

基于TDLAS的SF₆断路器湿度在线监测技术的应用研究

基于TDLAS气体测试原理,针对SF₆电气设备中的智能化需求,设计并研制了一套湿度检测试验装置,并在SF₆断路器中进行了湿度测试。该装置在SF₆断路器中测得明显的TDLAS信号。测试结果表明,TDLAS技术具备安全、快速响应的特性。为TDLAS湿度检测技术在SF₆智能电气设备中的应用提供了技术支持。

陈奕航^{1,2} 鞠 昱¹ 李彦林³ 韩 立¹ / 1.中国科学院电工研究所
2.中国科学院大学 3.北京航天易联科技发展有限公司

0 引言

SF₆气体具有极高的灭弧性能和绝缘强度,作为绝缘、灭弧介质在超高压输变电设备及气体绝缘开关中被广泛应用^[1]。但是,SF₆电气设备中的气体都会不可避免地含有微量水分,主要来源包括:SF₆新气中的残留水分^[2];制造、运输、安装和检修过程中的渗透;有机绝缘材料^[3]以及吸附剂^[4]自带;通过密封件渗入外界水分。当SF₆气体电气设备内部的水分含量达到一定程度后,将造成严重的后果:SF₆分解物与水分反应生成腐蚀性的酸性物质、有毒物质;大大降低设备的绝缘性;降低开关力学性能;影响开关开断性能^[5]。

为了确保SF₆电气设备的安全可靠运行,使电力系统有更高的连续可靠运行能力,对SF₆电力设备性能的在线状态监测与故障报警,已经成为智能电网发展中的重要研究方向。当变电站无人值守,对电气设备的遥控遥测更是必不可少,在线监测SF₆电气设备中的湿度含量

具有重要的实际应用价值^[6-7]。

1 SF₆湿度检测方法概述及TDLAS检测原理

目前电力系统采用的SF₆湿度检测方法有重量法、电解法、露点法和光谱吸收法等^[5]。其中露点法是最为常用的方法,主要是采用便携式露点仪进行现场检测,但是露点法存在以下几点缺陷:

1) 离线测量。电力部门对于SF₆电气设备中的微水含量检测频次为一年1~2次,不能及时反映设备运行的状态,显然难以满足智能化电网实时监测的需求。

2) 工作温度受限。露点仪的工作环境温度为-10~+50℃,且测量误差会随着温度的改变而变化。

3) 检测流程时间长、污染大气。完成单次测量耗时长达10 min甚至更长。排放SF₆约为8 L,SF₆气体是一种温室气体,需要处理后才能排入大气中。

4) 检测成本高。露点仪本身价格不菲,加上配套的人员、车辆和设备,每个变电站每年的检测费用在10万元左右。

可调谐半导体激光吸收光谱技术(简称TDLAS)是激光光谱吸收法的一种,是利用激光能量被气体分子“选频”吸收形成吸收光谱的原理来测量气体浓度的一种技术。具体来说,通过控制半导体激光器发射的激光波长与气体的某个特征波长重合,被测气体就会对激光进行吸收,导致激光强度产生衰减。气体含量越大,吸收越强烈。因此测量激光强度



陈奕航/博士研究生

关键词/Keywords

TDLAS ·
SF₆断路器 ·
湿度测量 ·
在线检测 ·

国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030112)

衰减信息就可以获得被测气体的浓度。

入射光强和出射光强的关系可用Lambert-Beer定律描述

$$I(v) = I_0(v) \exp[-\alpha(v)cl] \quad (1)$$

式中, $I(v)$ 为出射光强; $I_0(v)$ 为入射光强; $\alpha(v)$ 为气体吸收系数; c 为气体浓度; l 为吸收长度。

当激光的驱动电流受到频率为 ω 的频率调制时, 激光器的输出波长和光强都受到调制。

$$v = v_c + a \sin \omega t \quad (2)$$

$$I(t) = I_0(1 + \eta \sin \omega t) \quad (3)$$

式中, v_c 为激光的中心频率; a 为频率调制幅度; η 为光强调制深度。

由吸收系数定义可知

$$\alpha(v) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{(v - v_0)^2}{\gamma_L^2}} \quad (4)$$

