

变频电压下气制油纸绝缘与矿物油纸绝缘沿面放电特性

胡晓雨^{1,2,3}, 周远翔^{1,2,3}, 陈健宁³, 赵云舟^{1,2}, 刘俊^{1,2}

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室分室(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:天然气制绝缘油作为电力行业的新型绝缘油,有望解决我国未来优质变压器油供应不足的瓶颈问题,然而其包括局部放电耐受强度及扫频图谱特征在内的电气参数尚未明确。搭建了工频至低频下油纸绝缘局部放电试验平台,采用球板电极模型开展了频率由50 Hz降至0.1 Hz交流电压下气制油-纸绝缘和传统矿物油-纸绝缘沿面放电试验。研究表明,随着频率的降低,两种油下油纸绝缘沿面放电的起始电压都呈现增高的趋势,且气制油-纸绝缘沿面放电的起始电压明显高于传统矿物油-纸绝缘,局部放电性能更优异。两种油-纸绝缘沿面放电正负半周的最大放电量、平均放电量以及脉冲重复率整体随频率下降都呈现下降的趋势。各频率下,局部放电相位(PRPD)图谱与统计图谱($q_{\max}-\varphi$, $n-\varphi$ 和 $n-q$)整体形状一致,但分布范围差别较大。研究结果可以为不同油-纸绝缘沿面放电在不同频率电压下的模式识别提供参考价值。

关键词:沿面放电;气制油-纸绝缘;传统矿物油-纸绝缘;频率;放电图谱

中图分类号: TM853 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23521

Surface Discharge Characteristics of Gas Oil-paper Insulation and Mineral Oil-paper Insulation Under Variable Frequency Voltage

HU Xiaoyu^{1,2,3}, ZHOU Yuanxiang^{1,2,3}, CHEN Jianning³, ZHAO Yunzhou^{1,2}, LIU Jun^{1,2}

(1. College of Engineering Technology, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China; 2. Wind Solar Storage Division of State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Xinjiang University), Urumqi 830047, Xinjiang, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a new type of insulating oil in the power industry, natural gas insulating oil is expected to solve the bottleneck problem of high-quality transformer oil's insufficient supply in the future. However, its electrical parameters including partial discharge withstand strength and sweep frequency spectrum characteristics are not clear yet. A partial discharge test platform for oil-paper insulation from power frequency to ultra-low frequency was built and a ball-plate electrode model was used to carry out surface discharge test with gas-to-oil-paper insulation and traditional mineral oil-paper insulation under an AC voltage when frequency from 50 Hz to 0.1 Hz. The results show that the initial voltage of the surface discharge on oil-paper insulation increases with the decrease of frequency, and the surface discharge of gas-to-oil-paper insulation is higher than traditional mineral oil-paper insulation, and the performance of partial discharge is better. With the decrease of frequency, the maximum discharge, average discharge, and pulse repetition rate of the two kinds of oil-paper insulation surface discharge in positive and negative half-cycles all show a decreasing trend. The overall shape of the phase-resolved partial discharge (PRPD) map and the statistical map ($q_{\max}-\varphi$, $n-\varphi$ and $n-q$) are consistent at each frequency, but the distribution range is quite different. The results can provide the reference value for pattern recognition of different oil-paper insulation surface discharge under different frequency voltages.

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0902704);自治区科技支疆项目(2019E0236)

作者简介:胡晓雨(1993—),男,硕士研究生,Email:tuhuxy@163.com

通讯作者:周远翔(1966—),男,博士,教授,Email:zhou-yx@tsinghua.edu.cn

Key words: surface discharge; gas-to-oil-paper insulation; traditional mineral oil-paper insulation; frequency; discharge pattern

随着我国经济的快速发展,用电量随之增长,同时也带动了高端电力设备制造业发展^[1-3],而高端变压器矿物绝缘油存量有限。变压器绝缘油作为油纸绝缘系统中关键的组成部分,与绝缘纸板共同承担电气绝缘及散热作用,但是目前广泛使用的变压器绝缘油主要是传统的克拉玛依25号绝缘油^[4]。它主要产自天然石油,是一种不可再生资源。现有文献表明,传统矿物变压器绝缘油预计开采年限已不足20年,这就意味着传统的矿物变压器油将不能满足我国变压器油的需求^[5]。

现有的研究大多数都是基于传统矿物油开展的,且有部分用于故障的诊断^[6-9]。由于气制绝缘变压器油进入变压器市场不久,其研究仍处在起步阶段。已有对气制油的研究主要集中于不同类型电压下气制油的电导、介质损耗、击穿等特性研究,对局部放电起始及发展过程的特征图谱及其机理研究较少。中国电力科学研究院王健^[10]等人对气制绝缘油的电气性能和理化性能开展了一定研究,获取了雷电冲击击穿特性以及导热系数和比热容等性能参数。英国曼彻斯特大学Lu W, Liu Q^[11]对气制绝缘油与传统矿物绝缘油的雷电冲击性能进行了相关的研究,认为气制绝缘油芳香烃含量较低,使得其击穿电压高于传统矿物绝缘油。Muhammad Daghrah^[12]等人对矿物油变压器油、气液油变压器油和合成酯变压器液在锯齿盘式绕组模型中作为冷却剂的热性能进行了实验研究。华北电力大学^[13]对气制绝缘油油浸纸板的电气性能和介电性能进行了研究。

