

绝缘油老化特性及诊断方法研究进展

郭金明, 田树军, 卓浩泽

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530000)

摘要:长期电-热复合应力作用下的绝缘油老化问题严重威胁油浸式变压器的安全稳定运行。针对绝缘油老化及其后效引发的变压器故障,亟需开展绝缘油老化特性、机理及诊断方法等相关问题的研究。为此,对矿物绝缘油及植物绝缘油电老化特性及诊断方法的发展现状与关键技术进行了评述。本文首先总结了变压器用矿物绝缘油及植物绝缘油的理化特性,从高温性能、生物降解率、酸值、电气强度等角度将两者进行了对比。随后就两种绝缘油电、热老化基本形式及老化产物进行了综述。在此基础上,强调了铜等金属材料对绝缘油老化的影响。最后阐述了常用的绝缘油老化状态诊断方法,多种检测手段相结合的特征量多维融合表征有望提高诊断准确率,具有较好的工程应用前景。

关键词:矿物绝缘油;植物绝缘油;热老化;电老化;老化诊断

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)08-0008-10

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.08.002

Research Progress in Ageing Characteristics and Diagnostic Methods of Insulating Oil

GUO Jinming, TIAN Shujun, ZHUO Haoze

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: The ageing problem of insulating oil under long-term electrical-thermal combined stress seriously threatens the safe and stable operation of oil-immersed transformers. In view of the transformer faults caused by the ageing of insulating oil, it is urgent to research the ageing characteristics, mechanism, and diagnostic methods of insulating oil. Therefore, the development status and key technologies in the electrical thermal ageing characteristics and diagnostic methods of mineral insulating oil and vegetable insulating oil were reviewed. This paper first summarized the physical and chemical properties of mineral oil and vegetable oil for transformers, and their high temperature performance, biodegradability, acid value, and electric strength were compared. Then the two basic forms of electrical and thermal ageing and their products for insulating oil were reviewed. On this basis, the influence of metal materials such as copper on the ageing of oil was emphasized. Finally, the commonly used ageing diagnostic methods of insulating oil were described. The multi-dimensional fusion characterization of feature parameters from different detection methods is expected to improve the diagnostic accuracy, which has a good engineering application prospect.

Key words: mineral insulating oil; vegetable insulating oil; thermal ageing; electrical ageing; ageing diagnosis

0 引言

电网的安全运行是国民经济发展和社会稳定的基础。电力设备安全运行是电网安全的第一道

防线,大型油浸式变压器作为电力系统能量转换的枢纽,其绝缘运行状态的好坏对系统安全运行起着至关重要的作用^[1]。绝缘油和油浸纸绝缘共同作为变压器内绝缘的主体部分,在电、热应力等作用下会发生老化,严重影响变压器的运行寿命。

绝缘油在变压器中具有绝缘、冷却及灭弧的作用。通常要求绝缘油具有良好的氧化安定性、电气性能、耐高温性能、抗阻燃性能和低温性能^[2-3]。传

收稿日期:2020-08-18 修回日期:2020-11-11

基金项目:广西电网公司科技项目(GXKJXM20190384)

作者简介:郭金明(1985-),男(汉族),广西南宁人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

统的绝缘油一般采用矿物绝缘油,但矿物绝缘油的主要缺点为其生物降解率低于30%,一旦发生泄漏会对周围的土壤和水源造成严重污染^[4-5]。因此,有必要选择更为环保的植物绝缘油作为其替代绝缘介质。植物绝缘油作为液体绝缘介质的研究与矿物绝缘油同期开始进行,早期因其黏度大、凝点高及介电性能差而仅用于电容器的浸渍剂^[6]。经过精炼及添加抗氧化剂与降凝剂处理后的植物绝缘油燃点高于300℃,且28 d的自然生物降解率高达95%,工频击穿电压高达70 kV^[2,4]。但已有的研究并未完全解决植物绝缘油黏度大的问题^[7]。LI-AO R J等^[8]在对植物绝缘油浸纸绝缘的人工加速热老化试验中发现,植物绝缘油浸纸绝缘热老化后的油中酸值远大于矿物绝缘油浸纸绝缘,这主要是由于植物绝缘油分子极易水解生成高分子酸。虽然IEEE Std C57.147-2018^[9]中规定植物绝缘油新油的酸值小于0.06 mgKOH/g,相对于矿物绝缘油放宽了标准,但其酸值随油老化程度加深而急剧增大的问题仍未解决,其耐老化性能还需进一步研究。其次,虽然目前国内外已在植物绝缘油的合理精炼及性能提升等领域取得了较大进展,但要在工程实际中实现大规模运用,还需考虑制作成本及工艺成熟化等问题^[10]。表1为目前应用较广泛的两种植物绝缘油(FR3和BIOTEMP)与矿物绝缘油的基本电气、理化性能^[4],表中部分数据后标明了所采用标准规定的测试条件,例如工频击穿电压测试电极距离及介质损耗因数的测试温度等。

综上所述,矿物绝缘油与植物绝缘油分别作为目前应用最广泛和有高度应用前景的变压器用绝缘油,研究两者的绝缘老化特性并明晰其区别具有极大的现实意义。针对绝缘油在老化应力作用下的绝缘性能变化规律这一问题,国内外诸多学者开展了大量试验研究和分子模拟老化机理分析^[11-14],从宏观与微观两个角度揭示了不同绝缘油的老化特性。根据IEC 60599:2015^[15],绝缘油中的故障主要分为热故障和电故障,现有的绝缘油老化研究基本也是从电、热两方面展开。

本文首先阐述了传统矿物绝缘油与植物绝缘油在电气、理化性能方面的差别,随后分别从热老化与电老化两种老化形式对两类绝缘油的老化特性及产物进行系统评述,在此基础上,探讨金属铜对绝缘油老化的影响机理。最后就目前研究较多的绝缘油老化状态评估手段进行总结。

