

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.013

GIS局部过热故障红外成像技术诊断静态试验研究

李爽¹, 毕海涛¹, 鲁旭臣¹, 洪鹤², 李斌¹, 罗斌¹, 赵义松¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006)

摘要: 为了研究红外成像技术在GIS内局部过热故障诊断的有效性和可行性,文中通过静态试验方法,搭建了GIS内局部过热故障仿真平台,研究了故障点不同温度下外壳不同位置的稳定温升,并得到了GIS内部过热点温度及与其对应外壳温升间的函数关系。利用红外成像仪可清晰观察到外壳的局部高温,验证了试验的有效性和可行性。研究表明:当GIS内部发生过热故障时,在与其对应的外壳顶部将产生局部高温。以此高温点为中心,沿GIS轴线方向温度向两侧递减,呈开口向下的抛物线形。距最高温度点0.6 m处,温度变化大约为11~15℃。超过0.6 m,温度下降趋势减缓,超过3 m后,基本为环境温度。如果外壳局部温升超过18.08℃,与其对应的内部过热点温度可能在105℃左右。

关键词: GIS; 红外成像; 过热点; 温升; 外壳

Static Test Research on GIS Partial Overheating Fault by Infrared Imaging Technology

LI Shuang¹, BI Haitao¹, LU Xuchen¹, HONG He², LI Bin¹, LUO Bin¹, ZHAO Yisong¹

(1. State Grid Liaoning electrical power research institute, Shenyang 110006, Liaoning Province, China;

2. State Grid Liaoning Electrical Power, Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: To research the diagnosis effectiveness and feasibility of infrared imaging technology on overheating fault inside GIS, a test device to simulate the overheating fault inside GIS is developed by static state test method. The stable temperature rise at different point of GIS enclosure under different fault point temperature is investigated and the function relationship between the temperature rise at GIS enclosure point corresponding to the overheating fault inside GIS and the overheating fault temperature is obtained. The local high temperature on GIS enclosure can be observed by infrared imaging clearly, therefore, the effectiveness and feasibility of this test is verified. The results indicated that when there is an overheating fault inside GIS, the local high temperature on GIS enclosure corresponding to the overheating fault will produce. Take the highest temperature point as origin, the temperature decreases along the axis of GIS, which presents an opening down parabola. From the highest temperature point 0.6 m away, the temperature decreases 11℃-15℃. The tendency of temperature declines will be slow when excess 0.6 m. The temperature will be ambient temperature when distance excess 3 m. If the highest temperature rise on GIS enclosure is greater than 18.08℃, the overheating fault point inside the GIS corresponding to which may be about 105℃.

Key words: GIS; infrared imaging; overheating point; temperature rise; enclosure

0 引言

金属封闭式组合电器以其故障率低、维护量小、检修周期长等优势成为变电站建设的首选设备,在新建的变电站中,几乎都采用GIS(HGIS)。但实际上,组合电器的内部电极形式多样,从而使电场的形式也多样化,电场的优化处理成为组合电器设计的关键^[1-3]。除此之外,封闭母线的主导体由于长度较长存在多处触头连接,触头接触的好坏也直

接影响着设备的安全运行。

运行经验表明,由于生产工艺或现场安装条件等原因,组合电器设备的故障率并不低,其中,以绝缘闪络和触头接触不良居多^[4-5]。组合电器一旦发生故障,将给故障处理带来极大的麻烦和损失,不仅维修周期长影响供电,而且如果处理的不当,还会派生二次故障,加大处理难度。2014年10月,东北电网某500 kV变电站中252 kV GIS母线导体由于发生接触不良,触头过热使金属熔化,最终导致三相短路。事故的前后处理历时3个月,经济损失和人力物

收稿日期:2017-06-13; 修回日期:2017-08-25

基金项目:国网辽宁省电力有限公司科技项目(2017YF-39)。

Project Supported by Science and Technology Projects of Liaoning Power Limited Corporation of SGCC(2017YF-39).

