

温度和微水对变压器油及油纸绝缘介电性能的影响

刘兰荣^{1,2}, 孙建涛³, 马 斌^{1,2}, 张书琦³, 徐征宇³, 杜振斌^{1,2}

(1. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071050;

2. 河北省输变电装备电磁与结构性能重点实验室, 河北 保定 071050;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 开展了极寒环境下变压器油及油纸绝缘介电性能的研究和典型油-纸绝缘系统的电场分析。建立了极寒环境试验系统, 在 $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 研究不同微水含量下的变压器油及油纸绝缘结构的绝缘性能随温度的变化情况, 并对试验结果进行了分析。

关键词: 极寒; 变压器油; 变压器油纸绝缘; 介电常数; 介损因数; 击穿电压

Influence of temperature and micro water on dielectric properties of oil and oil-paper insulation of transformer

LIU Lanrong^{1,2}, SUN Jiantao³, MA Bin^{1,2}, ZHANG Shuqi³, XU Zhengyu³, DU Zhenbin^{1,2}

(1. Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071050, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Electromagnetic & Structural Performance of Power

Transmission and Transformation Equipment, Baoding 071050, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Absrtact: The dielectric properties research of transformer oil and oil-paper insulation and the electric field analysis of typical oil-paper insulation system in extremely cold environment were carried out in this paper. An extremely cold environment test system was established to study the variety of insulation performance of transformer oil and oil-paper insulation with temperature, at the temperature range of $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, under different micro water content. The test results were analyzed as well as.

Key words: extremely cold; transformer oil; transformer oil-paper insulation; dielectric constant; dielectric loss factor; breakdown voltage

0 引言

目前我国多个特高压交直流工程^[1]位于东北、内蒙及新疆等寒冷地区, 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^[2-3]。变压器的电气绝缘强度是变压器能否投入可靠运行的基本条件之一, 如何保证极寒条件下特高压变压器的安全运行成为首当其冲的问题。为此笔者选择变压器油及油纸作为研究对象, 研究变压器油及油纸绝缘结构的绝缘性能随温度的变化规律, 以进行变压器内部绝缘的评估。

1 试验平台及试验方法

常用绝缘性能测试设备测试温度均为常温, 为了研究极寒条件下的性能参数, 首要是建立温度环境条件。

选用温度范围(-60~100 ℃)的恒温恒湿温控箱(内部尺寸: 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm)进行改造。侧壁孔实现低压测量线进口; 顶部开孔, 安装聚四氟乙烯套管, 高压电缆通过套管进入温控箱内施加高电压, 并进行击穿电压特性测量, 接线方便且安全。温控箱试验如图 1 所示。



图 1 极寒环境下击穿电压测试试验接线图

Fig. 1 Wiring diagram of breakdown voltage test in extremely cold environment

试验选取-60 ℃作为极寒环境条件, 能够满足我国变压器应用环境要求; 最高测量温度取常温(年平均温度 20 ℃)的环境温度。根据国标 GB/T 1409—2006 和 GB 1408.1—2016 选择合适的电极和相关仪器进行试样介电常数、介损因数以及击穿特性不同温度和微水含量条件下的测量。

2 绝缘油及油纸绝缘试样

在变压器产品中, 主要的绝缘材料包括绝缘纸和变压器油两大类, 选择具有代表性的材料绝缘纸板和变压器油进行试验研究。绝缘油选用性能良好的 45# 变压器油以满足低温使用条件。绝缘纸板选取瑞士魏德曼公司厚度 1 mm 绝缘纸板加工成 $\phi 90$ mm 的圆形。

将产品变压器油进行处理, 气体和微水含量达到 500 kV 及以上等级变压器产品的要求。变压

器油密闭储存, 记录微水含量。较高微水含量的油样, 通过将该油暴露于大气中不同时间取得。最终取得 2.5×10^{-6} 、 15.0×10^{-6} 、 26.0×10^{-6} 和 35.0×10^{-6} 四种微水含量的变压器油油样。

按 500 kV 及以上等级产品要求对纸板进行烘干处理, 再浸入合格变压器油样中密闭保存, 使纸板被油浸透。后将纸板取出, 暴露于空气中, 形成微水含量为 0.77%、2.33% 和 4.17% 的油浸绝缘纸板, 模拟变压器实际应用的油纸绝缘条件。

