

# 基于红外测温技术的 GIS 导体温度在线监测的方案

武胜斌, 郑 研, 陈志彬

(西安高压电器研究院有限责任公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 提出了将红外测温功能集成在 GIS 中的方案。针对 GIS 运行过程中温升过高点多发生在导体连接处的特点, 在导体连接部位安装点式红外测温仪来适时监测导体关键点的温度, 该方案讨论了导体的发射率和 SF<sub>6</sub> 气体温室效应的影响, 同时考虑测温仪的安装对 GIS 的密封性的影响, 从而针对性地提出了解决方案, 为在线监测 GIS 关键点的温度提供了新的途径。方案的实施将在及时发现异常温升、避免突发故障方面起到重要作用。

**关键词:** GIS; 红外测温; 在线监测; 状态维护

**中图分类号:** TM83

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2009)04-0100-03

## An On-line Monitoring Scheme of Conductor Temperature in GIS Based on Infrared Temperature Measurement

WU Sheng-bin, ZHENG Yan, CHEN Zhi-bin

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper presents a design of integrating infrared temperature measurement into GIS. Because temperature of conductor contacts in GIS rises more quickly than that of other parts of conductors, spot infrared thermoscopes are installed at the key points to monitor the temperatures in time. The problems of conductor's low emitting rate, the greenhouse effect of SF<sub>6</sub> gas, and the leak tightness of GIS when installing or changing thermoscopes are analyzed. Therefore, a new scheme for on-line monitoring the temperature of key points in GIS is proposed. Implementation of this scheme will facilitate to find abnormal temperature rise and avoid burst accidents.

**Key words:** GIS; infrared temperature measurement; on-line monitoring; state maintenance

### 0 引言

GIS 以占地面积小、高稳定性而受到电力用户的青睐。然而随着运行时间的推移和日益增长的负荷需求, GIS 运行的可靠性备受电力用户的关注, 其维护的方式迫切需要由定期维护向状态维护转变。由于受到 GIS 自身封闭性结构的限制, 目前主要采用局部放电检测手段对 GIS 运行状况进行在线监测<sup>[1,2]</sup>。局部放电因为主要通过特高频无线接收或者通过耦合接地信号来判定是否存在内部局部放电, 所以存在放电位置确定、灵敏性以及抗干扰能力等问题还未得到完全解决, 且电力用户需要更为直接的状态参数。随着红外技术的发展, 获取 GIS 运行的状态参量又有了新的手段, 笔者提出了为用户提供更为直接的状态因子——温度的红外监测方法。

### 1 被测对象的红外辐射特点及测温原理

任何高于绝对零度的物体都会以电磁波的形式

向外发射出能量, 这种能量叫做辐射能。波长在 0.76~40 μm 的红外线短波部分电磁波热效应最明显。普朗克定律反映了不同温度下的光谱辐射出度  $M_{\lambda} [W/(m^2 \cdot \mu m)]$  随波长  $\lambda$  的分布规律

$$M_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]^{-1} \quad (1)$$

式(1)中,  $k$  为波尔兹曼常数,  $k=1.3807 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ;  $\lambda$  为波长, μm;  $T$  为黑体的热力学温度, K;  $C_1$  为普朗克第 1 常数,  $C_1=3.743 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$ ;  $C_2$  为普朗克第 2 常数,  $C_2=14\,388 \mu m \cdot K$ 。

图 1 所示的普朗克曲线显示出温度不变情况下黑体光谱辐射出度随波长变化很大, 极大值随着温度增加向短波方向移动, 这就是著名的维恩位移定律

$$\lambda_m T = 2\,897.6 \quad (2)$$

根据 GB 763 规定, GIS 导体最高温度为 378 K, 对应的导体最大光谱辐射出度的波长是 7.66 μm。

基尔霍夫定律指出, 任何物体的积分辐射出度与其吸收率之比值  $M/\alpha$  恒等于同温度下黑体的积分辐射出度  $M_b$ 。

收稿日期: 2008-10-31; 修回日期: 2009-01-13

作者简介: 武胜斌(1978), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究及高压 GIS 设计工作。

