

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.035

负荷电流对电接触点温升的影响

林其雄, 曾文斐, 区伟明, 蔡 蒂, 周 哲, 陈智仁

(广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: 由于高压电气设备的电接触点的发热功率和负荷电流的大小有关,在通过温度判断其是否存在电接触缺陷时需要考虑负荷的影响,因此文中研究了负荷电流对电接触点发热的影响。首先根据焦耳—楞次定律和热传递理论从理论上分析了电接触点的发热机理及温升规律,然后通过实验研究了隔离开关这种典型的电接触设备在负荷变化情况下发热部位的温度随时间的变化规律,以及发热部位稳态温升和负荷电流之间的关系。研究表明,对于隔离开关的触头和接线端,在负荷变化时其温度变化快慢和热时间常数有关,其稳态温升和负荷电流之间存在幂函数的关系。文中的研究结果为在不同负荷情况下判断电接触缺陷提供了参考。

关键词: 负荷; 温升计算; 隔离开关; 热时间常数

Influence of Load Current on Temperature Rise of Electrical Connector Contacts

LIN Qixiong, ZENG Wenfei, QU Weiming, CAI Di, ZHOU Zhe, CHEN Zhiren

(Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: The heating power of some electrical connector contacts of high-voltage equipment depends on load current, so the influence of load must be considered in fault diagnosis of the contacts via temperature. In this paper, the heating mechanism and the temperature change laws of the electrical connector contacts were analyzed theoretically with the Joule - Lenz' s law and the theory of heat transfer. Then experiments were conducted to obtain the temperature change of heating position of disconnector with time under varying load current and the relationship between steady - state temperature rise of the heating position and load current. Results show that the temperature change speeds of disconnector contact and terminal are related with thermal time constant, and the steady-state temperature rise has exponential function relationship with the load current. This study may provide reference for fault diagnosis of electrical connector contacts in different load conditions.

Key words: load; temperature rise calculation; disconnector; thermal time constant

0 引言

电气设备在运行时,在电压和电流的作用下,电气设备会产生一定的功率损耗,这些损耗的功率一部分转化为热能,引起设备的温度升高。正常运行的电气设备产生的热量经过一定的方式传到设备表面,使设备的表面呈现一种特定的热特征,而电气设备的某些缺陷也会使电气设备产生异常的发热,从而使电气设备表面存在异常的热分布^[1-3]。通过红外热像仪可以远距离、非接触得到电气设备表面的温

度特征,进而对电气设备的运行状态进行分析诊断^[4-6]。且通过红外对电气设备检测是在设备带电运行时进行的,相较于传统的预防性检测,减少了设备的停电时间。随着红外探测器的发展,红外检测在电气设备状态检修中得到越来越广泛的应用。

在电气设备红外检测的国内标准^[7]中,将电气设备分为电流致热型设备、电压致热型设备和综合致热型设备。在电流致热型设备缺陷中存在最多的是电接触缺陷^[2],其一般是由于接触部位电阻过大导致发热增加、温度升高,严重情况下会影响热稳定

性和故障冲击电流下的动稳定性^[8]。由于电接触故障一般伴随温度升高,因此可以通过红外测温得到其温度来判断缺陷。

但是通过红外测温检测电接触缺陷时,若运行设备的负荷电流较小,则其发热量较小,温升较低,没有明显的过热现象,单纯将温度和阈值进行比较可能会出现缺陷的漏判。对于此种情况,部分业内专家建议在负荷低于30%时不进行红外测温检测,也有一些专家和从业人员采用同类设备间的相对温差来判断其缺陷^[9]。但是,部分运行中的电气设备存在同类设备的新旧程度不一,或是设备间的运行负荷不同的情况,此种情况下正常的同类设备间也可能存在相对温差较大的情况。同时,在设备负荷变化时,若对设备的温升变化特点不了解,可能导致无法掌握恰当的测温时机,造成无法准确对设备的缺陷进行判断。

文中在理论上分析了电气设备电接触点的温升变化规律,通过现场实验研究了隔离开关在负荷电流变化时其温升变化规律,得到了负荷电流变化对电接触点温升的影响,为在不同负荷情况下判断电接触缺陷提供了参考。

