

天然酯绝缘油纸系统低温耐压特性研究

王伟龙¹, 朱孟兆², 叶文郁¹, 潘振¹, 董永军³

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002;
3. 山东中实易通集团有限公司, 济南 250002)

摘要:为研究低温条件下天然酯绝缘油、改性天然酯绝缘油以及其绝缘油纸系统的耐压特性, 对大豆油基天然酯绝缘油、棕榈油基改性天然酯绝缘油以及其绝缘油纸系统在 $-20 \sim 10^\circ\text{C}$ 进行耐压试验。结果表明: 两种绝缘油及对应的油纸系统工频击穿电压在 $-20 \sim 10^\circ\text{C}$ 内随温度的变化曲线都呈 U 型, 击穿电压的极小值分布在 $-10 \sim 0^\circ\text{C}$ 区间内, 棕榈油基改性天然酯绝缘油击穿电压最小值对应温度略低于大豆油基天然酯绝缘油; 油纸系统中击穿电压波动范围较纯绝缘油小很多, 且比较稳定。

关键词:天然酯绝缘油; 绝缘纸板; 低温; 击穿电压

中图分类号: TQ645; TM21

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2020)02-0050-04

Pressure resistance characteristics of natural ester insulating oil – paper system at low temperature

WANG Weilong¹, ZHU Mengzhao², YE Wenyu¹, PAN Zhen¹, DONG Yongjun³

(1. College of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;
3. Shandong Zhongshiyitong Group Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract: In order to study the pressure resistance characteristics of natural ester insulating oil, modified natural ester insulating oil and their insulating oil – paper system at low temperature, the pressure resistance test was carried out on soybean oil – based natural ester insulating oil, palm oil – based modified natural ester insulating oil, and their insulating oil – paper systems at $-20 \sim 10^\circ\text{C}$. The results showed that the breakdown voltage curve of the two natural ester insulating oils and the corresponding oil – paper systems were U – shaped with the temperature changing at $-20 \sim 10^\circ\text{C}$. The minimum breakdown voltage distributed within the temperature range of $-10 \sim 0^\circ\text{C}$. The minimum breakdown voltage of palm oil – based modified natural ester insulating oil corresponds to a slightly lower temperature than soybean oil – based natural ester insulating oil. The breakdown voltage fluctuation range of insulating oil – paper system was much smaller than that of pure insulating oil and was relatively stable.

Key words: natural ester insulating oil; insulated cardboard; low temperature; breakdown voltage

天然酯绝缘油是一种新型环保高燃点液体绝缘介质^[1], 具有良好的理化性能、电气性能^[2-4], 应用

范围与矿物绝缘油类似, 已在许多国家得到应用, 全球应用的植物绝缘油变压器已超过 75 万台^[5]。在我国, 2015 年 8 月工信部、质检总局、发改委联合印发《配电变压器能效提升计划(2015—2017 年)》, 明确将天然酯绝缘油变压器列为推广的配电变压器新技术产品。然而天然酯绝缘油因其自身成分的原因, 倾点和黏度都高于矿物绝缘油, 导致其低温流动性较差, 不利于变压器散热^[6-11]。改性天然酯绝缘

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-10-22

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(2018A-007)

作者简介: 王伟龙(1992), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail)245194661@qq.com。

通信作者: 朱孟兆, 高级工程师, 硕士生导师, 博士(E-mail)xiaozhupost@qq.com。

油是在天然酯绝缘油的基础上通过酯交换或其他化学反应得到的天然酯绝缘油,其弥补了天然酯绝缘油的倾点和黏度高的问题。

国内外有关变压器绝缘油纸低温特性的研究相对较少,有关天然酯绝缘油纸系统低温特性的研究更少^[12-16]。目前,有关天然酯绝缘油纸绝缘在耐压方面的研究仅涉及到高温以及水分含量等相关因素的影响^[17-19],在低温条件下的研究亟待完善。我国地域辽阔,很大一部分变压器位于东北、新疆及内蒙等高寒地区,研究天然酯绝缘油纸系统在低温条件下的绝缘强度对天然酯绝缘油变压器的低温冷态启动与运行具有重要的现实意义^[20-22]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆油基天然酯绝缘油、棕榈油基改性天然酯绝缘油,两种绝缘油的理化性能如表1所示;绝缘纸板(2 mm)。

