

纤维杂质对油纸复合绝缘局部放电特性影响研究

史 强,王睿晗,刘苏婕

(国网四川省电力公司营销服务中心,四川 成都 610065)

摘要:为研究纤维杂质对油纸绝缘局部放电特性的影响,搭建了直流油纸绝缘实验平台,观测了油中纤维杂质产生及成桥过程,就杂质成桥的动力学基础进行了分析,并对杂质影响下的油纸绝缘局部放电频数、平均放电量及最大放电量等特征参数进行了研究。结果表明,直流电压下纤维杂质在油中受电场力、重力、浮力及油黏性阻力作用。当杂质所在处场强大于 2.12×10^5 V/m时,纤维杂质以缓慢速度向高压电极运动,且沿电压梯度最大方向成桥;纤维杂质畸变电场可使油纸绝缘局部放电频数上升、放电量下降。进一步实验表明,纤维小桥可导致油隙内泄漏电流增加,引起局部发热,并使油中水分局部气化为微小气泡。直流电压下低电导率气泡承担较强电场,先于变压器油发生放电,宏观表现为更加密集且强度较低的局部放电。

关键词:直流电压;油纸绝缘;纤维杂质;局部放电

中图分类号:TM 854 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)03-0065-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240312

Influence of Cellulose Impurities on Characteristics of Partial Discharge in Oil-paper Composite Insulation

SHI Qiang, WANG Ruihan, LIU Sujie

(Marketing Service Center of State Grid Sichuan Electric Power Company,
Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:To investigate the influence of cellulose impurities on the characteristics of partial discharge (PD) in oil-paper insulation, a DC oil-paper insulation experimental platform is established. Processes including the generation and bridging of cellulose impurities in oil are observed, where the dynamic basis of bridging of cellulose impurities is analyzed. The characteristic parameters of PD in oil-paper insulation affected by cellulose impurities, including discharge frequency, average discharge magnitude and maximum discharge magnitude are studied. The results show that the cellulose impurities in oil under DC voltage are influenced by electric field force, gravity, buoyancy and oil viscous resistance. When the electric field strength is higher than 2.12×10^5 V/m, the cellulose impurities begins moving to high-voltage electrode at a slow speed and bridging along the maximum direction of voltage gradient. The distorted electric field of bridged impurities can cause an increase of PD frequency and a decrease of discharge magnitude. Further experiments show the cellulose bridge can increase the leakage current of oil gap, which leads to the local overheating and gasification of water contents in oil into tiny bubbles. Bubbles with low conductivity under DC voltage withstands stronger electric field, resulting in discharging before transformer oil and more concentrated PD with lower intensity.

Key words:DC voltage; oil-paper insulation; cellulose impurities; partial discharge

0 引言

油纸绝缘是一种典型的复合绝缘材料,其中:绝缘油具有良好的绝缘强度及导热性能,因此起着绝缘和散热的双重作用;绝缘纸(板)绝缘性能、吸油

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199720003N)

性能优异,且具有一定的机械强度。油与纸配合使用,可互相弥补各自缺点,显著增强整体绝缘性能^[1-2]。鉴于上述优点,油纸绝缘在电力电缆、电力变压器等设备中应用广泛。但在实际应用时,由于制造工艺、油处理环境、运行条件等因素的影响,油纸绝缘中常常会混入纤维、水分及金属颗粒等杂质。杂质的存在往往会影响油纸材料的绝缘性能,甚至

引起放电,使绝缘受到破坏^[3-6]。

截至目前,针对油纸绝缘材料中的杂质,国内外学者已开展了一系列的研究,其中大部分学者的研究对象为水分及金属颗粒杂质,研究手段多以实验为主,研究重点多为杂质对油纸绝缘放电特性的影响^[7-10]。其中,文献[11]研究了水分对换流变压器油纸绝缘放电特性的影响,认为变压器油中的水分溶解了低分子有机酸而具有强导电能力,绝缘纸板中的水分使纸板载流子浓度增大,以上原因使含水油纸绝缘材料的局部放电起始电压及击穿电压显著降低。文献[12]研究了直流电压下油中导电微粒引起的放电现象,认为导电微粒产生的局部电场畸变是引起放电的主要原因。除此之外,国内外众多学者就杂质引起的油纸绝缘放电机理进行了多种多样的解释,已有的解释包括杂质引起的电场畸变作用及热作用,但这些解释的合理性及适用性尚未得到验证^[13-14]。

