

变压器油中溶解甲烷实时监测系统设计

曹旺^{1,2}, 万元^{1,2}, 李橙橙^{1,2}, 廖学顺², 吴昊天²

(1. 国家电力投资集团水电产业创新中心, 湖南长沙 410007; 2. 湖南五凌电力科技有限公司, 湖南长沙 410007)

摘要: 针对变压器放电性故障的标志性气体——甲烷的在线监测需求, 研制了一种基于可调谐半导体激光器技术的变压器油中溶解甲烷实时监测系统。系统搭建了中心波长为 1563 nm 的 N 型 DFB 激光器与光程长度为 12 m 的怀特池的光学检测模块, 结合动态顶空脱气法设计了油气分离模块, 研发了基于 STM32 与上位机的控制模块, 实现了注油、脱气、测量、回油等功能, 测量周期约为 30 min。实验结果表明, 二次谐波峰谷值与气体浓度具有极好的线性关系, 线性拟合误差为 0.999, 系统的最小检测下限低于 0.5 $\mu\text{L/L}$, 气相同浓度多次测试结果之间的误差控制在 0.5% 以内, 测量精度与稳定性满足变压器的甲烷监测需要。

关键词: 变压器; 甲烷; 可调谐半导体激光器技术; 实时监测

中图分类号: TN29

DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.21.048

Design of Real-time Monitoring System for Dissolved Methane in Transformer Oil

CAO Wang^{1,2}, WAN Yuan^{1,2}, LI Chengcheng^{1,2}, LIAO Xueshun², WU Haotian²

(1. Hydropower Industry Innovation Center of State Power Investment Co., Ltd., Changsha 410007, China;

2. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at realizing on-line monitoring of methane, the landmark gas of transformer discharge fault, a real-time monitoring system of dissolved methane in transformer oil based on tunable laser diode absorption spectroscopy technology is developed. The system contains an optical detection module consisting of N-type DFB laser generator with central wavelength of 1563 nm and Whitepool with optical path length of 12 m, an oil and gas separation module designed using dynamic headspace degassing method, and a control module based on STM32 and upper computer, realizing functions of oil injection, degassing, measurement, and oil discharge with the measurement period of about 30 minutes. The experimental results show that there is an excellent linear relationship between peak and valley values of the second harmonic wave and the gas concentration. The linear fitting error is 0.999, the minimum detection limit of the system is less than 0.5 $\mu\text{L/L}$, and the gaseous phase error between multiple test results of the same concentration is controlled within 0.5%, meeting the requirements of transformer methane monitoring for measuring accuracy and stability.

Key words: transformer; methane; tunable laser diode absorption spectroscopy technology; real-time monitoring system

0 引言

变压器是电力系统的枢纽部件, 担负着电压等级转换的重任^[1]。变压器运行过程中, 内部绝缘油在高温与放电作用下, 内部化学键断裂产生甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙炔(C_2H_2)等烃类气体。油中溶解气体分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)针对变压器内部产生气体的种类、含量进行测量与分析, 是变压器故障诊断领域的有效方法^[2]。 CH_4 是变压器 DGA 中最重要的气体之一, 是区分变压器局部放电与火花放电的标志性气体, 也是发热故障中故障点温度低的判据^[3], 因此精准、快速地测量变压器中 CH_4 浓度对实现变压器状态监测具有重要意义。

分析油中溶解气体最常用的方法是气相色谱法, 该方法应用广泛, 但检测周期长, 消耗载气, 需专人取样, 且

取样过程易受污染, 难以满足实时性需求。近年来, TD-LAS 以其测量精准、灵敏度高、无需载气、不损耗样品等优点, 开始逐步应用在变压器油中溶解气体监测领域。文献[4]以不同浓度甲烷为研究对象, 搭建了基于 TDLAS 的甲烷浓度识别系统, 实现了甲烷的高精度测量。文献[5]设计了基于 TDLAS-WMS 的甲烷泄漏遥测系统, 测量了不同浓度的谐波信号, 该系统的检测下限约为 70.5 $\mu\text{L/L}$ 。文献[6]研制了易携带的甲烷探测仪, 测量精准度为 $\pm 3.05\%$, 达到了 0.88 $\mu\text{L/L}$ 的最小检测下限。本文针对变压器油中甲烷检测需求, 基于动态顶空法与 TDLAS 技术, 研制了变压器油中甲烷实时监测系统, 实现了高精度测量。

