

酯类绝缘油的油流带电度影响因素研究

钱艺华^{1,2}, 卓然^{3,4}, 王青^{1,2}, 高萌^{3,4}, 赵耀洪^{1,2}, 傅明利^{3,4}

(1. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080;
3. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 4. 特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心, 广州 510663)

摘要: 为研究环保型酯类绝缘油的带电倾向, 搭建了油流带电度测试平台, 选取了两种商用酯类绝缘油与矿物绝缘油, 包括FR3天然酯、Midel 7131合成酯、克拉玛依绝缘油, 分析了油纸老化程度、流速、温度等关键因素对酯类绝缘油的油流带电度的影响。结果表明: 酯类绝缘油粘度较高, 在油流作用下进一步增大了油纸间的摩擦接触, 进而加速了油纸界面电荷分离, 导致其带电度明显高于矿物绝缘油, 其中天然酯最高, 其次为合成酯。随着油流流速增加, 加剧了油纸界面电荷分离, 酯类绝缘油的带电倾向增强。测试温度的增加会加速绝缘油中极性分子的电离过程, 导致绝缘油带电倾向增强, 而随着温度的增加绝缘油粘度会下降, 导致油纸接触摩擦减弱, 其带电倾向反而下降。油纸老化程度的增加加速了油中老化极性的生成, 进而加速杂质分子的离解, 致使油中的本征离子及杂质离子数量增多, 从而加剧油流带电程度。

关键词: 酯类绝缘油; 油流带电; 带电度; 天然酯; 合成酯

Study on the Factors Influencing the Oil Flow Chargeability of Ester Insulating Oil

QIAN Yihua^{1,2}, ZHUO Ran^{3,4}, WANG Qing^{1,2}, GAO Meng^{3,4}, ZHAO Yaohong^{1,2}, FU Mingli^{3,4}

(1. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Guangzhou 510080, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 4. National Engineering Research Center of UHV Technology and New Electrical Equipment, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to study the electrification tendency of environment-friendly ester insulating oil, an oil flow chargeability test platform is built. By selecting two kinds of commercial ester insulating oil and mineral insulating oil, including FR3 natural ester, Midel 7131 synthetic ester and Karamay insulating oil, the influence of key factors such as oil paper aging degree, flow rate and temperature on the oil flow electrification of ester insulating oil is analyzed. The results show that the viscosity of ester insulating oil is high. Under the action of oil flow, the friction contact between oil and paper is further increased, and the charge separation at oil-paper interface is accelerated, resulting in a significantly higher electrical charge than mineral insulating oil, of which natural ester is the highest, followed by synthetic ester. With the increase of oil flow rate, the charge separation at the oil-paper interface is intensified, and the electrification tendency of ester insulating oil is enhanced. The increase of the test temperature will accelerate the ionization process of polar molecules in the insulating oil, resulting in an increase in the electrification tendency of the insulating oil. With the increase of the temperature, the viscosity of the insulating oil will decrease, resulting in the weakening of the contact friction of the oil-paper, and its electrification tendency will decrease instead. The increase of the aging degree of oil paper accelerates the formation of aging polar products in the oil, and then accelerates the dissociation of impurity molecules, resulting in the increase of the number of intrinsic ions and impurity ions in the oil, thus increasing the degree of oil flow electrification.

Key words: ester insulating oil; oil flow chargeability; chargeability; natural ester; synthetic ester

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177129); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20210086)。

Foundation item: Supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China (52177129); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20210086).

0 引言

油浸式电力变压器作为电网的关键装备,其内部液体绝缘通过强迫油循环起着冷却、灭弧、绝缘等作用,直接影响着设备安全稳定运行^[1-7]。在强迫传递绕组和磁路产生的热量。然而,油循环电力变压器中液体绝缘会导致油纸界面电荷分离,使绝缘纸板表面带负电荷,而绝缘油中带正电荷,形成冲流电流(即“油流带电”),容易造成变压器放电故障^[8-12]。为此,对绝缘油的油流带电倾向进行测量是变压器绝缘油现场运行质量控制的重要指标之一^[13-15]。当前,随着电力设备电压等级的提升、容量的增大以及各类环保型绝缘油等新型变压器的开发与应用,油流带电问题已成为各电力部门及研究院所关注的热点^[16-18]。

