

等效热路在共箱隔离开关温升计算中的运用

刘 分, 刘 刚, 秦晓宇, 李松磊, 史春玲
(河南平芝高压开关有限公司, 河南 平顶山 467013)

摘要: 隔离开关是气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)的重要设备,而温升试验是其型式试验的关键环节之一。为了在开发阶段更准确地评估隔离开关运行在大电流工况下的温升,基于传热学原理,考虑集肤效应、接触电阻、散热阻抗等因素,并兼顾到三相共箱设计,提出了一种基于等效热路模型的计算方法。将计算结果和试验数据对比分析,结果表明,所提出的计算方法能相对准确地评估三相共箱隔离开关重点节点的温升,为新产品开发提供重要依据。

关键词: GIS; 隔离开关; 温升; 等效热路; 集肤效应; 热阻

Application of Equivalent Thermal Circuit in Calculation of Temperature Rise of Three-phase Enclosed Disconnecter

LIU Fen, LIU Gang, QIN Xiaoyu, LI Songlei, SHI Chunling
(Henan Pingzhi High-voltage Switchgear Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467013, China)

Abstract: Disconnecter is an important device of gas insulated switch gear(GIS), and temperature rise test is one of the key links of its type test. In order to evaluate the temperature rise of a disconnecter in high current condition more accurately in its development stage, this paper proposes a calculation method based on equivalent thermal-circuit model according to the heat transfer theory, in which the factors such as skin effect, contact resistance, and heat dissipation impedance, as well as the three-phase enclosed design, are considered. The results of calculation and test show that the proposed method can give relatively accurate temperature rise of the key nodes of the three-phase enclosed disconnecter for development of new products.

Key words: GIS; disconnecter; temperature rise; equivalent thermal circuit; skin effect; heat resistance

0 引言

GIS以其结构紧凑、安装方便、使用安全、寿命长等优点,被广泛应用在配电系统中^[1-2]。随着国民经济的飞速发展,电力设备使用量日益增多,电网主变容量的日渐增大,电力市场对开关设备的通流能力提出了更高的要求。且国家标准规定,温升试验验证时通流为额定电流的1.1倍^[3],因此对设备通流能力要求更加苛刻。

GIS设备的使用寿命和运行可靠性不仅取决于材料和结构设计,还与运行时的发热程度有关^[4-5]。隔离开关作为GIS的关键设备,其载流导体在运行时

如果温升过高,将会大大降低金属材料的机械性能,加快绝缘材料的老化速度和金属的氧化速度^[6-10]。252 kV三相共箱隔离开关因为体积小,且通流比较大,所以其温升计算对GIS的安全运行具有重要意义。通过对三相共箱隔离开关发热、散热规律进行深入研究,找出影响暂态、稳态温升的因素^[11-14],建立等效热路,可以便捷地修改导体尺寸等参数^[15],对其结构进行优化设计,从而达到延长使用寿命,降低产品成本的目的。

1 国内、国际标准温升允许值

长期载流情况下GIS产品的通流能力以其温升

收稿日期:2020-02-25; 修回日期:2020-04-16

基金项目:河南平芝高压开关有限公司自筹项目(PGKJ2018-102)。

Project Supported by Self-financing Project of Henan Pingzhi High-voltage Switchgear Co., Ltd. (PGKJ2018-102).

值来衡量,国家标准(GB)和国际电工委员会(IEC)均对其进行规定。在温升试验规定的条件下,当周围空气温度不超过40℃时,开关设备和控制设备任何部位的温升不应该超过表1规定的温升极限。

表1 高压开关设备在长期工作时的允许温升

Table 1 Allowable temperature rise of high-voltage switchgear during long-term operation

序号	部件	材料	绝缘介质	允许温升/K	
				GB	IEC
1	触头	裸铜或裸	SF ₆ 气体	65	75
		铜合金	空气	35	35
		镀银或镀	SF ₆ 气体	65	75
		镍	空气	65	75
2	用螺栓或与其等效的联结	裸铜或裸	SF ₆ 气体	75	75
		铜合金	空气	50	60
		镀银或镀	SF ₆ 气体	75	75
		镍	空气	75	75
3	可触及的部位	正常工作中可触及的		30	40
		正常工作中不可触及		40	40

由国家标准(GB)和国际电工委员会(IEC)对通流设备允许温升限制可看出,针对触头部分及可接触部分,IEC标准^[16]对相较于GB温升值有所提升。但GIS产品设计主要是为了满足国内市场需求,同时兼顾国际市场,故对产品进行通流能力优化计算时要按照较苛刻的条件(国家标准)执行。

