

# 电气设备 SF<sub>6</sub> 气体检漏技术研究与应用

林敏<sup>1</sup>, 杨景刚<sup>2</sup>, 贾勇勇<sup>2</sup>, 赵科<sup>2</sup>, 高山<sup>2</sup>, 张子阳<sup>1</sup>

(1.江苏省电力公司,江苏南京 210036;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

**摘要:**针对目前 SF<sub>6</sub> 气体泄漏现场检测工作效率不高的问题,从检测精度、实施方法、检测用时及现场检测效果等方面,论述了电气设备 SF<sub>6</sub> 气体检漏技术的现状,对比分析了各种检测技术的优缺点和适用范围。在此基础上重点阐述了基于窄带滤波技术的 SF<sub>6</sub> 气体红外成像检漏技术的检测原理及优缺点,并根据近几年的检测工作经验,详细阐述了红外成像检漏法在现场测试要点及推荐方法,最后通过一起案例对该方法进行了分析说明。

**关键词:** SF<sub>6</sub> 气体泄漏;窄带滤波技术;红外检漏技术;激光检漏技术

**中图分类号:** TM835

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2014)04-0027-03

SF<sub>6</sub> 气体是一种良好的高压设备绝缘介质,有很高的介质强度,具有极好绝缘性能和灭弧性能。采用 SF<sub>6</sub> 气体绝缘的电气设备目前已广泛应用于高压和超高压领域,它具有体积小、重量轻、容量大、成套速装、维修量少等优点,在电力系统中的应用越来越广泛。但运行中的 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备发生泄漏缺陷时,会产生多方面危害。SF<sub>6</sub> 是一种温室气体,泄漏后会污染环境,增加温室效应<sup>[1]</sup>;大量聚集在地面上的 SF<sub>6</sub> 气体会产生使人窒息危险;严重的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏会造成设备绝缘性能下降,最终可能会引起重大事故;部分 SF<sub>6</sub> 气体分解产物具有很强的毒性和腐蚀性,发生气体泄漏后会影响到靠近设备的运维人员安全;SF<sub>6</sub> 气体价格昂贵,大量泄漏导致设备运维成本增加。

## 1 传统 SF<sub>6</sub> 气体检漏技术

以往的 SF<sub>6</sub> 电力设备检漏手段主要集中在抽真空检漏法、包扎法和化学检测法。

(1) 抽真空检漏法。在设备未充入 SF<sub>6</sub> 气体前,对设备进行抽真空处理,并保持一段时间,观察其真空度降低的值是否满足设计要求。该方法仅用于出厂或大修后检漏,且精度较差,适用范围较小,需要大型真空泵及真空计,检漏所需时间较长,实施成本较大,目前已经很少采用了。

(2) 肥皂气泡法。在疑似泄漏点处涂抹肥皂水,观察是否有气泡产生,以此判断是否有泄漏点。该方法虽然不需要仪器,但其精度较差,无法评估泄漏量的大小,检漏所需时间较长,且检测范围有限,某些设备无法进行带电检测。

(3) 包扎法。在疑似泄漏点处使用塑料薄膜包扎,再使用 SF<sub>6</sub> 定量检测仪检测包扎部位的气体含量。该方法适用于定量检测,多用于出厂试验或大修后检测,检测结果受包扎是否严密的影响较大,且精

度较差。

(4) “卤素效应”检漏法。所谓“卤素效应”是指金属铂在一定温度下发生正离子发射,当遇到卤素气体时,正离子发射会急剧增加,相应地发射特性就是“卤素效应”。该检测方法既可用于 SF<sub>6</sub> 一般定性检漏也可以用于精确定量检漏。该方法不便于现场 SF<sub>6</sub> 气体泄漏点的精确定位,只能定位存在一定浓度的 SF<sub>6</sub> 气体区域,且工作量大。当出现微风时就不具备检漏条件,室外现场使用时受环境因素制约性大,性能不稳定。