另一个有待解决的问题是油纸绝缘材料内的杂质在电场作用下如何运动。分析电场作用下杂质的运动过程有助于解释杂质对放电的影响机制,同时也利于工程人员优化绝缘结构,从而尽可能消除杂质对材料绝缘性能带来的影响。

事实上,去除油纸绝缘杂质最有效的方法就是过滤,或从一开始就杜绝杂质掺入绝缘材料内部。但除上述水分及金属颗粒外,由绝缘材料本身产生的自生性杂质(如油纸绝缘中的纤维杂质)也大量存在于绝缘系统内,而这类杂质是无法单纯通过过滤去除的。因为纤维杂质由绝缘纸板表面产生,只要存在电场作用且场强超过一定值,纤维杂质就会在一段时间后出现。因此,诸如纤维杂质的自生性杂质相比于其他可滤除性杂质,对材料绝缘性能的影响更大。

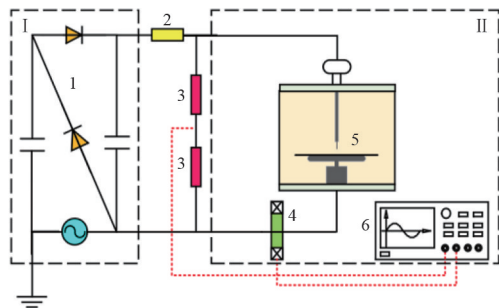
针对上述问题,下面首先理论分析了油纸绝缘材料内生性杂质——纤维杂质在电场作用下的运动规律,解释了纤维杂质成桥的力学基础。随后,实验研究了纤维杂质产生后对油纸绝缘模型泄漏电流的影响,并分析了纤维杂质引起油纸绝缘材料内发生局部放电的机理。

1 实验系统及研究方法

实验所用绝缘油为昆仑公司生产的 KI25X 型

变压器油。实验前使用真空加热装置及过滤装置对油进行脱气、脱水、过滤处理,使处理后的变压器油符合 IEC 60296:2020 标准^[15]。实验所用绝缘纸板由泰州魏德曼公司生产,纸板厚度为 0.5 mm。实验前首先将纸板剪裁为 100 mm×100 mm 的正方形试样,并在 60 ℃ 的环境下对纸板真空干燥 48 h。处理完成后将纸板置于真空实验腔内进行真空注油,注油完成后在 60 ℃ 的真空环境下进行 24 h 浸渍处理。

为研究直流电压下油纸绝缘纤维杂质,探究杂质在直流电压下的受力情况及其对油纸绝缘放电过程的影响,在屏蔽室内搭建了如图 1 所示的实验电路。为产生纤维杂质并研究其对局部放电特性的影响,实验采用了针-板电极油纸绝缘模型,其中针电极直径为 1 mm,油隙距离为 10 mm;板电极直径为 80 mm,厚度为 10 mm,倒角为 5 mm。模型两端施加直流电压,该直流电压由倍压电路产生,经电阻分压器测量。纤维杂质产生后会对油纸绝缘模型的局部放电特性产生影响,因此实验采用高频电流互感器对模型的局部放电脉冲波形、脉冲频数等信息进行了测量,最小测量值达 1 pC,测得的信号可同时传入示波器以及 Techimp 公司生产的 PD Check 局部放电检测设备中,并由计算机进行统计分析。



1-直流电源; 2-保护电阻; 3-电阻分压器;
4-高频耦合电流传感器(HFCT); 5-试样; 6-示波器

图 1 实验平台

为研究纤维杂质对油纸绝缘泄漏电流的影响,实验采用了板-板电极油纸绝缘模型,其中板电极直径为 50 mm,厚度为 10 mm,倒角为 5 mm,油间隙距离为 5 mm。模型内的纤维杂质由上一步实验提取并人为添加。

在测试泄漏电流时,选用 Keithley 6517A 静电计,其测量范围可达 $1 \times 10^{-17} \text{ A} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ A}$,误差率为 1%。同时,静电计内置的 1 kV 直流电源方便了绝缘电介质泄漏电流的测量,实验时通过屏蔽电缆将高压接到不锈钢电极上。实验数据通过 Labview 软

