

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.027

# 带电检测技术在电网设备运行维护中的应用

任双赞, 张默涵, 詹世强, 刘晶, 卢鹏  
(国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710054)

**摘要:** 为确保电网设备状态检修及隐患排查工作的顺利进行, 带电检测在设备运行维护中的应用目前已被列为各项工作开展的重点。对当前在电网设备运行维护中广泛使用的红外检测、紫外成像检测、超声波检测、超高频检测、暂态地电压法检测、谐波电场法检测、化学成分分析等检测技术的原理及适用范围分别进行了归纳和总结, 可为后续从事电网带电检测工作的技术人员提供了参考。

**关键词:** 带电检测; 电网设备; 运行维护

**中图分类号:** TM93

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2015)02-0140-06

## Application of Live Detection Technology on the Operation and Maintenance of Power Grid Electrical Equipments

REN Shuangzan, ZHANG Mohan, ZHAN Shiqiang, LIU Jing, LU Peng

(State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To ensure the condition-based maintenance and hidden trouble detection of power equipments carried out smoothly, the application of live detection on the operation and maintenance of power grid equipments has been as the focus of various works. In this paper, the principle and the suitable objects that widely used in the operation and maintenance of power grid electrical equipments, such as infrared detection, ultraviolet imagery, ultrasonic method, ultrahigh frequency (UHF), transient earth voltage (TEV), harmonic electric field method and chemical composition analysis method are summarized, some conclusions would provide reference for the following engineers that engage in the power grid live detection work.

**Key words:** live detection; power grid electrical equipment; operation and maintenance

随着国民经济的快速发展, 电网规模不断扩大, 对电网设备安全运行的可靠性要求也在不断提高, 现行基于周期性的停电检修模式已不能满足当今电网的发展需求, 以设备当前实际运行工况、巡检、家族缺陷、停电检修试验数据等信息为依据, 制定相应合理检修策略的状态检修模式已成为当今电网发展的方向<sup>[1]</sup>。

电力设备的带电检测试验具有对输、变、配电设备在运行条件下的状态诊断、缺陷部位的精确定位、缺陷程度的定量分析等优势, 对提前发现电力

设备潜伏性故障, 避免设备事故具有重要价值<sup>[2]</sup>, 此外采用便携式相关设备, 在设备不停电状态下, 对其进行现场操作的带电检测工作也为电网的状态检修和状态评价工作顺利开展提供了重要基础。

针对目前电力行业中各网省公司的带电检测工作开展程度不一, 仪器使用情况良莠不齐等现状, 本文对使用范围较广的带电检测技术测试原理及应用现状进行了探讨分析。

## 1 红外检测法

### 1.1 基本原理

红外线是波长介于微波与可见光之间的电磁波, 其波长范围为 760 nm ~ 1 mm, 也经常被称作“红外辐射”。在自然界中, 一切绝对零度 (-273℃) 以上的物体都会向周围空间不停的辐射

收稿日期: 2015-01-01

作者简介: 任双赞(1981), 男, 河北衡水人, 工程师, 博士, 主要从事变压器油中组分对其电气性能影响、矿物绝缘油中腐蚀性硫、设备故障诊断等方面的研究(e-mail)154889311@qq.com。

红外线, 红外辐射能量会物体表面温度密切相关, 只要通过测得物体自身红外辐射产生的能量, 便可准确的测定其表面温度。电力设备在运行过程中一般会通过电流、电压等方式产生热效应, 并因此产生对外辐射的红外能量。

常用的红外测温仪器功能模块及原理如图 1 所示:

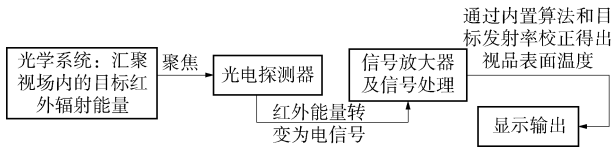


图 1 红外测温仪器原理

Fig. 1 The Principle of Infrared Thermometer

### 1.2 适用范围

红外测温检测技术可实现对设备表面辐射的红外光谱进行非接触式、远距离热成像检测, 并且具有免受电场干扰、灵敏度高、直观、安全准确等特点, 目前已成为电力设备状态监测和故障诊断的重要手段<sup>[2-3]</sup>。

