

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.014

天然酯绝缘油浸渍电容式电压互感器的电气性能研究

杨硕亮, 刘水平, 杨晓静, 任春阳, 姬凯, 刘宝来
(西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 电容式电压互感器(CVT)目前电磁单元内常用矿物油、电容分压器内常用合成油作为绝缘浸渍介质,此介质多为微毒或相对无毒,在生产或废油等危废的处理方面均存在一定的压力。在绿色、环保、低碳的电力发展下,特别是在国内外倡导绿色能源、绿色制造方面,以天然酯绝缘油为代表的环保型绝缘介质具有很大的先天优势。本文通过对 CVT 常用浸渍剂二芳基乙烷和天然酯绝缘油进行对比,研究电容器介质在不同温度下浸渍天然酯绝缘油的绝缘性能及介质损耗,得出浸渍天然酯绝缘油电容器介质的绝缘性能基本满足 CVT 电容分压器的耐压和介损使用要求,制作天然酯绝缘油的 CVT 样机进行相应的例行试验项目,为后续的冲击试验以及批量试验验证提供数据支撑。

关键词: 天然酯绝缘油; 绝缘性能; 电容器介质; 温度; 试验验证

Study on Electrical Performance of Capacitive Voltage Transformer Impregnated with Natural Ester Insulated Oil

YANG Shuoliang, LIU Shuiping, YANG Xiaojing, REN Chunyang, JI Kai, LIU Baolai
(Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: At present, mineral oil is commonly used in the electromagnetic unit and synthetic oil in capacitive voltage divider as insulation impregnating media for capacitive voltage transformer (CVT). These media are mostly slightly toxic or relatively non-toxic but face a definite pressure in the production or disposal of hazardous waste such as waste oil. Under the development of green, environmentally friendly and low-carbon electricity, especially in advocating green energy and green manufacturing both at home and abroad, the environmentally friendly insulation media represented by natural ester insulation oil have great inherent advantages. In this paper, the insulation performance and dielectric loss of capacitor media impregnated with natural ester insulating oil at different temperatures is studied through comparing the commonly used impregnating agents for CVT, diarylethane and natural ester insulating oil. It is concluded that the insulation performance of capacitor media impregnated with natural ester insulating oil basically meets the withstanding voltage and dielectric loss requirements of capacitor dividers of CVT. A CVT prototype with natural ester insulating oil is produced and corresponding routine test items are performed, which provide data support for subsequent impact tests and batch test verification.

Keywords: natural ester insulating oil; insulation performance; capacitor dielectric; temperature; experimental verification

0 引言

电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT)是电压互感器的一个分支,与电磁式电压互感器(potential transformer, PT)相比,解决了 PT 引起的系统铁磁谐振问题,除 PT 的全部功能外,还可兼作

耦合电容器用于载波通信系统,且电压等级越高价格优势越大。故已被广泛应用在高压、超高压及特高压领域中,并占据主导地位。

CVT 由电容分压器和电磁单元组成,电容分压器内部一般由若干个电容器心子单元组成,电容器心子的常规介质搭配一般为两膜一纸、两膜三纸、

收稿日期:2024-11-11

三膜两纸或其他搭配关系,目前常用的是两膜一纸式介质搭配结构。电磁单元内部一般包含中间变压器、补偿电抗器、阻尼装置等^[1-5]。稳态运行时中间电压较低,一般为几千伏到二十千伏不等,内部相关部件的相容性验证已在采用天然酯绝缘油的电力变压器行业做过大量验证。使用天然酯绝缘油的电力变压器^[6]已在高压系统上批量挂网运行,并运行良好。

在高压电气设备制造业绿色、环保、低碳的发展理念下,作为高压电气设备至关重要的一员,在CVT上实施绿色环保制造技术就显得尤为重要。

1 天然酯绝缘油简介

天然酯绝缘油作为环保型绝缘油的一种,已于几年前在高压、超高压充油式设备特别是电力变压器上逐步推进并应用。因其具有较好的环境友好型特性,国内诸多的电力变压器制造企业将其作为绿色环保绝缘油完成研制并挂网使用。

