波的直流电流;阀厅及交/直流滤波器的部分导体承载谐波含量十分丰富的交流电流或带纹波的直流电流。上述公式及规范均仅针对导体流过常规交流电流时的工况分析,并不完全适用于直流换流站中导体载流量的计算。因此,有必要开展换流站导体载流量计算方法的比较与研究,确定合适的计算方法。

1 换流站导体载流量计算原理分析

1.1 换流站导体载流量热平衡方程的修正

同交流导体类似,直流换流站中导体载流量计算的基本物理学原理同样基于热平衡方程,即导体的总散热量同总发热量相等。

空气中导体的散热途径主要包括对流散热、辐射散热和传导散热,发热来源包括焦耳热和太阳辐射吸热。考虑上述各方面因素,IEEE 605—2008 给出交流导体热平衡方程可用式(1)表示^[3]。

$$I^2 R F + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (1)$$

式中: I 为流过导体的电流,A; R 为一定温度下单位长度导体直流电阻, Ω/m ; F 为集肤效应系数; q_s 为太阳辐射吸热功率, W/m ; q_c 为对流散热功率, W/m ; q_r 为辐射散热功率, W/m ; q_{cond} 为传导散热功率, W/m ,一般忽略不计。

对于直流换流站中的导体,由于其承受电流应力较为复杂,故应将式(1)中导体电流热效应扩充至适用于换流站导体实际电流应力的情况。

根据叠加原理,考虑不同频率谐波集肤效应的损耗因数,含谐波的工作电流流过导体产生的焦耳热功率按式(2)计算。

$$q_R = \sum_{k=1}^{50} I_k^2 R_{\text{ack}} \quad (2)$$

式中: k 为谐波次数; I_k 为 k 次谐波电流; R_{ack} 为 k 次谐波电流下导体的交流电阻。

集肤效应引起的损耗因数 Y_s 由式(3)计算。

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (3)$$

其中:

$$X_s = \frac{8\pi/K_s}{R_d \times 10^4} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{D_c - D_s}{D_c + D_s} \cdot \left[\frac{D_c + 2D_s}{D_c + D_s} \right]^2 \quad (5)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{3}{4}D^2 + \frac{1}{4}D_s^2} \quad (6)$$

式中: D 为钢芯铝绞线外径,cm; D_s 为钢芯绞线外径,cm; R_d 为导体的直流电阻。

考虑集肤效应的 k 次谐波电流下导体的交流电阻 R_{ack} 为

$$R_{\text{ack}} = (1 + Y_{s-k}) R_d \quad (7)$$

式中, Y_{s-k} 为 k 次谐波下的导体集肤效应损耗因数。

这样,换流站单导体载流量计算的热平衡方程由式(1)修正为

$$\sum_{k=1}^{50} I_k^2 (1 + Y_{s-k}) R_d + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (8)$$

对于多分裂导线及钢芯铝绞线,还需分别考虑邻近效应和钢芯磁化损耗的影响,其热平衡方程表示为

$$\sum_{k=1}^{50} I_k^2 (1 + Y_{s-k} + Y_{p-k} + Y_{c-k}) R_d + q_s = q_c + q_r + q_{\text{cond}} \quad (9)$$

式中: Y_{p-k} 为 k 次谐波下的导体邻近效应损耗因数; Y_{c-k} 为 k 次谐波下的钢芯铝绞线磁化损耗因数。集肤效应和磁化损耗因数的计算详见文献[2]。

1.2 换流站导体载流量计算实例

对于谐波含量极少的换流站直流导体,其载流量、热效应计算相比交流导体更为简单,计算时仅将交流电阻改为直流电阻即可,故本节不再赘述。这里主要针对换流站中部分除流过正常工作电流外,还流过可观谐波电流的导体,计算其谐波电流的热效应。以某 $\pm 800 \text{ kV}/10\,000 \text{ MW}$ 直流换流站换流变压器阀侧为例,其电流谐波频谱如表1所示。

由表1可以看出,换流变压器阀侧的导体除流过正常工作电流外,还流过可观的谐波电流。计算导体载流量时,一方面需确定考虑谐波的导体电阻损耗;另一方面考察不同次数谐波电流作用下集肤效应系数的区别。