1 TDLAS 检测原理

气体对激光的吸收具有选择性, 仅当激光频率与气体

收稿日期: 2023-04-12

吸收频率一致时，气体才开始吸收，使激光的光强衰减，且气体浓度越高，光强衰减程度越大^[4]。比尔朗伯定理描述了激光强度变化的关系，其数学表达式为：

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

式中， $I(v)$ 为出射激光强度； I_0 为入射激光强度； v 为激光频率； $\alpha(v)$ 为被测气体的吸收系数； C 为被测气体浓度； L 为光程。

由式(1)可知，在测量条件已知的情况下，浓度 C 可通过测量出射激光强度得到。以比尔朗伯定理为基础的直接吸收法受低频背景噪声干扰较大，难以捕捉到大背景噪声下浓度的微小变化。而谐波检测技术在激光器电流中注入高频调制正弦波，并通过锁相放大器获取吸收信号的高次谐波，降低了背景噪声对测量结果的影响^[5]。调制后的激光器频率 v 为：

$$v = v_c + v_a \cos \omega t \quad (2)$$

式中， v_c 为激光器中心频率； v_a 为调制幅度； ω 为正弦调制频率； t 为时间。

将式(2)带入式(1)并进行傅里叶级数展开，可得：

$$I(v_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(v_c) \cos(n\omega t) \quad (3)$$

设 $\theta = \omega t$ ，谐波分量 $A_n(v_c)$ 可展开为：

$$A_n(v_c) = \frac{2I_0}{\pi} \int_0^{\pi} \exp[-\alpha(v_c + v_a \cos \theta)CL] \cos n\theta d\theta \quad (4)$$

当怀特池中的气体对光强的吸收 $\alpha(v)CL \ll 1$ 时，有：

$$A_n(v_c) = \frac{2CLI_0}{\pi} \int_0^{\pi} -\alpha(v_c + v_a \cos \theta) \cos n\theta d\theta \quad (5)$$

由式(5)可知，各谐波分量 $A_n(v_c)$ 与浓度 C 、光程 L 成正比。在所有谐波中，二次谐波在偶次谐波中的幅值最大、抗干扰能力最强。相较于奇次谐波，二次谐波关于中心吸收位置偶对称，并在该位置具有最大幅值，更有利于吸收峰定位^[6]。同浓度的一次谐波与二次谐波如图 1 所示。本文采用二次谐波吸收峰的峰谷值作为浓度计算的依据。

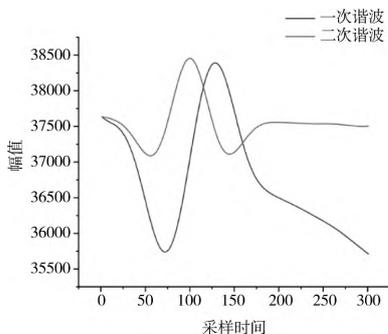


图 1 一次、二次谐波

TDLAS 无法直接测量变压器油中的气体浓度，需进行油气转换，将液相浓度转换为气相浓度。根据油气平衡理论，可得气相浓度与液相浓度的转化公式为：

$$C_{io} = \frac{293}{273+t} \times \frac{P_a}{P_0} C_{ig} \left(K_i + \frac{V_g}{V_o} \right) \quad (6)$$

式中， t 为测量温度； P_a 为测量压强； P_0 为标准大气压； K_i 为测量温度下的奥斯特瓦尔德系数； C_{io} 为液相浓度； C_{ig} 为 TDLAS 测量的气相浓度； V_g 为气液平衡时的气体体积； V_o 为油样的体积。

由式(6)可知，液相浓度与测试环境中温度、压强、注油量及系统空腔大小有关^[7]。根据 GB/T 17623—1998《绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法》，脱气温度为 50 °C 时变压器油中甲烷的奥斯特瓦尔德系数为 0.39。在测量环境稳定后，液相浓度与气相浓度成正比，根据式(6)即可计算变压器油中甲烷浓度。

