

基于光纤气体传感器的变压器油质在线监测分析系统研究

当前，许多变压器在线监测系统的故障诊断率低，且自身的稳定性不好，致使其发挥的作用有限。由于光纤气体传感器基于光通信传播技术，其具有抗干扰性强、损耗低、本质安全、易于组网和智能化监测等显著特点。在光纤技术的基础上，设计了新型变压器油质在线监测分析系统。该系统用于监测变压器发生故障时油中产生的CH₄、C₂H₄、C₂H₂和CO 4种气体的浓度，从而判断故障状况，提高系统的可靠性。

周俊杰¹ 徐国华² 章义军¹ 黄立² 姜敏³ / 1. 国网浙江安吉县供电公司
2. 国网湖州供电公司 3. 山西电力公司电力科学研究院



周俊杰/工程师

关键词/Keywords
变压器·
在线监测·
故障诊断·
光纤传感器·

变压器的运行状态影响着电网系统的效率和安全，对其工作状态进行在线监控，可促进电网系统安全高效运行。随着科学技术的发展，光纤通信技术越来越成熟，光纤传感器的应用技术研究也成为了热点。光纤气体传感器的特点是传输的光信号而非电信号，具有抗电磁干扰能力，而且还可以实现远离现场检测。在近红外波段，每种气体分子的结构不同，其对应着的吸收光谱也会不同，被测气体的吸收波峰和光源的光谱重合时，这些特定光谱就会被吸收，而且气体浓度与吸收强度有关，可以通过分析输出光强来检测气体的浓度。光谱吸收型光纤气体传感器利用这一特点可以确定气体的种类和含量。光纤气体传感器在线监测系统在分析气体成分和含量时，不再使用色谱柱，只需要光谱分析即可，并且不会造成被测气体量发生变化，因此具有非常好的在线实时性。光纤气体传感器在线监测系统的优点包括：系统操作简便；绝缘、防电磁干扰性能强，实时性好，响应速度快；测量

准确，无零点漂移，重复性好；无须进行标定，不影响载气含量；系统维护简单，安全可靠。

变压器内部故障与溶解气体的关系

变压器油中的分子结构在变压器正常运行情况下非常稳定，但当变压器内部故障发生时，电弧造成局部高温过热，故障点会释放大量热能，这些能量使烃类化合物的键断裂而产生CH₄，C₂H₆，C₂H₄和C₂H₂等烃类气体以及CO、CO₂和H₂等气体。以下两个方面是产生这些气体的主要原因。一方面是变压器油分子中C—C键和C—H键受热发生断裂，生成断链的碳氢化合物自由基和少量活泼的氢原子，这些自由基和氢原子会重新发生化学反应，形成H₂、CH₄、C₂H₆和C₂H₄等，也可能生成碳的固体颗粒及碳氢聚合物。另一方面是绝缘纸、木块和绝缘纸板等固体绝缘材料在高温下裂解并重新形成碳的化合物。

变压器不同故障产生的特征气体如表1所示。

表1 常见故障产生的气体成分

故障类型	主要气体组成	次要气体成分
油过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄	H ₂ 、C ₂ H ₆
油和纸过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO 和CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
油和纸绝缘局部放电	H ₂ 、CH ₄ 、CO和CO ₂	C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆ 和CO ₂
油中火花放电	H ₂ 、C ₂ H ₂	
油中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 和C ₂ H ₆
油和纸中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO和CO ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 和C ₂ H ₆