矿物绝缘油作为当前广泛应用的变压器液体绝缘材料,具有绝缘性能好、成本低等优势,但也存在生物降解性差、闪点低等缺点,不符合国家能源双碳可持续发展^[19]。相比之下,酯基绝缘油具有低碳环保、生物降解性优异、抗燃性较好等特点,现有酯基绝缘油变压器也逐渐应用于城市输变电、铁路动车组、海上风电等领域。目前常用的酯类绝缘油为天然脂与合成酯^[20-22]。天然脂为三酯绝缘油,主要成分为甘油三酯,来源于天然油料作物。合成酯为四酯绝缘油,主要成分为季戊四醇酯,通过化学合成方法获得。天然酯绝缘油中含有较多的不饱和脂肪酸,化学活性较强,使得其氧化安定性较差,而合成酯的氧化安定性优于天然脂^[23]。

值得注意的是,天然脂与合成酯绝缘油的分子结构复杂、分子量大、分子链较长,使得其体系的内摩擦力较大,导致其运动粘度明显高于矿物绝缘油。因此,由于酯类绝缘油内摩擦力、粘度、导热能力均相较于矿物绝缘油更高,势必会加剧变压器内部强迫油循环过程中油纸接触摩擦程度,加速油纸界面的电荷分离,容易造成油流带电问题。学者 T. Ishikawa 等人研究了不同温度下硅油流过 NOMEX 纸和牛皮纸的油流带电量变化规律,结果表明牛皮纸与硅油组合的油流带电量更大,而硅油的油流带电量较矿物油更小^[24]。学者 T. Paillat 等人研究对比了酯类绝缘油与矿物油对油流带电的影响,结果表明酯类绝缘油在油流作用下产生的冲流电流普遍比矿物绝缘油大^[15]。现有的研究主要集中在

在矿物绝缘油的油流带电特性,较少针对新型环保绝缘油,并没有充分研究各类因素对酯类绝缘油的带电度影响。

因此,为进一步明确酯类绝缘油的油流带电度与各类影响因素之间的关系,为新型环保酯类绝缘油的选择提供参考依据,本文通过开展油纸绝缘与绝缘油的加速热老化试验研究了老化程度、流速、温度等关键因素对酯类绝缘油的油流带电度的影响。

1 试验

1.1 试验材料

选用已广泛应用在各类油浸式变压器中的商用 FR3 天然酯与 Midel 7131 合成酯作为研究对象,以克拉玛依 25 号矿物绝缘油作为对比研究对象。纸包铜绕组样品尺寸为 8 mm×3 mm(宽度×厚度),包裹 8 层厚度为 0.08 mm 的普通硫酸木浆盐绝缘纸。绝缘油的具体参考如表 1 所示。

表 1 3 种绝缘油性能参数

Tab. 1 Performance parameters of three insulating oils

性能指标	绝缘油		
	FR3 天然酯	Midel 7131 合成酯	克拉玛依 25#矿物油
生产厂家	Cargill	M&IMaterials	中石油
颜色	淡绿色、无游离水和悬浮物及沉淀	清亮、无游离水和悬浮物及沉淀	清亮、无游离水和悬浮物及沉淀
密度/(g·cm ⁻³)	0.92	0.97	0.88
运动粘度/(m ² ·s ⁻¹)	36	28	9.9
闪点/(℃)	275	252	141
水含量/ppm	15	15	5
介损	0.006	0.006	0.001

1.2 绝缘油带电度测试

在实验室内搭建绝缘油过滤式微电流测量系统,如图 1 所示。在油流作用下利用真空循环泵强迫油样从不锈钢罐中进入电荷分离器,绝缘油通过电荷分离器中的商用滤纸(例如 Whatman 541)以产生电荷分离,滤纸上的电荷由高性能静电计 Keithley 6517B 测量。描述绝缘油的带电度(electrostatic charging tendency, ECT)表示流动中每单位体积绝缘油产生的电荷量,可以通过式(1)

