

负压对绝缘油中水分饱和和溶解度的影响

邓小聘¹, 刘西超¹, 肖小曼², 万德峰¹, 王晓周¹, 王焱¹, 刘彬¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;

2. 国网湖北综合能源服务有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:在昼夜温差大的地区,油浸倒立式电流互感器膨胀器内部容易形成负压,影响水分在油纸中的分布,进而影响油纸的绝缘性能。本研究采用间接法测定不同压力和温度下绝缘油中水分的饱和和溶解度,基于测试结果采用递归最小二乘法拟合得出 Arrhenius 方程中油中水分饱和和溶解度和温度及压力的关系,研究其影响规律。结果表明:负压导致油中水分饱和和溶解度不断降低,且随着温度的升高,这种趋势愈加明显。负压导致油中水分析出形成油中悬浮水或向纸中转移。引入关于压力的平移因子 n ,建立了压力、温度、油中水分饱和和溶解度的数学表达式。将油中酸值、温度和压力作为综合评估油中水分饱和和溶解度的因素,建立了多因子的影响规律,其中油中酸值和压力的影响在一定程度上可互相抵消。应用以上研究成果可更准确地评估油浸倒立式电流互感器油纸绝缘的水分分布和绝缘状态。

关键词:油浸倒立式电流互感器;油中水分饱和和溶解度;负压;水分;酸值

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)07-0110-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.07.016

Study on Influence of Negative Pressure on Water Saturation Solubility in Insulating Oil

DENG Xiaopin¹, LIU Xichao¹, XIAO Xiaoman², WAN Defeng¹, WANG Xiaozhou¹, WANG Yan¹, LIU Bin¹

(1. State Grid China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. State Grid Hubei Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: In areas with large temperature difference between day and night, negative pressure is easy to form in the expander of oil-immersed inverted current transformers, which will affect the distribution of water in the oil-paper insulation, and then affect the insulating properties of the oil-paper insulation system. In this paper, the saturation solubility of water in insulating oil under different pressure and temperature was measured by indirect method. On the basis of the test results, the relationship between the saturation solubility of water in insulating oil and temperature and voltage in Arrhenius equation was fitted by recursive least square method, and the effect law was studied. The results show that with the increase of negative pressure, the water saturation solubility in insulating oil decreases constantly, and this trend becomes more obvious with the increase of temperature. Under the effect of negative pressure, water in the oil separates out and turns into suspended water in insulating oil or transfers to insulating paper. The translation factor n related to pressure was introduced in this paper, and a mathematical expression involving pressure, temperature, and water saturation solubility in oil was established. The acid value, temperature, and pressure were taken as the comprehensive factors to evaluate the water saturation solubility in insulating oil, and the multi factor influence law was established, in which the influence of acid value and pressure can cancel with each other to some extent. The water distribution and insulation state of the oil-paper insulation system for oil-immersed inverted current transformers can be evaluate more accurately by the above

收稿日期:2020-09-09 修回日期:2020-12-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0215603)

作者简介:邓小聘(1986-),女(汉族),湖北随州人,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。

research results.

Key words: oil-immersed inverted current transformer; water saturation solubility in insulating oil; negative pressure; water; acid value

0 引言

电流互感器是电力系统中重要的一次设备,可以监测一次电流,为二次设备提供测量、控制和保护信号,是电力计量和保护的核心设备。油浸式电流互感器分为正立式和倒立式两种,相比正立式互感器,油浸倒立式电流互感器头部储油柜大多焊接密封,防渗漏油效果明显;用油少、耗铜材少、质量轻,比正立式更节省成本;一次导电杆较短,对动、热稳定电流的耐受能力更强,对一次绕组过电压保护没有要求;一次绕组的主电容屏尾端嵌入式底座密封在油内,不易受潮和引起断线,无类似正立式底部受潮发生故障的问题。

基于上述优点,油浸倒立式电流互感器近年来在电力系统得到了广泛应用。但是其二次绕组和铁心在互感器的头部,互感器重心较高;由于体积较小,内部绝缘的变压器油很少(约为同电压等级正立式的60%),不能长期采油样化验;由于结构紧凑,制造工艺和使用材料较常规正立式互感器要求更为严格。

