

基于光纤技术的 SF₆ 断路器气室微水在线检测方法研究^①

孙银山^② 钟建英 王 振 尹军华 张一茗

(平高集团有限公司 平顶山 467001)

摘 要 为确保 SF₆ 断路器安全工作,基于光纤传感技术并采用红外光谱吸收法对 SF₆ 断路器气室的微水含量(判断 SF₆ 断路器是否安全运行的主要指标)进行在线检测。根据水汽的特征吸收光谱设计了传感系统,并采用差分系统对信号进行处理,以减小环境因素对系统检测精度的影响。此方法可实现 SF₆ 断路器气室微水含量的准确在线检测,提高 SF₆ 断路器的可靠性和安全性。并且该系统采用光纤进行光的传输,具有防强电磁干扰的能力。

关键词 SF₆ 断路器,微水检测,光谱吸收法,光纤传感,在线检测

0 引 言

目前,六氟化硫(SF₆)断路器是应用最广泛的一种高压断路器,而 SF₆ 中的水分含量是影响 SF₆ 断路器绝缘性能的一个重要因素。SF₆ 气体的微水含量是判断 SF₆ 断路器能否安全运行的主要指标之一。当 SF₆ 气体中的水分含量超标时,过量的水蒸汽在低温下可能凝结成水附着在绝缘件表面,从而潜伏着发生绝缘事故的危险^[1,2],而且当微水含量超标时,SF₆ 气体会发生化学反应,分解出新的分解物,这些分解物不仅会对高压断路器产生腐蚀作用,还会对人身安全带来威胁,所以,对 SF₆ 气体含水量有比较严格的要求。对于 SF₆ 断路器气室的微水含量(体积比)的规定见表 1^[3,4]。通过对微水含量的检测,可以实现 SF₆ 高压断路器的运行安全性和可靠性评估^[5,6]。目前,对于 SF₆ 气体中微水的测量,常用的方法有镜面法、重量法、库仑电解法等,镜面法、重量法对环境条件要求比较高,测量的时间长,而且怕污染,一般只用作仲裁分析;库仑电解法测量时耗气量较大、怕污染,测量的时间长,使用时设备要提前一天通电通气干燥,而且重复性差。这些方法在检测时均存在较大的人为误差,并且均为离线检测,不能及时发现设备的潜在隐患。因此开发一种 SF₆ 气体的微水在线检测系统具有重要意义。

表 1 SF₆ 断路器气室含水量标准

SF ₆ 状态	IEC 标准	我国标准
SF ₆ 新气体	小于 122μL/L	小于 65μL/L
SF ₆ 设备运行	不超过厂家规定	投运行小于 150μL/L 运行中小于 300μL/L

本研究基于光纤传感技术并采用红外光谱吸收法对 SF₆ 断路器气室的微水含量进行在线检测。根据水汽的特征吸收光谱设计传感系统,并采用差分系统对信号进行处理,此方法可实现 SF₆ 断路器气室微水含量的准确在线检测,提高 SF₆ 断路器的可靠性和安全性。

1 SF₆ 断路器气室微水在线检测技术原理

每一种元素的原子不仅可以发射一系列特征谱线,也可以吸收与发射线波长相同的特征谱线。当光源发射的某一特征波长的光通过原子蒸气时,即入射辐射的频率等于原子中的电子由基态跃迁到较高能态所需要的能量频率时,原子中的外层电子将选择性地吸收其同种元素所发射的特征谱线,使入射光减弱^[7,8]。利用这一特性可以通过气体吸收光谱鉴别气体体积分数。

水汽的吸收光谱如图 1 所示,从图中可以看到,水汽在波数为 5300cm⁻¹ 左右、7300cm⁻¹ 左右、

① 863 计划(2011AA05A121)资助项目。
② 男,1980 年生,博士,工程师;研究方向:电器智能化,智能开关设备及其关键技术等;联系人, E-mail: sunyinshan0822@126.com
(收稿日期:2014-02-19)

