

极寒条件下均温和梯度温度对 变压器油击穿特性的影响

陈 鹤¹, 邴 龙¹, 张 静², 罗子秋², 吴 跃¹, 孙秋龙¹, 张 辉²

(1. 国网呼伦贝尔供电公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021100;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要:为探究极寒环境下实际变压器运行中绕组放热对变压器油击穿特性的影响,选择常用的45[#]变压器油作为研究对象,测量在极寒条件下不同温度变压器油的饱和含水量,并搭建低温环境击穿试验平台,在均温及梯度温度条件下测量变压器油的电气强度。结果表明:低温下变压器油的饱和含水量与温度之间的关系满足 Arrhenius 方程;低温下充分静置后,均温变压器油的电气强度在低温范围内均有一定幅度地提高,其中在电气强度极小值处即-10℃处提升最为明显,较静置前提升了51.5%;梯度温度变压器油的电气强度随温度的变化曲线和均温变压器油相似,整体呈“U”型分布,其电气强度极小值较均温变压器油并没有降低,反而略有提高,且达到电气强度极小值的温度也有所提高。

关键词:变压器油;极寒;梯度温度;击穿特性;微水

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)05-0056-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.05.008

Influences of Uniform Temperature and Gradient Temperature on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Under Extremely Low Temperature

CHEN He¹, BING Long¹, ZHANG Jing², LUO Ziqiu², WU Yue¹, SUN Qiulong¹, ZHANG Hui²

(1. State Grid Hulunbuir Power Supply Company, Hulunbuir 021100, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the influence of winding heat release during actual transformer operation process at extremely low temperature on the breakdown characteristics of transformer oil, the 45[#] transformer oil was selected as the research object, and the saturated moisture content of the transformer oil with different temperature under extremely low temperature were tested. A breakdown test platform under low temperature environment was built, and the electric strength of the transformer oil was measured under uniform temperature and gradient temperature conditions. The results show that the relationship between saturated moisture content of the transformer and temperature satisfies Arrhenius equation under low temperature. After fully standing at low temperature, the electric strength of uniform temperature transformer oil increases to a certain extent in low temperature range, and the electric strength at -10℃ increases most obvious where the electric strength is the minimum, which is 51.5% higher than that before standing. The electric strength change curve of gradient temperature transformer oil with temperature is similar to that of the uniform temperature transformer oil, showing a “U” shape distribution as a whole. The minimum electric strength of gradient temperature transformer oil does not decrease compared with that of uniform temperature transformer oil, but slightly increases, and the temperature reaching the electric strength minimum value increases.

Key words: transformer oil; extremely low temperature; gradient temperature; breakdown characteristics; trace moisture

收稿日期:2021-06-25 修回日期:2021-08-30

作者简介:陈鹤(1988-),男(汉族),吉林榆树人,工程师,研究方向为线损管理和电网规划。

0 引言

随着特高压输电技术的日渐成熟,中国的特高压交直流工程进入了规模化建设的新阶段^[1-2]。目前,我国多个特高压交直流工程位于东北、内蒙及新疆等寒冷地区,冬季的气温可达到 -40°C 以下,变压器作为输变电系统的重要设备,能否在寒冷条件下安全稳定运行至关重要^[3]。

绝缘油作为油浸式变压器的液体绝缘介质,其绝缘特性直接关系着变压器能否正常安全地运行。研究表明,绝缘油的绝缘性能主要受水分和温度影响^[4-7],在变压器运行过程中,随着材料的电、热老化以及吸潮,油中含水量逐渐上升,从而影响绝缘系统的绝缘性能,严重时会导致异常放电甚至绝缘击穿^[8-9]。因此,针对未来特高压输电工程面临的寒冷环境考验,有关低温条件下变压器油的绝缘性能研究亟待展开。

