

# 基于机器学习的变压器超疏水薄膜滤油效果识别

张增辉<sup>1a</sup>, 冯德旺<sup>1b</sup>, 张云霄<sup>2</sup>, 张天峰<sup>2</sup>, 池正南<sup>2</sup>, 林滔<sup>3</sup>

(1. 福建农林大学 a. 机电工程学院; b. 计算机与信息学院, 福建 福州 350002;

2. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

3. 国网福建电力有限公司超高压分公司, 福建 福州 350013)

**摘要:**在长期运行过程中,由于海上风电变压器油老化时易产生水分等杂质,引起变压器绝缘失效故障,从而造成经济损失和安全事故,亟需有效的变压器油滤油和判断方法,以改善变压器油性能与评估变压器油老化状态。本文通过对滤油薄膜进行超疏水改性,探究了滤油次数、薄膜种类和超疏水改性等对变压器油过滤前后性能的影响;通过支持向量机算法,构建了变压器油健康分类模型;提出了一种基于机器学习的超疏水薄膜滤油效果判断方法,对超疏水薄膜滤油效果进行评估。结果表明:经超疏水处理后薄膜的滤油性能得到大幅提升,经3次改性有机膜过滤后,变压器油的综合性能显著提升,符合变压器油的适用标准。对比多个算法发现,利用支持向量机算法构建的模型对变压器油健康分类的精确度最高,达到84.8%。

**关键词:**变压器油;超疏水;电气性能;支持向量机;健康评估

中图分类号:TM214 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.12.013

## Judgment of oil-filtration effect for superhydrophobic film based on machine learning

ZHANG Zenghui<sup>1a</sup>, FENG Dewang<sup>1b</sup>, ZHANG Yunxiao<sup>2</sup>, ZHANG Tianfeng<sup>2</sup>, CHI Zhengnan<sup>2</sup>, LIN Tao<sup>3</sup>

(1. a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. School of Computer and Information, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian 35000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian 350108, China;

3. Super High Voltage Branch of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fujian 350013, China)

**Abstract:** In the long-term operation process, due to the ageing of transformer oil for offshore wind power, the moisture and other impurities will be produced, which may cause transformer insulation failure, resulting in economic losses and safety accidents. Thus, it is urgent to propose an effective method of transformer oil filtration and judgment to improve the transformer oil performance and evaluate its ageing status. In this paper, the oil filter film was conducted superhydrophobic modification, and the effects of the number of oil filtration, the type of film, and the superhydrophobic modification on the properties of oil before and after filtration were investigated. The health classification model of transformer oil was established by support vector machine algorithm. In addition, a new method based on machine learning was proposed to evaluate the oil filtering effect of superhydrophobic film. The results show that the oil filtering performance of the film after superhydrophobic treatment is improved greatly. Especially after three times of modified organic film filtration, the comprehensive performance of transformer oil has significantly improved, meeting the applicable standard of transformer oil. Compared with several algorithms, the model built by support vector algorithm has the highest accuracy of 84.8%.

**Key words:** transformer oil; superhydrophobic; electrical performance; support vector machine; health assessment

## 0 引言

为了积极响应“双碳”目标<sup>[1]</sup>,我国坚持发展风电可再生能源,构建大规模海上风电传输体系<sup>[2-4]</sup>。油浸式变压器作为海上风电工程中普遍使用的核心装备之一,由于其建造成本昂贵,维护工作繁琐

和设备更换周期长,当变压器发生故障时,会造成大量的经济损失和不良的社会影响。变压器常用的绝缘形式是油浸纸绝缘<sup>[5]</sup>。随着变压器油的老化,油中水分、可溶解气体等杂质不断增加,内部的绝缘系统逐渐被破坏,最终会因绝缘失效而引发变压器故障<sup>[6-9]</sup>。因此,有效去除溶解在变压器油中的各类杂质对电网的安全可靠运行有着重要的工程意义<sup>[10-13]</sup>。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907101);国网福建省电力有限公司科技项目(52130A22000H)。