注：油中气泡或进水受潮可能是氢含量升高

由表1可知, 可以通过监测变压器油中的气体成分和含量来诊断变压器发生的故障。

光纤气体传感器的工作原理

被测气体分子都是多分子气体, 其具有转动能级、振动能级和电子跃迁能级, 并且这些能级是一系列离散数值。分子通过吸收和释放能量来发生能级跃迁, 在能量吸收和释放时会产生分子的吸收光谱。气体分子只能吸收和释放等于其两个能级差的光子, 不同的气体分子的能级不同, 因而吸收的光子频率也不相同。气体吸收光子的能量, 跃迁到离核更近的轨道上, 当光子的能量是物质粒子的基态 ($E_{初}$) 和激发态 ($E_{激}$) 的能量差 ΔE 时, 光子才被吸收。分子在激发态很不稳定, 经过短暂停留会重新回到基态, 在激发态回到基态的过程中又释放相应频率的光子。虽然释放的光子和吸收的光子的能量相同, 但分子时刻都在进行布朗运动, 其方向是任意发射的, 也就是说原方向上的光子被散射掉了, 所以光强度在原方向上会产生衰减, 衰减程度和被测气体的浓度有关, 测量被吸收光的波长和强度, 就可得出待测气体的吸收峰, 吸收峰的波长反映了待测物质的结构特征, 可用于定性分析, 而吸收峰的强度则与该物质的含量有关, 可用于定量分析。

气体特征频谱的选择

常见变压器油中溶解的气体如 CO 、 CO_2 、 C_2H_2 、 CH_4 和 C_2H_4 的标准特征吸收谱线一般分布在中红外区 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 的振动谱之间。而这个波段中大多数波段的光纤损耗很大, 而 $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 被称为石英光纤的透过窗口, 光纤的损耗很小, 所以一般选择在 $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 内的泛频谐波谱。相比标准特征谱的吸收率, 这类泛频谐波谱的吸收率要差很多, 但这些泛频谐波在石英光纤里衰减低、损耗小, 所以监测的灵敏度很高, 常被用来监测气体。一些常见气体的吸收谱线波长如表2所示。

本系统主要监测常见的造成变压器故障中出现的4种气体 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 CO 的含量。这4种气体的吸收峰分别为 $1.536 \mu\text{m}$ 、 $1.665 \mu\text{m}$ 、

表2 常见气体的近红外波线吸收谱

气体	波长/ μm
CO_2	1.57 1.538
CH_4	1.665
NO_2	0.75 450
C_2H_2	1.536
C_2H_4	1.567 6
NH_3	1.515
CO	1.57

$1.5676 \mu\text{m}$ 和 $1.57 \mu\text{m}$ 。

差分吸收监测原理

通过比尔-朗伯特 (Beer-Lambert) 定律, 可以得出入射光强 I_0 经过气体吸收后与出射光强 I 之间的关系式, 即

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{[-\varepsilon_\lambda C + \xi(\lambda)]} \quad (1)$$

式中, $I(\lambda)$ 为透射光强; $I_0(\lambda)$ 为入射光强; ε_λ 为被测气体在单位浓度气体下特定波长的吸收系数; C 为气体的待测浓度; l 为待测气体与光相互作用的长度; $\xi(\lambda)$ 为气体光路的干扰因素。

当用 λ_1 、 λ_2 两个波长相隔极近 (但在吸收系数上有很大差别) 的单色光同时或以相差极短的时间内通过待测气体时, 则

$$I(\lambda_1) = I_0(\lambda_1)e^{[-\varepsilon_{\lambda_1} C + \xi(\lambda_1)]} \quad (2)$$

$$I(\lambda_2) = I_0(\lambda_2)e^{[-\varepsilon_{\lambda_2} C + \xi(\lambda_2)]} \quad (3)$$

式中, λ_1 为吸收谱线, λ_2 为参考谱线。

由式 (4) 可得

$$\begin{aligned} \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} &= \frac{I_0(\lambda_1)e^{[-\varepsilon_{\lambda_1} C + \xi(\lambda_1)]}}{I_0(\lambda_2)e^{[-\varepsilon_{\lambda_2} C + \xi(\lambda_2)]}} \\ &= \frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)} e^{\{-(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2}) C + [\xi(\lambda_1) - \xi(\lambda_2)]\}} \end{aligned} \quad (4)$$

由此可求得气体的密度, 即

$$C = \frac{\xi(\lambda_1) - \xi(\lambda_2) - \ln \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} - \ln \frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)}}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2}) l} \quad (5)$$

λ_1 、 λ_2 是波长相差很近的两种光波, 让它们同时通过待测气体, 则认为 $\xi(\lambda_1) \approx \xi(\lambda_2)$ 。通过调节光源驱动电流使两种单色光的入射强度相近, 即 $I_0(\lambda_1) \approx I_0(\lambda_2)$, 故可把式 (5) 简化为

$$C = \frac{-1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \ln \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} = \frac{1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \quad (6)$$