(5) 热导检测器法。热导检测器的检测原理是基于不同组分与载气之间有不同的热导系数,当被检测组分通过热导池时,热敏元件温度发生变化,导致电阻发生变化,从而导致内部电桥不平衡,输出电压信号。该检测方法也可用于 SF<sub>6</sub> 一般定性检漏和精确定量检漏。其缺点与“卤素效应”检漏法相同,漏点检测不够直观,受现场环境制约,性能不稳定。

(6) 激光成像检漏法。该技术的工作原理是仪器主动发射一定波长的激光能量,泄漏出来的 SF<sub>6</sub> 吸收来自激光的能量,使其温度得以上升,产生跟周围环境更大的温差,然后通过红外探测器成像,原理如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

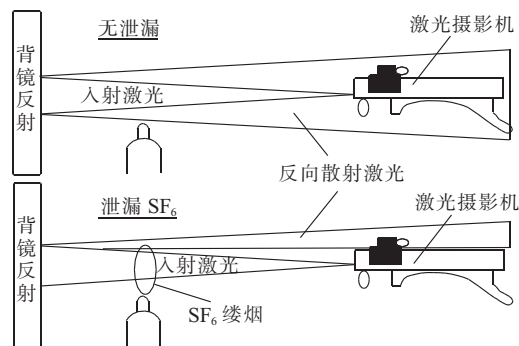


图 1 激光成像检漏技术原理示意图

传统 SF<sub>6</sub> 气体减口技术在检测 SF<sub>6</sub> 气体的泄漏方面实现突破,其检测结果也较为直观。但是激光成像检漏仪存在许多缺点,如激光发生器的限制,机身体积庞大且重,在现场拍摄及移动比较困难;激光器工作时耗

电较大,需要蓄电池或交流电源供电,很不方便;另外,激光成像检漏仪采用的是反向散射/吸收成像技术,对于一些没有背景的设备,某些 SF<sub>6</sub> 泄漏点是无法检测出来的,这也是该技术存在的一个缺憾。

上述几种方法各有利弊,在执行过程中受限制的因素较多,很难检查出泄漏点,同时工作量很大,泄漏点不直观,很多情况下还必须先对设备停电,然后检修人员手持检测设备逐步接触密封部位,寻找可能发生的泄漏部位。另外在有限的停电时间内,也不能马上进行处理,必须记录泄漏部位,然后准备好备品备件,等到下一次停电时再进行处理。这样就造成了处理 1 个设备的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏缺陷,需要设备至少停电 2 次的情况,检修工期长,效率低下。

鉴于上述 SF<sub>6</sub> 气体检漏技术的一些不足和缺陷,研究新的、可实现带电检测、远距离巡检 SF<sub>6</sub> 气体检漏技术就显得尤为重要。

## 2 SF<sub>6</sub> 气体红外成像检漏技术

研究表明<sup>[3]</sup>,一定浓度的 SF<sub>6</sub> 气体对红外线吸收极强,而空气吸收较弱,造成其两者的红外影像具有不同的特性,表现为泄漏点处的 SF<sub>6</sub> 气体与周围环境的温度有微小的差别, SF<sub>6</sub> 气体浓度越高这种温度差异越大,使得通常可见光无法观察的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏现象,在红外探测器及先进的红外探测技术的帮助下变得清晰可见。

研究表明, SF<sub>6</sub> 气体对红外光谱吸收性最强的波长为 10.6 μm,而一般的红外测温仪的工作波段比较宽,约为 0.7~14 μm,其检测到的干扰信号较多,无法直接用于 SF<sub>6</sub> 气体红外检漏工作。因此要实现红外检漏,关键技术是设计一款窄带滤波装置,将红外成像仪器的工作波段限制在 10.3~10.9 μm 的范围内,否则会因为其他气体对红外光谱的吸收而影响检测精度,且其温度分辨率不大于 0.025 °C,

目前较成熟的技术是利用制冷型量子阱探测技术(QWIP),检测由于 SF<sub>6</sub> 气体吸收红外光谱产生的微弱变化量,从而达到 SF<sub>6</sub> 气体泄露的目的,其检测工作原理如图 2 所示。

