

# 六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究

罗 洋,董汉彬,王嘉易,谢 茜

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

**摘 要:** 随着电力设备制造水平的快速提升,以六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体作为绝缘介质的高压电器具有绝缘和灭弧性能强、缩减设备占地面积等优点,在变电站中大量使用。然而,由于设备制造、环境等因素造成 $\text{SF}_6$ 气体泄漏,将直接影响高压电器的安全运行。 $\text{SF}_6$ 气体泄漏成像仪的检出灵敏度高且不用直接接触高压设备,是用于现场定位泄漏点的理想仪器。在探讨了 $\text{SF}_6$ 气体红外成像技术的基础上,重点研究了 $\text{SF}_6$ 气体泄漏成像与泄漏速率、检测距离和检测背景的关系,并对运行变电站的GIS设备开展了 $\text{SF}_6$ 气体泄漏现场检测,为技术人员现场检漏工作提供参考。

**关键词:** 六氟化硫;激光;红外辐射;背景;检漏

中图分类号:TM506 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2020)02-0063-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.013

## Research on Detection Methods of $\text{SF}_6$ Gas Leakage Imager

Luo Yang, Dong Hanbin, Wang Jiayi, Xie Qian

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** With the rapid improvement of power equipment manufacturing level, sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) as insulating medium for high-voltage electrical appliances is widely used in substation, which has the advantages of strong insulation and arc performance, reducing the occupied area of the equipment etc. However, leakage of  $\text{SF}_6$  gas resulting from equipment manufacturing, environment and other factors will directly affect the safe operation of high-voltage electrical appliances.  $\text{SF}_6$  gas leakage imager has high sensitivity of detection and can be used without contacting high voltage equipment directly, it is also the ideal instrument which can be used for locating the leakage points. The  $\text{SF}_6$  gas infrared imaging technology is discussed, which focuses on the relationship between  $\text{SF}_6$  gas leakage imaging and leak rate, detection distance as well as the background. Meanwhile, the field detection of  $\text{SF}_6$  gas leakage is carried out for GIS equipment in substation, which provides a reference for technical personnel.

**Key words:** sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ); laser light; infrared radiation; background; leakage detection

## 0 引 言

六氟化硫( $\text{SF}_6$ )气体无色、无味、无毒、不燃烧,具有优良的绝缘和灭弧性能,被广泛应用于断路器、气体绝缘金属封闭式组合电器(GIS)等高压电器中<sup>[1-2]</sup>。然而,由于设计施工不合理、制造安装不规范和自然环境恶劣等因素影响,造成高压电器出现尺寸偏移、裂纹、砂眼、受潮等缺陷而发生 $\text{SF}_6$ 气体泄漏。 $\text{SF}_6$ 气体泄漏不仅会给大气环境造成严重的污染,而且当泄漏量超过一定阈值时,高压设备的内部绝缘性能会下降,极易在高压设备中出现闪络或

击穿现象。因此,在结构复杂的高压电器中,如何正确使用泄漏检测仪器并快速准确地查找这种无色、无味气体的泄漏部位显得尤为重要。

下面针对 $\text{SF}_6$ 气体的红外吸收特性,采用 $\text{SF}_6$ 气体泄漏成像技术,重点开展了 $\text{SF}_6$ 气体泄漏成像情况与泄漏速率、检测距离和测试背景的关系研究。同时,在此研究基础上,对运行变电站的GIS设备开展了 $\text{SF}_6$ 气体泄漏现场检测,为技术人员开展现场快速带电查找 $\text{SF}_6$ 气体泄漏部位提供了应用参考。

## 1 $\text{SF}_6$ 气体红外吸收理论

根据能级跃迁理论,不同的气体分子对入射光具有

不同的选择吸收性,而SF<sub>6</sub>气体对以波长为10.55 μm为中心的红外光谱带具有很强的吸收作用<sup>[3]</sup>。图1为SF<sub>6</sub>气体红外吸收特性,明显看出10.55 μm波长的红外光在SF<sub>6</sub>气体中的透过率极低。因此,可以利用SF<sub>6</sub>气体对特定波长的红外光强吸收特性,在红外的光照射下区别是SF<sub>6</sub>气体还是空气,实现SF<sub>6</sub>气体的快速辨识。