1 电接触发热的理论分析

1.1 电接触点的发热机理

电气设备的金属导体在电流的作用下会产生发热现象,其发热功率可以用焦耳—楞次定律定量描述^[2]

$$P = K_f I^2 R \quad (1)$$

式(1)中: P 为电流作用产生的发热功率, W ; K_f 为附加损耗系数,表明在交流电路中计及趋肤效应和邻近效应时电阻增大的系数; I 为通过的负荷电流, A ; R 为载流导体的直流电阻值, Ω 。

在电气设备中,电触头或接线端子由于自身和环境的因素,在运行一段时间后电阻增大,从而引起发热增大,这种电接触缺陷是电气设备中存在最多的电流致热型缺陷^[10-11]。

1.2 电接触点的温升特征

电气设备在运行前,其温度会和周围的环境介质相同。在投入运行后,其载流部分会在电流的作用下产生热量,通过热传递作用使设备的表面温度升高,与周围的环境介质存在一定的温差,此时电气设备的某一点 X 的温度可以用式(2)来表示

$$\theta_{e1} = \theta_a + \Delta\theta_1 \quad (2)$$

式(2)中: θ_{e1} 为电气设备正常运行时的稳定温

度, $^{\circ}C$; θ_a 为电气设备周围的介质温度, $^{\circ}C$; $\Delta\theta_1$ 为电气设备正常运行时的稳定温升, $^{\circ}C$ 。

电气设备在未投运时, $\Delta\theta_1=0$ 。在设备投运后,电气设备开始有一定的发热功率,使 $\Delta\theta_1$ 增大,同时由于此时电气设备和周围环境存在一定温差,因此设备也向周围环境传递热量。若电气设备的发热功率不变,则最终设备的发热功率和相周围环境散耗的功率相等,此时设备达到一个发热和散热的平衡状态,此时点 X 的稳定温度为 θ_{e1} 。

在 t_0 时刻,若电气设备的负荷电流产生变化,电气设备的发热功率也随之变化,旧的温度平衡状态被打破,可以通过如下微分方程反映此过程^[12]

$$P dt = mcd\theta + hA(\theta - \theta_a)dt \quad (3)$$

式(3)中: P 为电气设备反映到 X 点的等效发热功率, W ; m 为设备等效质量, kg ; c 为设备的等效比热容, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; h 为计及传导、对流和辐射3种传热机制的总传热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$; A 为等效散热面积, m^2 。

其中 m 和 A 均为常数,在一定的温度变化范围内,近似认为 c 和 h 也为常数,对式(3)进行积分

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [P - hA(\theta - \theta_a)] dt = \int_{\theta_{e1}}^{\theta_{e2}} mcd\theta \quad (4)$$

若发热功率 P 不随时间变化,则可得

$$\Delta\theta_2 = \theta_{e2} - \theta_a = \frac{P}{hA} \left(1 - e^{-\frac{hA}{mc}\Delta t} \right) + (\theta_{e1} - \theta_a) e^{-\frac{hA}{mc}\Delta t} \quad (5)$$

随着时间 Δt 增加,温升 $\Delta\theta_2$ 逐渐趋于稳定。当 $\Delta t \rightarrow \infty$ 时,稳定温升为

$$\Delta\theta_2(\Delta t \rightarrow \infty) = \frac{P}{hA} \quad (6)$$

从式(5)、(6)可以看出,设备特定点的温升是按指数规律变化的,最终的稳定温升和设备的发热功率成正比。

在式(5)中,令

$$\tau = \frac{mc}{hA} \quad (7)$$

式(7)中的 τ 为设备的热时间常数,其物理意义为设备的热容量和传热能力之比。

理论上,电气设备在负荷电流变化时,从一稳定温升状态变化到另一稳定温升状态的时间是无限长的。但在实际上,在负荷电流变化后的(3~4) τ 后,温升即可以达到稳定温升值的95%以上,可近似认为在经过 4τ 后设备的温度达到稳定温升(下面所述达到稳态温升均是指经过 4τ 后设备的温度)。

若电气设备开始的发热功率为 P_1 ,设备的温度已经达到稳定,然后电气设备的发热功率变为 P_2 ,此时根据式(2)、(5)-(7)可以得到发热功率变化后设备的温升随时间的变化如下:

$$\Delta\theta_2 = \frac{P_2}{hA} + \left(\frac{P_1 - P_2}{hA} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (8)$$

式(8)表明,当电气设备的发热功率变化时,若 $P_2 > P_1$,则设备的温升按指数规律增加,若 $P_2 < P_1$,则设备的温升按指数规律减小。且温升的变化快慢和设备的时间常数 τ 有关。