随着油浸倒立式电流互感器应用的不断扩大,许多生产厂家的产品均出现了爆炸或者膨胀器冲顶等类型的故障,爆炸的主要原因为主绝缘击穿导致对地短路爆炸,膨胀器冲顶的主要原因为膨胀器内部气体过多导致膨胀器异常升高。目前,关于油浸倒立式电流互感器的爆炸和膨胀器冲顶等故障原因,国内的研究仅停留在故障统计、故障运行条件调研和故障案例分析上,相关研究大多分析了油浸倒立式电流互感器在现场产生故障的原因,提出在设计制造、运输、交接验收和运行维护等多方面采取有效措施,减少事故发生,并未对油浸倒立式电流互感器的绝缘失效机理展开深入研究。文献[1]分析了油浸倒立式电流互感器的故障实例,并从运行维护和生产制造两个方面提出一些建议。文献[2]针对一起500 kV油浸倒立式电流互感器损坏的故障,详尽阐述了故障的诊断与分析过程,确定了故障发生原因并提出相应预防措施。文献[3]通过模拟西部地区的水分和温度等环境条件,对油浸倒立式电流互感器的油纸绝缘材料进行了介电谱、电导率以及 $\tan\delta$ 测量,得到其绝缘特性数据,并对油

浸倒立式电流互感器头部主绝缘进行了有限元仿真,仿真结果表明,随着温度、含水量的增加,各层绝缘之间的电压降有所增大,为油浸倒立式电流互感器的设计改进提供依据。

在某次油浸倒立式电流互感器产品发生爆炸后对同厂同批次产品情况进行排查时,发现该批次产品出现了不同程度的冲顶现象,膨胀器中明显含有气体,而对冲顶产品进行油中气体含量分析时,发现氢气和甲烷含量远超出了初始值,因此将两类故障联系起来分析,发现可能是由于产品油中析出气体过量导致膨胀器压力过大,影响产品绝缘油的浸渍液面或者油中电场分布,最终发生主绝缘击穿导致对地短路发生爆炸。而油中气体含量超标可能有以下几个原因:①生产厂家干燥工艺有问题或者安装环境控制不够,导致绝缘纸含水量超标,运行过程中水分析出在电场下分解产生气体;②生产厂家干燥工艺控制没有问题,但是设计膨胀器时没有考虑到大温差运行环境,在低温环境下,器身内部由于用油少极易形成负压,负压导致油纸绝缘系统水分重新分布,油纸绝缘状态发生变化,绝缘更易劣化并分解生成气体;③产品负压运行吸潮导致绝缘性能降低。一般要求互感器微正压运行,但是目前油浸倒立式互感器都存在负压运行的工作状态,差别只是负压温区不同,有的在 10°C 以下出现负压,有的在 25°C 以下出现负压。在低温潮湿的季节,产品负压运行容易受潮,长期运行极易引起绝缘故障。

由上述分析可知,负压是引起油浸倒立式电流互感器故障的主要原因之一,国内外对油纸绝缘失效机理的研究主要集中在水分、温度、局部放电等因素对油纸绝缘失效机理的影响^[4-7],而负压对油纸绝缘失效的影响机理不明,有待进一步研究。

绝缘油中水分饱和和溶解度在一定程度上可以评估油浸式电流互感器的绝缘性能^[8],本研究通过试验获取负压和温度组合条件下的油中水分饱和和溶解度,研究负压和温度引起的绝缘油中水分饱和和溶解度变化规律,分析负压和温度组合条件对绝缘油绝缘性能的影响,对负压和温度组合条件下油浸倒立式电流互感器油纸绝缘失效的机理进行前期