目前,已有学者对低温下绝缘油的击穿特性进行了研究。刘兰荣等^[10]研究了低温下不同微水含量变压器油的击穿特性,发现变压器油的击穿电压与温度的关系曲线呈“U”型变化。高明^[11]在 $-20\sim 10^{\circ}\text{C}$ 对工频下变压器油的物性参数和绝缘性能进行了研究,发现低含水量、洁净的油击穿电压与温度的关系曲线“U”型特征不明显。郭冲等^[12]研究了低温条件下含水量对矿物油击穿特性的影响。发现高含水量油在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 存在击穿电压极小值,水分形态随温度变化是导致矿物油击穿电压发生变化的主要原因。

然而,这些针对低温下含水量对绝缘油击穿特性的影响研究尚存在不足之处。一方面,由于没有低温下绝缘油的饱和含水量数据,未能量化降温过程中绝缘油饱和含水量的变化,导致无法准确评估低温下绝缘油含水量对击穿特性的影响。另一方面,由于温度降低过程中油的饱和含水量降低^[13],油中水分析出并以悬浮水或冰晶的形态在变压器油中逐渐沉积,这种动态变化过程会对油的电气强度产生较大影响^[14],不利于低温下变压器油电气强度的准确测量。因此,有必要对低温下油的饱和含水量进行测量,探究水分的沉积对变压器油击穿特性的量化影响规律,从而为准确评估低温下水分对击穿特性的影响提供参考。

温度也是影响变压器油绝缘性能的重要参数,目前大部分击穿特性试验基于均温条件下进行测试,实际变压器在启动和运行过程中,由于铁心、绕组发热使得变压器油内存在温度分布不均的温度梯度场,梯度温度下油纸绝缘低温侧积聚异极性电荷,从而使低温侧电场发生畸变产生梯度温度效

应。由于梯度温度效应的影响,变压器油的绝缘性能发生改变^[15-16]。因此,探究梯度温度下变压器油的击穿特性对于低温绝缘故障有着重要意义,可为寒冷地区变压器的安全运行与维护提供必要的理论与试验依据。

本研究以45#变压器油为研究对象,搭建低温击穿测试平台,测量低温下变压器油的饱和含水量,在均温以及梯度温度情况下测量变压器油的电气强度,对比分析并总结出梯度温度下变压器油的击穿特性规律。

1 试验

1.1 主要原材料

45#变压器油,中国石油化工股份有限公司润滑油分公司;3A分子筛,AOS奥斯催化材料(大连)有限公司。

1.2 仪器设备

BYES-8A型微量水分测定仪,邦亿精密量仪(上海)有限公司;KCS-8120C型程式高低温循环试验箱,武汉环试检测设备有限公司;PFJY-310L型绝缘油介电强度测试仪,扬州攀峰电气有限公司;KSL-1200X-J型小型箱式炉,合肥科晶材料技术有限公司;SUPER型手套箱,上海米开罗那机电技术有限公司。

1.3 试验平台的搭建

低温击穿试验平台由高低温循环试验箱、绝缘油介电强度测试仪、油杯、电极、热电偶以及数据采集器等组成,如图1所示。

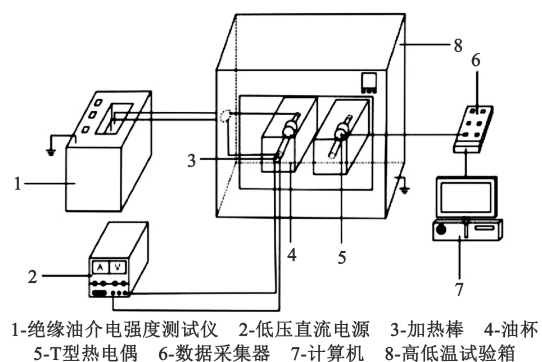


图1 低温击穿试验平台

Fig.1 Low temperature breakdown test platform

1.4 试验方法与步骤

1.4.1 变压器油的饱和含水量

45#变压器油中微水含量 x 用通过微水质量(w)/变压器油总质量(s)进行计算,如式(1)所示。

$$x = \frac{w}{s} \quad (1)$$

依据 GB/T 6283—2008《化工产品中水分含量的测定 卡尔·费休法(通用方法)》,采用微量水分测定仪对变压器油的微水含量进行测定。由于在极寒温度下变压器油中含水量非常低,为此采用将超低含水量绝缘油放置于低温饱和湿度下吸湿的方法来获得含水饱和的变压器油。具体试验步骤如下:

(1)除水处理。利用 3A 分子筛除去变压器油中的水分,使用前需对其进行活化处理,即先将分子筛放入箱式炉在 400℃ 下加热 4 h,然后降温至 200℃ 后将分子筛移至充满氮气的手套箱内冷却至室温。活化后的分子筛放入 500 mL 含水量为 23.5 mg/kg 的初始 45# 变压器油试样中,静置 48 h 后获得低含水量的变压器油试样,测得除水后的变压器油含水率为 3.7 mg/kg,并将其密封保存。

(2)低温下饱和吸湿。调节高低温循环试验箱的温度分别为 0、-10、-20、-30、-40℃,且在每个试验温度点运行超过 3 h,使得低温腔内温度达到均匀和稳定。运行 3 h 后,准备 1 支 50 mL 的试管,倒入已除过水的低含水量的试样,快速放入高低温循环试验箱中并敞口放置,在每个试验温度点放置 12 h 以上(试验中发现放置超过 12 h,测试的饱和含水量基本不变化)。

(3)微水测量。用针管抽取 2 mL 试样,用隔热棉和纸巾包裹好针管,以防止外界温度和水分对微水测量的影响。快速将试样注入微量水分测定仪中,测量过程的时间应尽量控制到最短,读取数值记录第 1 次数据,重复操作反复测量 3 次,若示数稳定,求取平均值后完成一个测试点的测量。

1.4.2 均温变压器油的电气强度

依据 GB/T 507—2002《绝缘油击穿电压测量法》,采用球-球电极对变压器油进行击穿试验。将油杯置于高低温循环试验箱中,油隙距离为 1 mm,待油样达到测试温度后,采用球电极进行击穿试验,加压方式采用逐步加压法,升压速率为 5 kV/s。具体操作步骤如下:

(1)在油杯中装入 500 mL 常温下饱和含水量为 32 mg/kg 的变压器油,放入高低温循环试验箱,设置好试验温度。

(2)采用绝缘油介电强度测试仪测试油样的电气强度,重复测量 5 次,求取平均值。

(3)将油样在同一温度下静置两天后,测试油样的电气强度,重复测量 5 次后若示数稳定,则求取平均值完成一个测试点的测量。

(4)高低温循环试验箱温度分别设置 10 个温度测试点:30、20、10、0、-5、-10、-20、-30、-40、-45℃。

1.4.3 梯度温度变压器油的电气强度

依据 GB/T 507—2002《绝缘油电气强度测量法》,采用球-球电极对油样进行击穿试验,油隙距离为 1 mm,加压方式采用逐步加压法,升压速率为 5 kV/s,加热方式采用单侧电极加热。通过均温变压器油击穿试验结果可知,电气强度极小值出现在 -10℃,为便于比较均温以及梯度温度变压器油电气强度的极小值,选取 -20℃ 作为加热起始温度。为了测量油样的实时温度且不影响电气强度的测试,在高低温循环试验箱中放入了一个相同的油杯,在油杯中放入热电偶,具体结构如图 2 所示。具体操作步骤如下:

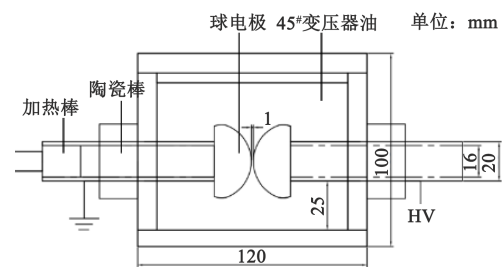


图2 加热电极的油杯结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the oil cup structure with heating electrode

