

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.030

基于频域介电谱法研究甲酸对油纸绝缘水分评估的影响

高波, 许竞, 夏国强, 吴广宁

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了准确评估油纸绝缘中的水分含量,研究小分子酸对油纸绝缘水分评估的影响,文中制备了多组不同水分和甲酸含量的油浸纸试样并利用频域介电谱法对其进行FDS测试,基于此提出表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量。研究表明:水分会影响小分子酸在油纸间的分布,且随着绝缘纸水分含量和油中甲酸含量的增加,油浸纸试样 $\tan\delta$ 频域谱在 $10^{-3}\sim 10^1$ 显著增大。相较于无酸环境,甲酸含量的增加使油浸纸试样同一水分含量下的 $\tan\delta$ 频域谱发生不同程度的增加,实际测量绝缘纸水分含量时小分子酸的影响不容忽视。提出的油浸纸试样介质损耗因素积分量 $S_{\tan\delta}$,在不同酸性环境中与水分含量均有良好的指数关系,且随着酸值变化与水分呈现出一定的规律,故可用作表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量。

关键词: 油纸绝缘; 甲酸; 水分含量; 频域介电谱; 特征参量

Effect of Formic Acid on the Moisture Evaluation of Oil-paper Insulation Based on Frequency Domain Dielectric Spectroscopy

GAO Bo, XU Jing, XIA Guoqiang, WU Guangning

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

Abstract: In order to accurately assess the moisture content in oil-paper insulation and study the effect of small molecule acid on the moisture evaluation of oil-paper insulation, the oil-impregnated paper samples with different moisture and formic acid content are prepared in this paper, and FDS test is carried out on it by using frequency domain dielectric spectroscopy, then on the basis of the spectroscopy a characteristic parameter of the moisture content of oil-paper insulation in different acidic environment is proposed. The research results show that the moisture will affect the distribution of small molecules acid in oil-paper insulation and then with the increase of moisture in paper and formic acid in oil, the $\tan\delta$ spectroscopy from 10^{-3} to 10^1 of oil-impregnated paper samples is significantly increased. Compared to the environment with no acid, the increase of formic acid makes the $\tan\delta$ spectroscopy of oil-impregnated paper samples in the same moisture content a increase in varying degrees, so the influence of small molecule acid can't be ignored in the actual measurement of moisture content of oil-paper insulation. The $S_{\tan\delta}$ of oil-impregnated paper samples, proposed in acidic environment, have a good exponential relationship with moisture content in different acidic environment and show a certain law with moisture with the change of acid content, so it can be used as the characteristic parameters of the moisture of oil-paper insulation in different acidic environment.

Key words: oil-paper insulation; formic acid; moisture content; frequency domain dielectric spectroscopy; characteristic parameters

0 引言

油浸式电力变压器是电力系统中关键设备之一,其绝缘性能的优劣对电力系统的安全稳定运行

具有重要意义^[1-3]。由于长期受电、热、化学和机械等因素作用,变压器油纸绝缘系统易发生高温降解、水解降解和氧化降解,其中,酸性条件下的水解降解是绝缘纸主要老化形式^[4-5],降解过程中产生的

水分被誉为油纸绝缘的“头号杀手”,而水分和有机酸等老化产物又会反过来加剧油纸的降解^[6-8]。由此可见,水分对运行中变压器油纸绝缘状态影响严重,因此准确评估油纸绝缘水分含量对变压器的安全稳定运行具有重要意义。

目前对油纸绝缘水分含量的评估主要以电气测量法、化学测量法以及利用 Oommen 等水分平衡曲线为主,但这些方法通常准确度低,测试结果不稳定^[9-12]。鉴于此,以频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS)为代表的电介质响应法受到国内外学者的广泛关注^[13-15]。文[16]提出利用介质损耗因数 $\tan\delta$ 区分油纸绝缘水分和老化状态对频域介电响应的影响,并基于此提取能量化绝缘纸水分含量及聚合度的频域介电特征量;文[17]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;文[18-21]指出油纸绝缘在老化过程中,绝缘纸产生以甲酸、乙酸为代表的低分子酸,绝缘油产生以硬脂酸为代表的高分子酸,其中低分子酸对油纸绝缘 FDS 测试结果影响较大,而高分子酸影响较小。然而,不同酸值和不同水分含量对油纸绝缘频域介电谱有何影响,以及提出可行的表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量,仍是目前需要研究的课题。

