

基于红外的 GIS 内部导体温度检测技术研究

李玉杰¹, 李洪涛¹, 宋思齐¹, 杨景刚¹, 刘通¹, 王林杰²

(1. 国网 GIS 设备运维检修技术实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211106)

摘要:为预防气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)触头过热缺陷,解决传统测温技术无法实现 GIS 设备内部触头温度准确检测的难题,提高 GIS 设备内部触头温度的测量精度,提出一种基于红外热成像 GIS 内部导体温度检测技术。通过不同光程和气压条件下 SF₆吸收率试验,对影响红外测温精度的光程和 SF₆气体压力进行分析,得到光程、气体压力与温度修正值的关系,并计算得到温度补偿算法;将该温度补偿算法应用在红外测温装置中,能够根据被测物的光程和 SF₆气体压力准确测得 GIS 内部导体实际温度。最终的试验结果显示,该红外测温仪在加入补偿算法后能够较准确地测量出 GIS 设备气室内触头的实际温度。

关键词:GIS; 红外测温; SF₆; 温度补偿算法

中图分类号: TM564

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0142-05

0 引言

随着我国电力工业的大力发展和需求量的不断增长,气体绝缘金属封闭开关(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS)被广泛应用于电力系统中^[1-3]。GIS 设备加工工艺严格、技术先进,当前绝缘介质为 SF₆气体,具有开断能力强,检修周期长、故障率低、占地面积小等优点。GIS 设备内出现触头接触不良等状况时,由于接触电阻变大,在负载电流流过时会产生过热现象。触头过热会引起导体相连盆子的绝缘老化甚至出现盆子被击穿现象,从而引发短路。由于发热引起的设备故障近几年屡见不鲜,已造成多起设备停运甚至爆炸等事故^[4-7]。因此,实现对 GIS 设备的在线温度监测,提前发现并消除热故障隐患,对 GIS 的安全稳定运行具有重要意义。

由于 GIS 结构的特殊性,当前无法实现对 GIS 设备温度状态量的持续测量。一些接触式测温装置因对 GIS 内部电场分布影响,测温装置自身绝缘问题和装置引出线的布置等方面暂无有效处理方法,目前还未在 GIS 设备触头温度检测中广泛应用。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——红外在线测温监测方法。该方法^[8]不与被测物体直接接触,不会扰动和破坏被测物体的温度场和热平衡,也解决了高压隔离和测量部分的高温问题,且能够实现连续自动测量 GIS 设

备触头的温度并及时进行温度越限预警,具有广泛的应用前景。文中针对 GIS 设备结构的特点,提出了基于红外测温的 GIS 内部导体温度检测技术研究,并对影响红外测温精度的因素进行了实验研究。

1 理论基础

温度在绝对零度以上的物体,都会因自身的分子运动而辐射出红外线,且物体的温度越高,所发出的红外辐射越强。通过红外探测器将物体辐射的功率信号转换成电信号后,成像装置的输出信号可以一一对应地模拟扫描物体表面温度的空间分布,经电子系统处理可得到与物体表面热分布相应的热像图,从而能实现对目标的远距离热状态图像成像和测温并进一步分析判断。

根据斯特藩-波尔兹曼定律,单位时间内单位面积上某绝对温度为 T 的物体红外辐射总能量为:

$$\varphi = \sigma\mu T^4 \quad (1)$$

式中: μ 为比辐射率; $\sigma = 5.669\ 7\ \text{pW}/\text{cm}^2\text{T}^4$, 为斯特藩-波尔兹曼常数。由公式可见,红外探测设备的任一时刻从被测设备表面接收到的红外辐射功率与被测物体表面绝对温度 T 的 4 次方成正比。因此,当物体表面有细微温度变化时,红外探测设备输出的电信号就有较大的变化。基于该理论基础,开展相关红外辐射与 SF₆ 气体吸收率试验研究^[9]。红外吸收光谱分析的理论依据是光子能量公式,即:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常量; c 为光速; ν 为光的频率。