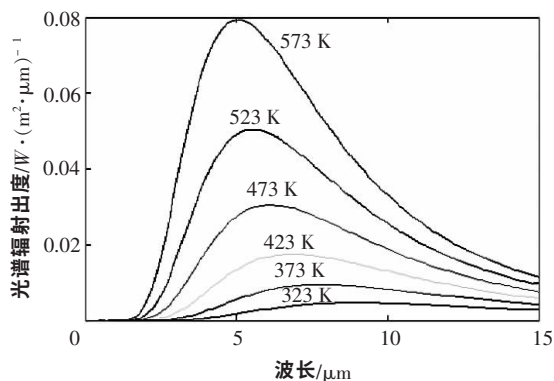


图 1 普朗克曲线

$$M/\alpha = M_b \text{ 或 } \alpha = \varepsilon \quad (3)$$

所以 GIS 中任何被测对象的发射率也等于吸收率。特别是传播媒质对红外的吸收与发射将影响测温的数值与精度。

由于全辐射和亮度测温法的测温精度受物体发射率的影响很大<sup>[3]</sup>,为了减少物体发射率的影响,目前测温精度高的测温仪主要采用双波长测温法。双波长测温法是通过测量给定波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的辐射功率之比,用比色测温法来确定物体的温度。

双波长测温仪有两个通道,分别输出两个波长对应的辐射信号,两个通道的输出信号可分别表示为

$$U_1 = K_1 \varepsilon_1 \lambda_1 \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T}} \quad (4)$$

$$U_2 = K_2 \varepsilon_2 \lambda_2 \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $K_1$ 、 $K_2$  为各个通道的仪表常数,  $C_2$  为普朗克第 2 常数。两个通道的信号比值  $R$  应为

$$R = \frac{\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} K_1 M(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} K_2 M(\lambda, T) d\lambda} \quad (6)$$

由式(6)可知,比值  $R$  与温度  $T$  及参数  $\lambda_1$ 、 $\delta\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 、 $\delta\lambda_2$  有关,因此测温时应选择合适的工作波长。

## 2 GIS 的结构特点

图 2 为某公司的 GIS 产品结构平面图,结构虽然复杂,但从温度监测角度来说都有共同的特点,导体通过绝缘支撑件与壳体相连,导体与壳体之间充满了  $\text{SF}_6$  气体。导体处在高电位,且电场强度高,壳体处于地电位,正是因为 GIS 的这种结构使得接触测温法很难实现。根据以往 GIS 出现事故的原因分析,温升过高主要出现在导体的连接部位,发生事故多是因为某种原因导致的接触电阻过大,连接部位温升过高而引发的。因此希望能够适时监测连接部位尤其是活动连接部位的温度信息。正是因为接触电阻发生变化引起导体的温度升高,可以通过监测导