天然酯(化学分子式通常表示为R-COOR',其中R和R'代表有机基团)一般从植物中提炼而成,大多采用大豆基和菜籽基做为原料。与化石能源相比,它具有诸如成本低、原料来源广泛等诸多优势。它的高燃点、耐压强、降解速度快、无毒等特性符合高压设备的使用要求,被认为是矿物质绝缘油和合成型绝缘油的良好替代者。但其有较强的亲水特性、低温流动性差以及粘度与耐压的反向特性仍是CVT特别是电容器部分亟待关注并解决的要难点。

2 天然酯绝缘油与CVT的相容性研究

相容性是研究绝缘油与浸渍在其中的固态介质的一种非常重要的指标,主要用于验证待测物料与液态介质是否相容,旨在评估不同材料或物

质在特定条件下与绝缘油的相互作用,且作用不会对产品的性能造成损伤或降低,一般通过测试前后的体积变化、重量变化和颜色变化等进行对比分析。

根据ASTM D3455—2019的要求,选择两种不同厂家的天然酯绝缘油对CVT的所有零部件进行相容性试验,按照IEEE C57.147对材料相容性的判断准则得出:相容性试验后的天然酯绝缘油的击穿电压无明显降低,除部分材料的介质损耗因数增大外,材料形状无明显变化,部分材料颜色加深^[7],但此种变化不影响相容性试验的结果。参考DL/T 2484—2022中天然酯变压器注油后的天然酯绝缘油要求及运行变压器中天然酯绝缘油质量标准,可得出天然酯绝缘油与CVT电容分压器和电磁单元内所用全部固态物料的相容性良好^[8-15]。

3 高低温下电容器介质的工频耐压性能

依照引言描述, CVT由电容分压器和电磁单元两部分组成。电磁单元内部所用的零部件与电力变压器所用物料基本一致,因CVT的中间电压较低,再结合本文第2节的相容性试验结果,可以初步得出,浸渍天然酯绝缘油后的电磁单元的电气绝缘性能基本满足使用要求,后续进行样机试验验证。

与电磁单元相比,电容分压器部分的电场强度相对较高,故电容器介质的耐压性能是本文研究的重点,也是难点。电容器固体绝缘介质一般选择为膜纸复合介质和全膜介质。因膜纸复合介质具有良好的浸渍效果、电容温度系数性能好等特性,本文选择膜纸复合介质进行研究。考虑到试验数据的准确性,选取国内两家供应商生产的天然酯绝缘油(采用A、B区分)与电容分压器常用浸渍剂苯基二甲苯基乙烷(PXE)、苯基乙苯基乙烷(PEPE)进行对比^[16-26],见表1。

表1 天然酯绝缘油、PXE和PEPE关键参数对比表
Table 1 Comparison table of key parameters between natural ester insulating oil、PXE and PEPE

名称	天然酯绝缘油 A	天然酯绝缘油 B	PXE	PEPE
运动粘度(40℃)/(mm ² /s)	35.64	35.76	5.33	3.30
运动粘度(100℃)/(mm ² /s)	8.118	8.175	2.17	1.67
击穿电压/(kV/2.5 mm)	85	72	≥61	≥63
体积电阻率/Ω·m	10.4×10 ¹²	6.9×10 ¹³	≥1.0×10 ¹²	≥1.0×10 ¹²
微水含量/ppm(uL/L)	77	≤200	≤50	≤50
介质损耗因数(90℃)/tanδ	0.014	0.012	≤0.10%	≤0.10%
倾点/℃	-18	-21	< -45	< -65
闪点/℃	289	322	≥140	≥140
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.918	0.919	0.970~0.988	0.969~0.987

CVT 属于户外支柱式单相设备,根据天然酯绝缘油受外界环境影响较大的特性,比如运动粘度、微水含量、倾点等^[27-28]。在进行耐压性能测试时必须考虑外界因素的影响。选取基本涵盖大部分工况环境温度点如下:−20℃、−10℃、0℃、10℃、20℃、30℃、40℃。制作膜纸复合介质心子在上述温度下进行工频耐压测试(试验环境条件:温度 26.1℃、湿度 46.5%)。测试过程的照片见图 1、试验波形见图 2,不同温度下的测试数据见图 3-9(注:横轴为试品端子编号、纵轴为击穿电压值)。



