

自取能无线测温装置研究性试验中发现的问题及改进建议

杨 柳¹, 戴冬云², 张显聪¹, 骆 虎²

(1. 广州供电局有限公司, 广州 510620; 2. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710075)

摘要: 为验证自取能无线测温装置的性能,笔者筛选了3种自取能无线测温装置,装配于模拟导电回路,按标准 GB/T 11022—2011 进行温升、额定短时耐受电流和额定峰值耐受电流的研究性试验,发现自取能无线测温装置在精度校验方法、传感器探头选择,自取能线圈铁心材料的选择、保护及控制回路设计方面存在着较大的改进及完善空间。

关键词: 高压开关设备; 自取能; 无线测温; 在线监测

Problems Existed in Development Tests of the Self-power Supplied Wireless Temperature On-line Monitoring Device and Suggestions for Improvement

YANG Liu¹, DAI Dongyun², ZHANG Xiancong¹, LUO Hu²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: According to China National Standard GB/T 11022—2011, the temperature rise tests, the short-time withstand current tests and the peak withstand current tests are carried out on three types of self-power supplied wireless temperature measurement devices from different suppliers in the simulation experiment circuit, to verify the performance of the devices. It is discovered that improvements are needed for the device in terms of the method of the accuracy verification, the selection of the sensor, the selection of the iron core material of the self power-supplied coil and the circuit of the control and protection.

Key words: high-voltage switchgear; self-power supply; wireless temperature measurement device; on-line monitoring

0 引言

随着当今社会对电能依赖性的提高,对供电设备可靠性也提出了越来越高的要求。目前广泛使用的手车式中置柜由于断路器与开关柜之间采用梅花触头实现主回路电联接,因制造、装配、安装不良或材料质量等问题将导致触头接触不良、回路电阻增大,从而产生触头温升过高的现象。同样,在固定柜中隔离开关的动静触头之间也存在同样的由于安装、操作或材料质量等问题造成触头接触不良导致局部温升过高的现象。以上两种现象都可能产生隐患,因过热而引发故障,严重时造成设备损毁。这些

现象在大电流开关柜(如进线柜)表现尤为突出^[1-3]。为避免导体和电联接位置如触头的温升过高而引发的设备故障,有必要对导体和电联接位置如动、静触头电连接处的温升/温度进行监测,相关标准和规范^[4-6]也将电连接部件温度在线监测作为智能开关设备的备选功能。实时温度在线监测可及时发现局部发热隐患从而提前做出判断如报警,为开关设备的维护和检修提供依据。

由于开关柜内温度监测点处在强电磁场、高电压环境中,所以现有的温度在线监测方法首先考虑如何实现系统的抗强电磁场干扰和高低电压的隔离问题。目前较为成熟的高压开关柜温度在线监测技术有:光纤测温^[6-9]、红外测温^[10-11]、声波测温^[12-13]、无线测温^[14-16]等。光纤测温技术中光栅传感器集测量

收稿日期:2014-10-17; 修回日期:2014-11-21

基金项目:广州供电局有限公司科技项目(K-GZM2013-008)。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd.(K-GZM2013-008).

和传输于一体,采用光波进行测量和传输,具有不受电磁场干扰和良好绝缘性能、体积小、重量轻、传输损耗小等优点,但由于光纤折弯半径较大,光纤走线困难、价格较高,影响其在高压开关领域的推广应用。红外测温技术为非接触式直线可视测温,只能在可视的情况下测量被测物体表面温度,并且易受环境温度和电磁场干扰,不易实现在线自动化监测监控,而高压开关设备内部空间狭小,发热点通常比较隐蔽,无法保证安装红外探头的安全距离。声波测温技术也为非接触式测温系统,需要在被测温点安装声波感应传感器,声波感应传感器和接受装置体积大,不易使用于高压开关设备内的狭小空间。无线测温装置由于不需要电缆连接,安装方便且能有效实现高、低电压隔离,因而得到开关设备设计人员青睐,但无线测温装置的供电是该技术一个难点。目前对无线测温装置的供电方法有电池供电法,电流互感器取能法^[17-19]。采用电池给无线测温模块供电方法是将电池与测温装置及传感器同时置入开关设备被监测导体内或旁边,由电池提供测温装置工作所需能量。但电池容量有限且寿命较短,安装于导体等工作温度高的位置时,进一步缩短电池使用寿命。并且开关设备运行时,需断电才能更换电池,经济性和可靠性都不高。若增大电池容量则体积也将增大,从而影响开关柜绝缘且安装困难。因此采用电池供电方式不能有效解决开关设备无线测温装置的供电问题。采用电流互感取能方法,是使用电磁感应方式从一次线路上感应获取工作电流用于测温装置工作,这种方式称为自取能方式。由于主回路通过一定电流后装置即能工作,避免了电池供电方式的弊端,因此自取能无线测温装置得到了更广泛的认可和使用。