2 温升计算理论

2.1 GIS内部发热源

运行中的高压开关设备会因发热造成温度升高,其热源的产生主要来自:①导体通过电流时产生的电阻损耗;②导磁材料在交变电场作用下的涡流和磁滞损耗;③绝缘材料的介质损耗。对GIS导电回路而言,绝缘材料的介质损耗在产品初期即已确定,而电阻损耗会因工作环境不同而有所变化,导电回路的接触部位尤其明显。

GIS设备导电回路电阻由导体自身的固有电阻和连接部位的接触电阻两部分组成。导体自身固有电阻主要和导体的结构、电阻率、温度等固有属性有关。导体接触电阻是指连接部位端子接触间所产生的附加电阻。影响接触电阻的因素主要有导体材料的性质、接触形式、接触压力、接触面粗糙度、温度、腐蚀、频率等^[17]。

2.2 散热方式

高压开关设备中产生的热损耗,通过传导、对流和辐射3种方式向周围介质散热^[18-19]。传导,即当

物体的内部存在温度差,由于分子和原子的微观运动,热量由高温区向低温区传递。对流,即流动着的流体和它直接接触的固体表面间热传递过程称为对流换热。辐射,即物体的热能不断地以电磁波的形式向四面八方发射。

2.3 传热原理

GIS发热主要由导体流过电流时产生的焦耳热 Q_1 和壳体所处的交变电磁场引发的表皮电流热损耗 Q_2 。而其散热主要通过导体表面和壳体之间热辐射、导体和绝缘气体之间热对流及绝缘气体和壳体之间的热对流将热量传递到壳体,壳体通过自身的热辐射和大气的热对流向大气传递,最终达到平衡状态,各部分温升不再发生变化,见图1。

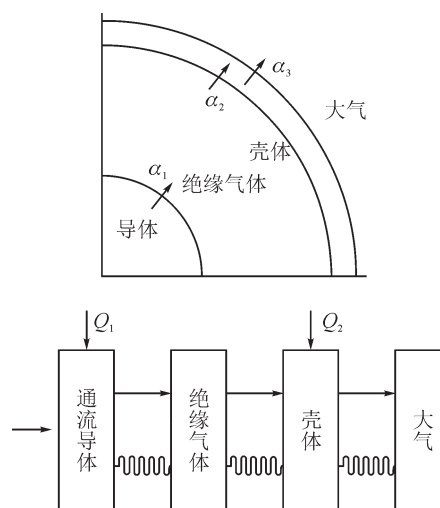


图1 GIS传热原理

Fig. 1 Principle of heat transfer in GIS

2.4 理论计算过程

开关设备在长期通过额定电流情况下,由于电流的作用其内部产生的热量一部分使导体本身温度升高,另一部分散失到周围介质中,二者之间呈动态分配。直到导体发热过渡到稳态时,导体发热温度达到热平衡状态。该计算方法假定GIS处于长期通流情况下已经达到某个热平衡状态,即发热和散热处于热平衡状态。详见图2。

当发热和散热达到平衡时,热平衡方程可采用式(1)进行计算

$$Q_{\text{总}} = \frac{1}{R_{1,2}}(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{R_{1,3}}(\theta_1 - \theta_3) + \dots \quad (1)$$

式(1)中: $Q_{\text{总}}$ 为GIS回路总发热量; $R_{1,2}$ 、 $R_{1,3}$ 等为各部分的热阻; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 等为各部位的温度。

2.4.1 发热

GIS内部产生的热量主要由导体本身发热和接触电阻产生的热量。导体本身电阻为:

