

# 直流电压下油中空间电场强度对油纸绝缘界面电荷特性的影响研究

张书琦<sup>1,2</sup>, 高春嘉<sup>1</sup>, 赵晓林<sup>2</sup>, 孙建涛<sup>2</sup>, 苏飞洋<sup>1</sup>, 齐波<sup>1</sup>, 李成榕<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 100026;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 直流电压下油纸绝缘界面电荷特性是换流变压器绝缘结构设计的巨大挑战。传统电阻-电容(RC)模型仅考虑由于油、纸材料的介电常数、电导率不同而引起的界面极化电荷, 忽略了其他形式来源的电荷及其对空间电场的影响。本文基于Kerr电光效应原理, 搭建了油纸绝缘结构油中空间电场特性非接触式、实时测量平台, 针对变压器油-电工绝缘纸、变压器油-变压器纸板组成的复合绝缘结构, 获得了不同极性、不同幅值直流电压下油中空间电场特性, 计算并分析了界面电荷密度与RC模型计算的极化电荷密度的差异。结果表明: 当油中电场强度较低时, 油纸界面电荷以极化电荷为主; 随着油中电场强度的增加, 油纸界面电荷密度与RC模型计算极化电荷密度差异逐渐增大, 出现了其他形式电荷的积聚, 且其在界面总电荷量中占比逐渐增加, 对电场强度的影响逐渐增大。

**关键词:** 换流变压器; 油纸绝缘; 直流电压; Kerr电光效应; 界面电荷; 空间电场

中图分类号: TM403.3 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.06.012

## Influence of space electric field strength in oil on interface charge characteristics of oil-paper insulation under DC voltage

ZHANG Shuqi<sup>1,2</sup>, GAO Chunjia<sup>1</sup>, ZHAO Xiaolin<sup>2</sup>, SUN Jiantao<sup>2</sup>, SU Feiyang<sup>1</sup>, QI Bo<sup>1</sup>, LI Chengrong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 100026, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The interface charge characteristics of oil-paper insulation under DC voltage is a huge challenge in the design of the insulation structure of converter transformers. The traditional resistance-capacitance (RC) model only considers the interface polarization charges due to the different dielectric constants and electrical conductivity of oil and paper materials, ignoring other forms of charges and their effects on the space electric field. In this paper, based on Kerr electro-optic effect, a non-contact, real-time measurement platform for space electric field characteristics in oil of oil-paper insulation was built. Aimed at the composite insulation structure consist of transformer oil-electrical insulation paper and transformer oil-transformer paperboard, the space electric field characteristics in the oil under DC voltage with different polarity and different amplitude were obtained. The difference between the total interface charge density and the polarization charge density calculated by the RC model was analyzed. The results show that when the electric field intensity in the oil is low, the total interface charge is dominated by polarization charges. With the increase of the electric field intensity in the oil, the difference between the total interface charge density and the polarization charge density calculated by RC model increases gradually, indicating other forms of charge accumulate and its proportion in total charge increases gradually, the effect of it on the electric field increases gradually.

**Key words:** converter transformer; oil-paper insulation; DC voltage; Kerr electro-optic effect; interface charge; space electric field

## 0 引言

换流变压器是高压直流输电工程的重要设备

基金项目: 中国电力科学研究院有限公司科技项目资助 (GYB51201902020)

之一, 其主要绝缘形式为变压器油、变压器纸板以及电工绝缘纸组成的油纸复合绝缘结构。随着高压直流输电技术的广泛应用, 其所传输的电压等级也在不断提高。在实际运行工况下, 换流变压器绝缘结构的故障率居高不下, 因此, 其绝缘设计的可

