

# 不同含水量油纸绝缘的交直流空间电荷特性研究

周远翔<sup>1,2</sup>, 薛磊<sup>1</sup>, 黄欣<sup>2</sup>, 张云霄<sup>2</sup>, 滕陈源<sup>2</sup>

(1. 新疆大学 电气工程学院 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风光储分室, 新疆乌鲁木齐 830047; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系 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, 北京 100084)

**摘要:** 换流变压器在正常运行过程中, 水分会导致油纸绝缘电气性能下降并加速其老化, 导致寿命下降和绝缘击穿。为研究水分对油纸绝缘交直流复合电压下空间电荷特性与击穿特性的影响, 制备不同含水量的油纸绝缘试样, 利用交直流复合电压下空间电荷测量系统, 得到了交流、直流及交直流复合电压形式下水分含量对油纸绝缘空间电荷特性的影响规律, 同时研究了不同水分含量试样在不同电压类型下的击穿特性。结果表明: 交直流复合电压下油纸绝缘中的电场畸变率大于直流和交流电压下的电场畸变率; 随着直流分量的增加, 较高含水量试样的电气强度增加幅度明显低于较低含水量试样, 低含水量试样的电气强度受直流电压分量影响而高于高含水量试样。

**关键词:** 含水量; 交直流复合; 油纸绝缘; 空间电荷

中图分类号: TM403.3; TM215 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)02-0057-10

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.02.008

## Investigation on AC and DC Space Charge Characteristics of Oil-paper Insulation with Different Water Content

ZHOU Yuanxiang<sup>1,2</sup>, XUE Lei<sup>1</sup>, HUANG Xin<sup>2</sup>, ZHANG Yunxiao<sup>2</sup>, TENG Chenyuan<sup>2</sup>

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

**Abstract:** During the normal operation of converter transformer, moisture will cause the decline of the electrical performance of oil-paper insulation and accelerate its ageing, resulting in a decrease of life and insulation breakdown. In order to study the influence of moisture on the space charge characteristics and breakdown characteristics of oil-paper insulation under AC and DC composite voltage, we prepared oil-paper insulation samples with different water content, then we used space charge measurement under AC and DC composite voltage to get the influence of moisture content on the space charge characteristics of oil-paper insulation under the voltage forms of AC, DC, and AC and DC composite voltage, and studied the breakdown characteristics of samples with different moisture contents under different voltage types. The results show that the electric field distortion rate of oil-paper insulation under AC and DC composite voltage is greater than that under DC and under AC electric field; as the DC component increases, the increase amplitude of breakdown voltage of the samples with higher water content is significantly lower than that of samples with lower water content, and the electric strength of samples with low water content is more affected by the DC voltage component than that of samples with high water content.

收稿日期: 2021-03-10 修回日期: 2021-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902704); 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)(2019E0236)

作者简介: 周远翔(1966-), 男(汉族), 福建莆田人, 教授, 主要从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作。

**Key words:** water content; AC and DC composite; oil-paper insulation; space charge

## 0 引言

淮东-皖南±1 100 kV特高压直流输电工程的正式投运,意味着我国在特高压直流输电领域跨入新的历程<sup>[1-2]</sup>。换流变压器是特高压直流输电工程中最核心、最关键的设备之一。相较于传统的电力变压器而言,换流变压器具有更特殊的绝缘结构和更复杂的运行工况,因此其运行的可靠性直接决定着整个系统的稳定<sup>[3-4]</sup>。

在实际工况下,油纸绝缘作为换流变压器的主绝缘,其承受了交流、直流、交直流复合等多种形式电压的共同作用,运行工况十分复杂<sup>[5-6]</sup>。在交流电场下因电场极性呈周期性变化,电介质内部的空间电荷反复注入与抽出,导致在试样内部不容易产生电荷积聚;而在直流电场的作用下,载流子在试样内部定向移动更容易产生空间电荷的积聚,进而引起绝缘介质内部电场发生畸变,加速绝缘材料的老化,降低其绝缘寿命<sup>[7-8]</sup>。与此同时,换流变压器在长期运行过程中,油纸绝缘承受电、热、机械等多种应力作用,当材料本身逐步发生降解或因潮气渗入变压器内部引起变压器水分含量增加时,在电场的作用下,水分子的迁移分解会进一步加速绝缘材料的老化,导致油纸绝缘寿命的缩短<sup>[9-10]</sup>。文献[11]表明,在换流变压器长期运行过程中,在正常工况下,油纸绝缘的水分含量应小于1%,而变压器经多年运行后,油纸绝缘经过多年的老化,最终的水分含量远大于1%。因此研究水分对油纸绝缘空间电荷的影响,可为换流变压器的绝缘设计提供理论和试验依据,对特高压直流输电工程的长期稳定运行具有重要意义<sup>[12]</sup>。

目前,国内外诸多学者对电介质空间电荷特性进行了大量的研究<sup>[13-15]</sup>。黄若栋等<sup>[16]</sup>对复合15 kV/mm等分量电场下的空间电荷特性进行了研究,发现在交直流复合电场下油纸绝缘内部空间电荷积聚明显,且以负极性空间电荷为主,而交流电场下空间电荷积聚不明显;周远翔等<sup>[17]</sup>研究了油纸绝缘的含水量在热老化过程中对空间电荷特性的影响,得出了增加水分含量在一定范围内会加速空间电荷达到稳态,超出范围则会减缓;廖瑞金等<sup>[18]</sup>对换流变油纸绝缘的交直流击穿特性进行了研究,结果表明油纸绝缘的电气强度随着交流分量的降低而迅速上升;HAO Miao等<sup>[19]</sup>探究了工频下的空间电