在现场实际操作中, 利用红外测温检测技术具有如下特点, 如表 1 所示:

表 1 红外测温技术的使用特点<sup>[4]</sup>

Table 1 The Characteristics of Infrared Temperature Measurement

检测类型	适用对象	使用要求
一般检测	用于检测因电流致热引起的发热, 并监测设备整体发热情况	对检测环境和仪器要求较低
准确检测	主要用于检测因电压致热引起的内部缺陷	对检测环境和仪器要求较高, 尤其是要消除风速和其他辐射的影响

图 2 为某变电站 220kV 主变 35kV 套管(C 相)及升高座整体发热检测图谱, 从图 2 可以看出 C 相套管和升高座整体发热, 套管桩头没有热点, 怀疑升高座及套管的热度可能是内部导电杆与绕组接头连接不良发热通过导电杆及绝缘油传导而来, 应为电流致热性缺陷<sup>[5]</sup>。

对于一些内部结构比较复杂的大型电力设备而言, 若其内部故障点距离设备表面较远, 或故障点的发热功率较低, 由于热量的横向传递特性, 均会导致故障发热在设备表面产生的特征响应不够明显。若设备内部的热传递过程十分复杂, 也会导致内部的故障发热难以在设备表面形成特征性热场分布, 红外测温技术便难以确定其警戒温升<sup>[6]</sup>。

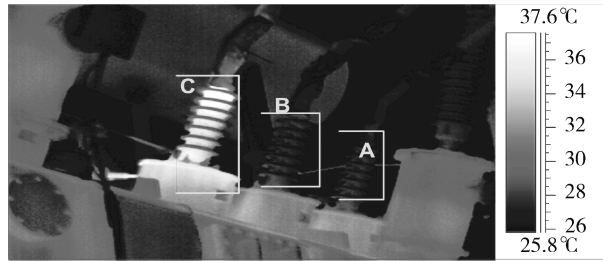


图 2 某主变 35 kV 套管红外测温结果

Fig. 2 Infrared Temperature Measurement Results of 35 kv Bushing of Transformer

此外, 由于 SF<sub>6</sub> 对红外光具有极强的吸收特性, 基于红外成像法的 SF<sub>6</sub> 气体检漏方法(激光成像检漏)在 GIS 等设备上也具有广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

红外检漏的主要原理如下: 当特定波长的红外激光(激光特定波长为 10.56 μm)入射至被测物体表面时, 入射光会发生反射, 随后反射光被探测器接收, 对于具有不同背景吸收率(反射率)的气体, 其反射至探测器的光子数会有一定的差别, 通过处理返回的光子数, 检漏仪便会显示出设备表面的相应成像。当检测区域不存在 SF<sub>6</sub> 泄漏时, 返回的红外能量与背景反射的能量一致, 显示设备上看到的只有目标区域的红外成像图; 当检测区域存在 SF<sub>6</sub> 泄漏时, 由于 SF<sub>6</sub> 气体对红外光强烈的吸收作用, 此时反射到检测设备上的红外光能量会发生急剧地减弱, SF<sub>6</sub> 气体在显示设备上便显示为黑色烟雾, 并且随着气体浓度的不同, 显示的黑度成像也会发生变化, 从而准确发现 SF<sub>6</sub> 气体的泄漏点, 相关过程如图 3 所示:

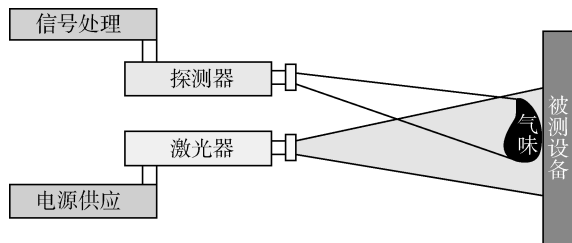


图 3 激光成像检测原理图

Fig. 3 The Principle of Laser Imaging Detection

## 2 紫外成像法

### 2.1 基本原理

紫外线的波长范围是 10 ~ 400 nm, 太阳光中也含有紫外线, 但由于大气中的臭氧会吸收波长小于 280 nm 的紫外线部分(该部分也被称为“太阳盲区”), 可以通过大气传输的只有波长为 315 ~ 400

nm 的紫外线。

高压设备因放电产生的紫外线波长一般在 280~400 nm 之间,有小部分在 230~280 nm 范围内,探测这部分波长的紫外线,可以作为判断设备是否产生放电的依据<sup>[9]</sup>。