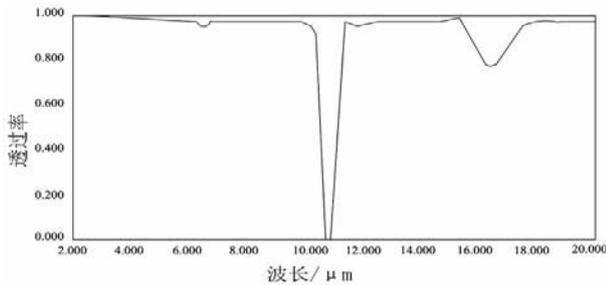


图1 SF<sub>6</sub>气体红外吸收特性

## 2 SF<sub>6</sub>气体泄漏检测方法

### 2.1 SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像技术

SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像检测技术是利用SF<sub>6</sub>气体对特定波长的红外光吸收性能较空气强的特性<sup>[4]</sup>,通过激光发射系统发出的红外光入射到被检测区域的物体上,并在物体表面上反射,其反射光沿着原来的光路重新返回到检测设备处。一部分特定波长的入射激光遇到泄漏的SF<sub>6</sub>气体,其能量会被吸收一部分;而另外一部分入射激光遇到的是空气,其能量相对SF<sub>6</sub>气体而言吸收较少。所以穿过SF<sub>6</sub>气体和空气的红外光遇到物体表面再反向散射回探测器的红外光能量存在差异,自然各自的激光成像也不同,由此可发现SF<sub>6</sub>气体泄漏。SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪可实现泄漏点的精确定位,但在使用时必须有反射背景,否则入射激光无法在物体表面反射并回到检测设备处成像。其检测原理如图2所示。

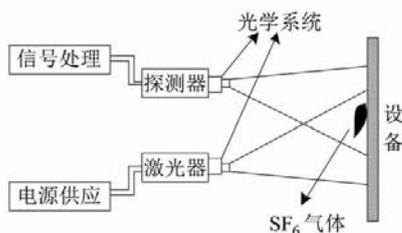


图2 SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像技术

### 2.2 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像技术

所有温度大于绝对零度(-273℃)的物体表面

都会发射出红外辐射,且SF<sub>6</sub>气体的红外吸收特性较空气而言极强,致使两者反应的红外影像不同<sup>[6]</sup>。因此,利用SF<sub>6</sub>气体和空气的红外吸收特性不同,将通常可见光下看不到的SF<sub>6</sub>气体泄漏,以红外图像的形式直观地反映出来,具有无需外加激光光源、无需检测背景、检测方便等优点。其检测原理如图3所示。

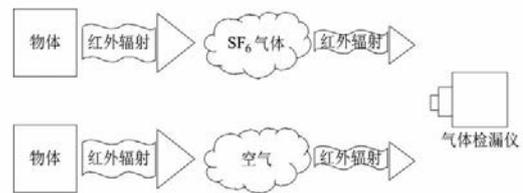


图3 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像技术

该项技术对SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪中红外焦平面探测器的性能要求十分高。根据制冷方式,红外焦平面探测器可分为制冷型和非制冷型,制冷型探测器的探测率通常能达到10<sup>11</sup> cmHz<sup>1/2</sup> W<sup>-1</sup>,而非制冷型探测器为10<sup>9</sup> cmHz<sup>1/2</sup> W<sup>-1</sup>,相差两个数量级<sup>[7]</sup>。因此,在快速、准确定位泄漏点中,制冷型探测器的SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪较非制冷型探测器的SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪具有明显优势,并且制冷型探测器的响应速度是微秒级,非制冷型探测器的响应速度是毫秒级。但制冷型探测器的SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪仍然有不足之处,就是启动时间较长,仪器需要用较长的时间进行自校正。

除此之外,无论是制冷型还是非制冷型红外焦平面探测器,其半导体材料的选取和探测元阵列数都是影响探测效果的关键因素。例如,即便同属于制冷型的量子阱红外探测器,也可分为光导型量子阱材料(GaAs/AlGaAs)和光伏型量子阱材料(InAs/InGaSb、InAs/InAsSb)等类型,其探测波长范围、探测率和温度灵敏度等参数各自也会不同。

