基于光纤光栅传感器的变压器油中微水在线监测

针对传统变压器油中微水监测存在的不足，提出了一种以光纤光栅传感器为基础的变压器油中微水监测方法，并据此设计了相应的微水在线监测系统。详细阐述了以聚酰亚胺薄膜为湿敏涂层的光纤光栅湿度传感原理和温湿度测量方法，重点对变压器油中微水间接测量进行分析。讨论了系统装置的工作过程和相关参量的获取方法，实验结果对比表明该方法对于变压器油中微水含量的实时监测是行之有效的。

刘春鹏[1,2] 姚毅[1,2] 贾金玲[2,3] 梅幼亚[1,2]/1.四川理工学院自动化与电子信息学院 2.人工智能四川省重点实验室 3.四川理工学院计算机学院

刘春鹏/硕士研究生

关键词/Keywords
光纤光栅传感器·
变压器油·
温湿度传感·
微水监测·

电力变压器是保证电力系统稳定供电的基础。变压器油中微水会引起油绝缘性能的劣化，缩短变压器的使用寿命，危害电力变压器的安全、可靠运行。在强电场作用下，溶解在变压器油中的微水由于水分子所带有的极性，易向绕组周围聚集[1]，致使绕组的纸质绝缘受损，严重时会引起绕组绝缘击穿，造成变压器设备烧毁等重大故障。另外，油中微水在一定程度上可以反映变压器内部的故障情况，对于变压器的故障诊断具有十分重要的意义[2]。

目前变压器油中微水在线监测方法主要有介电常数法、射频法和红外光谱法，其中研究较多的是介质常数法。与传统的离线法相比，在线监测法无须定期取定量的油样进行复杂的操作和费时的分析，可以避免人为因素的影响[3]。但在实际应用中，上述在线监测方法又暴露出了许多缺点。射频法对于微量水分的测量准确度较低。红外光谱法受测试仪的工作时间影响较大，可能会因工作曲线的偏移而影响测量结果的准确度[4]。介电常数法是通过电容相对介电常数因微水变化而实现的，等效于电容式湿度传感器。这种方法目前研究比较多的是用高分子材料做成的电容式湿度传感器，但是在高湿条件下其误差较大，而且容易受环境温度影响，抗污能力差。近年来，得益于光纤和光集成技术的飞速发展，利用光学原理研制而成的光学湿度传感器受到极大关注并被广泛应用于工业实践中[5]。基于此，本文提出了基于光纤光栅传感器的变压器油微水在线监测。

光纤光栅湿度传感器原理

光纤光栅传感器是通过光纤布拉格波长的调制来获取传感信息的，为了有效地解决普通光纤光栅对湿度变化敏感性差的问题，需要在光纤的外表面涂覆一层高分子湿敏材料。当湿度变化时，光纤表面湿敏材料的膨胀会引起光纤光栅的应变响应，从而引起反射波长发生变化[6]。

光纤光栅的波长漂移量是由应变和温度共同作用引起的，为了得到更为准确的湿度值，还要确定温度变化量。光纤光栅湿度传感器的原理结构如图1所示，其中，FBG_1涂覆聚酰亚胺湿敏薄膜，能够同时对温度、湿度变化敏感；FBG_2仅对温度敏感，两者串联封装成光

人工智能四川省重点实验室项目（2014RYJ01），四川省教育厅重点项目（201ZA123），四川理工学院研究生创新基金项目（y2014007）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

纤光栅传感器。根据FBG敏感测量的温度和湿度变化量转变成的谐振反射波长位移，可计算出温度、湿度变化值[7]。

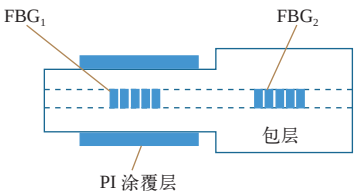


图1　光纤光栅湿度传感器原理结构

由光纤光栅衍射条件和耦合模理论可知，FBG谐振反射波长$\lambda_{Bi}(i=1,2)$满足以下关系

$$\lambda_{Bi}=2n_{eff}\Lambda_i \tag{1}$$

式中，n_{eff}为FBG的有效折射率；Λ_i为FBG的光栅周期。

研究表明，温度和湿度的变化会导致光纤光栅n_{eff}和Λ_i的变化，从而引起光栅谐振反射波长λ_{Bi}的漂移。对式（1）进行全微分可得

$$\mathrm{d}\lambda_{Bi}=2\Lambda_i\,\mathrm{d}n_{eff}+2n_{eff}\,\mathrm{d}\Lambda_i \tag{2}$$