体的温度来判定连接部位是否工作正常。

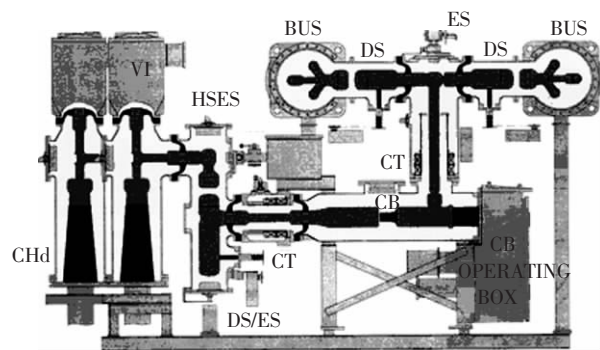


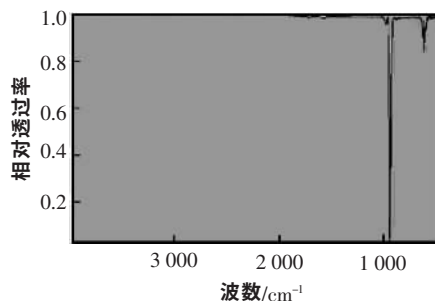
图 2 GIS 结构平面图

GIS 中抛光的导体外表面粗糙度算术平均偏差上限值为  $6.3 \mu\text{m}$ ,因为金属表面粗糙度降低反射率将增加,吸收率将随之降低,根据公式(3)可知表面发射率也会降低。对于红外测温希望导体的红外发射率大,这就要求表面粗糙度大,表面粗糙度的增加将导致  $\text{SF}_6$  绝缘能力下降,因此不可能通过降低表面光洁度来提高导体的表面发射率。GB 763 规定环境温度最高为  $40^\circ\text{C}$ ,GIS 中导体连接部位最高温升为  $65^\circ\text{C}$ ,即允许最高运行温度为  $105^\circ\text{C}$ ,抛光的金属铝导体表面的发射率在  $100^\circ\text{C}$  时约为 0.05。

## 3 传输介质的特点

单纯  $\text{SF}_6$  气体热稳定性高,加热到  $500^\circ\text{C}$  时不会分解。 $\text{SF}_6$  与绝缘物接触时,加热到  $160\sim 200^\circ\text{C}$  就分解,有水分存在时能加速分解,因此 IEC 规定  $\text{SF}_6$  产品使用最高温度为  $180^\circ\text{C}$ 。

在导体到测温仪之间起绝缘作用的是  $\text{SF}_6$  气体,红外光要穿过  $\text{SF}_6$  气体才能到达测温仪,作为温室气体的  $\text{SF}_6$  排放受到世界的严格限定,因为它对红外光能的吸收效果非常明显,在 GIS 中  $\text{SF}_6$  是作为传输介质,  $\text{SF}_6$  红外光谱图见图 3。  $\text{SF}_6$  虽然是温室气体,但成分单一,与大气的复杂成分相比,它的吸收光谱也比较简单。从图 3 中可以看出,  $\text{SF}_6$  气体在红外有一个以波长  $10.56 \mu\text{m}$  为中心的吸收带,对应的波数为  $947 \text{ cm}^{-1}$ 。说明  $\text{SF}_6$  气体在此频率带内吸收和辐射能力都很强。

图 3  $\text{SF}_6$  气体红外光谱图(NIST2001)

#### 4 导体红外测温的实现

通常 GIS 内部导体连接部位在额定电流作用下的温度为 100℃左右,达到稳态后 GIS 壳体壁面的温度为 50℃左右。壳体内表面涂有环氧底漆,发射率可达 0.9 左右。当导体光洁表面发射率为 0.05 时,反射率为 0.95 左右。根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,导体接触部位单位面积固有辐射与反射辐射的比值

$$\frac{M_b}{M_{ref}} = \frac{0.05 \times \sigma \times 373^4}{0.9 \times \sigma \times 323^4 \times (1 - 0.05)} \approx 0.104 \quad (7)$$

可见导体自身固有的辐射只有反射辐射的十分之一,因此如果采用全波段测温法得到的将不再是被测导体的温度,要测量导体连接部位的温度必须提高被测点的发射率,这也正是专业从事在线监测人员很难开展 GIS 内部导体温度红外监测的原因。

抛光金属表面的发射率是很低的,所以要大幅提高发射率必须对金属表面进行处理,但由于 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘性能与导体表面粗糙度关系密切,因此非设计工作者无法完成表面的处理工作,在产品设计的应考过程中应考虑设备的状态维护性能,为红外温度检测提供接口。对表面进行处理是为了提高发射率,表面处理后不得影响 GIS 内部运行环境。这里可以采用在触座上开圆孔槽,在槽底嵌入 SF<sub>6</sub> 环境下的高稳定化学性质且高辐射率的物质,这种嵌入其他物质的方式将不受金属铝的限制,有更大的替代材料空间,从而将对铝导体的红外测温转化为对普通材料温度的红外测量。

绝大多数纯金属表面的发射率都很低,绝大多数非金属材料发射率都很高;非金属材料尤其是多晶陶瓷,发射率受表面粗糙度的影响较小或无关,对于金属材料,表面粗糙度将对反射率产生较大的影响;绝大多数纯金属的发射率近似地随开氏温度的增大成比例增大,比例系数与金属电阻率有关<sup>[4]</sup>。因此,通常应选择多晶陶瓷作为稳定的红外发射源。