图 1 电气绝缘测试过程
Fig. 1 Electric insulation test procedure

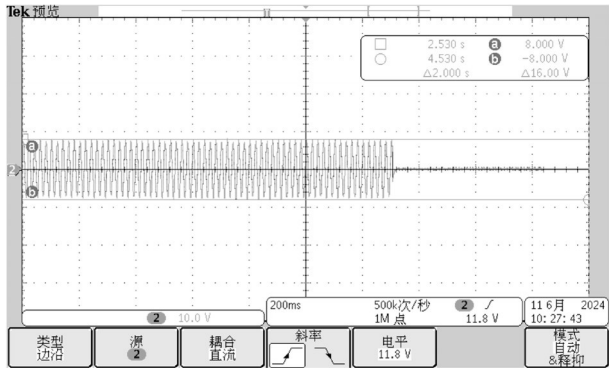


图 2 电气绝缘测试试验波形
Fig. 2 Waveform of electrical insulation test

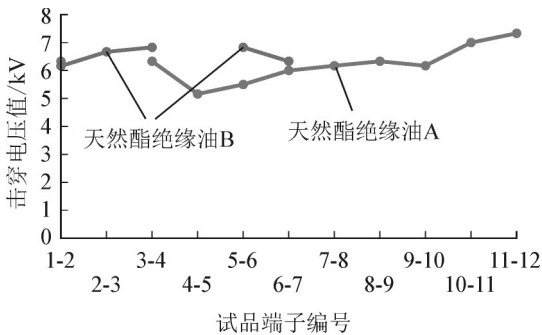


图 3 −20℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 3 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at −20℃

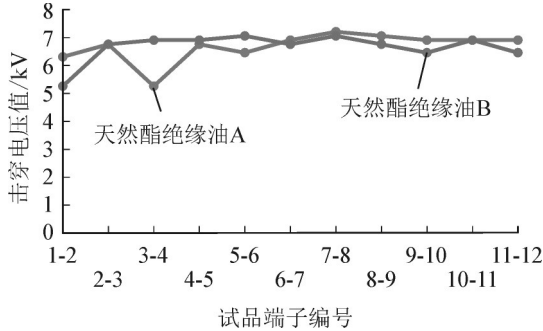


图 4 −10℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 4 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at −10℃

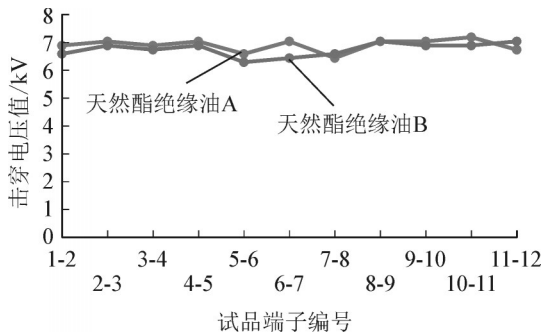


图 5 0℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 5 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at 0℃

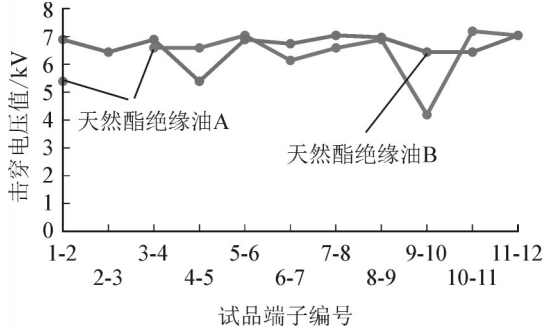


图 6 10℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 6 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at 10℃

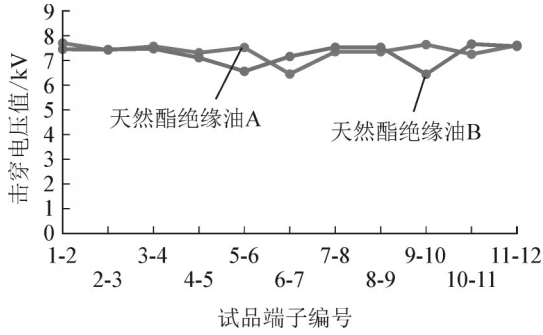


图 7 20℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 7 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at 20℃

