

漫反射光谱法检测变压器绝缘纸聚合度

蔡德华¹, 李胜利², 吴垂明¹, 喻培元²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电公司, 广东 江门 529000; 2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 检测变压器绝缘纸聚合度是判断其固体绝缘老化程度最直接有效的方法, 实验室制取了53个不同聚合度的变压器绝缘纸样, 采用国标法(粘度法)检测其聚合度。通过漫反射光谱仪对所有纸样进行扫描, 结合偏最小二乘回归法建立了绝缘纸聚合度与光谱参数间的定量模型, 模型相关系数为0.951 9, 预测均方根误差RMSEP为67.5。该方法检测绝缘纸聚合度的精密度和准确度基本满足工程应用要求, 为变压器固体绝缘状态提供了一种快捷、无损的检测方式。

关键词: 变压器绝缘纸; 聚合度; 漫反射光谱; 偏最小二乘回归

Methods to Measure Polymerization Degree of Transformer Insulating Paper Based on Diffuse Reflection Spectroscopy

CAI Dehua¹, LI Shengli², WU Chuiming¹, YU Peiyuan²

(1. Jiangmen Power Supply Company, Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong Jiangmen 529000, China;
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is an effective way to judge the aging degree of power transformer insulation paper by detecting the polymerization degree(DP). 53 samples are made and their DPs are determined by standard method(viscometric method). A quantitative model is established by using diffuse reflectance spectroscopy and partial least squares (PLS), with the correlation coefficient of 0.951 9 and RMSEP of 67.5. Precision and accuracy of spectroscopy method can basically meet the requirement of engineering application. This paper provides a rapid and non-destructive way for judging the aging degree of power transformer.

Key words: transformer insulating paper; polymerization degree; diffuse reflection spectroscopy; partial least squares regressivity

0 引言

电力是关系到整个国家安全与稳定的重要行业, 大型电力变压器^[1-2]是电力输配过程中至关重要的设备, 常用的油浸式变压器在运行过程中固体绝缘纸会受到各种因素^[3-5]的作用而不断老化, 严重影响了变压器的使用寿命, 因此对变压器固体绝缘情况的判断意义重大^[6-7]。同时, 变压器在生产加工后也需要进行一定的烘干除水处理, 会降低绝缘纸聚合度, 因而有必要对处理后纸样聚合度进行检测, 以判断其初始绝缘老化状态。

目前对变压器固体绝缘老化检测的主要方法可分为: 间接检测和直接检测。间接检测的主要手

段是利用检测变压器油中糠醛浓度^[8-10]的变化来实现, 该类方法属于一种平均效应的检测手段, 其反映的是变压器中固体绝缘的平均老化水平。但实际变压器中, 最高老化程度才是决定固体绝缘寿命的关键因素, 局部的固体绝缘损坏^[11-12], 就足以使变压器失效。实际运行变压器经常会出现温度分布不均匀的情况, 通过这种间接检测手段, 无法准确评估固体绝缘的实际老化情况。

直接检测手段是一种有损手段, 该方法是通过采集纸样, 分析所采纸样的机械强度^[13]或聚合度^[14]来判断绝缘纸的老化程度, 相关标准^[15]也明确给出了老化的直接判据。但这种直接手段会损坏固体绝缘, 对实际运行的变压器造成损害。

变压器绝缘纸样聚合度检测的标准方法为粘度法, 采用该方法检测纸样, 其溶解过程就需要一

天时间;而光谱法^[16-18]检测则相对方便,不需要复杂的预处理过程,时间较短,一般仅需几分钟,而且光谱法在检测时不会破坏变压器绝缘纸;可见光谱法相对国标法具有较为明显的优势。变压器绝缘纸老化的光谱定量分析方面目前国内研究较少,文[19]进行了初步的定性分析,研究发现绝缘纸在 2 989 nm 处有 O-H 吸收峰。文中采用高效光学收集系统和最新光谱信息分析手段,能较好克服传统分析方法的缺点,实现聚合度高效快速无损的测量。

1 实验原理

当一束光照在物体上,光与物体内部结构相互作用会产生散射、漫透射、吸收、漫反射等效果。对于固体样品,较多的采用漫反射原理来实现光谱信息的获取;漫反射法虽然使用方便,但相对于透射法,其光谱数据要复杂很多,很难找出简单的线性关系来描述漫反射光强与样品含量的关系,一般应用较多的是 Kubelka-Munk 定律

$$A = \lg \left[1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\left(\frac{K}{S} \right)^2 + \frac{2K}{S}} \right] \quad (1)$$