8800 cm^{-1} 左右、10600 cm^{-1} 左右都有吸收峰。对比这几个吸收峰,在波数为 5300 cm^{-1} (对应的波长为 1890nm)和 7300 cm^{-1} (对应的波长为 1370nm)的吸收峰较强。但 1890nm 的波长不在光纤传输的低损耗窗口范围内,因此,在检测系统中,选择 1370nm 为系统的工作波长。而 SF_6 气体的光波吸收峰在 10.55 μm 左右,因此,1370nm 的光波作为检测 SF_6 气体的微水含量光波是可行的。

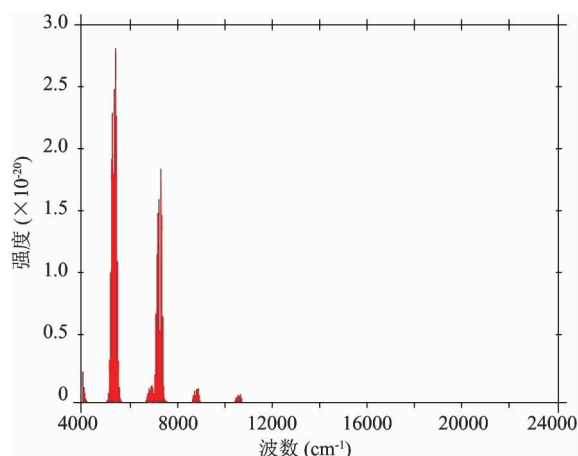


图1 水汽的吸收光谱

根据大气传输理论中的本征谱带吸收原理,即朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,也称为光的吸收定律,一束单色光通过某一气体后,由于气体吸收了一部分光能,光的强度就要减弱,光强减弱量的大小与气体的浓度和气体的厚度成正比,因此,在气体厚度不变的情况下,可以通过检测光强来检测气体的浓度^[9,10]。朗伯-比尔定律适用于所有的电磁辐射和所有的吸光物质,包括气体、固体、液体、分子、原子和离子。朗伯-比尔定律可表述为如下的数学形式:

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)CL] \quad (1)$$

式中:

I_0 ——光入射到气体前的光强度,为系统的可检测量;

I ——光透过待检测气体后的光强度,为系统的可检测量;

$\alpha(\lambda)$ ——待测气体对波长 λ 光波的吸收系数,为可检测已知量;

C ——待测气体的浓度;

L ——待测气体的厚度,为可测量已知量。

在式(1)中, I 、 I_0 、 $\alpha(\lambda)$ 和 L 均为已知可测量,因此,可通过式(1)求解出被测气体的浓度 C :

$$C = -\frac{\ln(\frac{I}{I_0})}{\alpha(\lambda) \cdot L} \quad (2)$$

在式(2)中,当气室中无待测气体时,可测得通过气室的光经探测器测得其光强为 I_0 ,当待测气体充入气室达到浓度 C 后,可测得通过气室的光强为 I 。因此,式(2)中的 I 、 I_0 、 $\alpha(\lambda)$ 和 L 均为已知可测量,便可以得到待测气体的浓度 C 。

2 SF_6 断路器气室微水在线检测系统

2.1 光源的选择

采用分布反馈式激光器,它是由内含布拉格光栅实现光的反馈。它具有良好的单色性和稳定性,以及很好的调制特性^[11,12]。它可以通过调整温度和注入电流来精确调节其输出光的中心波长。在气体传感技术领域中,反馈式激光器在灵敏度、信噪比、动态范围和响应时间等方面都是传统光源无法具备的优点^[13]。

2.2 检测系统的组成

基于光纤的 SF_6 断路器气室微水在线检测系统结构示意图如图 2 所示。主要由发光部分、传感部分、光电转换及信号处理部分组成。发光部分是由激光器驱动及调制电路、温控电路和激光器组成。激光器驱动及调制电路为激光器提供精确可调的正弦波电流,精确调制该正弦波电流的直流分量,就可使激光器处于所需的中心波长发光状态,而正弦波的交流分量用于后续的信号锁相放大电路提供精确的参考信号。由于激光器存在一定的温漂,采用温度控制电路使激光器处于恒温的工作状态,最大限度地减小因温度的变化对激光器产生的影响。