另外,变压器油纸复合绝缘结构的可靠性直接关系到整个电网的安全运行。已有资料证明,导致绝缘介质劣化的原因主要是由油纸绝缘沿面放电引起^[14],因此对油纸沿面放电特性研究有着重要意义。目前油纸绝缘沿面放电是在工频电压、直流电压或交直流复合电压下进行的^[15-16]。当待测试品电容量较大时,可使用低频电压代替工频,有效降低对电源的无功容量需求,从而减小试验设备的体积和成本。因此,本文搭建工频至超低频下油纸绝缘局部放电试验平台,采用球板电极模型开展频率由50 Hz降至0.1 Hz交流电压下气制油-纸绝缘和传统矿物油-纸绝缘沿面放电试验,获取不同频率下油纸绝缘沿面放电起

始电压与起始电场强度,绘制局部放电相位(phase-resolved partial discharge, PRPD)图谱,对比分析两种不同油浸绝缘纸板沿面放电特性,同时研究频率变化对沿面放电的影响。

1 油纸绝缘沿面放电试验

1.1 试验平台

为开展不同频率下油纸绝缘沿面放电试验,设计并搭建了如图1所示的试验平台。平台共包含三个部分:第一部分为高压发生器,由高压功率放大器 Trek model(50 kV/12 mA)对可编程信号发生器的输出信号进行放大后获得满足试验要求的不同频率下的电压;第二部分为试验回路的高压部分,其中高压输出与电极模型、耦合电容相连,使用测量阻抗 CPL 542 与电极串联获取放电信号,根据 IEC 60270 标准将测试带宽设置为 300 kHz,另一个测量阻抗与耦合电容($C_k=400$ pF)串联获取同步电压信号。第三部分为信号采集和分析模块,由局部放电测试仪 MPD 600 采集放电信号后通过计算机进行数据处理与分析。所有设备的引线端口均做了平滑设计,净空周围金属器件,局部放电测试仪回传信号使用光纤传输,在调整电路或缺陷模型的每次试验之前,均对不含待测缺陷的回路进行工频升压检测,确保背景噪声小于 5 pC。

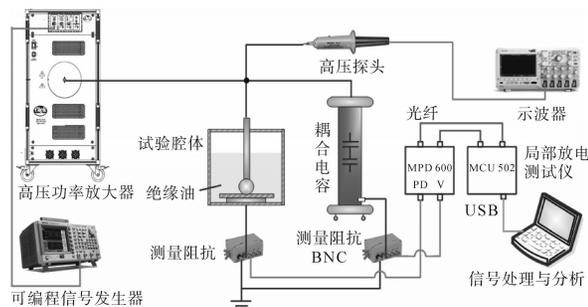


图1 工频至低频电压下油纸绝缘沿面放电试验平台

Fig.1 Oil-paper insulation surface discharge test platform under power frequency to low frequency voltage

1.2 试样制备

试验选用克拉玛依 KI 25X 绝缘油和气制 S4 绝缘油,绝缘纸板选用魏德曼 T4 型绝缘纸板,厚度为 1 mm。

绝缘油处理流程如下:1) 准备储油容器,采用无水乙醇、去离子水充分洗净后,100 °C 下真空干燥 48 h 以上;2) 真空滤油机进行抽滤,对绝缘

油进行脱水、脱气与杂质滤除;3)将经过抽滤的绝缘油真空干燥48 h以上。

油浸绝缘纸的制备流程如下:1)将绝缘纸侧放,100℃下真空干燥48 h;2)在80℃环境下,将绝缘油缓慢注入放有绝缘纸的真空器皿,再转入真空干燥箱静置72 h以上,保证绝缘纸充分浸油。

1.3 绝缘缺陷设计

油纸绝缘沿面放电试验选用球-板电极模型,其中高压球形电极直径为25 mm,球板电极之间放置边长为9 mm、厚度为1 mm的油浸绝缘纸,以模拟油纸交界面的放电,如图2所示。然后基于图1所示的试验平台进行试验,试验电压频率分别为50 Hz, 30 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz和0.1 Hz。先对不同频率下油浸绝缘纸板沿面放电起始电压进行测量,再施加恒定电压获取不同频率下局部放电相位图谱及统计特征图谱,各频率下获取3~5组有效数据。

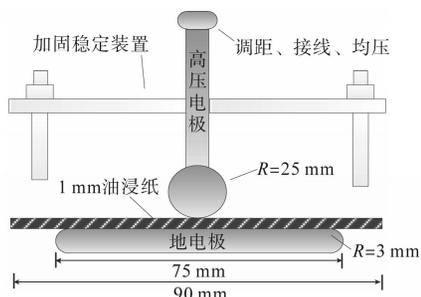


图2 油纸绝缘沿面放电缺陷模型

Fig.2 Defect model of surface discharge on oil-paper insulation

2 结果与讨论

2.1 沿面放电起始电压和电场强度

确定局部放电的起始电压是局部放电试验的首要步骤,试验中以0.5 kV/s的速度进行升压,当观察到稳定而连续的放电信号时记录外施电压为起始电压。气制油-纸绝缘与传统矿物油-纸绝缘在各频率下的沿面放电起始电压如图3所示。

