

植物绝缘油纸匝间绝缘的电气性能研究

宋浩永, 陈于晴, 黄青丹, 黄慧红, 王 勇

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘要: 本研究搭建了匝间绝缘试验平台,并在雷电冲击电压、操作冲击电压和工频电压下开展了植物绝缘油纸绝缘和矿物绝缘油纸绝缘的耐压试验。结果表明:在工频电压下,植物油纸绝缘的击穿电压高于矿物油纸绝缘;在操作冲击电压下,植物油纸绝缘的击穿电压略高于矿物油纸绝缘;在负极性雷电冲击电压下,植物油纸绝缘的击穿电压略低于矿物油纸绝缘。考虑到不同规格导线匝间绝缘的击穿电压存在差异,为指导植物绝缘油变压器的匝间绝缘设计,基于试验结果,采用有限元法对矿物油纸匝间绝缘和植物油纸匝间绝缘的场强进行仿真计算,结果表明击穿电压下矿物油纸匝间绝缘的最大场强高于植物油纸匝间绝缘。

关键词: 植物绝缘油;矿物绝缘油;匝间绝缘;仿真计算;击穿电压

中图分类号: TM214 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.05.016

Study on electrical performance of vegetable insulating oil-paper interturn insulation

SONG Haoyong, CHEN Yuqing, HUANG Qingdan, HUANG Huihong, WANG Yong

(Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: An interturn insulation test platform was constructed, and the voltage-withstand tests were conducted on vegetable insulating oil-paper insulation and mineral insulating oil-paper insulation under lightning impulse voltage, switching impulse voltage, and power frequency voltage. The results show that under power frequency voltage, the breakdown voltage of vegetable oil-paper insulation is higher than that of mineral oil-paper insulation. Under switching impulse voltage, the breakdown voltage of vegetable oil-paper insulation is slightly higher than that of mineral oil-paper insulation. Under negative lightning impulse voltage, the breakdown voltage of vegetable oil-paper insulation is significantly lower than that of mineral oil-paper insulation. Considering the differences in breakdown voltage of interturn insulation with different specification of wires, on the basis of test results, the field strength of mineral oil-paper interturn insulation and vegetable oil-paper interturn insulation were simulated and calculated by finite element method so as to guide the design of interturn insulation for vegetable insulating oil transformer. The simulation results show that the maximum field strength of mineral oil-paper interturn insulation is higher than that of vegetable oil-paper interturn insulation under the breakdown voltage.

Key words: vegetable insulating oil; mineral insulating oil; interturn insulation; simulation calculation; breakdown voltage

0 引言

矿物绝缘油作为电力变压器(电抗器)中起着绝缘、冷却散热、熄灭电弧作用的主要介质,其在实际工程中应用已有一个多世纪的历史。绝缘油的性能在很大程度上决定了变压器的绝缘性能、环保性能、防火性能及使用寿命。随着国家“双碳”战略目标的提出,矿物绝缘油生物降解难、原材料资源不可再生、燃点和闪点低的缺点日益凸显,研发一种具有高燃点、可生物降解、可再生、绝缘性能优良

的环保型液体绝缘介质势在必行。

植物绝缘油是从植物种子或其他生物中提取出来,通过精炼加工制备而成的具有较好绝缘性能的一种液体绝缘介质,通过加入添加剂的方式来改善普通植物绝缘油易氧化、黏度大、倾点高、酸值高等缺点,可得到符合标准要求的液体绝缘介质^[1]。

植物绝缘油作为一种燃点高的环保型液体绝缘介质,关于其电气性能的研究报道较多。邹平等^[2]研究了含水量对植物绝缘油绝缘性能的影响规律,发现在油中水分饱和度相同的情况下,植物绝缘油比矿物绝缘油的击穿电压高,且随水分饱和度的增加,植物绝缘油击穿电压的下降速度比矿物绝