λ_1 被散射幅度要大于 λ_2 , 则有 $\frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} < 1$ 。

对式(6)进行泰勒展开, 即

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \\ &= \frac{-1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \ln \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \\ &= \frac{-1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \ln \left[I + \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} - I \right] \\ &= \frac{-1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \left[\frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} - I \right] \\ &= \frac{-1}{(\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2})I} \left[I - \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 由于 λ_1 、 λ_2 这两种单色光的气体吸收系数之差 $\varepsilon_{\lambda_1} - \varepsilon_{\lambda_2}$ 为固定值, 只需求出两种光的投射强度 $I(\lambda_1)$ 和 $I(\lambda_2)$ 就可求出被测气体的浓度。

光纤气体传感器系统的设计

图1为光纤气体传感器的结构图。

图1中的SLED₁、SLED₂、SLED₃和SLED₄为4个光源, 分别提供CH₄、C₂H₂、C₂H₄和CO 4种气体

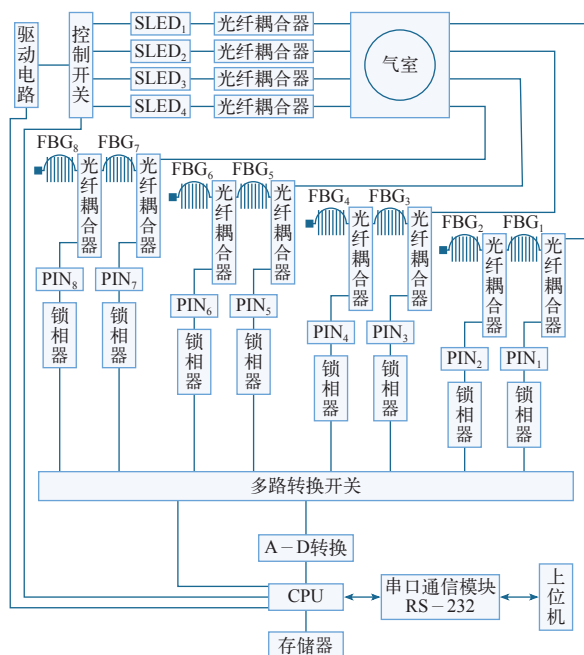


图1 光纤气体传感器的原理结构图

的检测光源。SLED是具有超辐射性能的发光二极管模块, 该模块能提供大功率、稳定性好和低相干度的光源。系统内置高度隔离的光纤隔离器, 其作用是降低回波的干扰, 系统内部还集成了驱动电路与温控电路, 提高稳定性能的光源。光源的控制是由CPU通过驱动电路来执行, 依次控制4个光源发光。光的传播路径是由光纤耦合器经光纤进入气室。图1中, 从PIN₁到PIN₈, 共有8个光电探测器, 选用0.8~2.6 μm的InGaAs探测器, 其优点是噪声低、响应速度快和线性工作范围大等。气室为20个光纤气体传感器组成的多路光纤传感器圆环, 每个传感器是由渐变折射率透镜组成, 如图2所示。

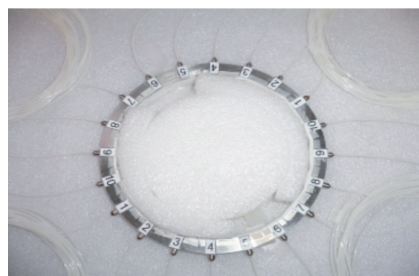


图2 多路光纤传感器测量气室

图2中有两套编号, 每套编号1~10下方连接着渐变折射率透镜, 每种光的传输经过两组透镜, 如1→1→2→2, 使光经过了两次气室, 气体和光的接触路程增加, 提高光谱检测的灵敏度。光电探测器PIN₁和PIN₂把出射光转换为两个电信号。并通过锁相放大和低通滤波对电信号进行数据处理, 之后通过A-D转换器把这些电信号转换为数字信号, 最终求出两种光的透射光强 $I(\lambda_1)$ 和 $I(\lambda_2)$ 。根据差分吸收检测原理, 可以得出CH₄、C₂H₂、C₂H₄和CO的气体浓度。图3为经过试验测得的浓度为56 μL/L的CH₄气体曲线图。