荷特性,结果发现交流电压下空间电荷的积聚量明显小于直流电压下空间电荷的积聚量;ZHU Yuanwei等<sup>[20]</sup>研究了不同频率下的空间电荷特性,发现随着频率的增加,电极附近的空间电荷密度也随之增大,从而导致击穿电压的降低。有研究报道了水分对直流电场下油纸绝缘空间电荷的影响,但关于水分对交直流复合电场下油纸绝缘空间电荷影响的研究鲜有报道。

本研究搭建交直流复合电压下空间电荷测量平台,对油浸纸的空间电荷特性进行测量并在此基础上开展交流、直流及交直流复合电压击穿测试,对油浸纸的空间电荷特性和击穿特性进行讨论分析,系统地剖析复合电压下空间电荷的迁移规律,及空间电荷特性对绝缘击穿的影响,为后期换流变油浸纸绝缘缺陷分析、绝缘配合的优化提供试验和理论参考。

## 1 试验

### 1.1 样品的预处理

本研究选用的绝缘纸为魏德曼电力绝缘有限公司生产的普通植物纤维绝缘纸,厚度为250 μm;变压器油选用克拉玛依变压器油。油浸绝缘纸试样制备具体步骤如下:

(1)绝缘纸预处理:将绝缘纸裁剪成尺寸为60 mm×60 mm的正方形纸片,然后放入105℃真空干燥箱中真空干燥24 h,干燥结束后取出部分纸样作为对照组试样,将剩余绝缘纸分成3组置于温度为40℃、湿度分别为40%、50%、60%的恒温恒湿箱中晾置,使每张纸吸水饱和,制备3种不同水分含量的样品。

(2)变压器油预处理:选用孔径为0.2 μm的滤膜对变压器油进行抽滤,除去变压器油中的水分和杂质后,放入80℃真空干燥箱中真空干燥48 h,干燥结束后将真空干燥箱温度降至室温,真空状态下自然冷却平衡24 h,测量油中微水含量,确保绝缘油的含水量低于5 mg/L,达到GB/T 7595—2017的要求。

(3)真空浸油处理:将步骤(1)中处理好的不同水分含量的绝缘纸放入步骤(2)中处理好的变压器油中,在40℃环境下进行真空浸油24 h,浸渍结束后将温度降至30℃,并在真空状态下自然冷却平衡

48 h, 然后测量油中微水含量, 根据 Oommen 油纸水分平衡曲线<sup>[21]</sup>, 配置出含水量分别为 1% (对照组)、3%、5%、7% 的油纸绝缘样品。

(4) 样品保存: 将制备完成的样品放置在玻璃干燥器中密封保存。

### 1.2 交直流空间电荷测试平台

本研究在室温下进行油浸纸空间电荷的测量, 测量空间电荷采用的是最常用的电声脉冲 (pulsed electro-acoustic, PEA) 法。传统 PEA 空间电荷测量系统是针对直流电压下的测量而设计的, 本课题组在传统 PEA 测量系统的基础上, 构建了适用于交直流复合电压下的 PEA 空间电荷测量系统<sup>[22]</sup>, 该系统由交流电源、试验用变压器、高压直流电源、脉冲发生器、保护电阻、PEA 单元、高性能示波器和计算机组成, 原理图如图 1 所示。

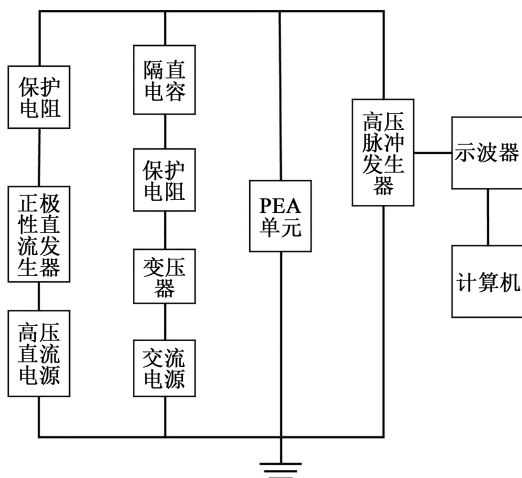


图1 交直流空间电荷测量系统原理图  
Fig.1 Schematic diagram of AC/DC space charge measurement system

为了模拟换流变压器阀侧绕组在实际工况中承受的电场环境, 本研究设置了交直流复合电场为测试环境, 还设置了交流与直流电场作为对照试验组。交流与直流电场强度均为 20 kV/mm, 交直流复合电场为交流、直流按 1:1 比例叠加, 电场分量均为 10 kV/mm。极化电压  $U_{pol}$  的表达式为式(1)。

$$U_{pol} = U_{DC} + \sqrt{2} U_{AC} \sin\theta \quad (1)$$

式(1)中:  $U_{AC}$  为正弦波幅值的有效值;  $\theta$  为相位角;  $U_{DC}$  为直流偏置量, 相应的波形如图 2 所示。

交流电源与试验用变压器为系统提供稳定的 50 Hz 高压交流电源, 直流电源提供正极性电压, 脉冲发生器能产生脉冲宽度为 5 ns, 振幅为 400 V, 重

复频率为 1 kHz 的脉冲, 示波器最大采样频率为 6.25 GS/s, 存储深度为 125 MS, 能够满足交直流空间电荷测量的巨大数据存储需求。

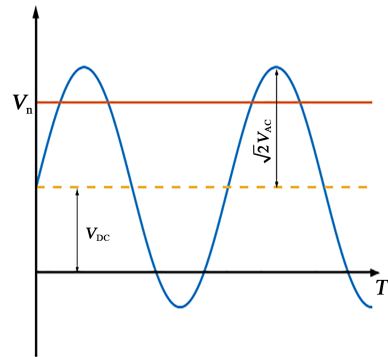


图2 交直流复合电压波形图  
Fig.2 AC/DC composite voltage waveform

本次试验中, 在一个交流电压周期内可获得 20 个 PEA 信号, 即相邻两个信号之间的相位差约为  $18^\circ$ , 为了采集足够的数据进行平均, 对每个测量点在 60 个交流电压周期内进行连续重复数据采集。为了方便研究分析, 选取其中 8 个不同相位的空间电荷进行研究。