目前,传统的变压器油处理方法有真空喷雾法、真空净化法、压力滤油法、吸附过滤法、白土处理过滤法和分子筛微球过滤法等。然而,传统的滤油技术存在资源损耗大、效率低、装备设备大等缺点,有时为了增强处理效果,会同时使用多种方式进行处理。因此,亟需开发一种高效且经济的变压器油滤技术。近年来,超疏水技术得到广泛应用,许多仿生超疏水功能应用于产品制备中<sup>[14-16]</sup>。其中,超疏水表面作为功能材料基础研究的重要组成部分之一,在各种表面界面应用中发挥着重要的作用<sup>[17]</sup>。然而目前将超疏水薄膜应用于变压器油维护任务的相关研究不足。因此,亟需对超疏水薄膜进行研究,为实现有效、低成本的现场变压器滤油奠定理论基础和应用支撑<sup>[18-19]</sup>。

为了合理判断超疏水薄膜的滤油效果,需要对变压器油健康状态进行评估。目前,对于判断变压器油健康状态的方法只是单一的特征量测量,不能有效将油本身多数特征量进行融合<sup>[20-22]</sup>。伴随着机器学习的发展与应用,许多研究者结合算法进行分析与判断<sup>[23-24]</sup>。陈健宁等<sup>[25]</sup>通过搭建3通道输入的卷积神经网络方法,对油纸绝缘局部放电模式进行识别。阮羚等<sup>[26]</sup>将人工神经网络和信息融合技术应用于变压器油状态的评估。

本文利用超疏水材料的疏水性优势,通过添加SiO<sub>2</sub>纳米粒子制备改性超疏水薄膜,探究滤油次数、薄膜种类和超疏水改性对变压器油过滤前后性能的影响。为了准确判断薄膜的应用效果,采集变压器油的特征参数,结合支持向量机(support vector machine, SVM)算法,构建变压器油健康分类模型。通过对比多个算法,分析SVM模型的可靠性。最后,结合薄膜改性前后的特征参数,指导与分析超疏水薄膜的滤油效果,为超疏水薄膜应用于滤油状态精准评估提供一种新思路。

## 1 试验

### 1.1 原材料

试验使用的有机膜、聚偏二氟乙烯(PVDF)膜和聚丙烯(PP)膜,直径均为50 mm,孔隙大小为1.2 μm,海盐新东方塑化科技有限公司;变压器油,国网福建省电力有限公司超高压分公司;改性薄膜使用的超疏水SiO<sub>2</sub>颗粒,利洁化工公司;E-51环氧树脂WSR618,南通星辰合成材料有限公司;固化剂,濮阳汇成电子材料有限公司;乙醇,南京化学试剂股份有限公司。

### 1.2 超疏水薄膜制备

将超疏水SiO<sub>2</sub>纳米颗粒与环氧树脂、固化剂、

乙醇按一定比例进行混合,得到SiO<sub>2</sub>质量分数为4%的浸渍溶液,然后将薄膜放置在浸渍溶液内15 min,取出浸润薄膜放入烘箱中进行加热和固化2 h,最终得到超疏水薄膜<sup>[27]</sup>,制备流程如图1所示。

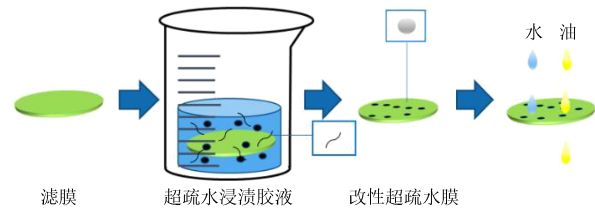


图1 改性超疏水薄膜制备示意图

Fig.1 Diagram of preparation of modified superhydrophobic film

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 击穿测试

为测量变压器油的击穿电压,搭建交流电压下的击穿试验平台,油杯应满足GB/T 507—2002的规定,电极距离为2.5 mm,电压按照2 kV/s的速度从零开始均匀加压。将变压器油浸满油杯电极,通过调整调压器来测量电压。重复5次试验并记录试验数据,击穿试验间隔120 s,计算平均击穿电压。