式（1）和式（2）联立得

$$\frac{\mathrm{d}\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi}}=\frac{2\Lambda_i\,\mathrm{d}n_{eff}+2n_{eff}\,\mathrm{d}\Lambda_i}{2n_{eff}\Lambda_i}=\frac{\mathrm{d}n_{eff}}{n_{eff}}+\frac{\mathrm{d}\Lambda_i}{\Lambda_i} \tag{3}$$

式中，$\mathrm{d}n_{eff}/n_{eff}$为光纤光栅有效折射率的变化，由湿度变化量$\Delta H$和温度变化量$\Delta T$分别引起的弹光效应和热光效应导致。$\Delta H$引起的湿膨胀和$\Delta T$引起的热膨胀致使光纤光栅的轴向应变发生变化，从而引起Λ_i发生变化[8]，即$\mathrm{d}\Lambda_i/\Lambda_i$。

为便于分析，式（3）可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi}}=\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}}+\frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_i} \tag{4}$$

对于FBG_1，能同时感受温度和湿度变化。由于表面涂覆聚酰亚胺和光纤之间的共同作用，湿度变化引起光纤光栅轴向应变，由弹性理论及轴向应变、应力平衡关系可知

$$\left.\frac{\Delta\Lambda_1}{\Lambda_1}\right|_H=C_1\beta\Delta H \tag{5}$$

式中，$C_1=\dfrac{E_H(r_H^2-r_F^2)(1-2\mu_F)}{(1-2\mu_H)r_F^2E_F+(1-2\mu_F)(r_H^2-r_F^2)E_H}$；$\beta$、$\mu_H$和$E_H$分别为涂覆聚酰亚胺湿敏材料的湿膨胀系数、泊松比和杨氏模量；μ_F、E_F为光纤的泊松比和杨氏模量；r_H、r_F为湿敏涂层和光纤包层的横截面积半径[9]。

综合考虑弹光效应热、光效应及热膨胀等因素引起的轴向应变，FBG_1的谐振波长相对变化为

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}}&=C_1(1-P_e)\beta\Delta H+[C_1(\alpha_H-\alpha_F)+\xi]\Delta T\\&=K_{T1}\Delta T+K_{H1}\Delta H\end{aligned} \tag{6}$$

式中，P_e、ξ分别为有效的光纤弹光系数和热光系数；α_H、α_F分别为聚酰亚胺和光纤的线膨胀系数；K_{T1}、K_{H1}分别为光纤光栅温度、相对湿度的灵敏度系数[10]。

对于仅受温度变化影响的FBG_2，可取$\beta=0$，得$K_{H2}=0$，因此，谐振波长位移变化为

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}}=[(1-P_e)\alpha_F+\xi]\Delta T=K_{T2}\Delta T \tag{7}$$

式中，K_{T2}为FBG_2的温度灵敏度系数。联立式（6）和式（7），即可求出相对湿度变化值ΔH和温度变化值ΔT。

变压器油中微水的间接测量

鉴于变压器油中微水含量的重要性，我国对变压器投运前后油中微水含量具有严格的规定与要求。国家标准GB/T 7595—2000规定的油中微水含量的质量标准如表1所示。

表1　变压器油中微水含量的质量标准

电压等级/kV	投运前/（mg/L）	投运后/（mg/L）
330～500	≤10	≤15
220	≤15	≤25
≤110及以下	≤20	≤35

目前直接测量变压器油中微水含量在工程实践中尚存在较大难度，不易实现，而且油中微水溶解度的变化也会影响其测量的准确度。间接地通过变压器油的温度和上部空间相对湿度去计算油中微水含量则是一种可行的方法。

