

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.017

变压器绝缘纸中酸值含量测试方法研究

连鸿松

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007)

摘要:文中在实验室条件下通过研究确定了一套测试变压器绝缘纸中酸值含量的规范方法。对比各种试验手段,提出测量酸值的核心步骤是利用纯水对绝缘纸中酸值进行萃取,对萃取液采取KOH溶液滴定的方法计算酸值,考虑空白溶液和纸中残留变压器油中酸并对结果进行修正。基于文中提出的方法,对变压器油纸老化实验中的纸样酸值进行测量,结果表明,纸中酸值与聚合度随时间变化速率相关性较好,进一步验证了该方法的准确性。

关键词:变压器;绝缘纸;酸值;萃取;老化

Research on Test Method of Acid Value Content in the Transformer Insulation Paper

LIAN Hongsong

(Electric Power Research Institute, SGCC, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In this paper, a set of standard method for measuring the acid value of transformer insulation paper is determined under laboratory conditions. Through a variety of experimental means of comparison, the core step of measuring acid value is to extract the acid value of the insulating paper with pure water. The KOH solution titration method is used to calculate the acid value of extract. The acid both in the solvent and residual oil in the paper is considered to correct the results. At the same time, with the proposed method, the acid value of the paper in the aging test of transformer oil-paper is measured. It is concluded that the correlation between the acid value and the degree of polymerization is strong, verifying the accuracy of the proposed method.

Key words: transformer; insulation paper; acid value; extraction; aging

0 引言

油浸式电力变压器的内绝缘系统主要是由绝缘纸(板)及绝缘油组成。绝缘纸(板)主要成分是纤维素,在变压器长期运行过程中,纤维素会发生高温降解(>100 ℃)、氧化分解和酸催化水解,产生乙酸、甲酸及乙酰丙酸等小分子羧酸,绝大多数小分子酸被吸附在绝缘纸中^[1-4]。羧酸是亲水性酸,极易溶于水,与水结合电离出氢离子(H⁺),又促进绝缘纸的水解进程^[5-6]。因此,纸中的水溶性酸值与绝缘纸老化程度存在相关性。目前为止,测量纸中亲水性小分子羧酸标准方法尚未统一,运维中有必要建立浸油绝缘纸中酸值的测定方法,为固体绝缘老化评

估提供新的依据。

文[7]中提出使用氢氧化钾(KOH)异丙醇溶液直接滴定,或用纯水萃取纸中酸后再用KOH异丙醇溶液滴定的方法进行纸中酸值测量,但并没有给出具体的测试方法步骤。目前油中酸值的测量方法较为成熟,分为电位滴定法^[8]和BTB法^[9](以BTB指示滴定终点)两大类,BTB法因操作简单、测试结果可靠有效等优点而被广泛应用,油中酸值的测量方法可为纸中酸值的测量提供借鉴。

文中参考现有的纸中和油中酸值测量思路,提出了一种纸中酸值的测量方法,并通过对比试验探索给出了测量的最佳温度、时间等环境条件。同时,开展油纸老化实验,应用文中方法测量纸中酸

收稿日期:2018-07-06; 修回日期:2018-09-13

基金项目:国家自然科学基金(51477051);福建省电力公司科技项目(52130415004D)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477051), Programs for Science and Technology of Fujian Provincial Electric Power Company Limited(52130415004D).

值从而加以验证。

1 酸值测试原理与步骤

目前油中酸值的测量方法较为成熟,分为电位滴定法和指示剂(以 BTB 指示滴定终点)法两大类, BTB 法因操作简单、测试结果可靠有效等优点而被广泛应用,因此,油中酸值的测量方法为纸中酸值的测量提供很好的借鉴。文[10]提出使用 KOH 异丙醇溶液直接滴定,或用纯水萃取纸中酸后再用 KOH 异丙醇溶液滴定的方法进行纸中酸值测量,但并没有给出具体的测试方法流程。GB/T 1545—2008《纸、纸板和纸浆水抽取液酸度或碱度的测定》^[11]对新纸中的酸度或碱度采用沸水萃取方法,但该方法是否适合带油的绝缘纸有待验证。因此,文中综合了国内外相关文献和检测方法,重点实验对比滴定、萃取、前期处理等实验方法与条件,最终完整方案步骤如下。