以直流换流站阀厅内常用的LJ-1120纯铝绞线为例,计算得到1.05 pu下各次频率谐波电流的集肤效应损耗因数及其焦耳热,如表2所示。

由表2可以看出,对于换流变压器阀侧的LJ-1120纯铝绞线,考虑谐波后全电流产生的焦耳热功率比基波载流量焦耳热功率高约7.1%;此外,对于换流变压器阀侧,5、7次谐波贡献的焦耳热占有5~49次谐波焦耳热总和的94%。上述结果表明,谐波电流热效应在换流站导体载流量

计算中是不可忽略的,而具有较高幅值的低次谐波电流的热效应是导体选择中需要重点考虑的对象。

表 1 某 ±800 kV/10 000 MW 直流换流站换流
变压器阀侧出线谐波电流频谱

阀侧出线电流	电流值/A	
	1.0 pu	1.05 pu
直流电流 I_d	6 328.000	6 693.000
负荷电流 RMS	5 113.699	5 397.575
1 次谐波	5 007.115	5 289.105
5 次谐波	860.030 30	896.447 00
7 次谐波	525.867 00	539.773 80
11 次谐波	194.047 20	194.047 20
13 次谐波	106.073 80	106.073 80
17 次谐波	61.639 98	67.622 05
19 次谐波	58.433 10	62.318 36
23 次谐波	48.997 46	50.631 74
25 次谐波	41.905 32	41.905 32
29 次谐波	21.091 42	23.188 23
31 次谐波	21.399 77	22.972 38
35 次谐波	19.426 31	20.875 57
37 次谐波	18.624 59	19.426 31
41 次谐波	15.849 40	15.849 40
43 次谐波	12.765 86	12.765 86
47 次谐波	10.329 86	10.977 40
49 次谐波	9.990 672	10.730 720

表 2 考虑谐波的换流变压器阀侧
LJ-1120 焦耳热功率

谐波次数 k	集肤效应 损耗因数 Y_{s-k}	交流电阻 R_{ack} $/(\text{m}\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	谐波热功率 $q_k = I_{k2} \times R_{ack}$ $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$	考虑谐波后的 总热功率 $q_R / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$
1	0.092 0	0.031 4	878.800	
5	0.832 0	0.052 7	42.300	
7	0.995 0	0.057 4	16.720	
11	1.132 5	0.061 3	2.310	
13	1.163 5	0.062 2	0.700	
17	1.198 0	0.063 2	0.290	
19	1.208 0	0.063 5	0.250	
23	1.221 0	0.063 9	0.160	
25	1.225 0	0.064 0	0.110	941.9
29	1.232 0	0.064 2	0.035	
31	1.234 0	0.064 3	0.034	
35	1.237 0	0.064 4	0.028	
37	1.239 0	0.064 4	0.024	
41	1.241 0	0.064 0	0.016	
43	1.242 0	0.064 5	0.010	
47	1.243 0	0.064 5	0.008	
49	1.243 0	0.064 5	0.007	

2 换流站导体载流量计算方法研究

国内工程交流导体载流量一般根据 DL/T 5222—2005 附录中的数值选取。在某些涉外工程中,业主提出应根据后续发布的 IEEE 738—2006 (2012) 或 IEEE 605—2008 等规范进行较为详细的

载流量计算,而其计算原理与 DL/T 5222—2005 及电气一次手册不尽相同。文献[9]对比了 IEC 61957—1995^[5]和 IEEE 738—2006^[6]的载流量计算方法,根据不同方法的计算结果,提出了不同环境条件下建议采用的方法,但未将电气一次手册解析算法及 DL/T 5222—2005 载流量计算方法纳入比较。下面从计算原理出发,结合工程设计实际需求,对比国内外 5 种载流量计算方法,探讨适用于换流站导体载流量计算的方法。

2.1 导体载流量计算的几种方法

2.1.1 导体直流电阻 R 的计算方法

各规范规定的一定温度下单位长度导体直流电阻 R 计算方法相同,按式(10)计算。

$$R = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (10)$$

式中: R_{20} 为 20 °C 时导体直流电阻, Ω/m ; α_{20} 为导体电阻温度系数; θ 为导体最高允许温度, °C。 R_{20} 可根据导体样本给出的数值选择,或根据导体截面积及材料电阻率计算得到。