探索。

1 水分对绝缘油的影响

1.1 水分来源

互感器用绝缘油是石油经过分馏的产物,其主要成分是烷烃、环烷烃及少量芳香烃化合物。互感器油中含有水分是不可避免的,水分主要来自以下3个方面:①生产过程中水分的残留。互感器在制造过程中,油纸绝缘经过一系列脱水工艺后仍有微量水分残留。一般而言,绝缘纸中含水量为0.2%~0.5%,绝缘油中含水量为10~20 mg/L。②运行过程中水分的渗入。在密封问题或者在补油过程中可能进入水分。③绝缘老化导致水分的生成。随着温度的上升,绝缘老化加速,作为老化产物之一的水分逐渐增多。纤维素分子链降解后,产物水分会进一步加速其自身降解,这一反复循环的过程使其降解速度更快,直到生命末期。此外,绝缘油氧化裂解的产物也包含水分。

1.2 绝缘油的水溶性

水分在绝缘油中主要有以下3种存在形式^[7]:①溶解水:在绝缘油中均匀分布,由于含量很少,对油的绝缘性能影响较小。②悬浮水:一方面,针对变压器这种强迫油循环的设备,油中溶解的水分无法与油形成胶质水,这种水分的流动会产生油流带电,对绝缘性能影响较大;另一方面,根据工程液体电介质的小桥击穿理论,油中悬浮水会降低绝缘油的电气强度。③沉积水:沉入绝缘油底部的水分离高电场区较远,不会明显降低其绝缘性能。

由上述分析可知,绝缘油中水分饱和和溶解度对其绝缘性能具有重要意义。

2 理论基础

2.1 油中水分饱和和溶解度测试原理

R B KAUFMAN等^[9]和DU Y等^[10]研究表明,在同一温度下,水分在绝缘油和空气之间达到平衡状态时,其相对湿度是相等的。绝缘油中的相对湿度定义如式(1)所示。

$$\%RH = \frac{W_o}{W_s} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:%RH为绝缘油的相对湿度,在平衡状态下等于环境中的相对湿度; W_o 为油中水分含量,mg/L; W_s 为油中水分饱和和溶解度,mg/L。

对式(1)进行变换可得式(2)。

$$W_o = W_s \times \%RH \quad (2)$$

由式(2)可知,绘制油中水分含量与相对湿度的关系曲线,该曲线的斜率即为油中水分饱和和溶解度^[11]。

2.2 湿度发生源制备原理

为获得不同压力条件下的油中水分饱和和溶解度,试验需要在密闭空间内进行,本研究采用不锈钢密封罐形成密闭空间。为达到试验所需的不同湿度要求,需控制密封罐内的环境湿度,制备特定的密封罐内的湿度发生源。

湿度发生源由水和丙三醇的混合溶液制成,混合溶液参照ANSI/ASTM D 5032-2011给出的水和丙三醇的配比配制,以初步控制环境中的湿度范围。湿度由密封罐内置的温湿度探头实时监测,并由LCD数显温湿度计观测和记录。试验中所需的负压条件需要不断抽真空,会带走密封罐内的水分,降低环境湿度,因此可以根据温湿度仪记录的湿度数据对ANSI/ASTM D 5032-2011给出的水和丙三醇的混合比例进行校准,达到目标湿度。

当目标湿度较高时,可将绝缘油从密封罐内取出,采用外部加湿的方式,加速油中水分达到目标湿度的速率,再放入密封罐的环境中进行水分平衡。

3 试验

3.1 试验材料及预处理

采用新疆克拉玛依油田产45#环烷基矿物绝缘油作为绝缘油试样。

预处理:在温度为313.15 K、真空度为50 Pa的真空干燥箱中对绝缘油进行真空脱气和干燥,直到油中水分含量小于10 mg/L,密封保存。

3.2 试验流程

①将盛有油样的250 mL烧杯置于2 L的密封罐内。试验中需要同时控制密封罐内的温度、湿度和压力。②湿度调节:通过水和丙三醇的混合溶液控制密封罐内的湿度,混合比例参考ANSI/ASTM D 5032-2011,并根据温湿度仪进行调整。③温度调节:将密封罐置于恒温箱中,调节恒温箱控制密封罐内的温度。④压力调节:通过外置的真空泵控制密封罐内的压力,根据需要适时抽真空保证试验所需压力条件。⑤通过水和丙三醇的混合溶液调节密封罐内的湿度为40%,调节密封罐内温度和压力分别为一定值(温度值和压力值由⑥给出),待温度、压力和湿度均稳定后,记录此时的各项参数,采