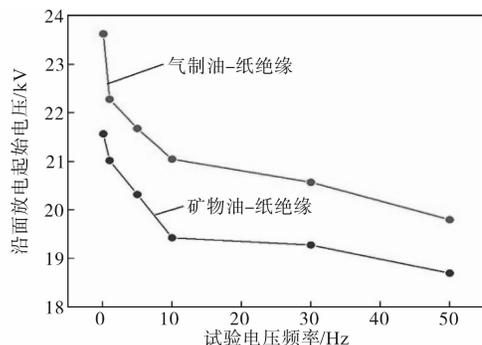


图3 工频至低频电压下沿面放电起始电压

Fig.3 Initiation voltage of surface discharge from power frequency to low frequency voltage

随着频率的下降,两种油浸纸板沿面放电起始电压先是缓慢上升,后在10 Hz下快速上升。气制油-纸绝缘放电起始电压在30 Hz,5 Hz和0.1 Hz下与工频起始电压相比分别上升4%,9.5%和19.3%,而传统矿物油-纸绝缘与工频电压相比,分别上升了3.1%,8.7%和15.4%。在低频电压下,由于电压变化速率变慢,导致两次放电之间具有更多时间进行电荷消散,前一次放电产生的残余电荷对下一次放电电场的增强作用减弱,不利于放电起始,从而导致低频下起始电压增加。

气制绝缘油分子主要为异构链烃,其结构大多为线性结构,且电子分布也较均匀;而传统矿物绝缘油同时含有环烷烃及芳香烃,分子结构和电子分布比气制绝缘油复杂,因此从结构上来看传统绝缘油具有更强的极性。另外,绝缘油的苯胺点也可以定性地反映不同绝缘油的相对极性。苯胺点指不同的绝缘油与相同体积的苯胺溶为一体所需的最低温度。苯胺为极性物质,根据相似相容原理,苯胺点越高则绝缘油的极性就越小。气制绝缘油的苯胺点显著高于传统矿物绝缘油^[8],所以传统矿物绝缘油的极性更大,导致传统矿物绝缘油的相对介电常数大于气制绝缘油的相对介电常数,进一步使得传统矿物绝缘油浸纸板的相对介电常数较气制油浸绝缘纸板大。

变压器内部的主绝缘结构是变压器绝缘油与油浸纸板所构成的复合绝缘。在交流电压下绝缘油与油浸绝缘纸板所承受的电压与两者介电常数成反比。由于油浸绝缘纸板的相对介电常数大于变压器绝缘油的相对介电常数,所以绝缘油中承受的电压更大,从而使得绝缘油先发生放电。由于油浸绝缘纸板的相对介电常数大于变压器绝缘油的相对介电常数,所以绝缘油中承受的电场强度更大,从而使得绝缘油先发生放电。相较于传统矿物油浸纸板,气制绝缘油浸纸板的介电常数更小,与绝缘油的相对介电常数更加接近,使得场强的分布更均匀,局部放电更难发生,沿面放电起始电压更高。由此可以看出,气制油-纸绝缘系统在交流电压下的沿面放电性能优于传统矿物油-纸绝缘系统。

基于COMSOL Multiphysics有限元仿真软件搭建了球板电极的油纸绝缘模型,仿真分析了在工频起始电压下两种油浸绝缘纸板起始电场强度。由于油浸纸板的电导率远远小于其介质相