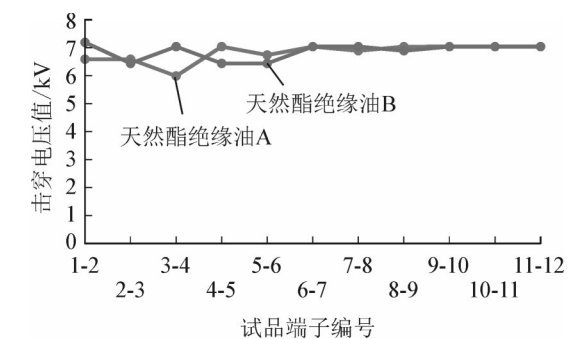


图8 30℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 8 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at 30℃

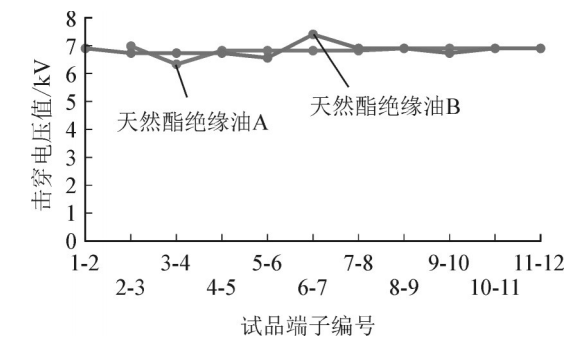


图9 40℃下浸渍天然酯绝缘油击穿电压曲线图
Fig. 9 Breakdown voltage curve diagram of impregnated natural ester insulating oil at 40℃

根据图 3-9 的试验数据可知,浸渍天然酯绝缘油的膜纸复合介质的元件在-20℃、-10℃、0℃、10℃、20℃、30℃、40℃的温度下的平均击穿电压值

表2 电容器心子的电容及介损试验数据(试验环境条件:温度26.1℃、湿度46.5%)
Table 2 Capacitance and dielectric loss test data of capacitor core (ambient condition for test: temperature 26.1℃、humidity 46.5%)

试品编号	施加电压/kV	天然酯绝缘油 A		试品编号	施加电压/kV	天然酯绝缘油 B	
		电容量/μF	tanδ/%			电容量/μF	tanδ/%
1	2	0.125	0.736	2	2	0.132	0.587
	3	0.125	0.527		3	0.132	0.406
3	2	0.131	0.571	4	2	0.134	0.504
	3	0.131	0.406		3	0.134	0.378
5	2	0.135	0.495	6	2	0.136	0.516
	3	0.135	0.365		3	0.136	0.356
7	2	0.130	0.583	8	2	0.145	0.434
	3	0.130	0.427		3	0.145	0.323

注:测试时,电容器心子已在室温下放置较长时间,内部心子温度与环境温度一致。

由上表可以看出,浸渍天然酯绝缘油的电容器心子的介损值约在 0.323%~0.736%之间。随着测试电压的升高,介损值呈下降趋势,且变化较为明显。表中所显数值与浸渍 PXE 的电容器心子介损值相比,浸渍天然酯绝缘油的电容器心子的介损高于浸渍 PXE 产品。