表1 植物绝缘油与矿物绝缘油基本电气、理化性能对比
Tab.1 Comparison of basic electrical physical and chemical properties of vegetable insulating oil and mineral insulating oil

参数	FR3	BIOTEMP	矿物绝缘油
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	34	45	3~16
酸值/(mgKOH/g)	0.040	0.075	≤0.030
凝点/℃	-21	-25~-15	-60~-30
闪点/℃	316	330	100~170
表面张力/(mN/m)	24	—	—
21 d生物降解率/%	99	97	30
密度(20℃)/(kg/m ³)	0.92	0.91	0.83~0.89
工频击穿电压/kV	56(2 mm)	65(2 mm)	60(2.5 mm)
介质损耗因数/%	3.00(100℃)	2.00(100℃)	0.01(90℃)
体积电阻率/(Ω·m)	10 ¹² (90℃)	10 ¹¹ (90℃)	10 ¹³ (90℃)
相对介电常数	3.2(25℃)	3.2(25℃)	2.2(25℃)

1 绝缘油老化形式及老化机理

1.1 绝缘油的热老化

热老化是绝缘油性能劣化的最主要形式,已有的研究工作主要是针对绝缘油的高温热裂解和热氧化两方面。因为矿物绝缘油与植物绝缘油在分子结构上有着本质区别,所以两者的热老化反应过程和老化产物也有所不同。

1.1.1 矿物绝缘油热裂解机理及产物

矿物绝缘油是由石油经过蒸馏、精炼得到,它是各种碳氢化合物组成的混合物,主要包括环烷烃(C_nH_{2n})、烷烃(C_nH_{2n+2})、芳香烃(C_nH_{2n-m})。其中,碳、氢两元素占其全部元素质量的95%~99%,其他为硫、氮、氧及极少量金属元素等^[3]。

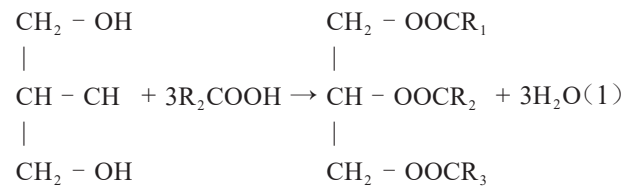
文献[16-17]的研究成果表明,矿物绝缘油的热裂解可分为两个阶段:第一阶段是烷烃的裂解,得到产物烯烃和环烷烃;第二阶段是烯烃、环烷烃和芳香烃的裂解。在能量较低的情况下,热裂解主要为第一阶段,发生烷烃C-C键的断裂和脱氢反应,生成小分子烷烃、烯烃和氢气(H₂)等^[12]。烯烃的热稳定性优于烷烃,裂解的温度相对较高,矿物绝缘油中不含烯烃,其主要来源于热裂解第一阶段。

文献[12]和[18]基于分子动力学模拟方法建立了含有30个分子的矿物绝缘油仿真模型,较为系统

地研究了高温下矿物绝缘油的动态热裂解过程及生成产物。在此基础上,还重点分析了温度对热裂解过程的影响。结果表明,随着温度的升高和时长增加,矿物绝缘油分子碳链持续断裂,生成分子量较大的中间产物和分子量较小的自由基与气态小分子,中间产物又进一步断裂最终生成自由基与气态小分子。温度对分解产物有较大影响, H_2 和 C_2H_2 是高温裂解的产物, C_2H_6 和 C_2H_4 是中低温裂解的产物, CH_4 一直存在。最后将仿真结果与热重试验结果进行对比,验证了微观仿真的合理性与可靠性。

1.1.2 植物绝缘油热裂解机理及产物

植物绝缘油的主要成分是甘油三酸酯(简称为甘三酯),还有少量甘油一酸酯、甘油二酸酯及游离脂肪酸。甘三酯可认为是1个甘油分子与3个脂肪酸分子缩合而成,结构式如式(1)所示,式中 R_1 、 R_2 、 R_3 是相同或不同结构的脂肪酸基团。



植物绝缘油的热裂解机理相较于矿物绝缘油更为复杂,而且不同种类植物绝缘油因甘三酯种类和含量不同的原因,其分解产物也有差异^[19]。诸多国内外学者对植物绝缘油热裂解产气特性进行了研究。结果表明, C_2H_6 是植物绝缘油热裂解的主要特征气体,而矿物绝缘油裂解时主要特征产物是 CH_4 ^[20-21],而且植物绝缘油裂解生成 CO_2 和 CO 含量也明显高于矿物绝缘油。因此,有必要对植物绝缘油热裂解产物进行更深入研究,从而指导植物绝缘油变压器的故障诊断。相晨萌等^[11,22]对植物绝缘油热裂解过程进行分子动力学模拟,发现含非共轭双键越多的甘三酯分子热稳定性越差,越易分解,并得出了植物绝缘油分子分解特征产物的生成路径,为植物绝缘油热裂解机理提供了理论支撑。

1.1.3 绝缘油热氧老化机理及产物

变压器在运行条件下,内部绝缘油除发生热裂解外,还会与氧气发生热氧老化反应,热氧老化过程如图1所示。

在热氧老化条件下,植物绝缘油因氧化和酯水解会比矿物绝缘油生成更多的酸^[23-24],而矿物绝缘油中的酸性物质基本来源于氧化反应,所以直接用酸值评定绝缘油的热氧老化程度是合理的。

