

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.021

酸对变压器油纸绝缘水分含量测量的影响

夏国强, 吴广宁, 刘琛浩, 高天山, 高波

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了更准确地进行油纸绝缘水分含量的测量, 探寻老化产物中最为主要的酸对于水分测量的影响, 从而为变压器绝缘状态评估提供可靠指导, 文中在实验室条件下制备含有不同水分含量以及含有不同类型不同酸值的油纸绝缘试样, 采用极化/去极化电流法(PDC)对有机酸对于水分测量的影响开展了研究。试验结果表明: 乙酸在油纸间的分布会受到水分含量变化的影响, 而硬脂酸的分布并不受含水量的影响; 乙酸和硬脂酸对去极化电流曲线影响不同, 乙酸对去极化电流曲线尾端影响很大, 而硬脂酸对去极化电流曲线首段影响严重; 乙酸和硬脂酸分别影响绝缘纸与绝缘油中的含水量测量, 且存在一定比例关系, 故实际中可以考虑采取补偿的方法消除不同酸对油和纸中水分测量的影响。

关键词: 油纸绝缘; 酸; 水分含量; 极化/去极化电流法

Study on the Influence of Acids on the Moisture Content Measurement

XIA Guoqiang, WU Guangning, LIU Chenhao, GAO Tianshan, GAO Bo

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to measure the moisture content of oil-paper insulation more accurate, and explore the influence of acid on moisture content measurement, thus providing reliable guidance for insulation condition assessment of transformer, in this paper, we made two groups of oil-paper insulation samples with different moisture content and acid value under laboratory conditions and studied the influence of organic acids on moisture by using polarization/depolarization current. The results show that moisture content will have effect on the distribution of acetic acid between oil and paper, but no effect on stearate; acetic acid and stearate have different influences on depolarization current curves, acetic acid has effect on the tail of depolarization current curves, while stearate mainly impact the first stage of depolarization current curves; acetic acid and stearate affect moisture content of oil and insulating-paper respectively, and there is a certain proportional relationship, so we can consider some compensation method to obtain the accurately moisture content of different parts of oil-paper insulation in practice.

Key words: oil-paper insulation; acid; moisture content; polarization/depolarization current

0 引言

电力变压器在电力系统的正常运行中起到了关键的作用, 是保障电力系统稳定、可靠运行的最为重要的设备之一^[1-2]。变压器的绝缘系统由绝缘油和绝缘纸所组成, 油纸绝缘的性能优劣决定了变压器的使用寿命^[3]。其中, 绝缘纸起到了支撑和绝缘的作用, 绝缘油起到了绝缘和散热的作用^[4]。在变压器运行过程中, 油纸绝缘不断老化产生众多的老化

产物, 其中水分是影响油纸绝缘性能的最重要因素之一, 含水量与老化速率关系密切, 水分的增加将直接缩短变压器使用寿命^[5-7]。因此, 水分含量的测量对于运行中变压器的寿命评估有着重要的意义。

目前油纸绝缘水分含量的测量方法中, 通常采用T. V. Oommen方法测量含水量, 但该方法测量结果误差较大, 存在诸多不足^[8-9]。近些年, 时域介电法由于其优越的无破坏性和操作简便性, 成为了国内外学者研究的热点^[10-11]。周利军等^[12]探寻了油纸

绝缘中水分含量的分布规律以及纤维素老化对水分分布的影响,但未探究老化产物的作用;吴广宁等^[13]探究了不同种类酸对于水分在油纸中扩散的影响,指出酸会影响水分扩散以及绝缘纸的老化,但酸对于含水量测量时的影响并未提及;刘捷丰等^[14]研究了水分含量对PDC曲线的影响,发现PDC曲线对于水分的变化十分敏感并找出了表征含水量的特征量,但并未排除干扰因素对于特征量的影响。