对介电常数,二者比值所得的电荷弛豫时间很长,所以应选用静电场模块求解其放电起始场强。仿真参数如表1所示。

表1 工频下介质相对介电常数

介质	介电常数
气制油	2.020
气制油-纸绝缘	4.483
矿物油	2.182
矿物油-纸绝缘	4.566

仿真计算可得,在放电起始电压作用下,气制油-纸绝缘沿面放电起始电场强度大于传统矿物油-纸绝缘沿面放电起始电场强度,如图4所示。

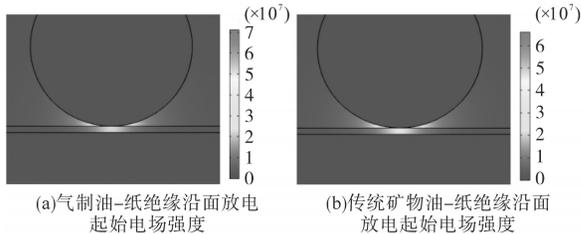


图4 起始放电场强仿真

Fig.4 Simulation of initial discharge field strength

2.2 放电统计量

工频至低频电压下,沿面放电正负半周最大放电电量如图5所示。

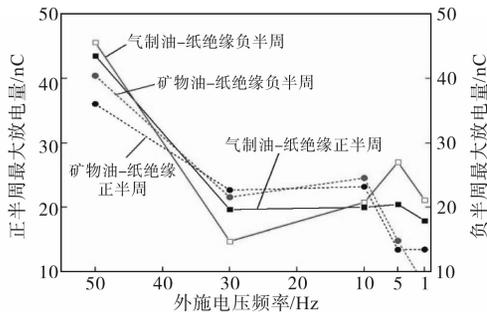


图5 正、负半周最大放电电量

Fig.5 Maximum discharge of positive and negative half cycle

由图5可知,随着外施电压频率的降低,两种油浸纸板沿面放电正负半周的最大放电电量整体上都呈现为下降的趋势,但是气制油-纸绝缘在由30 Hz降至5 Hz频率段,最大放电电量呈现出上升趋势,而传统矿物油-纸绝缘由30 Hz降至10 Hz频率段有上升趋势。其中气制油-纸绝缘沿面放电正半周最大放电电量由50 Hz时的43.51 nC下降到30 Hz和1 Hz时的19.67 nC和17.94 nC,分别下降了54.79%和58.77%。负半周的最大放电电量由50 Hz时的45.58 nC下降到30 Hz和1 Hz时的14.75 nC和21.13 nC,分别下降了67.64%和

53.64%。

工频至低频电压下气制油-纸绝缘沿面放电平均放电电量与最大放电电量变化基本一致,整体也呈现为下降趋势,在部分频率段也有上升趋势,这是由于在该频率段内,放电剧烈程度减弱了,使得小幅值放电减少,从而使得平均放电电量呈现上升趋势,如图6所示。

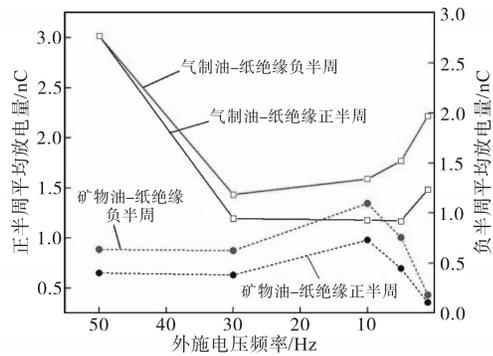


图6 正、负半周平均放电电量

Fig.6 Average discharge in positive and negative half-cycle

由图6可知,正半周平均放电电量由50 Hz时的3.02 nC下降到30 Hz和1 Hz时的1.20 nC和1.48 nC,分别下降了60.26%和50.99%。负半周平均放电电量由50 Hz时的2.77 nC下降到30 Hz和1 Hz时的1.19 nC和1.97 nC,分别下降了57.04%和28.88%。而传统矿物油-纸绝缘变化趋势与气制油-纸绝缘相反,呈现出先上升后下降的趋势,且在10 Hz频率下为最大点。

随着频率的下降,两种油纸绝缘沿面放电正、负半周的脉冲重复率呈现下降的趋势,气制油-纸绝缘在由10 Hz下降至1 Hz频率段内下降速率高于由50 Hz下降至10 Hz频率段,而传统矿物油-纸绝缘除由10 Hz下降至5 Hz频率段下降速率稍缓慢外,其余频率范围下降速率均较快,且快于气制油-纸绝缘,如图7所示。

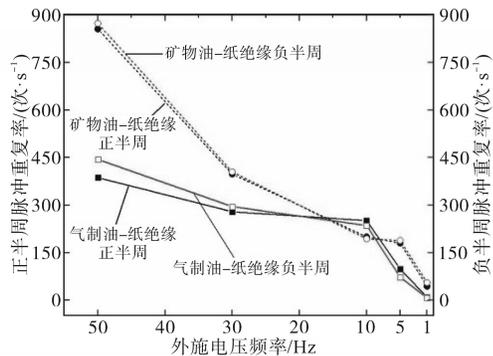


图7 正、负半周脉冲重复率

Fig.7 Positive and negative half-cycle pulse repetition rate

由图7可知,气制油-纸绝缘正半周脉冲重复

率由 50 Hz 下的 386.65 次/s 下降至 5 Hz 下的 98.36 次/s,再下降至 1 Hz 下的 9.07 次/s,分别下降了 74.56% 和 97.65%。负半周脉冲重复率由 50 Hz 下的 444.6 次/s 下降至 5 Hz 的 72.45 次/s,再下降至 1 Hz 下的 6.6 次/s,分别下降了 83.7% 和 98.52%。总体而言,随着频率降低,每秒等效周期数更少,局部放电脉冲重复率更低,但是气制油-纸绝缘脉冲重复率较低,这是因为其局部放电性能更好,相同的周期内局部放电数目更少。