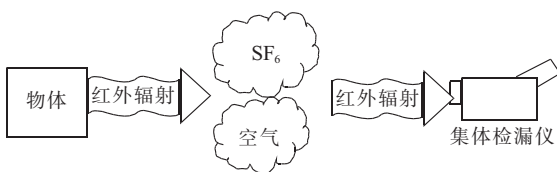


图 2 SF<sub>6</sub> 气体泄露红外可视化检漏原理示意图

红外成像检漏是最新的 SF<sub>6</sub> 检漏技术,较传统的泄漏检测技术有着不可比拟的优势,同时也能给实际工作中创造较大的经济效益及社会效益。

(1) 红外检漏技术可进行带电检测,大大减少因

停电检漏而带来的损失。

(2) 红外检漏技术可进行非接触、远距离检测,人员检测工作更安全。

(3) 红外检漏技术可实时捕捉微量 SF<sub>6</sub> 气体泄漏,并以图像显示出来,准确定位故障点,省时省力。

(4) 采用纯红外接收成像,不需要额外发射激光补助能量,因此仪器体积较小,现场操作简单,可在各种环境、天气和背景下进行检测。

(5) 现有红外检测装备大多同时具备红外和可见光成像功能,每种成像方式还同时具备视频和图像拍摄模式,便于后期进行更细致的分析。

(6) 红外检漏技术较其他检漏技术,现场工作用时较短,现场检测工作效率高。

另外,与传统检漏技术相比较,现有红外检漏技术及其装备也存在一定的劣势。即目前 SF<sub>6</sub> 气体泄漏红外检测装备价格昂贵,大面积推广的成本较高;进行 SF<sub>6</sub> 气体红外检漏时,要求工作人员具有一定的工作经验与技巧;红外检漏技术仅能实现定性检测,无法进行定量检漏,因此该方法仅可用于运行设备检测。

## 3 红外成像检漏现场测试要点

### 3.1 现场检漏工作顺序

根据近几年的工作经验,建议按照如下顺序进行 SF<sub>6</sub> 泄漏点查找:密度继电器→阀门及管道→法兰→本体→转角(GIS)及底座→空间狭小部位。

(1) 密度继电器作为 GIS 设备的辅助测试部件,其内部多为二次元件,在安装运行维护阶段往往会忽视对其进行密封性试验,而成为 SF<sub>6</sub> 气体泄漏的薄弱环节。

(2) SF<sub>6</sub> 气体管道多采用硬连接、铜焊接等工艺,在生产、安装环节很容易出现各类问题,如密封圈质量不佳、焊接处开裂等问题较为突出。

(3) 设备法兰(顶部、中间、底座)面较容易出现漏气现象,如在拧螺丝时力矩过大过小、未按照对角紧固、密封圈质量不佳等,均会出现异常泄漏。

(4) 如果在 GIS 壳体浇筑成型阶段或焊接时工艺控制不严,往往会出现沙眼或焊孔,在 GIS 设备出厂或交接验收时未及时发现,运行一段时间后就出现 SF<sub>6</sub> 气体泄漏现象。

(5) 由于空间窄小,导致某些部位难以用常规检测方法进行泄漏测试,往往在安装和交接中过程忽视这些部位的监测,应在运行阶段加强检测。

### 3.2 根据补气周期确定泄漏检测工作

常规红外可视化检漏仪具有一定的检测精度,并非对所有泄漏情况进行监测。根据近几年工作经验,建议结合 SF<sub>6</sub> 气体密度继电器的示数变化速度和补气周

期进行 SF<sub>6</sub> 泄漏检测。现有的红外检测仪一般可检测到补气周期在 6 个月以内的漏气缺陷,现场检测结果如图 3—5 所示。当补气周期超过 6 个月时,需要在夜间、无风、晴朗的环境下,采用高精度测试仪才能监测到微弱的漏气现象,现场检测结果如图 6、图 7 所示。