植物绝缘油与矿物绝缘油的热氧老化反应方

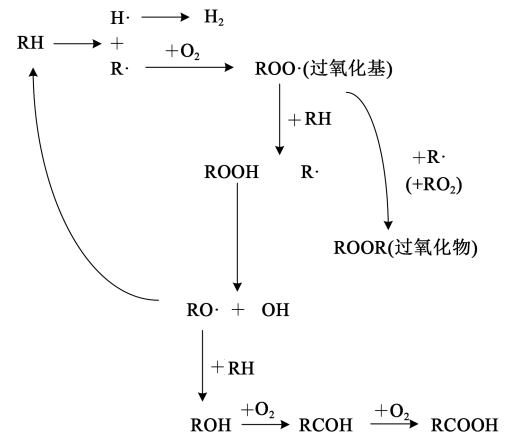


图1 绝缘油热氧老化反应过程

Fig.1 Thermal oxygen ageing reaction process of insulating oil

程虽然基本相同,但由于植物绝缘油中存在大量不饱和脂肪酸基团,使其氧化安定性相对于矿物绝缘油较差。植物绝缘油因含有不饱和双键而发生自动氧化反应,是一种按照链式自由基机理进行的反应,包括3个阶段:链的引发、链的传递和链的终止^[19]。由于植物绝缘油天然较差的氧化安定性,国内外学者针对抗氧化剂的选择也进行了专门的研究^[13,25],抗氧化剂分子会与氧化中的自由基相互反应,从而使氧化反应链中断,达到抑制绝缘油氧化的作用。CIGRE研究组总结了有关绝缘油氧化机理及氧化安定性评估的报告^[26]。

两类绝缘油在热氧老化条件下的电气、理化性能会发生变化,因此提出了诸多评价绝缘油热氧老化程度的方法及标准,例如IEC 61125-1992与ASTM D2440-2004通过测定绝缘油的氧化安定性来评估其老化状态^[27-28]。S SINGHA等^[29]研究发现,对矿物绝缘油和植物绝缘油在同一老化条件下进行加速热老化后,虽然植物绝缘油的介质损耗和酸值随老化时间增加而急剧增加,但其交流击穿电压却基本不变。这与矿物绝缘油将酸值和介质损耗作为老化评估指标的情况显然不同,表明针对矿物绝缘油的热氧老化评估标准不能直接用于对植物绝缘油的热氧老化评估。文献[5]对植物绝缘油的热氧老化评估进行深入研究,文献[30]通过压差扫描量热法(PDSC)测量植物绝缘油热氧老化后的氧化诱导时间(OIT)来评估其氧化安定性,以此得到植物绝缘油老化状况。

1.2 绝缘油的电老化

电老化机理较热氧老化更为复杂,包括绝缘油

在电场下的一系列物理化学反应、放电过程中的带电质点撞击、放电过程中的活性生成物以及热效应、可见光与紫外线等都会对绝缘油分子结构产生影响,使绝缘材料分解^[1]。绝缘油的电老化主要由局部放电引发。有关绝缘油在电应力作用下的分子裂解过程和产物生成路径的研究尚未涉及。目前针对绝缘油电老化的研究主要集中于绝缘油发生放电情况下的产气特性和绝缘油放电引发机理两个方面。

1.2.1 绝缘油放电机理

对于绝缘油放电机理的研究,由于液体电介质致密流动的性状使其放电现象易受外界环境因素的影响,不同试验条件下得到的放电规律并不一致,没有一种统一的放电机理解释。已有的研究大多认为是流注或气泡及微小杂质的存在而造成放电。针对流注理论研究方面,文献[31]通过研究电子发射理论,认为是高速运动电子碰撞中性分子使其电离而形成电子崩;文献[32-33]对场电离理论进行相关研究,认为中性分子在场强作用下发生跃迁而产生了带电离子。也有学者认为是因液体电介质中气泡或微小杂质的存在而引发局部放电,例如,文献[34-35]对绝缘油中气泡产生机理、气泡放电特性,以及油中含金属微粒时的放电机理作了详细阐述。

1.2.2 绝缘油电老化产物

针对电老化对绝缘油的影响,文献[36-38]根据 ASTM D6180-2008 标准进行大量不同种类绝缘油的电老化试验研究。研究表明,在分别对植物绝缘油与矿物绝缘油进行电老化后,矿物绝缘油的产气量高于植物绝缘油,该试验结果在文献[39]中也有说明。究其原因,一种观点认为植物绝缘油在化学结构上更均匀,而矿物绝缘油始终包含各种混合物,因此显现出高产气性,但如果将矿物绝缘油过分精炼,甚至可能会丢失一些实际所需的不饱和物。另一种观点认为,与矿物绝缘油相比,植物绝缘油的这种低放气趋势是由不饱和、非芳族分子的数量所致。文献[40]在对比分析两类绝缘油在放电条件下的产气特性时得到了不同的结论,因此研究人员更深入地统计了一定时间内的油中放电次数和放电量。结果表明,单次放电下矿物绝缘油烃类特征气体产量基本都高于植物绝缘油,与上述结论相符,但由于矿物绝缘油 2 h 内放电次数和放电量远低于植物绝缘油,最终导致矿物绝缘油烃类特征

气体产量远低于植物绝缘油。

在此基础上,文献[41-42]测量了绝缘油经热老化、电老化和电-热联合老化后的水含量、介质损耗因数、界面张力、浊度以及油中溶解产物(dissolved decay products, DDP)等电气、理化参数。测试结果表明,热老化对绝缘油的介质损耗因数影响最大,而电老化对绝缘油的界面张力影响最大,同时根据 DDP 和浊度测试所反映的结果,推测出在放电情况下绝缘油分子还会发生二次化合反应。

国内学者也对绝缘油放电产气特性进行相关研究,相晨萌^[22]根据放电能量不同分别对山茶籽植物绝缘油进行了局部放电、击穿放电以及电弧放电时油中溶解气体特性研究。研究表明,局部放电时绝缘油产生的气体含量较低,主要由于局部放电是一种低能放电形式,烃类气体含量最高的是 CH_4 ,当放电发生 10~20 h 时才会有 C_2H_2 产生;而 C_2H_2 是击穿放电和电弧放电的主要特征气体产物,其次是 C_2H_4 、 CH_4 和 C_2H_6 ;相比于局部放电和击穿放电,电弧放电能量最高,所以产生气体含量也明显高于另外两种放电形式。随后又通过分子模拟手段分析电应力对植物绝缘油分解反应的影响机制:在变压器正常运行时的电场强度下,电场仅对植物绝缘油的分解起促进作用,并不改变其断键特性。而在放电发生时,在强电场作用下,分子断键反应机制发生变化,小分子气体产物的生成路径比热解时更加复杂多样,不仅包括大分子分解为小分子的反应,还出现了小分子结合的化合反应,这也验证了 IFOFANA 等^[37-38]提出的二次化合反应理论。