式中, α_0 为气体吸收峰中心位置; γ_L 为洛伦兹线形的半高半宽。

在弱吸收条件下, 有 $\alpha(v)cl \ll 1$ 。在吸收峰中心位置, 有 $v = v_0$, 令 $m = \alpha/\gamma_L$, 则式 (3) 可以写为

$$I(t) = I_0 + I_0 \eta \sin \omega t - \frac{I_0 \alpha_0 n l}{1 + m^2 \sin^2 \omega t} - \frac{\alpha_0 \eta \sin \omega t n l}{1 + m^2 \sin^2 \omega t} \quad (5)$$

忽略式 (5) 第四项的二阶小量, 将式 (5) 进行傅里叶展开, 可以得到基波分量 I_f 与二次谐波分量 I_{2f} , 两者比值为

$$\frac{I_{2f}(v_0)}{I_f(v_0)} = \frac{2(2 + m^2 - 2\sqrt{1 + m^2})}{\eta m^2 \sqrt{1 + m^2}} \alpha_0 c l = f(m) \alpha_0 c l \quad (6)$$

可以看到, 两者的比值与光强无关, 实际测试中通过这个比值来确定待测气体浓度。

$$c = \frac{1}{f(m) \alpha_0 l} \frac{I_{2f}(v_0)}{I_f(v_0)} \quad (7)$$

TDLAS 气体浓度传感器可以用于湿度检测。湿度实际上是水分子在大气中浓度的表征, 因此检测到大气中的水分子的浓度就可以给出绝对湿度, 再结合大气温度就可以得到大气的相对湿度。在湿度检测领域, 基于 TDLAS 的气体传感技术的优势十分明显: 检测范围广, 无论在低温干燥地区还是高温高湿地区都可以应用; 无高湿脱湿慢问题; TDLAS 准确度高、响应快且成本低,

可以弥补露点仪在响应速度和价格成本上的不足。

2 TDLAS 湿度监测装置设计

2.1 特征吸收峰的选择

水汽在近红外波段有相当丰富的吸收谱线, 1~2 μm 范围内的水汽吸收谱如图1所示。

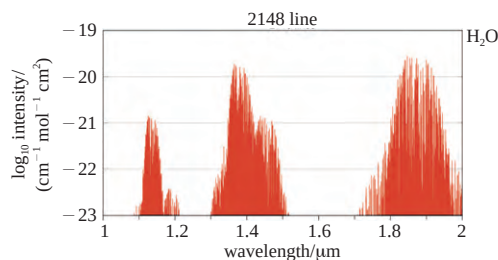


图1 1~2 μm 水汽吸收谱线图

吸收峰的选择, 除了考虑吸收谱线强度之外, 还需要避开背景气的干扰。对于电气设备而言, 水汽检测的背景气包括绝缘气体 SF_6 以及残留或渗透入内的空气。空气中的主要成分有如 O_2 , N_2 和 CO_2 等, 其在近红外波段 (1~2 μm) 的吸收强度如图2所示。

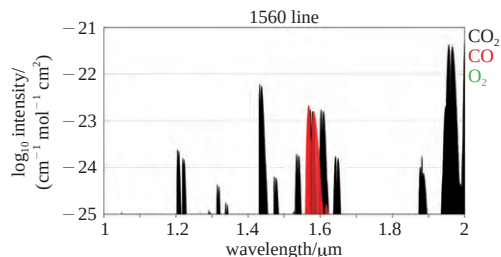


图2 1~2 μm 背景气中常见组分吸收谱线图

SF_6 与氮气在该波段没有显著吸收峰, 因此在图2中没有画出。综合考虑特征谱线吸收强度、避开大气组分的吸收谱线以及通信波段和对应的光学器件等因素, 选择 1 370 nm 作为水汽检测的特征吸收峰。