对于电接触点的发热,其发热功率可以用式(1)描述,将式(1)带入式(6)有

$$\Delta\theta_2(\Delta t \rightarrow \infty) = \frac{K_f I^2 R}{hA} \quad (9)$$

式(9)表明,电接触点最终的稳态温升和电流的平方成正比,说明在红外检测电流型致热设备缺陷时,必须将设备的负荷电流纳入考虑。

但上述对设备温升的理论分析在实际应用中存在如下问题。

首先,上述理论分析中假设在电气设备发热功率改变后,设备温升重新到达稳定的过程中设备的发热功率不变。若电气设备热的时间常数 τ 较大,则设备达到稳定温升的时间越长,若在此期间设备的发热功率改变,则设备还未达到稳定温升就进入一个新的温度过渡状态。这样会导致采用红外检测电气设备缺陷时,由于所测温度为设备的过渡态温升,而不是该工况下的稳态温升,可能造成测量时设备的温升较低而认为设备运行正常,实际上设备已经存在缺陷,在经过一段时间后温度逐渐升高,超过运行规定,造成停电甚至设备损坏事故。

针对上述情况,需要了解不同设备的热时间常数。对于时间常数较小的设备,其能较快的达到该工况下的稳态温升,在此期间设备的发热功率变化很小,则认为该设备可以通过红外检测得到其运行下稳态温度来进行缺陷判断。而对于一些时间常数较大的设备,其达到该工况下的稳态温升较慢,在此期间设备的发热功率可能已经改变,无法用红外测量其稳态温度,这是采用红外对其进行缺陷检测时需要综合考虑负荷变化的时间因素。

其次,上述分析还假设 m 、 c 、 h 和 A 这些参数是不随时间和温度变化的常数。但实际上,电气设备在运行时,其传热系数 h 会随着温度变化^[13],使设备的温升变化规律和理论计算规律有一定的差别。

2 电接触发热的实验研究

2.1 实验对象和方法

如文中第二部分所述,电气设备在实际运行条件和理论存在一定的差别,为了对理论结果进行修正完善,需要对实际电力设备进行实验研究。

笔者将隔离开关作为电接触发热的典型设备作为实验研究对象,由于其具有如下特点:

1)在变电站中,隔离开关为回路提供一个明显的分合点,其数量较多;

2)隔离开关具有2~3类的发热点,其一是接触点或刀口^[14];其二是接线端,部分隔离开关还具有转动接触部分^[15],这三类都是典型的发热点均是典型的接触电阻引起的发热;

4)隔离开关的发热处的数目多,一个隔离开关具有一个或两个连接刀口或触点、两个接线端,部分还具有两个转动接触部位,其需要红外测温检测的部位也多;

5)其发热部位一般外露,其热点温度可以通过红外热像仪直接测得。

本次所研究的隔离开关的电压等级为110 kV,刀口的运动方式为水平运动。

所采用的检测仪器为高分辨率红外热像仪,其主要参数见表1。

表1 热像仪主要参数

Table 1 Parameter of the thermal infrared imager

类别	参数
探测器类型	非制冷红外焦平面
分辨率	640×480
镜头焦距/mm	35
瞬时视场角/mrad	0.71

红外热像仪通过三脚架固定并以一定的角度测量目标隔离开关的刀口部位和一端接线部位,目标隔离开关的红外热像图见图1,相应的可见光图见图2。图2中的方框为所关注的触头部位和接线端。

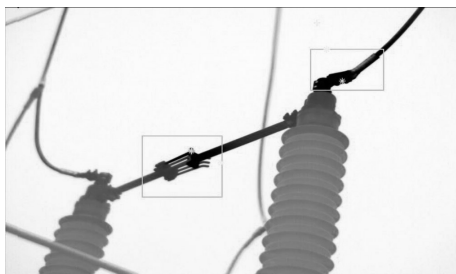


图1 观测目标的红外图像

Fig. 1 Infrared image of the target



图2 观测目标的可见光图像

Fig. 2 Visible light image of the target

测量所设置的发射率为0.9^[16],测量距离为3.23 m。观测时间均为傍晚和夜间,天气为阴天。

所采用的测量方法有如下两种:

1)温度的瞬态测量:以10 s为时间间隔,连续多次采集隔离开关的红外热像图,分析所关心区域内的热点温度值;