传感部分是指气室,当光通过时,由于气体对光的吸收,光强减小。光经过第一个光纤准直器后发出平行光,此平行光经过气室进行水汽的检测,然后由对应配对的另一个光纤准直器接收平行光并汇聚到光纤中进行继续传输。

光电转换及信号处理部分主要包括光电二极管、后续的放大滤波以及锁相放大等。光经过气室后,包含了气体的浓度信息,经过光电二极管转换成电信号。此信号经过后续的放大滤波以锁相处理(以前述正弦波信号为参考信号)后,送入计算机,完成信号处理和显示。

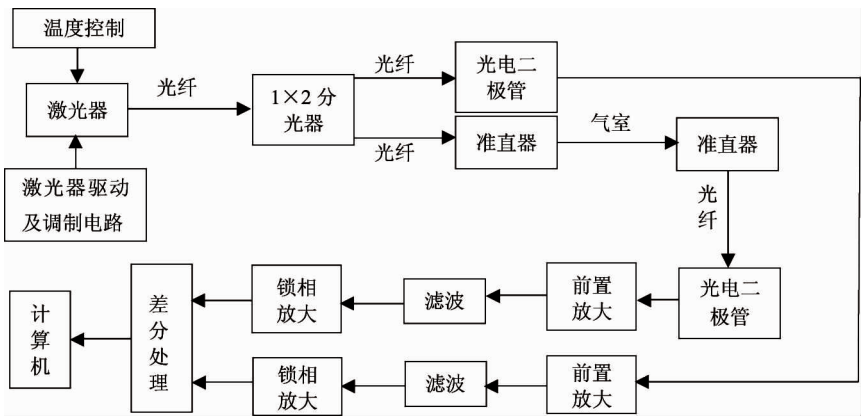


图 2 微水在线检测系统结构示意图

2.3 差分系统

为了抑制激光器的光强不稳定等因素对检测结果的影响,引入了差分处理系统,如图 2 所示。从激光器发出的光进入光纤后,由 1×2 分光器将光分成 50:50 的两束光。一束光经过气室,对待测气体进行检测;另一束光由光纤直接引入到光电二极管进行光电转换,做为参考信号。在检测气体之前,进行电路的调节,使其两路光的输出信号相等。两束光信号经过后续的调制后进入到计算机中进行信号处理,通过编程,将两路信号的比值作为系统的输出,经过式(2)计算后,就可以得到待测气体的浓度。

3 实验及结果分析

本文采用图 2 所示的检测系统对 SF₆ 气体微水含量进行在线检测实验。实验过程中,选用的光纤为 0.9mm 带保护套管的单模光纤,光纤与光纤之间的连接采用 FC/APC 的方式联接。光电二极管采用高响应雪崩光电二极管,气室的长度为 90cm。向气室中分别通入配比不同体积分数的带水汽的 SF₆ 气体,将检测路输出与参考路输出的比值作为检测系统的输出量,其测量结果如表 2 所示。根据表 2 的结果绘制出 SF₆ 气体中的水汽含量和检测系统输出量的关系曲线如图 3 所示。

表 2 系统微水含量检测结果

微水含量 ($\mu\text{L/L}$)	0	50	100	200	300	400	500
系统输出值	1	0.962	0.925	0.856	0.792	0.730	0.665