光子能量仅与 $1/\lambda$ 即波数有关,因此研究在不同压强和光程条件下 SF₆ 对红外波的吸收率只需求

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-12-13

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“高压开关设备机械状态评估及故障诊断关键技术研究”

得在对应条件下的红外吸收光谱的积分面积与红外测温仪总的可吸收光的积分面积的比值^[10-11]。

从 HITRAN 数据库中查找到 SF₆ 分子标准状况下的吸收光谱图,如图 1 所示。常用的红外测温仪接收的红外线的波长在 8~14 μm 左右,其红外波段为 714.3~1 250 cm⁻¹ 之间, SF₆ 气体对波长在 10.1~11.1 μm 之间,波段为 900~990 cm⁻¹ 的红外信号有吸收作用。由于 SF₆ 的红外吸收光谱与红外测温仪检测红外波段重叠,研究 SF₆ 在红外波段的吸收特性,消除其对红外测温仪的影响非常必要^[12-14]。

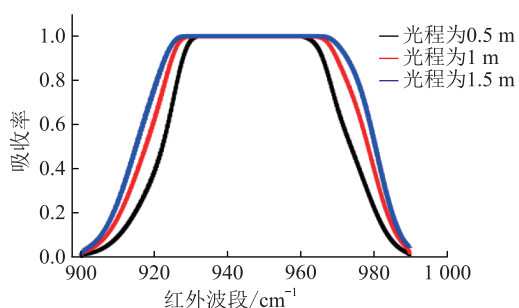


图 1 SF₆ 红外吸收光谱

Fig.1 SF₆ infrared absorption spectrogram

通过对不同气压和光程条件下 SF₆ 气体压强和光程,结合 SF₆ 分子相关波段的吸收光谱,便可对测的红外光强进行补偿,提高红外测温仪的精度。

2 SF₆ 红外光谱吸收特性影响因素分析

设计一个 SF₆ 气体密闭气室,分别充入不同压力的 SF₆ 气体,研究在 0.5 m, 1 m, 1.5 m 光程时对其吸收特性的影响。气室内设置一个标准发热黑体和红外传感器,开展不同气体压力、不同光程情况下 SF₆ 气体对红外光谱的吸收、反射和辐射特性影响的研究,提出不同气体压力、不同光程情况下红外光谱吸收特性。SF₆ 气体对红外吸收特性影响试验研究平台原理如图 2 所示。SF₆ 气体对红外光谱特性影响试验研究平台如图 3 所示。

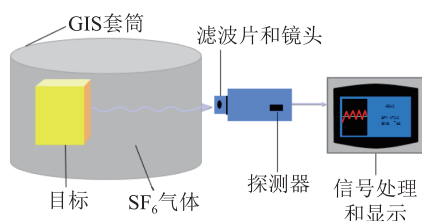


图 2 SF₆ 对红外吸收特性影响试验研究平台

Fig.2 Schematic platform diagram of influence of SF₆ on infrared absorption characteristics

试验中设置气室内压强范围为 0.2~0.8 MPa,以 0.05 MPa 为间隔变化,选取光程分别为 0.5 m,



图 3 SF₆ 对红外光谱特性影响试验研究平台

Fig.3 Experimental research platform of influence of SF₆ gas on infrared spectrum characteristics

1.0 m, 1.5 m 3 个区间,分别开展不同压强、不同光程条件下的 SF₆ 对红外光的吸收试验,试验数据经过探测器信号处理分析后,如图 4 所示。

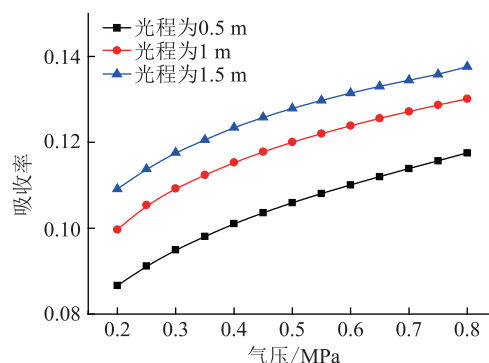


图 4 不同压强和光程条件下的 SF₆ 对红外光的吸收比较

Fig.4 Absorption of infrared light by SF₆ on the conditions of different pressure and light range