2.3 沿面放电统计图谱

工频至低频电压下气制油及传统矿物油两种油浸纸板沿面放电 PRPD 图谱如图 8 所示。

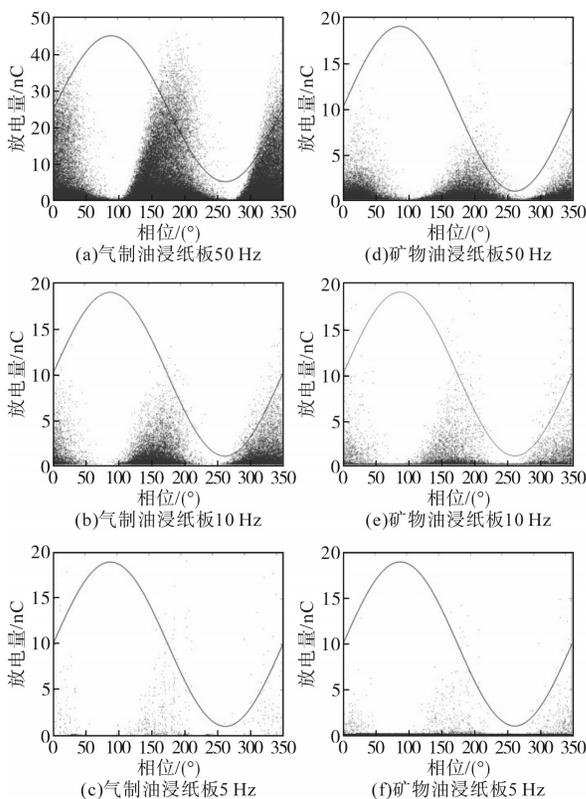


图8 工频至低频下PRPD图谱

Fig.8 PRPD spectrum from power frequency to low frequency

由图 8 可知,工频至低频电压下气制油及传统矿物油两种油浸绝缘纸板沿面放电 PRPD 图谱轮廓基本相似,图谱均呈现为山峰状,以电压峰值为中心展开分布,尾部小放电量较为集中,各频率下气制油-纸绝缘沿面放电图谱高度高于传统矿物油-纸绝缘。随着外施频率的下降,放电脉冲的峰值和放电频次也随之下降,这表明放电剧烈程度随之减弱。在工频电压下,两种油浸纸板沿面放电正负半周的放电起始点都位于前半周的尾部,这是由于前半周的放电产生的残余电荷增强电场强度,使得在电压过零点附近触发了新一

轮的放电。随着频率的下降,放电图谱侵入前半周的部分逐渐后移,表明在较低频率下,由于周期时间的增长,正负半周间隔时间也随着增大,使得前半周放电产生的残余电荷可以有更多的时间进行消散,从而导致放电相位延后。

工频至低频电压下沿面放电 $q_{max}-\varphi$ 图谱如图 9 所示。

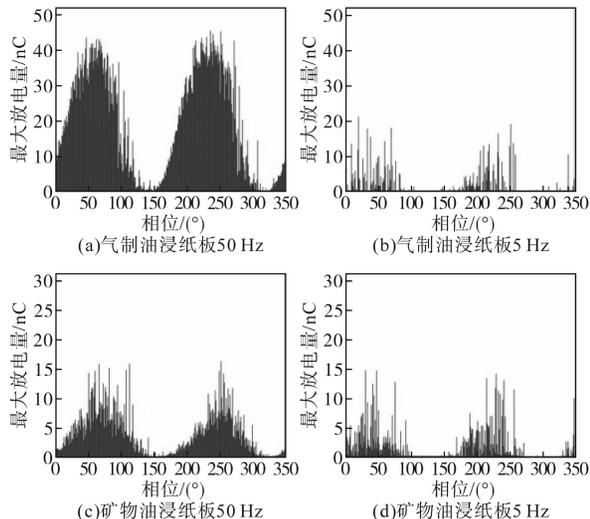


图9 工频至低频下沿面放电 $q_{max}-\varphi$ 图谱

Fig.9 The $q_{max}-\varphi$ pattern of creeping discharge from power frequency to low frequency

由图 9 可知,在工频电压下,气制油及传统矿物油下两种油浸纸板图谱形状均大致为三角形。但传统矿物油的图谱高度较低,且毛刺较多,低频 30 Hz 和 10 Hz 下的图谱保持了这一特性。而在 5 Hz 下,两种油下油浸纸板沿面放电图谱形状为幅值较高的毛刺所组成,没有呈现出三角形,放电更为平均,这是因为在更低频率下由于放电时间间隔较大,每次放电之间具有较充裕的时间使得放电初始电荷被激发,也使得上一次的放电残余电荷能充分消散。各频率下,正负半周图谱轮廓和幅值大致相似。

工频至低频电压下气制油及传统矿物油两种油浸绝缘纸板沿面放电 $n-\varphi$ 图谱如图 10 所示。由图 10 可知,各频率下图谱呈山峰状,且正负半周图谱轮廓与幅值基本一致。但是在 5 Hz 下,气制油-纸绝缘山峰状趋于模糊,而传统矿物油-纸绝缘山峰形状依旧明显。随着频率的下降,峰值随之减小,传统矿物油-纸绝缘图谱高度下降尤为明显。其中气制油-纸绝缘正半周分布由 50 Hz 下的 322 次下降为 5 Hz 时的 39 次,下降了 87.89%,负半周分布由 50 Hz 时 341 次下降为 5 Hz 时的 35 次,下降了 89.74%,正负半周下降速率基本一致。

低频5 Hz电压时的图谱在部分位置出现无放次数或放次数较少的现象,从而使得图谱轮廓出现毛刺形状。

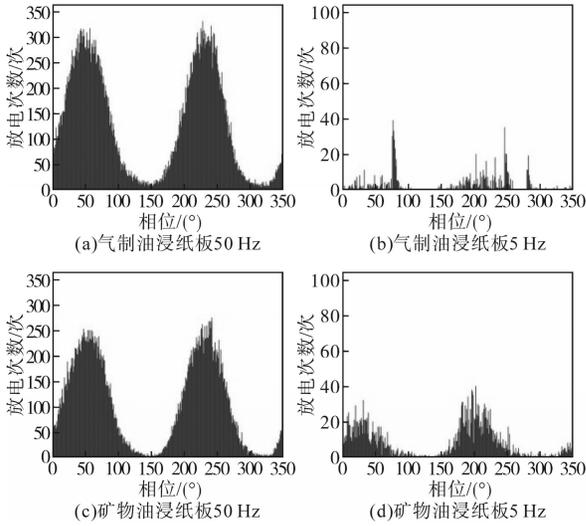


图10 工频至低频下沿面放电 $n-\phi$ 图谱

Fig.10 The $n-\phi$ pattern of creeping discharge from power frequency to low frequency