在封闭的变压器油箱中，含有微水的变压器油会与密闭环境之间进行水分子交换，最终达到平衡，平衡时油中水分子与空气中的相对湿度有如下线性关系

$$W=SR_H \tag{8}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中，W为油中水分含量，mg/L；S为油中水分溶解度，mg/L；R_H为相对湿度。分析可知，只要求出油中水分溶解度S，结合光纤光栅传感器测得相对湿度便能得出油中微水含量W。根据相关资料，变压器油中水分的溶解度为

$$\lg S = A - \frac{B}{T} \tag{9}$$

式中，A为溶解度系数，一般取7.09～7.42；B也为溶解度系数，取1.567～1.670；T为绝对温度，$T=t+237.5$。

变压器油中微水在线监测系统设计

变压器油中微水在线监测系统不仅要实现对微量水分的准确测量，还应具有一定的抗干扰能力。系统能将监测到的数据实时传输给监控平台，为故障诊断提供分析依据。

变压器油中微水以不同形式存在于变压器油中，通过变压器油温度以及油箱内相对湿度的变化可以利用上述公式换算出油中微水含量。光纤光栅传感器监测变压器油中微水正是依据这一关系设计，系统构成如图2所示。

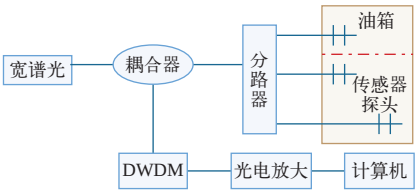


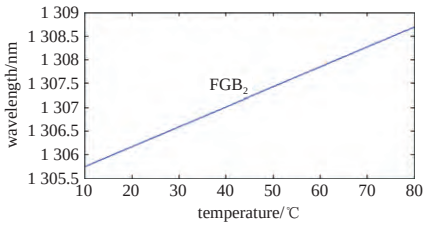
图2　变压器油中微水在线监测系统结构

系统主要由光源、传感器、信号传输和数据分析等部分组成。宽谱光从光源发出后进入光耦合器，光耦合器（Optical Coupler）亦称光电隔离器，它以光为媒介传输电信号，信号单向传输，输入、输出间互不影响。宽谱光经耦合器输出，由分路器分多路进入光纤光栅传感器。宽谱光作用于光纤光栅后的反射光再经耦合器到达密集型光波复用（DWDM），DWDM能组合一组光波长用一根光纤进行传送，DWDM 的每一个通道对反射光进行滤波，滤波后所得的光谱包含了光纤光栅的谐振反射中心波长信号。DWDM处理后的每一路光强信号经过光电放大和高速采样，接入计算机进行数据处理，以此完成光纤光栅谐振波长的测量。同时可在计算机编制相应数据处理程序，设置上位界面，实时监测微水含量变化。为达到变压器油中微水的有效测量，在变压器油箱内不同位置布置传感器探头，油箱内温湿度变化会引起光栅波长位移，按式（6）、式（7）计算得到温、湿度变化的具体数据。

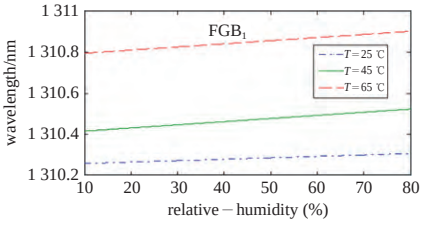
实验结果及分析

1. 光纤光栅湿度传感器的温湿度特性

为得到变压器油的准确温度及湿度，必须对传感器的特性进行测定，实验根据多次测量得出温湿度与谐振反射波长的关系，如图3所示。



（a）温度与谐波反射波长



（b）湿度与谐波反射波长

图3　FBG特性曲线

从图3中可以看出，温度和湿度与谐波反射波长呈良好的线性关系。根据拟合曲线便可得到温度和相对湿度值。

2. 变压器油中水溶解度系数的获取

水分在变压器油中的溶解度是随着温度的变化而变化的，油中水分的溶解度是关于温度的函数，不同温度下的含水量与相对湿度有着一定的关系。由以上分析可知，在得到温度和相对湿度值后还需知道变压器油的水溶解度系数A、B，才能计算得到油中微水含量值。相关方面的专家给出了油中水溶解度系数A、B的不同值，但是不同的变压器油水溶解度系数不同，需要在实验中多次测量得到。分组取变压器油试样，用上述传感