1)用脱脂棉或干燥滤纸擦除待测绝缘纸表面绝缘油,称取约 1 g(精确至 0.01 g)待测绝缘纸,放入 150 mL 的磨口具塞锥形烧瓶。若被测绝缘纸劣化程度较轻,纸中酸值较小,可酌情增加绝缘纸的称样量。

2)用移液管取 100.0 mL 纯水注入盛有纸样的锥形烧瓶中,塞好瓶口,置于 40 ℃ 烘箱中恒温 24 h。

3)取出盛有纸样的锥形烧瓶,轻轻摇匀后用移液管抽取 25.0 mL 下层水萃取液于另一 150 mL 锥形烧瓶中,然后加酚酞指示剂 3~4 滴。用 0.01~0.02 mol/L 氢氧化钾标准溶液滴定至溶液由无色或浅黄色变为淡浅红色(此时 PH 约为 8.2),记下消耗的氢氧化钾溶液的毫升数,每次滴定时间不宜超过 5 min。

4)另用移液管取 100.0 mL 纯水注入 150 mL 的锥形烧瓶,按 2)、3)步骤进行空白试验。

5)称取 8~10 g(精确至 0.01 g)原浸泡纸样的绝缘油于 150 mL 锥形烧瓶中,按 2)~3)步骤进行纸样吸附的绝缘油中水溶性酸值试验。

6)将萃取后的绝缘纸用 100 mL 石油醚溶液浸泡 1 h,然后放在玻璃器皿上并放入恒温装置中,在 105 ℃ 下烘干 2 h。

7)准确称量已烘干绝缘纸质量(精确至 0.01 g)。

8)绝缘纸水萃取液中的酸值按式(1)计算

$$X_1 = \frac{(V_1 - V_0)C \times 56.1 \times 100}{25} \quad (1)$$

式(1)中: X_1 为绝缘纸水萃取液中的酸值, mgKOH; V_1 为滴定绝缘纸水萃取液所消耗的氢氧化

钾溶液的量, mL; V_0 为滴定空白样所消耗的氢氧化钾溶液的量, mL; C 为氢氧化钾溶液的浓度, mol/L。

9)纸样吸附绝缘油的水溶性酸值按式(2)计算

$$X_2 = \frac{(V_2 - V_0)C \times 56.1 \times 100 \times (m_1 - m_2)}{25G} \quad (2)$$

式(2)中: X_2 为纸样吸附绝缘油的水溶性酸酸值, mgKOH; V_2 为滴定绝缘油水萃取液所消耗的氢氧化钾溶液的量, mL; V_0 为滴定空白样所消耗的氢氧化钾溶液的量, mL; C 为氢氧化钾溶液的浓度, mol/L; m_1 为待测浸油绝缘纸样品质量, g; m_2 为干燥处理后绝缘纸样品质量, g; G 为试验中所取的绝缘油质量, g。

10)绝缘纸中的酸值按式(3)计算

$$X = \frac{(X_1 - X_2)}{m_2} \quad (3)$$

式(3)中: X 为绝缘纸中的酸值, mgKOH/g; X_1 为绝缘纸水萃取液中的酸值, mgKOH; X_2 为纸样吸附的绝缘油中的水溶性酸酸值, mgKOH; m_2 为干燥处理后绝缘纸样品质量, g。

2 酸值测试实验条件的确定

2.1 滴定方法

纸中酸值测量有萃取后正向滴定和直接返滴定方法。反向滴定用过量的碱中和纸中酸性成分,然后再用标准酸溶液进行返滴定。即用水做萃取剂,在水和绝缘纸共存的情况下,加入 KOH 标液将纸中酸性成分完全中和,再用 H_2SO_4 标液进行返滴定至 pH 值为 8.2,但返滴定条件下,测得纸中酸值远大于直接测定萃取液测得的纸中酸值,说明在过量碱的情况下,绝缘纸会发生水解,消耗大量的碱,造成测定结果的偏大。

2.2 萃取试剂

因为纸中小分子酸极易溶于水^[12~13],采用水作萃取剂,这是目前相比于酸碱滴定常用的萃取溶剂如异丙醇和无水乙醇等可能与羧基酸发生酯化反应,纯水作为萃取试剂更为可靠。纯水、异丙醇、无水乙醇的萃取效率见表 1。