常用的紫外电晕检测仪工作原理如图 4 所示:

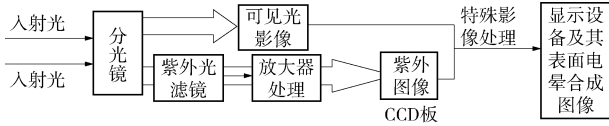


图 4 紫外电晕检测仪工作原理

Fig. 4 The Principle of Ultraviolet Corona Detecting Apparatus

紫外成像技术就是利用图 4 所示原理,接收设备放电时产生的紫外信号,经处理后与可见光影像合成,从而确定电的位置和强度,并为进一步评估设备的运行状况提供依据。

## 2.2 适用范围

紫外成像技术主要用来检测设备(如绝缘子、管母等)表面由于局部放电而形成的碳化通道和电蚀损<sup>[10-11]</sup>;还可用于检测导线外伤、高压设备的污染程度及绝缘缺陷等。某变电站 2 号主变 35 kV 侧 B 相管母存在放电缺陷时的紫外电晕检测图如图 5 所示<sup>[5]</sup>。

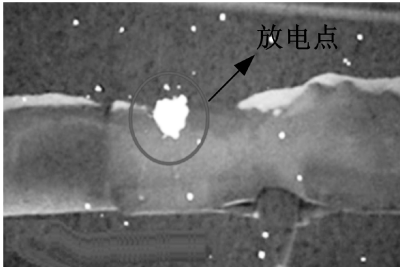


图 5 管母紫外电晕检测图

Fig. 5 Ultraviolet Corona Detection on Pipe Type Bus Bar

作为一种新型的无损带电检测手段,紫外检测目前基本上还只是处于定位分析阶段,国内外尚没有相关标准或机构能够对紫外放电检测做出定量要求。对于产生的电晕是否会影设备正常运行,或是否需要立即进行停电处理尚无法做出有效判断。因此对电晕放电强度检测进行进一步量化,并找出其与设备电晕放电不同阶段的对应关系,将会是紫外成像技术在今后的主要研究方向<sup>[9]</sup>。

紫外成像技术与红外成像技术两者可形成优势互补关系,紫外成像用来检测设备放电异常,红外成像一般用来检测设备发热异常,这两项技术的结合应用,将会大大提高高压设备故障点的全面检

测及诊断能力。

## 3 超声波检测

### 3.1 基本原理

超声波是一种机械振动波,当设备内部有局部放电发生时,在放电区域的分子间会产生剧烈的撞击,由于放电是一连串的脉冲形式,由此产生的压力波也是脉冲形式的,它含有各种频率的分量。当局部放电产生的超声波向四周传播时,会经过气、液、固等介质到达电气设备表面,因此检测此超声信号便可以判断设备内部是否有局部放电发生。

超声波信号的频率范围一般为数 kHz 到数 MHz(20~200 kHz)。测试时应在传感器测量面上涂抹超声耦合剂,以保证传感器与被测设备表面之间无气泡或空隙,从而减少超声信号的衰减,并提高测试的灵敏度。

### 3.2 适用范围

超声波检测技术适用于测量变压器、开关柜/环网柜、配电柜、电缆分支箱以及断路器(或 GIS)中的局部放电,对于电缆终端或接头等部件,其内部产生局部放电所导致的振动幅度较弱,一般难以利用超声波法对其进行有效测量。

超声波具有频率高、波长短、方向性强且能量集中等特点,因此容易进行定位。此外,超声波法检测抗电磁干扰性能好,它是目前除超高频法外最成熟的局部放电检测方法<sup>[12-13]</sup>。

## 4 超高频检测

### 4.1 基本原理

局部放电是一个复杂的物理过程,除了在上文中提到的声效应外,还伴随有电磁波信号的辐射,该信号频段范围为 300 MHz~1 GHz,在该频段范围内干扰信号较少。应用宽带高频天线传感器检测设备内部局部放电所激发的电磁波信号,再经过相应的数据处理及分析便可以判断设备的绝缘情况。根据超高频传感器的使用及安装位置不同,一般可以分为内置式和外置便携式。