文中用甲酸代表小分子酸,制备不同水分和酸值含量的油浸纸试样,在恒温条件下对不同酸值和水分含量的油浸纸试样进行 FDS 测试,分析其频域介电谱变化规律,并基于此提出表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量,为油纸绝缘水分评估提供新思路。

1 理论基础

于平板电容器两端施加一时变电压 $U(t)$,此时电极两端所产生的电位移 $D(t)$ 可表示^[22]为

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (1)$$

式(1)中: ε_0 为真空介电常数; $E(t)$ 为两极板产生的均匀电场; $P(t)$ 为极化响应。

根据 Maxwell 方程可知全电流密度为

$$J = \sigma_0 E + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)中, σ_0 为直流电导率。

对式(2)进行傅里叶变换,可得

$$J(\omega) = \sigma_0 E(\omega) + j\omega D(\omega) \quad (3)$$

$$J(\omega) = j\omega \varepsilon_0 \{ \varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega)] \} E(\omega) = j\omega \varepsilon_0 [\varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega)] E(\omega) \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5)$$

式(3)-(5)中: $\tan\delta$ 为介质损耗因数; ε' 和 ε'' 为复介电常数 ε 实部和虚部; $\varepsilon'(\omega)$ 和 $\varepsilon''(\omega)$ 为 $\varepsilon(\omega)$ 实部和虚部; $\chi'(\omega)$ 和 $\chi''(\omega)$ 为复极化指数 $\chi(\omega)$ 实部和虚部。

2 试验

2.1 试验材料

试验所需材料主要有:厚度为 0.3 mm 的普通纤维素绝缘纸,25 号环烷基矿物绝缘油以及无水甲酸。

2.2 试验步骤

具体的试验步骤如下:

1) 采用普通纤维素绝缘纸制作若干尺寸为 450 mm×20 mm 的绝缘纸片,将其卷成圆柱形并放入 50 Pa/90 °C 真空箱中干燥 48 h,然后将干燥后的纸板置于潮湿空气中自然吸潮,得到含水量分别为 0.4%、1.8%、2.9% 和 4.0% 的绝缘纸试样。

2) 对绝缘油真空脱气并将其置于 40 °C 环境下进行干燥处理。

3) 在室温(25 °C)下向经真空脱气的绝缘油中滴入无水甲酸溶液。在此过程中,用玻璃棒搅拌酸溶液并利用自动酸值测试仪 JKCS-3 不间断监测油中酸值变化情况,最终得到甲酸含量分别为 1、2、3 mg·KOH/g 的绝缘油,并将其静置。

4) 将制备好的初始水分含量为 0.4%、1.8%、2.9% 和 4.0% 的绝缘纸分别浸入无酸和甲酸含量分别为 1、2 和 3 mg·KOH/g 的绝缘油溶液中(油纸质量比为 20:1),然后真空充氮并密封。将试样置于 50 Pa/25 °C 环境中充分浸渍,期间定期测定油中酸值直至油中酸值稳定,记录下此时油中酸值。

5) 稳定后,利用 IDAX-300 绝缘介电谱测试仪对步骤 4) 中不同酸值和水分含量的油浸纸试样进行 FDS 测试。

2.3 绝缘油中酸值测定

绝缘油中酸值是指在试验条件下中和 1 g 试样所消耗的氢氧化钾的质量。试验严格按照 GB/T 264《石油产品酸值测定法》^[23]中规定的测量步骤对绝缘油中的酸值进行测定。

2.4 频域介电谱测试

试验中频域介电谱的测试通过 IDAX-300 绝缘介电谱测试仪进行,选择的频率范围为 $10^{-4} \sim 10^3$ Hz,施加的电压为有效值为 100 V 的正弦交流电压,FDS 试验装置见图 1。