根据式(8)可知,如果采用双波长比色测温法,由于频带很窄,带宽主要取决于光学系统的滤波性能,因此如果选择波长 10.56 μm 为中心的频带,可知测量的信号将是 SF<sub>6</sub> 气体自身的固有辐射,而非来自原辐射源的辐射。由于 SF<sub>6</sub> 气体的红外特性,对红外测温仪的选择上要避免对应的吸收带。常用的红外探测器主要有 HgCdTe (8~13 μm) 探测器、HgCdTe (6~9 μm) 探测器、InSb (2~5 μm) 探测器,为了避开 SF<sub>6</sub> 吸收带,同时考虑到通常连接部位的温度在 300~380 K,所对应的能量集中为 6.5~9.5 μm,因此选择 HgCdTe (6~9 μm) 探测器。

在开发产品的过程中,设计者对可能出现的由于电接触而导致的温升过高点非常清楚,这些点的温度关系到电力运行的可靠性,因此电力用户最关心这些点的温度。前面的讨论知道要适时监测关键

部位的温度,需要在导体上嵌入多晶陶瓷作为红外发射源。多晶陶瓷面积大小的选取,主要由测温仪的距离系数决定,距离系数=L/D,见图 4。比如选用 120:1,那么 600 mm 处最小的监测直径为 5 mm,目前很多测温仪的距离系数为 200:1,因此如果嵌入直径为 10 mm 的多晶陶瓷完全满足点式测温仪的测温需要。

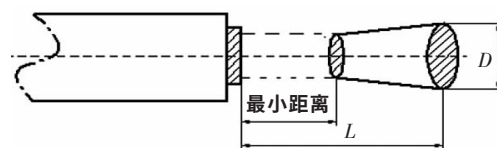


图 4 距离系数示意图

GIS 特征导体测温模型见图 5。由于是嵌入方式,圆形槽和镶嵌的多晶陶瓷并不影响 GIS 的绝缘强度,且多晶陶瓷稳定,不与 SF<sub>6</sub> 气体反应。

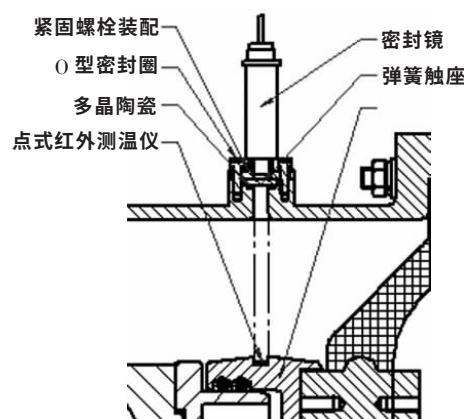


图 5 GIS 特征导体测温模型

根据 GIS 运行可靠性要求,在 GIS 运行过程中应保证更换红外测温仪不影响 GIS 的运行,在 22℃时光滑玻璃表面反射率可以小到 0.04,玻璃经过钢化处理后抗压强度最大可以达到 125 MPa,GIS 中断路器壳体设计压力最大为 0.8 MPa,取铸件破坏压力系数为 5,选择承受 4 MPa 以上压强,受压面直径为 10 mm 的圆形钢化玻璃可满足密封镜要求,此钢化玻璃作为密封镜以防薄膜的方式装在壳体法兰上,如图 5 所示,密封镜与法兰之间通过密封圈进行密封,在法兰上方为连接红外测温仪的接口。密封镜上方为带有安装红外测温仪螺纹的挡板,这样在运行过程中安装与更换红外测温仪都极为方便。

#### 5 结语

笔者提出了采用红外测温仪对 GIS 的内部导体,特别是对导体活动连接部位进行温度在线监测

(下转第 110 页)

率,方便设备的维护和更新,减少变电站寿命周期内的总体成本。

## 5 结语

电子式互感器的诞生是互感器传感准确化、传输光纤化和输出数字化发展趋势的必然结果。电子式电流互感器是电网动态观测、提高继电保护可靠性和数字电力系统建设的基础装备,将在现代电力系统中发挥重要的基础测量作用。随着微机保护的广泛应用,二次保护设备不再需要高功率的输出信号。电子式互感器以其高精度、高可靠性、宽频带等特点和在实际应用中表现的优良特性表明:ETA/ETV 完全能够适应电力计量和继电保护数字化、自动化的发展潮流,并将成为未来互感器发展的主流方向。