2 系统设计

变压器油中溶解甲烷实时监测系统主要包括油气分离模块、光学检测模块及控制模块，如图 2 所示。与传统 TDLAS 气体检测不同，该系统需将变压器油中溶解的甲烷析出，并传送到怀特池中，而后方能检测。

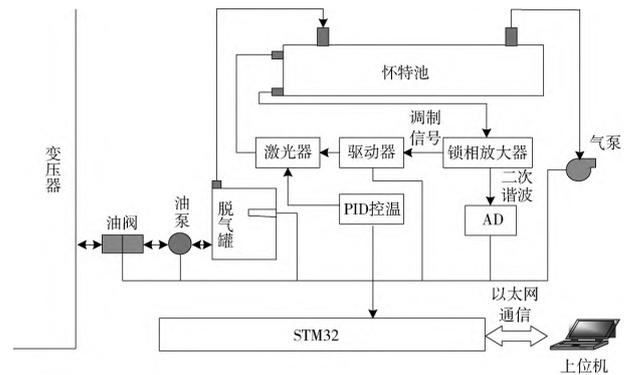


图 2 系统结构

(1) 油气分离模块的功能便是析出油中溶解气体，包括脱气罐、气管、油管、油泵、气泵、加热器及阀门。测量时，打开进油阀门，开启油泵，抽取变压器中油进入脱气罐。脱气罐中有加热棒与搅拌器，使气体在油中的溶解度降低，保障罐中变压器油脱气充分。罐顶与怀特池连接处设有油雾分离器，截留大颗粒油分子，防止怀特池受污染。在测量结束后，开启排油阀门，油泵反转将油输回变压器，无损变压器油量。

(2) 光学检测模块基于 TDLAS 原理进行设计，包括激光器、激光驱动器、怀特池、数字锁相放大器与数据采集芯片。在波长 1653 nm 附近，甲烷的吸收谱线强度远超空气及变压器油中溶解的其余常见气体，因此选用中心波长 1653 nm 的 DFB 激光器作为系统光源，确保其余气体不干扰甲烷测量。式(5)表明，在浓度不变的情况下，光程越长，二次谐波的幅值越大，检测下限越低。但实际中，怀特池光程长度 L 无法无限加长，常通过来回反射增加光程长度。怀特池由 3 块曲率半径相同的凹面镜组成，分为大镜 M，小镜 N1、N2。大镜 M 的曲率中心位于 2 块小镜之间，2 块小镜 N1、N2 的曲率中心位于 M 之上。怀特池内部的简易光路如图 3 所示。

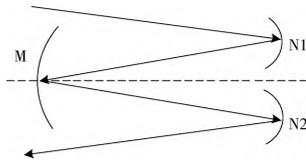


图3 怀特池内部光路

根据几何光学原理，M发出的光点经N1、N2反射后，最终成像于M的另外一点。根据怀特池的基长L与光在怀特池中的反射次数n，光程s可表示为：

$$s = 2(n + 1) \times L \quad (7)$$

小镜N1、N2的曲率中心的位置决定了单次反射次数n，因此可通过改变N1、N2的位置来改变怀特池的光程。如果小镜N1、N2的布置在垂直方向上存在角度差时，大镜M上的激光反射点会上下错落，可进一步增加反射次数。

激光驱动器接收到调制信号后改变激光器的电流，扫描气体的吸收波长。其中的DAC芯片下设的温度数字信号转换为模拟信号，PID温控将下设温度与实际温度进行比较，在较短时间内完成温度调节。光电探测器接收气体吸收过的激光信号，并转换为电压信号。数字锁相放大器一方面产生10 Hz的锯齿信号与10 kHz的正弦信号组成的调制信号，对激光器的输入电流进行调制；另一方面对气体吸收后的信号进行解调，产生计算浓度的二次谐波。AD采集谐波数据后，通过以太网上传至上位机中计算气体浓度，并根据测量浓度值对变压器的运行状态进行评估。