图 3 补气周期为 1 个月以内的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏成像图



图 4 补气周期为 1 至 3 个月的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏成像图



图 5 补气周期为 1 至 3 个月的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏成像图



图 6 补气周期为 6 至 12 个月的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏成像图



图 7 补气周期为 12 个月以上的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏成像图

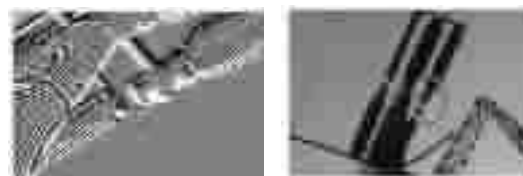
#### 4 案例分析

某 500 kV 变电站运行维护人员发现 5071 断路器 A 相、B 相相继出现低气压报警,补气周期大约为 2 个月,随即采用红外和激光成像检测法分别进行泄漏点定位。红外检漏结果显示,5071 断路器 A 相线路侧极柱和 B 相母线侧极柱合闸电阻法兰上部分别存在一个气体泄漏点,其中 B 相泄漏严重程度大于 A 相,如图 8、图 9 所示。激光检漏没有发现 SF<sub>6</sub> 气体泄漏点。



(a) SF<sub>6</sub> 气体泄漏点红外图像 (b) SF<sub>6</sub> 气体泄漏点

图 8 5071 断路器 B 相红外检漏



(a) SF<sub>6</sub> 气体泄漏点红外图像 (b) SF<sub>6</sub> 气体泄漏点

图 9 5071 断路器 A 相红外检漏

结合停电计划对该设备进行解体检修,发现 B 相断路器操作连杆箱存在砂眼,A 相断路器法兰密封胶圈脱离“密封槽”而存在不正常的挤压,设备运行一段时间后发生气体泄漏现象。随后更换连接箱和密封圈后泄漏现象消失。

#### 5 结束语

综上所述,相比于常规方法,红外可视化检漏技术具有可进行带电检测、可进行非接触、远距离检测、可实时捕捉微量 SF<sub>6</sub> 气体泄漏等优点。缺点则是无法进行定量检测,但作为一种设备运行巡检技术,检测、定位泄漏点是首先解决的问题,然后根据包扎法进行定量检测。因此,建议加大红外可视化检漏技术的发展和推广力度,建立现场检测导则、规范,加强技术交流,提高 SF<sub>6</sub> 气体检漏工作效率。

#### 参考文献:

- [1] 佟智勇,甄利,张远超. SF<sub>6</sub> 开关设备检漏及漏点处理现场实践[J]. 高压电器,2010,46(5):92-94.
- [2] 吴剑敏. 激光成像技术在电力系统中的应用[J]. 上海电力,2008,15(2):192-195.
- [3] 李鸣青. 提高 GIS 设备漏气处理成功率[J]. 山东电力技术,2010,17(6):27-30.

#### 作者简介:

林敏(1956),男,福建福州人,高级工程师,从事输变电设备运行维护技术分析和管理工作的;

杨景刚(1984),男,陕西咸阳人,工程师,从事变电设备状态评价及技术监督工作的;

贾勇勇(1986),男,江西九江人,工程师,从事变电设备状态评价工作的;

赵科(1984),男,江苏无锡人,工程师,从事变电设备的状态评价工作的;

高山(1974),男,江苏盐城人,高级工程师,从事变电设备状态评价工作的;

张子阳(1982),男,安徽蚌埠人,高级工程师,从事输变电设备状态分析及管理工作。

(下转第 33 页)