在变压器运行中,油纸绝缘的老化产物除了水分外主要是甲酸、乙酸等低分子有机酸以及环烷酸、硬脂酸等高分子有机酸^[15],而这些有机酸对于PDC曲线所产生的影响不可忽略,直接利用PDC法测量变压器中的水分含量则必然会使其老化状态评估带来误差,但国内外研究酸对变压器运行中的水分含量测量的文章却鲜有。

因此,为了探究变压器运行中油纸的主要老化产物有机酸对油纸绝缘水分含量测量的影响,文中在实验室条件下制备出分别含硬脂酸与乙酸的不同酸值与不同含水量的油纸绝缘试样,利用自制试验装置进行PDC电流测试,通过比较不同类型的有机酸以及不同酸水的组合,探究不同类型酸和水分对于PDC曲线测量的影响关系,从而为PDC法研究水分含量时提供可靠依据。

1 理论

1.1 PDC理论

根据电介质物理,在电介质两端加一个阶跃电压之后会产生电流,此电流由介质的电导电流与极化电流组成,称为极化电流^[16],公式见式(1)。测量回路见图1中回路1所示。

$$i_d(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_0)] \quad (1)$$

当介质两端的电压撤去之后所产生的电流为电介质弛豫电流的总和,称为去极化电流,公式见(2)。测量回路见图1中回路2。

$$i_p(t) = C_0 U_0 [\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t)] \quad (2)$$

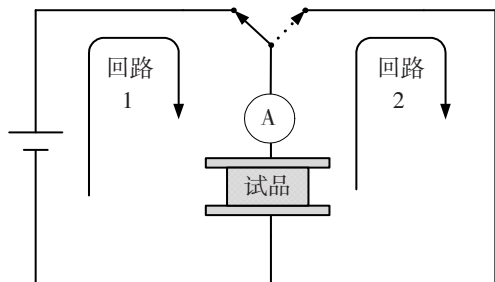


图1 PDC测量电路

Fig. 1 Circuit for PDC measurement

1.2 酸值测量标准

目前,主要采用化学测试法来测定变压器油中的酸值,而纸中的酸值,国内外也尚未有统一的标准^[17]。故文中绝缘纸中酸值是通过油中酸值变化来确定的。酸值是指中和1 g试样中酸所消耗的氢氧化钾的质量,本试验中严格按照GB/T 264—1983《石油产品酸值测定法》^[17]规定步骤对绝缘油酸值进行测量。

2 实验设计

文中样品材料选用1 mm厚的纤维素绝缘纸板和25号环烷基矿物绝缘油,以及无水乙酸和无水硬脂酸为试验材料,试验的具体步骤如下:

1)将绝缘纸板置于90 °C/50 Pa的真空箱中干燥48 h;将绝缘纸板样品放到潮湿的空气中进行吸潮,含水量通过样品在空气中吸收水分时质量的变化确定,最终得到3组油纸绝缘样品,它们的水分含量分别为1.05%、2.02%、3.09%。

2)将绝缘油进行真空脱气,在40 °C下进行干燥。在室温的条件下,将已经进行脱气干燥的绝缘油分为两组,每组中各自滴入乙酸或硬脂酸的溶液,并用自动酸值测试仪JKCS-3测量油中酸值变化。最终获得了酸值为1、2、3、4、5 mgKOH/g分别含有乙酸或硬脂酸两组绝缘油试样。

3)将已经制备好的不同含水量的绝缘纸板样品按照质量比20:1的比例分别浸入到两组含不同酸值的绝缘油中,真空充氮气在20 °C/50 Pa的条件下浸渍。每隔一段时间记录油中酸值变化情况,待油中酸值稳定后,记录各组油中酸值。

4)待酸值稳定后,将每组样品置入到图2所示的三电极测试装置中进行PDC测试,极化直流电压为500 V,测试时间为10 000 s。在每组测试之前,将装置放入到60 °C的恒温箱中静置4 h,并通过温度探头测量装置内外部温度,保证每次测量的温度一致。