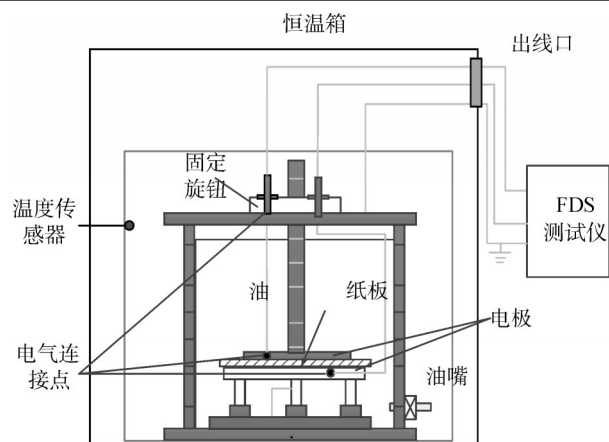


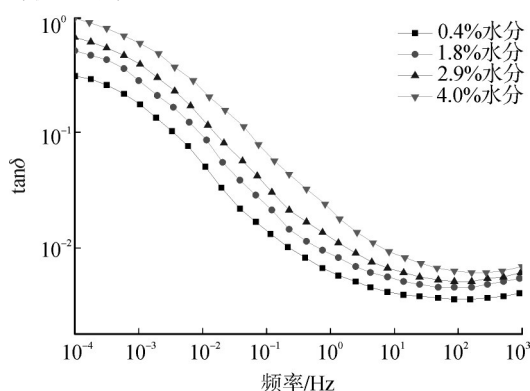
图1 FDS试验装置

Fig. 1 FDS measuring equipment

3 试验结果分析

3.1 水分对频域介电谱及酸值分布的影响

为研究水分含量对油浸纸试样 $\tan\delta$ 频域谱的影响,在试验中对不同水分含量的油浸纸试样进行了 FDS 测试,以无酸环境为例,油浸纸试样在不同水分含量下 $\tan\delta$ 频域谱测试结果见图 2。从图 2 中可以看出,随着绝缘纸中水分含量的上升,油浸纸试样 $\tan\delta$ 逐渐增大,这种增大趋势在 10^{-3} 到 10^1 之间十分显著,但在高频部分 $\tan\delta$ 变化不大。这是因为随着绝缘纸中水分含量的增加,绝缘中杂质粒子增多,极性分子数目即增多,油浸纸试样中极化程度增强,导致介质损耗变大,油浸纸试样 $\tan\delta$ 增大,而当频率升高时,极化速度跟不上电场变化,极化无法建立,使得水分对此频段 $\tan\delta$ 影响较小。

图2 无酸时不同含水量油浸纸试样 $\tan\delta$ 频域谱Fig. 2 The $\tan\delta$ spectroscopy of oil-impregnated paper samples without acid under different moisture content

文中测定了油浸纸试样在平衡前后的甲酸含量,结果见表 1。从表 1 可以看出,平衡前后油浸纸试样油中甲酸含量发生了很大变化,绝大部分酸在扩散中被绝缘纸吸收,只有少部分留在绝缘油中。这是由于甲酸为小分子酸,由羧基和烷基构成,其中

羧基为极性较强的基团,而烷基为非极性基团,甲酸分子中羧基所占比重较大,因此甲酸极性分子极性较强。而绝缘纸相对绝缘油具有更强的极性,根据相似相溶原理,甲酸更易溶于极性更强的绝缘纸,因此平衡前后甲酸被绝缘纸吸收,仅有少部分留在绝缘油中,这也与文[18]中结论一致。从表 1 中还发现,随着水分含量的增加,平衡前同一酸值含量的试样在平衡后更多地留在绝缘油中,这可能是因为水分含量的增加影响了小分子酸向绝缘纸中的扩散速度。

表 1 油浸纸试样平衡前后甲酸含量分布

Table 1 The distribution of formic acid in oil-impregnated paper samples before and after balance

初始酸值	after balance $\text{mg} \cdot (\text{KOH})^{-1}$			
	不同水分含量试样平衡后酸值			
	0.4%	1.8%	2.9%	4.0%
0	—	—	—	—
1	0.17	0.20	0.23	0.25
2	0.34	0.37	0.41	0.44
3	0.53	0.56	0.59	0.61