件进行实时测量与记录,采样速率为1次/min,通过 GPIB IEEE Std 488.2:1992^[16]总线实现高阻计与计算机的数据传输。根据 IEC 61620:1998^[17]及 IEC 60247:2004^[18]规定:在直流电压下测量介质电流时,由于介质内电荷向两极迁移,流经试品的电流将逐渐减少到一稳定值。图2为油纸绝缘模型泄漏电流随外施电压时间变化的关系曲线。实验结果表明,模型的泄漏电流在10 min后均呈现稳定趋势。因此,实验中读取10 min时的电流值作为稳态情况下流过试品的泄漏电流。

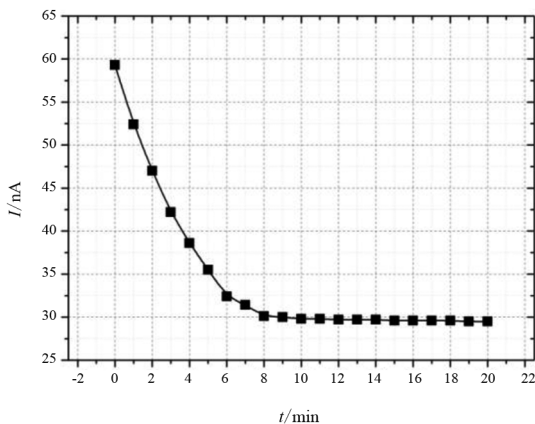


图2 油纸绝缘模型泄漏电流随外施电压时间变化曲线
(电场强度 1 kV/mm,油隙间距 5 mm,环境温度 25 ℃)

2 实验结果与分析

2.1 纤维杂质的产生及其对放电的影响

对油纸绝缘针-板电极模型施加 15 kV 正极性直流电压,当电压作用时间超过 108 min 后,绝缘纸板表面产生纤维杂质,随加压时间增加至 189 min,油隙内形成纤维小桥,如图3所示。

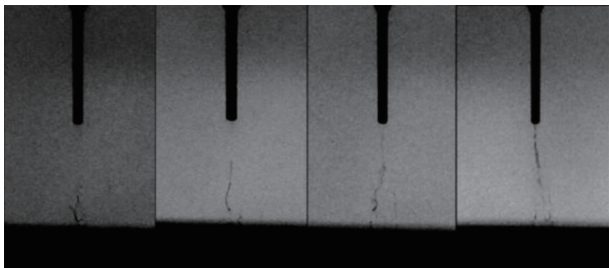


图3 纤维杂质的产生及成桥

纤维小桥产生后,采用阶梯升压法提高外施电压幅值,每次升压 1 kV,在 30 s 内完成,每级电压保持 10 min,并同步记录局部放电信息。当外施电压达到 27 kV 时模型内出现局部放电,10 min 内放电 8 次。由此可知,纤维杂质的产生并不是由放电引

起的,即便在低电压(场强)未出现放电的情况下,也可能有纤维杂质产生。

为探究纤维杂质产生的条件,在不同幅值的外施电压下对多组油纸绝缘针-板电极模型进行恒压实验,实验电压分别为 5 kV、10 kV、20 kV、25 kV 及 30 kV,实验时长为 4 h,每级电压下进行 3 组实验。图4所示为各个电压下纤维杂质产生时间。由实验结果可知,外施电压幅值越高(电极间电场强度越大),模型内纤维杂质产生时间越短。由此可以推测,纤维杂质的产生与绝缘纸板表面电场强度有关,纸板表面场强越大,纤维杂质产生越快。