表 1 使用不同萃取剂时测得的纸中酸值

Table 1 The acid value of the paper as measured

萃取剂	with different extractants		mgKOH/g
	纯水	异丙醇	无水乙醇
试样 1	1.350 5	0.133 3	0.376 5
试样 2	0.997 9	0.095 6	0.454 8

由表 1 中的实验数据可知,使用纯水萃取的试样中测得的纸中酸值比异丙醇和无水乙醇萃取时

大得多。因此进行纸中酸的萃取时使用纯水更为适合。但是由于纯水的酸值对纸中酸值测量有一定影响,因此在测量中用空白试验扣除。

2.3 萃取温度

分别设计沸水与常温纯水中萃取到绝缘纸中酸值的大小,从而确定最佳萃取温度。

1)沸水热萃取方法试验。参照 GB/T 1545—2008《纸、纸板和纸浆水抽取液酸度或碱度的测定》,加入 100 mL 新煮沸的蒸馏水,置于恒温水浴中,装上回流冷凝器,煮沸 1 h,滴定测试结果见表 2。

表 2 不同萃取方式测定的纸中酸值

Table 2 Determination of acid value in paper by different extraction		
	mgKOH/g	
纸中酸值	样品 1	样品 2
沸水回流热萃取	2.87	3.40
25 °C 下常温萃取	1.88	2.30

从表 2 中可以看出,沸水热萃取程序测得的纸中酸值较常温萃取程序下测得的纸中酸值大,但绝缘纸中的残油在沸水下迅速乳化,萃取液呈浑浊状,造成指示剂变色难于准确辨识,试验中只能依靠 PH 计进行终点判断。此外,在高温下,绝缘纸中的低分子酸容易挥发和分解,绝缘纸也容易水解^[4],造成测定结果的不确定。

2)常温萃取试验。为确定萃取溶液制取的最佳温度,选取 40 °C 与 25 °C 作为对照,测定结果见表 3。从表 3 中可以看出,40 °C 时测定的纸中酸值比 25 °C 时高,说明在该温度下纸中酸值更容易溶出,且该温度较容易调控,在此温度下纤维素水解、小分子酸挥发和分解速度相对较小,因此萃取温度取 40 °C 较为适宜。

表 3 不同萃取温度下测定的纸中酸值

Table 3 Determination of acid value in paper at different extraction temperatures			
萃取温度/°C	样品 1/ (mgKOH·g ⁻¹)	样品 2/ (mgKOH·g ⁻¹)	样品 3/ (mgKOH·g ⁻¹)
25	0.711	0.730	0.345
40	0.815	0.836	0.441

2.4 萃取时间

为确定萃取溶液制取的最佳时间,开展了将绝缘纸浸入 100 mL 纯水中,测量不同种纸中酸值随萃取时间的变化规律试验,酸值滴定结果见图 1。从图 1 中可以看出,两种纸中萃取液的酸值在萃取时间为 6 h 左右达到一个极大值,此后出现下降现象,24 h 后,纸中酸值趋于稳定,为了便于操作,萃取时间选取 24 h 较为适宜。