不同频率下沿面放电的 $n-q$ 如图11所示。由图11可知,两种油下浸绝缘纸板 $n-q$ 图谱在各频率下图谱形状整体保持一致,即在小放电量区域幅值较高,而较大放电量区域放电分布较为平坦。在50 Hz电压下 $n-q$ 图谱呈现出由峰值快速下降再缓慢下降的特点,30 Hz和10 Hz电压下保持了这一特点。而5 Hz电压下 $n-q$ 图谱整体轮廓呈现为下降趋势,但由于放电剧烈程度减弱,使得部分放电量区域的次数较少,从而使得图谱轮廓不连续,传统矿物油-纸绝缘尤为明显。

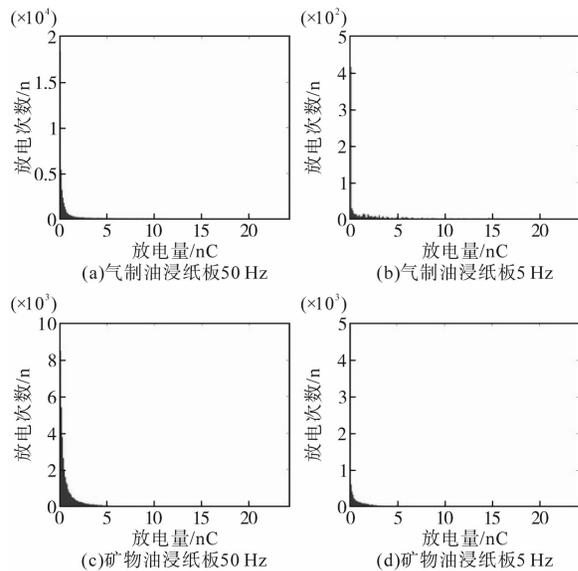


图11 工频至低频下沿面放电 $n-q$ 图谱

Fig.11 The $n-q$ pattern of creeping discharge from power frequency to low frequency

3 频率对沿面放电的影响分析

变压器绝缘油以及绝缘纸板都属于弱极性电介质,其容性分布特性主要是由于偶极弛豫极化造成的。电压频率的变化会引起绝缘油和油浸绝缘纸介电常数的变化。基于 COMSOL Multiphysics 商业有限元仿真软件仿真分析了频率变化对电场分布的影响。电磁场控制方程如下:

$$\nabla J = 0 \quad (1)$$

$$J = \sigma E + j\omega D \quad (2)$$

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

式中: J 为电流密度; σ 为电导率; E 为电场强度; ω 为电压角频率; D 为位电流; V 为电势。

式(1)为电流连续性方程,式(2)为全电流方程,式(3)为电场与电位关系方程。

基于宽频介电谱仪测得工频至低频电压下油浸纸板及变压器绝缘油相对介电常数如表2所示。绝缘油电导率 $\sigma_1=8.0 \times 10^{-13}$ S/m,油纸电导率 $\sigma_2=8.6 \times 10^{-15}$ S/m。

表2 工频至低频下油浸纸板及绝缘油相对介电常数

Tab.2 Relative permittivity of oil-impregnated paperboard and insulating oil from power frequency to low frequency

频率/Hz	纸板介电常数	绝缘油介电常数
50	2.180	4.566
30	2.182	4.571
10	2.194	4.593
5	2.287	4.713
1	2.360	4.716

工频与5 Hz下油纸沿面放电电极电势和电场分布对比如图12所示。

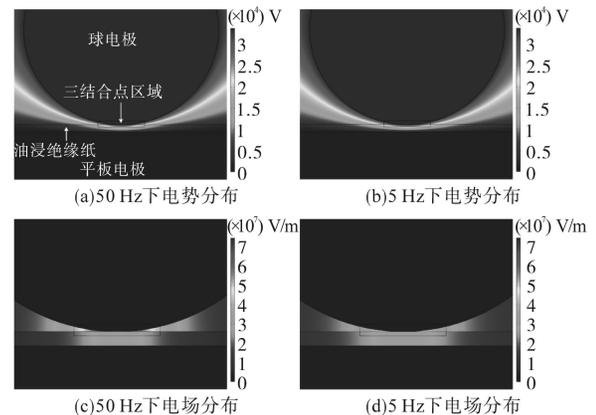


图12 工频与5 Hz下电势与电场分布

Fig.12 Electric potential and electric field distribution at power frequency and 5 Hz