1.3 绝缘油的电-热联合老化

实际上,绝缘油在运行过程中大部分情况下会受到电、热应力的同时作用。国内外针对材料多因子老化问题也开展了很多研究,主要涉及建立宏观的现象学模型(即唯像模型)与揭示材料微观老化机理(即物理模型)两种方式^[43]。对于唯像模型,因其不涉及材料老化的具体物理机制,要求针对研究对象选择适用性高的模型,廖瑞金等^[44]发现 FALLOU 模型最适合油纸绝缘电-热联合老化的评估。而对于物理模型,电-热联合应力作用下油纸绝缘的局部放电与空间电荷现象的机理解释逐渐受到关注^[45]。

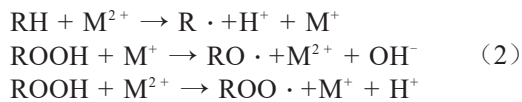
无论是采用何种模型,研究绝缘油在电-热联合作用下的老化,还需考虑协同效应的作用机制。大量研究结果表明,在电应力与热应力的同时作用

下,材料的失效时间明显缩短,且不能以简单的代数叠加去分析多应力的联合作用^[46]。相比于绝缘油的热、电单因子老化,电-热联合老化的具体机理研究尚不充分,是未来研究的重点与难点。

2 铜对绝缘油老化的影响

金属铜因其低电阻率及耐蚀等特性被用于变压器绕组的制造。变压器油在运行过程中不可避免地会与金属接触,因此绝缘油中会含有微量的铜、铁等金属元素。自20世纪50年代以来,不同变压器制造商展开了金属对绝缘油老化特性影响的研究。德国纽伦堡变压器制造厂^[26]研究不同金属对绝缘油老化的影响。结果表明,Al、Fe、Fe(镀锌)、Zn、Cu对绝缘油的氧化催化速率之比为1:1:3:4:13。可见,铜对变压器油的老化催化作用最为明显,变压器中的金属材料除铜外,还有用于铁芯制造的硅钢片等其他金属,本文选取最具代表性的铜来阐述其对变压器绝缘油老化的影响。

首先,文献[47-48]表明,金属铜对变压器绝缘油氧化具有催化作用。它可以通过直接或间接参与绝缘油的链式反应,通过降低引发步骤的活化能来催化绝缘油的氧化反应。此外,它可以与绝缘油分子直接反应生成烷基自由基,并通过式(2)氧化还原途径将有机氢过氧化物分解为自由基。



廖瑞金等^[48]系统研究了铜对变压器绝缘油热老化的影响,分别设计矿物绝缘油在有铜和无铜条件下的热老化试验,通过对比老化前后绝缘油的紫外光谱图谱发现,铜对矿物绝缘油的老化影响显著。在此基础上,通过测量绝缘油中抗氧化剂随老化进程的变化,证明铜对绝缘油氧化有催化作用。S TENBOHLEN等^[49]验证了铜的氧化催化作用同样适用于植物绝缘油。

随后,文献[50-51]表明铜除了充当绝缘油的氧化反应催化剂外,绝缘油中溶解铜离子和悬浮铜颗粒还会对绝缘油的电气、理化性能产生直接影响,具体为溶解铜离子会引起绝缘油的介质损耗因数增加,而悬浮金属铜颗粒会在油水界面积聚造成界面张力下降等,从而降低绝缘油的绝缘性能。对于绝缘油中存在的铜离子,已有研究利用吸附剂对其进行吸附处理,处理后的油中铜离子含量明显降低,绝缘油的各项电气、理化参数明显提升^[52]。

此外,绝缘油中存在以二苄基二硫(dibenzyl-disulfide, DBDS)为主的腐蚀性硫化物会腐蚀铜绕组,生成导电性的Cu₂S, Cu₂S会沉积于绝缘纸表面,造成油纸绝缘电场分布的改变,可能引发局部放电甚至击穿。因此,为防止腐蚀性硫化物引起变压器运行故障,一方面是要严格把控含腐蚀性硫化物的绝缘油进入变压器,例如GB/T 2536—2011等标准已对新绝缘油中腐蚀性硫含量做出了规定。另一方面,对于运行一定时长的变压器也要对绝缘油中腐蚀性硫含量进行检测。针对绝缘油中含有腐蚀性硫化物的问题,目前的研究主要是向绝缘油中添加金属钝化剂,相比于更换新绝缘油或化学方法除硫等其他方法,添加钝化剂相对成本较低且适用范围更广。但它也会使得绝缘油的产气特性及电气性能受到影响^[53],虽然国家标准未对新绝缘油中金属钝化剂的含量做出相应规定,但是有学者建议向运行一段时间后的绝缘油中添加钝化剂,而非采取直接向新绝缘油中添加的方式^[54]。

3 绝缘油老化状态诊断方法

3.1 电气、理化特征参量法

绝缘油电气、理化特征参量是其老化状态的直观表征。其中,电气特征量主要包括工频击穿电压、介质损耗因数及体积电阻率等;理化特征量主要包括黏度、闪点、界面张力、浊度、酸值、含水量等。IEC针对矿物绝缘油与植物绝缘油各自特性分别制定了新绝缘油参数标准^[55-56]。