3 变压器油试验结果及分析

对四种微水含量的变压器油进行 -60~25 ℃ 下的介电性能参数测量。

3.1 变压器油相对介电常数

相对介电常数, 即相对电容率。试验中, 以电容介损测试仪测试试样的电容值, 计算公式为

$$\varepsilon_r = C_x / C_a \quad (1)$$

式中, C_x 为被测液体的电容量; C_a 为以空气为介质的试验池的电容量; ε_r 为被测液体的相对电容率。

在试验温度范围内间隔 5 ℃ 选取一个测量点, 两次测试值的差不大于较大值的 5% 时判定测量有效, 两次有效测量的平均值作为最终测量结果。

四组微水含量不同温度下绝缘油的介电常数随温度变化规律曲线如图 2 所示。

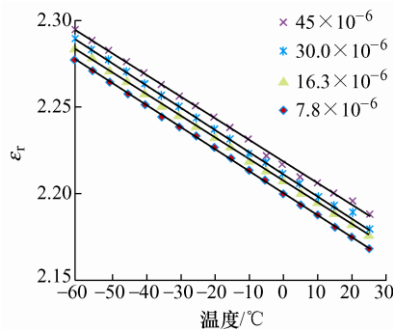


图 2 不同温度和微水含量时变压器油相对介电常数
Fig. 2 Relative permittivity of transformer oil at different temperature and micro water content

由图 2 可知, 在试验温度范围内, 变压器油的

相对介电常数随温度降低呈逐渐升高的趋势,但变化幅度不大。变压器油为非极性液体电介质,温度降低导致变压器油体积压缩,这就造成了单位体积内分子数量增大,介质极化的强度也增大,因此变压器油随温度降低介电常数增大^[4-5]。

变压器油的介电常数在测量温度范围内取同一温度点时,微水含量越大,油的相对介电常数越高。原因是水作为强极性物质,水分的增加会降低变压器油的介电性能。

3.2 变压器油介损因数

绝缘材料在交变电场作用下产生极化损耗和电导损耗。因此绝缘中通过的电流就不是超前电压 90° ,而是比 90° 小。当外施电压为交流电压时,绝缘材料中的视在功率 U_I 可以分为两个部分组成,即有功功率 P 和无功功率 Q ,其比值称为介质损耗因数,即

$$\tan \delta = P/Q \quad (2)$$

不同微水含量的变压器油介损因数随温度变化趋势如图 3 所示。

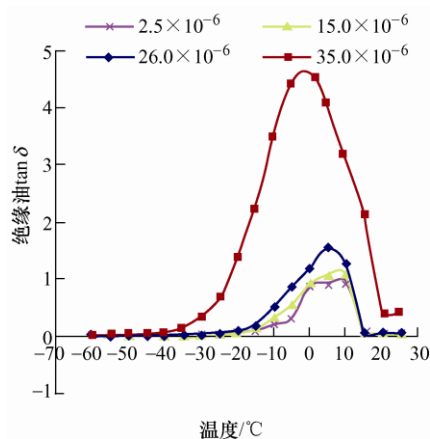


图 3 变压器油介损因数随不同温度变化

Fig. 3 Variation of dielectric loss factor of transformer oil with different temperature

从图 3 中可以看出,在测试温度范围内,变压器油的介损因数随温度降低,呈现出先增大后减小的规律。变压器油为弱极性电介质,随温度降低,体积减小,密度增大,单位体积分子数增加,造成介损因数增大;但不同微水含量导致变

压器油中的水析出,因此随着温度降低,介损因数是先增大后减小的规律,到 -35°C 以后介损因数数值基本一样。

3.3 变压器油击穿电压特性

绝缘油试验电极按照 GB/T 507—2002《绝缘油击穿电压测定法》进行,油击穿电极间隙 2.5 mm,在试验温度范围内每 10°C 选取一个测量点,分析相同温度不同微水含量对绝缘油击穿电压特性的影响。试验结果如图 4 所示。