(1)在油杯中装入 500 mL 常温下饱和含水量为 32 mg/kg 的变压器油,放入高低温循环试验箱,快速降温至 -20℃,并静置两天。

(2)如图 2,在油杯的球电极单侧铜套管内插入陶瓷棒并与加热棒连接,加热棒通过导线连接直流低压电源。

(3)在测温的油杯中装入 T 型热电偶,分别固定在两个球电极的表面以及中间区域,并将热电偶引出低温箱与温度数据采集器相连,再将数据采集器与计算机连接。

(4)在 -20℃ 的温度下,对单侧球电极进行加热,加热棒电功率为 36 W。

(5)采用绝缘油介电强度测试仪对加热时长为 0、10、15、20、30、45 min 的油样进行电气强度测试。每一个测试点均重复测量 5 次,若示数稳定,则求取平均值完成一个测试点的测量。

2 结果与分析

2.1 变压器油的饱和含水量

图 3 为变压器油饱和含水量随温度变化的曲线。从图 3 可以看出,变压器油的饱和含水量随着温度的降低呈凹曲线降低。

可以根据 Arrhenius 方程拟合变压器油中水分

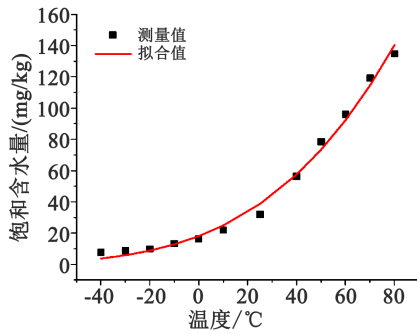


图3 变压器油饱和含水量随温度变化的曲线

Fig.3 Change curve of saturated water content of transformer oil with temperature

饱和溶解度与温度的关系,如式(2)所示^[17-18]。

$$W_s = 10^{A - \frac{B}{T}} \quad (2)$$

式(2)中: W_s 为变压器油中水分的饱和溶解度, mg/kg; T 为绝对温度, K; A 和 B 为关联系数, 与变压器油的组成成分、化学性质等有关。

通过拟合计算得到 $A=5.1728, B=1068.2$ 。图3中的拟合曲线和实测数据吻合度很高, 相关系数 R^2 (COD) 为 0.99259, 表明在低温下, 油中水分的饱和溶解度与油温之间的关系满足 Arrhenius 方程。

从图3还可以看出, 低温下变压器油的饱和含水量很低, 0°C 时的饱和含水量为 16.5 mg/kg, 当温度为 -20°C 时, 变压器油的饱和含水量为 8.8 mg/kg, 直至 -40°C 时饱和含水量仅为 7.6 mg/kg, 在低温范围 (-40~0°C) 内变压器油的饱和含水量变化极小。

2.2 静置前后均温变压器油的电气强度

图4为变压器油静置前后电气强度随温度变化的曲线, 图中阴影区域反映了变压器油静置前后电气强度的变化范围。从图4可以看出, 静置前后变压器油的电气强度均随温度的升高先减小后增大, 大致呈“U”型变化趋势, 在 -10°C 出现极小值。相较于静置前, 静置后变压器油的电气强度有一定幅度的提升, 当温度为 -10°C 时提升最为明显, 变压器油的电气强度从 19.8 kV/mm 提升至 30.0 kV/mm, 提升了 51.5%。

根据文献[19], 可以对上述现象进行解释: 温度高时变压器油中水分以溶解水的形式存在, 随着温度的降低, 油中的水分逐渐析出成悬浮态的极性水球。受非均匀电场影响, 极性水球会发生变形且相互串联, 在电极间形成“小桥”, 因此电气强度逐渐下降, 直至温度下降至 -10°C 附近达到极小值; 当温度继续降低时, 析出的水分凝结成微小冰晶, 而冰晶结构由于不易导电且介电常数较小, 同时变压器油的黏度逐渐增大, 故电气强度逐渐升高。因此便形成电气强度随温度降低呈“U”型分布的曲线。