靠性和有效性对于保障高压直流输电工程的安全稳定运行至关重要<sup>[1]</sup>。

目前,在换流变压器绝缘结构设计中,国内外主流设备制造商采用传统的电阻-电容(resistivity-capacitance, RC)模型为基础进行研发设计,使用 ANSYS 和 Infolytica 等专业的计算仿真软件,通过设置不同绝缘材料的相关介电参数,即可仿真计算得到不同绝缘模型、介质和电压应力下油纸绝缘结构电场的时空分布特性<sup>[2-4]</sup>。研究表明,RC 模型计算的电场结果与实测的电场差异明显<sup>[5-6]</sup>,主要归因于界面电荷特性对空间电场的影响,但目前界面电荷的来源、组成依然不清晰,对油纸绝缘结构的有效设计提出了巨大挑战。在油纸绝缘空间电场/界面电荷研究方面,1983年,日本 T Takada 教授首次提出了电声脉冲法(PEA)<sup>[7]</sup>,自此国内外相关研究学者利用 PEA 技术针对油浸纸、油纸复合绝缘的空间电荷/电场特性开展了一系列研究<sup>[8-14]</sup>,获得了不同电压应力、不同油纸组合形式、不同温度等条件下油纸介质内部空间电荷对电场的影响机理,并利用双极性载流子模型等手段开展了一系列仿真计算。但是传统的 PEA 技术仅仅适用于厚度较小(微米~百微米级)的介质内部空间电荷测量,与实际换流变压器大尺寸油纸复合绝缘结构不符,且 PEA 技术对于固液(油纸)复合介质存在声波折反射、消散严重等问题,导致测量稳定性低、结果不准确。针对中度尺寸油纸复合绝缘内结构(毫米~百毫米级),U GAFVERT 等<sup>[15]</sup>、H OKUBO 等<sup>[16]</sup>、QI B 等<sup>[17]</sup>从换流变压器主绝缘结构中提取不同组合形式的油纸复合绝缘结构,并利用 Kerr 电光效应开展了油纸复合绝缘油中空间电场以及油纸界面电荷特性的测试与分析,并发现了 RC 模型在直流电场下油纸绝缘结构电场计算失效的现象,提出了离子迁移模型、ICPE 模型等电荷/电场分析手段,但均未对油纸绝缘界面电荷的来源、组成进行系统的测试和分析。

针对上述问题,本文基于 Kerr 电光效应原理,搭建油纸绝缘结构油中电场非接触式、实时测量平台,开展不同幅值、不同极性直流电压下典型油纸复合绝缘结构模型的油中空间电场测试,对界面电荷积聚特性进行计算分析,阐明油纸界面除极化电荷外存在其他形式电荷来源,揭示其与外施电压或油中电场强的关系,希望相关成果可为换流变压器油纸绝缘结构的优化设计和准确校核提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 主要原材料

采用的油纸复合绝缘结构模型材料为变压器

油、电工绝缘纸和变压器纸板,其中变压器油为昆仑 KI50X 变压器油,电工绝缘纸为杜邦 NOMEX 绝缘纸,厚度为 0.06 mm,变压器纸板为魏德曼电工绝缘纸板,厚度为 1 mm。

### 1.2 试验模型

设计的油纸复合绝缘结构模型选用单一界面形式,包括电工绝缘纸包覆电极结构以及变压器纸板覆盖平板电极形式,具体如下:①电工绝缘纸包覆电极模型如图 1(a)所示,其中,变压器油隙间距为 5 mm,每层纸的厚度为 0.06 mm。 $X$  代表包覆电极所用电工绝缘纸的层数,本文中  $X$  分别取值为 1、2、5、15;②变压器纸板覆盖电极模型如图 1(b)所示,其中,变压器油隙间距为 5 mm,变压器纸板的厚度为 1 mm,宽度为 140 mm。试验平板电极宽度为 100 mm,长度为 200 mm,厚度为 10 mm,材料为黄铜,边缘倒角为 3 mm。在进行相关试验前,所有材料根据 IEC 60641-2-2004 以及 GB/T 19264.2—2013 相关要求进行处理,变压器油、电工绝缘纸和变压器纸板的材料预处理过程包括:①固体绝缘材料首先在 85℃ 鼓风干燥箱内烘干 48 h;②将绝缘纸、变压器纸板浸油处理,在 85℃、真空环境内真空脱气、脱水浸油处理 48 h。经过标准处理流程后,电工绝缘纸的水分含量为 0.81%,变压器纸板的水分含量为 0.88%,变压器油水分含量为 9.2  $\mu\text{L/L}$ 。