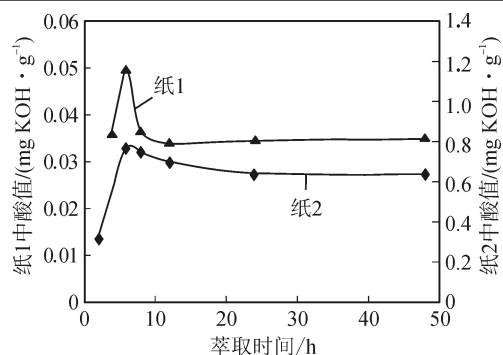


图 1 不同萃取时间下测得的纸中酸值

Fig. 1 The acid value of paper in different extraction time

2.5 滴定指示剂

通过对萃取液滴定指示效果,对比酚酞和酚红和 BTB 的试验效果。

试验方法是用 0.010 3 mol/L 的 KOH 标液滴定绝缘纸萃取液,从滴定曲线看等当点在 8.0 左右,有效判断滴定终点。

酚红和 BTB 等指示剂的适用性,观测效果均不如酚酞。其中,酚红在酸性溶液中呈黄色会加重萃取液的颜色,滴至过程中溶液逐渐转变为橙色,不利于终点判定;而 BTB 指示剂与酚红类似,在酸性溶液中呈黄色会加重萃取液的颜色,滴定时溶液逐渐转变为墨绿色,不利于终点判定。此外,通常绝缘纸的水萃取液呈淡黄色或浅黄色,用酚酞做指示剂时一般滴定至溶液淡黄色或浅黄色溶液中刚出现红色即可,此时溶液的 pH 值恰好在 8.2 左右,与理论等当点接近,此时滴定误差较小。由于不同操作人员对颜色辨识的敏锐性不同,因此,滴定终点可能存在一定的系统误差,有条件的情况下可以用 pH 计观测滴定终点的 pH 值,以减少系统误差。

2.6 绝缘纸的预处理方式

试验用绝缘纸样品使用脱脂棉尽量擦拭表面的变压器油,不使用任何清洗剂,因为清洗剂在清洗掉变压器油的同时,也会损失部分纸中酸值。试验中使用石油醚清洗和未使用石油醚清洗时测得的纸中酸值见表 4 (石油醚是常用的中性清洗剂和有机溶剂,可有效去除绝缘纸表面的变压器油)。

表 4 石油醚清洗和未清洗的纸中酸值

Table 4 Petroleum ether cleaning and acid value of the paper not cleaned				
	mgKOH/g			
项目	1	2	3	平均值
未清洗	1.592 7	1.718 7	1.655 7	1.655 7
清洗	1.030 7	1.509 7	1.242 7	1.261 0

使用石油醚清洗的酸值比未清洗的测量值小,其平均值相差 0.394 7 mgKOH/g。由此可知,石油醚

的清洗能损失部分纸中酸值,使测量结果偏小。

2.7 绝缘纸干重确定

为考察石油醚的除油效果,对比试验中采取的绝缘纸首先在 105 ℃下烘干 4 h(简称老化处理前纸样),然后浸油在 150 ℃下老化 72 h,按本标准进行浸水萃取试验后,再用石油醚溶液浸泡清洗 1 h,然后在 105 ℃下烘干不同时间时称重,质量变化见表 5,从表 5 可知,当烘干 2 h 之后,样品的减重已经小于 0.01 g,已满足试验准确度要求。同时从表 5 可以看出,在实际试验中,采取石油醚基本可以把绝缘纸中的绝缘油去除掉,无需采用乙醇—苯混合液、乙醇—乙醚混合液、异丙醇—甲苯—正己烷混合溶液等作为除油溶剂。

表 5 不同处理条件下绝缘纸质量变化

Table 5 Quality variation of insulating paper under different conditions

处理条件	样品 1 质量/g	样品 2 质量/g
老化处理前	1.004 0	0.999 8
老化后擦拭除油	1.256 6	1.243 2
清洗后烘干 0.5 h	1.053 4	1.035 6
清洗后烘干 1 h	1.000 7	1.000 0
清洗后烘干 2 h	1.000 2	0.999 7
清洗后烘干 3 h	0.999 9	0.999 5

2.8 精密度

精密度试验以 GB/T 6379.2—2004《测量方法与结果的准确度(正确度与精密度) 第 2 部分:确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法》为依据,共有 7 个实验室按同一试验方法各自进行一定次数的测定,将全部测定结果汇总、验算,判断方差的一致性,检验界外值、界外实验室,对所接受的测量值进行统计计算,求出室内精密度和室内精密度如下。

- 1)重复性限:两个测试结果的差值小于平均值的 10%;
- 2)再现性限:两个测试结果的差值小于平均值的 20%。

3 绝缘纸酸值测量老化实验

3.1 实验设计

该试验所采用的实验材料是:25 号变压器新油(通过了 DL/T 285—2012《矿物绝缘油腐蚀性硫检测法——裹绝缘纸铜扁线法》^[15]的检测标准、普通变压器绝缘纸(厚度 0.07 mm,宽度 25 mm)、变压器用绕组铜片)。