#### 1.3.2 微水测试

通过DL32型卡尔菲休库仑测定仪测量变压器油的微水含量,重复采样3次,结果取平均值。

#### 1.3.3 气体含量测试

采用GDC-9560C型电力系统专用油色谱分析仪测量变压器油中溶解气体含量。

## 2 超疏水薄膜

### 2.1 不同滤油次数与薄膜种类对滤油效果的影响

图2和图3分别为薄膜种类和滤油次数对变压器油微水含量与击穿电压的影响情况。由图2~3可知,在薄膜种类相同的情况下,随着滤油次数增加,变压器油的微水含量降低,击穿电压上升,说明

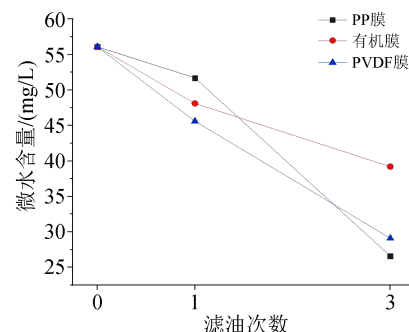


图2 不同种类薄膜滤油次数与变压器油含水量的关系

Fig. 2 The relationship between oil filtration times of different films and water content of transformer oil

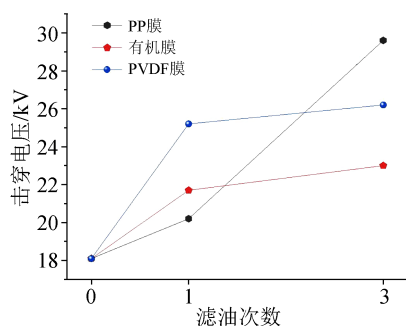


图3 不同种类薄膜滤油次数与变压器油击穿电压的关系

Fig.3 The relationship between oil filtration times of different films and breakdown voltage of transformer oil

薄膜滤油效果与变压器油的过滤次数有关。在滤油次数相同的情况下,薄膜种类不同,微水含量与击穿电压的变化也不同,说明3种薄膜具有不同的滤油效果。在滤油1次后,PVDF膜的除水效果最佳,变压器油的含水量从56.1 mg/L降至45.6 mg/L,约下降了18.7%;在滤油3次后,PP膜的除水效果最好,含水量从56.1 mg/L降至26.6 mg/L,约下降了52.6%。PP膜滤油1次后,滤油效果最差,但在滤油3次后,滤油效果反而最好。试验发现,随着滤油次数的增加,薄膜的滤油性能并没有相应提高,可能是由于薄膜的内部结构有关,次数的增加阻碍了内部循环能力,薄膜之间的物质交换能力受到限制。

## 2.2 不同种类薄膜超疏水改性后的性能研究

对薄膜进行超疏水改性处理,对比薄膜超疏水改性前后变压器油微水含量和击穿电压的变化,结果分别如图4和图5所示。由图4~5可知,对薄膜进行超疏水改性后,其性能得到提高。其中有机膜和PVDF膜的除水性能增长明显。有机膜改性后,变压器油微水含量从39.2 mg/L下降至5.2 mg/L,击穿电压从23 kV提升至59.99 kV;PVDF膜改性后,变压器油微水含量由29.1 mg/L下降至6.6 mg/L,击穿电压从26.2 kV提升至44.49 kV。可以看出,对薄膜进行超疏水改性后,降低了变压器油的微水含量并提升了电气性能。其原因是在薄膜表面引入超疏水粒子后,一方面使薄膜表面吸附油中的更多水分子,聚集形成“水表皮”现象,阻碍油中自由扩散的水分子,从而降低了电子和水分子团簇碰撞的概率;另一方面在高水分环境下水分大多聚集在薄膜界面处,纳米粒子的加入将引入新的陷阱,限制载流子的迁移,从而降低了水分对界面电荷的影响,提高了击穿电压。因此,对薄膜进行超疏水改性可以促进变压器油中微水含量的降低和击穿电压的上升。

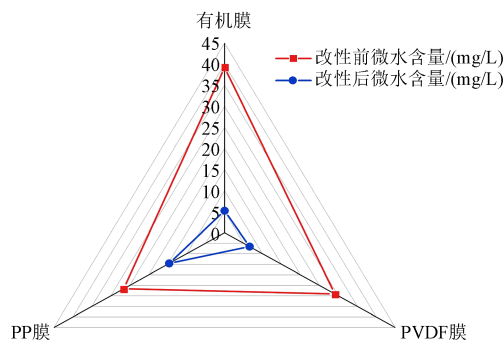


图4 薄膜超疏水改性前后变压器油的微水含量变化

Fig.4 Change of moisture content in transformer oil before and after superhydrophobic modification of superthin film