计算得到。

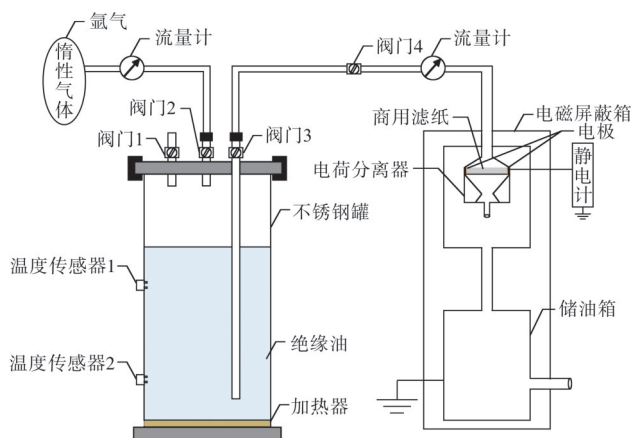


图1 绝缘油过滤式微电流测量系统

Fig. 1 Insulating oil filtering micro-current measuring system

$$\rho = \frac{q}{V} = \frac{\int_0^t i dt}{V} \quad (1)$$

式中： ρ 为油中电荷密度， pC/mL ； q 为油纸电荷分离的电荷量， pC ； i 为泄漏电流， pA ； V 为油样体积， mL ； t 为测量时间， s 。装有油样的不锈钢罐底部设有加热器，并通过温度传感器对油样进行控温，通过对不锈钢罐内冲入高纯度惰性气体氩气，并控制气压，可将不锈钢内的油样以一定流速通过阀门3、4注入电磁屏蔽箱内的电荷分离器中，并利用流量计记录液体流速，油样通过电荷分离器中的商用滤纸，利用静电计测试泄露电流值，并根据储油箱内绝缘油体积，按照式(1)计算得到油样带电度。

1.3 油纸绝缘热老化试验

为全面研究绝缘油老化程度对酯类绝缘油的带电度影响，需要开展油纸绝缘与绝缘油的热老化试验。针对油纸绝缘热老化试验，通过模拟变压器油纸绝缘在实际运行过程中的劣化选择一种合适的试验温度至关重要。温度选择过低或者过高均不合适，本文参考IEEE热老化试验标准，选择 130°C 作为油纸绝缘的热老化温度，该温度下油纸绝缘老化一天相当于现场运行变压器在实际温度下(80°C)运行1 a。此外，针对绝缘油热老化试验可以充分排除铜绕组对不同类型绝缘油的带电度影响。具体试验步骤如图2所示。

1) 对试验材料预处理，分别将3种绝缘油与若干铜绕组置于真空干燥箱里，在 90°C 、 50 Pa 的条

件下干燥24 h。

2) 针对油纸绝缘样品，按照油纸比10:1的比例将铜绕组分别浸没在3种绝缘油中并置于真空干燥箱，在 60°C 、 50 Pa 的条件下干燥24 h。针对单一绝缘油样品，将3种绝缘油分别置于 90°C 、 50 Pa 的条件下干燥24 h。

3) 将预处理之后油纸绝缘样品与绝缘油样品置于密封不锈钢罐中，并向罐中充入氮气以排尽空气。

4) 随后将不锈钢罐置于 130°C 油浴锅中进行30 d热老化试验。每隔5 d取出绝缘油样品，进行不同温度、流速下的绝缘油带电度测试。

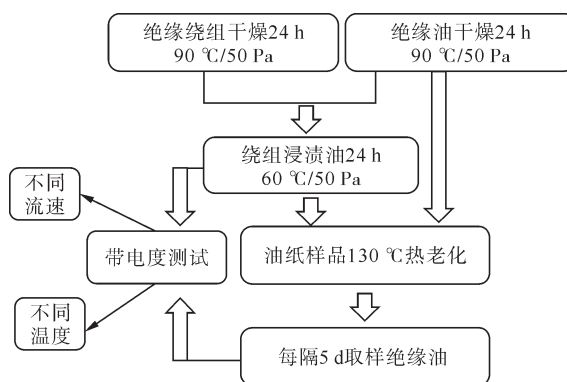


图2 试验流程

Fig. 2 Test process

2 结果与讨论

绝缘油流速是影响油流带电的重要因素，根据实际工程经验，油浸式变压器内部油流速不超过 3 m/s 。为此，本文通过调节绝缘油过滤式微电流测量系统中氩气的出力量，以获得在 $0.2\sim 2.0\text{ m/s}$ 范围内的绝缘油流速。在 50°C 测试温度条件下3种新油的带电度与流速间的关系如图3所示。