表1 两种绝缘油的理化性能

性能	天然酯绝缘油	改性天然酯绝缘油
颜色	清澈、亮绿	无色、透明
密度(15℃)/(g/cm ³)	0.92	0.86
黏度(40℃)/(mm ² /s)	34	5.1
倾点/℃	-21	-32.5
闪点(开口)/℃	330	186
酸价(KOH)/(mg/g)	0.04	0.05
水分(25℃)/(mg/kg)	68.5	121.3
生物分解度(28 d)/%	99	77

ZSGX型电热恒温干燥箱,南京卓实电气有限责任公司;奥地利BAUR保尔DTA 100C全自动绝缘油耐压测试仪。

1.2 试验方法

1.2.1 样品的处理

绝缘油预处理:对两种绝缘油滤油处理,除掉油内的水分及杂质。

绝缘纸板预处理:将厚度为2 mm的绝缘纸板裁剪成60 mm×60 mm的正方形纸块,置于ZSGX型电热恒温干燥箱(温度110℃)中,干燥48 h,再将纸板置于绝缘油中浸泡48 h,使绝缘纸板浸油充分。

1.2.2 工频击穿电压测试

准备6个试验用的耐压油杯,将经预处理的绝缘油倒入6个油杯内,将油杯密封,静置2 h后放置冰箱,待油温降至-20℃时,依次将6个油杯放置全自动绝缘油耐压测试仪中分别测量-20、-10、0、10℃时的击穿电压,耐压油杯电极采用球盖状电极,电极间距为2.5 mm,升压速度为2 kV/s。为保

证数据的准确性,每个样品每个温度只测量1次,最终结果取每个温度下6个样品的平均值。绝缘油纸系统的耐压试验跟绝缘油耐压试验基本一致,将浸油后的绝缘纸板放于两电极之间,倒入绝缘油,控制温度、电极间距,试验电极模型如图1所示。

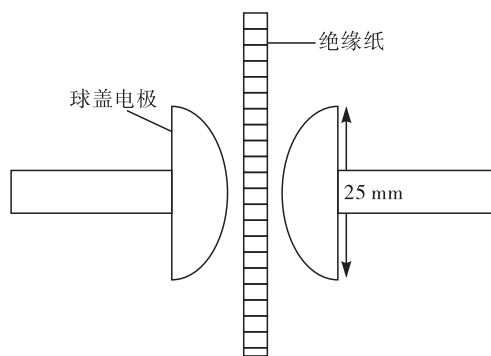


图1 试验电极模型

2 结果与分析

2.1 两种绝缘油工频击穿电压测试结果

在4种温度下对大豆油基天然酯绝缘油、棕榈油基改性天然酯绝缘油进行耐压试验,击穿电压随温度的变化情况分别如图2、图3所示。

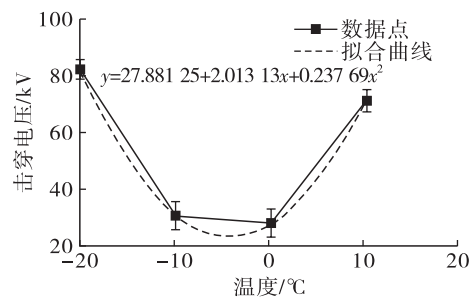


图2 大豆油基天然酯绝缘油击穿电压随温度的变化曲线

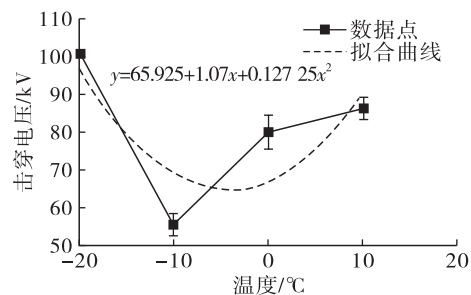


图3 棕榈油基改性天然酯绝缘油击穿电压随温度的变化曲线

从图2、图3可以看出,两种绝缘油击穿电压随着温度的升高都呈现先降低后升高的趋势,其拟合曲线都呈U型,两种绝缘油击穿电压的最小值都在-10~0℃区间内,大豆油基天然酯绝缘油击穿电压最小值在-5℃左右,棕榈油基改性天然酯绝缘油击穿电压最小值在-10℃左右。

绝缘油中的水分一般以溶解水、乳化(悬浮)