力投入十分巨大。

目前,电网的运维中已开展多项带电检测,实践证明,通过带电检测手段来提前发现设备的某些潜在故障是有效的。红外技术操作简单,不伤害设备,不需要设备停电,尤其是对过热故障的直观检测发挥着积极作用。但红外技术在金属内部过热故障的诊断并没有开展,主要是普遍的思想认为红外线不能穿透金属外壳,利用红外成像技术检测金属壳体内部的过热故障是无效的、不可行的,因此,对金属外壳内部过热故障的诊断成了困扰至今的课题。如果红外成像技术能应用于金属壳体内部过热故障的诊断,将对电网的安全运行具有重大意义。

现有文献中对红外热成像技术在 GIS 母线局部过热故障的诊断技术的报道较少。文[6]对该技术进行了初步研究,但只是停留在温度场的仿真上,并没有开展实质的试验研究。文[7-9]是利用在线监测技术,将 GIS 导体预埋热电偶或红外探头来监测内部的温度,但这些只是理论上可行,实际将有很大困难,不仅需要电场的优化,而且给生产工艺、设计及运行中的维护也带来极大困难。另外,传感器如果损坏,还需对其进行更换。文[10-14]采用仿真计算的方法,利用多场耦合对正常的触头接触处温度场进行了计算,得到了比较好的效果,但未进行因接触不良而导致的局部过热故障情况下的仿真计算。

针对以上提出的问题,笔者在试验室搭建了 252 kV 离相式 GIS 中线路侧隔离开关及分支母线平台,在隔离开关触头部位,通过人为设置局部过热点,研究不同的局部过热点温度在外壳上所对应的温升,最终得到外壳过热点的温升与其内部过热点温度的函数关系式。通过红外成像所测的外壳布局高温,利用该判据可推断出 GIS 内部导体可能处于的故障状态。

1 GIS 母线温升原理分析

取单位长度的 GIS 母线为研究对象。在正常运行工况下,就母线主导体而言,其损耗 P_M 在热稳定情况下,一部分以辐射的方式传给外壳,记作 Q_{MF} ;另一部分以自然对流方式传给外壳,记作 Q_{MD} ,三者满足第一热平衡方程

$$P_M = Q_{MF} + Q_{MD} \quad (1)$$

其中

$$Q_{MF} = \frac{T\pi D_M \left[\left(\frac{T_m + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k + 273}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{D_k}{D_k - 2C_k} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right)}; \quad (2)$$

$$Q_{MD} = \frac{T_m - T_k}{\frac{1}{2\pi\lambda_e} \ln \frac{D_k - 2C_k}{D_M}} \quad (3)$$

式(2)-(3)中: T_m, T_k 分别为母线、外壳的温度; $\varepsilon_m, \varepsilon_k$ 分别为母线、外壳的辐射率; D_M, D_k 分别为母线、外壳的外径; C_k 为外壳的厚度; T 为 Stefan-Boltzmann 常数; λ_e 为流体的等效传导系数。

就外壳而言,它除了本身损耗 P_K 以外,还接受来自母线导体的热量 P_M 以及周围环境辐射能量 P_R 。这些能量在热稳定情况下必须全部以辐射和自然对流方式传给周围介质,分别记为 Q_{KF} 和 Q_{KD} ,根据第二热平衡方程得

$$P_M + P_K + P_R = Q_{KF} + Q_{KD} \quad (4)$$

其中

$$Q_{KF} = \varepsilon_k T\pi D_M \left[\left(\frac{T_k + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{v_0 + 273}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi); \quad (5)$$

$$Q_{KD} = a_{KF} \pi D_k (v_k - v_0) \quad (6)$$

式(5)-(6)中: v_0 为环境温度; a_{KD} 为外壳与外界空气的对流换热系数。

根据牛顿换热定律,导体与气体热交换边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = K_T (T - T_f) \quad (7)$$

式(7)中: K_T 为换热系数; T_f 为导体表面气体温度。

在 GIS 母线导体加 5 500 A 工频电流时的温度分布示意图见图 1^[15-16]。环境温度设置为 40 °C。从图 1 中可以看出,对于水平放置的三相 GIS 母线,其等温线分布并非一族沿半径方向温度单调下降的同心圆,其导体与金属外壳的温度分布体现出上高下低、左右对称的规律;其内部环状空间气体对流作用较强,使等温线呈弯曲的 S 形,使同一圆周上温度分布并不均匀,在环形空间半径方向的一定范围内,出现离开热表面越远气体温度反而升高的等温线反转现象。由此表明,在环形空间内,气体对流散热作用较为强烈,存在较强的回流流动。