### 1.3 交直流复合电压击穿平台

为了研究水分含量对于油纸绝缘性能的影响, 本研究还设计了不同水分含量油纸绝缘在不同形式电压下的击穿试验。根据特高压换流变压器阀侧绕组承受的电压类型, 试验电压选择为纯交流、纯直流、交直流 1:1 复合电压 3 种形式。图 3 为交直流击穿系统示意图, 其中  $R_1$ 、 $R_2$  为保护电阻,  $C_1$  为隔直电容,  $R_H$ 、 $C_H$  为阻容分压器高压臂电阻、电容,  $R_L$ 、 $C_L$  为阻容分压器低压臂电阻、电容。

对油纸绝缘试样进行击穿试验时, 参照 GB/T 1408.1—2016<sup>[23]</sup> 和 GB/T 1408.2—2016<sup>[24]</sup>, 输出电压

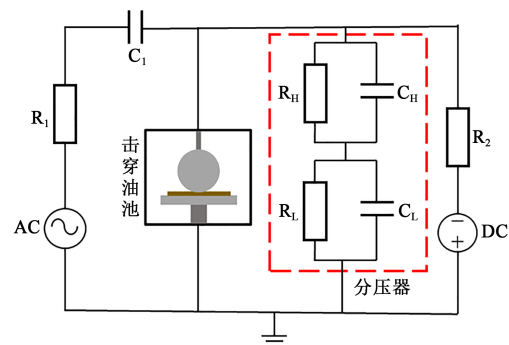


图3 交直流空间击穿系统示意图  
Fig.3 Schematic diagram of AC/DC space breakdown system

从0 kV开始,采用连续升压法,交/直流击穿试验以1 kV/s的升压速率升压至击穿,记录下最大击穿电压值;进行交直流1:1复合击穿试验时,交流和直流电压同时以500 V/s的升压速率同步升压至样品击穿,记录下交流和直流在击穿时电压的最大值。击穿试验在30℃环境下进行。考虑到击穿试验的分散性和随机性,每组试样进行多次试验,从中选取15次试验数据进行Weibull数据处理分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 交流电压下空间电荷特性

图4为不同含水量油纸绝缘在交流电压下0 s时刻和极化后的空间电荷分布图,其中图4(d)、(e)为极化中发生击穿前的一个波形,图中虚线所指的位

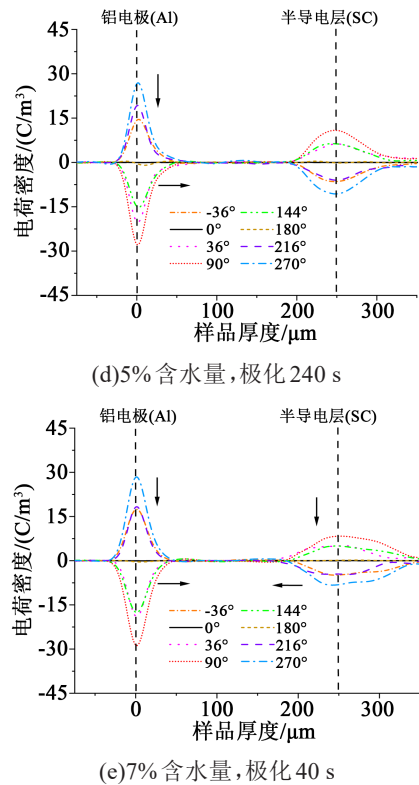
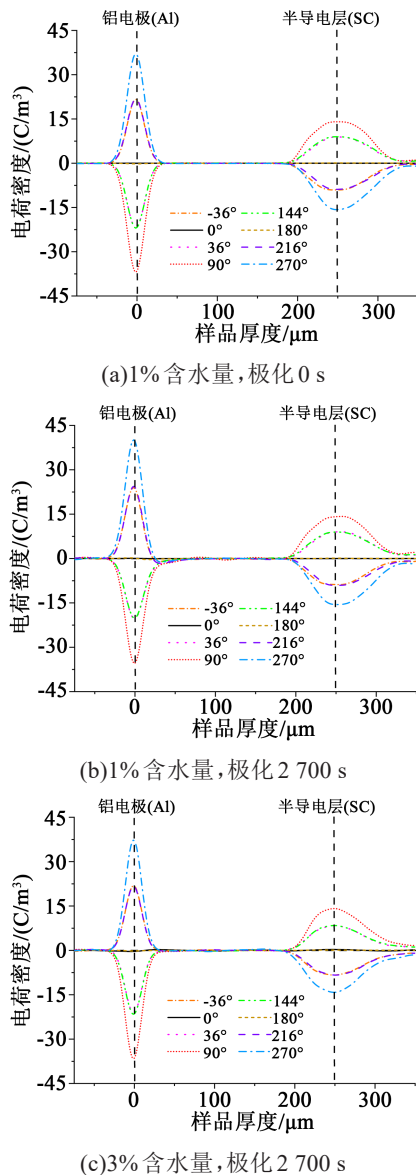


图4 交流电压油纸绝缘的空间电荷分布  
Fig.4 Space charge distribution of oil-paper insulation under AC voltage