3.2 甲酸对不同含水量试样频域介电谱的影响

文中在试验中对不同水分含量下不同甲酸含量的油浸纸试样进行 FDS 测试,测试结果见图 3。由图 3 可以看出,在同一绝缘纸水分含量下,随着甲酸含量的增加,油浸纸试样 $\tan\delta$ 逐渐增大,这种增大趋势在 10^{-3} ~ 10^1 之间十分显著,但在高频部分油浸纸试样 $\tan\delta$ 变化不大,并且随着油中酸值含量的增加,油浸纸试样 $\tan\delta$ 呈现向高频移动的趋势。

这主要是由于:当有外加电场作用时,电子位移极化为非极性和弱极性分子极化的主要形式,其建立时间约为 10^{-15} ~ 10^{-14} s;而偶极子转向极化为极性电介质极化的主要形式,其建立时间约为 10^{-6} ~ 10^{-2} s^[24]。当绝缘纸中水分含量相同时,随着甲酸含量的增加,一方面会导致油浸纸试样中极性分子数目的增多,极化强度随之加强,试样介质损耗也随之变大;另一方面甲酸含量的增加会加大甲酸的电离程度,绝缘纸电导率随之提高,从而加快极化速度,减小极化响应时间,使得试样 $\tan\delta$ 向右移动。但随着频率的增加,交流电场周期与极性分子的极化时间逐渐接近,极化跟不上交流电场变化,出现极化滞后的情况,因此油浸纸试样的 $\tan\delta$ 在高频部分变化不大,十分接近。同时对比图 3 中 4 个小图还可发现,相较于无酸环境,当油中有酸时,对比同一水分含量下无酸和有酸的情况,可发现酸值含量的增加使油浸纸试样同一水分含量下的 $\tan\delta$ 频域谱发

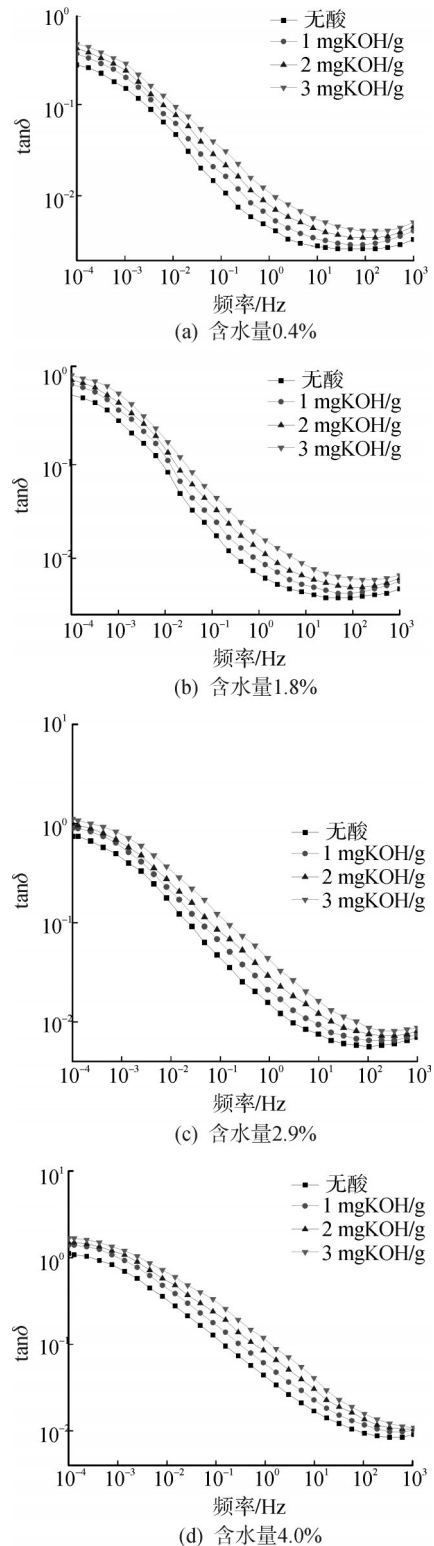


图3 甲酸对不同含水量油浸纸试样tanδ频域谱影响
Fig. 3 Influence of formic acid on the tanδ spectroscopy of samples with different moisture content