2)温度的静态测量:在隔离开关温度较为稳定时采集隔离开关的红外热像图,分析所关心区域内的热点温度值。

上述两种测量中,对环境参照体温度也进行了测量和记录。

2.2 热时间常数的分析

在负荷变化是,隔离开关通过的电流也会随之变化,此时其发热部位的发热功率也会随之变化,引起其热点温度的变化。但是在实际运行时,负荷是时刻随机变化的,使隔离开关通过的电流也是时刻变化的,而不是稳定在某一个具体的值。但是对于110 kV 高压等级的隔离开关,其通过的电流在较长的时间尺度内都在一个较小的范围内波动。在本次研究中,所研究隔离开关在较长时间内通过的电流变化都在10%以下,但在某个特定,由于运行方式的改变,其通过电流在短时间内(小于10 s)发生了较大的改变,且在变化后其电流又稳定在一个较小的范围内波动(小于10%),这种电流较大的变化发生了两次。

在上述目标隔离开关通过电流变化前后,通过采用温度瞬态测量方法记录了隔离开关通过电流变化时其热点温度的变化,并约定将电流发生较大变化的时刻设定为0时刻。笔者截取了两次0时刻附近的数据记录在表2中。

表2 温度变化数据

Table 2 Data of the temperature				
时间/s	电流/A	环境参照 温度/℃	触头热点 温度/℃	接线端热 点温度/℃
-10	151.77	17.6	53.7	40.5
0	82.35	17.6	53.7	40.5
10	87.61	17.6	41.4	35.2
20	86.80	17.6	37.4	30.1
30	82.66	17.6	34.2	28.4
40	83.31	17.6	32.1	27.5
50	88.15	17.6	31.2	26.6
60	84.55	17.6	30.5	25.8
70	86.71	17.6	30.4	25.6
80	83.10	17.6	30.3	25.1
90	85.48	17.6	30.3	25.1
100	87.44	17.6	30.4	25.1

从表2的数据中可以看出在100 s时触头和接线端的热点温度基本达到稳定温度。根据式(8),可以对触头热点温度和接线端热点温度分别按式(10)、(11)拟合。

$$T_c = a + be^{-t/\tau} \quad (10)$$

$$T_l = a + be^{-t/\tau} \quad (11)$$

从0时刻开始对表2中数据进行拟合,拟合得到参数见表3,拟合曲线见图3、4。

表3 温度—时间拟合结果

Table 3 Result of temperature vs time curve fitting

部位	a	b	τ	R^2
触头	30.27	23.12	15.66	0.996
接线端	24.99	15.65	20.32	0.995

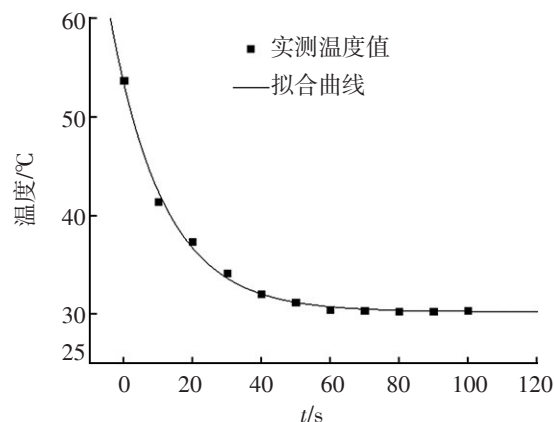


图3 隔离开关触头温度和时间关系拟合曲线

Fig. 3 Temperature vs time fitting curve of temperature of the disconnecter contact

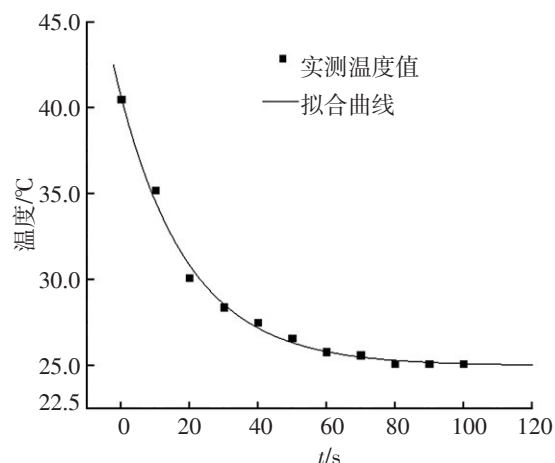


图4 隔离开关接线端子温度和时间关系拟合曲线

Fig. 4 Temperature vs time fitting curve of temperature of the disconnecter terminal