基金项目:南方电网公司重点科技项目(080037KK5219 0038)。

缘油缓慢。李剑等^[2]对3种植物绝缘油的电气性能进行了测量,发现3种植物绝缘油中单不饱和脂肪酸支链含量最高的菜籽绝缘油综合性能最佳。何清等^[3]通过对植物绝缘油和矿物绝缘油浸纸板的交流击穿特性、体积电阻率、介质损耗因数和相对介电常数随温度和水分含量的变化规律进行对比分析,发现油浸纸板的电气性能在含水量超过4%时急剧下降,植物绝缘油浸纸板的电气强度高于矿物绝缘油浸纸板。蔡胜伟等^[4]采用精炼和酯交换两种工艺制备了植物绝缘油,并对其理化性能和电气性能进行测试分析,发现这两种工艺制备的植物绝缘油各项性能指标均能达到ASTM D6781-2003的要求。王珊珊等^[5]采用绝缘油耐压测试仪对凝固状态的植物绝缘油和油纸绝缘进行了耐压试验,结果表明大豆基植物绝缘油凝固后工频耐压水平下降了3.2 kV,油纸混合结构的耐压水平基本没变。叶文郁等^[6]搭建植物油纸频率响应平台研究了绝缘结构对植物油纸频域介电谱特性的影响,结果表明低频下植物油纸的介质损耗因数最小,而植物绝缘油的介质损耗因数最大;中高频下植物油纸的介质损耗因数最小,植物油纸与两层油隙组成的油纸绝缘系统介质损耗因数最大。

虽然植物绝缘油在工程上已有了一定的应用,但目前对其绝缘性能的研究主要处于实验室阶段,试验电压也主要是工频电压,对雷电冲击电压和操作冲击电压下植物绝缘油和油纸绝缘结构的研究罕见报道。对高压产品来说,操作冲击电压和雷电冲击电压下的绝缘性能对其绝缘结构的可靠性至关重要。在高压变压器中,由于变压器绕组需要承受沿输电线路侵入的雷电冲击过电压,通常采用纠结式结构、插入屏蔽线的方式增加串联电容,改善冲击电位分布。由此可见,变压器绕组匝间、饼间绝缘的绝缘性能对变压器绕组的设计有重要影响。

本研究基于实际工程应用的变压器产品搭建匝间绝缘试验平台,在雷电冲击电压、操作冲击电压和工频电压下开展矿物绝缘油和植物绝缘油的耐压试验,然后使用专业的电场仿真软件建立植物绝缘油纸匝间绝缘和矿物绝缘油纸匝间绝缘的有限元计算模型,对匝间绝缘的场强进行仿真计算,为后续植物绝缘油变压器匝间绝缘的设计提供理论依据。

1 试验

矿物绝缘油变压器已有一个多世纪的应用历

史,基于矿物绝缘油的变压器绕组设计技术已相当成熟,而植物绝缘油作为一种新型的液体绝缘介质,基于植物绝缘油的变压器绕组设计技术还有待进一步研究。

油纸绝缘是变压器内部绝缘组成的重要结构,绝缘纸中的气隙被绝缘油渗透和填充后,其电气强度会得到大幅提高^[7],具体提高的程度与浸渍的绝缘油的电气性能有较大关系,因此有必要研究各种电压下植物绝缘油纸匝间绝缘的电气强度^[8]。

1.1 试验平台

本文通过开展植物绝缘油匝间绝缘和矿物绝缘油匝间绝缘击穿电压试验进行对比研究,为后续植物绝缘油变压器的绕组设计提供数据支撑。匝间绝缘模型结构设计方案如图1所示。其中绕组内径为400 mm,匝间绝缘厚度为0.6 mm,饼间油道厚度为4 mm,4饼为1个单元,20个单元共80饼,通过21根套管引出,其中1根套管为接地套管,套管电压等级为35 kV。每个单元的绕组由两根线并绕,一根线的首尾接一根套管,另一根线的首尾接接地套管。匝间绝缘模型实物照片见图2(a)。为保证线匝之间的松紧度,线圈绕制时采用白色电工收缩带进行绑扎;为避免击穿后产生的碳化物对其他单元产生影响,单元之间用厚度为1.5 mm的纸板隔开,纸板内外径均超出线圈内外径50 mm。