自取能无线测温装置在获取工作电能时需要有取能、稳压、保护、能量释放等环节。而一次线路电流不是稳定值且变化范围非常大,对自取能各环节能力及协同是一种挑战。笔者筛选了市场上应用较为广泛并有一定使用量的3种不同特征的自取能无线测温传感装置,装配于模拟导电回路。依据额定电压12 kV、额定电流1 250 A的开关柜的技术参数,通流1.1倍额定电流,按标准GB/T 11022—2011进行温升试验、80 kA额定短时耐受电流和额定峰值耐受电流试验,以检验自取能无线测温传感装置耐热、耐受电力以及耐受大电流冲击的能力。研究性实验后发现自取能无线测温传感器在精度,自取能线圈的铁心材料、保护功能设计方面存在极大改进及完善空间。

1 标准依据

《GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》要求高压开关设备和控制设备在散热最不利的条件下,周围空气温度不超过40℃时,对开关设备的触头、用螺栓连接的接头及电缆连接头进行温度和温升的测量,且要求梅花触头的温升不超过65 K,用螺栓连接的接头温升不超过75 K,电缆连接头的温升不超过50 K。与此同时,为了考核开关设备承受峰值耐受电流和短时耐受电流的承受能力,即开关设备的耐热和耐电力性能,还需要进行动热稳定试验,且要求动热稳定试验后,回路电阻的增加不超过试验前的20%,如果电阻的增加超过20%且不能用目测检验证实触头的状况,需进行附加的温升试验。

随着中国智能电网建设,行业上对开关设备进行智能化时,开关设备梅花触头温度监测被写入了相关标准^[4-5],测温系统作为一个智能电子装置(IED),为主IED提供测温数据并为主IED的温度报警提供参考依据。

在标准中《3.6~40.5 kV 智能交流金属封闭开关设备和控制设备》送审稿中,要求智能单元包括温度监测装置随开关设备一同进行型式试验,试验前后对相关功能进行功能性验证。在温升试验过程中,进行温度监测的精度比对试验,要求开关设备的温度监测装置与试验室的温升测试仪测温数据(即热电偶测温值)的比对误差不大于±2℃,并提出了如下的功能性要求:

- 1)测温传感元件的安装应不降低金属封闭开关设备和控制设备的性能;
- 2)测温点的设置应不低于6个;
- 3)各测温点的预报警温度值和极限报警温度值应可设置;
- 4)在监测温度超过预报警温度值和极限报警温度值时,应发出不同的告警信息,该信息包括与告警同步的温度信息;
- 5)当温度采集端采用电池供电工作时,应能监测电池电量,并提供电池低电量告警提示信号;
- 6)温度采集端采用无线射频技术发送信号时,频段应符合《微功率(短距离)无线电设备的技术要求》规定;
- 7)应保存报警信息和一定周期时间段的温度数据;
- 8)应具备数据发送和命令接收的通信接口,该接口可为RS485。

为检验自取能无线测温装置性能,依托西安高压电器研究院的试验资源,按照标准要求,进行温升试验和额定短时耐受电流、额定峰值耐受电流试验,将 3 种自取能无线测温传感器安装于同一模拟导电回路,利用各自接收端接收监测的温度数据,同时与试验室数据进行比对,以验证自取能无线测温传感器性能。