水、游离水以及固体绝缘材料吸附水 4 种形态存在^[23]。当绝缘油处于低温条件下(-20℃),水分以悬浮冰的形式存在于绝缘油中,少量的悬浮冰在电场作用下不易形成“冰桥”,所以绝缘油击穿电压高;当油温从-20℃升高至0℃过程中,油中悬浮冰逐渐转化为悬浮水,随着温度的上升,油中悬浮水的体积分数逐渐增大,悬浮水的增多是影响油耐压水平下降的重要因素,使得击穿电压在-20~0℃阶段呈逐渐下降的趋势;当温度继续上升时,水由悬浮态逐渐转化为溶解态,溶解水对击穿电压的影响很小,故在0~10℃阶段击穿电压呈上升趋势。

2.2 两种绝缘油纸系统工频击穿电压测试结果

当电极间距 2.5 mm,纸板厚度 2 mm,两种绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化如图 4、图 5 所示。

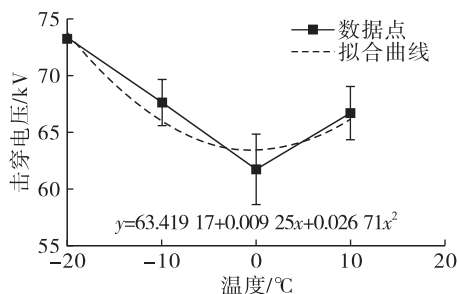


图 4 大豆油基天然酯绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化曲线(电极间距 2.5 mm)

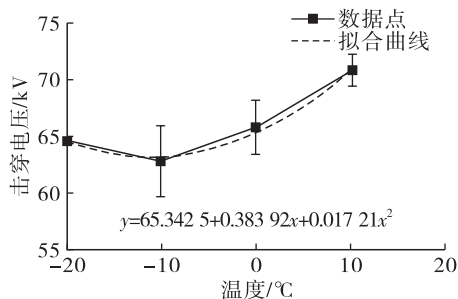


图 5 棕榈油基改性天然酯绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化曲线(电极间距 2.5 mm)

由图 4、图 5 可以看出,随温度的升高,两种绝缘油纸系统的击穿电压呈先下降后上升的趋势,棕榈油基改性天然酯绝缘油纸系统击穿电压最小值对应的温度略低于大豆油基天然酯绝缘油纸系统,与纯绝缘油击穿电压随温度变化趋势基本一致,这与电极与纸板之间存在油隙有关。但油纸系统的击穿电压波动范围较纯绝缘油小很多。

考虑到电极间距对击穿电压有一定影响,因此在纸板厚度为 2 mm 下,改变电极间距为 2 mm,考察电极间距的影响。两种绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化曲线如图 6、图 7 所示。

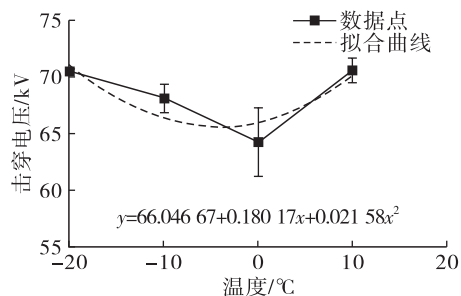


图 6 大豆油基天然酯绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化曲线(电极间距 2 mm)

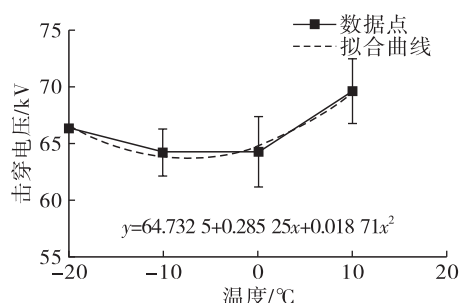


图 7 棕榈油基改性天然酯绝缘油纸系统击穿电压随温度的变化曲线(电极间距 2 mm)

由图 6、图 7 可以看出,两种绝缘油纸系统的击穿电压仍呈先下降后上升的趋势,与电极间距为 2.5 mm 时变化趋势基本一致。比较图 4、图 6 或者比较图 5、图 7,即同一种绝缘油纸系统不同电极间距,可以发现,当电极间距 2 mm 时,击穿电压波动范围要比电极间距 2.5 mm 时小。

试验过程发现,在电极间距为 2.5 mm 时,当试验电压接近击穿电压时,可明显观察到电极表面对纸板表面放电,可理解为绝缘纸板表面易吸附水分,击穿的过程电极与绝缘纸板之间的油隙先被击穿,然后纸板被击穿。理论上电极间距 2.5 mm 的击穿电压应该大于电极间距 2 mm 的击穿电压,但是,当纸板与电极存在油隙时,在纸板击穿过程中会选择纸板较为薄弱的点击穿,所以纸板击穿电压较电极间距为 2 mm 时要小一些,因此对外表现出两者击穿电压近似。同时可看出,电极间距为 2 mm 时击穿电压更稳定一些。