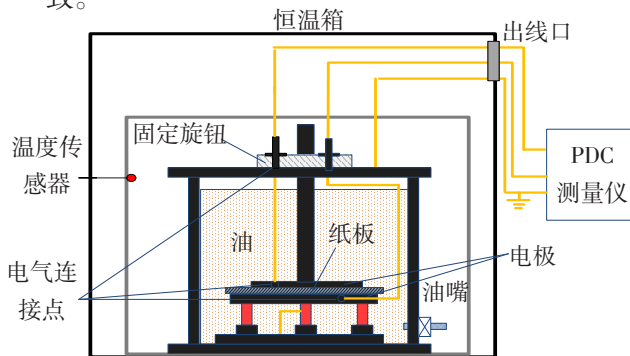


图2 三电极测试装置

Fig. 2 Structure of three-electrode measuring device

3 结果分析

3.1 小分子酸测试结果及分析

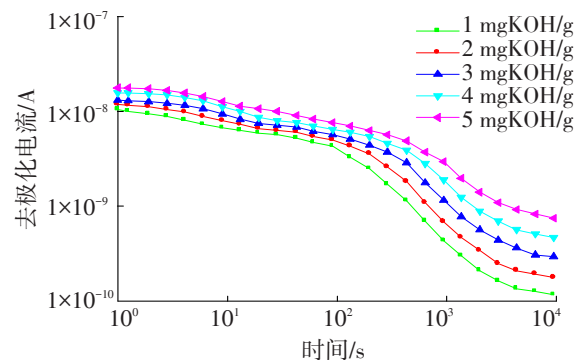
绝缘油中乙酸酸值在平衡前后的体积分数见表1。由表1可以看出,乙酸的体积分数在平衡前后发生了很大的变化,在扩散过程中大部分被绝缘纸板所吸收,只有少部分留在了绝缘纸中。由于乙酸是强极性分子,绝缘纸板的主要成分纤维素相对于绝缘油具有较强的极性^[18-19],则根据相似相容原理,乙酸易溶于绝缘纸板,这种特性与水分在油纸中的扩散与分布规律相同。同时从表1中也可以看出,水分含量对于乙酸在油纸间的分布有一定的影响,且随着含水量的增加,酸在绝缘纸板中的体积分数在上升。这主要是因为乙酸溶于水时,电离出氢离子,酸水之间形成氢键,一定程度上促进了乙酸向绝缘纸板中扩散和转移。

表1 油纸样品中乙酸的体积分数分布

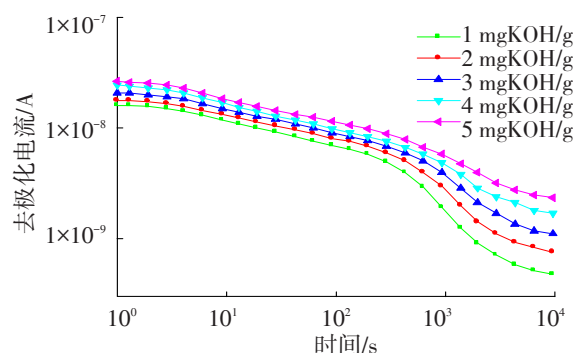
Table 1 Distribution of acetic acid in oil-paper

初始值	平衡后		
	含水量 1.05%	含水量 2.02%	含水量 3.09%
1	0.19	0.21	0.24
2	0.37	0.39	0.43
3	0.56	0.59	0.61
4	0.75	0.76	0.81
5	0.93	0.95	0.98