(3)控制模块包含STM32F407芯片与上位机软件。上位机软件提供操作界面、数据显示及故障诊断功能，通过以太网与STM32F407芯片进行指令手法与数据传输。

3 系统性能分析

3.1 TDLAS 检测分析

TDLAS气体测量是检测变压器油中甲烷的基础，故先利用高精度自动配气仪产生不同浓度气体对系统进行标定与检测性能分析。配气仪的稀释气采用浓度为99.999%的氮气，原料气分别采用100、1000 μL/L的甲烷，配置10、20、50、100、300、500 μL/L的甲烷，所配置浓度基本覆盖变压器中常见甲烷浓度。在不同浓度的甲烷气体进入气室后，开启系统的光学检测模块，记录18次二次谐波，取18次的平均值作为浓度计算依据。不同浓度下的二次谐波如图4所示，18次测量的峰谷值如图5所示。可见，随着浓度增加，二次谐波吸收峰不断增大，但吸收峰的峰值位置始终不变，说明系统的温控精准，没有产生漂移现象。每个标定点的峰谷值保持相对稳定，没有产生较大的偏离，标准差与平均值的商控制在0.5%以内。

最小二乘法是基于误差的平方和最小为原理的寻求数据最佳函数匹配方法，TDLAS检测领域中常用该方法进

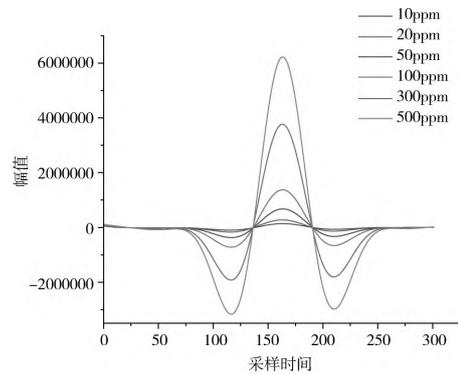


图4 不同浓度二次谐波

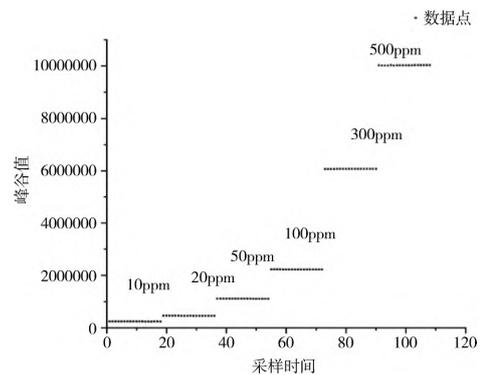


图5 不同浓度二次谐波的峰谷值分布

行浓度与谐波之间的关系拟合。为此，本文采用最小二乘法进行谐波峰谷值与气体浓度标定。浓度与峰谷值的关系如图6所示。

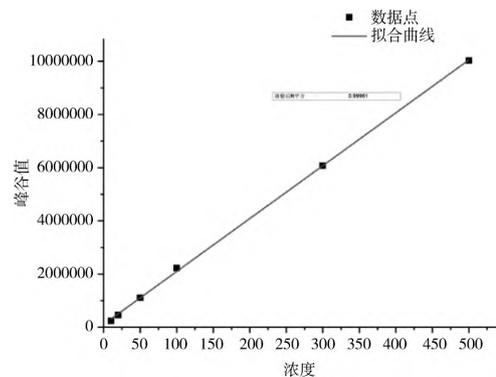


图6 拟合关系

由图6可知，二次谐波峰谷值与浓度之间具有良好的线性关系，拟合曲线的线性拟合系数为0.999，接近直线，与TDLAS原理相符。在实际测量时，根据测得的峰谷值，查询拟合关系即可计算出浓度。

检测下限是衡量系统性能的重要指标。在Q/GDW 10536—2021《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》中，变压器油中甲烷的检测下限要求为0.5 μL/L^[8]。为测试系统的检测下限是否满足需求，配置浓度为0.5 μL/L的甲烷与纯氮气进行测试，测得的二次谐波如图7所示。

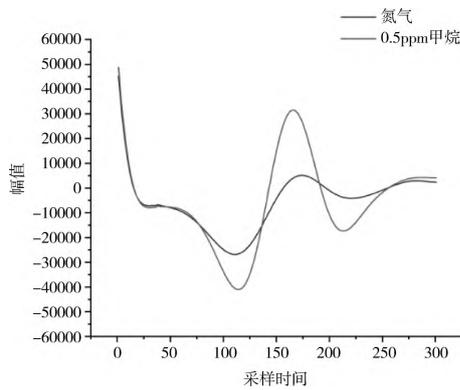


图7 浓度为0.5 μL/L时二次谐波

由图7可知，在检测0.5 μL/L的甲烷时，二次谐波仍具有明显的吸收特征，吸收峰位置处幅值明显比氮气突出。由此可推测出系统可精准检测出0.5 μL/L的甲烷，甚至可检测出更低浓度甲烷，满足变压器的检测需求。