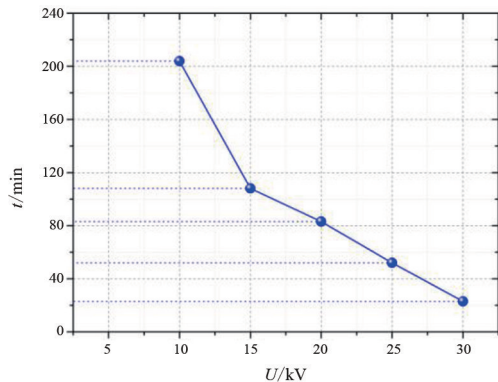


图4 各电压下纤维杂质产生时间

在研究纤维杂质对油纸绝缘放电过程的影响前,首先需要将前述实验中的纤维杂质滤出,并在烘干后进行密封保存。由前述实验可知,在 30 kV 外施电压下,油纸绝缘针-板电极模型内已出现局部放电,而该电压下纤维杂质的产生时间为加压后 23 min。因此实验时可设置两组试品,一组人为添加纤维杂质,样本分别记作 A1、A2、A3;另一组不做处理,样本分别记作 B1、B2、B3。之后对两组试品施加 30 kV 直流电压,并记录加压第 10 min 到第 20 min 这 10 min 内的局部放电信息。由于时段内纤维杂质不会由油纸材料本身产生,因此上述两组试品局部放电特性的差异即为纤维杂质引起。由表1可知,当油隙内存在纤维杂质时,油隙局部放电频率增加,而放电量明显减小。

2.2 纤维杂质在电场下的运动分析

由第2.1节实验结果可见,电场强度影响了纤维杂质的产生过程,即便未发生放电,只要电场强度超过一定值,也会有纤维杂质产生。由此推断,电场力在纤维杂质的形成过程中起重要作用。在分析电场作用下杂质的运动过程前,首先考虑均匀电场下单一介质所受的电场力。

表 1 有无纤维杂质情况下实验模型局部放电特性

组别	纤维杂质	频数/次	平均放电量/pC	最大放电量/pC
A1	无	11	107	154
A2	无	14	124	169
A3	无	9	102	161
平均	无	11	111	161
B1	有	23	105	147
B2	有	29	100	132
B3	有	34	87	123
平均	有	29	97	134

图 5 所示为一平行平板电容器(板-板电极), 电容量为 C , 极板面积为 S , 极间距离为 d , 极间介质的介电常数为 ε 。设极板 A、B 的电位分别为 U 和 0 , 分析极板 B 所受的电场力。

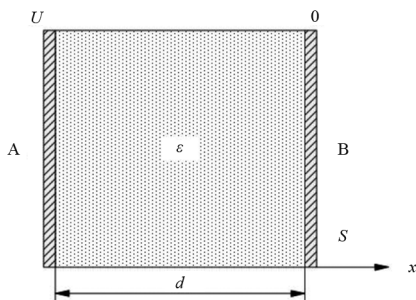


图 5 平行平板电容器

在分析极板 B 所受的电场力时, 可类比力学中假定受力物体在受力方向上发生微小的“虚位移”, 而假定 B 在电场力下沿 x 轴正方向发生虚位移, 并利用物体势能的空间变化率来计算电场力, 即:

$$\mathbf{F} = \frac{dW}{dx} \mathbf{e}_x \quad (1)$$

其中电容器电场能量

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{\varepsilon SEU^2}{2U} = \frac{\varepsilon SU^2}{2d} \quad (2)$$

因此,

$$\mathbf{F} = -\frac{\varepsilon SU^2}{2d^2} \mathbf{e}_x = -\frac{DE}{2} \mathbf{S} \mathbf{e}_x = -\frac{D^2}{2\varepsilon} \mathbf{S} \mathbf{e}_x \quad (3)$$

式中: \mathbf{e}_x 为 x 方向的单位矢量, 即表示该力沿 x 方向; E 为电场强度; D 为电位移矢量。

针对以上计算结果, 可从如下角度进行解释: 电场中每一个电位移管沿轴线方向受纵拉力, 而在垂直于轴线方向受侧压力, 单位面积纵拉力与侧压力数值相等, 为 $DE/2$ 。即电位移管在轴线方向有缩短趋势, 在垂直于轴线方向有向外扩张趋势。

在上述单一介质的基础上, 考虑如图 6 所示的

双层介质分界面电场力问题。

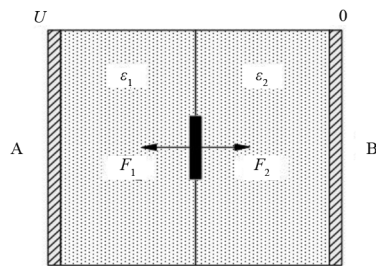


图 6 双层介质平行平板电容器

在图 6 中的介质分界面处沿电场方向做一根很短的电位移管, 其截面积为 ΔS 。电位移管左侧端面受到向左的拉力为

$$\mathbf{F}_1 = -\frac{D^2}{2\varepsilon_1} \Delta S \mathbf{e}_x \quad (4)$$

右侧端面受到向右的拉力为

$$\mathbf{F}_2 = \frac{D^2}{2\varepsilon_2} \Delta S \mathbf{e}_x \quad (5)$$

如若使电位移管的长度趋向于 0, 那么两种介质分界面量 ΔS 上所受的总电场力即为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \frac{D^2}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} \right) \Delta S \mathbf{e}_x \quad (6)$$