2 温升试验过程

2.1 温升试验布置

温升的研究性试验中,模拟导电回路采用铜排,试验室将铜排从自取能无线测温传感器中间穿过。在西安高压电器研究院温升试验室,接线及布置方式见图 1。

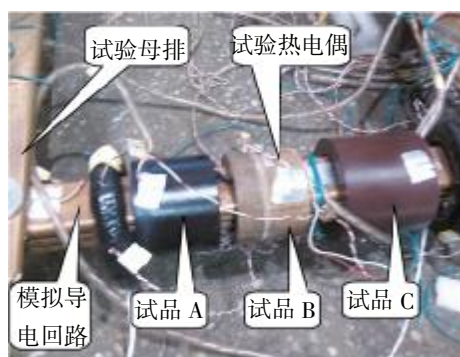


图 1 温升试验布置现场

Fig. 1 Site arrangement of the temperature rise test

试品 A、试品 B、试品 C 的自取能无线测温传感器探头与试验室热电偶 1 布置于模拟导电回路的同一个位置,用锡箔纸固定,用于测量同一点铜排的温升,并将试品 A、试品 B、试品 C 自取能无线测温传感器的测温值与各自对应的试验室热电偶测温值进行精度比对。

试品 A、试品 B、试品 C 的外壳上分别布置一个热电偶 2、热电偶 3、热电偶 4,用于测量自取能无线测温传感器自身发热。

3 个试品自取能无线测温传感器的区别见表 1。

表 1 试品的技术特征

Table 1 The technical characteristics of test specimen

试品名称	内径/mm	测温探头	通信方式
试品 A	60	数字式测温探头	433M 射频信号
试品 B	50	数字式测温探头	2.4G Zigbee
试品 C	75	热敏电阻	2.4G Zigbee

当试验室经试验母排给模拟导电回路通电时,自取能无线测温传感器通过内置的电流互感线圈取电,3 个试品的无线测温传感器工作并将自身传感器测量的温度值,通过无线方式,发送至自身显示仪表。

其网络通信见图 2。

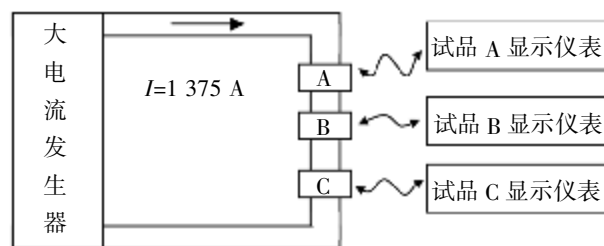


图 2 试品温度信息无线收发示意图

Fig. 2 The wireless receive and send of the temperature signal by test specimens

温升实验室将热电偶测量的温度值,传输到试验室的显示后台。

将无线测温传感器及热电偶布置完毕后,根据额定电流为 1 250 A 的开关柜的温升实验要求,2013 年 7 月 3 日下午 14:05 给无线测温传感器通以 1.1 倍的额定电流(即 1 375 A),试验回路的电流电压值见图 3。



图 3 试验室试验回路电流电压值

Fig. 3 The circuit and voltage value of the laboratory's test apparatus

2.2 温升试验结果及分析

温升试验室的环境温度为 34 ℃,通电时刻为 14:05 分,15:16 分开始通过温升试验室后台记录 3 个无线测温传感器的壳体温度值。试验过程中发现,试品 A 的自取能无线测温传感器自身发热最为厉害,传感器外壳温度超高了 100 ℃,最高温度达到 111.5 ℃。试品 B 的自取能无线测温传感器自身壳体温度在 76~81 ℃内变化,最终稳定于 80 ℃。试品 C 的无线测温传感器自身发热较少,外壳温度没有超过 60 ℃。3 个不同试品的自取能无线测温传感器壳体温度变化趋势见图 4。

将 3 个无线测温传感器测量的同一个点的铜排温度,与热电偶测量的同一个点的铜排温度进行比较,见图 5,发现:试品 A 的无线测温传感器测量的母排温度与试验室热电偶测量的母排温度偏差

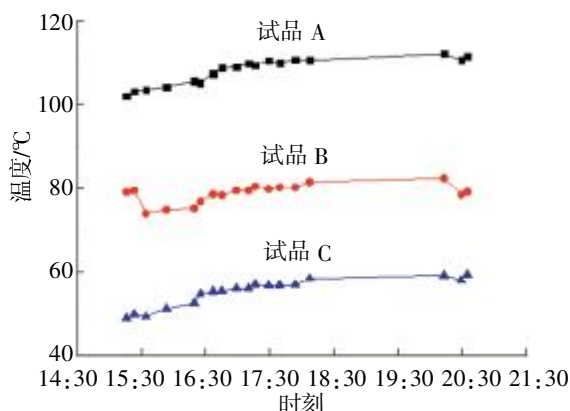


图4 试品壳体温度

Fig. 4 The surface temperature of test specimens

在 $-0.6\sim 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合开关设备的触头测温精度 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 技术要求;试品B无线测温传感器测量的母排温度,与试验室热电偶测量的母排温度偏差较大,且随着母排温度的升高,偏差越来越大,偏差最大时,达到 $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;而试品C无线测温传感器测量母排温度与试验室热电偶测量母排温度偏差最大,当试验室热电偶的温度稳定于 $77\sim 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,该试品的自取能无线测温传感器测量的母排温度稳定于 $61\sim 62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,温度偏差超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