生不同程度的增加,证明在利用频域方法评估水分含量时,酸对于水分的影响不容忽视,因此在评估油纸绝缘水分含量时须考虑小分子酸的影响。

3.3 酸性环境下绝缘纸水分含量评估

传统绝缘纸水分含量的评估通常没有考虑酸

的影响,而油纸绝缘系统在老化过程中会产生以酸为代表的老化产物,结合以上分析,评估油纸绝缘水分含量时须考虑小分子酸的影响。因此,将在不同酸性环境下对油纸绝缘水分含量进行评估。文3.2节中发现不同含水量和甲酸含量的油浸纸试样tanδ频域谱在10⁻³~10¹变化显著,因此将对此频段进行积分处理,提出介质损耗因数tanδ积分量S_{tanδ}作为表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量。相较于采用tanδ频域谱上某一特定的tanδ值作为评估绝缘纸水分含量等状态的特征参量而言,选用介质损耗因数tanδ积分量S_{tanδ}不仅可在一定程度上消除由干扰所造成的某一特定频率的畸变,并且由于包含的频率点更多,信息也更为丰富。介质损耗因数tanδ积分函数S_{tanδ}可表示为

$$S_{tan\delta} = \int_{10^{-3}}^{10^1} \tan \delta(f) df \quad 10^{-3} \leq f \leq 10^1 \quad (6)$$

由式(6)可计算出不同含水量和不同酸值含量下油浸纸试样介质损耗因数tanδ积分量S_{tanδ},结果见表2。从表2可以看出,油浸纸试样介质损耗因数tanδ积分量S_{tanδ}随着水分含量和酸值含量的增加而增大,同时不同酸值含量下介质损耗因数tanδ积分量S_{tanδ}与水分含量之间存在一定规律。

表2 不同水分和甲酸含量下试样tanδ积分量S_{tanδ}

Table 2 The S_{tanδ} of oil-impregnated paper samples under different formic acid content and moisture content

水分含量/%	甲酸含量/[mg·(KOH) ⁻¹]			
	0	1	2	3
0.4	0.051 2	0.071 9	0.099 8	0.130 3
1.8	0.108 4	0.122 8	0.154 5	0.218 4
2.9	0.137 3	0.200 0	0.273 9	0.379 8
4.0	0.377 2	0.513 3	0.676 2	0.874 2

为了更好地表征不同酸值含量下特征参量S_{tanδ}与水分含量mc(%)之间的关系,将不同甲酸含量下油浸纸试样介质损耗因数积分量S_{tanδ}与水分含量mc(%)进行拟合,拟合结果见图4。拟合参数见表3。

由图4和表3可以看出,不同甲酸含量下油浸纸试样tanδ积分量S_{tanδ}对绝缘纸水分含量mc(%)的变化十分敏感,并与绝缘纸水分含量mc(%)存在较好的指数拟合关系,拟合优度也在0.95以上。同时从不同酸值含量下的拟合曲线可以看出,随着环境酸性的增强,S_{tanδ}和水分拟合曲线呈逐渐上升的趋势,

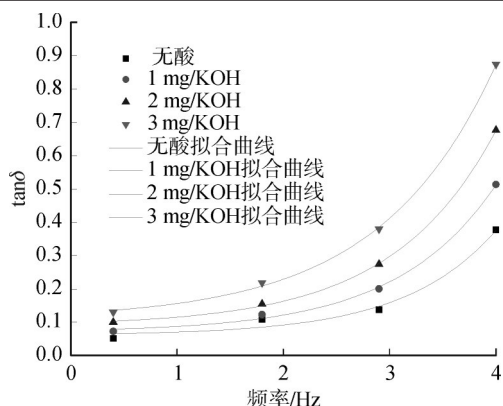


图4 不同甲酸含量下油浸纸试样 $S_{\tan\delta}$ 与 mc 拟合关系

Fig. 4 The fitting relationship between $S_{\tan\delta}$ and mc of samples with different formic acid content

表3 不同甲酸含量下油浸纸试样 $S_{\tan\delta}$ 与 mc 拟合参数

Tab. 3 The fitting parameters between $S_{\tan\delta}$ and mc of samples with different formic acid content

甲酸含量/ [mg·(KOH) ⁻¹]	拟合方程 $S=A \times \exp(-mc/B)+C$			
	A	B	C	R^2
0	0.002	-0.850	0.060	0.957
1	0.006	-0.932	0.069	0.981
2	0.009	-0.960	0.088	0.987
3	0.019	-1.080	0.108	0.990