2.1.2 对流传热功率 q_c 的计算方法

根据传热学基本原理,根据流动起因的不同,对流传热可以区别为强制对流传热和自然对流传热。前者是由于外部动力源造成的,而后者通常是由于流体内部的密度差所引起。两种流动的成因不同,流体中的速度场也有差别,换热规律不一样。因此,对流传热功率 q_c 包括强迫对流传热功率 q_{cf} 和自然对流传热功率 q_{cn} 。根据调研,现有文献对以上两个参数的计算方法不尽相同,具体情况如下。

1) 《电气一次设计手册》相关计算方法

《电气一次设计手册》给出了导体对流传热功率计算方法,对于软导线的强迫对流传热功率,风袭角取 90°,按式(11)计算。

$$q_{cf} = 0.57 \pi \lambda_f \Delta t Re^{0.485} \quad (11)$$

式中: λ_f 为导线表面空气层的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$; Re 为雷诺数。

$$Re = VD/v_f \quad (12)$$

式中: V 为垂直于导线的风速, m/s ; D 为圆柱形导体外径, m ; v_f 为导线表面空气层的动态粘度, m^2/s 。

$$v_f = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6(\theta_a + \theta/2) \times 10^{-8} \quad (13)$$

式中, θ_a 为环境温度, °C。

上述方法主要用于有风条件下计算软导线的对流传热功率,计算了其中强迫对流传热的部分。但对于室内的无风或微风情况,自然对流传热效应占主导地位,《电气一次设计手册》并未涉及这一方面。此外,上述计算方法并未直接体现海拔的影响。

2) DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》采用的载流量计算方法

DL/T 5222—2005 中附录 A 给出的各型号导体载流量结果最早见于文献[7],以式(14)描述对流散热功率 Q_c 为

$$Q_c = \alpha_1 (t_m - t_0) F_1 \quad (\text{W/m}) \quad (14)$$

式中: α_1 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; t_m 为导体运行温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为周围空气温度, $^\circ\text{C}$; F_1 为单位长度对流换热面积, m^2/m 。

由于对流条件不同,分为自然对流和强迫对流两种情况。屋内自然通风或屋外风速小于 0.2 m/s ,属于自然对流换热。空气自然对流换热系数,可按大空间湍流(又称紊流)状态来考虑,自然对流换热系数按式(15)计算。

$$\alpha_{1-\text{natural}} = 1.5 (t_m - t_0)^{0.35} \quad (15)$$

对圆管导体,有

$$F_1 = \pi D \quad (16)$$

屋外配电装置中的管形导体,常受到大气中风吹的作用,风速越大,空气分子与导体表面接触的数目增多,对流换热的条件就越好,形成强迫对流换热。强迫对流换热系数 $\alpha_{1-\text{force}}$ 为

$$\alpha_{1-\text{force}} = \frac{Nu\lambda}{D} \quad (17)$$

式中: λ 为空气的导热系数,当气温为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\lambda = 2.55 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; D 为圆管外径, m ; Nu 为努塞尔数,其值为

$$Nu = 0.13 \left(\frac{VD}{\nu} \right)^{0.65} \quad (18)$$

式中: V 为风速, m/s ; ν 为空气的运动粘度系数,当气温为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\nu = 16.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

根据上述方法,户内导体按自然对流散热原理计算,户外导体按强迫对流散热原理计算。此外,上述计算方法仍未直接体现海拔的影响,而是通过海拔修正系数对标准环境条件下的计算结果进行修正。该方法公式虽同《电气一次设计手册》形式不同,但计算结果及原理基本一样,以下将两者作为同一种方法介绍。

3) IEEE 605—2008 相关计算方法

IEEE 605—2008 IEEE 气体敞开式绝缘变电站母线设计导则(IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations)提出强迫对流散热功率按式(19)计算。

$$q_{cf} = \frac{k_a}{L} \left\{ 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}P_r^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{P_r} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \right\} A\Delta T \quad (19)$$

式中: k_a 为导线表面空气层的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; L 为导体直径, m ; P_r 为空气的普朗特数,取 0.7 ; A 为单位长度导体的迎风面积, m^2/m ; ΔT 为导体最高允许温度 T_c 和周围空气温度 T_a 之差, $^\circ\text{C}$; Re 为雷诺数。

k_a 与导体表面空气膜温度有关,按式(20)计算

$$k_a = 0.024 \cdot 24 + 7.477 \times 10^{-5} T_{\text{film}} - 4.407 \times 10^{-9} T_{\text{film}}^2 \quad (20)$$