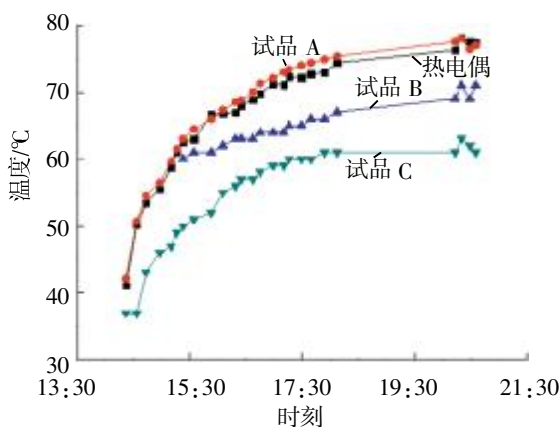


图5 热电偶、试品A、B、C测量的同一点母排温度

Fig. 5 The same point test temperature value by the thermocouple, test specimens A、B、C

温升试验后,对3个无线测温传感器试品的产品进行外观检查,发现试品A无线测温传感器外壳因为高温导致开裂,其温升较高的原因是取能线圈铁心材质选择不合适,铁损较大,从而导致温升过程中无线测温传感器自身壳体温度过高而开裂。试品B、试品C的传感器外观正常。

3 短时耐受电流和峰值耐受电流试验

采用同样的接线方式,在西安高压电器研究院试验站大容量试验室,进行动热稳定试验。对3个试品的自取能无线测温传感器进行 31.5 kA 额定短

时耐受电流(持续时间 4 s)、 80 kA 额定峰值耐受电流试验,以检验自取能无线测温传感器抗瞬间冲击电流的能力。试验后测试发现试品A、试品C的自取能无线测温传感器工作正常,而试品B的无线测温传感器损坏。对试品B的无线测温传感器进行解剖分析发现,由于该家的温度采集端的过流保护器件烧毁。动热稳定试验过程中, 80 kA 电流的感应出尖峰电压,导致电源处理模块的稳压二极管击穿从而导致传感器损坏。

4 结论

笔者对所选用3个试品的自取能无线测温传感器进行测试,并对试品测试结果进行分析,发现各个无线测温传感器试品在自取能线圈设计、无线通信及感温探头选择及信号的处理方面都有自己的设计优势,但都存在某一方面的自身缺陷:试品A通过了所有研究性试验中,测试精度也符合 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测试要求,但该试品在环境温度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下,自身壳体温度升达到了 $111.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其温升为 $67.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,超过了标准[19]规定的 65 K 的规定,因而该试品无疑成为开关设备内部发热源,违背了传感器性能不影响开关设备的本体性能设计原则。试品B的传感器运行时一旦遇到线路上故障电流则传感器损坏,丧失基本功能。试品C的传感器,测温精度偏差巨大,不满足基本要求和标准要求,无法实现监测点温升的真实监测。通过分析各个试品试验对比结果,笔者给出以下建议:

1)针对使用对象选择合适的传感器探头并进行精度校验。无线测温传感器出厂精度校验时,将传感器整体置于温控箱内空气中,温控箱内的空气属于单一介质且探头被空气整体包裹。而现场运行时及试验时无线测温传感器探头仅一部分与被测物体接触,其余部分暴露于空气中或接触其他物体,两种介质之间的温度不同,因而测量得到的结果不同。例如试品C采用的圆柱形探头,与试验母排接触是线接触,接触面小从而导致测量的温度偏差大。而试品A、B的无线测温传感器探头是数字式的扁平形,与试验的母排接触是面接触,因而测量到的温度值接近试验热电偶温度值。尤其试品A熟悉试验和现场运行情况,对温度进行校验和补偿,因而试验时精度较高。