基于上述电气、理化特征参量,研究人员对绝缘油老化特性进行了大量研究。Y HADJADJ等^[57]针对绝缘油的界面张力、酸值、浊度和DDP值对绝缘油的热老化特性展开研究,同时定量分析了上述特征参数之间的关联度。研究表明,老化绝缘油界面张力与DDP值呈线性关系,与浊度呈指数函数关系,酸值与DDP值及浊度均呈现指数函数关系。上述数学关系可实现绝缘油电气性能的多参量评估。I A R GRAY^[58]制定了针对酸值和界面张力的绝缘油老化状态分类表,并将界面张力与酸值的比值定义为OQIN因数。新油的OQIN因数为1 500,当OQIN因数降低到100时表明该绝缘油已严重老化,需要进行更换或再处理。M KOHTOH等^[59]对不同制造年份、电压等级为66~500 kV的在运变压器绝缘油进行了电气参数测试,发现各类绝缘油的体积电阻率及介质损耗因数随老化时间增加分别呈显著

的下降和上升趋势,但绝缘油的击穿电压总体上保持在 60 kV 左右,仍具有较好的绝缘强度。

由此可见,在评估绝缘油老化状态时,国内外学者选择的电气、理化特征参量不尽相同。与此同时,部分特征参量未能准确反映绝缘油的老化状态。因此,为绝缘油老化状态做出高效准确诊断,首先需要选择合适的老化特征参量,要求其对绝缘油老化状态具有较高的敏感程度,该参数的选择也成为绝缘油老化诊断研究的热点话题之一。

3.2 绝缘油中溶解气体分析

绝缘油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)根据特征气体组分、含量及比例来判断绝缘老化故障类型及严重程度。该方法已广泛用于变压器绝缘故障诊断,许多学者在研究绝缘油老化状态评估时也使用 DGA 方法。例如, M MAHARANA 等^[60]通过绝缘油中 C_2H_4 、 C_2H_6 波度比和 CO_2 、 CO 对矿物绝缘油和纳米改性植物绝缘油的老化状态进行对比分析; L LOISELLE 等^[38]统计了绝缘油老化过程中的总析气量,发现随老化时间推移绝缘油的放气趋势逐渐降低; J I JEONG 等^[61]通过绝缘油中溶解的 CO_2+CO 含量对变压器进行剩余寿命预测。

目前基于 DGA 方法形成的特征气体法、IEC 三比值法、Rogers 比值法、Dornenburg 比值法、Duval 三角形法和 Duval 五边形法等传统变压器诊断方法,已在矿物绝缘油变压器故障诊断方面得到广泛应用及不断完善,相应标准 IEC 60599:2015^[62]与 IEEE Std C57.104-2019^[63]对上述方法及应用作出了详细阐述。J FAIZ 等^[64]在实测 DGA 数据基础上,对上述传统方法的诊断效果进行对比总结,发现不同方法诊断结果有一定的差异,对某种特定故障诊断的敏感性表现不同。因此有学者将多种传统诊断手段结合使用,结合后的诊断正确率显著高于单种 DGA 方法^[65]。

同时,也有学者致力于研究更高准确率的 DGA 方法, O E GOUDA 等^[66]提出了基于 7 种特征气体的七边形诊断法,并以 452 个变压器油样本进行实试验证,其诊断准确率达 89.41%,而采用 Duval 三角形法、Dornenburg 比值法、IEC 三比值法和 Rogers 比值法的诊断准确率分别为 64.67%、38.48%、54.67% 和 46.43%。近年来, DGA 逐渐向人工智能方向发展,如基于模糊系统、神经网络、支持向量机及极限学习机的 DGA 方法等。然而,由于需要大量 DGA 样本支持,上述方法现场应用效率不如传统方法。

随着植物绝缘油变压器的推广使用,国内外学者开展了针对植物绝缘油变压器 DGA 方法的研究。但目前植物绝缘油中溶解气体数据比较缺乏,相关研究开展大多基于同矿物绝缘油老化故障产气特性对比以及矿物绝缘油 DGA 方法应用于植物绝缘油的适用性验证和改进两方面^[23]。已有学者将适用于矿物绝缘油诊断的 Duval 三角形法、特征气体法、IEC 三比值法、Rogers 比值法以及 Dornenburg 比值法用于对植物绝缘油老化诊断中^[68-69],研究结果表明,在实验室条件下,利用植物绝缘油中溶解气体数据对传统矿物绝缘油 DGA 方法进行改进是可行的^[70]。相晨萌^[22]研究实验室热故障与电故障下山茶籽植物绝缘油溶解气体特性和变化规律,建立适用于山茶籽植物绝缘油变压器故障的特征气体诊断法、图示诊断法以及无编码比值诊断法。同时,现有研究多数建立在实验室条件下的植物绝缘油加速老化基础上,而缺少基于现场实测数据的植物绝缘油变压器 DGA 诊断方法研究。

3.3 介电响应方法

绝缘油中会因老化、受潮而存在水分子及极性老化产物,从而造成绝缘油的弛豫过程及电导过程发生变化,介电响应作为研究电介质微观物理结构及内部电荷运动特性的有效手段,为宏观测试结果的微观物理过程解释提供了依据和手段^[71]。现有的介电响应方法根据激励电源的不同,可分为时域介电响应法和频域介电响应法。其中,时域介电响应法主要包括回复电压法(return voltage method, RVM)和极化去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)。频域介电响应法主要是频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS)。但 RVM 表现的诊断信息有限且易受残余电荷的影响,因此逐渐被 PDC 和 FDS 方法取代。

PDC 方法将直流阶跃激励电压施加于试样,并于一段时间后采用短接的方式获得介质的极化-去极化电流特性。研究表明,不同老化状态、不同含水量的绝缘油反映出不同的极化-去极化电流曲线,从中可提取直流电导率、低频介质损耗及非线性因子等介质绝缘状态特征参数^[72]。T K SAHA 等^[73]对不同水分含量油纸绝缘进行 PDC 测量发现,随着水分含量的升高, PDC 曲线末端均明显上翘,表明 PDC 曲线能准确表征油中的含水量。在此基础上, N A M JAMAIL 等^[74]建立了含水量与 PDC 特征参数的定量关系。吴广宁等^[75]提取稳态绝缘油老化去极