具有很强规律性。因此介质损耗因数积分量 $S_{\tan\delta}$ 可用作表征不同酸性环境中油纸绝缘水分含量的特征参量。在实际评估油纸绝缘水分含量时,文中认为可先测定油中酸值含量和测试其 $\tan\delta$ 频域谱,通过表3中不同酸值含量下 $S_{\tan\delta}$ 与水分含量 $mc(\%)$ 的拟合关系评估绝缘纸中水分含量,以此消除酸对水分评估的影响,从而更为准确地评估油纸绝缘水分含量。

3.4 进一步研究和讨论

1)文中于恒温条件下对油浸纸绝缘试样进行FDS测试,而温度对频域介电谱FDS测试影响较大,同时酸在不同温度下溶解度也有所差异,这些因素是否会对绝缘纸水分含量的评估产生影响也尚未可知,因此在后续研究中拟设定不同的温度梯度,考虑不同温度下酸的溶解度及其对油纸绝缘水分含量评估的影响。

2)为建立数据库以用于评估油纸绝缘状态,拟在后续研究中增加绝缘纸水分含量和油中酸值含量的梯度,以准确评估油纸绝缘状态并提供理论基础和数据支撑。

4 结论

文中制备了不同水分和甲酸含量的油浸纸试

样,测试了不同酸值 and 水分含量下油浸纸试样的FDS曲线,并基于 $\tan\delta$ 频域谱提出表征酸性环境下绝缘纸水分含量的特征参量,得出了以下结论:

1)水分会影响小分子酸在油纸间的分布;油浸纸试样 $\tan\delta$ 频域谱随着绝缘纸水分含量和油中酸值含量的增加而增大,增大趋势在 $10^{-3} \sim 10^1$ 之间十分显著, $\tan\delta$ 频域谱随着频率的增加呈现向高频移动的趋势。

2)相较于无酸环境,酸值含量的增加使油浸纸试样同一水分含量下的 $\tan\delta$ 频域谱发生不同程度的增加,进一步说明酸对水分的影响不容忽视,在实际评估绝缘纸水分含量时需考虑小分子酸的影响。

3)基于 $10^{-3} \sim 10^1$ Hz频段提出的不同甲酸含量下的特征参量—油浸纸试样 $\tan\delta$ 积分量 $S_{\tan\delta}$,其与水分含量的拟合曲线优度高,且随着酸性环境的增强拟合曲线呈现逐渐上升的趋势,因此可将介质损耗因数积分量 $S_{\tan\delta}$ 作为表征不同酸性环境下油纸绝缘水分含量的特征参量,以消除酸对水分评估的影响,从而更为准确地评估油纸绝缘水分含量。

参考文献:

- [1] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,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 Shuangsoo, 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] 彭积城,蔡金锭. 变压器油纸绝缘老化状态的探讨[J]. 高压电器,2015,51(5):132-138.
PENG Jicheng, CAI Jinding. Discussion on evaluation of aging condition for transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(5):132-138.
- [3] 郑元兵,孙才新,李 剑,等. 变压器故障特征量可信度的关联规则分析[J]. 高电压技术,2012,38(1):82-88.
ZHENG Yuanbing, SUN Caixin, LI Jian, et al. Association rule analysis on confidence of features for transformer faults[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1):82-88.
- [4] LUNDGAARD L E, HANSEN W, INGEBRUGTSN S, et al. Aging of kraft paper by acid catalyzed hydrolysis[C]// 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra, Portugal: IEEE, 2005: 381-384.
- [5] 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, LYU Jiefeng, LYU Yandong, et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantita-