从表3的拟合结果可以看出,隔离开关触头的热时间常数为15.66 s,接线端子的热时间常数为20.32 s。从图3、4可以看出,隔离开关的触头和接线端均在开始时温度降低较快然后逐渐变慢,在经过4倍的热时间常数后,其温度基本趋于稳定。

上述分析表明,在负荷变化导致电流变化时,隔离开关的触头和接线端的温度变化较快,可以在较短的时间内达到稳定。变电站存在较多的接头和本次研究的隔离开关的接线端类似,均裸露在外面,其热时间常数也较小,温度能在负荷变化时较快达到稳定。在一些变电站刚投运时,对于这些存在较多,容易出现接触缺陷的接线端的常规红外检测可以在加上负荷较短的时间后进行。

2.3 负荷电流和设备温升的关系

在目标隔离开关的负荷电流较为稳定时(变化小于10%)对其触头和接线端的温度进行静态测量,记录了不同负荷电流情况下的温度情况,见表4。

表4 不同负荷下的温度

负荷电流/A	环境参照温度/℃	触头温升/K	接线端温升/K
151.77	17.6	36.1	22.9
87.44	17.6	12.8	7.5
119.54	12.3	24.1	14.0
171.23	20.3	44.2	27.4

由于在不同的温度下散热系数会发生变化,因此实际测量的结果和式(10)反映的规律有一定的差异,这里通过如下幂函数对实验的结果进行拟合

$$\Delta T = kI^\alpha \quad (12)$$

对表4中的实验数据拟合的结果见表5。拟合曲线见图6、7。

表5 温升—电流拟合结果

Table 5 Result of temperature rise vs current curve fitting

部位	k	α	R^2
触头	0.004 761	1.778	0.998
接线端	0.001 617	1.897	0.996

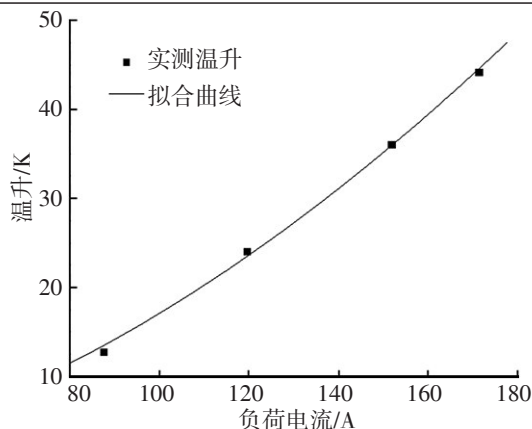


图6 隔离开关触头温升和电流关系拟合曲线

Fig. 6 Temperature rise vs current fitting curve of temperature of the disconnecter contact

从表5可以看出,温升并不是和负荷电流的平方成正比关系,而是和负荷电流的幂函数成正比。

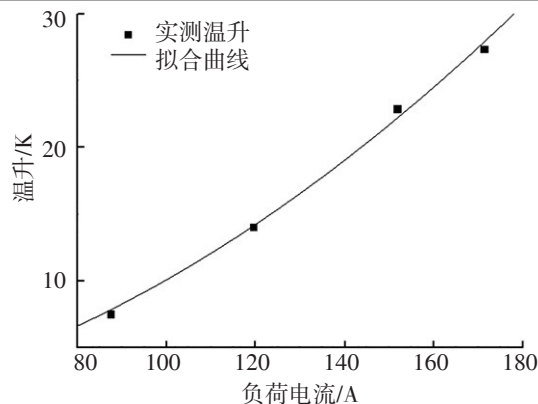


图7 隔离开关接线端温升和电流关系拟合曲线

Fig. 7 Temperature rise vs current fitting curve of temperature of the disconnecter terminal

其原因可能有如下两点:

1)散热系数会随着温度变化^[17-19],在温度增高时散热系数随之增大,式(9)中下面分母增大,使稳态温升随之降低;