在 6.232 kV~7.379 kV 之间。
天然酯绝缘油 A 和天然酯绝缘油 B 在不同温度下的击穿电压相差不大,见图 10。

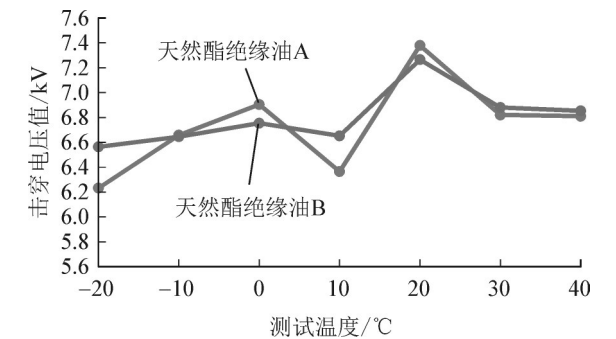


图10 击穿电压-温度曲线图
Fig. 10 Breakdown voltage-temperature curve diagram

根据 CVT 产品制作及运行经验,浸渍 PXE 的膜纸复合介质的元件在常温 20℃下的击穿电压总体值约在 7.0 kV~8.0 kV 之间。从图 10 可以看出,20℃下浸渍天然酯绝缘油电容器元件的击穿电压值在 7.2 kV~7.4 kV 之间,与浸渍 PXE 的性能基本相当,但较高位值略低。根据 CVT 的电场强度估算,上述数值可以满足膜纸复合介质的电容分压器在额定运行及短时工频耐受时的电气性能要求。

4 低电压下电容器心子的电容量及介损试验

选取 2 kV、3 kV,分别测试浸渍天然酯绝缘油的电容器心子的电容量及介损值,测试数据见表 2。

5 样机试验

根据以上研究内容,结合两种天然酯绝缘油制作两台 TYD110/√3 -0.02H 试验样机进行厂内例行试验检验,并通过全部例行试验项目。例行试验项目如下:外观检查及标志检验、一次端工频耐压试

验、局部放电测量、电磁单元耐压试验、二次端工频耐压试验、工频电容和 $\tan\delta$ 测量、准确度检验、铁磁谐振试验、密封性能试验。

两台 CVT 电容分压器的电容量及介损值见表 3。

表3 试验样机的电容量及介损试验数据(试验环境条件:温度 29℃、湿度 65%)
Table 3 Capacitance and dielectric loss test data of tested object (ambient condition for test: temperature 29℃、humidity 65%)

试品编号	施加电压/kV	天然酯绝缘油 A		试品编号	施加电压/kV	天然酯绝缘油 B	
		电容量/pF	$\tan\delta/\%$			电容量/pF	$\tan\delta/\%$
124101074	10	20 373	0.168	124101075	10	20 361	0.195
	110/ $\sqrt{3}$	20 372	0.087		110/ $\sqrt{3}$	20 356	0.095

模拟现场使用便携式电桥采用正接线法测量 10 kV 下试验样机 A 的介损值为 0.168%,试验样机 B 的介损值为 0.195%,上述数值超出国家标准要求,这可能与天然酯绝缘油自身性能有关,后续将对此展开细致研究,尝试与相关单位寻求验收现场对浸渍天然酯绝缘油 CVT 的处理措施。

除了例行试验项目外,还有诸如冲击试验等与绝缘相关的一系列型式试验和特殊试验项目,后续将开展此类研究。

6 结语

浸渍天然酯绝缘油的电容器介质的工频耐压性能测试数据显示,天然酯绝缘油具备在 CVT 电容分压器上使用的前提条件,但应注意其介质损耗值较目前的电容分压器略显偏大。制作的试验样机结果显示 CVT 电容分压器的介质损耗在额定电压下满足现有国家标准要求。

后续将根据浸渍天然酯绝缘油的 CVT 样机继续开展成套产品的试验验证(包含与绝缘有关的全部试验项目),并寻求天然酯绝缘油的配方调整方法,使天然酯绝缘油更便于推广至 CVT 及耦合电容器领域。

参考文献

[1] 刘水平. 输变电装备关键技术与应用丛书互感器电力电容器[M]. 北京:中国电力出版社,2020.

[2] 房金兰. 关于电容式电压互感器技术发展的探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(1):1-6.

FANG Jinlan. Discussion on technical development of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1): 1-6.

[3] 互感器 第5部分 电容式电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840.5—2013[S]. 2013.

Instrument transformers — Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers: GB/T 20840.5—2013[S]. 2013.

[4] 耦合电容器及电容分压器第1部分:总则:GB/T 19749.1—2016[S]. 2016.

Coupling capacitors and capacitor voltage dividers — Part 1:

由上表可以看出,在额定电压下,浸渍天然酯绝缘油的试验样机的介损值约为 0.09%,此值虽比 CVT 产品现行的介损值略大一些,但仍满足于 GB/T 20840.5—2013 国家标准(介损值 $\leq 0.15\%$)要求。

General rules: GB/T 19749. 1—2016[S]. 2016.