超高频法检测技术的关键在于传感器技术及信号处理与模式识别<sup>[14]</sup>。超高频法对 GIS 等设备进行局部放电现场测量时,一般有时域测量和频域测量两种方法,时域法常用来定位,而频域法则对有无放电的定性检测更为有效<sup>[7,15]</sup>。

## 4.2 适用范围

超高频法局部放电检测对于颗粒、毛刺以及绝缘盆内部缺陷产生的放电较为灵敏<sup>[7]</sup>, 目前主要应用于 GIS、变压器以及开关柜等设备的局部放电检测<sup>[15-17]</sup>。

利用超高频传感器测量局部放电时容易受到设备内部和外部环境的一些干扰, 现场测试时应尽量避免诸如手机、无线电通讯信号等干扰, 为消除干扰信号对测量结果的影响, 可以尝试在不同时段对同一位置进行多次测量。

## 5 暂态地电压法

### 5.1 基本原理

暂态地电压(Transient Earth Voltage, TEV)是指设备内部局部放电产生的电磁波信号通过设备金属外壳至接地体间感应出能持续纳秒数量级的暂态电压脉冲。其产生的基本原理为: 当设备内部有局放发生时, 放电产生的电子由带电体向非带电体移动, 放电点所产生交变的电磁波信号, 会向两个方向传播, 由于趋肤效应的作用, 电磁波一般会集中在金属柜/箱体表面进行传播, 而无法直接穿透金属柜/箱体外壳。电磁波信号首先传到金属外壳的内表面时, 大部分信号会被金属外壳屏蔽, 而少部分信号会通过金属外壳断开或绝缘连接处、绝缘衬垫或缝隙等处向周围空间传播, 进而在设备接地的金属柜/箱体表面产生一个瞬时对地电压。通过测量该瞬时对地电压即可以检测设备内部的绝缘故障情况, 这种检测技术称为暂态地电压技术, 即 TEV 测量法<sup>[18]</sup>, 测试原理如图 6 所示。

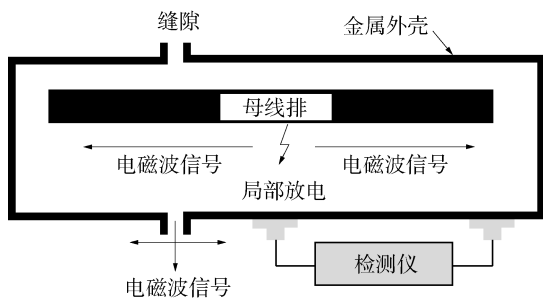


图 6 TEV 检测原理图

Fig. 6 The Principle of TEV Detection

### 5.2 适用范围

暂态地电压技术一般是用 TEV 传感器进行测量, 主要用在配电柜、开关柜/环网柜等配电设备

的内部放电测量。此外, 利用安装在设备金属外壳表面的两个 TEV 传感器所测量到的信号到达时差, 还可对放电点进行粗略的定位。暂态地电压幅值直接受设备电流的大小、频率等参数影响, 并与传播途径的衰减程度有关, 衰减量主要取决于放电点的位置、设备的内部结构以及配电设备金属外壳缝隙开口的大小。离放电点越接近, 传感器所检测的 TEV 值就越大。一般 TEV 信号与局部放电活动程度的关系可以用相对读数(dB/mV)方式来表征。

暂态地电压检测技术对于检测开关柜内部绝缘缺陷, 如金属尖端、绝缘气隙、悬浮电位等缺陷均有较好的测量效果<sup>[19]</sup>。

## 6 谐波电场法

### 6.1 基本原理

根据理论计算和实际测量, 无论是在交流还是直流电压作用下, 高压输电线路上的绝缘子可以等效视为夹在两金属电极之间的连续绝缘材料。在正常情况下, 电场强度沿绝缘子的纵向分布一般是一条光滑, 且呈两端强中间弱的“U”型曲线, 即靠近高压金具端场强最高, 随着向接地端移动且场强迅速降低, 在接近接地金具端又有所提高。由于复合绝缘子电场强度是电位沿长度的变化率, 因此, 当绝缘子串中存在零值或内绝缘导通性故障时, 缺陷处的纵向电场强度将突然降低, 电场分布曲线在相应的位置上有畸变, 画出的电场分布曲线也就不再平滑<sup>[20-21]</sup>, 如图 7 所示。