### 2.3 SF<sub>6</sub>气体泄漏检测方法对比

传统的高压电气设备SF<sub>6</sub>气体泄漏检测方法主要有:皂水法、包扎法及使用手持式普通检漏仪等<sup>[8]</sup>,通常需要接触设备或靠近漏点,对于敞开式断路器或GIS的出线套管这些部位仍需要设备停电进行,并且技术人员需要根据气室压力是否有明显下降,对泄漏点所在范围有初步的判断后才便于实施。各检测方法特性对比见表1。

表1 检测方法特性对比

检测方法	检测形式	检测距离	精度	是否断电	背景
皂水法	被动	近程	定性	否	无需
包扎法	被动	近程	定性	是	无需
卤化物检测	主动	近程	极低	是	无需
真空监测	被动	近程	定性	是	无需
激光成像	主动	约100 m	定性	否	需要
红外辐射成像	被动	约50 m	定性	否	无需

SF<sub>6</sub>气体泄漏激光、红外辐射成像仪相比传统方法虽有较为突出的优点,但在全站普测应用中,其工作量仍然较大。因此,仍然建议首先观察气室压力,且发现压力有明显下降后,在该气室范围内开展SF<sub>6</sub>气体泄漏激光或红外辐射成像检测。

### 3 SF<sub>6</sub>气体泄漏成像检测分析

#### 3.1 实验室检测分析

目前,SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪已在高压电器泄漏点的查找工作中逐步应用,但SF<sub>6</sub>气体泄漏速率、检测距离和检测背景对泄漏成像效果的影响情况并不是十分清楚。为此,在实验室模拟出不同泄漏速率的SF<sub>6</sub>气体泄漏,使用SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪和SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(选用制冷型探测器),开展检测距离分别为1 m和5 m、检测背景分别为白色墙体和金属面板的泄漏检测试验。

##### 1) 白色墙体为检测背景

以白色墙体为检测背景,分别在检测距离为1 m和5 m的情况下,调节模拟泄漏源的泄漏速率,其成像效果见表2。

表2 白色墙体为检测背景下的成像效果

泄漏速率 ( $\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	红外辐射成像效果		红外激光成像效果	
	1 m	5 m	1 m	5 m
4.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
3.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
2.0	清晰	较清晰	清晰	不可见
1.5	清晰	不可见	清晰	不可见
1.0	清晰	不可见	较清晰	不可见

由表2可知,以白色墙体为背景,在检测距离1 m的检出情况优于5 m,并且气体泄漏速率越大越易

检出。无论1 m还是5 m距离,当泄漏速率较小,低于2  $\mu\text{L}/\text{s}$ 时,SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出效果比SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪好。

##### 2) 金属面板为检测背景

以金属面板为检测背景,分别在检测距离为1 m和5 m的情况下,调节模拟泄漏源的泄漏速率,其成像效果见表3。

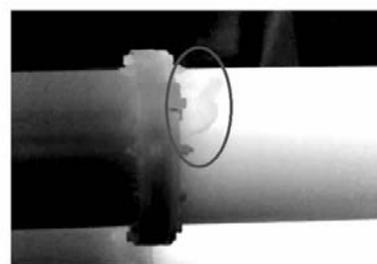
表3 金属面板为检测背景下的成像效果

泄漏速率 ( $\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	红外辐射成像效果		红外激光成像效果	
	1 m	5 m	1 m	5 m
4.0	清晰	较清晰	清晰	较清晰
3.0	清晰	较清晰	清晰	不可见
2.0	清晰	不可见	清晰	不可见
1.5	清晰	不可见	清晰	不可见
1.0	清晰	不可见	清晰	不可见

由表3可知,以金属面板为背景,在检测距离1 m的检出情况优于5 m,并且气体泄漏速率越大越易检出。在5 m距离情况下,当泄漏速率较小,低于3  $\mu\text{L}/\text{s}$ 时,SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出效果比SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪好。

#### 3.2 变电站检测应用情况

某220 kV变电站220 kV GIS设备A相穿墙气室,补气周期为半年一次,分别使用SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪和SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)在距离泄漏点2 m处检测,其成像效果如图4所示。