式中, T_{film} 为导体表面空气膜温度,等于导体最高允许温度 T_c 和周围空气温度 T_a 的平均值。

$$T_{\text{film}} = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (21)$$

IEEE 605—2008 给出的雷诺数计算方法同《电气一次设计手册》的式(12)有所区别,雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{\rho_f LV}{\mu_f} \quad (22)$$

式中: ρ_f 为空气绝对密度, kg/m^3 ; μ_f 为空气动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

不同温度及海拔条件下, ρ_f 按式(23)计算。

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} H + 6.379 \times 10^{-9} H^2}{1 + 0.00367 T_{\text{film}}} \quad (23)$$

式中, H 为海拔高度, m 。

μ_f 取值同温度有关:

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{\text{film}} + 273)^{1.5}}{T_{\text{film}} + 383.4} \quad (24)$$

IEEE 605—2008 提出,对于无风或多导体近距离平行排布的情况,应计算自然对流散热功率。对于水平圆柱体自然对流散热,其引用了 IEEE 738—2006 的公式,计算风速为 0 时的自然对流功率,如式(25)所示(风袭角取 90°)。

$$q_{cn} = 4.0 \rho_f^{0.5} D^{0.75} \Delta T^{1.25} \quad (25)$$

4) IEEE 738—2012 相关计算方法

IEEE 738—2012 IEEE 计算架空裸导体电流-温度特性的规范(IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors)指出,式(26)适用于低风速,式(27)适用于大风速,强迫对流散热功率取式(26)和式(27)的最大值(风袭角取 90°)。

$$q_{cf1} = \left[1.01 + 1.35 \left(\frac{D\rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f (T_c - T_a) \quad (26)$$

$$q_{cf2} = \left[0.754 \left(\frac{D\rho_f V}{\mu_f} \right)^{0.6} \right] k_f (T_c - T_a) \quad (27)$$

式(26)、式(27)和 IEEE 738—2006 中的表达式是等价的,但 IEEE 738—2012 明确其适用的导体外径范围为 20 ~ 150 mm。

对于自然对流散热功率,按式(28)计算。

$$q_{cn} = 3.645\rho_f^{0.5} D^{0.75} \Delta T^{1.25} \quad (28)$$

5) IEC 61597 相关计算方法

IEC 61597 (Overhead electrical conductors - calculation methods for stranded bare conductors) 仅考虑强迫对流散热,其中强迫对流散热功率按式(29)计算。

$$q_{cf} = \lambda_f N_u (T_c - T_a) \pi \quad (29)$$

式(29)中部分物理量取值同前述方法不同: λ_f 为导体表面空气膜热导率,IEC 61597 规范规定其取常数 0.025 85 W/(m·K)。

Nu 为努塞尔数,按式(30)计算。

$$Nu = 0.65Re^{0.2} + 0.23Re^{0.61} \quad (30)$$

Re 为雷诺数,按式(31)计算。

$$Re = 1.644 \times 10^9 \nu D [T_a + 0.5(T_c - T_a)]^{-1.78} \quad (31)$$

式中: ν 为风速,m/s; D 为导体直径,m; T_c 为导体最高允许温度,K; T_a 为周围空气温度,K。

2.1.3 辐射散热功率 q_r 的计算方法

IEEE 605—2008 及《电气一次设计手册》均采用式(32)所示的斯蒂芬-玻尔兹曼方程计算导体的辐射散热功率。

$$q_r = 5.6697 \times 10^{-8} \times \varepsilon \pi D [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (32)$$

式中: q_r 为辐射散热功率,W/m; ε 为辐射散热/吸热系数(黑度系数)。 ε 取值详见表 3,对于换流站内的管型母线, $\varepsilon = 0.5$;对于换流站内长期运行的铝绞线,可以认为其表面氧化变黑, $\varepsilon = 0.9$ 。

表 3 典型导体表面辐射散热/吸热系数

导体状态	ε 辐射散热/吸热系数的取值	
	铜	铝
清洁表面	0.1	0.1
轻微失去光泽 (户内外安装后不久)	0.3 ~ 0.4	0.2
长期户外暴露	0.7 ~ 0.85	0.3 ~ 0.5
涂黑	0.9 ~ 0.95	0.9 ~ 0.95