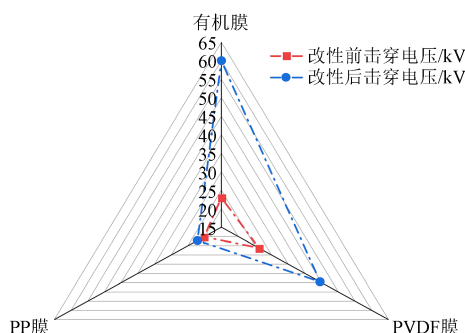


图5 薄膜超疏水改性前后变压器油的击穿电压变化

Fig.5 Change of breakdown voltage of transformer oil before and after superhydrophobic modification of superthin film

## 3 变压器油健康分类模型

### 3.1 变压器油老化特征

变压器油在长时间运行过程中,会由于电热老化产生水分、可溶解气体及颗粒物等杂质,当杂质达到一定浓度时,会破坏绝缘系统。可溶解气体包含乙烷( $C_2H_6$ )、氢气( $H_2$ )、甲烷( $CH_4$ )、乙烯( $C_2H_4$ )、一氧化碳( $CO$ )、二氧化碳( $CO_2$ )、氧气( $O_2$ )等。可溶解气体是电力变压器油早期故障潜伏特征之一,可以作为评判变压器油健康的指标之一。变压器油老化后,水分含量增多,油中自由扩散水分子的密度增大,使击穿电压下降。因此,油中微水含量和击穿电压是评估变压器油健康状态的重要指标。根据以上影响因子构建变压器油健康评估特征集合,如表1所示。

根据Q/GDW 168—2008《输变电设备状态检修试验规程》,变压器油击穿电压和水分含量限值见表2和表3。

变压器油健康状态可分为四个阶段:第一阶段为健康,第二阶段为前期老化,第三阶段为中期老化,第四阶段为后期老化。表4给出了训练模型输出所对应的变压器油健康情况及其分类编码。

表1 变压器油健康评估特征组成

Tab.1 Component of transformer oil health assessment characteristics

特征参量编号	变压器油特征分量
1	甲烷(CH <sub>4</sub> )
2	二氧化碳(CO <sub>2</sub> )
3	一氧化碳(CO)
4	氧气(O <sub>2</sub> )
5	氢气(H <sub>2</sub> )
6	乙烷(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
7	乙烯(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )
8	水分
9	击穿电压

表2 变压器油击穿电压限制值

Tab.2 Attention value of transformer oil breakdown voltage

电压等级/kV	66~110	220	330	500
击穿电压/kV	<35	<40	<45	<50

表3 变压器油微水含量限制值

Tab.3 Attention value of transformer oil moisture content

电压等级/kV	220 kV 及以下	330 kV 及以上
微水含量/(mg/L)	≤25	≤15

表4 变压器油评估状态及其编码

Tab.4 Evaluation status and its coding of transformer oil

变压器油健康状态	状态分类编码
健康	0
前期老化	1
中期老化	2
后期老化	3

### 3.2 支持向量机

支持向量机(SVM)算法是一种用来解决过度拟合化、适用于小样本数据及非线性问题的新型人工智能算法。将输入变量 $x$ 的数据样本,通过非线性映射方法映射到高维空间 $z$ ,使得输入变量 $x$ 升维到重构的高维特征空间,弥补输入变量不能在低维空间进行线性可分化任务的缺陷,转变为在高维空间构建最优超平面。SVM算法通过惩罚因子和核参数寻找最优解,将样本数据分为正、负两类,使得超平面与数据之间间隔最大,实现最佳的分类效果。SVM算法具有突出的学习能力、精准的分类效果和稳定的泛化能力等优点,广泛应用于各种工程问题上。支持向量机算法的标准分类器如式(1)所示。

$$y_i[\omega x_i + b_0] - 1 \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式(1)中: $x_i$ 为第 $i$ 个特征向量; $y_i$ 为 $x_i$ 的类标记; $\omega$ 是