对比图 4 中 3 条曲线可知:在光程和压强共同增大的情况下, SF₆ 对红外的吸收率也随之增大。其中,最小吸收率为 0.087,最大吸收率为 0.137。在实际应用于 GIS 内部导体测温时,现场红外测温装置安装在 GIS 外壳上靠近观察窗位置进行观测,因此红外传感器距离热点的距离介于 0.5~1 m, GIS 设备内部的压强在 0.4~0.6 MPa 左右。在此条件下计算得到实际 GIS 设备红外测温时, SF₆ 对红外的吸收率为 0.115,因此在使用红外测温装置对 GIS 气室内导体进行测温监测时,会受到 SF₆ 气体对红外的吸收作用^[15-17]。

不同光程条件下红外吸收率随压强变化的趋势大致相同,但随着压强的增大 SF₆ 对红外的吸收光谱的面积增大,而吸收能量随吸收光谱面积增大而增大,因此压强越大, SF₆ 对红外的吸收越强。

3 基于 SF₆ 吸收影响的补偿算法研究

对不同光程条件下的 SF₆ 气体红外吸收率随气室气压变化曲线进行函数拟合,吸收率拟合公式为:

$$\eta_{\text{吸收}} = \begin{cases} -0.0005p^2 + 0.0099p + 0.0695 & \text{光程为 } 0.5 \text{ m} \\ -0.0006p^2 + 0.0105p + 0.0828 & \text{光程为 } 1 \text{ m} \\ -0.0005p^2 + 0.0099p + 0.0916 & \text{光程为 } 1.5 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

使用 MATLAB 软件对不同光程、不同压强下的 SF₆ 吸收率进行多维拟合, 拟合结果如下:

$$\eta_{\text{吸收}} = -0.0495 + 0.492l + 0.00943p - 0.0122l^2 - 0.000588lp - 0.000264p^2 \quad (4)$$

根据辐射能量与温度对应关系公式可逆推得:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\varphi}{\sigma\mu}} \quad (5)$$

以 0.5 m 光程为例, 根据 SF₆ 气体对红外吸收率的影响推算出补偿后的吸收率, 即当红外仪监测到 GIS 内部 0.5 m 光程条件下温度为 t , 则实际的导体的红外辐射能量值为:

$$\varphi_{\text{实际}} = (1 + 0.005p^2 - 0.0099p - 0.0695)\sigma\mu t^4 \quad (6)$$

而 GIS 内导体的实际温度为:

$$T_{\text{实际}} = t\sqrt[4]{(0.0005p^2 - 0.0099p - 0.9305)} \quad (7)$$

针对不同电压等级 GIS, 即不同光程和 SF₆ 气体压力条件下, 红外测温修正算法如下式所示:

$$T_{\text{实际}} = t(1 - 0.0495 + 0.492l + 0.00943p - 0.0122l^2 - 0.000588lp - 0.000264p^2)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

4 红外 SF₆ 测温补偿算法应用试验研究

将该红外测温补偿算法导入红外测温系统软件中, 并对某 GIS 隔离开关气室进行红外测温试验。试验中将热电偶布置在 GIS 内部隔离开关触头附近导体上, 在导体正上方的可视窗口安装锗玻璃(红外透射率高)。对该 GIS 试验段在不同气压和不同电流条件下对导体稳态温度进行温度监测, 该试验模型见图 5。热布偶布置及红外测温度见图 6。