[5] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[6] 天然酯绝缘油电力变压器选用导则:DL/T 2484—2022 [S]. 2022.

Guidelines for the selection of natural ester insulated oil power transformers: DL/T 2484—2022 [S]. 2022

[7] 杨硕亮,任春阳,赵含,等. 天然酯绝缘油与电容式电压互感器的相容性研究[J]. 变压器,2024,61(7):41-46.

YANG Shuoliang, REN Chunyang, ZHAO Han, et al. Research on the compatibility of natural ester insulated oil and capacitive voltage transformers[J]. Transformer, 2024, 61(7): 41-46.

[8] 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(1):202-209.

LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis and prospects of key issues in plant insulating oil and its application research[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(1): 202-209.

[9] 杨涛,张小勇,王天,等. 新型高燃点环保型液体绝缘介质—植物绝缘油[J]. 中国油脂,2016,41(2):21-29.

YANG Tao, ZHANG Xiaoyong, WANG Tian, et al. A new high burning point environmental friendly liquid insulation medium—plant insulating oil[J]. Chinese Oil and Fat, 2016, 41(2):21-29.

[10] 赵辉,张亚杰,张江辉,等. 海上风电绝缘材料芳纶纸与变压器油相容性试验[J]. 变压器,2023,60(7):15-21.

ZHAO Hui, ZHANG Yajie, ZHANG Jianghui, et al. Compatibility test between aramid paper and transformer oil, an offshore wind power insulation material[J]. Transformer, 2023, 60(7):15-21.

[11] 黄芝强,李锦彪,方石明. 天然酯绝缘油与变压器常用橡胶材料的相容性研究[J]. 变压器,2021,58(3):41-46.

HUANG Zhiqiang, LI Jinbiao, FANG Shiming. Study on the compatibility between natural ester insulating oil and common rubber materials for transformers[J]. Transformer, 2021, 58(3):41-46.

[12] 任佳,符雪鹏,王巍,等. 天然酯绝缘油的发展历程、性能及展望[J]. 摩擦学学报,2020,40(1):41-46.

REN Jia, FU Xuepeng, WANG Wei, et al. The development history, performance and prospects of natural ester