$$R_{\text{dc}} = R_{\text{dc1}} [1 + a_1(t_1 - 20)] \quad (2)$$

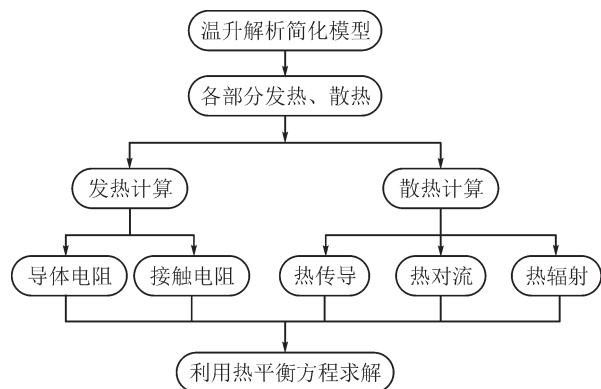


图2 温升理论计算流程

Fig. 2 Theoretical calculation flow of temperature rise

$$R_{dc1} = \rho L / S \quad (3)$$

$$R_{ac} = K \times R_{dc} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: R_{dc} 为温度 t_1 下导体的直流电阻, $\mu\Omega$; R_{dc1} 为20℃下导体直流电阻, $\mu\Omega$; a_1 为20℃时的温度系数; ρ 为导体电阻率, $\mu\Omega \cdot \text{mm}$; L 为导体长度,mm; S 为导体截面积, mm^2 ; K 为交变电流下导体集肤效应; R_{ac} 为导体交流电阻, $\mu\Omega$ 。

交变电流流过导体时,导体周围变化的磁场也要在导体中产生感应电流,从而使沿导体截面积的电流分布不均匀。尤其当频率较高时,此电流几乎是在导体表面附件的一薄层中流动,形成集肤效应现象^[20-21]。集肤效应系数为:

$$K = 1 + A_1 [1 - (t/d) - A_2 (t/d)^2] \quad (5)$$

$$A_1 = 7[2.513tf/(D-t)R_{dc}]^2 / \{315 + 3[2.513tf/(D-t)R_{dc}]^2\} \quad (6)$$

$$A_2 = 224 / \{211 + [2.513tf/(D-t)R_{dc}]^2\} \quad (7)$$

式(5)~(6)中: t 为导体壁厚,mm; d 为导体内径,mm; D 为导体外径,mm; f 为频率,Hz; R_{dc} 为直流电阻, $\mu\Omega$ 。

接触电阻由接触表面的收缩电阻与接触表面电阻两部分组成。导体表面状况、接触压力、材料硬度及电阻率等因数影响着接触电阻的大小。影响接触电阻的综合因素可用下面的经验公式^[1-19, 22]表达

$$R_c = K_c / (F_j / 9.8)^m \quad (8)$$

式(8)中: R_c 为接触电阻, $\mu\Omega$; F_j 为接触压力,N; K_c 为与材料、表面状况有关的系数; m 为与接触形式有关的系数,见表2。

导体本身或接触电阻的发热量为 Q_1 、 Q_2 ,则

$$Q_1 = I^2 R_{ac} \quad (9)$$

$$Q_2 = I^2 R_c \quad (10)$$

2.4.2 散热

散热的主要途径有传导、对流、辐射。

1)传导。导体间热量传递过程,会遇到阻力,即

表2 不同接触材料的有关接触系数

Table 2 Contact coefficient of different contact materials

接触材料	K_c	接触形式	m
铜镀银—铜镀银/铜镀银—铝 镀银	80/100	点接触	0.5
铜—铜(保护铜搪锡)	120~160	线接触	0.7
铜镀银—铝/铜—铝	450/980	面接触	1.0
黄铜—铝	1 900	—	—

为热阻。导体本身的热阻 R_1 为

$$R_1 = (1/\lambda)(l/s) \quad (11)$$

式(11)中: λ 为热传导率; l 为传导方向的距离; s 为传导截面积。

导体和导体之间接触部位的热阻 R_2 与接触电阻 R_c 有关,关于接触电阻的热阻,计算上采用式(12)进行换算,即

$$R(\text{℃/W}) = K\gamma \quad (12)$$

式(12)中: γ 为接触电阻, $\mu\Omega$; K 为常数(℃/W, $\mu\Omega$),取0.2。

导体本身与接触电阻之间的热阻为

$$R_{1,2} = (R_1 + R_2)/2 \quad (13)$$

气体中的散热包含对流和辐射。

2)对流。对流条件和气体成分、气体压力、导体形状、气体温度及环境温度有关,不同的气体中热量传递的传导率不同、气体的动粘性系数不同。开关装置中通流部分主要为圆柱形、平板形。热量传递率可通过式(14)计算:①当基于平板长度的瑞利数 $Ra < 10^9$ 时,平均热传导率 $\alpha = \lambda Nu/l$ ^[23],其中

$$Nu = 1.33f(Pr)(Gr)^{1/4} \quad (14)$$

②当基于平板长度的瑞利数 $Ra > 10^9$ 时,平均热传导率 $\alpha = \lambda Nu/l$,其中

$$Nu = 0.129(GrPr)^{1/3} \quad (15)$$

式(15)中: λ 为热传导率; l 为发热体长度; Gr 为格拉肖夫数; Pr 为普朗特鲁数。

基于上述算式,通过试验数据圆整计算结果,导体与 SF_6 气体之间传导率 α 取20 watt/($\text{m}^2 \cdot \text{℃}$), SF_6 气体和筒体之间的传导率 α 取15 watt/($\text{m}^2 \cdot \text{℃}$),壳体和空气之间的传导率 α 取3.5~7 watt/($\text{m}^2 \cdot \text{℃}$)。