可以看出，3种新油的带电度随着流速的增加均呈现单相上升趋势，相较于初始 0.2 m/s 流速，矿物油、天然酯、合成酯新油在 2.0 m/s 流速时候的带电度分别提高了172.5%、57.4%、71.7%。分析原因为绝缘油流速的增加会加速大量的电荷分离、迁移和累积，从而加剧绝缘油中电荷的生成，导致其带电度增加。此外，在相同流速下，天然酯与合成酯新油的带电度明显高于矿物油，分析原因为酯类绝缘油粘度较高，在油流作用下进一步增大了油纸间的摩擦接触进而加速了油纸界面电荷

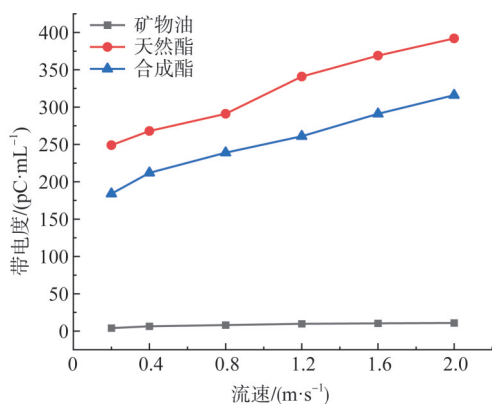


图3 不同流速下3种新油的带电度变化趋势

Fig. 3 Variation trend of electrical charge of three new oils at different flow rates

分离。

0.8 m/s 流速测试条件下3种新油的带电度与温度间的关系如图4所示。可以看出相同测试温度下依然是合成酯新油的油流带电度最高，其次为天然酯新油，两者远高于矿物油。值得注意的是，3种新油的带电度随着温度的增加呈现先上升后下降的趋势，分析原因为当绝缘油温度低于60℃时油中的本征离子与杂质离子数量随温度的增加而增多，导致油中带电量增加，3种新油在不同温度下的运动粘度变化规律如图5所示。随着绝缘油温度增加油的运动粘度进一步降低，油纸接触摩擦力更小，导致油流带电度降低。

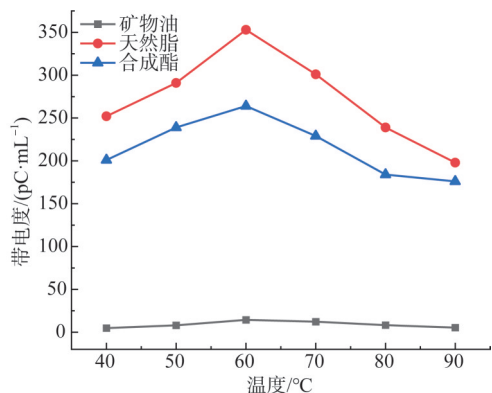


图4 不同温度下3种新油的带电度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of electrical charge of three new oils at different temperatures

0.8 m/s 流速、50℃测试条件下油纸绝缘样品中的3种绝缘油的带电度随老化时间的变化关系如图6所示。可以看出，3种绝缘油的带电度均随老化时间的增加呈现先快速上升后趋于平缓的变化趋

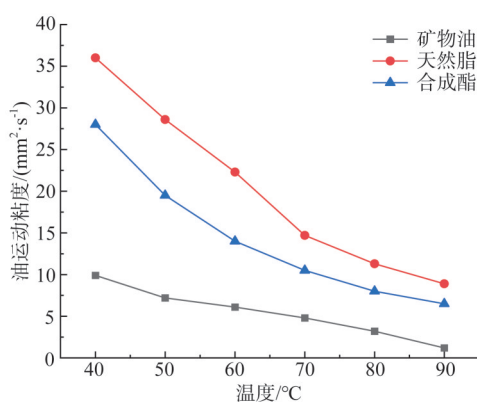


图5 不同温度下3种新油的运动粘度变化趋势

Fig. 5 Variation trend of kinematic viscosity of three new oils at different temperatures

势。分析原因为油纸绝缘老化初期绝缘油老化极性产物快速生成，绝缘油老化程度的加剧会导致油中极性产物快速生成，进而加速杂质分子的离解，致使油中的本征离子及杂质离子数量增多，从而加剧油流带电程度。油纸绝缘老化中后期油中杂质离子数量增加减缓，致使绝缘油带电度增加变缓。此外，油纸绝缘老化过程中天然酯绝缘油的带电度最高，其次是合成酯，最后为矿物油，并且天然酯与合成酯的带电度远高于矿物油。