化电量作为绝缘油的老化状态参数,并发现该参数与绝缘油老化天数成正比关系。

FDS方法主要测试从低频(10^4 Hz)至高频(10^6 Hz以上)的复电容及介质损耗,相比于传统工频介质损耗测试,FDS能够反映介质在不同频段下的介质损耗特性。FDS测试结果中,介质损耗因数 $\tan\delta$ 与复电容虚部曲线低频段对绝缘油中微水含量十分敏感,可将其作为特征量实现绝缘油中水含量的定量诊断评估^[76]。W SAMARASINGHE等^[77]通过现场选取共23组运行年限从1年至40年的变压器绝缘油,将FDS测试结果与击穿电压及绝缘油色泽等参数对比分析,结果表明FDS能够表征绝缘油的绝缘性能。B MATHARAGE等^[78]根据实验室加速老化环境下植物绝缘油的FDS测试曲线,求解其介质响应函数及电导率等特征参数,并在现场采集的绝缘油样老化状态检测评估方面得到较好的反馈。

需要注意的是,温度和施加电压对介电响应测试结果都有一定影响,对不同试样进行测试时应尽可能保证温度与电压维持不变。已有研究发现,PDC电流曲线形状不会随测试温度上升发生改变,因此,马志钦等^[79]定义了基于时域介电响应函数的时间及幅值平移因子,可将不同温度下的PDC测试曲线平移到参考温度下,以消除温度对PDC测试结果的影响。而针对FDS方法,郝建^[80]通过引入频温平移因子的方式消除温度对测试结果的影响。对于激励电压的选取,一方面过高的激励会使液体介质出现非线性特性,这种非线性特性主要由绝缘油中离子解离加速和电流体动力学现象(EHD)引起;另一方面,现场测试时还应考虑信噪比水平而不能选择过低的激励电压,尽量避免周围噪声干扰对测试结果的影响。

3.4 光谱测量技术

通过研究绝缘油在老化过程中的光学特性,可以对老化试验的宏观结果及老化机理进行合理的科学解释。目前国内外采用的光谱测量技术有傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、紫外-可见吸收光谱(ultraviolet-visible spectroscopy, UV-Vis)及三维荧光光谱等。

FTIR利用有机化合物分子吸收红外光会发生振动和跃迁,不同的化学键吸收特定波长的红外光来分析化合物的成分。研究表明,随老化时间的增加,绝缘油FTIR光谱某些特征峰处(如 722 cm^{-1} 频率处的-CH-峰)的透射率变化曲线与击穿电压、介

电常数等电气参数的变化曲线一致^[81],有助于绝缘油老化特征参数改变的理化分析。

UV-Vis法是基于分子内电子跃迁产生的吸收光谱进行分析测定的一种仪器分析方法,其波长范围为 $200\sim 800\text{ nm}$ 。在针对植物绝缘油与矿物绝缘油的UV-Vis测定中,随绝缘油老化程度加深,UV-Vis光谱吸收率增加并出现稳定红移^[65]。在此基础上,ASTM D6802-2002制定了基于UV-Vis光谱的矿物绝缘油老化评估定量表征参数,即油中溶解产物(dissolved decay products, DDP)。DDP值是指UV-Vis光谱中波段从 360 nm 至 600 nm 的吸光度曲线下的面积,图2是新、旧矿物绝缘油不同老化时长的UV-Vis光谱曲线及计算得到的DDP值。

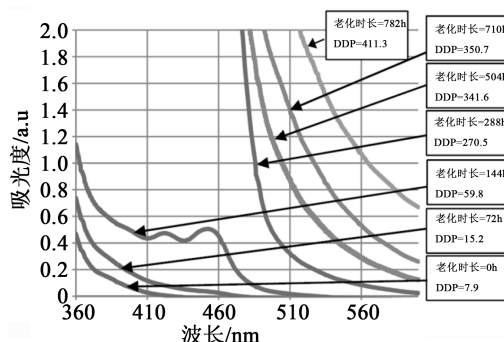


图2 新、旧矿物绝缘油的UV-Vis光谱

Fig.2 UV-Vis spectra of new and old mineral insulating oil

三维荧光光谱又称激发-发射矩阵(excitation-emission matrix, EEM),3个维度分别为荧光激发、发射波长和荧光强度,其表现的是荧光强度随激发和发射波长同时变化的信息。应用最为广泛的三维荧光光谱分析方法为寻峰法,其基于荧光基团特定的激发/发射波长的荧光峰,通过获取特定位置荧光信息对荧光基团进行表征。A J AMALANATHAN等^[82]分别在 90 、 140 、 160°C 条件下对植物绝缘油进行热老化测试,并对其进行荧光光谱测试,结果发现EEM光谱的激发波长与发射波长均随热老化时长增加而不断发生红移,且温度越高红移越严重。

4 结束语

(1)热老化是变压器绝缘油的主要老化形式,主要形式为热裂解与热氧老化。有关绝缘油热裂解机理主要包括矿物绝缘油的二阶段裂解与植物绝缘油的链式反应。绝缘油电老化机理研究主要集中在液体电介质放电引发方面。而对于绝缘油

放电生成产物,大量试验和仿真结果表明,绝缘油中放电除了会使油分子发生断键外,还可能出现小分子之间的二次化合反应。同时,还应重点关注绝缘油在电-热联合作用下的老化机理。

(2)金属铜及离子能促进绝缘油品的氧化反应,影响其氧化安定性。同时,绝缘油中腐蚀性硫化物会与铜反应生成导电性化合物,影响其绝缘性能。因此,可通过向绝缘油中添加吸附剂及金属钝化剂的方式降低金属对绝缘油老化的影响。