置为电极与试样之间的界面,箭头所指的是不同相位上空间电荷的变化趋势。因为不同含水量试样在0 s时刻的波形图十分接近,所以选取了1%含水量油纸绝缘的电荷分布图作为未极化的参考图,即图4(a)。

对比图4(a)、(b)可以看出,在0 s时刻,90°/270°、36°/144°、0°/180°、-36°/216°两两相位电荷密度曲线相互对称,图4(b)中-36°、216°、270°相位电荷密度峰值略微增大,而36°、90°、144°的几个相位电荷密度峰值略微减小,这表明随着极化时间的增加,各相位出现了负极性电荷的注入;对于-36°/144°、0°/180°、36°/216°而言,在极化前后,其电荷密度曲线几乎重合,且不随着时间的变化而变化,这表明在极化过程中电荷变化不明显。从图4(c)可以看出,在极化2 700 s后,电荷密度曲线明显不对称,而3%含水量试样与1%含水量试样极化过程类似。

电场畸变率代表了在绝缘纸内部出现畸变的局部电场的畸变程度,其计算方法为式(2)。

$$\Delta E = \frac{E_{\max} - E_{\text{av}}}{E_{\text{av}}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: $\Delta E$ 即为所求得电场畸变率; $E_{\max}$ 内部出现畸变的局部电场产生的最大电场强度,即为 $E(x, t)$ 的最大值; $E_{\text{av}}$ 为平均电场强度。

从图4(d)、(e)可以看出,5%、7%含水量油纸绝缘极化后的空间电荷分布较为类似。铝电极附近有明显的电荷积聚,5%含水量试样的电荷密度峰值下降较大,90°相位电场畸变最大,达到了42.7%;7%含水量的油纸绝缘半导体层附近电荷密度峰值下降幅度较大,270°相位电荷密度从-11.6 C/m<sup>3</sup>下降到-7.9 C/m<sup>3</sup>,半导体层附近有明显的电荷积聚,且逐渐向试样内部迁移。相较于图4(b)、(c)而言,随着水分含量的增加,同一相位处空间电荷密度峰值下降加剧,电荷积聚更加明显,电荷峰值向试样内部移动更加明显。

为了更直观地对比交流电压极化过程中空间电荷的变化,选取了90°相位空间电荷波形的变化趋势图,如图5所示。观察图5(a)可以看出,在极化过程中1%含水量油纸绝缘铝电极处的电荷密度峰值略微下降,出现少量电荷注入,半导体层附近无明显变化;观察图5(b)可以看到,3%含水量试样的电荷密度变化较小;图5(c)中铝电极处电荷密度峰值明显下降,下降量为4.79 C/m<sup>3</sup>,铝电极附近出现了明显的同极性注入且峰值逐步向试样内部移动,同样半导体层处电荷密度峰值也逐步下降;对比7%含水量试样的变化趋势,可以观察到两电极处电荷密度峰值都呈现逐步减小的趋势,且电极附近都有正极性电荷注入的现象发生,逐步向试样内部移动,试样内部出现电荷积聚。

### 2.2 交直流复合电压下空间电荷特性

图6为不同含水量油纸绝缘在交直流复合电压下0 s时刻和极化后的空间电荷分布图。在交直流复合电压下,由于施加了一定量的正极性直流分量,空间电荷的波形不再对称,位于正半周期的相位多于位于下半周期,所选相位点上只有270°位于下半周期,对于270°来说,铝电极为阳极,半导体层为阴极,对于其他相位点来说,则铝电极为阴极,而半导体层为阳极。铝电极(Al)和半导体层(SC)分别表示上、下电极材料。从图6(a)可以看出,铝电极只有270°相位的电荷密度峰值处于电荷密度的正半轴,其余相位皆位于负半轴,且峰值按照-36°/216°、0°/180°、36°/144°、90°相位依次增大,-36°/

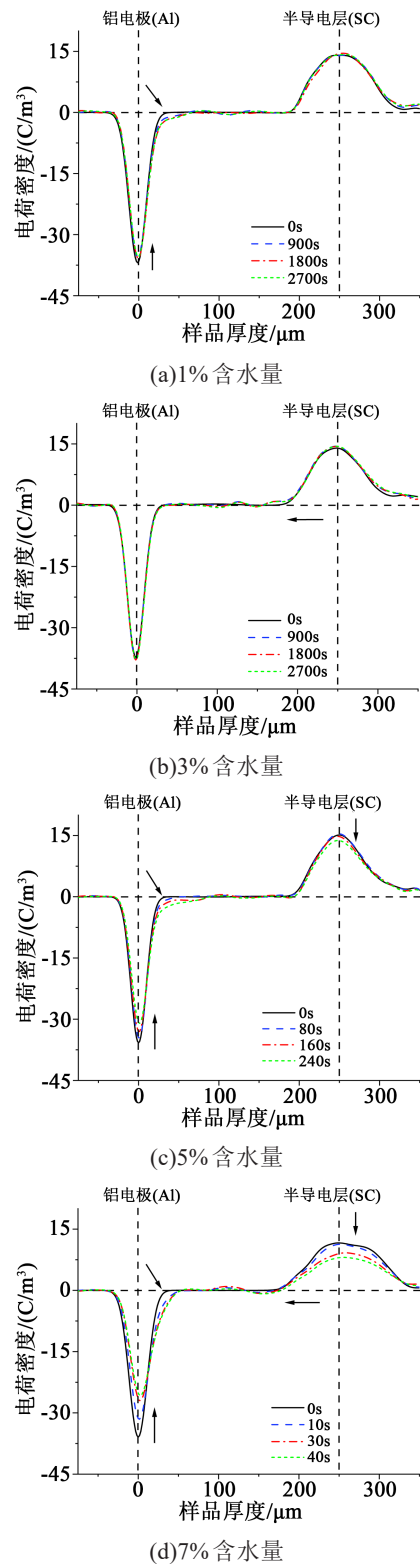
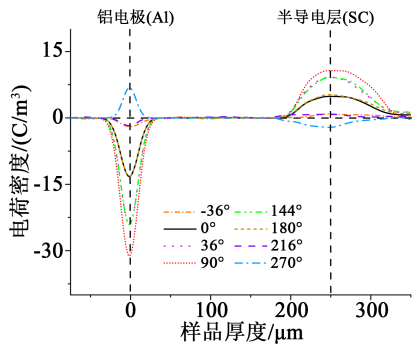