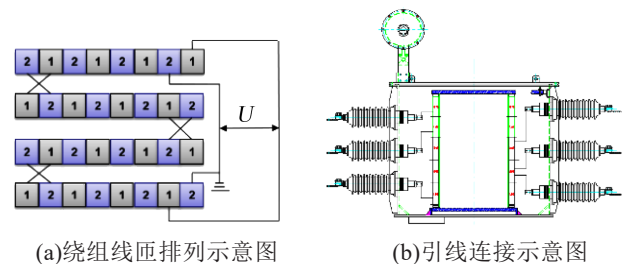


图1 匝间绝缘模型结构设计方案

Fig.1 Design scheme of interturn insulation model structure

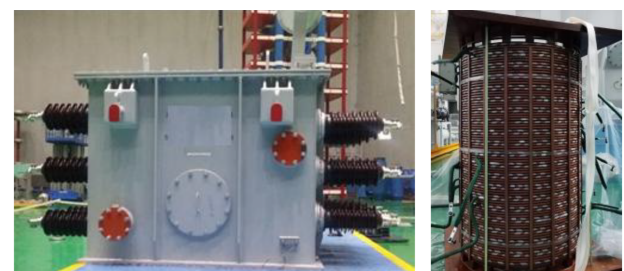


图2 匝间绝缘试验平台结构

Fig.2 Structure of interturn insulation test platform

为真实模拟实际产品的匝间绝缘状态,严格按照实际产品的制造工艺对匝间绝缘模型进行加工:

采用实际变压器线圈绕制工艺绕制匝间绝缘模型线圈;采用实际变压器器身干燥工艺干燥匝间绝缘模型器身;采用实际变压器引线包扎工艺包扎匝间绝缘模型引线;采用真空注油的方式对匝间绝缘模型进行注油。线圈实物照片见图2(b)。

1.2 试验方案

对试验平台分别浸渍25#矿物绝缘油和大豆基植物绝缘油,工频下油纸绝缘的击穿电压测试方法参考GB/T 1408.1—2016,雷电冲击电压和操作冲击电压下油纸绝缘的击穿电压测试方法参考GB/T 1408.3—2016。试验接线原理图见图3。

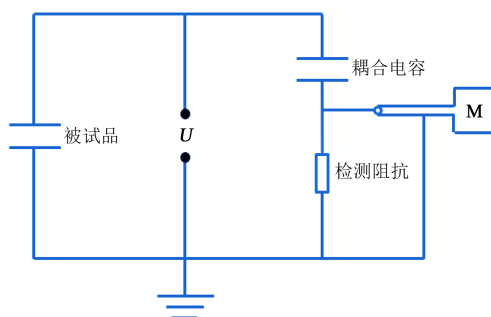


图3 试验接线原理图

Fig.3 Schematic diagram of test wiring

试验平台共20个试验单元,考虑到大量学者已对植物绝缘油工频电压下的绝缘性能开展了深入的研究,本次试验计划开展6个单元的工频耐压试验、7个单元的雷电冲击耐压试验、7个单元的操作冲击耐压试验。为保证试验过程的安全,施加电压严格控制在套管能承受的绝缘水平范围内。

GB/T 4109—2008对35 kV套管耐受绝缘水平规定如下:

- (1)雷电全波冲击耐受电压(峰值):200 kV;
- (2)工频耐受电压:95 kV。

由于35 kV变压器没有线端操作冲击耐压试验的要求,该标准对35 kV套管的操作冲击耐受电压不做要求。在标准操作波形下,变压器绕组的电位基本按线性分布,根据220 kV变压器操作冲击试验要求,当低压电压为35 kV时,低压套管操作冲击耐受电压不小于 $750 \div (220 \times 1.1 \div \sqrt{3}) \times 35 = 187$ kV。因此,该模型在开展操作冲击试验时,施加电压控制在180 kV以内即可。

油纸绝缘击穿后,会产生碳化物和气体,碳化物的密度比油大,会往下沉淀,气体密度比油小,会向上漂浮。碳化物和气体产生的量与放电能量息息相关,考虑到工频电压下击穿的放电能量>操作冲击电压下击穿的放电能量>雷电冲击电压下击穿的