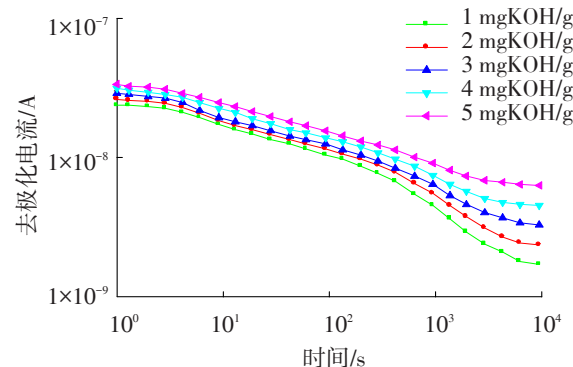
试验中对不同含水量以及不同酸值的样品进行PDC测试,曲线见图3。从图3中可以看出,随着乙酸体积分数在绝缘纸板中的增加,去极化电流曲线的尾端有明显的上升趋势,而曲线的前段变化趋势并不明显。根据文[20],油纸绝缘中油的状态主要影响去极化电流的首端,而绝缘纸的状态主要影响去极化电流的末端。故由表1可知,乙酸主要被绝缘纸板所吸收,油中乙酸的体积分数增加,直接导致绝缘纸板中乙酸的体积分数的上升,使得在绝缘纸内部形成了众多的界面,增强了界面极化,以及乙酸溶于水所电离出来的氢离子,这些都使得绝缘纸板中极化过程增强,导致PDC曲线的尾端整体上升。而油中酸值改变较小,PDC曲线前段变化不明显。比较图3中不同含水量同一酸值下的曲线,也可以看出,水分对于去极化电流曲线的影响也集中在尾端,这一点与乙酸的影响规律很像,文[21]中得到了类似的结论。故乙酸等小分子酸的存在对于绝缘纸板中水分测量的影响不容忽视,尤其是在老化后期,当酸值不断产生和累积时这种影响更加明显。



(a) 含水量 1.05%



(b) 含水量 2.02%



(c) 含水量 3.09%

图3 乙酸对不同含水量油纸样品的PDC曲线影响

Fig. 3 Influence of acetic acids on the PDC curves of oil-paper insulation with different moisture content

3.2 大分子酸测试结果与分析

硬脂酸在油纸间的分布情况见表2,在平衡后硬脂酸主要仍存在于绝缘油中,只有很少的一部分被绝缘纸板吸收。绝缘油的主要成分是环烷烃,极性非常弱。有机酸由羧基和非极性的烷基构成,其中分子量越大,羧基所占得比重越小,分子极性越弱,故而硬脂酸的极性要远小于乙酸的。根据相似相容原理,硬脂酸易溶于极性较弱的绝缘油中,同时有机酸分子的活力也随着分子量的增大而减小,相对运动空间减少,绝缘油对分子的束缚力在加强,故只有少部分硬脂酸进入了纸中。与乙酸不同的是,水分对于硬脂酸的扩散影响很小,主要是因为油纸绝缘中水分主要存在于绝缘纸中,油中含水量很低,

而硬脂酸主要存在于油中。

表2 油纸样品中硬脂酸的体积分数分布

初始值	insulation samples		
	平衡后		
	含水量 1.05/%	含水量 2.02/%	含水量 3.09/%
1	0.81	0.82	0.83
2	1.68	1.66	1.69
3	2.52	2.53	2.52
4	3.37	3.34	3.36
5	4.26	4.25	4.30

不同含水量下的硬脂酸对PDC的影响见图4。从图4中可以看出,硬脂酸所影响的去极化电流曲线部分与乙酸不同,随着硬脂酸酸值的增加,去极化电流曲线的前段有很大的改变,而对曲线末端的影响很小。如文[20]中所述,油的状态主要影响去极化电流的首段,并由表2知硬脂酸主要存在于油中,故而硬脂酸对于绝缘纸板中的极化过程影响很小,而对于绝缘油的状态影响很大,同时硬脂酸是弱极性分子,会增大绝缘油的电导率,导致去极化电流曲线的前段明显上升。从图4中还可以看出,水分对于曲线的影响主要在尾端,也就是在绝缘纸板中,对前端影响很小。故而硬脂酸对于去极化电流曲线的影响主要集中在曲线前段,即利用PDC探寻油中水分含量时,硬脂酸所造成的影响不容忽视。