2)温度升高时接触部位理化性能发生变化,使发热功率变化^[16]。

另外对比隔离开关和接线端的拟合结果可以发现,两者之间的幂指数存在一定差别,说明对于不同载流发热部位,由于形状和材料特性其幂函数的指数不一样。

从上述分析可以看出,在对电气设备进行红外检测时,其负荷电流不同时会导致温升存在一定的差别,在低负荷情况下要根据负荷电流综合考虑判断设备缺陷^[20]。

上述分析还表明,若在以往对电气设备的测温中收集了设备在不同负荷情况下的温度信息,并根据其分析了温升和符合电流之间的函数关系,在设备负荷电流不大时进行红外检测,可以根据上述分析得到的温升和负荷电流的关系,对较大负荷下设备的温升进行外推,综合环境温度得到设备的推算温度,判断是否存在隐患。

3 结论

1)理论分析和实验研究表明,电接触点的温升会随着负荷电流的变化而变化。在负荷改变时,电接触点的温度变化快慢和热时间常数有关,最终的稳定温升和负荷电流存在一定的函数关系。

2)对于隔离开关的触头和接线端这样裸露在外部的电接触部位,在负荷电流改变时其温升随时间变化较快,其实测热时间常数在15~25 s之间,经过3~4倍的热时间常数后其温升基本稳定。

3)对于一些电接触部位的温升,其和负荷电流

的平方之间不是成严格的正比关系,而是和负荷电流的幂函数成一定的正比关系,幂指数的大小和发热部位的形状和材料有关。

4)在对电气设备电接触点的状态检测中,可以收集相关设备的历史温度数据,拟合得到设备相应部位温升和符合电流之间的函数关系,在小负荷检测中可以据此外推换算额定负荷情况下电接触点的温度,将该温度和阈值比较来判断缺陷。

参考文献:

- [1] 丁国成,李伟,王刘芳,等.紫外检测技术用于现场红外测温异常的处理[J].高压电器,2010,46(10):42-44.
DING Guocheng, LI Wei, WANG Liufang, et al. Application of ultraviolet detection technology for corona discharge to abnormal on-line infrared detections[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 42-44.
- [2] 陈衡,侯善敬.电力设备故障红外诊断[M].北京:中国电力出版社,1999.
CHEN Heng, HOU Shanqing. Infrared diagnosis technology for electric equipment failure[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] 葛猛,李鹏,陶安培,等.220 kV电流互感器局部放电缺陷不停电检测与分析[J].高压电器,2009,45(6):153-155.
GE Meng, LI Peng, TAO Anpei, et al. On-line detection and analysis of partial-discharge fault for 220 kV current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 153-155.
- [4] 杨武,王小华,荣命哲,等.基于红外测温技术的高压电力设备温度在线监测传感器的研究[J].中国电机工程学报,2002,22(9):113-117.
YANG Wu, WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, et al. On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(9): 113-117.
- [5] 李艳鹏,杨冬冬,陈昱同.电力设备缺陷红外热像特征研究与应用[J].绝缘材料,2015(9):38-41.
LI Yanpeng, YANG Dongdong, CHEN Yutong. Research and application on infrared thermal imaging features of electrical equipment defects[J]. Insulating Materials, 2015(9): 38-41.
- [6] 朱建军,王赞中,崔绍平,等.红外技术诊断高压电气设备内部缺陷[J].高电压技术,2004,30(7):34-36.
ZHU Jianjun, WANG Yunzhong, CUI Shaoping, et al. The application of infrared diagnosis technology in diagnosis of the high voltage electrical equipment internal defect[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 34-36.
- [7] 带电设备红外诊断应用规范:DL/T 664—2008[S].2008.
Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment: DL/T 664—2008[S]. 2008.
- [8] 周鑫,鲁铁成,罗容波,等.气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J].高电压技术,2015,41(1):217-224.
ZHOU Li, LU Tiecheng, LUO Rongbo, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [9] 胡世征.电气设备红外诊断的相对温差判断法及判断标准[J].电网技术,1998,22(10):47-50.
HU Shizheng. Method and criterion of relative temperature difference determination of infrared diagnosis for electric equipment[J]. Power System Technology, 1998, 22(10): 47-50.
- [10] 孙萍,魏立明.基于红外热像技术的电接触故障诊断[J].电气应用,2008(6):83-86.
SUN Ping, WEI Liming. Fault diagnosis of electrical connector contacts based on infrared thermal imaging technology[J]. Electrotechnical Application, 2008(6): 83-86.
- [11] 孙国霞,关向雨,金向朝,等.基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J].高电压技术,2014,40(11):3445-3451.
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated switchgear bus connector based on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.
- [12] 张宜倜.变压器温升计算原理分析[J].变压器,2009,46(9):6-10.
ZHANG Yiti. Analysis of calculation theory for transformer temperature rise[J]. Transformer, 2009, 46(9): 6-10.
- [13] 姜宏伟,徐其迎,游华春.干式变压器温升理论与计算方法研究[J].变压器,2016,53(1):15-19.
JIANG Hongwei, XU Qiyong, YOU Huachun. Study on temperature rise theory and calculation method of dry-type transformer[J]. Transformer, 2016, 53(1): 15-19.
- [14] 吴涛,余海涛,戴永正,等.550 kV高压隔离开关热稳定性分析[J].高压电器,2013(9):134-141.
WU Tao, YU Haitao, DAI Yongzheng, et al. Thermal stability analysis of 550 kV high-voltage disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2013(9): 134-141.
- [15] 岳永刚,白志强,赵墨林,等.采用导电滚动触头的隔离开关过热故障分析[J].高压电器,2008,44(6):592-595.
YUE Yonggang, BAI Zhiqiang, ZHAO Molin, et al. Analysis of overheating fault of electric rolling-contact-