由图12可知,两个频率下电势降落情况一

致,三结合点区域降落较快,越往两侧电势降落越慢。两个频率下均是三结合点区域电场强度较大,且相同位置处,工频下电场值大于5 Hz下电场值,表明同一位置处工频下电场强度较大。随着频率的下降,电场强度下降的趋势和沿面放电起始电压上升、最大放电量和脉冲重复率下降的趋势相符合,造成放电各统计量发生变化影响到了其他机制,如下文所述。

图13为一个周期内放电产生的空间电荷对电场的影响示意图。

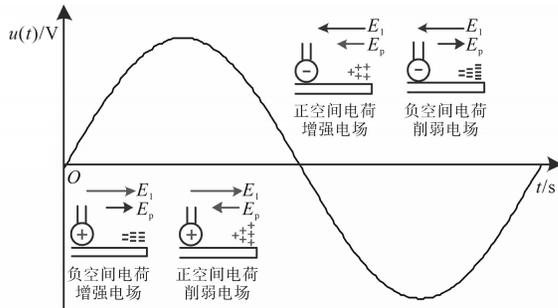


图13 一个周期内放电产生的空间电荷对电场的影响示意图
Fig.13 Schematic for the effect of space charge generated by discharge on electric field in one cycle

在一个周期的正半周内,极性为正的流注由球电极向平板电极发展,放电产生的电子注入正极性的球电极,而远离球电极处由于电场较低,使得漂移速率较低的正离子聚集于此。此时,空间电荷所形成的泊松电场 E_s 与外施电压形成的拉普拉斯电场 E_p 方向相反,如图13左下方所示,于是使得合成场强减少。当外施电压在由正变负的过零点附近时,球电极极性变为负,残留的正离子形成的电场与外施电场方向相同,增强了电场的强度。随着负半周电压值的增大,由放电产生的空间电荷所形成的电场与外施电场方向相反,使得合成电场强度减少,如图13右上方所示。当外施电压处于由正变负的过零点附近时,球电极又由负变为正,此时空间电荷产生的电场又将使得合成场强增大。

对于峰值为 U_m 的外施交流电压,当电压超过放电起始电压 U_{cr} 且经过一定放电时延 τ_{delay} 后将发生放电,如图14所示。

图14中,从放电起始到外施电压降为放电起始电压 U_{cr}^+ 的时刻 t_2 之间为有效放电时间 t_{effect} ,计算式由下式计算:

$$t_{effect} = \frac{1}{f} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{U_{cr}^+}{U_m} \right) - \tau_{delay} \quad (4)$$

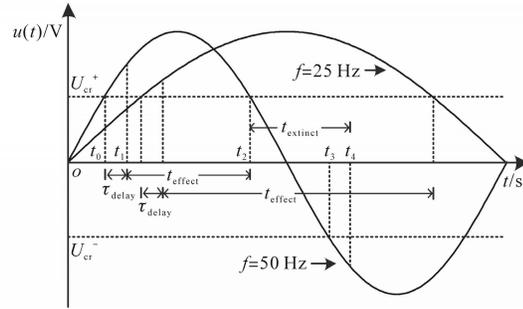


图14 不同频率下有效放电时间和放电熄灭时间
Fig.14 Effective discharge time t_{effect} and discharge extinguishing time $t_{extinct}$ under different frequencies

由图14可以看出,随着频率的降低, t_{effect} 随之增大。 t_2 到负半周放电起始时刻 t_4 之间的时间称为放电熄灭时间 $t_{extinct}$,计算式下式所示:

$$t_{extinct} = \frac{1}{2\pi f} \left(\arcsin \frac{U_{cr}^+}{U_m} + \arcsin \frac{U_{cr}^-}{U_m} \right) + 2\tau_{delay} \quad (5)$$

较低频率下半周的有效放电时间 t_{effect} 增加会使得正半周内积聚的正离子对电场的削弱时间增强,加剧了对正半周电场的削弱作用,从而不利于放电的发生。同时,放电熄灭时间 $t_{extinct}$ 的增加使得负半周残余负空间电荷有更多的时间进行流逝和消散,从而减弱了对正半周电场的增强作用以及提供有效电子的能力。外施电压频率的改变会影响电场的分布以及放电产生的空间电荷的消散与积聚,最终使得油纸绝缘沿面放电的放电量和脉冲重复率随外施电压频率的下降而降低。但是油纸绝缘沿面放电的平均放电量在部分频率呈上升的趋势,这是由于频率降低导致沿面放电的剧烈程度变弱,使幅值较小的放电量减少,从而使得平均放电量有上升的趋势。

4 结论

本文搭建了工频至低频下油纸绝缘局部放电试验平台,采用球板电极模型开展了由50 Hz降至0.1 Hz交流电压下气制油-纸绝缘沿面放电试验,获取不同频率下油纸绝缘沿面放电起始电压与起始电场强度,绘制局部放电相位 (PRPD) 图谱,并与传统矿物油-纸绝缘沿面放电特性进行对比分析。

1) 不同频率下,气制油-纸绝缘沿面放电的起始电压高于传统矿物油-纸绝缘的起始电压,这是由于气制油浸绝缘纸板的介电常数较小,从而导致放电的起始电压较高,起始放电场强也较高;

2) 各频率下,两种油浸纸板沿面放电正负半

周的最大放电量整体都呈现下降的趋势,但在不同频率段有上升趋势;相较于传统矿物油-纸绝缘,气制油-纸绝缘局部放电性能更好,相同的周期内局部放电数目更少;