3 结论

通过研究天然酯绝缘油、改性天然酯绝缘油以及两种绝缘油纸系统击穿特性发现:

(1) 两种不同油基的绝缘油及其对应的油纸系统在 -20~10℃ 内都呈先下降后上升的 U 型变化趋势,大豆油基天然酯绝缘油及其油纸系统击穿电压最小值在 -5℃ 左右,棕榈油基改性天然酯绝缘油及其油纸系统击穿电压最小值在 -10℃ 左右。

(2) 在油纸系统中,当纸板厚度为 2 mm,电极

间距为 2 mm 与 2.5 mm 下的工频击穿电压曲线基本一致,电极间距为 2 mm 时击穿电压更稳定。

(3)在 $-10 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内植物绝缘油击穿电压普遍较低,甚至会出现低于相关技术标准要求的情况。为避免变压器发生绝缘事故,若变压器油温在投运前处于 -10°C 以下时,建议变压器空载运行一段时间,待油温上升至 10°C 后再带负荷运行。

参考文献:

- [1] 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(11): 41-45.
- [2] 孙大贵, 杨凤, 刘作华, 等. 植物绝缘油的制备及电气性能研究[J]. 中国油脂, 2010, 35(11): 36-39.
- [3] 吕程. 菜籽油浸渍后绝缘纸的介电和击穿性能[J]. 中国油脂, 2015, 40(12): 109-111.
- [4] 李剑, 党剑亮, 杨丽君, 等. 三种植物绝缘油的理化与电气性能的比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007(9): 42-45.
- [5] 覃彩芹. 植物变压器油的研究与应用进展[J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38(3): 5-9.
- [6] 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.
- [7] 刘光祺, 钟力生, 于钦学, 等. 植物绝缘油研究现状[J]. 绝缘材料, 2012, 45(3): 34-39.
- [8] 陈朋, 余辉, 陈江波, 等. 植物绝缘油主要组分的理化与电气性能研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 45-49.
- [9] 廖瑞金, 张爽, 杨丽君, 等. 天然酯-纸绝缘与矿物油-纸绝缘的热老化及工频击穿特性对比[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 769-775.
- [10] 何清, 李亚飞, 王伟, 等. 植物绝缘油浸纸板电气性能的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 127-131.
- [11] 邹平, 李剑, 孙才新, 等. 植物绝缘油纸浸渍模型与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 125-131.
- [12] 赵冲. 低温环境下变压器油纸复合绝缘特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [13] 郭冲. 换流变压器油纸绝缘低温击穿特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [14] DUVAL M, CAUCHON D, LAMOTHE S, et al. Paraffinic transformer oils for use at low temperatures[J]. IEEE Transact Dielectr, 1983, 18(6): 586-590.
- [15] HAKIM R M. The properties of an insulating oil and its fractions at low temperatures[J]. IEEE Transact Dielectr, 1975, 10(4): 124-134.
- [16] GAO M, LI G F, LI J Z, et al. Study on insulation characteristics of transformer oil at low temperatures [C]. Power Engineering and Automation Conference. Japan, Kyoto: IEEE, 2011: 27-30.
- [17] 唐超, 廖瑞金, 黄飞龙, 等. 电力变压器绝缘纸热老化的击穿电压特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 1-8.
- [18] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 热老化时间及测试温度对油纸绝缘时域介电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 162-169.
- [19] 池明赫, 陈庆国, 王新宇, 等. 温度对复合电压下油纸绝缘电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1524-1532.
- [20] 王珊珊, 周竹君, 梁嗣元. 变压器用植物绝缘油的低温特性试验研究[J]. 电工电气, 2014(12): 48-50.
- [21] 徐征宇, 程焕超, 汪可, 等. 高寒条件下变压器油击穿特性试验[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1342-1348.
- [22] 郭冲, 池明赫, 陈庆国, 等. 复合电压作用下变压器油的低温击穿特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 492-498.
- [23] 邓显波, 刘学忠, 李志锋, 等. 润滑油含水量在线监测研究[J]. 燃气轮机技术, 2008, 21(4): 56-59.

欢迎订阅2020年度《中国油脂》
欢迎关注中国油脂微信公众号