放电能量,且单元间已用纸板隔开碳化物和气体扩散的路径,为了尽量减小对其他未开展试验单元的影响,试验从上部单元开始,依次开展雷电冲击试验、操作冲击试验、工频耐压试验。

2 试验结果

2.1 工频耐压试验结果

工频耐压试验升压方式为慢速升压^[9],试验结果见表1。由表1可知,在升压方式相同的情况下,植物油纸绝缘的工频击穿电压高于矿物油纸绝缘;矿物油纸绝缘的击穿时间大于植物油纸绝缘。从击穿电压的分布情况看,矿物油纸绝缘中偏离最大的是最大击穿电压,植物绝缘油纸绝缘中偏离最大的是最小击穿电压。

表1 工频击穿电压试验结果

Tab.1 Power frequency breakdown voltage test results

序号	工频击穿电压/kV		工频击穿时间/s	
	矿物油纸绝缘	植物油纸绝缘	矿物油纸绝缘	植物油纸绝缘
1	25	27	20	60
2	22	26	75	40
3	23	27	70	25
4	22	22	80	10
5	22	26	60	5
6	22	26	105	35
平均值	22.67	25.67	68	29

2.2 雷电冲击试验结果

雷电冲击试验按照每次升压3 kV的方式开展,实际加压时,由于试验设备及冲击发生器加压方式的影响,每次加压和预设电压存在一定的偏差。雷电冲击波前时间(T_1)为2.65 μ s,半峰值时间(T_2)为56.7 μ s,峰值电压(U_p)为-30.39 kV,具体波形如图4所示,试验结果见表2。由表2可知,矿物油纸绝缘的雷电冲击击穿电压略高于植物油纸绝缘。

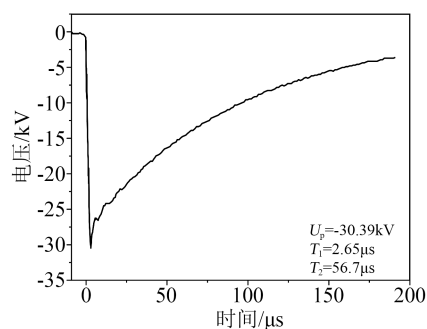


图4 雷电冲击试验波形

Fig.4 Waveform of lightning impulse voltage

表2 雷电冲击击穿电压试验结果

Tab.2 Breakdown voltage of lightning impulse test results

序号	雷电冲击击穿电压/kV	
	矿物油纸绝缘	植物油纸绝缘
1	73.05	63.93
2	67.03	66.33
3	70.74	67.38
4	67.51	68.06
5	71.16	70.39
6	69.93	71.14
7	66.50	71.65
平均值	69.42	68.41

2.3 操作冲击试验结果

同雷电冲击试验类似,操作冲击试验按照每次升压 3 kV 的方式开展,实际加压时,由于试验设备及冲击发生器加压方式的影响,每次加压和预设电压存在一定的偏差。操作冲击波前时间(T_1)为 45.74 μ s,半峰值时间(T_2)为 2 624 μ s,峰值电压为 -57.52 kV,具体波形如图 5 所示,试验结果见表 3。由表 3 可知,植物油纸绝缘的操作冲击击穿电压略高于矿物油纸绝缘,但植物油纸绝缘的击穿电压相对来说不稳定,分散性较大。

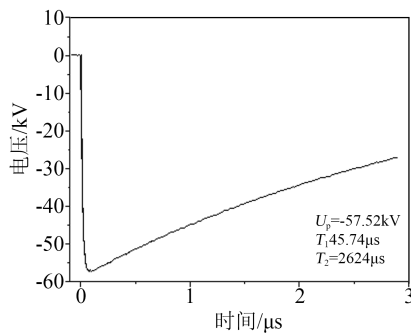


图5 操作冲击电压波形

Fig.5 Waveform of switching impulse voltage

表3 操作冲击击穿电压试验结果

Tab.3 Breakdown voltage of switching impulse test results

序号	操作冲击击穿电压/kV	
	矿物油纸绝缘	植物油纸绝缘
1	56.40	63.27
2	54.18	58.70
3	56.87	61.43
4	55.85	58.68
5	57.30	52.49
6	59.42	59.67
7	56.78	61.61
平均值	56.69	59.41