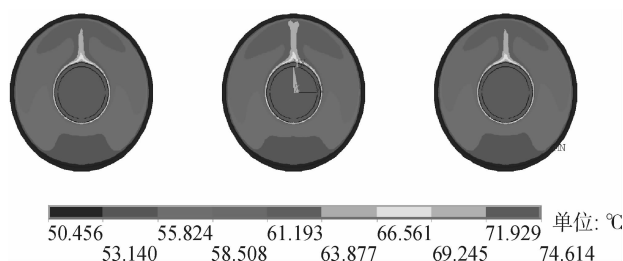


图 1 GIS 母线温度分布示意图

Fig. 1 The sketch map of the bus temperature distribution in GIS

母线最高温度都出现在中心导体的顶端,最高温度 74.6 ℃,温升为 34.6 ℃。而外壳的损耗较小,虽然由于主导体通过对流传给外壳一部分热量,但温度还是较低,最低温度出现在外壳为 50.46 ℃,温升为 10.46 ℃。导体与外壳之间的气体呈现导体上部温度高、导体下部温度较低的情况。这是由于导体和外壳之间的气体受热后向上流动,使得导体的上部与气体的对流换热作用减弱,从而上部气体温度高于下部。因此,主导体的最高温度应出现在导体的顶端,外壳的最高温度也出现在最顶端,并与导体故障点相对应。

图 1 中 B 相母线气流矢量图见图 2。从图 2 可以看出,由于母线的加热作用,气体受热上升到外壳内壁后向两侧分为 2 股,然后分别沿外壳左右内壁下降,沿中心导体外表面上升,形成环状气流。

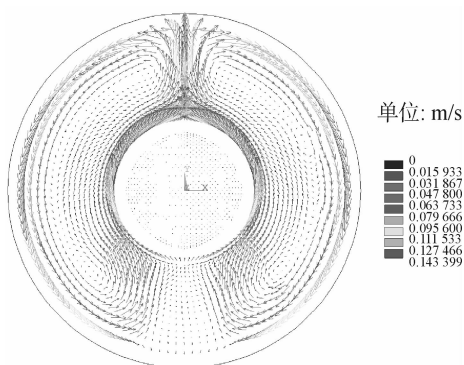


图 2 B 相母线气流矢量图

Fig. 2 The airflow vector diagram of phase B bus

理论分析表明,在正常情况下,发热的母线导体会使外壳的顶部产生高于轴向其它部位的温度,为接下来的导体局部过热红外成像诊断试验研究提供了理论依据。

2 GIS 母线接头局部过热分析

GIS 母线接头通过弹簧将梅花触指固定在 2 个触头之间,梅花触指和触头之间存在一系列的导电斑点,这些导电斑点使电流线发生收缩,产生接触电阻和接触热阻,从而产生热损耗^[17-19]。热量以传导、对流、辐射的形式与周围介质发生热交换,此过程满足如下电热耦合方程^[20]

$$\begin{cases} \rho_v c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_t \nabla^2 T = \frac{I \nabla U^2}{\rho} \\ \nabla^2 V = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: ρ_v 为材料密度; c_p 为材料等压比热容; λ_t 导热系数; ρ 为电阻率; T 为温度; t 为时间; U 为接触电位。

如果由于紧固螺栓松动、触头插接不到位或者

弹簧的弹力下降等原因,导致触头局部接触电阻增大,在电流不变的情况下,会使接触斑点的接触电位增大,从而引起局部温度增高。在实际运行中,电网的负荷电流是动态变化的,电流增大必然导致接触电位增大,从而局部温度升高,温度与电阻之间又存在互相影响的动态过程,温度高,电阻增大,进而使温度进一步升高,如此反复,直到触点的温度稳定。无论是何种原因产生的局部过热故障,归结到底都是故障点的温度达到了其极限允许值,使金属熔化,最终引发短路事故^[21]。因此,外壳局部过热点与其对应内部过热点温度之间存在一定函数关系,可将多元函数(i, R, t)转化成一元函数(T_m),见图 3。图 3 中, i, R 分别为负荷电流、接触电阻。通过红外实测的温度,再推出内部过热点的温度,如果超过阈值即可决定相应的处理措施。