3)辐射。固体表面产生的辐射能力按斯忒藩—玻尔兹曼定律(stefan-Boltzmann' law)表示:

$$Q = \alpha_s (T_1 - T_2) A \quad (16)$$

$$\alpha_s = \sigma \times K \times \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / (T_1 - T_2) \quad (17)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (18)$$

式(16)–(18)中: A 为放射面积; σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数 $5.667 \times 10^8, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{T}^4)$; K 为根据放射形态和放射率定的系数,见图3; T_1 、 T_2 为绝对温度; ε_1 、 ε_2 为热源的放射率; A_1 、 A_2 为热源的截面积。

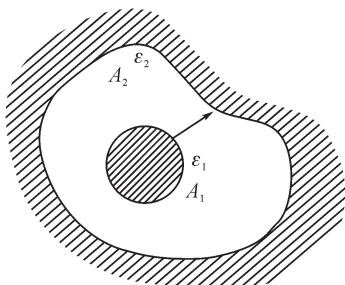


图3 辐射形态

Fig. 3 Form of radiation

3 252 kV 三相共箱隔离开关模拟过程

3.1 模型简化

根据三相共箱隔离开关装置内部电流流路线对模型进行简化。在隔离开关温升计算时,因通电部分形状复杂,所以导体电阻、热电阻的计算要按照近似的方法等效为简单形状,见图4。在简化模型的过程中,由于导体和壳体均为非铁磁材料,不

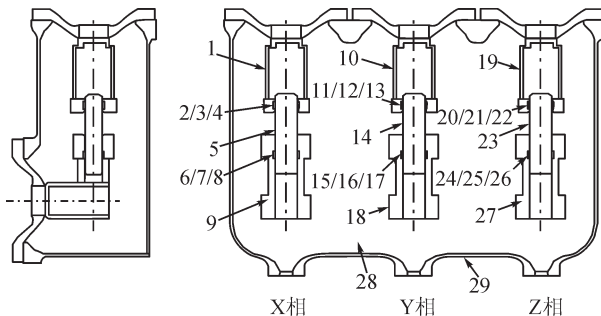


图4 252 kV 三相共箱隔离开关等效模型

Fig. 4 Equivalent model of 252 kV three-phase enclosed disconnector

会形成磁滞回路,不考虑磁滞损耗现象。另外,导体和绝缘件之间的介质损耗极小,可以忽略不计。

将模型中每个发热导体看作一个单体,单体连接面存在接触关系,将这些单体编上唯一编号(例如:导体1与导体5之间通过触指3连接,2表示导体1与触指3之间的接触电阻,4表示导体5与触指3之间的接触电阻,则 $R_{1,2}$ 表示导体1与接触电阻2之间的热阻),并将它们相对关系用等效热路进行表示(见图5),最后按照图示关系列出热平衡方程式(见图6)。