3)各频率电压下,两种油-纸绝缘沿面放电正负半周的PRPD图谱轮廓基本一致,都呈现为山峰状,且气制油-纸绝缘图谱高度更高;随着外施电压频率的降低, $q_{\max}-\varphi$, $n-\varphi$ 和 $n-q$ 图谱轮廓整体保持一致,但分布范围出现变化。

参考文献

- [1] 刘振亚.特高压交流直流电网[M].北京:中国电力出版社,2014.
Liu Zhenya. UHV AC and DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [2] 张琳,张昌栋,张彬荣,等.面向未来高压直流互联的端对端电力电子拓扑[J].电气传动,2020,50(9):106-114.
Zhang Lin, Zhang Changdong, Zhang Binrong, et al. End-to-end power electronics topology for future high-voltage DC interconnection[J]. Electric Drive, 2020, 50(9):106-114.
- [3] 郭来佳,王国庆,徐帅,等.直流高压开关柜用无线电能传输系统优化研究[J].电气传动,2021,51(12):74-80.
Guo Laijia, Wang Guoqing, Xu Shuai, et al. Research on optimization of wireless power transmission system for DC high-voltage switchgear[J]. Electric Drive, 2021, 51(12):74-80.
- [4] 徐昀.国内变压器油市场分析与展望[J].石油商技,2009(3):46-49.
Xu Yun. Analysis and prospect of domestic transformer oil market[J]. Petroleum Business Technology, 2009(3): 46-49.
- [5] 马蕊燕,李俊峰,何军.国内外变压器油的发展现状与趋势[J].新疆石油科技,2010(2):75-77.
Ma Ruiyan, Li Junfeng, He Jun. The development status and trend of transformer oil at home and abroad[J]. Xinjiang Petroleum Technology, 2010(2):75-77.
- [6] 周远翔,周仲柳,郭绍伟,等.基于脉冲电流法的低频与工频电压下油中电晕放电特性对比研究[J].电工技术学报,2019,34(1):160-169.
Zhou Yuanxiang, Zhou Zhongliu, Guo Shaowei, et al. Comparative study on the characteristics of corona discharge in oil under low frequency and power frequency voltage based on pulse current method[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2019, 34(1):160-169.
- [7] 崔彦捷,曹沛,祝令瑜,等.局部放电作用下油浸绝缘纸板电老化特性[J].高电压技术,2019,45(9):2945-2953.
Cui Yanjie, Cao Pei, Zhu Lingyu, et al. Electrical aging characteristic of oil immersed pressboard under partial discharge activity[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2945-2953.
- [8] 于瑞,高波,胡广才,等.油纸绝缘针板沿面放电模型白斑发展过程及放电特性[J].高电压技术,2020,46(1):240-249.
Yu Rui, Gao Bo, Hu Guangcai, et al. Development of white mark on pressboard surface and change of discharge characteristic parameters in needle-plane model[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):240-249.
- [9] 李元,张冠军,梁钰,等.不同热老化程度下油纸绝缘沿面放电发展特性[J].高电压技术,2017,43(3):923-930.
Li Yuan, Zhang Guanjun, Liang Yu, et al. Evolutionary characteristics of surface discharge within oil-paper insulation under different thermally aged conditions[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):923-930.
- [10] 王健一,李金忠,张书琦.以天然气为原料的气制变压器油的典型性能分析[J].高电压技术,2016,42(9):2974-2979.
Wang Jianyi, Li Jinzhong, Zhang Shuqi. Typical performance analysis of gas-made transformer oil using natural gas material[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(9):2974-2979.
- [11] Lu W, Liu Q, Wang Z D, et al. Lightning impulse break down performance of an inhibited gas-to-liquid (GTL) hydrocarbon transformer oil[C]//2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Bled, 2014:1-4.
- [12] Daghra M, Wang Z D, Liu Q, et al. Experimental study of the influence of different liquids on the transformer cooling performance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2):588-595.
- [13] 贾国滨. GTL油浸纸板的电气性能研究[D].北京:华北电力大学,2017.
Jia Guobin. Research on electrical properties of GTL oil impregnated paperboard[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [14] Raymond W J K, Illias H A, Bakar A H A, et al. Partial discharge classifications: review of recent progress[J]. Measurement, 2015, 68:164-181.
- [15] 周远翔,周仲柳,沙彦超,等.交直流复合电压下油纸绝缘典型缺陷局部放电发展阶段评估[J].电工电能新技术,2018,37(6):50-57.
Zhou Yuanxiang, Zhou Zhongliu, Sha Yanchao, et al. Partial discharge evaluation of typical defects of oil-paper insulation under AC and DC combined voltage[J]. New Electrician and Energy Technology, 2018, 37(6):50-57.
- [16] 欧阳希,周淦,李雪丰,等.不同交直流复合电压下油浸绝缘纸微观结构及电气性能的变化规律分析[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7394-7404, 7512.
Ouyang Xi, Zhou Quan, Li Xuefeng, et al. Analysis of microstructure and electrical properties of oil-impregnated insulation paper under different AC/DC composite voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7394-7404, 7512.

收稿日期:2021-05-19

修改稿日期:2021-07-05