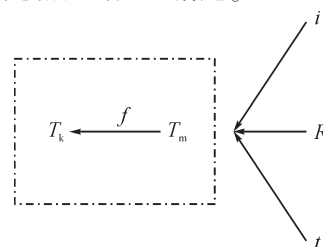


图 3 T_k 与 T_m 的关系

Fig. 3 The relationship between T_k and T_m

在试验室中, $P_R=0$ 。当母线运行电流,截面尺寸,表面状态等条件确定时,式(2)和式(5)构成一个非线性代数方程组,从中可解出 T_m, T_k 。从而可得出一条 T_m, T_k 关系曲线。

3 试验研究

根据 DL/T 664—2008 的现场检测要求,文中所做的试验均符合该标准中的要求^[22]。某厂家生产的试验装置实物图见图 4。装置横向长 2.54 m,纵向长 2.79 m,图 4 中标出了 1-9 个测温点,横向 2 个测温点间距 0.635 m,纵向 2 个测温点间距 0.697 m,其内部结构图见图 5。实践证明,通过松动螺栓、拆卸梅花触瓣、减少弹簧数量等方法增大接触电阻以产生局部过热故障是不可行的,利用电阻丝或者灯泡等方式作为热源更是不理想,也不方便操作。因此,为了产生局部过热点,采用特殊手段在隔离开关触头之间设置一故障点,以增大接触电阻,即外壳测温点 5 对应的位置,在该处设热电偶来测试内部过热点的温度,试验证明达到了预期效果,试验原理见图 6。图 6 中: T 为调压变压器; CT 为穿心式升流器; R 表示被测过热点电阻; r 为热电偶测温装置, V 为互感器一次电压表, A_1, A_2 分别为互感器一

次与二次电流表。通过调节调压变 T,使 CT 二次回路中流过电流,不同的电流最终将在过热点处产生不同的温度,以此模拟不同的过热程度。

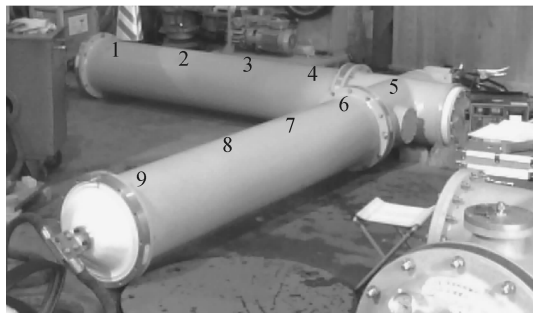


图 4 试验接线实物图

Fig. 4 The photo of test connection

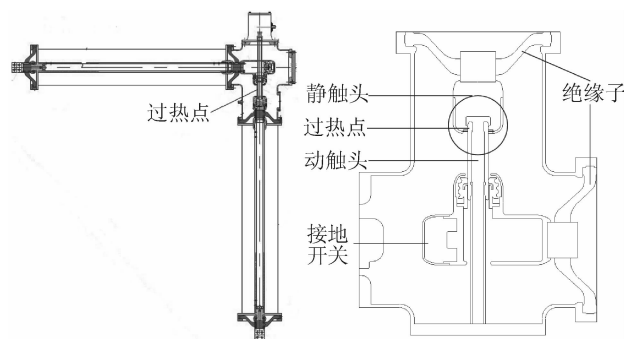


图 5 过热点设置示意图

Fig. 5 The sketch map of overheating points set

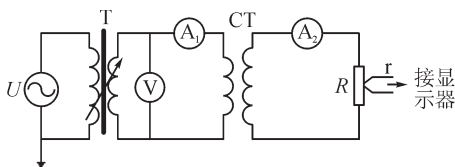


图 6 试验原理图

Fig. 6 The test principle

文中选取了电流值为 150、300、600、900 A 下试验情况,其中 SF_6 的充气压力为 0.35 MPa,试验时环境温度为 27 $^{\circ}\text{C}$ 。不同电流下,过热点与其对应外壳的稳定温度见表 1。不同试验电流下,过热点及其对应外壳温度的各种关系曲线见图 7-12。