用库仑法按照 GB/T 7600—2014 测量绝缘油中的水分含量。测试完毕后,依次将密封罐中的湿度调节为 60%、80%,重复 40% 湿度时的试验过程。通过所得绝缘油中的水分含量和对应的湿度值绘制曲线,曲线斜率即为油中水分饱和和溶解度。⑥调节密封罐内温度从 273.15 K 升高至 333.15 K,每次升高 10 K。调节密封罐内真空度依次为 0、-0.01、-0.02、-0.05、-0.10 MPa。在每一个温度和压力点,重复⑤中试验过程。

试验装置如图 1 所示。由于试验过程中,温度、压力和湿度是一个动态平衡的过程,为保证试验数据准确可靠,将湿度在 12 h 内变化不超过 ±3% 作为判定水分在环境和绝缘油之间达到平衡的判据。当目标湿度(80%)较高或由于压力、温度等原因导致环境和绝缘油之间水分难以达到平衡时,可采取外部加湿的方式,对绝缘油先进行外部加湿,再放入密封罐中进行水分平衡。对油中水分含量进行 3 次测量后取平均值以减小测量误差。

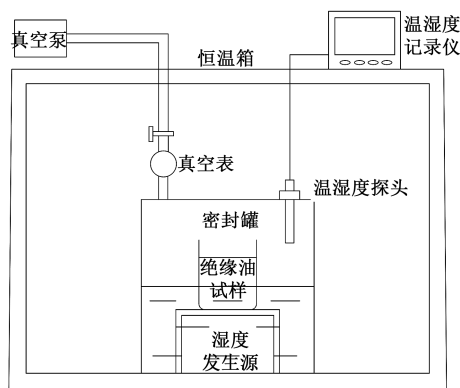


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental device

4 结果与分析

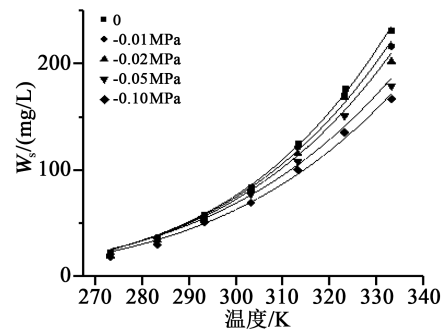
4.1 绝缘油中水分饱和和溶解度的影响因素

Arrhenius 方程中油中水分饱和和溶解度与温度的关系如式(3)所示。

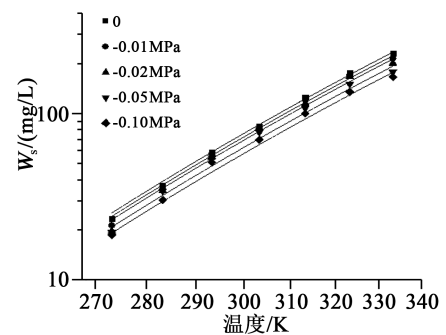
$$W_s = 10^{A - \frac{B}{T}} \quad (3)$$

式(3)中: T 为绝对温度; A 、 B 为与油的性质相关的系数。由式(3)可知,水分在油中的饱和和溶解度随温度的升高而急剧增加,但式(3)仅考虑温度对绝缘油中水分饱和和溶解度的影响,并未考虑其他因素的影响。

对油样按照 3.2 的试验流程进行测试,对测得的数据按式(3)进行拟合,拟合曲线如图 2(a)所示,



(a) 直线坐标



(b) 对数坐标

图 2 不同压力下油中水分饱和和溶解度与温度的关系

Fig.2 Relationship between temperature and water saturation in insulating oil at different pressure