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

器测量出温度值，再用卡尔－费休法测定微水含量，根据这些数据，采用递归最小二乘算法求出油中水溶解度系数*A*为7.3，*B*为1 630。

在满足出厂标准的变压器油中，水分含量相对较少，微水值符合国家标准。当油中水分含量增加时，可通过油箱内空气湿度的变化反映出微水含量的变化趋势，也可通过特殊封装浸入在油中的光纤光栅传感器测定温度和湿度值了解微水改变情况。

3. 实验结果分析

用文中所设计的微水在线监测系统对变压器油试样在不同温度下进行实验测量，测量结果如表2所示。其中监测到的温度和湿度数据传输到计算机，计算机通过式（8）和式（9）的计算可得到变压器油中微水含量值，并进行存储，经过多次测量，由计算机软件绘制变压器油中微水含量监测曲线。

表2　变压器油中微水含量在不同温度下的实验结果

温度/℃	溶解度/（mg/L）	相对湿度	微水测量值/（mg/L）	微水滴定值/（mg/L）	相对误差（%）
25	68.070	0.311	21.2	21	0.95
30	83.777	0.283	23.7	24	1.25
35	102.416	0.255	26.1	26	0.37
40	124.402	0.235	29.2	29	0.95
45	150.186	0.205	30.8	31	0.65
50	180.261	0.180	32.4	33	1.82

在线监测系统与测量得到的微水含量与卡尔－费休法得到的测量结果相比，最大绝对误差不超过2 mg/L。而且由表2中的最大相对误差可知，系统能满足测量准确度要求，符合国家标准的规定，达到了现场实际使用的准确度要求。而且系统还可以通过换算得到水分活度这个重要参量，这也是判断变压器运行状况的一个依据。

结束语

光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、性能稳定等优点，在工业中已有成熟应用，但国内外通过光纤光栅传感器来间接测量变压器油中微水含量的研究还很少。本文以光纤光栅传感器为基础，通过湿度和温度的监测换算出油中微水含量，设计了相应的在线监测系统。实验结果验证了系统的可靠性，可以实时地反映变压器油中微水含量，能够及早发现一些潜伏性故障，且误差符合标准规定。由于变压器内部结构复杂，环境条件特殊，在实际应用中还要重点考虑并选择最优的光纤涂覆湿敏材料聚酰亚胺膜厚以及传感器的封装形式，在电力变压器正式投入使用之前，仍有许多相关的技术问题需要解决。

参考文献

[1] 王越明，王朋，杨莹．变压器故障诊断与维修[M]．北京：化学工业出版社，2008．

[2] 陈伟根，甘德刚，刘强．变压器油中水分在线监测的神经网络计算模型 [J]．高电压技术，2007，33 (5)：73-78．

[3] 甘德刚，青晨唯，刘凡．基于最小二乘法的变压器油中微水含量在线监测方法 [J]．高压电器，2012，48 (1)：48-52．

[4] 吴勇，王彩云，夏志新．液压油含水量的红外光谱测量方法研究 [J]．中国矿业大学学报，2000，29 (2)：195-198．

[5] 吴晓庆，饶瑞中．湿度起伏对可见光波段折射率结构常数的影响 [J]．光学学报，2004，24 (12)：1599-1602．

[6] 丁宏伟，金永君．光纤布拉格光栅湿度传感器研究 [J]．科技导报，2008，26 (22)：54-57．

[7] 韩悦文，陈海燕，黄春雄．光纤技术在湿度传感器中的应用 [J]．光纤与电缆及其应用技术，2008 (6)：5-8．

[8] 彭仕玉，元秀华，张国云．光纤光栅传感器温度和轴向应变灵敏度的研究 [J]．光通信研究，2003，116 (2)：46-48．

[9] 张向东，李育林，彭文达，等．光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现 [J]．光子学报，2003，32 (10)：1166-1167．

[10] 盛德仁，黄雪峰，陈坚红，等．一种基于布拉格光纤光栅测量湿蒸汽两相流湿度场的新方法 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (5)：137-138．

（收稿日期：2015－01－04）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net