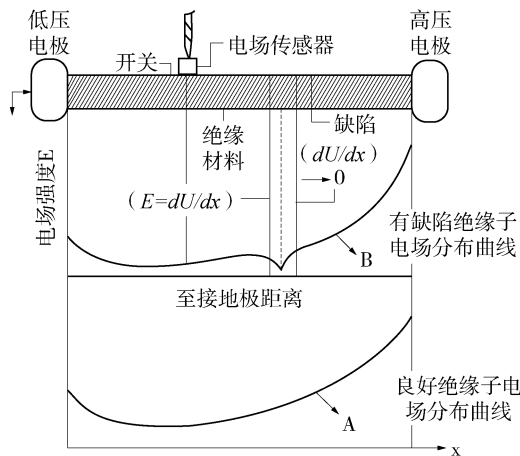


图 7 谐波电场法检测原理图

Fig. 7 The Principle of Harmonic Electric Field Methods

因此, 只要通过测量绝缘子的纵向电场分布,

便可找出绝缘子的内绝缘导通性缺陷的位置和大小。

## 6.2 适用范围

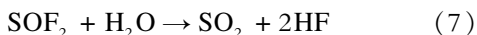
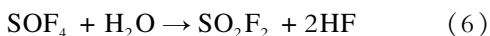
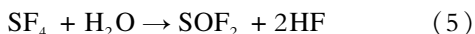
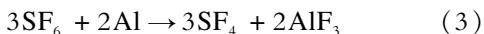
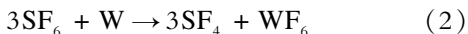
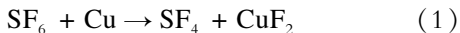
据现有文献报道,谐波电场法主要应用于合成绝缘子内绝缘局部缺陷的检测,且具有对天气等外界环境要求低,受干扰的影响较小,所用仪器较为简单等特点,所以可作为高压输电线路开展复合绝缘子带电检测的常规技术手段<sup>[21-22]</sup>。

## 7 化学成分分析法

### 7.1 基本原理

以 SF<sub>6</sub> 气体当绝缘介质的电气设备称为 SF<sub>6</sub> 电气设备。纯净的 SF<sub>6</sub> 气体是无色、无味、无毒、不燃的惰性气体,其自身分解温度大于 500 ℃,由于其具有极强的负电特性,加之具有密度大、分子半径大且移动速度慢等特点,因此具有很好的绝缘性能和灭弧性能。

SF<sub>6</sub> 电气设备内部有局部放电发生或有开断电弧高温作用时, SF<sub>6</sub> 气体与开关灭弧室内的触头材料铜(Cu)和钨(W)以及灭弧室结构材料铝(Al)等都会发生化学反应,其主要分解产物为 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SOF<sub>2</sub>(氟化亚硫酸)和 HF 等,相应的化学反应过程如式(1)~(7)所示。



由于 SO<sub>2</sub> 是一种水解产物,其多少取决于 SF<sub>6</sub> 气体中水份含量的大小。当 SF<sub>6</sub> 气体水份含量较大时(>500 μL/L), SO<sub>2</sub> 占主要成份;当水份含量较少(<100 μL/L)时, SOF<sub>2</sub> 占主要成份。

SF<sub>6</sub> 电气设备内部的绝缘材料,除了 SF<sub>6</sub> 气体外,还有部分固体绝缘材料,如热固形环氧树脂、聚酯尼龙、聚酯乙烯、聚四氟乙烯、绝缘纸、绝缘漆等,这些固体绝缘材料在高温条件下也会分解产生相应的特征气体,如表 2 所示:

综上所述,可以通过对分解物的主要成分的含量分析来判断设备内部故障,一般按 SO<sub>2</sub>、HF 为 SF<sub>6</sub> 分解特征组分, H<sub>2</sub>S 为热固形环氧树脂分解特

征组分, CO 是聚酯乙烯、绝缘纸和绝缘漆分解的特征组分来处理。该方法几乎不受任何外界环境因素的影响,因此是目前检测 SF<sub>6</sub> 类设备放电性缺陷最有效的方法<sup>[14, 17]</sup>。