(3)目前绝缘油老化检测手段主要有电气理化参量分析、DGA分析、介电响应法及光谱测量技术。对绝缘油及油浸式变压器进行老化诊断时,单一测试方法反映的老化状态易受测试环境及样本的影响而造成误诊或适用性低等缺陷,因此,多种检测手段相结合的老化特征参数多维表征有望提高诊断准确率,极具工程应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李晓虎. 植物绝缘油理化及电气性能的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [3] 孙才新,陈伟根,廖瑞金,等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [4] 李剑,姚舒瀚,杜斌,等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术,2015,41(2):353-363.
- [5] OOMMEN T V. Vegetable oils for liquid-filled transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(1):6-11.
- [6] FOFANA I. 50 years in the development of insulating liquids[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2013,29(5):13-25.
- [7] 杨凤. 植物绝缘油的制备及抗氧化性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [8] LIAO R J, HAO J, CHEN G, et al. A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(5):1626-1637.
- [9] IEEE Power and Energy Society. Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers: IEEE Std C57.147-2018[S]. New York: IEEE,2018.
- [10] 童伟,徐良铸,王莹,等. 植物油纸绝缘及其变压器的研究进展与老化机理分析[J]. 绝缘材料,2019,52(2):1-6,14.
- [11] 相晨萌,周淙,李剑,等. 基于分子动力学模拟的植物绝缘油过热分解产气特性[J]. 高电压技术,2018,44(11):3595-3603.
- [12] 杜林,王五静,张彼德,等. 基于ReaxFF场的矿物绝缘油热解分子动力学模拟[J]. 高电压技术,2018,44(2):488-497.
- [13] LIAO R J, FENG D W, HAO J, et al. Thermal and electrical properties of a novel 3-element mixed insulation oil for power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(2):610-617.
- [14] HAMDI A, FOFANA I, DJILLALI M. Stability of mineral oil and oil-ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2017,11(9):2384-2392.
- [15] International Electrotechnical Commission. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis: IEC 60599:2015[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2015.
- [16] HALSTEAD W D. A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers[J]. Journal of the Institute of Petroleum,1973,59(5):239-241.
- [17] SHIRAI M, SHIMOJI S, ISHII T. Thermodynamic study on the thermal decomposition of insulating oil[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1977,12(4):272-280.
- [18] 王五静. 矿物绝缘油过热分解过程仿真分析与实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [19] MACHER K D, BRESSLER D C. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals[J]. Bioresource Technology,2007,98(12):2351-2368.
- [20] 张召涛. 植物绝缘油中特征气体及油纸吸湿特性与纳米粒子分散稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [21] WANG Z D, YI X, HUANG J P, et al. Fault gas generation in natural-ester fluid under localized thermal faults[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(6):45-56.
- [22] 相晨萌. 山茶籽绝缘油中溶解气体分析与判断方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [23] PERRIER C, BEROUAL A. Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2009,25(6):6-13.
- [24] TENBOHLEN S, KOCH M. Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers[J]. IEEE transactions on power delivery,2010,25(2):825-830.
- [25] 李剑,李勇,廖瑞金,等. 山茶籽绝缘油的电气及抗氧化性能研究[J]. 电工技术学报,2007,22(12):1-6.
- [26] CIGRE working group D1.30. Oxidation stability of insulating fluids: 978-2-85873-219-7[R]. Paris: CIGRE,2013.
- [27] International Electrotechnical Commission. Unused hydrocarbon based insulating liquids; test methods for evaluating the oxidation stability: IEC 61125-1992[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1992.
- [28] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for oxidation stability of mineral insulating oil: ASTM D2440-2004[S]. West Conshohocken,US:ASTM International,2004.
- [29] SINGHA S, ASANO R, FRIMPONG G, et al. Comparative aging characteristics between a high oleic natural ester dielectric liquid and mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):149-158.
- [30] XU Y, QIAN S, LIU Q, et al. Oxidation stability assessment of a