- insulating oil[J]. Journal of Tribology, 2020, 40(1):41-46.
- [13]邱武斌,杨涛,王吉,等.天然酯绝缘油与油浸式变压器绝缘材料相容性研究[J].变压器,2016,53(3):62-68.
QIU Wubin, YANG Tao, WANG Ji, et al. Research on the compatibility between natural ester insulating oil and oil immersed transformer insulation materials[J]. Transformer, 2016, 53(3):62-68.
- [14]胡婷,曾四秀,李松,等.天然酯与变压器固体材料相容性的研究[J].绝缘材料,2019,52(11):41-49.
HU Ting, ZENG Sixiu, LI Song, et al. Research on the compatibility of natural esters with solid materials for transformers[J]. Insulation Material, 2019, 52(11):41-49.
- [15]邓小聘,李松江,胡婷,等.变压器用植物绝缘油的研究进展[J].绝缘材料,2019,52(11):11-19.
DENG Xiaoping, LI Songjiang, HU Ting, et al. Research progress on plant insulation oil for transformers[J]. Insulation Material, 2019, 52(11):11-19.
- [16]严怀贵.电容式电压互感器制造工艺改进[J].电力电容器,2001,21(1):31-35.
- [17]霍成智.电容式电压互感器的应用和制造技术进步[J].科技创新导报,2010(10):11-12.
- [18]潘永莉,王鹏,王会娟,等.天然酯绝缘油研究进展及发展展望[J].石油炼制与化工,2024,55(8):22-30.
PAN Yongli, WANG Peng, WANG Huijuan, et al. Research progress and development prospects of natural ester insulating oil[J]. Petroleum Refining and Chemical Industry, 2024, 55(8):22-30.
- [19]梁苏宁,杨智,邵先军,等.天然酯绝缘油电力变压器绝缘油与绝缘漆材料相容性研究[J].绝缘材料,2023,56(12):16-23.
LIANG Suning, YANG Zhi, SHAO Xianjun, et al. Study on the compatibility between natural ester insulation oil and insulation paint materials for power transformers[J]. Insulation Material, 2023, 56(12):16-23.
- [20]黄青丹,宋浩永,陈于晴,等.油道高度对植物油变压器绕组温升的影响[J].变压器,2023,60(12):63-67.
HUANG Qingdan, SONG Haoyong, CHEN Yuqing, et al. Influence of oil duct height on winding temperature rise of vegetable oil transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12):63-67.
- [21]王建民,于东旭,王浩名,等.天然酯绝缘油对110 kV电力变压器主纵绝缘强度的影响分析[J].绝缘材料,2023,56(1):51-57.
WANG Jianmin, YU Dongxu, WANG Haoming, et al. Analysis of the effect of natural ester insulation oil on the main longitudinal insulation strength of 110 kV power transformers[J]. Insulation Material, 2023, 56(1):51-57.
- [22]刘鹏飞,王锐锋,吴红菊,等.丁腈橡胶和丙烯酸酯橡胶在天然酯(FR3)和矿物油中的材料相容性测试及探讨[J].变压器,2024,61(8):22-24.
LIU Pengfei, WANG Ruifeng, WU Hongju, et al. Compatibility testing and exploration of nitrile rubber and acrylic rubber in natural ester (FR3) and mineral oil[J]. Transformer, 2024, 61(8):22-24.
- [23]纪蔚涛,杜迎辉,李象军,等.500 kV天然酯绝缘油变压器绝缘结构仿真优化[J].绝缘材料,2023,56(6):45-51.
JI Weitao, DU Yinghui, LI Xiangjun, et al. Simulation and optimization of insulation structure for 500 kV natural ester insulated oil transformer[J]. Insulation Material, 2023, 56(6):45-51.
- [24]张亚杰,杜振斌,刘新颜,等.天然酯绝缘油在变压器中的应用研究与探讨[J].绝缘材料,2023,56(5):66-71.
ZHANG Yajie, DU Zhenbin, LIU Xinyan, et al. Research and discussion on the application of natural ester insulation oil in transformers[J]. Insulation Material, 2023, 56(5):66-71.
- [25]郑志曜,张婧卿,李凌,等.矿物绝缘油配电变压器更换天然酯绝缘油的性能变化分析[J].变压器,2019,56(6):46-52.
ZHENG Zhiyao, ZHANG Jingqing, LI Ling, et al. Analysis of performance changes of mineral insulated oil distribution transformers replacing natural ester insulated oil[J]. Transformer, 2019, 56(6):46-52.
- [26]张涛,肖霞,杨文雁,等.变压器用天然酯绝缘油研究现状[J].中国油脂,2019,44(4):77-85.
ZHANG Tao, XIAO Xia, YANG Wenyan, et al. Research status of natural ester insulating oil for transformers[J]. Chinese Oil and Fat, 2019, 44(4):77-85.
- [27]李琪菡,张振东,刘浩,等.影响油浸式电力变压器振动因素的研究[J].电测与仪表,2023,60(9):96-101.
LI Qihan, ZHANG Zhendong, LIU Hao, et al. Study on factors affecting vibration of oil immersed power transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9):96-101.
- [28]李婷,肖京,刘赞,等.基于信息融合和神经网络的变压器内部故障快速诊断方法[J].电测与仪表,2023,60(11):194-200.
LI Ting, XIAO Jing, LIU Yun, et al. Fast diagnosis method of transformer internal fault based on information fusion and neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11):194-200.

作者简介:

杨硕亮(1985—),男,工程师,主要从事电容式电压互感器及耦合电容器技术工作。E-mail:yangshuoliang@126.com。

刘水平(1965—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器及互感器技术工作。

杨晓静(1986—),女,工程师,主要从事电容式电压互感器及耦合电容器技术工作。

任春阳(1967—),男,正高级工程师,主要从事电容式电压互感器、耦合电容器及电流互感器技术工作。

姬凯(1987—),男,工程师,主要从事互感器及电力电容器工艺工作。

刘宝来(1984—),男,工程师,主要从事互感器及电力电容器试验工作。