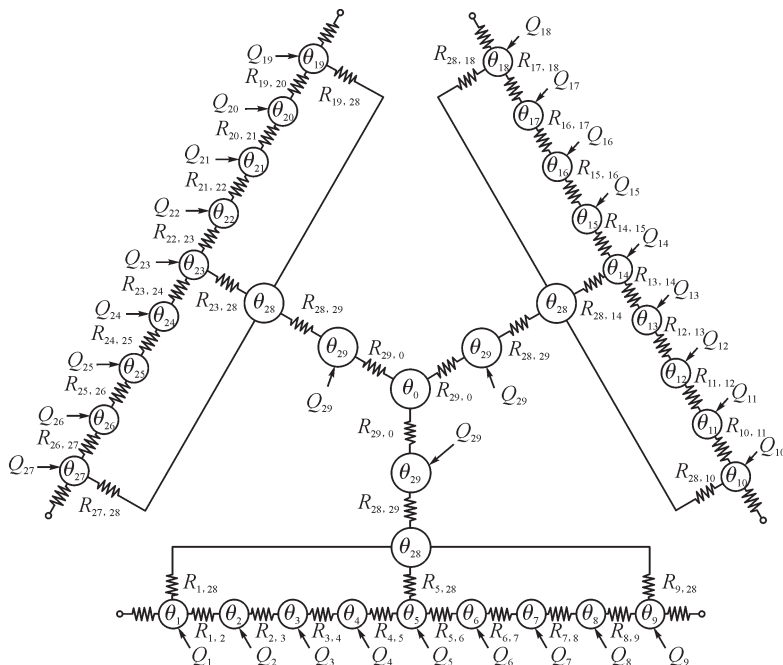


图5 252 kV 三相共箱隔离开关等效热路

Fig. 5 Equivalent thermal-circuit of 252 kV three-phase enclosed disconnector

假设回路上通电电流为4 000 A,环境温度 T_0 设定为20℃,各部分等效电阻值和热阻值见表3,将各等效导体电阻、热阻及环境温度带入热平衡方程,最终求解各部位的温升值。按照以上方式进行计算,结果见表4。

3.2 计算结果

为研究该计算方法的可行性,对采用此计算方法的隔离开关进行温升试验测试。结果显示,二者温升趋势相同,其值能满足国家标准规定,且误差在6.7%范围内,详见图7。

$$Q_1=(T_1-T_2)/R_{1,2}+(T_1-T_{28})/R_{1,28}$$
$$Q_2=(T_2-T_1)/R_{1,2}+(T_2-T_3)/R_{2,3}$$
$$Q_3=(T_3-T_2)/R_{2,3}+(T_3-T_4)/R_{3,4}$$



$$Q_{29}=(T_{11}-T_{10})/R_{10,11}+(T_{11}-T_0)/R_{11,0}$$

图6 热平衡方程

Fig. 6 Heat balance equation

表3 不同测点的等效值

Table 3 Equivalent value at different measuring points			
测点	材料	交流电阻/ $\mu\Omega$	热阻/ $\mu\Omega$
1/10/19	Al	2.20	0.25
2/11/20	接触部位	0.45	0.06
3/12/21	铜合金	0.88	0.09
4/13/22	接触部位	0.34	0.05
5/14/23	Al	2.90	0.22
6/15/24	接触部位	0.34	0.05
7/16/25	铜合金	0.88	0.09
8/17/26	接触部位	0.45	0.06
9/18/27	Al	1.42	0.08
28	—	2.20	0.25
29	—	0.45	0.06

表4 不同测点的温升值

Table 4 Temperature rise value at different measuring points			
测点	温升 /K	测点	温升 /K
1/10/19	59.34	7/16/25	61.28
2/11/20	62.84	8/17/26	62.36
3/12/21	62.36	9/18/27	60.67
4/13/22	64.13	28	22.01
5/14/23	64.26	29	24.71
6/15/24	61.71	—	—

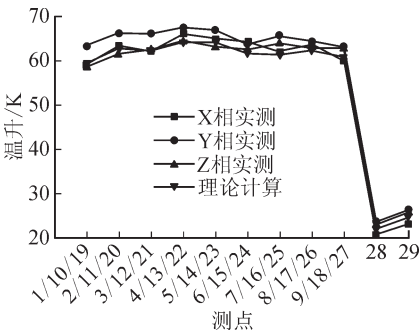


图7 温升理论计算与实测值对比

Fig. 7 Comparison between theoretical calculation and measured value of temperature rise

4 结语

GIS中隔离开关的温升计算时,因其通电部位结构、形状复杂,所以导体的电阻、热电阻计算都需要采用近似等效的方法。通过试验验证,这种假设导体长期通流设备达到热稳定状态的温升计算方法,其理论计算值与实测值误差在6.7%之内。因此,该方法可以为252 kV三相共箱隔离开关的温升计算提供判据。另外,由于计算模型中每个构成单位的温度统一,若要提高计算精度,可将单元根据形状差异进行分割。

参考文献:

[1] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin. Design of SF₆ high voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

[2] 李玉杰,李洪涛,高 山,等. GW6B-252型隔离开关触头温升与接触状态关系研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37 (4):121-125.
LI Yujie, LI Hongtao, GAO Shan, et al.Study on the relationship between contact temperature rise and contact state of GW6B-252 disconnecter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37 (4): 121-125.

[3] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
Common technical requirements for high voltage switchgear and control equipment standards: GB / T 11022—2011[S]. Beijing:China Standards Press, 2012.