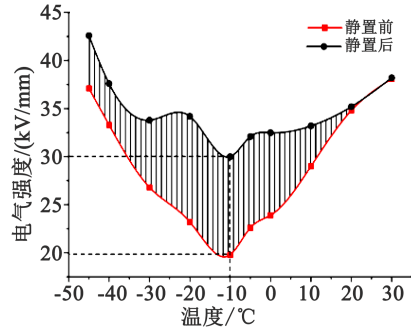


图4 变压器油静置前后电气强度随温度变化规律

Fig.4 Variation of electric strength of the transformer oil before and after standing with temperature

当静置温度为 -10°C 左右时, 变压器油中的悬浮水或冰晶会逐渐沉降到油的底部, 此时电极间不易形成“小桥”, 因此静置后变压器油的电气强度明显提升。对于常温下静置的变压器油, 由于含水量变化小, 导致电气强度改变不明显; 而当静置温度为 -45°C 左右时, 变压器油的黏度较大, 静置对悬浮冰晶的沉降效果不明显, 因此电气强度的改变也较小。

综上所述, 通过低温下长时间静置的方式可以有效减少油中的悬浮水或冰晶, 显著提升变压器油的电气强度。

2.3 梯度温度变压器油的电气强度

图5为单侧电极加热后油杯内部各位置的温度变化曲线。从图5可以看出, 电极间变压器油的温度随着加热时间增加逐渐升高, 加热电极表面、极板中央以及未加热电极表面之间的温度差先逐渐增大后趋于稳定, 形成逐渐稳定的梯度温度场。

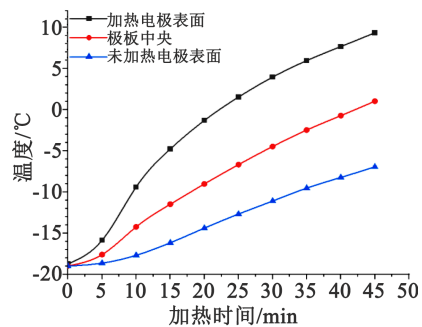


图5 油杯内部变压器油不同位置温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curves of transformer oil at different positions inside the oil cup

图6为电极加热后梯度温度变压器油与均温变压器油的电气强度对比曲线, 其中均温变压器油选取整体温度作为自变量, 梯度温度变压器油选择加热电极表面温度作为自变量。从图6可知, 均温变压器油和梯度温度变压器油的电气强度均随温度

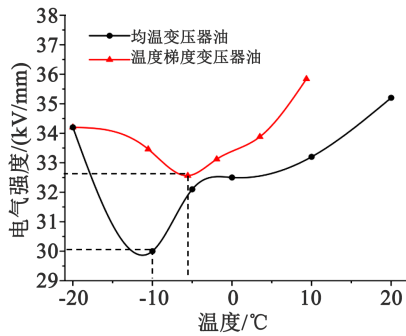


图6 均温以及梯度温度变压器油的电气强度对比曲线

Fig.6 Comparison curves of transformer oil electric strength with uniform temperature and gradient temperature

的降低先减小后增大,呈“U”型分布曲线。若仅比较电气强度极小值,相较于均温变压器油,梯度温度变压器油的电气强度稍有提升,从30.0 kV提升到32.6 kV,提升幅度仅8.6%,出现电气强度极小值时电极温度从 -10°C 升高到 -5.5°C 。

根据文献[20]可知,在梯度温度下电荷会从电极处向介质中间转移,场强畸变的峰值点也会向介质中间移动,即向低温侧偏移。同时文献[21-22]通过数值模拟的方式验证了梯度温度的存在会使电极间高场强区向低温处移动。故推测梯度温度变压器油的电气强度极小值和出现极小值的电极温度均稍有提高的原因是:当单侧加热电极的温度达到 -10°C 时,另一侧电极的温度还低于 -10°C ,导致电极间存在温度分布不均的梯度温度场,从而使电荷从电极处向介质中间转移,电极间的高场强区域从加热电极向低温侧移动。而从图6可知,相较于 -10°C ,低温侧具有较高的电气强度,因而梯度温度变压器油的电气强度极小值相较于均温变压器油偏高,而由于低温侧温度滞后于加热电极温度,故出现电气强度极小值的电极温度高于 -10°C 。