2.1.4 太阳辐射吸热功率 q_s 的计算方法

根据 IEEE 605—2008,太阳辐射吸热功率 q_s 按式(33)计算。

$$q_s = \varepsilon Q_s A' K \sin \varphi \quad (33)$$

式中: q_s 为太阳辐射吸热功率,W/m; ε 为辐射吸热系数,取值同表 3; φ 为太阳辐射角,保守考虑时可

取 90°; A' 为单位长度导体垂直于太阳辐射的投影面积,对于圆柱型导体其 $A' = \pi D$,m²/m; Q_s 为太阳辐射强度,W/m²; K 为海拔辐射修正系数,IEEE 738—2012 给出其计算公式为

$$K = 1 + 1.148 \times 10^{-4} H - 1.108 \times 10^{-8} H^2 \quad (34)$$

需要指出的是,IEEE 还给出了导线所处纬度、季节、时间、环境、高度、走向等不同因素下的太阳辐射吸热功率计算方法。针对工程设计应用的实际情况,这里仅计算其最严格条件下的数值。

2.2 导体外表面对流散热原理分析及计算方法

从第 2.1 节可以看出,在热平衡方程中,各规程规范或手册中关于导体对流散热的计算公式不尽相同:一些明确区分了强迫对流散热和自然对流散热;一些仅考虑了强迫对流散热。在强迫对流散热方面,计算公式也不尽相同,因此,对流散热原理进行简要分析,从工程应用和传热原理两方面出发,讨论选择相应合适的计算方法。

2.2.1 强迫对流散热计算结果分析

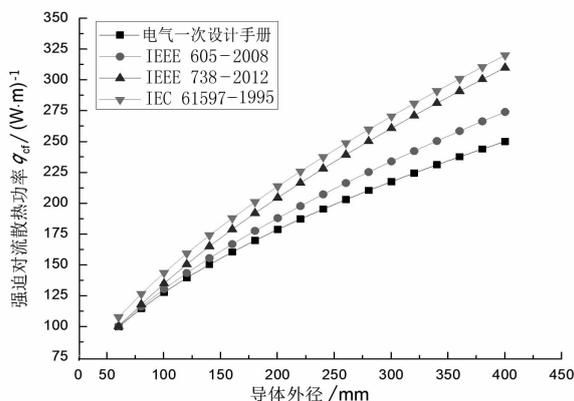


图 1 不同计算方法得到的导体强迫对流散热功率(海拔 0 m)

采用第 2.1 节对应的不同公式,分别计算导体在海拔为 0 m 和 1000 m 时的强迫对流散热功率。基本计算条件为:环境温度 25 °C,导体最高允许温度 80 °C,风速 0.5 m/s。海拔为 0 m 的计算结果如图 1 所示(在这一条件下,《电气一次设计手册》计算结果和 DL/T 5222—2005 计算结果一致,下同)。可以看出,对于外径 60 ~ 400 mm 范围内的导体,采用《电气一次设计手册》计算得到的强迫对流散热功率最小,即最保守。然而,《电气一次设计手册》相关计算方法并未给出海拔影响,需对其进行修正,以计算不同海拔条件下的载流量。

根据传热学基本原理,容易知道海拔对强迫对流散热的影响主要体现在海拔升高、空气密度下降、

强迫对流散热效应减弱。《电气一次设计手册》及 DL/T 5222—2005 相关计算方法中,雷诺数的计算应考虑海拔修正,其计算公式应修正为式(35),即

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu_f} \quad (35)$$

空气密度随着海拔高度的改变而改变,但是特定模型特定区域的尺寸和流速是不变的。参照文献[8-9],根据空气密度与海拔的关系,可以得到 Re 的海拔修正公式为

$$Re(H) = \eta(H) Re(0) \quad (36)$$

式中: $Re(H)$ 为海拔 H 处的雷诺数; $\eta(H)$ 为海拔为 H 处的空气相对密度,表达式为

$$\eta(H) = (1 - 2.25577 \times 10^{-5} H)^{5.2559} \quad (37)$$

上述雷诺数 Re 的海拔修正方法,和 IEEE 738—2012 中空气绝对密度 ρ_f 和空气动力粘度 μ_f 关于海拔 H 的关系式是等价的,可以得到相同的修正结果。