2)取电线圈的铁心选用杂质含量低,易磁饱和的材料。现场运行电流和型式试验电流不同。现场运行时,开关柜工作电流较小,要求无线测温传感器的最小启动电流为 30 A 甚至 5 A 并能提供给足够

的能量给后端负载。而温升试验时,持续通过 1 375 A 的电流,自取能线圈取能过剩,多余的能量只能通过取能线圈的功率电阻以热能的形式释放从而导致取能线圈发热。这要求无线测温试品在选用取能线圈铁心材料时,选用杂质含量低,快速磁饱和的铁心材料,让其在小电流能获取足够的能量,大电流的时候处于深度饱和状态。

3)加强无线测温传感器电源保护回路设计。现场运行时,无线测温传感器处于电流不断变化的使用环境,不断变化地电流导致无线测温传感器的感应电压不断变化,因而自取能线圈的电源保护回路,必须在有效的时间内将其获取的多余能量有效释放并保护后端的处理电路,防止一次电流变化太快,导致取能线圈二次感应电压出现尖峰导致后端的二次元器件因过电压而击穿。因而无线测温传感器试品,需要加强无线测温传感器的电源保护回路的设计,防止短时耐受电流和峰值耐受电流试验传感器损坏。

总之,通过该次温升和动热稳定研究性试验可以看出,自取能无线测温传感器如果设计合理、完全可应用于高压开关设备领域,测温传感器设计人员需要互相沟通,取长补短,设计出符合高压开关设备的应用需求的优质产品。

志谢:

该次研究性试验用自取能无线测温装置是 3 个厂家无偿提供的,西安高压电器研究院试验站工作人员在试验过程中给予无私的帮助和指导,在此感谢传感器厂家、试验人员及项目资助单位。

参考文献:

- [1] 陈化刚,张开贤,程玉兰.电力设备异常运行及事故处理[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
CHEN Huagang, ZHANG Kaixian, CHENG Yulan. Abnormal phenomena and fault disposal of electrical device [M]. Beijing: Water and Electricity Press of China, 1999.
- [2] 陈化刚.高压开关电器故障诊断与处理[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [3] 宋梁,温秀峰.高压开关柜温度在线监测研究[J].电气开关,2012,50(3):32-34.
SONG Liang, WEN Xiufeng. Study on temperature on-line monitoring of high voltage switch cabinet[J]. Electric Switcher, 2012, 50(3): 32-34.
- [4] NB/T 42044—2014 3.6 kV~40.5 kV 智能交流金属封闭开关设备和控制设备[S].2014.
NB/T 42044—2014 Alternating-current metal-enclosed intelligent switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV[S].2014.
- [5] Q/GDW 410—2011 智能电气设备智能化技术导则[S].2011.
Q/GDW 410—2011 Intelligent technology for intelligent electrical equipment[S].2011.
- [6] 乔学光,贾振安,傅海威,等.光纤光栅温度传感理论与实验[J].物理学报,2004,53(2):494-497.
QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, FU Haiwei, et al. Theory and experiment about in-fiber bragg grating temperature sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2): 494-497.
- [7] 张水香,甘辉.基于光纤温度传感器的高压开关设备温度检测系统[J].高压电器,2008,44(6):513-515.
ZHANG Shuixiang, GAN Hui. Temperature monitoring system for HV switches based on fiber-optic temperature sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 513-515.
- [8] 康利军,樊维涛,朱香平,等.荧光光纤测温技术在电力设备中的应用[J].中国电机工程学报,2014(7):23-25.
KANG Lijun, FAN Weitao, ZHU Xiangping, et al. Application of fluorescence fiber temperature measurement technology in power equipment [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(7): 23-25.
- [9] 何毅,周岩,曹卫国,等.高压开关柜在线监测系统中光纤传感器的应用研究[J].华东电力,2011,39(9):1497-1499.
HE Yi, ZHOU Yan, CAO Weiguang, et al. Application research of optic fiber sensor to the on-line HV switchgear monitoring system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1497-1499.
- [10] 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 CSEE, 2002, 22(9): 113-117.
- [11] 张艳,田竞,叶逢春,等.基于红外传感器的高压开关柜温度实时监测网络的研制[J].高压电器,2005,41(2):91-94.
ZHANG Yan, TIAN Jing, YE Fengchun, et al. Development of temperature real-time monitoring network for high voltage switch cabinet based on IR sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 91-94.
- [12] 米小兵,张淑仪,张俊杰,等.超声波自动测温技术[J].南京大学学报(自然科学版),2003,39(4):517-524.
MI Xiaobing, ZHANG Shuyi, ZHANG Junjie, et al. Automatic ultrasonic thermometry[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2003, 39(4): 517-524.