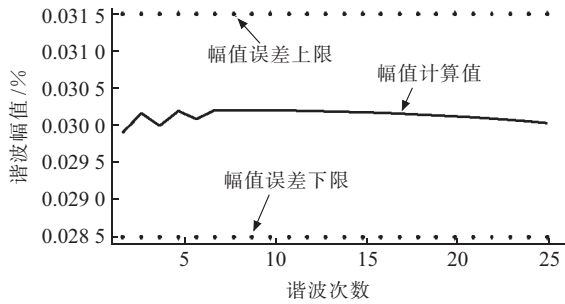


图 12 谐波电压有效值为基波有效值 3% 测量结果

实现每 10 周波同步采样误差小于 0.002%，远小于 IEC 规定的同步偏差限值，而且随着 FPGA 主频的不断提升，采样同步偏差越来越小；

(2) 提出根据矩形窗频谱进行简单的移位和加法运算，以达到加 Hanning 窗函数的谐波计算精度，相对传统时域加窗法运算速度更快。

由于该方法充分考虑了采样同步策略和算法实现的实时性，其同步偏差小于 IEC 限值一个数量级，其谐波计算精度满足国标 A 级标准。本文同时给出该方法具体实现的一种硬件配置方案，该方案将用于某种高精度电能质量分析仪的设计中。

#### 参考文献:

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京: 机

械工业出版社, 1998: 35-37.

[2] 吕润徐. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 185-187.

[3] General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, IEC Std[S]. 61000-4-7, 2002: 27.

[4] Power Quality Measurements Methods, Testing and Measurement Techniques, IEC Std[S]. 61000-4-30, 2002: 37.

[5] 方伟林, 王立功. 双速率同步采样法在交流测量中的应用[J]. 电测与仪表, 1997, 34(4): 21-23.

[6] 潘华, 黄纯, 王联群. 电力参数微机测量中采样周期的优化校正方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 71-75.

[7] 张志文, 王承林, 王伟, 等. 新型多周期同步和倍频锁相的频率跟踪技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 119-123.

[8] 李宇峰. 基于 TMS28335 的智能电网快速采样系统设计[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 35-39.

#### 作者简介:

李安娜(1991), 女, 江苏靖江人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析、电能质量;

黄家晖(1993), 男, 江苏靖江人, 本科, 研究方向为电网电能质量测量与控制;

熊杰锋(1976)男, 湖北武汉人, 博士后, 研究方向为功率理论、电能质量测量理论与电能质量测量仪设计。

## Power Harmonic Analysis Based on Multi-cycle Synchronous Sampling and Algebraic Operation in Spectrum

LI Anna<sup>1</sup>, HUANG Jiahui<sup>1</sup>, XIONG Jiefeng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211196, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

**Abstract:** A new method for harmonic measurement in power system is proposed, and the hardware schematic of implementing it is discussed. The proposed method is based on the multi-cycle synchronous sampling and simple algebraic operation in spectrum. The multi-cycle synchronous sampling technique guarantees that the synchronous sampling error with 10 cycles is under 0.03%. Then the harmonic components of the spectrum is obtained by simple algebraic operations, which enjoys the same accuracy as Hanning windowed DFT. The simulation results validate the proposed method, and the accuracy of the proposed method meets the national A-level standards.

**Key words:** multi-cycle synchronous sampling technique; Harmonic measurement; windowed DFT

(上接第 29 页)

## Research and Application on Detection Technology of SF<sub>6</sub> Leak in Electrical Equipment

LIN Min<sup>1</sup>, YANG Jinggang<sup>2</sup>, JIA Yongyong<sup>2</sup>, ZHAO Ke<sup>2</sup>, GAO Shan<sup>2</sup>, ZHANG Ziyang<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

**Abstract:** The efficiency of SF<sub>6</sub> leak detection is not satisfied currently. From the angles of detection accuracy, implementation methods, time-consuming of detection and detection results, this paper gives a brief review of the status of detection technology of electrical equipment SF<sub>6</sub> leak, and a comparative analysis of the advantages and disadvantages of various detection techniques is made. Based on the analysis, the detection principle and the advantages and disadvantages of infrared imaging technology for SF<sub>6</sub> leakage based on narrowband filter are described. With the application experience of the detection in recent years, the main points of infrared imaging detection and some detection methods are presented. Finally, the infrared imaging technology for SF<sub>6</sub> leakage is illustrated with a case analysis.

**Key words:** SF<sub>6</sub> leakage; Narrowband filtering; Leak detection with infrared; Leak detection with laser