表 2 SF<sub>6</sub> 电气设备固体绝缘材料热分解物

Table 2 Thermal Decomposition of Solid Insulation Materials for Electric Equipments

固体绝缘材料	分解温度	主要分解组分
热固形环氧树脂	>500℃	SO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、CO、NO、NO <sub>2</sub>
聚酯尼龙	聚酯材料 >130℃	SO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、CO
	尼龙 >500℃	
聚酯乙烯	>130℃	H <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub>
聚四氟乙烯	>500℃	CF <sub>4</sub> 、CO
绝缘纸	>130℃	CO、CO <sub>2</sub>
绝缘漆	>130℃	CO、CO <sub>2</sub>

### 7.2 适用范围

目前通过检测罐体内部 SF<sub>6</sub> 气体分解产物来判断设备故障的方法主要应用在依靠 SF<sub>6</sub> 作为绝缘介质的设备中,如 GIS、SF<sub>6</sub> 电流互感器、断路器等。

对于 SF<sub>6</sub> 分解产物的测定国内尚未制订相关标准,但 IEC 与 CIGRE 已有导则和推荐值。CIGRE 对总的分解物浓度的推荐值为 500~2 000 uL/L,作为是否超标的依据<sup>[14]</sup>。国家电网公司于 2010 年颁布的《电力设备带电检测技术规范》中规定:对于 GIS 本体或敞开式 SF<sub>6</sub> 断路器而言, SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的浓度均不大于 2.0 uL/L 时为正常,当 SO<sub>2</sub> 浓度 ≥ 5.0 uL/L 或 H<sub>2</sub>S 浓度 ≥ 5.0 uL/L 时认为设备存在异常。

## 8 结语

从目前的使用情况来看,带电检测的广泛开展,对于提升电网设备的运行维护水平起到了积极的作用,是开展电网设备状态检修和状态评价的重要依据。

然而,电网设备的带电检测工作是一项复杂的系统工程,目前各网省公司使用的设备厂家不尽统一,在检测标准及评判依据上缺乏统一规定,因此为达到国家电网公司目前对带电检测工作日益提高的各项要求,确保电网设备状态可控、在控,防止重要设备损坏事故的发生,建议各网省公司之间能够加强信息和技术共享,不断提升自身带电检测业