3.2 油样分析

为确认系统对变压器油中溶解甲烷的测量精度与稳定性，配置甲烷浓度为2、5、10、50、100 μL/L的变压器油样各3份。在测试过程中，系统从注油到测量结束用时仅为30 min，小于气相色谱仪的平均用时，更满足实时性需求。油样测试结果见表1。

表1 油样测试结果

油样浓度/ (μL/L)	色谱浓度/ (μL/L)	测试1/ (μL/L)	测试2/ (μL/L)	测试3/ (μL/L)	相对误差
2	2.1	2.29	1.82	2.3	-0.02
5	4.8	5.1	5.05	5.29	-0.08
10	10.4	9.6	10.52	11.1	0.00
50	50.6	50.84	51.74	52.1	-0.02
100	98.7	99.6	100.4	101.3	-0.02

(上接第181页)

波器的使用不重视，电压相序、机端测量阻抗异常，最终造成失磁保护误动。

4 结语

综上所述，核电厂机组正常运行中，应急柴油发电机是一个重要组成部分，直接关系到反应堆的安全性。本文从试验方式继电保护、应急方式继电保护、励磁保护等方面，介绍了应急柴油发电机的继电保护方法。在未来，核电厂应对柴油发电机的继电保护方法进行改进，做好管理维护工作，发挥继电保护作用，保证核电厂安全稳定运行。

在油样实验中，当浓度大于10 μL/L时相对误差控制2%以内，当浓度小于5 μL/L时绝对误差控制在0.5 μL/L以内，满足《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》中对甲烷的误差A级要求。

4 结语

本文选用1653 nm激光器作为系统检测光源，研制了变压器油中溶解甲烷的TDLAS检测系统。该系统检测下限低于0.5 μL/L，同浓度的多次测试偏差低于0.5%，具备极佳的稳定性。系统运行时无需人为操作，不损耗变压器中的油量，测量精准，可为变压器提供全天候的甲烷检测。

参考文献

- [1]徐龙舞,张英,张倩,等.基于正交实验法改进的蝠鲞算法优化BP在变压器故障上的研究[J].南方电网技术,2022,16(7):46-53.
- [2]梁权.用于变压器故障诊断深度学习算法优化的研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [3]汪康.基于油中溶解气体分析的变压器故障诊断研究[D].长春:长春工业大学,2020.
- [4]阚玲玲,叶蕾,王喜良,等.基于TDLAS技术的甲烷气体浓度识别系统[J].化工自动化及仪表,2021,48(2):122-127.
- [5]徐俊,李云飞,程跃,等.基于TDLAS-WMS的甲烷泄漏监测系统研制[J].激光与光电子学进展,2023,60(6):366-374.
- [6]刘杰,董洋,古明思,等.基于TDLAS技术的吸入便携式甲烷检测仪研制[J].量子电子学报,2019,36(5):521-527.
- [7]应姿.基于可调谐激光吸收光谱测量系统的变压器故障诊断研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [8]Q/GDW 10536—2021 变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范[S].

参考文献

- [1]魏彦勋,山江川,沈晓晖,等.核电厂应急柴油发电机失磁保护误动原因分析及改进建议[J].电工技术,2021(7):168-170.
- [2]赵江,韩瑜.应急柴油发电机失磁保护误动作分析与处理[J].电工技术,2020(18):51-52.
- [3]汪南华.核电厂应急柴油发电机1E级电气量保护配置方案探讨[J].机电信息,2020(24):20-21.
- [4]李果繁.关于核电厂应急柴油发电机的继电保护分析[J].城市建设理论研究(电子版),2019(29):28.
- [5]黄顺建,黄罔.数据中心备用中压柴油发电机系统的电气保护配置方案[J].电气技术,2019,20(8):103-106,109.