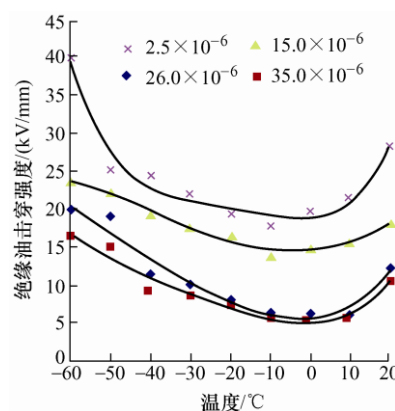


图 4 不同温度不同微水含量绝缘油击穿电压曲线

Fig. 4 Breakdown voltage curve of insulating oil with different temperature and micro water content

从图 4 中可以看出,绝缘油击穿电压在试验范围内随着温度的降低,呈现出先减小后增大的规律。这是因为在降温的过程中,开始水分在变压器油中处于溶解状态,随着温度的降低,水分逐渐析出,形成悬浮的极性水球。极性水球在不均匀电场作用下,会沿着电场方向伸长为极性椭圆球。大量的极性椭圆球相互串联又形成导电的水回路。最终导致绝缘程度降低,击穿电压降低, 0°C 时击穿电压最低,随着温度继续下降,变压器油饱和吸水浓度越来越低,油的黏度逐渐增大,复合体系中的微水含量增大并形成冰,冰的电导率比水小,击穿电压也就随之增加。

4 油纸复合绝缘试验结果及分析

4.1 油纸绝缘的相对介电常数

使用电容介损测试仪测量油纸复合绝缘试样

的电容值，油纸绝缘的相对介电常数计算式为

$$\varepsilon_r = C_x h / (0.08854A) \quad (3)$$

式中， C_x 为放入样片后的电容量，F； h 为样片厚度，m； A 为测试电极的表面积， $A=1/4\pi d^2$ ，测试电极直径 d 为5 cm，则电极表面积 A 为19.6 cm²；0.08854为真空介电常数，单位为pF/cm。

在试验温度范围内每10℃选取一个测量点，不同微水含量、不同温度下油纸复合绝缘的相对介电常数变化曲线如图5所示。

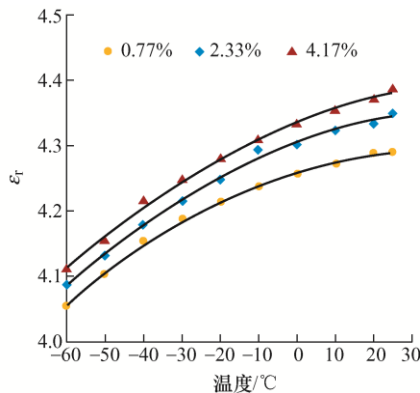


图5 油纸复合绝缘相对介电常数随温度、微水含量的变化曲线

Fig. 5 Curves of relative permittivity of oil paper composite insulation with temperature and micro water content

由图5可知，浸油纸板的相对介电常数在试验范围内随着温度的降低，呈现出逐渐减小的趋势。其变化规律可用极性材料的相对介电常数随温度的变化来解释，绝缘纸板随着温度的降低，极性分子运动降低，分子处于束缚状态，不利于转向极化，相对介电常数较小，而随着温度的升高，分子运动增加而加快了分子极化的速度，相对介电常数也随着增加。