2.4 试验结果分析

2.4.1 工频耐压试验结果分析

根据文献[10]可知,工频电压下植物绝缘油的电气性能优于矿物绝缘油。众所周知,交流电压下介质的场强分布与介电常数成反比,植物绝缘油的介电常数为 3.2~3.3,矿物绝缘油的介电常数为 2.2~2.3,浸油后的绝缘纸介电常数为 3.6~4.0,植物绝缘油和绝缘纸之间的相对介电常数更接近。在外加电场的作用下,植物油纸绝缘中的电场分布更均匀,再加上工频电压下植物绝缘油的电气性能优于矿物绝缘油,因此,植物油纸绝缘在工频电压下具有更好的绝缘性能^[8]。

2.4.2 雷电冲击试验结果分析

采用针-球电极测试负极性雷电冲击下植物绝缘油和矿物绝缘油的长油隙击穿电压,结果见表 4。从表 4 可知,负极性雷电冲击下,矿物绝缘油的击穿电压高于植物绝缘油。

表4 负极性雷电冲击下绝缘油的击穿电压

Tab.4 Breakdown voltage of insulating oil under negative polarity lightning impulse

油隙距离/mm	击穿电压/kV	
	矿物绝缘油	植物绝缘油
15	102	68
25	124	96
40	172	148
50	210	182
75	298	235

对于匝间绝缘来说,绝缘油的浸渍和填充消除了绝缘层中的气隙,提高了其电气强度。而匝间绝缘的击穿电压与材料本身的性能有较大的关系,在负极性雷电冲击电压下,矿物绝缘油的电气性能明显优于植物绝缘油,因此矿物油纸绝缘在雷电冲击下的电气性能略优于植物油纸绝缘。

2.4.3 操作冲击试验结果分析

针对负极性操作冲击下的矿物绝缘油和植物绝缘油的击穿特性研究目前鲜有报道。从表 3 可知,植物油纸绝缘在负极性操作冲击下的击穿电压略高于矿物油纸绝缘。从试验波形来看,操作冲击电压波前时间为 45.74 μ s,介于雷电冲击电压和工频电压之间,而矿物绝缘油和植物绝缘油在雷电冲击电压和工频电压下的绝缘性能刚好相反,再加上匝间绝缘的击穿电压与材料本身的绝缘性能有较大的关系,因此植物油纸绝缘的操作冲击击穿电压略高于矿物油纸绝缘。

分析可知,3 种电压陡度从高到低依次为雷电

冲击电压、操作冲击电压、工频电压,随着电压陡度的升高,植物绝缘油的击穿电压先高于矿物绝缘油,然后两者的差距减小,最后甚至低于矿物绝缘油,说明植物绝缘油相对矿物绝缘油对电压陡度更敏感,在高陡度电压下应用时应注意其击穿电压变化。

3 仿真计算

变压器导线的规格和型式多种多样,直接用匝间绝缘的厚度指导变压器的绝缘设计存在一定的风险,采用数值计算的方式通过控制最大场强来指导植物绝缘油变压器的设计更可靠。在工程应用中,如果电场变化速度小于电磁波变化速度,则当作静电场处理,对变压器来说,工频电压或冲击电压下其各处的电场仅随外加电压变化,完全可以当作静电场处理。在交流电场下,电场的分布取决于材料的介电常数,25℃时植物绝缘油和矿物绝缘油的相对介电常数分别为3.2和2.2,浸渍植物绝缘油的绝缘纸和绝缘纸板相对介电常数分别为3.5和4.4,浸渍矿物绝缘油的绝缘纸和绝缘纸板相对介电常数分别为3.2和4.0。