或分界面上单位面积所受的电场力为

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{F}}{\Delta S} = \frac{D^2}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1} \right) \mathbf{e}_x \quad (7)$$

那么对于图 7 中的油纸绝缘针-板电极模型而言, 由于变压器油的相对介电常数 ε_o 在 2.0~2.5 之间, 而油浸绝缘纸板的相对介电常数 ε_p 在 4.0~4.5 之间, 因此纸板表面纤维上侧所受电场力 f_1 指向 x 负方向; 纤维下侧所受电场力 f_2 指向 x 正方向。如果电场均匀, f_1 与 f_2 应该是一对大小相等、方向相反的力。但值得注意的是, 由于针电极附近电场线集中, 而电位移矢量与电场成正比, 因此 $D_1 > D_2$, 所以 $f_1 > f_2$ 。此时, 绝缘纸板表面纤维受到的合力向上。外施电压越高, 纤维受到的力越大, 当该力超过一定值后, 纤维即被扯断而成为漂浮在油中的自由纤维链。对自由纤维链在电场下受力情况的分析与前述相同, 自由纤维链在电场力作用下向针电极附近聚集, 最终形成如图 3 所示的纤维小桥。

在上述分析中仅考虑了电场力对纤维杂质的作用。事实上, 纤维杂质在油中除受电场力外, 还受重力 G 、浮力 f_b 及黏性阻力 f_v 作用, 且有

$$\mathbf{G} + \mathbf{f}_v = \mathbf{F} + \mathbf{f}_b \quad (8)$$

对刚刚脱离纸板进入变压器油的纤维杂质

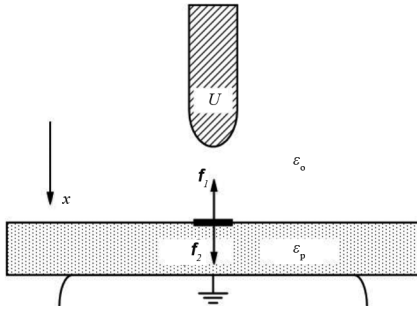


图7 纤维杂质受力分析

而言,由于体积小,可近似为球形,球半径为 $100\ \mu\text{m}$ 。纤维密度约为 $1.05\ \text{g}/\text{cm}^3$,纤维运动速度约为 $2 \times 10^{-6}\ \text{m}/\text{s}$,变压器油密度为 $0.89\ \text{g}/\text{cm}^3$, $25\ ^\circ\text{C}$ 下变压器油动力黏度约为 $1.9 \times 10^{-2}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。式(8)中 $G = 4.31 \times 10^{-8}\ \text{N}$, $f_v = 3.65 \times 10^{-8}\ \text{N}$, $f_b = 7.16 \times 10^{-11}\ \text{N}$,则有

$$F = \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2}\right) \Delta S}{2} (D_1^2 - D_2^2) = 0.66 \times 10^{-8}\ \text{N} \quad (9)$$

$$D = \varepsilon E, \text{ 那么 } E_1^2 - E_2^2 = 0.45 \times 10^{11}\ \text{V}/\text{m}。 \text{ 由于 } E_1^2 > E_2^2 - E_2^2 \quad (10)$$

由式(10)可得 $E > 2.12 \times 10^5\ \text{V}/\text{m}$ 。但值得注意的是,由于纤维杂质尺寸较小, E_1 、 E_2 数值相近,因此计算得到的电场强度值可能偏小。且在此电场下,虽然纤维受到的合力向上,但纤维运动速率仍然较慢,只有在非常接近强场区域时才会受到明显的电场力作用。

2.3 纤维杂质对放电过程的作用机制分析

交流电压下,当油间隙内存在高介电常数的纤维杂质时,与杂质串联部分油通道内的电场将被加强,进而引发油内放电。如若纤维杂质连成小桥,还会产生沿小桥的油隙击穿。类比交流情况,直流电压下纤维杂质对放电过程的作用机理也可从局部电场畸变及泄漏电流增大两个角度进行分析。