表 1 过热点与其对应外壳的稳定温度

Table 1 The overheating points temperature and enclosure stable temperature corresponding to it

试验电流 / A	过热点温度 / $^{\circ}\text{C}$	对应外壳点温度 / $^{\circ}\text{C}$
150	30	27.7
300	60	33.0
600	100	43.0
900	134	57.0

从表 1 及图 7-12 可知,如果 GIS 内部发生局部过热,热量会以对流和辐射的形式传递到外壳,使外壳的温度升高。与过热点对应的外壳部位会产生高于两侧沿轴向方向其他位置的温升,而该最高温度

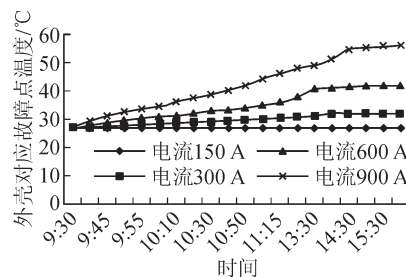


图 7 不同电流下,过热点对应外壳温度升高情况

Fig. 7 The curves of temperature rise condition on enclosure corresponding to overheating point

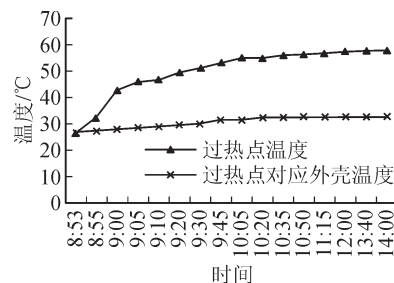


图 8 300 A 电流下,空气与 SF_6 介质中过热点及其对应外壳温度升高情况

Fig. 8 The curves of temperature rise condition of overheating point and enclosure corresponding to it on condition of 300 A

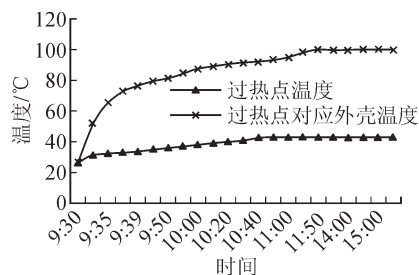


图 9 600 A 电流下,空气与 SF_6 介质中过热点及其对应外壳温度升高情况

Fig. 9 The curves of temperature rise condition of overheating point and enclosure corresponding to it on condition of 600 A

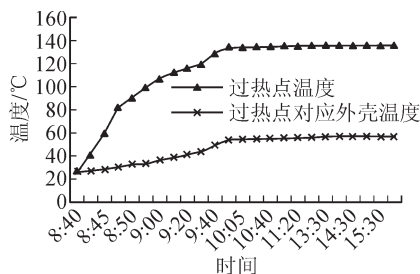


图 10 900 A 电流下,过热点及其对应外壳温度升高情况

Fig. 10 The curves of temperature rise condition of overheating point and enclosure corresponding to it on condition of 900 A

点总是在壳体的顶部,试验结果与理论分析一致。

随着电流的增大,局部过热点的温度及其所对应的外壳温升也增高。当过热点温度小于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,

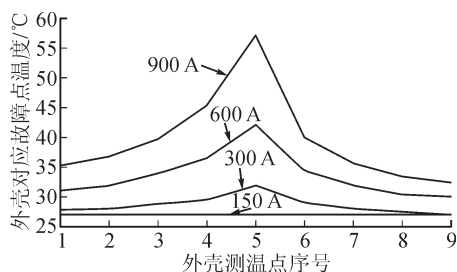


图 11 不同电流下,不同外壳测温点的稳定温度

Fig. 11 The stable temperature on different enclosure point at different current

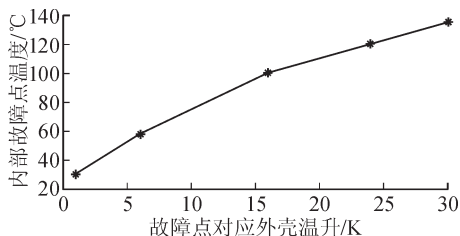


图 12 过热点温度与其对应外壳温升的关系

Fig. 12 The relationship between overheating point and enclosure point corresponding to it