## 参考文献:

- [1] IEC 61850.Communication Networks and Systems in Substation:Part9-1·Geneva:International Electro Technical Commission[S].2003.
- [2] BRAND K P.The Standard IEC 61850 as Prerequisite for Intelligent Applications in Substations[C]//Power Engineering

Society General Meeting,2004;714-718.

- [3] STEINHAUSER F.New Challenges with Substations Utilizing Communication Networks[C]//Power Tech. Conference Proceedings, Bologna,2003;225-229.
- [4] SHEPHARD B,JANSSEN M C,SCHUBERT M.Standardised Communications in Substations[C]//Developments in Power System Protection,2001,Seventh International Conference on IEE,Amsterdam,2002;543-547.
- [5] 李红斌,余春雨.电子式互感器数字输出的研究[J].高电压技术,2004,30(2):10-12.
- [6] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J].电力系统自动化,2004,28(21):38-42.
- [7] 黄智宇,段雄英,张可畏,等.电子式高压互感器数字接口的设计及实现[J].电力系统自动化,2005,29(11):87-90.
- [8] 段雄英,邹积岩.小波变换在电子式电力互感器误差校正中的应用[J].电工技术学报,2002,17(6):93-96.
- [9] 钱政,梅志刚,罗承沐.电子式互感器中数据采集系统的实现与误差补偿[J].高压电器,2004,40(1):37-39.
- [10] OATES C D M,BURNETT A J,JAMES C.The Design of High Performance Rogowski Coils [C]//International Conference on Power Electronics,Machines and Drives,2002;568-573.
- [11] NIEWCZAS P,CRUDEN A,MICHIE W C,et al.Error Analysis of an Optical Current Transducer Operating with a Digital Signal Processing System[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2000,49(6):60-65.

(上接第 102 页)

的方法,从而为电力用户获取更为直接的温度参数提供了新的途径;分析了 GIS 红外温度监测的特点,有效地克服了 GIS 中导体的低发射率和 SF<sub>6</sub> 气体的温室效应问题,并将此问题转化为普通的红外测温问题。GIS 温度在线监测的实现,将在及时发现异常温升、避免引发严重故障中发挥重要作用。

(上接第 105 页)

情况下,上述电弧性故障判断电路对故障类型的判断非常准确;在接地电阻达到几百欧姆以上时,通过调整比较器的参考值其判断结果也相当准确。

## 4 结语

(1)笔者提出的单相接地故障类型判断方法简单可靠,电路所需元件全部是常用元件,易于维护,工程实用价值高。

(2)如果单相接地电阻比较高时,应该适当调高比较器的参考值设定水平,以保证判断电路的可靠性。这有赖于线路走廊的地理条件及运行经验。

## 参考文献:

- [1] 张纬钺,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华

## 参考文献:

- [1] 刘卫东,黄瑜瑜.GIS 局部放电特高频在线检测和定位[J].高压电器,1999,35(1):11-15.
- [2] 金力军,胡青,邱国海,等.GIS 电晕放电监测[J].高电压技术,2005,31(3):25-27.
- [3] 徐淦卿,陈钰,程东杰.红外物理与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,1989.
- [4] 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.
- [5] 大学出版社,2002.
- [2] 刘渝根,丁伯剑,袁涛.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[J].高电压技术,2006,32(1):32-34.
- [3] 税正中,施怀瑾.电力系统继电保护[M].重庆:重庆大学出版社,1997.
- [4] 牟道槐,李玉盛,马良玉.发电厂变电站电气部分[M].重庆:重庆大学出版社,1996.
- [5] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [6] 戴伏生,毛兴鹏,王好贤,等.基础电子电路设计与实践[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [7] 阎石.数字电子技术(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 丁伯剑.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[D].重庆:重庆大学电气工程学院,2004.