图8所示为板-板电极油隙模型在有无纤维杂质情况下的泄漏电流随测量时间变化曲线,油含水量分别为 $9.2\ \mu\text{g}/\text{L}$ 及 $27.4\ \mu\text{g}/\text{L}$,纤维添加量约为 $4\ \mu\text{g}$,测量电压为 $1\ \text{kV}$ 。由测量结果可见,在低含水量下,当油间隙内含有纤维杂质时,模型泄漏电流由无纤维杂质时的 $29.8\ \text{nA}$ 增加到 $63.5\ \text{nA}$,即纤维杂质较变压器油具有更大的电导。若仅由物质成分分析,纤维杂质的电导应介于变压器油与绝缘纸板之间,但事实上,由于纤维杂质的密度远小于绝缘纸板,

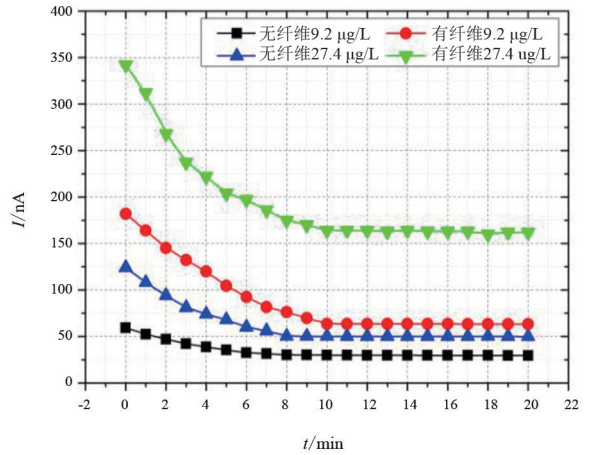
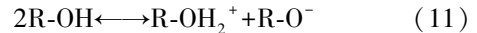


图8 不同含水量下有无纤维杂质时实验模型泄漏电流 (电场 $1\ \text{kV}/\text{mm}$,油隙间距 $2\ \text{mm}$,环境温度 $25\ ^\circ\text{C}$)

结构极为稀疏多孔,因此纤维素分子单体间的氢键极不稳定,原本葡萄糖单体间的缔合反应将逆向发生,如式(11)所示,使纤维杂质内出现大量本征载流子。由此,原本的杂质载流子加上新产生的本征载流子,使纤维杂质载流子浓度增加,进而使其电导增大。



另一方面,由于纤维杂质较为稀疏,其多孔结构会吸收更多的油中水分。在无纤维杂质情况下,当变压器油内含水量由 $9.2\ \mu\text{g}/\text{L}$ 增加到 $27.4\ \mu\text{g}/\text{L}$ 时,模型泄漏电流由 $29.8\ \text{nA}$ 增大到 $50.2\ \text{nA}$,增幅为 68.46% ;在有纤维杂质情况下,当变压器油内含水量如上变化时,模型泄漏电流由 $63.5\ \text{nA}$ 增加到 $164\ \text{nA}$,增幅达 158.3% 。即当油隙内存在纤维杂质时,含水量对油电导的作用显著增强。在极端情况下,油内有纤维、含水量为 $27.4\ \mu\text{g}/\text{L}$ 时,模型泄漏电流为 $164\ \text{nA}$,远高于无纤维、含水量为 $27.4\ \mu\text{g}/\text{L}$ 与有纤维、含水量为 $9.2\ \mu\text{g}/\text{L}$ 的泄漏电流之和。由此证明纤维杂质与水分在增大变压器油电导方面有正协同作用。此外,上述纤维分子逆缔合反应生成的本征离子也会溶于纤维杂质表面或内部的水膜中,进一步增大了油隙电导。

为探究纤维杂质对放电过程的作用机制,改变模型内变压器油的油压与纤维杂质含量,研究在不同液体静压力、不同纤维含量下板-板电极带纤维杂质油隙模型的局部放电特性。在控制油压时,采用如图9所示的气动油缸结构。

图9中油缸左侧充满变压器油,右侧充满氮气,油气之间有活塞格挡。采用该结构一方面可

以精确调节油压,另一方面可保证油气隔离,防止油中混入外界气体。实验时控制油压为 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa 及 0.4 MPa,控制纤维含量为 2 μg 、4 μg 、6 μg 、8 μg 及 10 μg ,测量带纤维杂质油隙模型的局部放电起始电压,实验结果如图 10 所示。