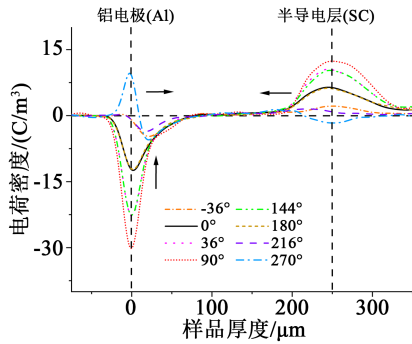
图5 交流电压90°相位处油纸绝缘的空间电荷分布  
Fig.5 Space charge distribution of oil-paper insulation at 90° phase of AC voltage

216°、0°/180°、36°/144°相位的电荷密度曲线近似重合;从图6(b)可以看出,在极化2 700 s后,铝电极

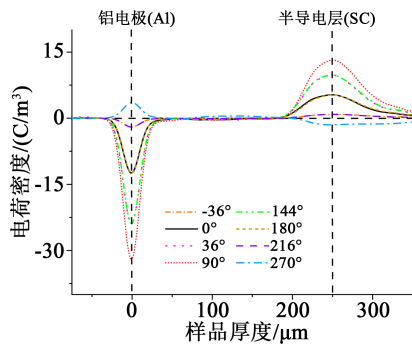
处 36°/144°、90°相位的电荷密度峰值明显降低，且在铝电极附近有明显的同极性电荷积聚，相反的是，-36°/216°、270°相位的峰值显著提高，270°相位的铝电极附近有异性电荷积聚，各相位的峰值位



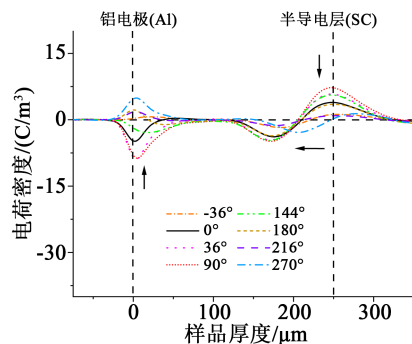
(a)1%含水量,极化0 s



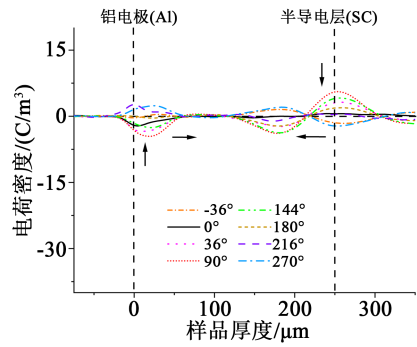
(b)1%含水量,极化2 700 s



(c)3%含水量,极化2 700 s



(d)5%含水量,极化2 030 s



(e)7%含水量,极化80 s

图6 交直流复合电压油纸绝缘的空间电荷分布

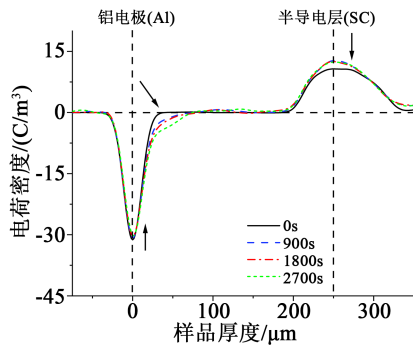
Fig.6 Space charge distribution of oil-paper insulation under AC/DC composite voltage

置逐渐向试样内部移动；半导体层处各相位的电荷密度峰值逐渐增大；两极附近有明显的同极性电荷向试样内部积聚。从图6(c)可以看出，3%含水量试样无明显电荷积聚。从图6(d)、(e)可以看出，5%、7%含水量试样在交直流复合电压下的极化过程相似。

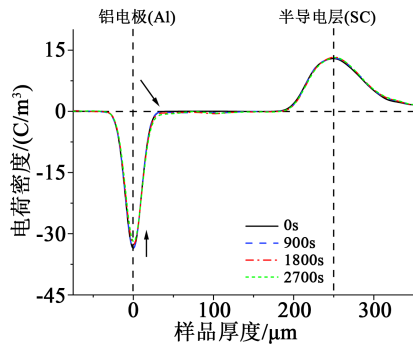
从图6可以看出极化前后，在铝电极处各相位的电荷密度曲线发生了较大的变化，各相位上电荷密度峰值均发生了大幅下降，5%含水量中90°相位下降最大，下降幅度达到了74.75%，峰值位置向试样中间移动，-36°、180°、216°相位电荷密度峰值极性发生变化，峰值位置也均向对侧移动；半导体层处各相位的电荷密度曲线表现出了峰值下降的趋势，电荷密度峰值的大小及位置发生了改变，且在半导体层附近出现了明显的异性电荷积聚峰，同时各相位曲线不再发生重合，半导体层附近各相位均出现了明显的异性空间电荷积聚现象。