式(1)中: A 为漫反射吸光度; K 为吸光系数; S 为反射系数。

实验用光谱系统示意图见图 1。

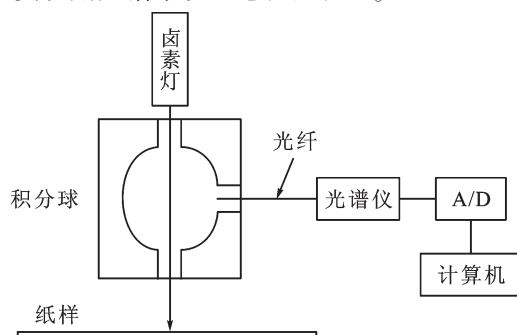


图 1 光谱系统示意图

Fig. 1 Schematics of spectroscopic systems

2 实验方法与条件

2.1 实验仪器与试剂

仪器: Maya2000pro 微型光谱仪,光谱范围为 200~1 130 nm(美国海洋光学公司);NIRQUSET-512 微型光谱仪,光谱范围为 887~2 545 nm(美国海洋光学公司);ISP-REF 微型光源(美国海洋光学公司);乌氏粘度计(上海上博玻璃仪器有限公司);超纯水仪(美国 BARNSTEAD);超级恒温水浴锅(常州国华);磁力搅拌器(北京医用离心机厂);数控超声波清洗器(昆山超声仪器有限公司)。

试剂:铜乙二胺(99.5%标准样品);硝酸(63.0%

标准样品);丙酮(99.5%标准样品)。

2.2 纸样制取

将保定天威集团有限公司提供的新变压器绝缘纸样放入烘箱在不同温度下进行不同时间的加热老化;老化温度分别为 90、110、130、150、180 ℃,老化时间为 1~10 天。老化得到 53 个不同聚合度的绝缘纸样,将老化后的纸样分为两组,一组用于聚合度的国标法检测,一组用于光谱信息提取。

2.3 聚合度检测

根据国标 GB/T 29305—2012《新的和老化后的纤维素电气绝缘材料粘均聚合度的测量》^[20]测定绝缘纸样聚合度,绝缘纸样的溶解液为 1 mol/L 的铜乙二胺,在 20 ℃恒温水浴条件下分别检测溶解纸样与空白样品流经乌氏粘度计的时间,得到溶解纸样的增比粘度即可由相关公式算出其聚合度,每个纸样检测两次。

2.4 光谱采集

文中采用的光源为美国海洋光学公司生产的 ISP-REF 型光源,光源置于反射积分球内部;光谱仪分别为 Maya2000pro 和 NIRQUSET-512,分别取前者的 200~1 000 nm 波段和后者的 1 000~2 545 nm 波段组成一个完整的光谱图 200~2 545 nm。以标准反射白板作为空白参考,纸样无需进行任何预处理直接扫描,每个样品扫描 5 次进行数据平均。

2.5 光谱处理与数据分析

光谱分析软件采用美国赛默飞世尔公司的 TQ analyst。随机选取 40 个纸样作为校正集,10 个纸样作为预测集。光谱处理主要包括平滑、微分、中心化、多元校正散射以及不同波段选择等^[21-22],通过比较校正和预测相关系数 RC 和 RP ,校正均方根误差 ($RMSEC$),预测均方根误差 ($RMSEP$) 评价模型性能来选择较优处理方法。

3 实验结果与分析

3.1 样品集聚合度参考数据

根据国标 GB/T 29305—2012 测定的 53 个纸样聚合度范围为 157~992,平均值为 539,从新纸的 1 000 左右到严重老化的 150 左右,聚合度覆盖面较广,差异明显,具有较好的代表性。

3.2 参考数据精密度

绝缘纸聚合度的参考数据采用国标 GB/T 29305—2012 进行测量。国标 GB/T 29305—2012 要求每个样品两次流经粘度计的时间误差在 1% 以内。检测误差主要有几个来源:读数时人员的主观误差,溶解时搅拌时间,溶解时氧气含量,称取的纸

样量等。这些因素都有可能导致检测结果误差偏大,在粘度法检测过程中要求严格控制这些条件以确保检测结果的准确性。文中53个纸样两次平行检测的时间误差大部分在1%以内,仅有5个样品的误差超过1%,但都在2%以内。参考数据基本满足要求,可以用来建模。每个样品的最终检测结果为两次平行检测的平均值,以进一步减小检测误差。

3.3 近红外光谱特征与模型建立

纸样的全波段漫反射光谱图见图2。图2中有许多吸收峰,如可见光谱段430 nm处的吸收峰,这主要体现的是纸样颜色特性,纸样呈黄色,且聚合度越小颜色越深,因而吸光度也越大;1 500 nm为O-H键一级倍频振动吸收峰,1 930 nm和2 100 nm处为O-H和C-O二级倍频合频振动吸收峰。