- vegetable transformer oil under thermal aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(2):683-692.
- [31] TOBAZEON R, FILIPPINI J C, MARTEAU C. On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1000-1004.
- [32] DEVINS J C, RZAD S J, SCHWABE R J. Breakdown and pre-breakdown phenomena in liquids[J]. Journal of Applied Physics, 1981,52(7):4531-4545.
- [33] HALPERN B, GOMER R. Field ionization in liquids[J]. Journal of Chemical Physics,1969,51(3):1048-1056.
- [34] 唐炬,朱黎明,麻守孝,等. 绝缘油中悬移气泡局部放电特性[J]. 高电压技术,2010,36(6):1341-1346.
- [35] 程林,李兴兴,唐炬,等. 不同温度下含金属微粒的流动液体绝缘介质放电形成过程与机理分析[J]. 高电压技术,2018,44(9): 2917-2925.
- [36] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for stability of insulating oils of petroleum origin under electrical discharge: ASTM D6180-2008[S]. West Conshohocken,US:ASTM International,2008.
- [37] N'CHO J S, FOFANA I, BEROUAL A, et al. The gassing tendency of various insulating fluids under electrical discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011, 18(5):1616-1625.
- [38] LOISELLE L, RAO U M, FOFANA I. Influence of aging on oil degradation and gassing tendency for mineral oil and synthetic ester under low energy discharge electrical faults[J]. Energies, 2020,13(3):595.
- [39] KANG P B. Stability of electrical-insulating oils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1970,5(2):41-46.
- [40] KHAYAM U, SUSILO A, MUSLIM J, et al. Partial discharge characteristics and dissolved gas analysis of vegetable oil[C]// Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata: Japan, IEEE,2014.
- [41] LOISELLE L, FOFANA I, SABAU J, et al. Comparative studies of the stability of various fluids under electrical discharge and thermal stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(5):2491-2499.
- [42] BOUDRAA S, MOKHNACHE L, FOFANA I. A comparative study of impact of electrical stress and thermal aging on transformer oil[C]//2014 IEEE 11th International Multi Conference on Systems. Barcelona: Spain: IEEE,2014.
- [43] 胡一卓,董明,谢佳成,等. 聚合物绝缘材料多因子老化的研究现状与发展[J]. 电网技术,2020,44(4):1276-1289.
- [44] 廖瑞金,解兵,杨丽君,等. 油纸绝缘电-热联合老化寿命模型比较与分析[J]. 电工技术学报,2006,21(2):17-21.
- [45] WEI Y H, MU H B, ZHANG G J, et al. A study of oil-impregnated paper insulation aged with thermal-electrical stress: PD characteristics and trap parameters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(6):3411-3420.
- [46] MONTANARI G C, MAZZANTI G, SIMONI L. Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2002,9(5):730-745.
- [47] CHAIYASIT W, ELIAS R J, MCCLEMENTS D J, et al. Role of physical structures in bulk oils on lipid oxidation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2007,47(3):299-317.
- [48] 廖瑞金,周旋,杨丽君,等. 铜对变压器油热老化影响的试验分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1090-1095.
- [49] TENBOHLEN S, KOCH M. Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(2):825-830.
- [50] MAINA R, TUMIATTI V, POMPILI M, et al. Dielectric loss characteristics of copper-contaminated transformer oils[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(3):1673-1677.
- [51] DE CARLO R M, BRUZZONITI M C, SARZANINI C, et al. Copper contaminated insulating mineral oils-testing and investigations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(2):557-563.
- [52] WAN T, QIAN H, FENG B, et al. Influence of copper ions in transformer oil properties and adsorption treatment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(1): 141-146.
- [53] 高思航,李威,柯亭婧,等. 苯并三氮唑钝化剂对绝缘油中溶解气体特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(8):2715-2725.
- [54] 丛浩熹,潘豪,张敏昊,等. 钝化剂对变压器油中多重硫化物的防护效果及油品质量的影响[J]. 高电压技术,2020,46(8):2864-2871.
- [55] International Electrotechnical Commission. Fluids for electro-technical applications-unused natural esters for transformers and similar electrical equipment: IEC 62770:2013[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2013.
- [56] International Electrotechnical Commission. Fluids for electro-technical applications-unused mineral insulating oils for transformers and switchgear: IEC 60296:2003[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2003.
- [57] HADJADJ Y, FOFANA I, SABAU J, et al. Assessing insulating oil degradation by means of turbidity and UV/VIS spectrophotometry measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(5):2653-2660.
- [58] GRAY I A R. A guide to transformer oil analysis[R]. Transformer Chemistry Services,2009,1-12.
- [59] KOHTOH M, KANEKO S, OKABE S, et al. Aging effect on electrical characteristics of insulating oil in field transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009, 16(6):1698-1706.
- [60] MAHARANA M, BARUAH N, NAYAK S K, et al. Condition assessment of aged ester-based nanofluid through physicochemical and spectroscopic measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2019,68(12):1-11.
- [61] JEONG J I, AN J S, HUH C S. Accelerated aging effects of min-

- eral and vegetable transformer oils on medium voltage power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):156-161.
- [62] International Electrotechnical Commission. Mineral oil-filled electrical equipment in service-Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis: IEC 60599:2015[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2015.
- [63] IEEE Power and Energy Society. Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers: IEEE Std C57.104-2019[S]. New York,US:IEEE,2019.
- [64] FAIZ J, SOLEIMANI M. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(2):1239-1248.
- [65] MEIRA M, RUSCHETTI C, ÁLVAREZ R, et al. Dissolved gas analysis differences between natural esters and mineral oils used in power transformers: A review[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2019,13(24):5441-5448.
- [66] GOUDA O E, EL-HOSHY S H, El-Tamaly H. Proposed heptagon graph for DGA interpretation of oil transformers[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2018,12(2):490-498.
- [67] GÓMEZ N A, WILHELM H M, SANTOS C C, et al. Dissolved gas analysis(DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(3):1071-1078.
- [68] PERRIER C, MARUGAN M, SARAVOLAC M. DGA comparison between ester and mineral oils[C]//2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Trondheim: Norway, IEEE, 2011.
- [69] KHAN I U, WANG Z D, COTTON I, et al. Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2007,23(5):5-14.
- [70] DUVAL M. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008,24(6):22-29.
- [71] 刘益军,李恒真,孔华东,等. 时变温度下绝缘油频域介电响应特性研究[J]. 绝缘材料,2015,48(8):51-55.
- [72] 张福忠,周凯,谢敏,等. XLPE 水树老化电缆介电响应下非线性研究[J]. 绝缘材料,2018,51(2):51-56.
- [73] SAHA T K, PURKAIT P. Some precautions for the field users of PDC measurement for transformer insulation condition assessment[C]//2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Canada: IEEE,2003.
- [74] JAMAIL N A M, PIAH M A M, MUHAMAD N A. Comparative study on conductivity using Polarization and Depolarization Current (PDC) test for HV insulation[C]//International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Bandung, Indonesia: IEEE,2011.
- [75] 吴广宁,宋臻杰,杨飞豹,等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术,2017,43(1):195-202.
- [76] 杨峰,唐超,周渠,等. 基于等效电路的油纸绝缘系统受潮状态分析[J]. 电工技术学报,2020,35(21):168-178.
- [77] SAMARASINGHE W, MANOJITHAN S, SUBHANKAN S, et al. Condition assessment of field aged transformer oils up to 40 years[C]//2015 IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka: IEEE,2015.
- [78] MATHARAGE B, FERNANDO M, BANDARA M, et al. Performance of coconut oil as an alternative transformer liquid insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(3):887-898.
- [79] 马志钦,廖瑞金,郝建,等. 温度对油纸绝缘极化去极化电流的影响[J]. 电工技术学报,2014,29(4):290-297.
- [80] 郝建. 变压器油纸绝缘热老化的时频域介电和空间电荷特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [81] STEVENS G C, HERMAN H, FREEBODY N, et al. Chemometrics in the study of liquid dielectrics[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids. Manchester, UK: IEEE,2017.
- [82] AMALANATHAN A J, SARATHI R, PRAKASH S, et al. Investigation on thermally aged natural ester oil for real-time monitoring and analysis of transformer insulation[J]. High Voltage,2019, 5(2):209-217.