实验老化容器是带磨口塞的 150 mL 三角烧瓶(图 2),每个试样包含 150 mL 绝缘油和 4 个纸包铜试

样。每个纸包铜试样是由 2 g 绝缘纸包裹 1 片铜片(30 mm×11 mm×1 mm)并用细铜丝捆绑而制成。



图 2 油纸老化试样

Fig. 2 Oil-paper aging samples

实验前,将剪成质量为 2 g 的长条并折叠用细铜丝捆绑固定。将绝缘纸在 90 ℃/50 Pa 环境下干燥 48 h 后,浸入脱水脱气的变压器新油中,并在 40 ℃/50 Pa 环境下浸油 24 h,最后按照 150 mL 新油和 8 g 绝缘纸的油纸比例装入带磨口塞的 150 mL 锥形瓶中,并加入适量变压器绕组铜片,进行抽真空充氮气密封处理制成试样。将试样在不同温度和时间条件下老化(图 3),以制取不同酸值含量的绝缘纸样,定期取纸样,测量绝缘纸聚合度和酸值(文中方法)。

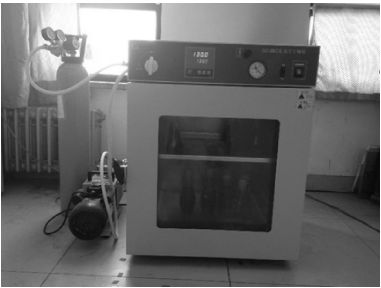


图 3 真空电热恒温箱(可充氮气)

Fig. 3 Vacuum thermostat box (can be filled with nitrogen)

3.2 聚合度测试

纤维素分子的聚合度(degree of polymerization, DP)是指一个纤维素分子中含有的β-D-葡萄糖单体的数量。聚合度同纸的抗张强度有良好的相关性,是表征绝缘纸老化程度最准确、最可靠的指标,因此测量变压器内部绝缘纸的聚合度对变压器整体的老化评估以及对可取到纸样的变压器故障部位的老化评估是具有重要意义^[16-18]。绝缘纸的聚合度由中国制浆造纸研究院协助测试,参照 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》^[19]和 IEC 60450:2007《新的和老化的纤维素电绝缘材料的粘均聚合度的测量》^[20]标准执行,通过测量绝缘纸溶于铜乙二胺溶剂中的

溶液特性粘度来计算纸的聚合度,测试采用粘度计,见图4。



图4 粘度计

Fig. 4 Viscometer

3.3 实验结果与分析

随老化时间延长,绝缘纸聚合度及纸中酸值变化情况见图5、6。由图5可知,绝缘纸聚合度随老化时间增长而呈现明显的下降趋势,老化前期聚合度迅速下降,老化中后期其下降趋势趋于平稳;由图6可知,绝缘纸中酸值随老化时间增长呈现明显上升趋势,老化前期酸值迅速增大,老化中后期其增长趋势趋于平稳。

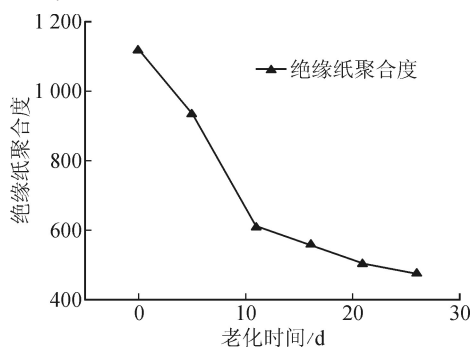


图5 聚合度与时间关系

Fig. 5 Acid value and time

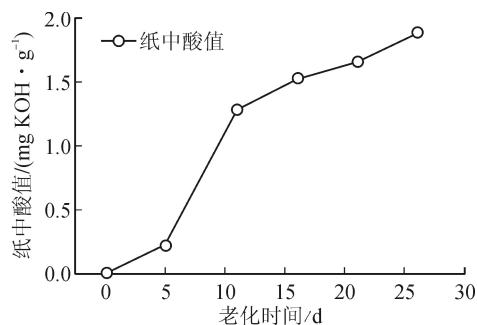


图6 酸值与时间关系

Fig. 6 Relation between polymerization degree and time

观察图5、6的特征参数随时间的变化发现一相似规律,第0、5、10天酸值与聚合度变化速率较快,从第10天开始变化速率减慢,因此以第10天为节

点,分别对其前后的数据进行线性拟合,求取变化速率的数值。

聚合度第0~10天和第10~26天的拟合式分别见式(4)、(5):

$$DP = -46.44t + 1135.37 \quad (4)$$

$$DP = -9.20t + 706.70 \quad (5)$$

式(4)、(5)的拟合优度 R^2 分别为0.976 9、0.973 6。

酸值第0~10天和第10~26天的拟合式分别见式(6)、(7):

$$I_A = 0.13585t - 0.05512 \quad (6)$$

$$I_A = 0.02621t + 1.20101 \quad (7)$$

式(6)、(7)的拟合优度 R^2 分别为0.972 5、0.989 4。

曲线两段的变化速率见表6。

表6 不同区间特征参量变化速率及比值

Table 6 Change rate and ratio of characteristic parameters in different intervals