浸油纸板的介电常数在测量温度范围内取同一温度点时，微水含量越大，浸油纸板的相对介电常数越高。

4.2 油纸绝缘介损因数

绝缘纸板介损因数随不同温度变化关系曲线如图6所示。

由图6可以看出，变压器油纸绝缘介损因率在试验范围内随着温度的降低，呈现出先增大后逐渐减小的规律。

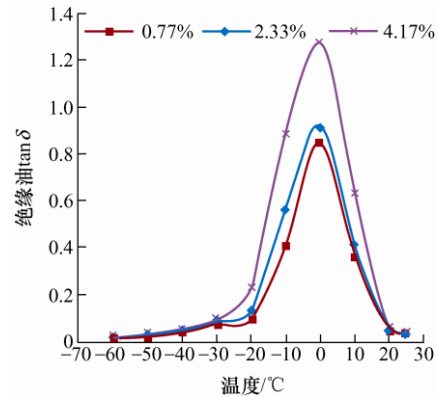


图6 绝缘纸板介损因数随不同温度变化关系曲线

Fig. 6 Curve of dielectric loss factor of pressboard with different temperature

4.3 油纸绝缘击穿电压特性

不同温度、不同微水含量油纸击穿电压曲线如图7所示。

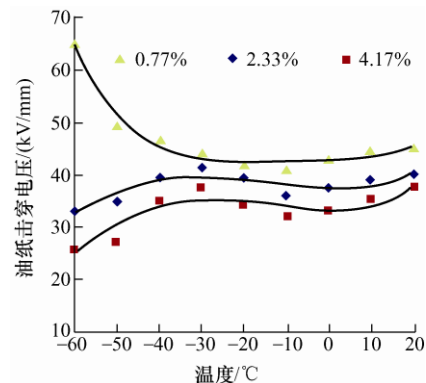


图7 不同温度、不同微水含量油纸击穿电压曲线

Fig. 7 Breakdown voltage curve of oil paper with different temperature and micro water content

从图7中可以看出，变压器油纸击穿电压在试验范围内随着温度的降低，微水含量低的油纸绝缘是呈现增大的规律，而微水含量高的油纸绝缘则呈现出先减小后增大最后又减小的规律。

这是因为在温度降低过程中，初始时变压器油和绝缘纸板中的水分析出是同步的，水分析出会导致绝缘性能降低。当温度下降一定程度后，水分开始结冰导致击穿电压又回升。后期油纸复合绝缘中油和纸的水分析出不再同步，绝缘纸中水分析出滞后于油，此时油凝固导致水分析出后滞留在油纸绝缘系统内，重新导致绝缘性能下降。

5 温度对变压器油-纸绝缘系统电场分布的影响

在变压器中,油被绝缘纸板分成多个油隙。现以典型的平行油-纸绝缘系统模型进行模拟分析^[6],如图8所示。电极电压 U ,电极间充有两种介质:变压器油(相对介电常数为 ε_1 ,厚度为 d_1)和绝缘纸(浸油纸板,相对介电常数为 ε_2 ,厚度为 d_2),建立一个简单的油纸绝缘系统。

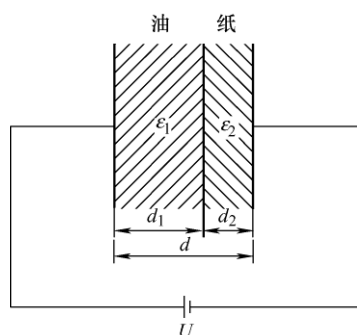


图8 平行油纸绝缘系统

Fig. 8 Parallel oil paper insulation system

利用平行板电容器原理,忽略电导因素,取 $k=d_1/d_2$,变压器油和油浸纸板的电场强度 E_1 和 E_2 符合以下公式

$$E_1 = \left(1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + k\varepsilon_2}\right) \frac{U}{d} \quad (4)$$

$$E_2 = \left(1 - \frac{k(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 + k\varepsilon_2}\right) \frac{U}{d} \quad (5)$$

变压器厂家通常采用“小油隙-薄纸筒”的油-纸绝缘系统^[7]。油隙长度数值比纸筒厚度数值要大,一般 k 取2~5,甚至更大。

ε_1 按微水含量 7.8×10^{-6} 取值, ε_2 按微水含量0.77%取值(变压器油、纸板的微水含量符合500 kV以上变压器等级要求)进行温度对电场强度影响的分析。由于 k 是可调的,同样取不同 k 值,研究其对电场强度的影响。

$$\text{令 } k_1 = 1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + k\varepsilon_2}, \quad k_2 = 1 - \frac{k(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 + k\varepsilon_2}。$$

绘制不同 k 值随温度的变化曲线,如图9、图10所示,可知:

1) 在油纸绝缘系统中,油中电场强度 $E_1 >$ 单介质时的强度 $(U/d) >$ 纸中电场强度 E_2 。

2) 当 k 一定时,温度逐渐降低,油中电场强度有所降低,纸中电场强度升高。当 k 值较大时,油中电场强度随温度变化($-60 \sim 25^\circ\text{C}$)而变化的幅度较小,例如当 $k=2$ 时,油中电场强度的变化幅度为2.3%; $k=5$ 时,变化幅度为1%。大型电力变压器电场绝缘设计裕度一般都在1.05以上,因此在忽略电导因素影响情况下,变压器电场设计时可不必考虑温度的影响。