(a) SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪检测



(b) SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪检测

图4 变电站SF<sub>6</sub>气体泄漏检测情况

由图4可知,在距离泄漏点2 m处检测, SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪和 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出清晰度差异不大,但呈现效果仍然是 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)较优。

## 4 结 语

前面利用激光成像仪和红外辐射成像仪开展了 SF<sub>6</sub>气体泄漏速率、检测距离和检测背景对泄漏成像效果的影响分析,发现检测仪器距离泄漏源的距离越近越容易检出泄漏;在相同距离、相同背景的情况下,泄漏速率越大越容易检出泄漏;白色墙体为背景的检出效果好于金属面板。

对于变电站 GIS 母线、开关等靠近地面安装的气室,较容易找到 GIS 壳体为背景的检测角度且可实现 1 m 左右的近距离检测,则 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)与 SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪均可较好使用;对于变电站 GIS 出线套管、换流站 GIL 及其他远离地面安装的气室,较难通过调整检测角度找到反射物体且需要远距离(一般大于 2 m)检测,则 SF<sub>6</sub>气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)成像效果比 SF<sub>6</sub>气体泄漏激光成像仪好。

## 参考文献

- [1] 李玉海,路自强,李后顺,等. 红外成像检漏技术在青海电网 SF<sub>6</sub>电气设备泄漏检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(12):130-134.
- [2] 林敏,杨景刚,贾勇勇,等. 电气设备 SF<sub>6</sub>气体检漏技术研究与应用[J]. 江苏电机工程,2014,33(4):27-29.
- [3] 叶涛,尹建波,王瑞军. 红外成像技术在 SF<sub>6</sub>断路器气体检漏中应用[J]. 内蒙古电力技术,2010,28(4):31-33.
- [4] 弓艳朋,毕建刚,杨圆,等. SF<sub>6</sub>气体泄漏成像仪校验技术研究[J]. 电测与仪表,2014,51(14):92-95.
- [5] 郭利民. 基于红外吸收原理 SF<sub>6</sub>气体在线检漏仪的设计[D]. 郑州: 郑州大学,2011.
- [6] 高树国,郑爱全,耿江海,等. 应用激光成像技术检测 SF<sub>6</sub>气体泄漏[J]. 高压电器,2010,46(3):103-105.
- [7] 喻新发,闫荣鑫,钟亮,等. 航天器红外成像检漏方法研究[J]. 航天器环境工程,2012,29(2):220-225.
- [8] 胡伟涛,隋少臣,韩建波. 红外检漏成像仪在 SF<sub>6</sub>电气设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2010,46(10):90-93.

### 作者简介:

罗 洋(1986), 硕士, 高级工程师, 从事高电压技术研究。

(收稿日期: 2019-12-11)

(上接第58页)

- [2] 张勇,陈建斌,余畅,等. 联网后海南电网与主网严重故障下的相互影响及解列措施研究[J]. 南方电网技术,2009,3(5):50-53.
- [3] 应启良,徐晓峰,孙建生. 海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 张栋国. 电缆故障分析与测试[M]. 北京: 中国电力出版社,2005.
- [5] Zubiaga M, Abad G, Barrena J A, et al. Spectral Analysis of A Transmission System Based on AC Submarine Cables for an Offshore Wind Farm [C] //Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE,2010.
- [6] Bui - Van Q, Beaulieu G, Huynh H, et al. Overvoltage Studies for the St. Lawrence River 500 - kV DC Cable Crossing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(3):1205-1215.
- [7] Henriksen T, Gustavsen B, Balog G, et al. Maximum

Lightning Overvoltage along A Cable Protected by Surge Arresters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):859-866.

- [8] 绝缘配合 第2部分: 使用导则: GB/T 311.2-2013 [S],2013.
- [9] Insulation co-ordination - Part 2: Application guide: IEC 60071-2-1996 [S],1996.
- [10] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064-2014 [S],2014.
- [11] 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则: DL/T 804-2014 [S],2014.
- [12] 李炬添. 海上风电场海底高压电缆雷电过电压研究[J]. 电工技术,2012(12):45-46.
- [13] 王梅义,吴竞昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 中国电力出版社,1995.

### 作者简介:

李浩原(1987), 博士, 工程师, 从事输变电工程设计。

(收稿日期: 2019-12-05)