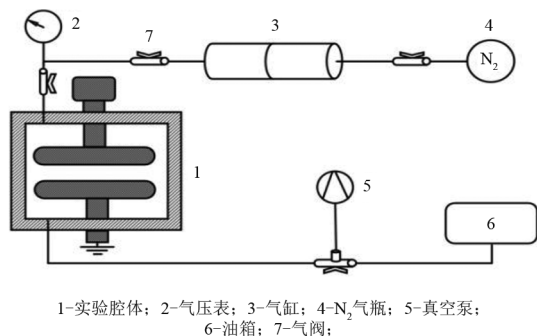


图 9 油压实验气路平台

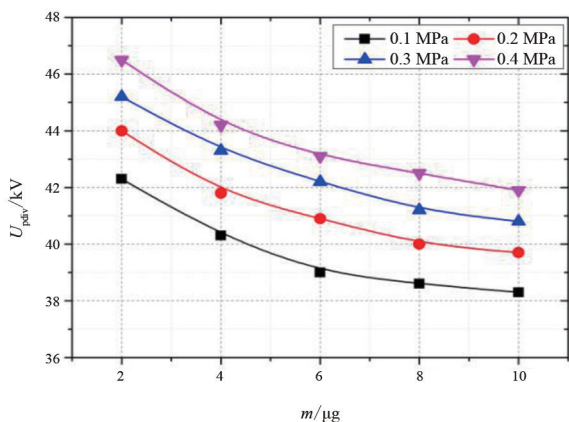


图 10 不同油压下局部放电起始电压随纤维质量变化曲线

由图 10 可见,当油压在 0.1~0.4 MPa 的范围内变动时,油纸绝缘模型局部放电起始电压呈现随油压升高而升高的趋势。值得注意的是,在上述油压下,当板-板电极模型间无纤维杂质时,油隙并不出现局部放电现象,电压一旦达到足够幅值,油隙直接击穿。由于油压直接影响的是油内微气泡体积,进而影响微气泡击穿电压。由此可知,对无纤维杂质的模型而言,油隙内不存在足以引起局部放电的微气泡,因此油压无论如何改变也不会出现局部放电现象。而对有纤维杂质的模型而言,油隙内存在气泡,因此不同油压下模型局部放电起始电压不同。综上所述,油隙内纤维杂质的存在使油隙内产生微气泡。

由于纤维杂质具有较高的电导,直流电压下油隙内的泄漏电流将大大增加。外施电压越高,泄漏电流的增加越明显,带来的一个显著问题就是泄漏电流引起的局部发热。由此可以对直流电压下纤维杂质对放电过程的作用机制进行如下解释:当变压器油中含

有纤维杂质时,水分在杂质周围堆积;在泄漏电流加热作用下,水分局部气化速率增大并大于水分在油中的溶解速率,这将在纤维杂质周围产生大量微小气泡;由于这些气泡的成分为纯净的水蒸气,因此具有较高的电阻率;直流电压下,根据复合介质分压规律,上述气泡将承担较大直流电压,而气泡的击穿电压较低,因此大量水蒸气气泡将先于变压器油发生放电,使放电频率增加;另一方面,温度升高,将使气泡击穿电压降低。因此在第 2.1 节的实验结果中,局部放电平均放电量与最大放电量均出现下降。

3 结 论

上面理论分析了油纸绝缘内自生性纤维杂质在电场作用下的运动规律,实验研究了纤维杂质产生后对油纸绝缘模型泄漏电流的影响,探究了纤维杂质引起油纸绝缘材料内发生局部放电的机理,得到如下结论:

1)纤维杂质在油中受电场力、自身重力、浮力及液体黏性阻力作用。当纤维所处场强大于 $2.12 \times 10^5 \text{ V/m}$ 时,纤维杂质以缓慢速度向高压电极运动,且只有在非常接近强场区域时运动速度才会明显增大。

2)纤维杂质与水分在增大变压器油电导方面有正协同作用。稀疏纤维分子逆缔合反应生成的本征离子也会溶于纤维杂质表面或内部的水膜中,进一步增大了油隙电导。

3)纤维杂质使油隙内的泄漏电流增加,进而引起局部发热,并导致水分局部气化,产生大量微小气泡。直流电压下气泡承担较大电压,先于变压器油发生放电,宏观表现为油隙模型局部放电特性的改变。