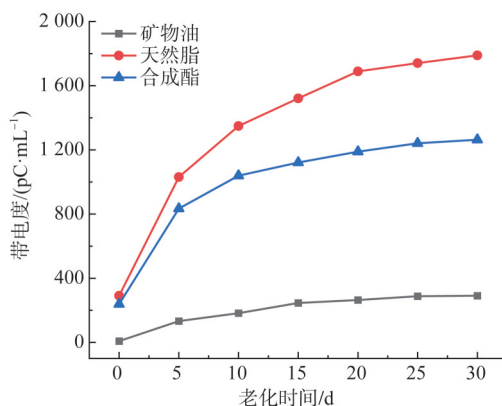


图6 不同老化程度下油纸绝缘样品中3种油的带电度变化趋势

Fig. 6 Variation trend of electrical charge of three oils of oil-paper insulation sample under different aging degrees

合成酯与天然酯的运动粘度明显高于矿物油是造成差异的主要原因，其次为酯类绝缘油的耐湿性优于矿物绝缘，导致其在老化过程中会生成更多的极性水分，如图7所示。

以上过程加剧了油导电性，进一步加剧了绝缘油带电倾向。油纸绝缘老化会加速绝缘油中生成杂

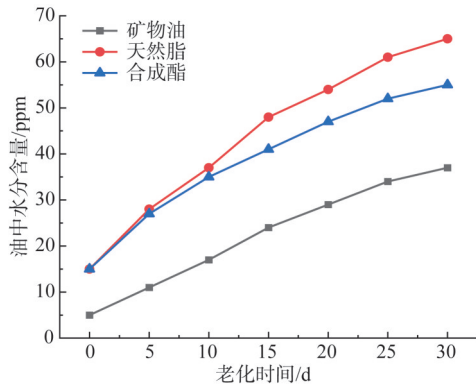
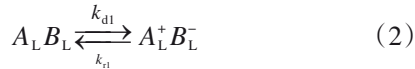


图7 不同老化程度下油纸绝缘样品中3种油的水分含量变化趋势

Fig. 7 Variation trend of moisture content of three oils of oil-paper insulation sample under different aging degrees

质 $A_L B_L$ ，而绝缘油自身碳氢化合物也发生解离与复合反应，并影响油流电荷的产生与迁移，如式(2)所示。绝缘纸纤维素的自由基 RP 、 RN 分别与油中杂质电离出的正 A_L^+ 、负 B_L^- 离子反应，如式(3)~(4)所示，生成 RA_L^+ 与 RB_L^- ，从而加剧了电荷从油/纸界面分离。



式中： k_{d1} 为电荷离解率常数； k_{r1} 为电荷重新结合率常数； k_{fP} 、 k_{fN} 分别为正向自由基 P 、反向自由基 N 常数。

0.8 m/s 流速、50 ℃测试条件下绝缘油样品中的3种绝缘油的带电度随老化时间的变化关系如图8所示。可以看出，酯类绝缘油在老化过程中的带电度也均高于矿物绝缘油，其中天然脂依然最高，其次为合成酯。此外，对比图6与图8可以看出铜绕组在一定程度上会加速绝缘油带电度增加，分析原因为油纸绝缘样品在老化过程中铜绕组会逐渐释放铜离子溶解于绝缘油中，导致油品带电度增加，但值得注意的是铜绕组并不会改变酯类绝缘油的带电倾向明显高于矿物绝缘油的事实。

由图8可见，酯类绝缘油的带电度明显高于矿物油，在油流作用下进一步增大了油纸间的摩擦接触，进而加速了油纸界面电荷分离，导致其带电度明显高于矿物绝缘油，其中天然酯最高，其次为合

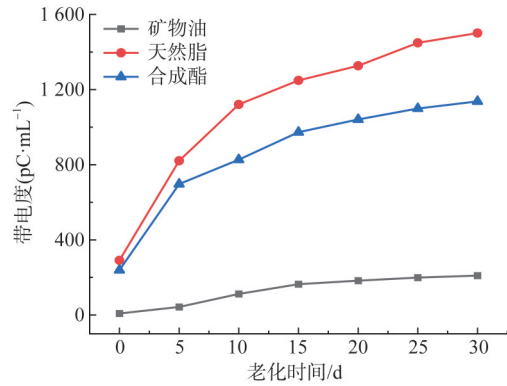


图8 不同老化程度下绝缘油样品中3种油的带电度变化趋势

Fig. 8 Variation trend of electrical charge of three oils of insulating oil sample under different aging degrees