在给定相同的边界条件下,对击穿电压下植物绝缘油和矿物绝缘油纸匝间绝缘开展仿真分析。

3.1 计算模型

试验平台线圈为空心轴对称结构,为防止击穿试验后对其他未试验单元的影响,单元间用宽度为20 mm的端圈隔开。根据匝间绝缘模型设计方案建立二维电场模型,模型主要由激励部分(导线)、绝缘部分(变压器油、匝间绝缘、绝缘纸板等)及边界条件(第一类及第二类边界条件)组成。

3.2 计算参数设定

根据绝缘材料的伏秒特性,将交流耐压试验值转换为1 min工频耐压试验值。击穿电压与持续时间的关系曲线如图6所示^[11]。在一定的击穿概率下,施加电压(U)和持续时间(t)的关系可以用式(1)表示。

$$U = kt^{-a/m} \quad (1)$$

式(1)中: a 为试验时间威布尔分布的形状系数; m 为试验电压威布尔分布的形状系数; k 为常量。

根据屏障间油隙的试验数据,植物油纸绝缘的负极性雷电全波冲击耐压(68.41 kV)折算成1 min外施工频耐压为28.46 kV;矿物油纸绝缘的负极性雷电全波冲击耐压(69.42 kV)折算成1 min外施工频耐压为28.88 kV。植物油纸绝缘的负极性操作冲击耐压(59.41 kV)折算成1 min外施工频耐压为

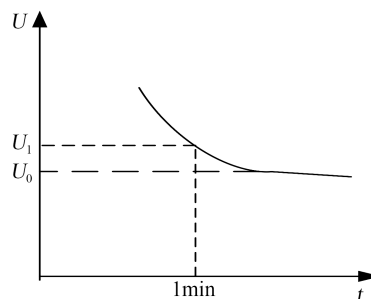


图6 击穿电压与持续时间关系曲线

Fig.6 Relation curve between breakdown voltage and duration

33.0 kV;矿物油纸绝缘的负极性操作冲击耐压(56.69 kV)折算成1 min外施工频耐压为31.50 kV。折算完后植物油纸绝缘1 min外施工频耐压最大值为33.0 kV,矿物油纸绝缘1 min外施工频耐压最大值为31.5 kV。

3.3 仿真计算

由于试验装置为空心轴对称结构,试验在规则的长方体箱体内进行,箱体对匝间绝缘场强分布影响较小,故采用二维轴对称模型,仿真计算结果如图7和图8所示。其中图1(a)中被试线匝1分别施加31.5 kV、33.0 kV的电压,线匝2均施加0 kV电压,非被试线匝均接地,油箱接地。采用自适应剖分,对物理模型中各部件的网格尺寸进行控制,由于采用二维模型求解,为获取更高的精度,采用较密的网格^[12]。从图7和图8可以看出,矿物绝缘油纸匝间绝缘的最大场强为70.82 kV/mm,位于相邻两根导线搭接处楔形油隙位置;植物绝缘油纸匝间绝缘的最大场强为59.81 kV/mm,位于导线表面倒角处。