图7为不同含水量试样在交直流1:1电压下90°相位的空间电荷分布。从图7(a)可以看到，1%含水量试样中铝电极附近有明显的同极性电荷积聚，半导体层处空间电荷峰值明显上升；从图7(c)、(d)可以看出，5%含水量和7%含水量试样的空间电荷峰值在两电极处都有明显下降，同时电荷积聚现象较为明显；图7(b)中3%含水量试样的空间电荷波形无明显变化。对比图7可以看出，随着水分含量的增加，空间电荷积聚出现先减小后增大的趋势，说明增加一定量的水分，有利于空间电荷达到平衡状态，当继续增加水分含量，则会加剧空间电荷的积聚。

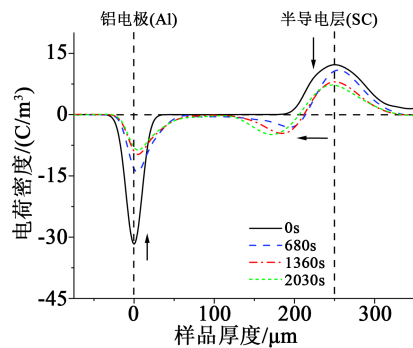
图8为交直流复合电压下90°相位处的电场分



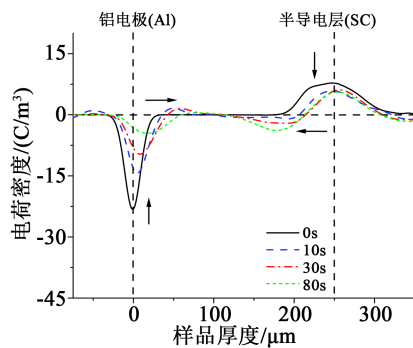
(a)1%含水量



(b)3%含水量

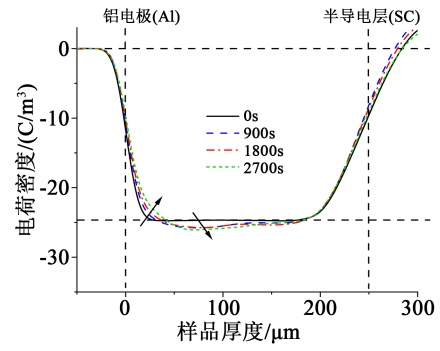


(c)5%含水量

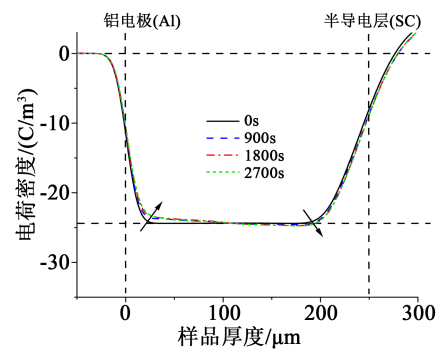


(d)7%含水量

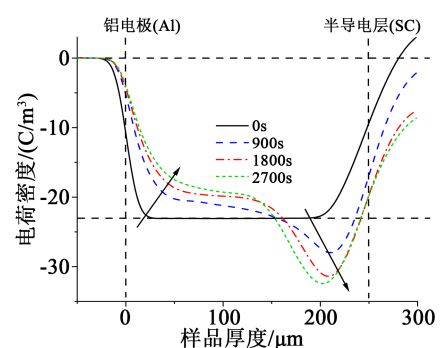
图7 交直流复合电压90°相位处油纸绝缘的空间电荷分布  
Fig.7 Space charge distribution of oil-paper insulation at 90° phase of AC/DC composite voltage



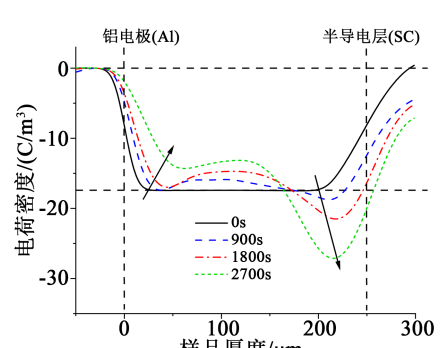
(a)1%含水量



(b)3%含水量



(c)5%含水量



(d)7%含水量

图8 交直流复合电压90°相位处油纸绝缘的电场分布  
Fig.8 Electric field distribution of oil-paper insulation at 90° phase of AC/DC combined voltage

布图。从图8可以看到,在极化前后,1%与3%含水量试样的电场变化较小,电场畸变率为2.93%与

1.83%;5%与7%含水量试样的电场变化幅度较大,电场畸变率达49.85%与59.67%,较高水分含量试

样的电场畸变率为较低水分含量试样的几十倍。随着水分含量的增加,电场畸变率逐渐加剧,半导体层附近电荷注入量逐步增多,电场变化更大,意味着半导体层处的电场畸变更大。

### 2.3 直流电压下空间电荷特性

图9为不同含水量油纸绝缘在直流电压下极化后的空间电荷分布图。从图9(a)可以看出,随着极化的进行,两电极处的电荷密度峰值显著下降,阴极的电荷密度峰值由 $-20.9 \text{ C/m}^3$ 变化为 $-16.7 \text{ C/m}^3$ ,两电极附近有比较明显的同极性电荷积聚。从图9(b)可以看出,铝电极电荷密度峰值明显缩小,阴极附近有同极性电荷积聚,半导体层电荷密度峰值无明显变化;从图9(c)可以看到,随着极化进行,铝电极附近电荷密度峰值大幅减小,而半导体层电荷密