- type isolator[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 592-595.
- [16] 张树军, 魏汝祥, 范春利. 电气设备红外故障诊断中的影响因素分析[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 140-142.
ZHANG Shujun, WEI Ruxiang, FAN Chunli. Analysis on affecting factors of thermographic inspection of electric apparatus[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(2): 140-142.
- [17] AZIZIAN D, BIGDELI M, FOTUHI - FIRUZABAD M. A dynamic thermal based reliability model of cast-resin dry - type transformers[C]//International Conference on Power System Technology.[S.l.]: IEEE, 2010: 1-7.
- [18] 周 封, 管春伟, 李伟力, 等. 铁耗和环流损耗分布对定子温度场及绝缘外表面散热系数计算的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009(21): 124-130.
ZHOU Feng, GUAN Chunwei, LI Weili, et al. Influence of distributions of circulation losses and iron losses on stator temperature field and heat transfer coefficient's calculation of outer surface of insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 124-130.
- [19] 黄琳敏, 陈德桂, 张敬菽. 计及物理参数随温度变化时螺管电磁铁温度场和瞬态热路的仿真分析[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 27-31.
- HUANG Linmin, CHEN Degui, ZHANG Jingshu. Analysis of thermal field and T ransient thermal circuit of solenoid magnet by considering physical parameters as functions of temperatures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 27-31.
- [20] 张益滔. 红外线检测技术判断电气事故[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 112-113.
ZHANG Yitao. Infrared detection technology for judging electric accidents[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 112-113.
- 林其雄(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气设备状态检测。
- 曾文斐(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 区伟明(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 蔡 蒂(1988—), 男, 工程师, 研究方向为电气设备状态检测。
- 周 哲(1989—), 男, 高级技师, 研究方向为高电压与绝缘技术。
- 陈智仁(1989—), 男, 工程师, 研究方向为电气设备状态检测。

(上接第 228 页)

- tion and study of some properties of compounds resulting from the decomposition of SF_6 under the effect of electrical arcing in circuit-breakers[J]. Revue Generale Electricite, 1974(s1): 45-78.
- [15] HIROOKA K, KUWAHARA H, NOSHIRO M, et al. Decomposition products of SF_6 gas by high - current arc and their reaction mechanism[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 95(6): 14-19.
- [16] LAMPE J, LATOUR - SŁOWIKOWSKA H, SŁOWIKOWSKI J. Study on metal fluoride products formation caused by the electric arc in SF_6 [J]. Gaseous Dielectrics III, 2013(4): 433-438.
- [17] CHU F Y, LUTZ F. SF_6 decomposition in a plasma arc for various electrode materials[C]//Proc. of 6th Intl. Symp. Plasma Chem.: [s.n.], 1983: 231.
- [18] KULSETAS J, REIN A, HOLT P A. Arcing in SF_6 insulated equipment decomposition products and pressure rise[C]//Proc. 23rd Nordic Insulation Symposium. Trondheim, Norway: [s.n.], 1979: 78.
- 夏谷林(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术的监督管理。
- 邓 军(1985—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要从事高电压技术电磁环境设备检测的研究。
- 钱凯洋(1993—), 男, 工学硕士, 主要从事高电压与绝缘技术(通讯作者)。