可调权值向量; $b_0$ 是超平面相对原点的偏移。

从超平面到最优超平面之间的距离为 $d$ , $d = 1/\|\omega\|$ ,两个分类超平面之间的距离为 $2d$ ,因此,求解最优超平面可以转变为一个带约束的求解目标最小值问题,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \min L(\omega, b_0) = \frac{\|\omega\|^2}{2} \\ s.t \ y_i(\omega^T x_i + b_0) \geq 1, i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

由于实际工程中大多都是非线性样本,需要通过非线性映射到高维空间,在这个空间中存在一个线性分类准则,可划分一个线性最优分类超平面。样本的映射关系是通过设计内核函数来实现,使用不同的内核函数可以形成不同的非线性支持向量机算法。目前常用的内核函数有:线性核函数、多项式核函数、RBF核函数、Sigmoid函数。综上所述,支持向量机算法的基本思想可以概括为,通过定义内核函数构建映射关系,使得输入变量提升到高维空间,并在空间内寻找最优分类超平面。

### 3.3 变压器油健康分类流程

基于机器学习的变压器油健康分类流程如图6所示,整个流程主要分为4个步骤:

(1)数据预处理:不同溶解性气体含量数值相差较大,需要对样本数据进行归一化处理。

(2)样本划分:将预处理后的数据进行训练集合测试集划分。

(3)模型搭建与训练:确认参数并搭建模型,训练模型,获得分类模型。

(4)健康分析:通过训练完成的模型,输入新的测试样本,得到输出健康结果。

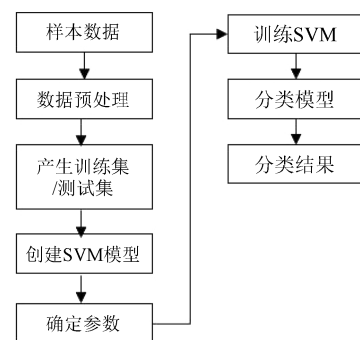


图6 变压器油健康分类流程图

Fig. 6 Flow chart of transformer oil health classification

## 4 实例分析

为确保数据可信度,从某电网公司获取349组变压器油试验数据,其中262组为训练样本,剩余87组为测试样本,样本具体划分见表5。

表5 样本分配情况  
Tab.5 Sample distribution

项目	状态编号			
	0	1	2	3
训练集	39	86	87	50
测试集	11	29	30	17
样本总数	50	115	117	67

利用 SVM、K 近邻(K-Nearest Neighbor, KNN) 和神经网络算法对数据进行处理,得到不同算法对变压器油健康分类的准确率如表 6 所示。由表 6 可知,通过 3 种算法对变压器油数据进行处理,其中样品标签为健康时,最高准确率为 78%;样品标签为前期老化时,最高准确率为 87.0%;样品标签为中期老化时,最高准确率为 88.0%;样品标签为后期老化时,最高准确率为 88.1%。

表6 不同算法分类准确率对比  
Tab.6 Comparison on classification accuracy of different algorithms

项目	SVM	KNN	双层神经网络
健康	78.0%	76.0%	76.0%
前期老化	87.0%	73.9%	77.4%
中期老化	88.0%	70.9%	84.6%
后期老化	80.6%	58.2%	88.1%

各方法的综合判断准确率和运行时间如表 7 所示。从表 7 可以看出,相比于 KNN 和双层神经网络算法,SVM 算法具有更高的准确率,达到 84.8%,并且总运行时间最短。这表明支持向量机对小样本变压器油健康数据具有强大的分类效果,验证了 SVM 算法的优越性。

表7 不同算法的综合准确率及运行时间对比  
Tab.7 Comparison on comprehensive accuracy and running time of different algorithms

算法	准确率/%	总运行时间/s
SVM	84.8	0.892 29
KNN	70.2	0.996 84
双层神经网络	81.7	1.443 40

通过保存最优 SVM 分类模型,将滤油薄膜改性前后的性能数据进行分类编码,结果分别如表 8 和表 9 所示,其中 PP 薄膜滤油次数为 1 时的试样标记为 PP1,其他薄膜标记以此类推。从表 8 可以看出,原油初始状态的健康状态分类为 3,即后期老化。利用未改性薄膜对原油进行滤油,原油依旧在后期老化状态,说明未改性薄膜具有一定的滤油效果,但是不足以提升油的指标。