得到不同压力下油样的 A 、 B 和 R^2 如表 1 所示。

表 1 不同绝缘油试样相应的 A 、 B 和 R^2 的值

Tab.1 Values of A , B , and R^2 of different insulating oil samples

编号	真空度/MPa	A	B	R^2
1	0	6.77	1 466	0.9 983 3
2	-0.01	6.60	1 417	0.9 952 5
3	-0.02	6.48	1 860	0.9 886 8
4	-0.05	6.16	1 296	0.9 876 4
5	-0.10	6.17	1 309	0.9 926 6

为了得到负压对油中水分饱和和溶解度的影响的普遍规律,对式(3)左右两侧取对数,可以得到如图 2(b)所示的曲线,如式(4)所示。

$$\lg W_s = A - \frac{B}{T} \quad (4)$$

通过图 2(b)可发现,其余 4 条曲线可通过平移常压(即真空度为 0)下的绝缘油中水分饱和和溶解度与温度的关系曲线得到,因此,可在式(4)中引入与压力有关的平移因子 n ,如式(5)所示。

$$\lg W_s = A - \frac{B}{T} + nP \quad (5)$$

式(5)中: P 为真空度,单位为MPa。采用递归最小二乘法拟合得到各参数值如表2所示。

表2 绝缘油试样拟合得到的各参数值

Tab.2 Values of A , B , R^2 , and n for insulating oil samples			
A	B	R^2	n
6.772 7	1 466.07	0.989 4	1.771 1

油中水分饱和和溶解度与压力和温度曲线图如图2所示。图2(a)为直线坐标关系,在负压下,饱和和溶解度随负压增大而降低,且这种降低趋势随温度的升高更为明显。当油中水分饱和和溶解度降低时,油中的溶解水析出,因本研究并未测量纸中水分,温度和负压对纸中水分的影响不得而知,故油中溶解水析出后有两种可能走向,即形成油中悬浮水或向绝缘纸中析出。

对于油中悬浮水,根据工程液体电介质的小桥击穿理论:水在电场力作用下,沿电场方向定向排列,形成杂质小桥。由于水的介电常数比油大,水分易极化而在电场方向定向排列,使电导增大,泄漏电流增加,小桥发热,油水局部沸腾汽化,形成气体小桥,气体中的电场强度比油中高得多(因为与相对介电常数成反比),气体小桥击穿,则液体电介质击穿,油中悬浮水的增加会降低绝缘油的电气强度。

水分向绝缘纸中析出会加速绝缘纸的热老化和水解老化。绝缘纸纤维老化的速率与其中的水分含量成正比,负压下绝缘油中容纳的水分降低,相比常压而言,在动态平衡过程中水分从绝缘油中转移至绝缘纸中,负压对纤维素起到“润湿”的作用,从而加速纤维素的热老化。水分子因体积较小会首先渗透进入纤维素无定形区,纤维素结晶区会随着绝缘老化逐渐转变为无定形区,老化产物中包含水分,虽然这种水分含量较少,但是一旦发生,通常是呈指数递增的。因此负压加速了纤维素的热老化和水解老化。

根据上述分析,负压对油浸倒立式电流互感器的影响主要表现:一方面,若产品密封存在漏洞,负压运行极易吸入潮气,使油纸绝缘系统水分增加,导致绝缘强度降低;另一方面,若产品密封不存在问题,负压会引起绝缘油中水分饱和和溶解度降低,绝缘油中溶解水析出形成油中悬浮水,或向纸中析

出加速绝缘纸的热老化和水解老化,这些都是促使油浸倒立式电流互感器绝缘性能降低甚至发生故障的主要因素。

在上述油中水分饱和和溶解度测定过程中,选取湿度为40%的点,分别取不同压力和温度下达到水分平衡时的油样测量其击穿电压,测试结果如图3所示。从图3可以看出,随着负压的增大,绝缘油的击穿电压降低,此结论印证了上文的结论,负压对油中水分饱和和溶解度的影响可以解释此处绝缘油电气强度降低的原因。