通过检测, 可以得到C₂H₂、CO、CH₄和C₂H₄ 4种气体的最小检测浓度为5 ppm、10 ppm、5 ppm和10 ppm。检测的误差均小于10%。

在线监测系统的框图如图4所示。由图4可知, 变压器油中气体在线监控系统包括油气分离单元模块、光纤气体传感器、数据采集单元模块和串口通信模块。串口通信模块将计算出的气体

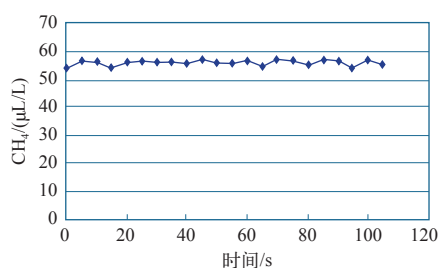
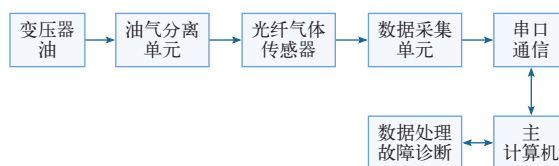
图3 CH₄气体的曲线图

图4 变压器油中气体在线监测系统框图

浓度传送到主计算机中进行数据分析和故障诊断,并通过显示屏进行实时显示,实时显示变压器油中溶解气体的浓度。与传统离线监测相比,

该系统采用全自动在线连续监测方式,并且具有高效率、测量数据连续性强以及随时监测设备工作状态等特点,实时显示气体增长的趋势,在线监测系统的主界面如图5所示。

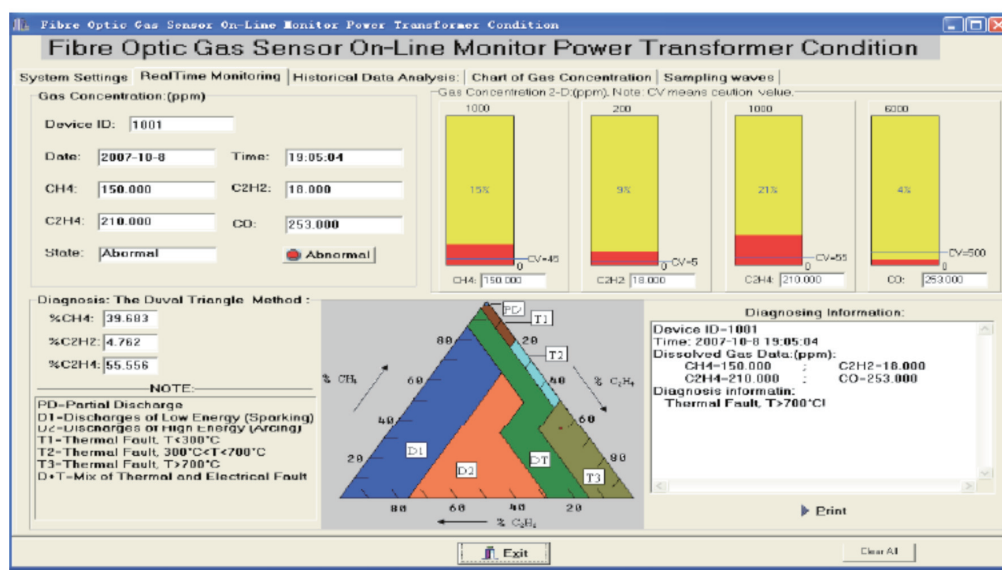


图5 变压器油中气体在线监测系统主界面

图5中,4个长方形显示气体的实时浓度值,绿色线为警戒线。该系统的功能可实现数据监测及故障诊断、分析结果的显示、打印和报警等功能。

的隔离效果,消除干扰,在线实时监测更是取代了传统的离线监测,提高了检测的灵敏度和准确性,具有一定的实用价值。

结束语

目前,常用的变压器色谱分析在线监测分析系统,其色谱柱和传感器故障率高,且寿命短,频繁更换将对电网系统的安全稳定运行造成影响。而光纤气体传感器运行安全稳定、监测准确的特点使其成为电力行业的研究热点。