表8 不同种类薄膜的部分特征和滤油性能评估  
Tab.8 Partial characteristics and oil filtration performance evaluation of different types of hydrophobic films

种类	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	水分含量/(mg/L)	击穿电压/kV	分类
原油	1.05	2 132.24	13.17	66.8	12.51	3
PP1	1.02	622.99	12.21	51.7	20.2	3
PP3	0.92	730.16	13.41	26.6	29.6	3
有机1	0.94	567.04	9.71	48.1	21.7	3
有机3	1.04	565.02	10.73	39.2	23	3
PVDF1	1.02	564.26	11.59	45.6	25.2	3
PVDF3	0.99	659.45	14.14	29.1	26.2	3

表9 不同种类改性薄膜部分性能特征及评估  
Tab.9 Partial characteristics and evaluation of different types of modified hydrophobic films

种类	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	水分/(mg/L)	击穿电压/kV	分类
原油	1.05	2 132.24	13.17	66.8	12.51	3
改性有机膜1	1.02	2 144.55	14.08	12.3	31.9	1
改性有机膜3	0.48	469.56	8.23	5.2	59.99	0
改性PP1	0.78	1 185.61	12.88	24	34	3
改性PP3	0.70	861.68	9.33	14.6	22.18	1
改性PVDF1	1.32	860.54	28.83	11.1	45.9	1
改性PVDF3	1.45	651.77	28.27	6.6	44.49	1

从表 9 可以看出,利用超疏水粒子改性薄膜对原油进行滤油后,变压器油健康状态具有显著的提升,健康状态分类普遍提升至 1,即老化初期,其中改性有机膜滤油 3 次的效果最好,油品质从后期老化提升至健康状态,符合变压器油使用标准,证明超疏水改性薄膜对油品健康提升颇具成效。将试验预测分类结果与相关专家和电网工程师进行油品预估对比,发现预估结果与本文设计的模型分类结果大致符合,证明了模型的可靠性。

## 5 结论

本文针对海上风电变压器油的过滤维护处理,提出对滤油薄膜进行超疏水改性的方法,探讨了不同因素对滤油前后变压器油性能的影响,并利用 SVM 算法搭建油品健康评估模型,评估超疏水薄膜应用于变压器油的维护效果,得到以下结论:

(1)增加滤油次数可降低油中的含水量并改善电压击穿特性,滤油 3 次比 1 次的效果更好。不同种类薄膜的疏水性能不同,并受滤油次数的影响。在所有改性薄膜中,改性有机膜的滤油效果最好,经过 3 次过滤后,变压器油指标符合使用标准,表明超疏水薄膜应用于变压器油过滤具有可行性。

(2)为评估变压器油的健康情况,结合机器学习算法对实际变压器油维护测试数据进行分析。通过对比多个算法发现,利用SVM算法构建的变压器油健康评估模型精确度最高,达到84.8%,并且运行时间最短,能够对变压器油的健康状态进行分类。

(3)通过试验测量改性前后薄膜滤油性能特征值和搭建的变压器油健康评估模型,评估超疏水薄膜的滤油效果,得到改性有机膜滤油3次的效果最好。模型与试验结果相一致,进一步验证了本文提出的基于机器学习的超疏水薄膜效果判断是有效的,对指导超疏水薄膜应用于变压器油维护是可行的。