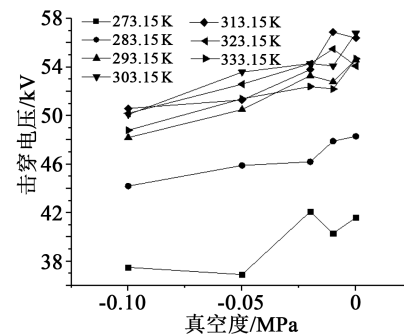


图3 负压对绝缘油击穿电压的影响

Fig.3 Effect of negative pressure on the breakdown voltage of insulating oil

4.2 对油中水分饱和和溶解度影响因素的进一步讨论

国内外学者对油纸绝缘系统中水分分布情况进行了大量的研究,对影响油中水分饱和和溶解度的因素也进行了深入挖掘,文献[7]得出油中水分饱和和溶解度随油中酸值、温度的变化规律,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \lg W_s = A - \frac{B}{T} + mA_c \\ W_s = 10^{A - \frac{B}{T} + mA_c} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, A_c 为油中酸值,单位为mgKOH/g。

式(6)只针对一般的变压器和互感器而言,对于油浸倒立式电流互感器,由于其存在负压运行的特殊工作条件,文献[7]的研究结果就不再具有普适性,影响其油纸绝缘的因素变得更为复杂,压力也是影响油中水分饱和和溶解度不可忽视的重要因素,可将压力因素引入油中水分饱和和溶解度的影响因素中,应用油中酸值、温度和压力3个因素综合评估绝缘油中水分饱和和溶解度。由式(5)可知,在负压下,水分饱和和溶解度降低,且这种降低趋势随温度

的升高更为明显;而由式(6)可知,老化后,饱和溶解度增加,且这种增加趋势随温度的升高更为明显。当绝缘油处于一定的负压和一定的老化程度时,两者对绝缘油中水分饱和和溶解度的综合影响可以互相抵消一部分,具体的抵消程度还需要进一步研究。

5 结论

(1)得出了油中水分饱和和溶解度与压力和温度的方程式,其中平移因子 n 与压力有关。在负压下,油中水分饱和和溶解度降低,且这种降低趋势随温度的升高更为明显。

(2)负压导致油浸倒立式电流互感器更易受潮,或引起绝缘油中饱和和溶解度降低,水分析出形成油中悬浮水或向纸中转移,这些都是促使油浸倒立式电流互感器绝缘性能降低甚至发生故障的主要因素。

(3)对于油浸倒立式电流互感器,可将油中酸值、温度、压力作为绝缘油中水分饱和和溶解度的综合评估体系。负压和油中酸值对油中水分饱和和溶解度的影响趋势相反,两种因素的综合影响可以互相抵消一部分。

参考文献:

- [1] 王世阁. 倒置式电流互感器运行状况分析及提高安全运行性能的建议[J]. 变压器,2009,46(9):64-68.
- [2] 唐庆华,王楠,马小光,等. 一起500kV油浸倒立式电流互感器故障分析[J]. 电气应用,2015,30(10):54-57.
- [3] 张大鹏. 高铁用电容式电流互感器绝缘特性及故障研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [4] 杨丽君. 变压器油纸绝缘老化特征量与寿命评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [5] 伍衡,梁晨,李原龙,等. 水分对换流变压器油纸绝缘电气强度与机械强度的影响[J]. 绝缘材料,2017,50(12):22-27.
- [6] 黎颖,周欣, WERLE P, 等. 不同均匀电场中温度对油纸绝缘沿面放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2017,51(6):66-71.
- [7] 白鹭,李冠良,杨成鹏,等. 试验方法及电极布置形式对变压器油局部放电起始电压的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(5):85-91.
- [8] 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.
- [9] KAUFMAN R B, SHIMANSKI E J, MAFAYDYEN K W. Gas and moisture equilibrium in transformer oil[J]. *Communication and Electronics*,1955,74(3):312-318.
- [10] DU Y, ZAHN M, LESIEUTRE B, et al. Moisture equilibrium in transformers paper-oil systems[J]. *Feature Article*, 1999, 15(1): 11-20.
- [11] 王晓剑,王娟,石颀,等. 油纸绝缘老化产物对油中水分饱和和溶解度的影响[J]. 绝缘材料,2015,48(8):46-50.