参考文献

- [1] 于钦学,印昌容.油纸绝缘直流局部放电的研究[J].变压器,1998(5):17-20.
- [2] 周远翔,沙彦超,聂德鑫,等.交直流复合电压下油中局部放电的起始过程[J].高电压技术,2012,38(5):1163-1171.
- [3] SARATHI R, KOPERUNDEVI G. Investigation of partial discharge activity of single conducting particle in transformer oil under DC voltages using UHF technique [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2009, 3(5): 325-333.

- [4] 董明,刘媛,任明,等.水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究[J].高电压技术,2014,40(11):3403-3410.
- [5] 刘凯,王鹏,王伟.直流电场下变压器油中电场分布特性[J].电网技术,2015,39(6):1714-1718.
- [6] 周远翔,沙彦超,陈维江,等.变压器油与绝缘纸板电导特性研究[J].电网技术,2013,37(9):2527-2533.
- [7] 杨雁,杨丽君,徐积全,等.用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J].高电压技术,2013,39(2):336-341.
- [8] 廖瑞金,唐超,杨丽君,等.电力变压器用绝缘纸热老化的微观结构及形貌研究[J].中国电机工程学报,2007,27(33):59-64.
- [9] 廖瑞金,郭沛,周年荣,等.水分和老化对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1407-1415.
- [10] 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.
- [11] MORSHUIS P H F, SMIT Johan J. Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2):328-340.
- [12] FROMM U. Interpretation of partial discharges at dc voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(5):761-770.
- [13] OKABE Shigemitsu, UETA Genyo, WADA Haruhisa, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5):1649-1656.
- [14] OKABE Shigemitsu, UETA Genyo, WADA Haruhisa, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of oil-impregnated insulating material used in oil-immersed power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4):1225-1233.
- [15] Fluids for electrotechnical applications - Mineral insulating oils for electrical equipment: IEC 60296:2020 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/61025>.
- [16] IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for Use with IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation: IEEE Std 488.2-1992 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/213762>.
- [17] Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance - Test method: IEC 61620:1998 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/5671>.
- [18] Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity: IEC 60247:2004 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/1150>.

作者简介:

史强(1986),男,高级工程师,从事电测量技术研究工作;

王睿晗(1986),女,工程师,从事电测量技术研究工作;
刘苏婕(1990),女,工程师,从事电测量技术研究工作。

(收稿日期:2023-10-19)

(上接第64页)

- [3] 宋建成,王雪,吝伶俐,等.基于无变压器型混合有源滤波器的快速重复控制策略的研究[J].高电压技术,2019,45(7):2037-2045.
- [4] 周勤勇,张彦涛,刘增训,等.基于暂态最高电压约束的直流整流站技术要求[J].高电压技术,2020,46(6):2057-2063.
- [5] 宋世旗,张代润,郭宛鑫,等.谐波电压引起HVDC系统换相失败的风险评估[J].电网技术,2021,45(11):4505-4511.
- [6] 邵思语,黄振琳,刘永强,等.基于交流系统非特征谐波的HVDC换相失败风险评估及抑制策略[J].电网技术,2019,43(10):3466-3476.
- [7] 王峰,刘天琪,周胜军,等.谐波对HVDC系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4888-4894.
- [8] 钟济群. ± 1100 kV 特高压直流输电系统缓波前电磁暂态特性研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [9] 刘磊,李小鹏,张纯,等. ± 800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过电压分析[J].四川电力技术,2023,46(2):59-63.
- [10] 张万荣,黄莹,苟锐锋,等. ± 800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计关键问题研究[J].南方电网技术,2009,3(6):35-39.
- [11] 刘守豹,王大兴,曾宏,等.特高压直流极线与接地极线路同杆架设雷电过电压特性分析[J].电瓷避雷器,2019(4):94-98.
- [12] 电力行业高压直流输电技术标准化技术委员会. ± 800 kV 高压直流输电系统成套设计规程: DL/T 5426—2020[S].北京:中国电力出版社,2021.

作者简介:

罗东辉(1992),男,博士,研究方向为防雷接地及过电压等。

(收稿日期:2024-01-17)