3.3 酸水组合对PDC影响

根据图3、4中水分和酸的不同组合对PDC曲线的影响,可以知道水分和乙酸对去极化电流曲线的影响是相同的,而硬脂酸则不同,原因前述已做详细解释,在此不再赘述。为了探寻不同酸水组合对PDC曲线的影响,根据两组试验的PDC结果,将曲线进行归类总结,得到图5(a)乙酸与水分作用效果相同的曲线。由于硬脂酸和水分的作用效果在曲线的尾端不一致,故而只研究硬脂酸与水分对于PDC曲线前段的影响效果,见图5(b)。

从图5(a)中可以看出,4组含有不同酸值与水分含量的组合对于PDC曲线的影响几乎是一致的,且这种一致性在曲线整个测量时间都是相同的,原因在上文已经阐述。如图5(b)所示,针对硬脂酸与水分的不同组合,不同的组合在去极化电流曲线前段有着相同的影响,但是对于曲线末端影响完全不同。为了便于观察和研究不同酸类型对于油纸各部分的作用,将图5中不同酸水组合,其效果见表3。

从表3中可以看出,大小分子酸和水的组合,在比例上相差很多;从表3中还可以看出,3 mgKOH/g

的乙酸和1.05%的水分含量对PDC曲线作用效果相同,而1 mgKOH/g的硬脂酸和2.04%的水分含量对PDC曲线首段的作用效果相同。造成差异的主要原因一是水分含量大部分存在于纸中而不是油中,二是乙酸与硬脂酸所具有的极性有很大差距。

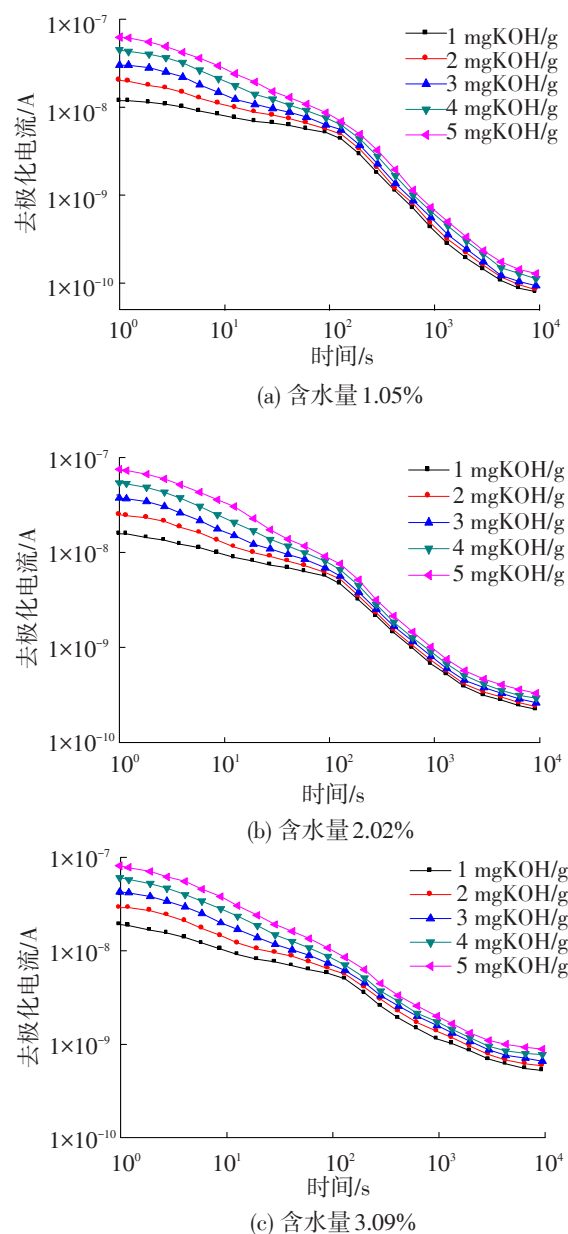
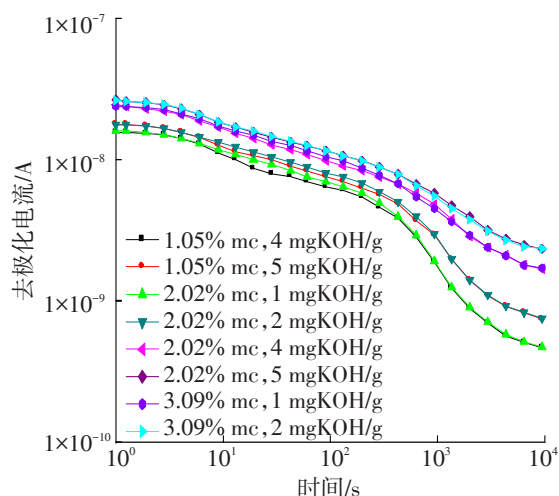