成酯，虽然环保型酯类绝缘油的出现为变压器绝缘方式的选择提供了一条新的思路，但其高粘度、耐湿性等特性也会为实际运行过程中油流带电问题埋下隐患。性能优异的绝缘油对保障其可靠运行至关重要，而混合绝缘油能将单一油品的性能优势互补，是新型液体电介质研究的重要方向。由矿物油与天然酯、合成酯、改性酯等按一定配比组成的混合绝缘油，具备统筹兼顾矿物油和酯类油优缺点的独特优势，是未来解决脂类绝缘油带电度高且矿物绝缘油生物降解性差、闪点低等问题的关键。

3 结论

本文研究围绕环保型酯类绝缘油的带电倾向特性，开展了加速热老化试验，研究了老化程度、流速、温度对酯类绝缘油带电倾向的影响，并与矿物绝缘油进行了对比，主要结论如下。

1) 油流流速增加加剧了油纸界面电荷分离，导致绝缘油的带电倾向增强。测试温度的增加加速了绝缘油中极性分子的电离过程，导致绝缘油带电倾向增强，带电度增加，而随着温度进一步增加，绝缘油粘度下降，油纸接触摩擦减弱，其带电度反而下降。

2) 酯类绝缘油粘度较高，在油流作用下进一步增大了油纸间的摩擦接触，进而加速了油纸界面电荷分离，导致其带电度明显高于矿物绝缘油，其中天然酯最高，其次为合成酯，并且随着流速的增加呈现上升趋势。