3) 当温度一定时, k 取值越大,油中和纸中的电场强度越小。

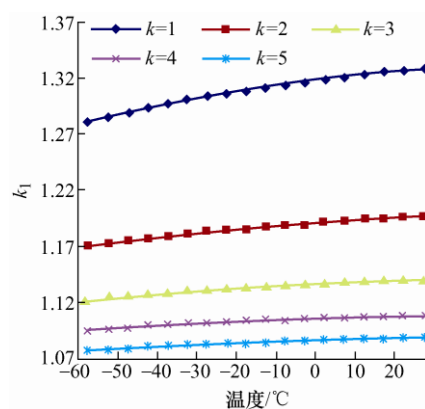


图9 油中电场强度

Fig. 9 Electric field strength in oil

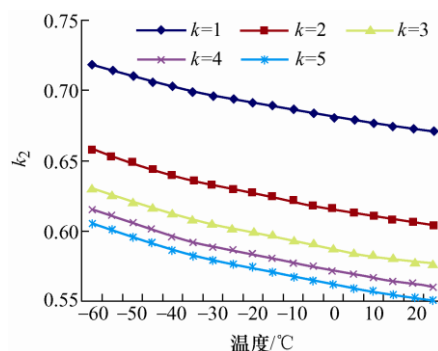


图10 纸中电场强度

Fig. 10 Electric field strength in paper

6 结束语

在试验温度范围内,不同微水含量的变压器油及油纸绝缘电场性能具有以下特性:

1) 变压器油的相对介电常数随温度降低而上升,但变化幅度不大。油纸复合绝缘(浸油纸板)的介电常数随温度降低而逐渐减小。

2) 温度一定时, 微水含量越大, 变压器油和浸油纸板的相对介电常数越高。

3) 微水含量一定时, 变压器油和油纸绝缘的介损因数最大值均出现在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 随温度变化向两侧均为降低的趋势。

4) 温度一定时, 微水含量增加, 变压器油击穿电压降低。

5) 微水含量一定时, 绝缘油击穿电压最低点在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 随温度变化向两侧均为增高的趋势, 击穿电压最高点在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。油纸绝缘在微水含量较低时, 与变压器油的击穿电压规律相同。

6) 对于典型的平行油-纸绝缘系统模型, 油中电场强度 E_1 > 单介质时的强度 (U/d) > 纸中电场强度 E_2 。当 k 一定时, 温度降低, 油中电场强度降低, 纸中电场强度升高。当 k 值较大时, 油中电场强度随温度变化 ($-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 幅度非常小。在忽略电导因素影响情况下, 大型电力变压器电场设计时可不考虑温度对油中电场强度的影响。

由结论 3) 和 5) 可知, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近温度是变压器油击穿特性最薄弱的温度, 应避免变压器油工作在此温度, 或在变压器绝缘设计时考虑此温度特性。

由结论 4) 可知, 微水含量增加会降低变压器油击穿电压, 因此需要极寒低温运行的变压器应监控微水含量在合格范围之内。否则, 微水含量的增加将可能引起变压器内部的局部放电发生或击穿。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
- [2] 刘永鑫, 罗臻. 低温对油纸绝缘介电特征及换流变压器内电场分布的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 461-466.
- [3] 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.
- [4] 张过有, 吕程, 康积涛. 酸值对天然酯绝缘油介电性能的影响[J]. 可再生能源, 2016, 34(6): 932-934.
- [5] 郭文敏, 侯宪昆, 刘丹. 降温过程中微水对变压器油介电性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2018(1): 72-76.
- [6] 刘海丽. 含水率对复合电场下油纸绝缘介电性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [7] 沈万里. 220 kV 变压器绝缘分析与改进[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.

作者简介:



刘兰荣

刘兰荣(1978—), 女, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向为变压器基础技术和关键共性技术。

(收稿日期: 2020-12-05) **EA**

新闻记者证公示信息

根据国家新闻出版署颁布的《新闻记者证管理办法》《国家新闻出版署关于开展 2020 年度新闻记者证核验工作的通知》(国新出发函[2021]1号)文件要求, 我单位对《电气应用》新闻记者证持证人员进行了严格审核, 现将拟通过新闻记者证年度核验人员名单进行公示, 并接受社会监督, 公示期 20 天。

姓名 史海疆 记者证号 K11524966000003

监督举报电话: 010-88379714

国家新闻出版署监督举报电话: 010-83138953

《电气应用》