区间	变化速率	
	酸值	聚合度
0~10天	0.135 85	-46.44
10~26天	0.026 21	-9.20
比值	5.180 00	5.08

从表6中可以明显看出,酸值与聚合度的变化速率均在0~10天更大,且大致为10~26天变化速率的5倍。

老化过程中绝缘纸聚合度与纸中酸值的关系曲线见图7,从图7可以看出,随聚合度的不断下降,纸中酸值不断增大,即二者成反比;并且,聚合度和纸中酸值的关系近似呈线性相关,拟合的线性关系见式(8)

$$I_A = -0.00295DP + 3.16043 \quad (8)$$

式(8)的拟合优度 R^2 达到0.971 0。

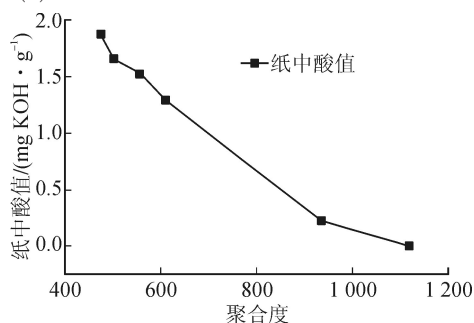


图7 酸值与聚合度关系

Fig. 7 Relation between acid value and polymerization degree

4 结论

1)文中研究了纸中酸值测试方法,确定了具体的试验测试条件:将绝缘纸取出后用纯水萃取纸中

亲水性酸制成萃取液,使用酚酞指示滴定终点,测量萃取液酸值并计算绝缘纸酸值。通过对比实验确定了纸中酸值测量的最佳试剂、温度和时间等条件。对老化过程中纸中酸值进行测量,发现该方法能较好地反映纸中酸值实际变化规律。

2)应用文中确定的方法测量实验室条件下老化绝缘纸酸值。结果表明,纸中酸值的上升规律、速率与聚合度下降有很好的相关性,说明酸值能够较好地反应绝缘纸的裂化程度,同时验证了文中提出酸值测试方法的准确性。

参考文献:

- [1] LUNDGAARD L E, HANSEN W, INGEBRIGTSEN S. Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 540-546.
- [2] 裴继诚. 植物纤维化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
PEI Jicheng. Chemistry of plant fiber[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005.
- [3] 廖瑞金, 裴仕军, 周欣. 热稳定绝缘纸抗热老化性能提升机制的量子化学研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 196-203.
LIAO Ruijin, NIE Shijun, ZHOU Xin. Quantum chemistry study on mechanism of anti-thermal ageing performance of thermally upgraded insulation papers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 196-203.
- [4] 廖瑞金, 郝建, 梁帅伟, 等. 水分和酸对矿物油与天然酯混合油-纸绝缘热老化的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 31-37.
LIAO Ruijin, HAO Jian, LIANG Shuaiwei, et al. Influence of water and acid on the thermal aging of mineral oil mixed with natural ester oil - paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 31-37.
- [5] 吴广宁, 王晓剑, 李先浪, 等. 有机酸对油纸绝缘热老化及频域介电谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1424-1432.
WU Guangning, WANG Xiaojian, LI Xianlang, et al. Influence of organic acids on thermal aging and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1424-1432.
- [6] VACA-GARCIA C, THIEBAUD S, BORREDON M E, et al. Cellulose esterification with fatty acids and acetic anhydride in lithium chloride/N, N-dimethylacetamide medium[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1998, 75(2): 315-319.
- [7] INGEBRIGTSEN S, DAHLUND D, HANSEN W. Solubility of carboxylic acids in paper(Kraft)-oil in-sulation systems[C]//CEIDP. Colorado, USA: IEEE, 2004: 253-257.
- [8] 绝缘油酸值的测定 自动电位滴定法: NB/SH/T 0836—2010 [S]. 北京: 国家能源局, 2010.
Determination of acidity in oil insulation automatically potentiometric titration: NB/SH/T 0836—2010[S]. Beijing: The National Energy Bureau, 2010.
- [9] 变压器油、汽轮机油酸值测定法(BTB法): GB/T 28552—2012[S]. 2012.
Determination of transformer oil, turbine oil acid(BTB method): GB/T 28552—2012 [S]. 2012.
- [10] 钱艺华, 蔡利霞, 李智. 油中酸值简易测定方法的研究[J]. 广东电力, 2002, 15(3): 23-24.
QIAN Yihua, CAI Lixia, LI Zhi. Research on easy method of the acid number in oils[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(3): 23-24.
- [11] 纸、纸板和纸浆水抽取液酸度或碱度的测定: GB/T 1545—2008[S]. 2008.
Paper, board and pulp - Determination of acidity or alkalinity: GB/T 1545—2008[S]. 2008.
- [12] 李海燕, 何梦, 黄林, 等. 超高压变压器油中酸类物质的生成规律和变压器热老化状况分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1959-1964.
LI Haiyan, HE Meng, HUANG Lin, et al. Correlation between the generation of acidic products and the thermal aging of oil-paper insulation of the UHV transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1959-1964.
- [13] 廖瑞金, 孙会刚, 尹建国, 等. 水分对油纸绝缘热老化速率及热老化特征参量的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 34-42.
LIAO Ruijin, SUN Huigang, YIN Jianguo, et al. Influence on the thermal aging rate and thermal aging characteristics caused by water content of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 34-42.
- [14] 冯运. 电力变压器油纸绝缘老化特性及机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
FENG Yun. Characteristics and mechanisms of aging of oil-paper insulation in power transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [15] 矿物绝缘油腐蚀性硫检测法——裹绝缘纸铜扁线法: DL/T 285—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
Test method for corrosive sulphur in mineral insulating oils: Copper conductor wrapped with insulating paper: DL/T 285—2012[S]. Beijing: China Power Press, 2012.
- [16] 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.

- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Impacts of moisture content and distribution on frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation system by FEM approach[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3403-3410.
- [14] 李盛涛, 王 辉, 林春江, 等. $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷介电模量响应特性的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 474-479.
- LI Chengtao, WANG Hui, LIN Chunjiang, et al. Study on the dielectric modulus response characteristic of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 474-479.
- [15] TIAN Fuqiang, OHKI Y. Electric modulus powerful tool for analyzing dielectric behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 929-931.
- [16] 李翰如. 电介质物理导论[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990: 127-130.
- LI Hanru. Introduction to dielectric physics[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1990: 127-130.
- [17] PRADHAN M K, YEW J H, SAHA T K. Influence of the geometrical parameters of power transformer insulation on the frequency domain spectroscopy measurement[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [18] 赵双孔. 介电谱方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 89-99.
- ZHAO Shuangkong. Dielectric spectroscopy method and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 89-99.
- [19] JADAV R B, EKANAYAKE C, SAHA TK. Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 369.
- [20] 杨丽君, 齐超亮, 邓帮飞, 等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 310-317.
- YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified Cole-Cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 310-317.
- 梁 钰(1985—), 男, 工程师, 主要从事变压器在线监测、状态诊断及电力系统仿真分析技术研究。
- 谢佳成(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究变压器在线监测及设备绝缘状态评估。

(上接第 113 页)

- [17] 廖瑞金, 聂仕军, 周 欣, 等. 热稳定绝缘纸抗热老化性能提升机制的量子化学研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 196-203.
- LIAO Ruijin, NIE Shijun, ZHOU Xin, et al. Quantum chemistry study on mechanism of anti-thermal ageing performance of thermally upgraded insulation papers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 196-203.
- [18] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [19] 新的和老化后的纤维素电气绝缘材料粘均聚合度的测量: GB/T 29305—2012 [S]. 2012.
- Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials: GB/T 29305—2012[S]. 2012.
- [20] 新的和老化的纤维素电绝缘材料的粘均聚合度的测量: IEC 60450: 2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials: IEC 60450: 2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- 连鸿松(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电器状态监测与故障诊断方面的研究工作。