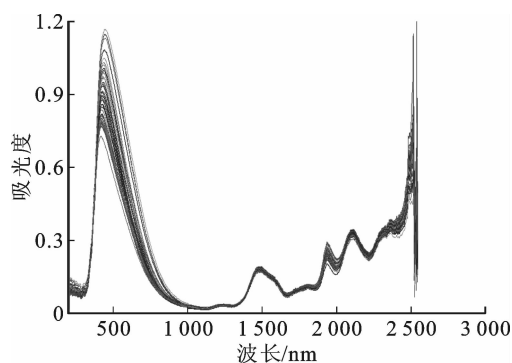


图2 纸样光谱图

Fig. 2 Spectra of paper samples

采用不同处理方法建模,通过比较得知,原始光谱7点平滑模型最优。上述条件下不同波段的模型见表1。

表1 不同波段所建模型的分析结果

Table 1 Results for different wave bands

波段/nm	因素	RC	RP	RMSEC	RMSEP
200~350	2	0.249 4	0.365 8	255.0	221.0
350~1 000	4	0.940 9	0.953 1	89.0	73.9
1 000~1 100	1	0.383 6	0.290 6	243.0	227.0
1 100~1 600	4	0.932 8	0.918 4	94.8	130.0
1 600~1 800	3	0.746 9	0.103 4	175.0	267.0
1 800~2 200	3	0.936 6	0.952 1	92.1	69.1
2 200~2 545	2	0.280 1	0.158 6	252.0	213.0

从表1可以看出,200~350、1 000~1 100、2 000~2 545 nm 3个波段各自所建模型误差较大,可能是因为光谱仪两端波段受环境噪声等干扰较大;1 600~1 800 nm波段的模型拟合效果一般,预测效果也较差,出现过拟合情况;350~1 000、1 100~1 600、1 800~2 200 nm 3个波段各自的模型拟合度都较好,与图2的吸收峰情况基本吻合。因此,笔者

最终选择350~1 000、1 100~1 600、1 800~2 200 nm 3个波段进行建模,最终建模结果:5个主成分,校正和预测相关系数RC和RP分别为0.951 9和0.964 4,校正和预测均方根误差RMSEC和RMSEP分别为73.4和67.5,模型的校正与预测性能均较好。

3.4 模型检测结果精密度和准确度

采用上面所建立的绝缘纸聚合度预测模型,分别对3个不同聚合度的纸样进行了聚合度测量,这3个不同聚合度纸样分别代表了新纸、使用中期纸和老化后的纸,具有一定的代表性。3种纸样每个分别检测4次,4次的标准偏差以及漫反射光谱法预测值与国标法检测值的相对偏差见表2。

表2 漫反射光谱法的精密度与准确度

Table 2 Accuracy & precision of spectroscopy method

样品编号	预测值	国标参考值	4次预测值相对偏差/%	预测值与参考值相对偏差/%
1	254.4	316.5	4.7	19.6
	273.0			13.7
	265.6			16.1
	284.5			10.1
	925.0			11.3
2	904.8	831.0	2.8	8.9
	870.7			4.8
	923.4			11.1
	503.8			5.5
	513.0			3.7
3	520.2	532.9	3.3	2.4
	543.6			2.0

从表2可以看出:3种纸样各自4次预测值的标准偏差全部在5%以内,说明漫反射光谱法检测结果的精密度基本满足要求;当聚合度较大时,预测值与国标检测值之间的偏差较小,处于聚合度中位的纸样3,偏差最小;这可能是由于在制备的纸样中,处于聚合度中位的纸样数最多,数据点密集。预测值与国标检测值之间的偏差全部在20%以内,也基本满足工程应用的准确度要求。

4 结论

1)变压器绝缘纸样的聚合度与其漫反射光谱参数之间存在一定的线性关系,不同波段的吸光度能够反映其聚合度信息;

2)采用350~1 000、1 100~1 600、1 800~2 200 nm 3个波段7点平滑光谱结合偏最小二乘法所建定量模型最优,校正和预测相关系数RC和RP分别为0.951 9和0.964 4,校正和预测均方根误差RMSEC和RMSEP分别为73.4和67.5;

3)模型预测结果与国标法相比有一定偏差,但该检测方法操作简便、检测速度快,且其精密度与准确度基本能满足工程应用的要求,因此文中研究的检测方法具有一定的工程应用价值,为快速判断变压器固体绝缘老化状况提供了新的思路。

参考文献:

- [1] WASHABAUGH A P, VON GUGGENBERG P A, ZAHN M, et al. Temperature and moisture transient flow electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation using a couette facility[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. [S.l.]:IEEE, 1991:867-870.
- [2] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5):1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5):1-12.
- [3] LEIBFRIED T, KACHLER A J, ZAENGL W S, et al. Ageing and moisture analysis of power transformer insulation systems[M]. Paris: CIGRE Session, 2002:1-6.
- [4] 刘玉仙. 油纸绝缘变压器中水分的聚积及其对热老化寿命的影响[J]. 变压器, 2004, 41(2):8-13.
LIU Yuxian. Water accumulation in oil-paper insulation transformer and its influence to life time[J]. Transformer, 2004, 41(2):8-13.
- [5] EMSLEY A M, XIAO X, HEYWOOD R J, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers Part 3: Effects of oxygen and water on ageing in oil[J]. IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2000, 147(3):115-119.
- [6] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7):187-193.
HAO Jian, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Aging status assessment of power transformer oil paper insulation by frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7):187-193.
- [7] 周远翔, 沙彦超, 陈维江, 等. 变压器油与绝缘纸板电导特性研究[J]. 电网技术, 2013, 39(9):2527-2533.
ZHOU Yuanxiang, SHA Yanchao, CHEN Weijiang, et al. Conduction characteristics in transformer oil and electrical insulation paper[J]. Power System Technology, 2013, 39(9):2527-2533.
- [8] SHANG Y, YANG L, GUO Z J, et al. Assessing aging of large transformers by furfural investigation[C]//Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. [S.l.]:IEEE, 2001:272-274.
- [9] 张欲晓, 李胜利, 李婷, 等. 变压器油中糠醛萃取浓缩新技术[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1390-1395.
ZHANG Yuxiao, LI Shengli, LI Ting, et al. Study on new technology of furfural extraction and concentrate in transformer oil[J]. Power System Technology, 2014, 38(5):1390-1395.
- [10] MORAIS R M, MANNHEIMER W A, CARBALLEIRA M, et al. Furfural analysis for assessing degradation of thermally upgraded papers in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(2):159-163.
- [11] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2):29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2):29-35.
- [12] 董宝华, 何平. 油浸式电力变压器的局部放电测量试验(上)[J]. 变压器, 2008, 45(8):33-38.
DONG Baohua, HE Ping. Partial discharge test of oil-immersed power transformer(part 1)[J]. Transformer, 2008, 45(8):33-38.
- [13] EMSLEY A M, HEYWOOD R J, ALI M, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers Part 4. Effects of ageing on the tensile strength of paper[J]. IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2000, 147(6):285-290.
- [14] KACHLER A J, HOHLEIN I. Aging of cellulose at transformer service temperatures Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2):15-21.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 984—2005 油浸式变压器绝缘老化判断导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
National Development and Reform Commission. DL/T 984—2005 Guide for the diagnosis of insulation aging in oil-immersed power transformer[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [16] RODRIGUEZ D M, AGUILAR F J, WROBEL K, et al. Spectrophotometric assay for copper and iron in transformer oil using partial least squares regression (PLS2)[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6):1272-1277.
- [17] 张欲晓, 李胜利, 喻培元, 等. 一种光谱法检测油中糠醛的初步研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8):47-52.
ZHANG Yuxiao, LI Shengli, YU Peiyuan, et al. Preliminary study on spectrometric method for measuring furfural content in transformer oil[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8):47-52.

- [18] 宋玉侠,罗传勇,阎雪梅,等. 粘度法测定电工用纸/纸板聚合度的研究及应用[J]. 绝缘材料,2012(1):65-68.
SONG Yuxia, LUO Chuanyong, YAN Xuemei, et al. Measurement of polymerization degree of paper/paperboard by viscometry for electrical engineering[J]. Insulating Materials, 2012(1):65-68.
- [19] 廖瑞金,周旋,杨丽君,等. 变压器油纸绝缘热老化过程的中红外光谱特性[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, 34(2):1-6.
LIAO Ruijin, ZHOU Xuan, YANG Lijun, et al. The mid-infrared spectra characteristic of the transformer oil-paper insulation in thermal ageing process[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2011, 34(2):1-6.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 29305—2012 新的和老化后的纤维素电气绝缘材料粘均聚合度的测量[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 29305—2012 Measure of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [21] 闵顺耕,李 宁,张明祥. 近红外光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(10): 1205-1209.
MIN Shungeng, LI Ning, ZHANG Mingxiang. Outlier diagnosis and calibration model optimization for near infrared spectroscopy analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(10): 1205-1209.
- [22] 赵振英,林 君,张怀柱. 近红外光谱法分析油页岩含油率中异常样品识别和剔除方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1707-1710.
ZHAO Zhenying, LIN Jun, ZHANG Huaizhu. Research on outlier detection methods for determination of oil yield in oil shales using near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1707-1710.
- 蔡德华(1965—),男,高级工程师,从事电气设备管理工作。
- 李胜利(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向放电等离子体理论和应用研究、电力系统特种检测技术的研究等(通信作者)。
- 吴垂明(1981—),男,硕士研究生,高级工程师,目前负责变电一次设备管理。