务能力, 并更好的服务于电网。

### 参考文献:

- [1] 邓万婷. 带电检测技术在湖北智能电网状态检修模式中的应用 [J]. 湖北电力, 2012, 34(Supp1): 29-31.  
DENG Wanting. Application of Live Detection Technology in Hubei Smart Grid Condition-based Maintenance Model [J]. Hubei Electric Power, 2012, 34(Supp1): 29-31.
- [2] 齐飞, 毛文奇, 何智强等. 带电检测技术在电网设备中的应用分析 [J]. 湖南电力, 2012, 32(1): 27-29.  
QI Fei, MAO Wenqi, HE Zhiqiang, et al. Application of Online Detection Technology on Power Grid Electrical Equipment [J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(1): 27-29.
- [3] 阚金辉. 红外测温技术在避雷器带电检测中的应用 [J]. 通信电源技术, 2011, 28(5): 68-69.  
KAN Jinhui. Application of Infrared Temperature-measuring for Arrester in Electric Field test [J]. Telecom Power Technology, 2011, 28(5): 68-69.
- [4] 范闻博, 盛万兴, 高媛, 等. 带电检测技术在配电设备状态检修中的应用研究 [J]. 电气应用, 2013, 32(17): 64-67, 80.  
FAN Wenbo, SHENG Wanxing, GAO Yuan, et al. Research on the Application of Live Detection Technology on Distribution Plant Condition-based Maintenance [J]. Electrotechnical Application, 2013, 31(17): 64-67, 80.
- [5] 国家电网公司生产技术部. 电网设备状态检测技术应用典型案例 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [6] 王少华, 叶自强, 梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状 [J]. 高压电器, 2011, 47(4): 84-90.  
WANG Shaohua, YE Ziqiang, MEI Bingxiao. Application Status of Online Monitoring and Live Detection Technologies of Transmission and Distribution Equipment in Electric Network [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 84-90.
- [7] 郗晓光, 张弛, 满玉岩, 等. 带电检测技术在 GIS 设备状态监测中的应用探讨 [J]. 天津电力技术, 2011(4): 25-26.  
XI Xiaoguang, ZHANG Chi, MAN Yuyan, et al. Application of Live Detection Technology on Condition Monitoring on GIS [J]. Tianjin Electric Power Technology, 2011(4): 25-26.
- [8] 李明, 程泓, 李昆, 等. SF<sub>6</sub> 气体激光成像检漏仪的应用及实例 [J]. 电气应用, 2011, 30(21): 74-76.  
LI Ming, CHENG Hong, LI Kun, et al. Application and Case of SF<sub>6</sub> Laser Imaging Detector [J]. Electrotechnical Application, 2011 30(21): 74-76.
- [9] 唐铁英, 许杰, 陈悦. 紫外成像技术在变电设备带电检测中的应用 [J]. 数字技术与应用, 2011 年第 5 期, 164-166.  
TANG Tieying, XU Ji, CHEN Yue. Application of Ultraviolet Imaging Detecting Apparatus on Substation Equipment Live Detection [J]. Digital Technology and Application, 2011, (5): 164-166.
- [10] 程养春, 李成榕, 沈小军等. 几种合成绝缘子带电检测方法的比较 [J]. 高电压技术, 2011, 47(12): 76-79, 85.  
CHENG Yangchun, LI Chengrong, SHEN Xiaojun, et al. Comparison Along Some Methods on Online Detecting of Composite Insulator [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 35-37.
- [11] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 97-98.  
DAI Libo. Application of Ultraviolet Imaging Technology on the Live Detection of High Voltage Equipments [J]. Automation Electric Power Systems, 2003, 27(20): 97-98.
- [12] 李涛, 杜晓平, 刘焕光. GIS 带电测试技术的现状与发展 [J]. 山东电力技术, 2009(2): 53-56.  
LI Tao, DU Xiaoping, LIU Huangang. Actuality and Perspective of Gas Insulated Switchgear On-line Detection Technology [J]. Shandong Electric Power Technology, 2009(2): 53-56.
- [13] 方庆, 邓维, 张国光, 等. 超声法在 GIS 设备带电测试及故障诊断中的应用 [J]. 湖南电力, 2012, 32(4): 21-23.  
FANG Qing, DENG Wei, ZHANG Guoguang, et al. Application of Ultrasound Method in Hot-line Test and Diagnosis of GIS [J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(4): 21-23.
- [14] 张小军. 带电检测技术在全封闭组合绝缘器故障监测中的应用 [J]. 新疆电力技术, 2012(1): 27-29.  
ZHANG Xiaojun. Application of Live Detection Technology on GIS Fault Monitoring [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2012(1): 27-29.
- [15] 郗晓光, 张弛, 满玉岩, 等. 如何利用带电检测新技术查找组合电器缺陷 [J]. 电工技术, 2011(5): 44-45, 62.  
XI Xiaoguang, ZHANG Chi, MAN Yuyan, et al. How to Use Live Detection Technology to Detect Fault on GIS [J]. Electrotechnology, 2011(5): 44-45, 62.
- [16] 孙利朋, 毛柳明, 刘兴文. SF<sub>6</sub> 绝缘电流互感器放电性缺陷带电检测方法的分析 [J]. 高压电器, 2011, 47(12): 76-79, 85.
- [17] 曾雄杰, 江健武, 侯俊. TEV 和 UHF 在 10 kV 开关柜带电检测中的应用 [J]. 高压电器, 2012, 48(1): 41-47.
- [18] 吴子坚. 浅谈开关柜局部放电带电检测定位技术 [J]. 电源技术应用, 2013(6): 361-365.
- [19] 郝金鹏. 暂态地电压测试技术在开关柜带电检测中的应用 [J]. 科技信息, 2013(20): 369-373.
- [20] 沈小军, 江秀臣, 曾奕, 等. 谐波电场法带电检测直流绝缘子 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 63-67.
- [21] 梁华贵, 孙晓宇, 孙建明, 等. 复合绝缘子带电检测装置研究与应用 [J]. 宿州学院学报, 2013, 28(6): 68-70.
- [22] 杜勇. ±800 kV 特高压直流合成绝缘子带电检测技术研究 [J]. 湖北电力, 2011, 35(6): 7-8, 20.