3) 油纸老化程度的增加加速了油中老化极性

产物的生成,进而加速杂质分子的离解,致使油中的本征离子及杂质离子数量增多,从而加剧油流带电程度。

参考文献

- [1] 胡小博,李坤,陈荣,等.天然酯绝缘油在油纸界面放电故障条件下的分解产气特性研究[J].绝缘材料,2019,52(11):70-74.
HU Xiaobo, LI Kun, CHEN Rong, et al. Study on the decomposition and gas production characteristics of natural ester insulating oil under oil paper interface discharge fault conditions[J]. Insulation Material, 2019, 52(11): 70-74.
- [2] 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):69-75.
ZHANG Yajie, DU Zhenfubin, LIU Xinyan, et al. Research and discussion on the application of natural ester insulating oil in transformers[J]. Insulation Material, 2023, 56(5): 69-75.
- [3] 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.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Review on thermal aging of oil paper insulation for power transformers[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [4] 曾夯夫,胡婷,胡洋,等.绝缘纸对天然酯和矿物油热老化特性的影响[J].绝缘材料,2022,55(6):78-83.
ZENG Hangfu, HU Ting, HU Yang, et al. The effect of insulation paper on the thermal aging characteristics of natural esters and mineral oils[J]. Insulation Material, 2022, 55(6): 78-83.
- [5] 吴楠,李晓楠,李赫,等.高频电老化过程中油纸绝缘表面电荷积聚消散特性[J].南方电网技术,2022,16(7):40-45,75.
WU Nan, LI Xiaonan, LI He, et al. Accumulation and decay characteristics of charges on oil paper insulated surface under high frequency electrical aging process [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 40-45, 75.
- [6] 鲁沛乐,严英杰,刘亚东,等.有载分接开关绝缘油中金属颗粒运动规律及其对介电性能的影响[J].南方电网技术,2024,18(5):1-11.
LU Peile, YAN Yingjie, LIU Yadong, et al. Movement law of metal particles in insulating oil of on-load tap-changer and its influence on dielectric properties [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 1-11.
- [7] 马秉伟,陈晓国,郑宇,等.电力变压器环保绝缘油研究进展与趋势[J].南方电网技术,2024,18(5):12-21.
MA Bingwei, CHEN Xiaoguo, ZHENG Yu, et al. Research progress and trends of eco-friendly insulating oil for power transformers[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 12-21.
- [8] 郭献清,孙文艺,贺银涛.影响天然酯油变压器绝缘性能因素分析[J].机电工程技术,2022,51(9):285-288.
GUO Xianqing, SUN Wenyi, HE Yintao. Analysis of factors affecting the insulation performance of natural ester oil transformers [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2022, 51(9): 285-288.
- [9] 陈庆国,高源,池明赫,等.交直流叠加电场下油纸绝缘的油流带电特性[J].中国电机工程学报,2014,34(15):2502-2510.
CHEN Qingguo, GAO Yuan, CHI Minghe, et al. Oil flow electrification characteristics of oil-paper insulation under AC and DC superimposed electric fields [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2502-2510.
- [10] 林木松,钱艺华,李智,等.变压器油绝缘性能下降化学诊断及处理技术研究[J].广东电力,2023,36(7):70-76.
LIN Musong, QIAN Yihua, LI Zhi, et al. Study on chemical diagnosis and processing technology for declination of transformer oil insulation performance [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 70-76.
- [11] OKABE S, KOHTOH M, AMIMOTO T. Suppression of increase in electrostatic charging tendency of insulating oil by aging used for power transformer insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 294-301.
- [12] 吴楠,李晓楠,李赫,等.高频电老化过程中油纸绝缘表面电荷积聚消散特性[J].南方电网技术,2022,16(7):40-45.
WU Nan, LI Xiaonan, LI He, et al. Characteristics of charge accumulation and dissipation on the surface of oil paper insulation during high-frequency electrical aging [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 40-45.
- [13] 石墨,许海林,李晖,等.基于多模态数据融合的油浸式配电变压器分级预警模型[J].广东电力,2022,35(12):110-117.
SHI Mo, XU Hailin, LI Hui, et al. Classification early warning model of oil-immersed distribution transformers based on multi-modal data fusion [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 110-117.
- [14] 任双赞,蒲路,黄国强,等.变压器用矿物绝缘油的带电度与油中腐蚀性硫浓度的相关性分析[J].高电压技术,2015,41(2):440-445.
REN Shuangzan, PU Lu, HUANG Guoqiang, et al. Correlation analysis between the electrical conductivity of mineral insulating oil used in transformers and the concentration of corrosive sulfur in the oil [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 440-445.
- [15] PAILLAT T, ZELU Y, MORIN G, et al. Ester oils and flow electrification hazards in power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 5(19): 1537-1543.
- [16] 刘克成,李振海,成立,等.电场强度对变压器绝缘油电导率的影响研究[J].变压器,2019,56(3):37-40.
LIU Kecheng, LI Zhenhai, CHEN Li, et al. Study on influence of electric field intensity on conductivity of transformer insulating oil [J]. Transformer, 2019, 56(3): 37-40.
- [17] 雷秉惠,张吉,陈锋,等.大型电力变压器油流带电机理研究[J].水电站机电技术,2020,43(5):30-32.
LEI Binghui, ZHANG Ji, CHEN Feng, et al. Research on the mechanism of oil flow electrification in large power transformers [J]. Hydropower Station Electromechanical Technology, 2020, 43(5): 30-32.
- [18] 陈庆国,王金龙,林林,等.运行条件对换流变压器油纸绝缘油流带电特性的影响[J].高电压技术,2018,44(12):3880-3887.
CHEN Qingguo, WANG Jinlong, LIN Lin, et al. Influence of operation conditions on flow electrification characteristics of oil-paper insulation in converter transform [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3880-3887.
- [19] 刘东升,刘新颜,史哲文,等.天然酯变压器与矿物油变压器温升特性差异分析[J].变压器,2023,60(9):19-23.