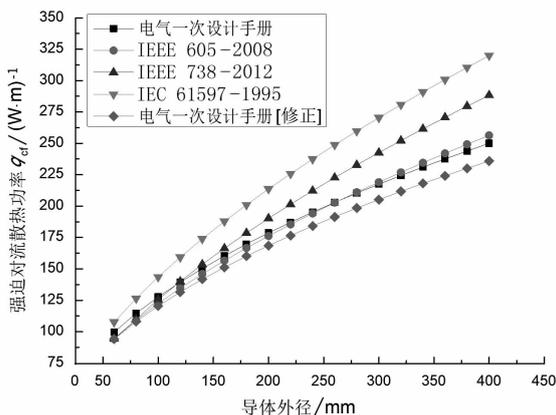


图2 不同计算方法得到的导体强迫对流散热功率(海拔 1000 m)

采用上述修正后的《电气一次设计手册》计算方法,计算海拔为 1000 m 的不同直径导体的强迫对流散热功率,结果如图 2 所示。综合图 1 和图 2 可以看出,采用未修正的《电气一次设计手册》及 IEC 61597—1995 方法计算的强迫对流散热功率并没有随着海拔增加而变化;而 IEEE 605—2008 及 IEEE 738—2012 方法计算的高海拔下强迫对流散热功率明显下降;采用修正后《电气一次设计手册》计算方法得到的强迫对流散热功率同样随海拔增加而下降。

从计算结果看,海拔为 0 m 时,各种方法计算的强迫对流散热功率计算值大小有“IEC 61597—1995” > “IEEE 738—2012” > “IEEE 605—2008” > “电气一次设计手册”的关系;考虑海拔修正时,有“IEEE 738—2012” > “IEEE 605—2008” > “电气一次设计手册(修正)”的关系。IEC 61597—1995 主要针对输电线路,其散热环境好于变电站、换流站

内,故其散热功率计算值最大,计算得到的导体载流量也最大,有利于最大程度地利用导体载流面积,提升输电线路的经济性。而修正电气一次设计手册计算方法得到的散热功率最小,计算得到的导体载流量也最小。因此,对于换流站内的户外导体,若保守考虑,工程中可采用修正的《电气一次设计手册》的方法计算导体的强迫对流散热功率,具有足够的裕度。

2.2.2 自然对流散热计算结果分析

根据第 2.1 节内容,对于换流站户内导体,由于一般没有均匀风速的空气流动,没有强迫对流散热过程,应采用自然对流散热原理计算其对流散热功率。分别采用不同方法计算了导体的自然对流散热功率,如图 3 所示,虽然 IEEE 605—2008 在 IEEE 738—2012 给出的公式基础上将系数四舍五入、向上取整,但方法是统一的,其散热功率随外径增加而增加的趋势是一致的。根据 DL/T 5222—2005 的计算结果,热源向周围传递的热量与导体外径成正比,同 IEEE 计算结果相比存在一处转折点:当导体外径小于 100 mm 时,DL/T 5222—2005 的自然对流换热功率计算结果比 IEEE 小,当导体外径大于 100 mm 时,DL/T 5222—2005 的自然对流换热功率计算结果比 IEEE 计算结果大,且差值逐渐增加。实际工程中,可根据导体的外形尺寸,选择相对保守的计算方法。

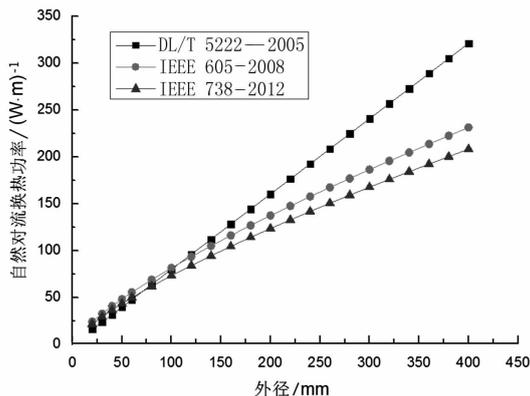


图3 不同计算方法得到的导体自然对流散热功率

3 结语

上面根据载流量计算的基本原理,给出了换流站中不同载流工况下导体载流量计算的基本原则,确定了适用于换流站导体载流量计算的修正的热平衡方程;在载流量计算方法方面,综合分析比较了电气一次设计手册、DL/T 5222—2005、IEEE 738—