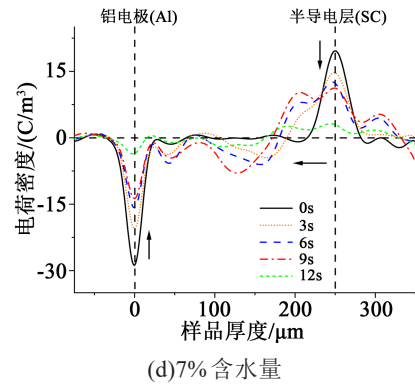


图9 直流电压油纸绝缘的空间电荷分布

Fig.9 Space charge distribution of oil-paper insulation under DC voltage

度峰值呈现先增大后减小的趋势,两极附近逐渐出现大量负极性电荷积聚,且逐步向试样内部迁移;从图9(d)可以看到,阴极和阳极的电荷密度峰值大幅减小,试样内部电荷密度曲线出现多个峰值。

根据式(2)计算得到交流、直流、交直流复合电压下电场畸变率如表1所示。

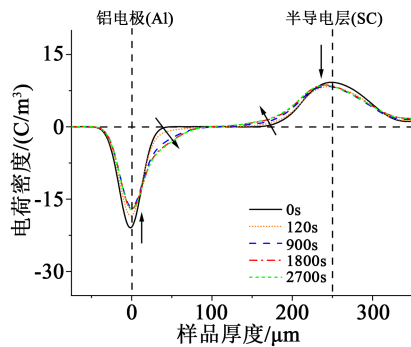
表1 各电压下油纸绝缘电场畸变率 (单位:%)

Tab.1 Electric field distortion rate in oil-paper insulation at various voltages

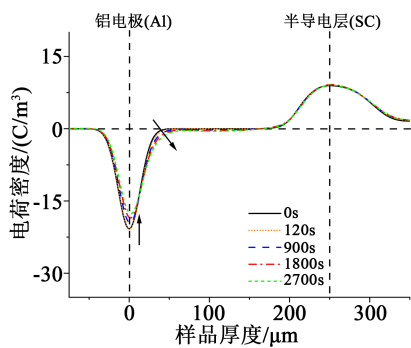
含水量	电压类型		
	交流电压	交直流复合电压	直流电压
1	22.63	51.08	3.73
3	20.58	20.75	1.26
5	21.66	88.12	41.88
7	22.78	64.83	42.44

从表1可以看出,交直流复合电压下电场畸变率最大,交流电压下的电场畸变率较为稳定,在水分含量较低(1%、3%含水量)时,交流电压下的电场畸变率大于直流电压下的电场畸变率;随着水分含量的增加,直流电压下电场畸变率的增加幅度大于交流电压下的增加幅度。

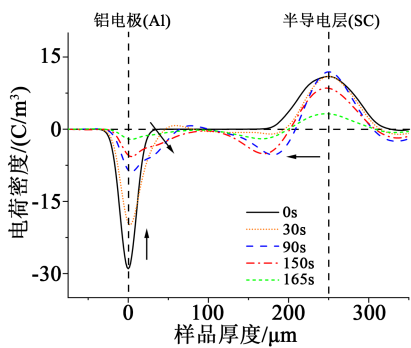
对比同一水分含量下的空间电荷分布图可以看出,交直流复合电压下空间电荷波形峰值降低最为明显;在含水量较低时,交流电压在相位趋近于 $0^\circ$ 与 $180^\circ$ 时,电压较小,即使微量的电荷积聚也会引起电场发生较大的畸变,故交流电压下的电场畸变率大于直流电压下;在水分含量较高时,油纸试



(a)1%含水量



(b)3%含水量



(c)5%含水量

样的电导能力迅速提升,电荷注入更加迅速,因此直流电压下的电场畸变率大于交流电压下的电场畸变率。

#### 2.4 击穿电压特性

对不同水分含量油纸绝缘分别进行了交流、直流、交直流复合电压下的击穿试验,水分含量和 Weibull 电气强度的关系见图 10。从图 10 可以看出,在同一水分含量下,随着直流分量增加,电气强度逐渐升高。随着水分含量的增加,直流电压下电气强度下降最为明显,交流电压下电气强度变化最小,从空间电荷曲线上也能看出,交流电压下电荷积聚不明显,在直流电压和交直流复合电压下电荷积聚较为明显。1%、3% 含水量试样的电气强度变化较为明显,5%、7% 含水量试样的电气强度变化较小,说明低含水量油纸绝缘受直流电压影响大于高含水量油纸绝缘。

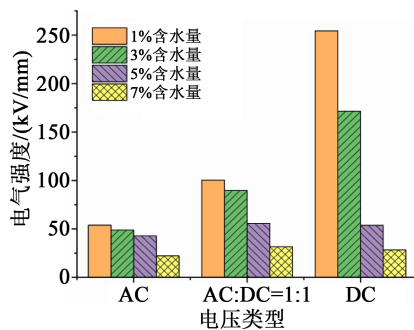


图 10 不同电压下不同含水量油纸绝缘的 Weibull 电气强度

Fig.10 Weibull electric strength of oil-paper insulation with different water content under different voltage

油纸绝缘在不同电压类型下的电场分布并不相同<sup>[25]</sup>。在交流电场下,电场按材料介电常数分布,油和纸的介电常数差异较小,电场分布较为均匀;在直流电场下,电场分布与电阻率呈正比,电场按照材料电阻率分布;而在交直流复合电场下其电场分布会受到介电常数和电导率共同影响,随着直流分量的增加,电场主要集中在电阻率较大的油浸纸上。在交直流复合电场下,随着水分含量的增加,变压器油的电阻率整体减小<sup>[26]</sup>,油浸纸的体积电阻率呈现指数级降低,因此电场从纸中向绝缘强度更低的油中转移,从而导致整体击穿电压的下降<sup>[9]</sup>。