### 参考文献:

- [1] 周远翔,陈健宁,张灵,等.“双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J].高电压技术,2021,47(7):2396-2408.
- [2] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4278-4292.
- [3] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等.海上风电机组运行维护现状研究与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(3):729-738.
- [4] 樊肖杰,迟永宁,马士聪,等.大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J].电网技术,2022,46(8):2859-2870.
- [5] 王建民,于东旭,王浩名,等.天然酯绝缘油对110kV电力变压器主纵绝缘强度的影响分析[J].绝缘材料,2023,56(1):62-69.
- [6] 苗光尧,周玉霞,李叶飞.微水加速变压器油纸绝缘热解的微观机制研究[J].绝缘材料,2022,55(9):57-62.
- [7] 于会民,王会娟,张绮,等.变压器油纸绝缘体系中水分和气体含量研究[J].绝缘材料,2019,52(3):86-90.
- [8] 伍衡,梁晨,李原龙,等.水分对换流变压器油纸绝缘电气强度与机械强度的影响[J].绝缘材料,2017,50(12):22-27.
- [9] 隋彬,李延涛,吴广宁,等.水分和氧气对油纸绝缘老化的影响[J].绝缘材料,2013,46(4):43-47.
- [10] 刘宏领,田克强,李继攀,等.天然酯绝缘油中溶解气体研究现状[J].绝缘材料,2022,55(1):12-18.
- [11] 郭金明,田树军,卓浩泽.绝缘油老化特性及诊断方法研究进展[J].绝缘材料,2021,54(8):8-17.
- [12] 朱孟兆,朱文兵,陈鑫,等.不同水分含量下三元混合式绝缘油浸纸板的介电、工频击穿及产气特性对比研究[J].绝缘材料,2020,53(11):89-95.
- [13] 蒋松林,于钦学,夏林枫,等.植物绝缘油大间隙下的雷电冲击和直流击穿特性研究[J].绝缘材料,2020,53(5):58-63.
- [14] LIN J Y, LIN F, LIU R R, et al. Scalable fabrication of robust superhydrophobic membranes by one-step spray-coating for gravitational water-in-oil emulsion separation[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 231:115898.
- [15] ZHOU Y J, HE L T, WANG L X, et al. A facile and effective strategy to develop a super-hydrophobic/super-oleophilic fiberglass filter membrane for efficient micron-scale water-in-oil emulsion separation[J]. RSC Advances,2022,12:3227-3237.
- [16] CHEN X, ZHANG L J Q, WU M, et al. Preparing hydrophobic cellulose nanofibers-SiO<sub>2</sub> films and coating by one-step mechanochemical method[J]. Polymers,2022,14(20):4413.
- [17] LIANG Y Y, JU J G, DENG N P, et al. Super-hydrophobic self-cleaning bead-like SiO<sub>2</sub>@PTFE nanofiber membranes for water-proof-breathable applications[J]. Applied Surface Science,2018, 442:54-64.
- [18] FAN X H, LIU J F, ZHANG Y Y, et al. Polarization loss analysis and ageing characterisation of transformer oil-immersed insulation by using decoupled frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage, 2021,7(3):575-585.
- [19] YUE R L, MENG D, NI Y, et al. One-step flame synthesis of hydrophobic silica nanoparticles[J]. Powder Technology,2013,235(2):909-913.
- [20] 杨定坤,陈伟根,万福,等.基于绝缘油拉曼光谱的聚合度定量评估方法[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4710-4720.
- [21] 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.
- [22] 廖瑞金,林元棣,杨丽君,等.温度、水分、老化对变压器油中糠醛及绝缘纸老化评估的影响和修正[J].中国电机工程学报,2017, 37(10):3037-3044.
- [23] 吴启蒙,魏明,樊高辉,等.基于BP神经网络的静电放电电流解析表达式[J].高电压技术,2012,38(11):2912-2918.
- [24] 王科,游大海,蓝海波,等.基于支持向量机的电力系统临界割集暂态稳定可用传输容量快速预测[J].高电压技术,2015,41(3):800-806.
- [25] 陈健宁,周远翔,白正,等.基于多通道卷积神经网络的油纸绝缘局部放电模式识别方法[J].高电压技术,2022,48(5):1705-1715.
- [26] 阮羚,谢齐家,高胜友,等.神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J].高电压技术,2014,40(3):822-828.
- [27] 郭新良,许培俊,杨雪滢,等.纳米SiO<sub>2</sub>超疏水膜在电力设备油水分离系统中的应用[J].化工新型材料,2020,48(4):217-221.

收稿日期:2023-05-23;修回日期:2023-07-10。

作者简介:张增辉(1999-),男(汉族),福建福州人,硕士生,主要从事高压绝缘材料与机器学习的研究;通信作者:冯德旺(1968-),男(汉族),江西丰城人,教授,主要从事嵌入式系统设计及应用、大数据获取及分析、电磁兼容的研究。