2012、IEEE 605—2008、IEC 61597—1995 等 5 个规程规范给出的交流导体载流量计算方法及其计算结果,重点对比不同的对流散热功率计算方法。分析表明,对于适用于户外导体的强迫对流散热功率,IEEE 738—2012 给出的计算方法综合考虑了温度、海拔等因素的影响,比《电气一次设计手册》计算方法更为完备,而根据其原理修正的《电气一次设计手册》计算方法的计算结果则最为保守。考虑 IEEE 738—2012 不适用于外径大于 150 mm 的导体,结合国内工程设计实际情况,建议采用修正的《电气一次设计手册》计算方法计算换流站户外导体载流量。对于适用于户内导体的自然对流散热功率,导体外径大于 100 mm 时采用 IEEE 738—2012 计算方法更保守;导体外径小于等于 100 mm 时,采用 DL/T 5222—2005 计算方法更保守。相关研究结论可供涉外工程设计及换流站导体选择设计相关规程规范的编制参考使用。

参考文献

[1] 水利电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,1989.

(上接第 26 页)

- [3] 王惠中,朱宏毅,张茨,等. 稀疏矩阵在电网网络拓扑分析中的应用与研究[J]. 电网与清洁能源,2014,30(12):1-4.
- [4] 崔岩. 邻接矩阵染色法及其在电力系统网络拓扑分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(16):52-56.
- [5] 朱文东,刘广一,于尔铿,等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术,1996,20(3):30-33.
- [6] 苏义荣,邱淘西,邱家驹. 配电网拓扑分析的研究[J]. 浙江电力,2001,20(5):10-14.
- [7] 李盟,秦立军,郭庆,等. 基于 CIM 模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22.
- [8] 王明鸣,孟相如,李纪真,等. 基于着色树优化的网络并发链路故障快速恢复方法[J]. 计算机应用研究,2015,32(6):1822-1825.
- [9] 王小飞,胡志坚,吴方劼,等. 基于改进邻接矩阵的稀疏技术及其在电力系统计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(9):50-56.
- [10] 姚玉斌,叶爽利,吴志良,等. 稀疏矩阵法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):1-5.
- [11] 周琰,周步祥,邢义. 基于邻接矩阵的图形化网络拓扑分析方法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):49-52.

- [2] 导体和电器选择设计技术规定:DL/T 5222—2005[S],2005.
- [3] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors:IEEE 738-2012[S],2012.
- [4] IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations:IEEE 605-2008[S],2008.
- [5] Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors:IEC 61597-1995[S],1995.
- [6] IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors:IEEE 738-2006[S],2006.
- [7] 邱岭. 导体载流量计算:导体及电气设备选择文集(第三集)[C]. 北京:全国电气工程标准技术委员会导体及电气设备选择分委员会,1999.
- [8] 刘士樟. 铝绞线钢芯铝绞线交直流电阻及载流量的计算[J]. 电线电缆,1988(6):6-12.
- [9] 王飞,张浏骏,许佩佩,等. 海拔高度对变频器散热影响的研究[J]. 电子机械工程,2016,32(1):9-15.
- [10] 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

作者简介:

韩毅博(1991),男,硕士,工程师,主要从事换流站和变电站的设计研究工作。 (收稿日期:2021-04-27)

- [12] 杨冬锋,周苏荃,刘隽,等. 基于关联矩阵化简的电网拓扑辨识新方法[J]. 华东电力,2014,42(11):2254-2259.
- [13] 黄佳乐,杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.
- [14] 徐彪,尹项根,张哲,等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):152-161.
- [15] 卢虹宇,蔡月明,刘明祥,等. 低压配电台区拓扑辨识及校核方法[J]. 电气自动化,2020,42(3):95-98.
- [16] 蒋玮,汤海波,祁晖,等. 基于集成深度神经网络的配电网联络关系辨识技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):101-108.

作者简介:

曾顺奇(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

吴杰康(1965),男,工学博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制等;

李欣(1981),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

刘国新(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制、冷热电联供运行优化等。

(收稿日期:2021-04-02)