[4] 金 虎,彭在兴,王 颂,等. 252 kV三相共箱GIS母线壳体温度场分布特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 20-25.
JIN Hu, PENG Zaixing, WANG Song, et al.Research on temperature field distribution characteristics of 252 kV three - phase enclosed GIS bus bar shell[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12):20-25.

[5] 马 波,吴旭涛,李秀广,等. GIS温度场分布特性及影响因素的有限元仿真研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3):69-73.
MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al.Finite element simulation of temperature field distribution characteristics and influencing factors in GIS[J]. Insulation Materials, 2019, 52(3):69-73 .

[6] 宋 帆,申春红,林 莘,等. 800 kV GIS隔离开关磁场-温度场计算与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1383-1388.
SONG Fan, SHEN Chunhong, LIN Xin, et al.Calculation and analysis on magneto-thermal fields of 800 kV GIS dis-

- connector[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1383-1388.
- [7] 刘亚男,舒乃秋,李彦彰,等. 基于等效热路模型的GIS隔离开关温升计算[J]. 电测与仪表, 2017, 54(19): 7-12.
LIU Yanan, SHU Naiqiu, LI Yanzhang, et al. Temperature-rise calculation of GIS disconnecting switch based on equivalent thermal - circuit model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(19): 7-12.
- [8] TIMSIT R S. Electrical instabilities in stationary contacts: Al/al and al/brass junctions[J]. Electrical Contacts, 1988, 11(1): 12-16.
- [9] RUNDE M, HODNE E, TTDAL B. Current-induced aging of contact spots[J]. Electrical Contacts, 1989, 12(13): 20-25.
- [10] LEE K L, HU C K, TU K N. In situ scanning electron microscope comparison studies on electromigration of Cu and Cu (Sn) alloys for advanced chip interconnects[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(7): 4428-4437.
- [11] 刘生辉. GN30-10Q隔离开关接触电阻值的计算分析[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 106-108.
LIU Shenghui. Research calculation of electrical contact of GN30-10Q disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 106-108.
- [12] 宋邦申. 分箱式GIL中通流导体的设计计算[J]. 电气制造, 2011(1): 64-65.
SONG Bangshen. Design and calculation of through current conductor in box type GIL[J]. Electrical Manufacturing, 2011(1): 64-65.
- [13] 鄢来君, 张 颖. 大电流封闭母线温升计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 201-203.
YAN Laijun, ZHANG Ying. Calculation of temperature rise of high current enclosed bus[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 201-203.
- [14] 王 磊, 严浩军, 林 钧, 等. 户外高压隔离开关电触头温升机理研究[J]. 广东电力, 2014, 27(12): 92-95.
WANG Lei, YAN Haojun, LIN Jun, et al. Research on electric contact temperature rise mechanism of outdoor high voltage disconnecting switch[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12): 92-95.
- [15] 张敬菽, 王其恺, 孙会刚. 基于热网络法的高压开关设备热特性分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 34-38.
ZHANG Jingshu, WANG Qikai, SUN Huigang. Thermal analysis of high voltage circuit breaker based on thermal network[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 34-38.
- [16] 高压开关设备和控制器. 第1部分: 通用规范: IEC 62271-1: 2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
High voltage switchgear and controlgear - Part 1: General specification: IEC 62271-1: 2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [17] 邓 斌, 杨 帆, 王国志, 等. 隔离开关触点静态接触下热稳定性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 91-96.
DENG Bin, YANG Fan, WANG Guozhi, et al. Study on thermal stability of disconnector contact under static contact [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 91-96.
- [18] 张靖周. 高等传热学[M]. 北京: 科技出版社, 2009.
ZHANG Jingzhou. Advanced heat transfer[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2009.
- [19] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
- [20] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [21] 宋浩永, 王 炜, 黄青丹, 等. 载流导体临近与趋附效应及电流频率对三相共箱式GIS温升的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 97-102.
SONG, Haoyong, WANG Wei, HUANG Qingdan, et al. Influence of proximity and skin effect of current carrying conductor and current frequency on the temperature-rise of three - phase - in - one - tank type GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 97-102.
- [22] 许 军, 李 坤. 电接触的接触电阻研究[J]. 电工材料, 2011(1): 10-13.
XU Jun, LI Kun. The research on resistance of electrical contact[J]. Electrical Engineering Materials, 2011(1): 10-13.
- [23] (日)圆山重直. 传热学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
(Japanese) MARUYAMA S. Advanced heat transfer[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.

刘 分(1980—),女,本科,工程师,主要从事气体绝缘金属封闭开关开发(E-mail: lf08082@163.com)。