随着直流分量的增加,1%、3% 含水量试样的电气强度增大,5%、7% 含水量试样的电气强度变化趋势不明显,表明在水分含量相对较低的试样上直流电压分量对击穿的影响大于水分对击穿的影响,在

水分含量相对较高的试样上水分对击穿的影响大于电压类型对击穿的影响。随着水分含量的增加,在同一电压类型下的电气强度明显下降,且随直流电压分量的增加,不同含水量之间电气强度的差距越来越明显。可见水分含量及交/直流分量共同决定了油浸纸的电气强度。

### 3 结论

(1)在不同电压类型下,随着水分含量的增加,空间电荷积聚更加严重;在相同水分含量下,随着直流分量的增加,空间电荷积聚逐渐加剧,峰值逐渐下降,随着水分含量的增加,电荷积聚更为明显,高含水量油纸绝缘在交直流电场下其两极附近出现了更大量的空间电荷积聚。

(2)对于不同水分含量试样,交直流复合电压下电场畸变最大,相较于低水分含量的试样,较高水分含量试样的电场畸变率更大。且在较低水分含量的试样中,直流电场下的电场畸变率最小,在较高水分含量的试样中,交流电场下的电场畸变率最小。

(3)在相同电压类型下,随着水分含量的增加,电气强度明显降低;在相同水分含量下,随着直流分量的增加,较高水分含量试样电气强度增加幅度明显小于较低水分含量试样,表明低水分含量试样的电气强度受直流电压分量影响而高于高水分含量试样。

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:1-35.
- [2] 周浩,邓旭,王东举,等. ±1100kV 特高压直流换流站过电压与绝缘配合(英文)[J]. 高电压技术,2013,39(10):2477-2484.
- [3] 金福宝,周远翔,黄建文,等. 电场分量对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电特性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(8):2516-2524.
- [4] 熊庆,祝令瑜,汲胜昌,等. 直流及复合电压作用下油纸绝缘局部放电研究综述[J]. 绝缘材料,2017,50(1):1-7.
- [5] 杜伯学,朱闻博,李进,等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1300-1309.
- [6] 欧阳希,周隰,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.
- [7] 周远翔,孙清华,李光范,等. 空间电荷对油纸绝缘击穿和沿面闪络的影响[J]. 电工技术学报,2011,26(2):27-33.
- [8] 王兆伟,周远翔,张灵,等. 运行温度下直流预压对油纸绝缘击穿特性的影响[J]. 绝缘材料,2020,5(11):59-65.
- [9] 刘青松,邓军,张良,等. 水分对油纸绝缘复合电场击穿特性的影

- 响[J]. 哈尔滨理工大学学报,2020,25(5):40-46.
- [10] 池明赫. 运行条件对复合电场下油纸绝缘击穿特性的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [11] XU Jiakuan, DENG Yunkeng, MA Yi, et al. Effect of moisture content on dynamic characteristics of space charge in oil-paper insulation under AC Field[C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis. Perth, Australia: IEEE,2018:1-4.
- [12] 金福宝,周远翔,黄猛,等. 老化对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电过程特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(12):4120-4130.
- [13] 滕陈源,张灵,周远翔,等. 晶型对等规聚丙烯电导电流和空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(8):2679-2686.
- [14] 王伟,何东欣,易登辉,等. 工频电压下电缆本体的空间电荷测试[J]. 电工技术学报,2016,31(7):152-158.
- [15] 郝建,廖瑞金, CHEN George,等. 油纸绝缘复合电介质的空间/界面电荷特性及其抑制方法综述[J]. 高电压技术,2019,45(10):3192-3206.
- [16] 黄若栋,邓云坤,吴建东,等. 交直流叠加电场下油浸绝缘纸的空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(4):1232-1238,1300.
- [17] 周远翔,黄猛,戴超,等. 不同含水量油纸绝缘热老化过程中的空间电荷特性研究[J]. 高电压技术,2015,41(6):1921-1928.
- [18] 廖瑞金,邵山峰,成立,等. 特高压换流变压器油纸绝缘交直流击穿特性及选型[J]. 电网技术,2018,42(2):387-392.
- [19] HAO Miao, HAO Jian, WANG Qian, et al. Space charge dynamics in oil-impregnated pressboard under AC electric field[C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ann Arbor, USA: IEEE,2015:118-121.
- [20] ZHU Yuanwei, MIN Daomin, LI Shengtao, et al. Space charge modulated electrical breakdown of oil impregnated paper under AC-DC combined voltages in frequencies of 50 ~ 600Hz[C]//2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada: IEEE,2016:441-444.
- [21] OOMMEN T V. Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems[C]//1983 EIC 6th Electrical/Electrical Insulation Conference. Chicago, USA: IEEE,1983:162-166.
- [22] ZHOU Yuanxiang, HUANG Xin, ZHANG Ling, et al. Space charge characteristics of oil-paper under AC/DC composite voltage[C]//2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. East Rutherford, USA: IEEE,2020:308-311.
- [23] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 绝缘材料 电气强度试验方法第1部分:工频下试验:GB/T 1408.1—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [24] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 绝缘材料 电气强度试验方法第2部分:对应直流电压试验的附加要求:GB/T 1408.2—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [25] 廖瑞金,王季宇,袁媛,等. 换流变压器下新型纤维素绝缘纸特性综述[J]. 电工技术学报,2016,31(10):1-15.
- [26] 王刚. 含水率对换流变压器油纸绝缘击穿特性影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.