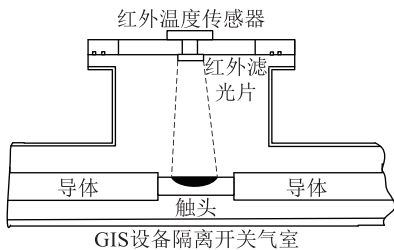
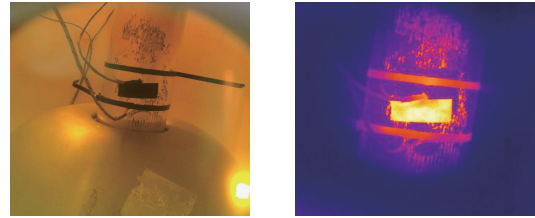


图 5 GIS 红外测温模型

Fig.5 Model diagram of GIS infrared temperature measurement



(a) 热电偶布置

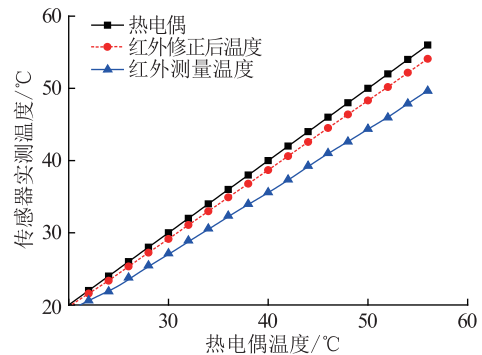
(b) 红外测温

图 6 热电偶布置及红外测温图

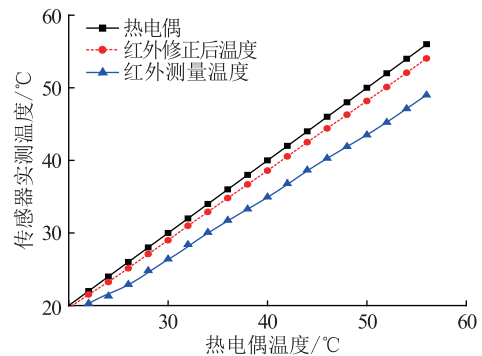
Fig.6 Thermocouple layout and infrared temperature measuring

在试验过程中记录热电偶位置的红外测温仪监测温度和热电偶温度, 同时记录通红外补偿算法修正前后的红外数据, 3 组数据温度曲线如图 7 所示。

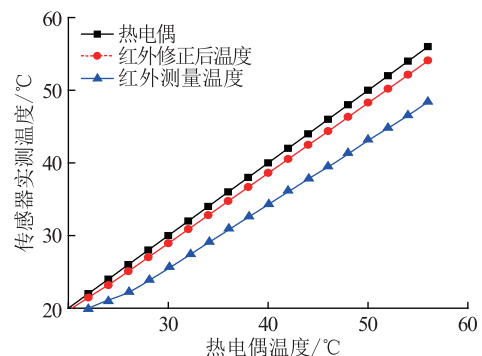
不同气压条件下红外补偿修正后的温度曲线均介于实际热电偶温度曲线和红外修正前的温度曲线之间。虽然红外修正之后的温度值仍略低于热



(a) 0.2 MPa 条件下温度曲线



(b) 0.3 MPa 条件下温度曲线



(c) 0.4 MPa 条件下温度曲线

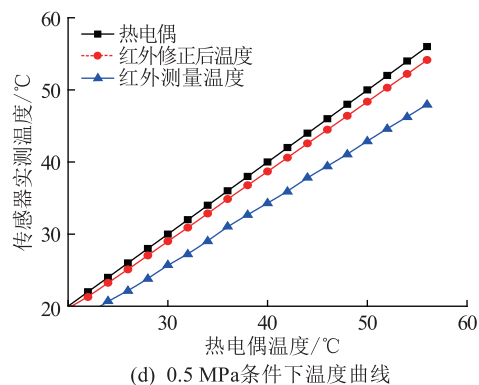


图7 不同压强条件下的 GIS 内部导体温度监测图

Fig.7 Temperature monitoring of GIS internal conductor on the conditions of different pressure