3 结论

(1)变压器油的饱和含水量随着温度的降低呈凹曲线降低,在低温下变压器油的饱和含水量与温度之间的关系满足 Arrhenius 方程。

(2)针对初始含水量为常温饱和含水量的变压器油,低温下充分静置后的均温变压器油电气强度有一定幅度的提升,其中在电气强度极小值处即 -10°C 提升最为明显,较静置前提升了51.5%,表明水分的析出并结晶沉底可以显著提升变压器油的电气强度。

(3)低温下均温和梯度温度变压器油的电气强度均随温度的降低先减小后增大,整体呈“U”型分布曲线。相较于均温变压器油,梯度温度变压器油

的电气强度极小值略有增大,且达到电气强度极小值的温度也有所升高。

参考文献:

- [1] 邹志恒. 特高压输电线路运行与维护措施探析[J]. 建筑工程技术与设计,2018(19):2856.
- [2] 邓伟. 特高压输电工程及中国发展特高压输电工程的重要意义[J]. 电器工业,2013(5):46-47.
- [3] 李国强. 低温下特高压交流变压器绝缘裕度分析[J]. 黑龙江电力,2020,42(3):247-251.
- [4] FOFANA I, WASSERBERG V, BORSI H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers, Part 1: Investigation of mixed liquids[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(3):18-21.
- [5] MINERS K. Particles and moisture effect on dielectric strength of transformer oil using VDE electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1982,PER-2(3):751-756.
- [6] 杜伯学,姜金鹏. 换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述[J]. 高电压技术,2021,47(8):2932-2945.
- [7] 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.
- [8] 李国强,李琳. 纸板含水率对油纸绝缘击穿特性的影响[J]. 黑龙江电力,2019,41(2):135-139.
- [9] 甘德刚. 变压器油中微水含量在线监测系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [10] 刘兰荣,孙建涛,马斌,等. 温度和微水对变压器油及油纸绝缘介电性能的影响[J]. 电气应用,2021,40(3):8-13.
- [11] 高明. 低温下变压器油绝缘特性研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2011.
- [12] 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.
- [13] ARALKELLIAN V G, FOFANA I. Water in oil-filled, high-voltage equipment, Part I: States, solubility, and equilibrium in insulating materials[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2007,23(4):15-27.
- [14] 陈彬,刘阁. 变压器油中微水含量在线监测方法研究进展[J]. 高电压技术,2020,46(4):1405-1416.
- [15] 陈曦,王霞,王增彬,等. 温度梯度对直流电压极性反转过程中瞬态电场的影响[J]. 高电压技术,2010,36(5):1222-1227.
- [16] 吴锴,朱庆东,陈曦,等. 温度梯度效应对油纸绝缘材料空间电荷分布特性的影响[J]. 高电压技术,2011,37(4):29-33.
- [17] ARALKELLIAN V G, FOFANA I. Water in oil-filled, high-voltage equipment, Part I: States, solubility, and equilibrium in insulating materials[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2007,23(4):15-27.
- [18] 吴广宁,崔运光,王晓剑,等. 应用油中酸值评估不同老化程度绝缘纸中水分含量[J]. 高电压技术,2015,41(1):115-122.
- [19] 孙长海,李天伦,马埭,等. 低温下水分含量对天然酯绝缘油介电特性的影响[J]. 绝缘材料,2020,53(9):54-58.
- [20] 殷丕盛. 不同电场强度及温度梯度下油纸绝缘空间电荷的测量[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [21] 朱庆东,吴锴,朱文兵,等. 温度梯度下油纸绝缘空间电荷特性的数值仿真[J]. 高电压技术,2016,42(3):923-930.
- [22] 张施令,彭宗仁. 换流变压器出线装置非线性电场模拟及其绝缘结构优化[J]. 高电压技术,2018,44(6):2048-2059.