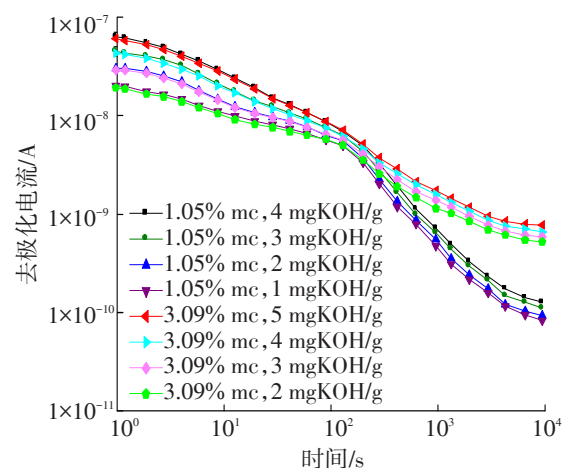
图4 不同含水量下的硬脂酸对PDC的影响

Fig. 4 Influence of stearate on the PDC curves of oil-paper insulation with different moisture content

通过探寻不同类型酸值与水分对于PDC的作用效果,为利用PDC测量油纸绝缘系统的水分含量是提供了有力的修正方案。在利用PDC探寻油中以及绝缘纸中水分含量时,可以利用小分子酸以及大分子酸对于PDC曲线的作用效果的比例对测得的水分含量进行补偿,以消除酸值在测量中所引起的误差,从而更精确的获得油纸绝缘中各部分的水分含量。



(a) 效果相同的乙酸与水分



(b) 曲线首段效果相同的硬脂酸与水分

图5 作用效果相同的酸水组合

Fig. 5 The same effect of different combinations of acid and water

表3 对PDC曲线作用效果相同的不同酸水组合

Table 3 The same effect on PDC curves of different combinations of acid and water

参数	酸水比例1		酸水比例2	
乙酸	1.05% mc	4 mgKOH/g	2.02% mc	1 mgKOH/g
	1.05% mc	5 mgKOH/g	2.02% mc	2 mgKOH/g
	2.02% mc	4 mgKOH/g	3.09% mc	1 mgKOH/g
	2.02% mc	5 mgKOH/g	3.09% mc	2 mgKOH/g
硬脂酸	1.05% mc	2 mgKOH/g	3.09% mc	1 mgKOH/g
	1.05% mc	3 mgKOH/g	3.09% mc	2 mgKOH/g
	1.05% mc	4 mgKOH/g	3.09% mc	3 mgKOH/g
	1.05% mc	5 mgKOH/g	3.09% mc	4 mgKOH/g

4 结论

1)水分含量会影响去极化电流的尾端,同时含水量的增加也影响酸值在油纸系统中的分布。随着水分含量的增加,乙酸在绝缘纸板中的体积分数有上升趋势,而硬脂酸含量几乎没有变化。

2)乙酸等小分子酸主要会影响PDC曲线的末端,影响绝缘纸板中水分含量的测量;硬脂酸等大分子酸会影响PDC曲线的首段,主要影响油中水分的测量。

3)乙酸和硬脂酸对于PDC曲线的影响同水分对于曲线的影响存在着一定的比例关系,在实际中可以考虑根据不同的比例关系提出补偿水分测量的方法以测得更为精确的水分含量。

参考文献:

- [1] 王世强,魏建林,杨双锁,等. 油纸绝缘加速热老化的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 125-131.
WANG Shiqiang, WEI Jianlin, YANG Shuangshuo, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation under accelerated thermal aging[J]. Proceedings of CSEE, 2010, 30(34): 125-131.
- [2] 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.
- [3] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [4] 王世强,张冠军,魏建林,等. 纸板的老化状态对其PDC特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 177-183.
WANG Shiqiang, ZHANG Guanjin, WEI Jianlin, et al. Experimental study of the aged states effects on press-board PDC characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 177-183.
- [5] 吴广宁,夏国强,宋臻杰,等. 基于小波分析和时域介电谱的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 226-233.
WU Guangning, XIA Guoqiang, SONG Zhenjie, et al. Status assessment of aging condition of transformer oil-paper insulation based on time domain dielectric spectroscopy and wavelet analysis[J]. high Voltage Engineering, 2018, 44(1): 226-233.
- [6] 王伟,马志青,李成榕,等. 纤维素老化油纸绝缘水分平衡的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 100-104.
WANG Wei, MA Zhiqing, LI Chengrong, et al. Impact of cellulose aging on moisture equilibrium of oil-press-board insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 100-104.
- [7] EKANAYAKE C, GUBANSKI S M, GRACZKOWSKI

- A, et al. Frequency response of oil impregnated press-board and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1309-1317.
- [8] 周利军, 汤浩, 吴广宁, 等. 油纸绝缘微水扩散的稳态分布[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 27-30.
- ZHOU Lijun, TANG Hao, WU Guangning, et al. Equilibrium moisture distribution in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 27-30.
- [9] DU Y, ZAHN M, LESIEUTRE B C, et al. Moisture equilibrium in transformer paper-oil system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(1): 11-20.
- [10] 王林, 周利军, 李先浪, 等. 应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 354-359.
- WANG Lin, ZHOU Lijun, LI Xianlang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 354-359.
- [11] ZHOU Lijun, LI Xianlang, WU Guangning. Low frequency dispersion mechanism of dielectric response for oil-paper insulation diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1873-1880.
- [12] 周利军, 李先浪, 段宗超, 等. 纤维素老化对油纸绝缘水分扩散特性的影响机制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3541-3547.
- ZHOU Lijun, LI Xianlang, DUAN Zongchao, et al. Influence of cellulose aging on characteristics of moisture diffusion in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3541-3547.
- [13] 吴广宁, 崔运光, 段宗超, 等. 有机酸对变压器油纸绝缘进一步热老化的催化作用试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(03): 832-839.
- WU Guangning, CUI Yunguang, DUAN Zongchao, et al. Experimental study on further thermal aging of transformer oil-paper insulation by organic acid catalysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 832-839.
- [14] 刘捷丰, 廖瑞金, 吕彦冬, 等. 电力变压器油纸绝缘含水量定量评估的时域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 196-203.
- LIU Jiefeng, LIAO Ruijin, LYU Yandong, et al. Time domain dielectric characteristics for quantitative assessment of moisture content in transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 196-203.
- [15] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘热老化酸类及铜类产物生成规律分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2160-2166.
- HAO Jian, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Analysis on the generation rules of both acids and copper products of transformer oil-paper insulation under thermal aging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 36(9): 2160-2166.
- [16] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.
- [17] 石油产品酸值测定法: GB/T 264—1983[S]. 1983.
- Acid value measurement in petroleum products: GB/T 264—1983[S]. 1983.
- [18] 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.
- [19] 王有元, 杨涛, 田苗, 等. 电场对绝缘纸中水分扩散特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 195-203.
- WANG Youyuan, YANG Tao, TIAN Miao, et al. Impact of electric field on the moisture diffusion properties of insulation paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 195-203.
- [20] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformer insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.
- [21] 廖瑞金, 刘捷丰, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘含水量定量评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 204-211.
- LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, LYU Yandong, et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantitative assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 204-211.
- 夏国强(1991—), 男, 研究生, 主要从事变压器状态评估与绝缘检测方面的研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术相关教学与科研工作。