电偶所测值,但已经明显更加接近热电偶测得的温度曲线。从表2中红外测温系统修正后的平均测量误差来看,在不同气压下补偿修正后误差均降为1.2℃左右,原因推断为GIS红外观察窗材料对红外存在吸收作用,而使得修正后的红外测温法获得的导体温度比热电偶测得的实际温度低。总体可见此红外测温系统内部算法修正的效果良好,作为一种非接触式测温方式其修正之后的测温结果准确度较高,测温误差在工程允许范围之内。

表2 不同压强条件下GIS内部导体温度平均误差

Table 2 The average error of temperature on the condition of different pressure and current

气压/MPa	修正前平均误差/℃	修正后平均误差/℃
0.2	3.907	1.172
0.3	4.542	1.272
0.4	5.121	1.280
0.5	5.357	1.232

5 结语

文中通过对SF₆气体在不同压强、不同光程下的红外吸收特性试验研究,得到结论:压强越大,SF₆对红外的吸收作用越强;光程越大,SF₆对红外的吸收作用越强;在压强与光程2个因素共同作用时,随着光程和压强的增大,SF₆对红外的吸收作用越强。

基于红外的GIS内部导体温度检测技术重点对测量所得数据进行的补偿和修正,通过对不同条件下SF₆吸收红外过程进行试验和比较,修正后得到的结果较修正前的原始结果更加接近真实数据,通过红外补偿公式修正后,能够有效提高红外温度测量精度,最大可能地消除光程和气体压力对测量结果的影响。不同气压下红外修正之后的温度曲线均介于实际热电偶温度曲线和红外修正前的温度

曲线之间,红外修正之后的温度值仍然略低于热电偶所测值,原因推断为GIS红外观察窗材料对红外存在吸收作用。但作为一种非接触式测温方式其修正之后的测温结果准确度较高,测温误差在工程允许范围之内,因此基于红外的GIS内部导体温度检测方法效果良好。

参考文献:

- [1] 陈琳,唐忠,崔昊杨. 电气设备红外测温技术的实现[J]. 电测与仪表,2013(4):64-68,100.
CHEN Lin, TANG Zhong, CUI Haoyang. The realization of infrared thermometric techniques of electric equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2013(4):64-68,100.
- [2] 马继先,杨青,郭亮. 影响电力设备红外检测准确性因素的分析研究[J]. 华北电力技术,2012(8):55-60.
MA Jixian, YANG Qing, LIANG Guo. Research on promoting the accuracy of electrical equipment diagnosing with infrared detection[J]. North China Electric Power,2012(8):55-60.
- [3] 张乔根,文韬,赵军平,等. 大容量GIS现场冲击试验问题探讨[J]. 广东电力,2018,31(8):37-43.
ZHANG Qiaogen, WEN Tao, ZHAO Junping, et al. Discussion on problems of on-site impulse test for GIS with large capacity[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(8):37-43.
- [4] 李德刚. 红外诊断技术在电气设备状态检测中的研究与应用[D]. 济南:山东大学,2010.
LI Degang. Research and application on the infrared diagnostics of electrical equipment testing[D]. Jinan:Shandong University,2010.
- [5] 武胜斌,郑研,陈志斌. 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):100-102.
WU Shengbin, ZHENG Yan, CHEN Zhibin. The scheme of on-line monitoring of GIS conductor temperature based on infrared temperature measurement technology[J]. High-voltage Electrical,2009,45(4):100-102.
- [6] 缪金,王艳华. GIS组合电器典型故障分类和全周期维护策略研究[J]. 陕西电力,2017,45(2):78-81.
MIAO Jin, WANG Yanhua. Typical fault classification of GIS equipment and life cycle management strategy[J]. Shaanxi Electric Power,2017,45(2):78-81.
- [7] 金虎,彭在兴,王颂,等. GIS触头过热故障实验及外壳红外热像分布特征研究[J]. 智慧电力,2017,45(11):37-41.
JIN Hu, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Study on overheat experiment of GIS contact and infrared thermal image distribution on its Shell[J]. Smart Power,2017,45(11):37-41.
- [8] 金力军,胡青,邱国海. GIS电晕放电监测[J]. 高电压技术,2005,31(3):25-27.
JIN Lijun, HU Qing, QIU Guohai. GIS corona discharge monitoring[J]. High Voltage Technology,2005,31(3):25-27.
- [9] 刘渝根,丁伯剑,袁涛. 山区35kV电网中性点新型运行方式研究[J]. 高电压技术,2006,32(1):32-34.
LIU Yugen, DING Bojian, YUAN Tao. Study on the new operation mode of neutral point in 35 kV power grid in mountain area