由图 3 可以看出,检测系统的输出与水汽的体积分数成近似的线性关系,检测系统的输出值随着

水汽含量的增加而线性减小。在相同的实验条件下,经多次实验测试发现,检测系统的重复性良好,其非线性误差小于 3%。

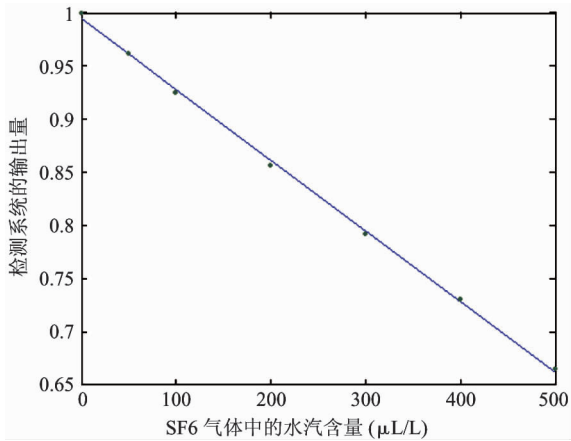


图 3 检测系统输出量与水汽含量之间的关系曲线

4 结 论

实验结果表明,基于光纤的 SF₆ 断路器气室微水在线检测系统,由于采用了锁相放大技术和差分结构,其检测稳定性较高,其非线性误差小于 3%。另外,检测系统对环境的变化(如温度等)有较好的抑制作用。由于采用光纤进行光的传输,可以实现传感部分和光电转换及信号处理部分的分离,因此检测系统不受高电压设备强电磁干扰的影响。此检测方法同样适用于易燃易爆环境下的气体微水含量检测。

参考文献

[1] 荆锴, 冯新岩, 曹刚. SF₆ 气体微水在线检测装置研究. 山东电力技术, 2012, (3): 30-32

- [2] Paul T, Porus M, Galletti B, et al. SF₆ concentration sensor for gas-insulated electrical switchgear. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 206: 51-56
- [3] 李刚, 朱革兰. SF₆ 电器设备中水分控制及湿度超标处理. 高压电器, 2006, 2(42): 139- 140
- [4] 赵鑫, 徐元哲. 六氟化硫断路器微水检测装置的研究. 工程与试验, 2009, 49(1): 55- 57
- [5] 李艳秋, 江秀臣, 曾奕. SF₆ 气体微水含量在线检测方法及其软件实现. 华东电力, 2006, 3(34): 58- 60
- [6] 胡雨龙, 陈伟根, 孙才新. SF₆ 气体中微水含量模拟在线检测初探. 高电压技术, 2002, 4(28): 31- 33
- [7] 贾振安, 王佳, 乔学光等. 光纤传感技术在气体检测方面的应用. 光通讯技术, 2009, (4):55-58
- [8] 徐元哲, 胡智慧, 刘县等. 基于光谱吸收法 SF₆ 断路器泄漏检测技术的研究. 电力学报, 2009, 24(1): 12-15
- [9] 王俏. 光纤甲烷传感器的信号处理方法:[硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009. 13
- [10] 田卡丽. 红外光谱吸收型光纤一氧化碳传感器的研究:[硕士学位论文]. 武汉; 武汉理工大学, 2008. 10
- [11] 邬辰鸣, 辛玉军, 陈康. 可调谐窄线宽激光器在有害气体检测中的应用研究. 中国科技信息, 2014, (3): 42-44
- [12] 江剑平. 半导体激光器. 北京: 电子工业出版社, 2000. 125-148
- [13] 张爱军, 冉昌艳, 张宇. 差分吸收式光纤气体传感器的研究, 传感器技术, 2005, 24(10):8-12

Research on online moisture measurement of SF₆ breakers based on fiber optic technology

Sun Yinshan, Zhong Jianying, Wang Zhen, Yin Junhua, Zhang Yiming
(Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001)

Abstract

To ensure SF₆ breakers' safety in working, the IR spectrum absorption method was used to detect the moisture content of SF₆ breakers (an important parameter for SF₆ gas-insulated circuit-breakers' safe working) based on fiber optic technologies. A sensor system was designed according to the characteristics of the water absorption spectrum, and a differentiating system was applied to signal processing to reduce the influence of environments on the measuring precision. The proposed method can realize the online moisture measurement and improve the reliability and safety of SF₆ gas-insulated circuit-breaker. This detecting system has the ability of resisting electric-magnetic interference because the optical fiber is introduced to realize the optical transmission.

Key words: SF₆ gas-insulated circuit-breaker, moisture measurement, spectral absorption method, fiber sensor, online measurement