2.2 激光器的选择

由于工作温度直接影响激光器的输出波长, 对 TDLAS 的检测结果具有很大影响。在调制驱动电流调制波长的系统结构中, 保证温度恒定十分重要。因此, 一般选择内部封装了制冷器的 DFB 激光器作为 TDLAS 的激光光源, 并且外接硬件闭环反馈控制激光器的工作温度, 控制示意图如图3

所示。

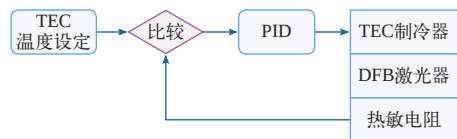


图3 激光器温度闭环控制示意图

2.3 气室设计与装配

北开电气集团公司（以下简称北开）所提供的SF₆断路器，工作时内部SF₆气压达0.4 MPa，因此设计了如图4所示的耐高压密闭气室。气室由外壳和内芯两部分组成，如图5所示。内芯包含耐高压光法兰、测量室等，外壳是为了防止设备中的SF₆气体泄漏。气室通过北开提供的转接件安装于充满SF₆气体的电气设备进气口处，图6所示为转接件。



图4 耐高压密闭气室外观



图5 外壳与内芯

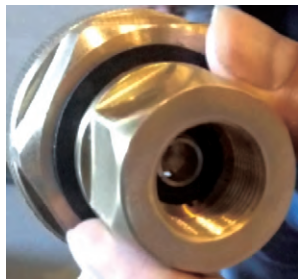


图6 转接件

采用包扎法对气室及转接件进行气密性检测：用塑料袋包扎24 h后，测量包扎袋中的SF₆气体含量，如图7所示。三次测量结果为： 0×10^{-6} ， 0.3×10^{-6} ， 0.5×10^{-6} ，表明气室及转接件气密性良好。



图7 气密性检测

3 TDLAS湿度测量装置与试验结果

DFB激光器发出波长为1 370 nm的激光，经过控制电路调制后成为在一定波长范围内的扫描光束。光束通过光环形器、耐压光法兰纵向轴线射入测量室。测量室中的气体通过转接件与SF₆断路器内部直接连通，产生气体交换，测量室中的水汽分子吸收了入射激光的部分能量。此时，通过光环形器的另一端就能检测到出射光强信号。光电探测器将减弱了的出射光强信号，转化为电信号，通过信号处理电路反馈至计算机。在计算机上可以观察到二次谐波比基波的测试信号。这就是TDLAS湿度检测装置的工作流程，示意图如图8所示。