- [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):32-34.
- [10] 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.
- [11] 戴伏生, 毛兴鹏, 王好贤. 基础电子电路设计与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
DAI Fusheng, MAO Xingpeng, WANG Haoxian. Basic electronic circuit design and practice [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [12] STEINHAUSER F. New challenges with substations utilizing communication networks[C] // Power Technology Conference Proceedings, Bologna, 2003:225-229.
- [13] 丛浩熹, 李庆民. 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):144-148.
CONG Haoxi, LI Qingmi. Research on on-line monitoring technology of GIS disconnecter contact temperature based on infrared sensing [J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(3):144-148.
- [14] 陈强, 李庆民. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):298-306.
CHEN Qiang, LI Qingmin. Based on the GIS disconnecter contact temperature monitoring technique multipoint distributed fiber grating [J]. Electrical Technology, 2015, 30(12):298-306.
- [15] 杨景刚, 刘媛, 高山, 等. 高压开关机械故障诊断技术[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2):1-6.
YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2):1-6.
- [16] 张扬. 一例红外测温技术诊断 220 kV 隔离开关过热缺陷[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5):21-22.
ZHANG Yang. An example of diagnosing overheating defects in 220 kV disconnecter by infrared thermometric techniques [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5):21-22.
- [17] 赵科, 李洪涛, 杨景刚. 特高压 GIS 集中监造工作的若干思考[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2):69-71.
ZHAO Ke, LI Hongtao, YANG Jinggang. Discussions on the centralized supervision of UHV GIS [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2):69-71.

作者简介:



李玉杰

李玉杰(1991),男,硕士,工程师,从事高压开关及局部放电带电检测工作(E-mail: liyujie.12@qq.com);

李洪涛(1987),男,博士,工程师,从事高压开关电器相关工作;

宋思齐(1991),男,硕士,工程师,从事高压电压技术及高压电器相关工作。

Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging

LI Yujie¹, LI Hongtao¹, SONG Siqi¹, YANG Jinggang¹, LIU Tong¹, WANG Linjie²

(1. State Grid GIS Equipment Operation and Maintenance Technology Laboratory

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to prevent the over heating defects of gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) contacts and solve the problem of unable to measure the temperature of internal conductor in GIS by traditional temperature measurement, high-accuracy temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging is proposed. Through a series of tests, the depth analysis of the optical path factors and the pressure of the SF₆ gas which have an impact on the accuracy of infrared temperature, the concrete relationship among the optical path factors, the pressure of the SF₆ gas and the measurement accuracy is gained. So is the compensation formula. According to the distance of the measured objects and the pressure of SF₆, a set of algorithm improving the measurement accuracy of infrared radiation thermometer to obtain the actual temperature of the contact measured is designed. It can combine with exact temperature compensation calculated by compensation formula. The final result of test shows that the infrared radiation thermometer with compensation algorithm can measure the temperature of the contacts in GIS more accurately.

Keywords: gas-insulated metal-enclosed switchgear; infrared temperature measurement; SF₆; compensation algorithm

(编辑 方晶)