(下转第 187 页)

- LI Xingwang, LU Qifu, LYU Hong, et al. Online monitoring technique and application of UHF during partial discharge of GIS[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25 (6): 91-95.
- [18] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. 采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37 (3): 706-710.
- [19] 王建生, 邱毓昌, 吴向华, 等. 用于 GIS 局部放电检测的超高频传感器频率响应特性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 42-45.
WANG Jiansheng, QIU Yuchang, WU Xianghua, et al. Frequency response characteristics of the UHF sensors for partial discharge detection in GIS[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2000, 20 (8): 42-45.
- [20] 李 信, 李成榕, 丁立健, 等. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 26-30.
LI Xin, LI Chengrong, DING Lijian, et al. Identification of PD patterns in gas insulated switchgear (GIS) based on UHF signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 26-30.
- [21] 孟 岩, 梁乃峰, 孙大陆, 等. 110 kV 电压等级 GIS 实体缺陷设计及带电检测[J]. 陕西电力, 2014, 42(3): 54-58.
MENG Yan, LIANG Naifeng, SUN Dalu, et al. Design and on-line detection of defects in 110 kV GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(3): 54-58.
- [22] 顾云霞, 孙海文, 金 虎. TEV 与超声波法在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 陕西电力, 2012, 40(12): 12-16.
GU Yunxia, SUN Haiwen, JIN Hu. Probe into partial discharge detection and location of switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(12): 12-16.
- [23] 杨志超, 范立新, 杨成顺, 等. 基于 GK 模糊聚类和 LS-SVC 的 GIS 局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 38-45.
YANG Zhichao, FAN Lixin, YANG Chengshun, et al. Identification of partial discharge in gas insulated switchgears based on GK fuzzy clustering & LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 38-45.
- [24] 夏成军, 李 勇, 金兵梅, 等. 基于护套电流和的 110 kV GIS 终端电缆行波故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 91-97.
XIA Chengjun, LI Yong, JIN Bingmei, et al. Fault location of 110 kV GIS terminal cable by traveling wave based on the sum of the sheath current [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 91-97.
- 王伟平(1984—), 男, 工学硕士, 从事高压试验、高压电气设备绝缘状态监测工作。
何炳锋(1974—), 男, 高级技师, 从事高压试验、高压电气设备绝缘状态监测工作。

(编辑 袁 妮)

(上接第 182 页)

- [13] 张兴红, 蔡 伟, 向凤云. 精密超声波温度测量仪设计[J]. 仪表技术与传感器, 2011(6): 32-35.
ZHANG Xinghong, CAI Wei, XIANG Fengyun. Design of precise ultrasonic thermometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(6): 32-35.
- [14] 张东亮. 一种无线在线测温装置在高压开关设备中的应用[J]. 电工电气, 2009, 9(9): 34-36.
ZHANG Dongliang. Application of a kind of online temperature measurement device in high-voltage switchgear [J]. Electrotechnics Electric, 2009, 9(9): 34-36.
- [15] 巩宪锋, 农红钢, 王长松, 等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 155-158.
GONG Xianfeng, NONG Honggang, WANG Changsong et al. Research on temperature monitoring of isolators in hv switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 155-158.
- [16] 赵炳成. 高压开关柜在线监测系统的开发与应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
ZHAO Bingcheng. Development and application of on-line monitoring of high-voltage switchgear cabinet[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.
- [17] 郭琳云, 尹项根, 严新荣, 等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (S1): 217-221.
GUO Linyun, YIN Xianggen, YAN Xinrong, et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 217-221.
- [18] 肖 波, 徐敏捷, 席朝辉, 等. 高压侧感应取能电源的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 1-5.
XIAO Bo, XU Minjie, XI Zhaohui, et al. Research of induction power supply at high voltage side [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 1-5.
- [19] GBT 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 2011.
GBT 11022—2011 Common specifications for high-voltage switchgear and control gear standards[S]. 2011.
- 杨 柳(1981—), 男, 工程硕士, 工程师, 从事高压预防性试验管理工作。

(编辑 袁 妮)