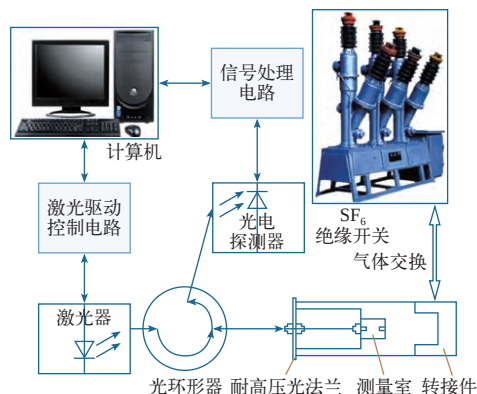


图8 TDLAS湿度测量装置结构示意图

按图8依次连接好装置中各个部分，进行第一组20次测试。发现测得信号存在严重的干涉现象，测试的平均结果如图9所示。

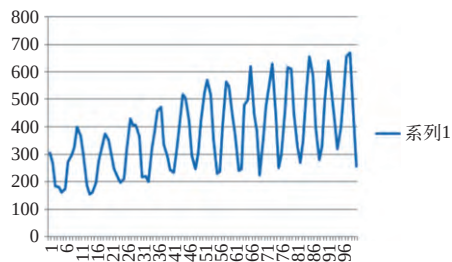


图9 存在严重干涉现象的测量信号

经过分析，其原因在于耐高压光法兰内含有一段光纤纤芯，在纤芯的两头产生了反射，对原本的光路造成了影响。因此，在光纤头与耐压光

法兰的连接中加入了自行配置的匹配液，用于消除了界面的影响。第二组20次测量是为了查看匹配液的效果，所以取样为大气，测试的平均结果如图10所示。

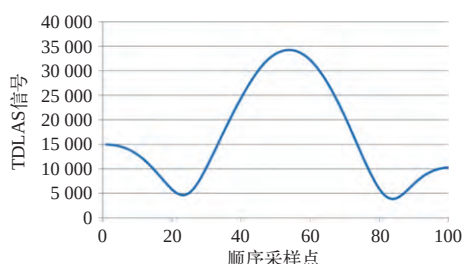


图10 加入匹配液后测量大气中绝对湿度的信号

由图10可以看出，干涉现象消失，测得的曲线光滑度较好，有明显的吸收信号，匹配液的使用达到预期效果。完成单次测量耗时约1 s。下面用加入匹配液后的气室，对SF₆断路器中的气体取样，进行第三组20次测试，平均结果如图11所示。

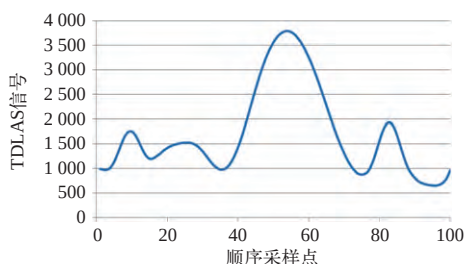


图11 加入匹配液后测量SF₆断路器中绝对湿度的信号

由图11可以观察到TDLAS信号。经检查，发现将耐高压密封气室与SF₆断路器相连后，入射光强降低为相连前的1/10，这说明接入后，光路的耦合情况变差。

采用第三组测试的试验方法，对SF₆断路器中的绝对湿度进行了多次测量，测量结果如图12所示。

TDLAS湿度检测装置常温常压下的标定过程已经提前在实验室完成。测试过程中，SF₆断路器安全稳定运行。测试过程中发现，显示值80 ppmv以上时记录的信号比较正常，信噪比较好；显示值在70 ppmv附近时，信号噪声较大。

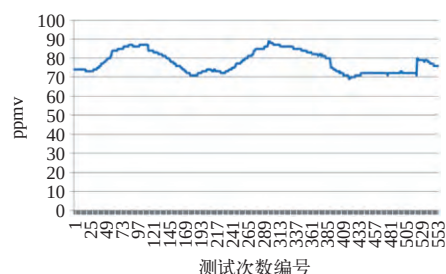


图12 TDLAS湿度检测装置测得SF₆断路器中的绝对湿度

4 结束语

本文基于TDLAS气体测试原理，针对SF₆电气设备的智能化需求，设计并研制了一套湿度检测试验装置，在北开提供的SF₆断路器进行了测试。该装置在SF₆断路器中测得明显的TDLAS信号。测试结果表明，TDLAS技术具备安全、快速响应的特性。为TDLAS湿度检测技术在SF₆电气设备中的应用提供了技术支持。下一步可以根据具体的电气设备需求，进行压力修正，改善测量气室在工作条件下的光路耦合，即可达到电力系统对于湿度在线监测的需求，推动SF₆电气设备智能化的发展。

参考文献

- [1] 李森. 六氟化硫中微水检测技术进展 [J]. 天津电力技术, 2010 (1).
- [2] 张凤清. SF₆电气设备中气体水分的测试和干燥处理 [J]. 中国科技博览, 2015 (12): 60-61.
- [3] 王永强. 高压电气设备中SF₆的水分控制与处理 [J]. 电气制造, 2009, 1 (3): 62-63.
- [4] 王永强, 程仲林. 关于SF₆气体绝缘组合电器中微水问题的研究 [J]. 电力情报, 2001 (2): 40-43.
- [5] 陈小刚. GIS设备中SF₆的微水含量检测系统的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [6] DL/T 259—2012 六氟化硫气体密度继电器校验规程 [S].
- [7] 王润华. SF₆气体监测系统在GIS组合电器中的应用 [J]. 上海电力, 2007, 19 (5): 536-538.

(收稿日期: 2016-01-08) EA