所提出的变压器油质在线监测分析系统基于差分吸收原理,通过设置参考光波计算出被测气体浓度,方法简单可靠。采用光纤传输,有很好

参考文献

- [1] 杨廷方. 变压器在线监测与故障诊断新技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [2] 赵文彬. 油浸式电力变压器绝缘状态的在线监测系统[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [3] 程鹏, 俘来生, 吴广宁, 等. 大型变压器油中溶解气体在线监测技术进展[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 90-93.
- [4] 刘先勇, 周方洁. 用傅立叶红外变换实现在线溶解气体分析的研究[J]. 变压器, 2002, 39(6):

- 29-32.
- [5] Yu F T, Yin S. Fiber optic sensor [M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [6] 靳伟, 廖延彪, 张志鹏. 导波光学传感器原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] Yu Hongbo, Liao Yanbiao, Jin Wei. Review of the optical fiber sensor [J]. Laser and Infrared, 2002, 32 (3): 193-196.
- [8] Jin W, Stewart G, Culshaw B. Absorption measurement of methane gas with a broadband light source and interferometric signal processing [J]. Optics Letters, 1993, 18 (6): 1364-1366.
- [9] Shimose Y, Okamoto T, Maruyama A, et al. Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength tunable DFB LD [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 3 (1): 178-181.
- [10] 王艳菊, 王玉田, 张玉燕. 差分吸收式甲烷气体传感系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (12): 1647-1650.
- [11] 王艳菊. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- [12] 王艳菊, 王玉田, 王忠东. 用于气体差分检测的微弱信号处理电路的研究 [J]. 传感器与微系统, 2006, 6 (25): 13-15.
- (收稿日期: 2015-04-13) **EA**

(上接第65页)

既保证与原装接地线全面接触, 又使新网状接地线稳固, 然后再回填石籽, 夯实电杆。

再通过计算模式, 可以进一步看到网状接地线的作用。图3中列举的8根接地线, 形成并联关系, 把原一根接地线的对地电阻变成了8个分支对地电阻, 其新的并联电阻值 $R_{\text{总}}$ 可按式计算

$$1/R_{\text{总}} = 1/R_1 + \dots + 1/R_8$$

所以, 新的并联电阻值 $R_{\text{总}}$ 能将原大地的整体电阻降低8倍, 例如岩石初测电阻高达40 Ω , 经处理后的总阻值为 $R_{\text{总}} = 40 \Omega / 8 = 5 \Omega$ 。远小于国家的10 Ω 标准, 所以满足指标要求, 更证实经改造后的网状接地线对雷电释放将产生明显作用, 并当双面根杆塔同时安装时, 效果会更好。

化学材质的引用

在敷设电杆和网状接地线的时候, 还可引入化学降阻剂, 以进一步增强雷击过电流、过电压的排解释放能力。

据考查, 诸如GH-2型等用化学材料制成的长效降阻剂, 便有很好的功效。该类降阻剂由石墨、膨润土、固化剂、润滑剂和导电水泥等制成, 电阻值极低, 仅为0.5 Ω 左右, 为岩石等高阻地质体的几十分之一。

实施中, 将降阻剂随同杆塔、网状接地线一起埋入地下, 加之降阻剂为软体材料, 在挤压中可向岩石、石籽空隙中渗透, 起到填充作用, 使导体更加饱和, 功能更加明显。

使用时, 降阻剂紧紧包围在金属导体的周围, 对地下氢、氧、酸和碱等腐蚀性物质自发产生防护作用, 故还使金属接地线的寿命得到大幅延长。

结束语

本文在揭示雷电形成与危害的基础上, 着重设计了网状式接地线的改造措施。新器件是在杆塔安装中基本不增加工作量的情况下, 成倍降低接地电阻值, 并同时引入化学降阻剂, 更加提升导电率。由此, 能够将雷击过电流、过电压有效排解和释放, 进一步提高防雷保护作用, 增强电力网络安全稳定性。

参考文献

- [1] GB 50057—94 《建筑物防雷设计规范》[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [2] 韩晋平, 王晓丰, 马心良, 等. 10 kV架空绝缘导线雷电过电压与防雷综合措施研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (11).

(收稿日期: 2015-04-01) **EA**