其对应的外壳顶部不会有明显的温升,与环境温度差不多。当局部过热点温度超过 30 °C 时,其对应的外壳顶部会产生高于两侧沿轴向方向其他位置的温升,可用红外成像仪进行检测。

根据图 12, 对应过热点的外壳顶部温度最高, 沿着轴线向两侧依次降低, 曲线呈开口向下的抛物线形, 以温度最高点为中心, 曲线基本对称。外壳温度梯度变化明显, 距最高点 0.6 m 处, 温度变化为大约为 11~15 °C。超过 0.6 m, 温度下降趋势减缓, 超过 3 m 后, 基本为环境温度。当温升稳定时, 不同的内部过热点温度, 在外壳上将产生不同的温度, 内部过热点温度越高, 外壳上的温度也越高, 而且红外成像越明显, 见图 13~15。所使用的红外热像仪参数为: 探测器像素: 640×480; 灵敏度: 0.05 °C (20 °C); 镜头视场: 25°×17°。

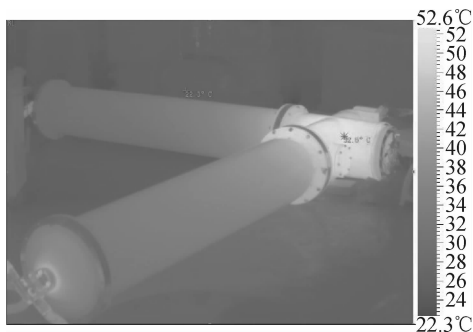


图 13 900 A 下红外图谱

Fig. 13 The infrared atlas at 900 A

将稳定后的过热点温度及其所对应的外壳顶部温升进行曲线拟合, 得到方程

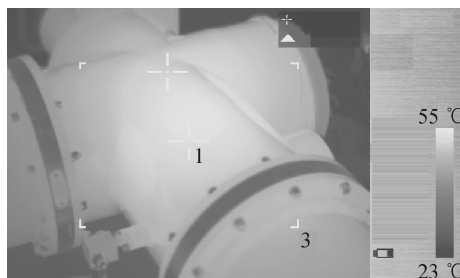


图 14 900 A 下局部放大红外图谱

Fig. 14 The enlarged picture of the local part above at 900 A

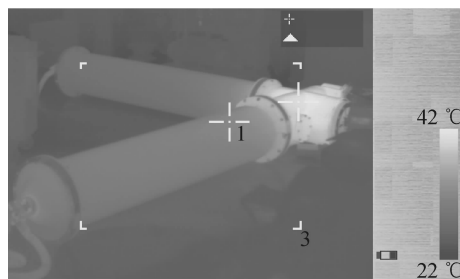


图 15 600 A 下红外图谱

Fig. 15 The infrared atlas at 600 A

$$T_m = 16.17 \times (t - t_0) 0.595 4 + 13.17. \quad (9)$$

式(9)中: t 为外壳的测试温度, °C; t_0 为环境温度, °C。

利用现场实测的外壳局部温度, 再结合环境温度, 利用式(9)即可判断壳体内局部过热点的大致温度范围。

根据标准中的要求^[23-24], GIS 内部温度最高不能超过 105 °C, 利用式(9), 如果环境温度为 20 °C, 则外壳的局部温度最高为 38.08 °C, 温升为 18.08 °C。

案例 1 分析: 2004 年 11 月 4 日, 红外检测发现某 110 kV 变电站 GIS XXI 回进线母线拐弯处的隔离开关 A 相上部外罩温度达 61.3 °C, 见图 16。环境温度 29.3 °C。从红外图谱可知, 内部双通道垂直导电杆之间接触不良引起的过热, 内部过热传递到外壳^[25]。根据式(9), 计算得 GIS 内部局部温度为 140.48 °C, 金属部件很可能熔化, 经解体检查发现其实内有一定位螺栓脱落, 导电杆与双通接头发生熔焊, 见图 17。