- LIU Dongsheng, LIU Xinyan, SHI Zhewen, et al. Difference analysis on temperature rise characteristics between natural ester insulating oil transformer and mineral insulating oil transformer[J]. Transformer, 2023, 60(9): 19–23.
- [20] 张宗喜,刘睿,聂鸿宇,等.微氧作用下天然酯变压器油热老化特性研究[J].电测与仪表,2021,58(12):63–68.
- ZHANG Zongxi, LIU Rui, NIE Hongyu, et al. Study on thermal aging characteristics of natural ester transformer oil under the action of micro oxygen[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(12): 63–68.
- [21] 贾玉玉,徐前进.合成酯作为轨道交通变压器油的必要性[J].绝缘材料,2021,54(3):49–53.
- JIA Yuyu, XU Qianjin. Necessity of synthetic ester as rail transit transformer oil[J]. Insulation Material, 2021, 54(3): 49–53.
- [22] 孟杰,孙国亮,李基成. MDEL 合成酯绝缘油性能特征以及与浇注树脂和矿物油绝缘特性的比较[J]. 变压器, 2010, 47(5): 40–49.
- MENG Jie, SUN Guoliang, LI Jicheng. Performance characteristics of MDEL synthetic ester insulation oil and comparison with insulation properties of casting resin and mineral oil[J]. Transformer, 2010, 47(5): 40–49.
- [23] 刘军,刘巧珏,张安红. 电力变压器用天然酯绝缘液的性能提高方法[J]. 变压器, 2020, 57(7): 40–48.
- LIU Jun, LIU Qiaojue, ZHANG Anhong. Performance improving methods of natural ester liquid for power transformer [J]. Transformer, 2020, 57(7): 40–48.
- [24] ISHIKAWA T, YASUDA K, OKABE S. Streaming electrification characteristics of silicone oil with oil temperature increase dielectric liquids [C]// IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Chasseneuil, June 30-July 3, 2008, Manchester, UK. New York: IEEE, 2008: 519–526.
-
- 收稿日期: 2023-10-17; 网络首发日期: 2024-04-15
- 作者简介:
- 钱艺华(1975), 女, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为液体电介质、先进电工材料及装备和智能输变电, qianyh2001@163.com;
- 卓然(1986), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力变压器状态评价与资产管理, zhuoran@csg.cn;
- 高萌(1990), 男, 通信作者, 工程师, 博士, 研究方向为电工新材料开发及应用评价以及电力设备资产管理, hvgao1990@163.com。
-
- (上接第 26 页 Continued from Page 26)
- [22] MOUSAVIZADEH S, GHANIZADEH B T, ALAHYARI A, et al. A novel unbalanced power flow analysis in active AC-DC distribution networks considering PWM convertors and distributed generations [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022 (138): 107938.1–107938.11.
- [23] 韩明明,李清泉,刘洪顺,等.特高压混合无功补偿变电站内特快速暂态波幅频特性[J].电网技术,2015,39(12):3353–3359.
- HAN Mingming, LI Qingquan, LIU Hongshun, et al. Amplitude and frequency characteristics of very fast transient in UHV substation with hybrid reactive power compensation [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3353–3359.
- [24] HE Baina, DONG Yanchen, MENG Fantao, et al. Research on TRV transient characteristics of EHV controllable series compensation line[J]. Electric Power Systems Research, 2023 (220): 1–10.
- [25] 周伟绩,李凤婷,解超.带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):33–41.
- ZHOU Weiji, LI Fengting, XIE Chao. Adaptive auto-reclosing scheme for line-to-line grounded faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 33–41.
- [26] 李润昌,刘洪顺,姜杰,等.特高压无补偿线路潜供电弧电弧特征与弧柱形态[J].高电压技术,2018,44(4):1359–1366.
- LI Runchang, LIU Hongshun, LOU Jie, et al. Investigation on electrical characteristics and arc column morphology of submarine arc on UHV transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1359–1366.
- [27] 张婧,杨小霞,杜巍.混合无功补偿对特高压输电线路的影响机制研究[J].智慧电力,2020,48(5):92–98.
- ZHANG Jing, YANG Xiaoxia, DU Wei. Influence mechanism of hybrid reactive compensation on UHV transmission lines [J]. Smart Power, 2020, 48(5): 92–98.
- [28] 王皓,李永丽,李斌.750 kV 及特高压输电线路抑制潜供电弧的方法[J].中国电力,2005,38(12):29–32.
- WANG Hao, LI Yongli, LI Bin. Submarine arc extinction methods for 750 kV and UHV transmission lines [J]. Electric Power, 2005, 38(12): 29–32.
-
- 收稿日期: 2023-11-02; 网络首发日期: 2024-04-15
- 作者简介:
- 刘洋(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统暂态特性, 2274823428@qq.com;
- 何柏娜(1977), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统暂态特性分析及高电压绝缘技术, hbn770425@163.com;
- 崔荣喜(1979), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源接入电网的技术与控制, 23493257@qq.com。