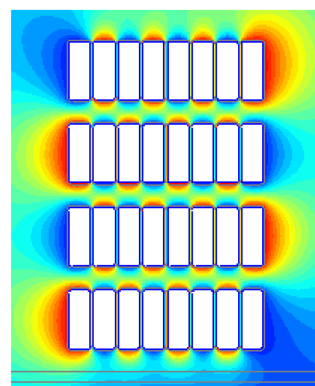


图7 电位分布

Fig.7 Voltage distribution

从仿真计算结果来看,在相同的击穿电压下,矿物油纸绝缘匝间绝缘的最大场强大于植物油纸绝缘匝间绝缘的最大场强。其原因是在交流电压

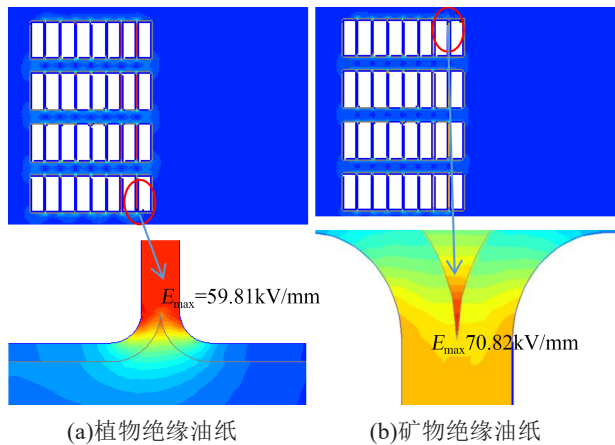


图8 匝间绝缘电场分布

Fig.8 Field intensity distribution of interturn insulation

下,场强分布与介电常数成反比,植物绝缘油的介电常数与油浸纸板的介电常数更接近,场强分布更均匀,此时导线倒角处的曲率半径小,因此最大场强位于导线倒角处;矿物绝缘油的介电常数比油浸纸板小很多,最大场强位于油纸绝缘交界面。由于匝间绝缘的击穿场强高于绝缘油,在许用场强相同的情况下,矿物绝缘油纸匝间绝缘的安全系数小于植物绝缘油纸匝间绝缘的安全系数。

4 结论

通过搭建匝间绝缘试验平台,对比分析了3种电压下植物油纸绝缘和矿物油纸绝缘的性能差异,主要得到以下结论:

(1)同一升压方式下,植物油纸绝缘的平均工频击穿电压高于矿物油纸绝缘;从击穿电压的分布情况看,矿物油纸绝缘偏离最大的是最大击穿电压,植物绝缘油纸绝缘偏离最大的是最小击穿电压,二者的分布规律有一定的区别。

(2)同一升压方式下,植物油纸绝缘的平均负极性雷电冲击击穿电压略低于矿物油纸绝缘;从击穿电压的分布情况看,雷电冲击击穿电压与工频击穿电压的分布规律类似,但矿物油纸绝缘击穿电压的分散性略优于植物油纸绝缘。

(3)同一升压方式下,植物油纸绝缘的平均操作冲击击穿电压略高于矿物油纸绝缘;从击穿电压的分布情况看,植物油纸绝缘击穿电压的分散性较大。

(4)植物绝缘油相对矿物绝缘油对电压陡度更敏感。由于GIS投切时会产生特快速暂态过电压(VFTO),频率更高、波形陡度更大,后续在采用GIS出线的高电压产品中应用植物绝缘油时,需要采取必要的加强措施。

参考文献:

- [1] 邹平,李剑,孙才新,等.植物绝缘油中含水量对其绝缘性能的影响[J].高电压技术,2011,37(7):1627-1632.
- [2] 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,2007,30(9):42-45.
- [3] 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.
- [4] 蔡胜伟,陈江波,梁云丹,等.植物绝缘油的性能改进及试验考核研究[J].变压器,2013,50(12):58-62.
- [5] 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.
- [6] 叶文郁,陈玉峰,朱孟兆,等.温度对植物绝缘油纸介电响应特性的影响[J].绝缘材料,2020,50(4):82-88.
- [7] 黄青丹,莫文雄,宋浩永,等.浸渍植物油对绝缘件影响的研究[J].绝缘材料,2021,54(9):69-72.
- [8] 童伟,徐良铸,王莹,等.植物油纸绝缘及其变压器的研究进展与老化机理分析[J].绝缘材料,2019,52(2):1-6.
- [9] 李剑,张召涛,邹平,等.植物油纸绝缘的介电与热稳定性性能[J].电力科学与技术学报,2010,25(1):75-80.
- [10] 蔡胜伟.天然酯绝缘油电力变压器技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [11] 李金忠,孙建涛,张书琦,等.特高压变压器高压出线装置长时工频耐压下绝缘性能试验研究[J].中国电机工程学报,2012,32(34):151-157.
- [12] 谭黎军,俞英中,曹燕明,等.基于有限元法的绝缘装置介电强度校核[J].变压器,2019,56(10):15-19.

收稿日期:2023-07-05;修回日期:2023-10-24。

作者简介:宋浩永(1985-),男(汉族),河南许昌人,教授级高级工程师,主要从事绿色绝缘材料的研发及应用的研究。