图 16 某 110 kV 变电站 GIS XXI 回隔离开关过热红外图谱

Fig. 16 The infrared atlas of a disconnector in a 110 kV GIS

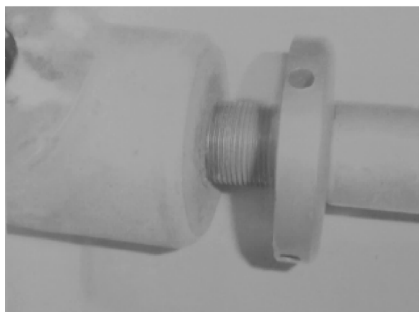


图 17 熔焊处

Fig. 17 The welding position

案例 2 分析:2011 年 8 月 21 日,某 220 kV 变电站 GIS 通过红外检测发现 1 号主变间隔 A 相 GIS 罐体最高温度为 30.7 °C,红外图谱见图 18,环境温度为 17.3 °C,而正常罐体温度为 21.9 °C。根据式(9),计算得 GIS 内部局部温度为 88.99 °C,为过热缺陷。经解体检查发现断路器触头未扩张前内径为 45 mm,触指外径为 43 mm,造成触头触指-2 mm 的公差配合,见图 19。为触头接触不良产生的局部过热。

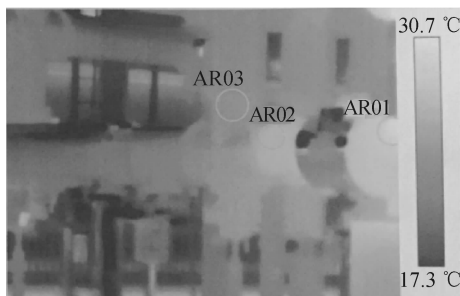


图 18 1 号主变间隔 A 相 GIS 红外图谱

Fig. 18 The infrared atlas of No.1 transformer GIS phase A

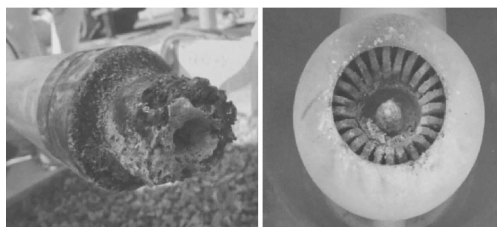


图 19 断路器触头和触指

Fig. 19 Contacts in circuit breaker

4 结论

通过试验方法,对红外成像技术在 GIS 内部过热故障诊断的可行性和有效性进行了研究,得到如下结论:

1)当组合电器内部发生过热点时,在与其对应的外壳处将产生局部高温,利用红外成像技术可清晰地观察到;以此高温点为中心,沿轴线方向温度递减,呈开口向下的抛物线形。

2)外壳的温度梯度通过红外成像技术清晰可见,且温度梯度变化明显,以最高温度点为原点,温

度变化为大约为 11~15 °C/0.6 m。超过 0.6 m,温度下降趋势减缓,超过 3 m 后,基本为环境温度。

3)如果外壳局部过热点温度可知,利用式(9),可推断内部过热点的温度。

4)笔者后续还将开展低温环境、考虑周围环境条件变化时的动态温升试验和超、特高压下的 GIS 内部局部过热红外诊断试验。

参考文献:

- [1] 林 莘,李 爽,徐建源,等. 考虑 GIS 外壳传输特性的 VFTO 计算模型[J]. 电网技术,2010,34(11):203-207.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan,et al. Calculation model of VFTO considering transmitting characteristics of GIS enclosure[J]. Power System Technology,2010,34(11):203-207.
- [2] 李 爽,金 鑫,毕海涛,等. 变间隙电弧模型下特高压气体绝缘变电站快速暂态过电压的数值计算[J]. 高压技术,2015,41(4):1306-1312.
LI Shuang,JIN Xin,BI Haitao,et al. Numerical calculation on very fast transient overvoltage of UHV gas insulated substation based on variable gap arc model[J]. High Voltage Engineering,2015,41(4):1306-1312.
- [3] 林 莘,李 爽,徐建源,等. 超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器,2011,47(3):12-17.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan,et al. Research on the simulation of TEV in EHV GIS[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(3):12-17.
- [4] MUKAIYAMA Y,TAKAGI I,IZUMI K,et al. Investigation on abnormal phenomena of contacts using disconnecting switch and detachable bus in 300 kV GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1990,15(1):189-195.
- [5] 谢志杨. 母线导体插入深度不足导致 GIS 对地故障原因分析[J]. 高压电器,2009,45(3):160-163.
XIE Zhiyang. Fault analysis on deficiency depth insert of GIS bus conductor[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):160-163.
- [6] 师晓岩,查 玮,孙 福,等. UHV GIS 内部温度场的红外热诊断技术[J]. 高压技术,2007,33(6):16-20.
SHI Xiaoyan,ZHA Wei,SUN Fu,et al. Inner temperature distribution of UHV GIS using infrared thermo-diagnosis technology[J]. High Voltage Engineering,2007,33(6):16-20.
- [7] 丛浩熹,李庆民,齐 波,等. 基于红外传感的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):144-161.
CONG Haoxi,LI Qingmin,QI Bo,et al. Online GIS switch contact temperature monitoring based on IR sensing[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):144-161.
- [8] 武胜斌,郑 研,陈志彬. 基于红外测温技术的 GIS 导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器,2009,45(4):100-110.
WU Shengbin,ZHENG Yan,CHEN Zhibin. An online mon-

- itoring scheme of conductor temperature in GIS based on infrared temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 100-110.
- [9] 周娜. 基于准分布式光纤测温技术的GIS母线触点温度在线监测系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- ZHOU Na. Based on quasi-distributed optical fiber temperature measurement technology GIS busbar contact temperature monitoring system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [10] 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.
- [11] MONNIER A, FROIDUROT B, JARRIGE C, et al. A mechanical, electrical, thermal coupled-field simulation of a sphere-plane electrical contact[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(4): 787-795.
- [12] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magneto-thermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
- [13] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 141-147.
- WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [14] KIM S W, KIM H H, HAHN S C. Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 921-924.
- [15] 范镇南, 张德威, 陈显坡, 等. 用电磁场和流场模型计算GIS母线损耗发热[J]. 高电压技术, 2008, 35(12): 3016-3021.
- FAN Zhennan, ZHANG Dewei, CHEN Xianpo, et al. Calculation of loss and heat of GIS bus bar using electromagnetic field and fluid field[J]. High Voltage Engineering, 2008, 35(12): 3016-3021.
- [16] 宋帆, 申春红, 林萃, 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 Cui, et al. Calculation and analysis on magnet-thermal fields of 800 kV GIS disconnector[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1383-1388.
- [17] 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 on the temperature rise of large current enclosed bus[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 201-203.
- [18] 纽春萍, 强若辰, 荣命哲, 等. 弹簧触指的稳态温升仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 8-14.
- NIU Chunping, QIANG Ruochen, RONG Mingzhe, et al. Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 8-14.
- [19] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- ZHANG Guansheng. The foundational theory of electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [20] 范春利, 孙丰瑞, 杨立. 缺陷表面温度分布及空腔自然对流对红外检测的影响[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 504-507.
- FAN Chunli, SUN Fengrui, YANG Li. Temperature distribution of defect surface and effect of natural convection on thermographic inspection[J]. Laser and Infrared, 2005, 35(7): 504-507.
- [21] GB 763—1990 交流高压断路器在长期工作时的发热[S]. 1990.
- GB 763—1990 Heating of AC high voltage apparatus under long run[S]. 1990.
- [22] ORIANO B, GABRIELLA C, GIOVANNI F. Numerical analysis of heating transient of electric contacts under short-circuit conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(5): 563-570.
- [23] GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 2011.
- GB/T 11022—2011 Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards[S]. 2011.
- [24] DL/T 664—2008 带电设备红外诊断应用规范[S]. 2008.
- DL/T 664—2008 Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment[S]. 2008.
- [25] 李进扬. 输变电设备红外检测典型案例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- LI Jinyang. Typical cases analysis of transmission line infrared detection equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.

李爽(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压电器及其相关技术。