- tive assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 204-211.
- [6] 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.
- [7] 吴广宁, 崔运光, 王晓剑, 等. 应用油中酸值评估不同老化程度绝缘纸中水分含量[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 115-122.
- WU Guangning, CUI Yunguang, WANG Xiaojian, et al. Evaluation of water content in insulation paper of different aging degrees using acid value in oil[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 115-122.
- [8] 段宗超, 吴广宁, 崔运光, 等. 铜类产物对油纸绝缘频域介电谱特性的影响[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 14-20.
- DUAN Zongchao, WU Guangning, CUI Yunguang, et al. Impacts of copper-based products on the characteristics of frequency domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 14-20.
- [9] 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 CSEE, 2014, 34(21): 3541-3547.
- [10] LI J, ZHANG Z T, GRZYBOWSKI S, et al. Characteristics of moisture diffusion in vegetable oil - paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1650-1656.
- [11] LI J, ZHANG Z T, GRZYBOWSKI S, et al. A new mathematical model of moisture equilibrium in mineral and vegetable oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1615-1622.
- [12] DU Y, ZAHN M, LESIEUTRE B C, et al. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(1): 11-20.
- [13] 彭华东, 董明, 吴雪舟, 等. 油纸绝缘频域介电谱影响因素研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 6-12.
- PENG Huadong, DONG Ming, WU Xuezhou, et al. Influencing factors on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 6-1.
- [14] 袁泉, 胡舰, 周天春, 等. 温度对变压器用油纸绝缘老化的频域介质响应的试验研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 74-79.
- YUAN Quan, HU Jian, ZHOU Tianchun, et al. Temperature influence on frequency domain dielectric response to transformer oil-paper insulation aging[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 74-79.
- [15] 李洁, 侯英洒, 赵建利, 等. 温度和老化程度对油纸绝缘频域谱的影响研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 157-162.
- LI Jie, HOU Yingsa, ZHAO Jianli, et al. Effects of temperature and aging degree on frequency spectrum of oil paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 157-162.
- [16] 王有元, 高竣, 刘捷丰, 等. 变压器油纸绝缘老化与水分含量评估频域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 215-221.
- WANG Youyuan, GAO Jun, LIU Jiefeng, et al. Aging and moisture evaluation characteristic parameters for oil-paper insulation of transformer using frequency dielectric spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 215-221.
- [17] 周利军, 李先浪, 吴广宁. 油纸绝缘电介质响应低频弥散的极化机理[J]. 高电压技术, 2013, 39(8): 1873-1880.
- 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.
- [18] LUNDGAARD L E, HANSEN W, INGEBUGTSN S. Aging of mineral of im-pregnated cellulose by acid catalysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 540-546.
- [19] HERNANDEZ R, LACHMAN M, GRIFFIN P, et al. Impact of aging by-products on moisture estimation in transformers using dielectric response measurements[J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(2): 469-475.
- [20] LINHJELL D, LUNDGAARD L, GAFVERT U. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.
- [21] 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(3): 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 Apparatus,

- [20] 徐翠丽. 中压空气绝缘开关柜的研究探析[J]. 企业科技与发展, 2015(3):68-69.
- XU Cuili. Research on medium voltage distribution cabinet[J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2015(3):68-69.
- [21] 武建文,王贺飞,蒋原,等. 高压断路器分—合能力合成回路试验模拟系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3150-3155.
- WU Jiangwen, WANG Hefei, JIANG Yuan, et al. Design of simulation system of the synthesis loop for testing the closing capacity of high voltage breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3150-3155.
- [22] 胡星福,高华云,毛江虹. 触头表面粗糙度对接触电阻影

响的探讨[J]. 电工材料, 2004(1): 14-16.

HU Xingfu, GAO Huayun, MAO Jianghong. Discuss in the effects of contact surface coarseness on contact resistance[J]. Electrical Engineering Materials, 2004(1): 14-16.

- [23] 柏小平,李国伟,翁桅. 电触头表面状态对接触电阻的影响和改善方法[J]. 电工材料, 2013(1): 10-15.
- BAI Xiaoping, LI Guowei, WENG Wei. Effects of contact surface condition on contact resistance and improving methods [J]. Electrical Engineering Materials, 2013(1):10-15.

崔建(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电器智能化技术应用。

(上接第213页)

age Engineering, 2015, 41(3):832-839.

- [22] 段宗超,吴广宁,高波. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2881-2887.
- DUAN Zongchao, WU Guangning, GAO Bo. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2881-2887.
- [23] 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.

- [24] 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2000:48-49.
- SUN Muzhen. Dielectric physics[M]. Guangzhou: South University of Technology Press, 2000: 48-49.

高波(1976—),男,副教授,硕导,主要从事高电压试验技术、电气设备状态检测及故障诊断研究工作。

许竞(1993—),女,研究生,主要从事高电压试验技术、电气设备状态检测及故障诊断研究工作。