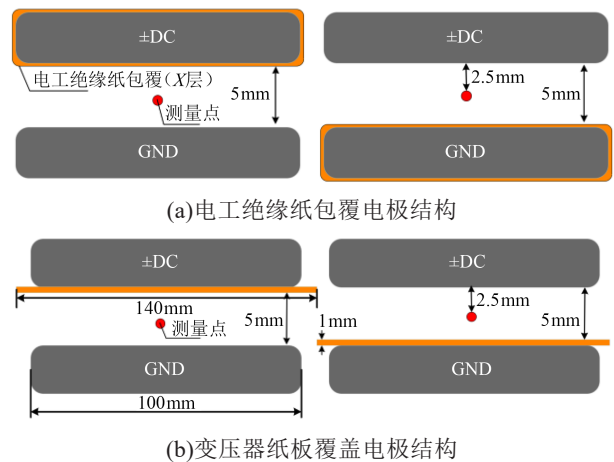


图1 试验模型

Fig.1 Test models

### 1.3 基于 Kerr 电光效应的油中空间电场测量平台

本文搭建了基于 Kerr 电光效应的油中空间电场非接触式、实时测量平台,当激光通过变压器油等 Kerr 介质时,在外施直流电压以及交流调制电压的共同作用下,激光中存在垂直和平行于电场的正交分量,且两分量间会产生相位差  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  的大小与电介质的 Kerr 系数、待测电场区域长度、待测区域

电场强度的平方成正比,即为Kerr电光效应原理,如式(1)及图2所示,本文采用的测量平台示意图如图3所示<sup>[18]</sup>。

$$\Delta\theta = 2\pi B \int_0^L E^2 dl \quad (1)$$

式(1)中: $B$ 为Kerr系数; $l$ 为待测电场区域沿光路方向的长度; $E$ 为测量区域内的油中场强。

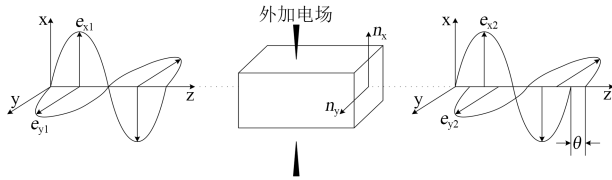


图2 Kerr电光效应原理示意图

Fig.2 Principle of Kerr electro-optic effect

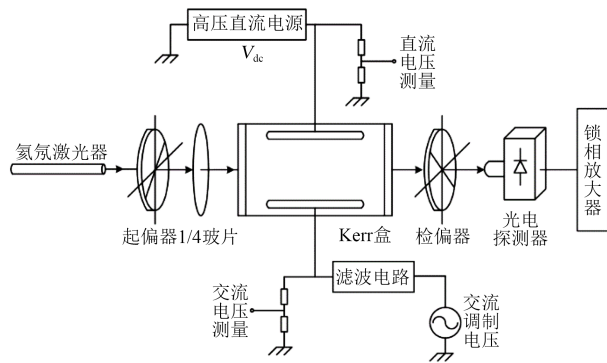


图3 测量平台示意图

Fig.3 Schematic diagram for measuring platform

根据Kerr效应原理及所搭建的测量平台,可以推导出油中交、直流电场强度对应的计算公式,分别如式(2)~(3)所示。

$$E_{ac} = \sqrt{\frac{I_{2\omega}/I_{dc}}{\pi BL}} \quad (2)$$

$$E_{dc} = \frac{I_{1\omega}/I_{dc}}{4\pi BLE_{ac}} \quad (3)$$

式(2)中: $I_{dc}$ 是光信号经光电探测器转换成电信号后所得到的直流分量; $I_{1\omega}$ 和 $I_{2\omega}$ 分别为光信号转换成电信号后由锁相放大器根据交流调制电压的频率所输出的基频分量和二倍频分量。

#### 1.4 油纸材料关键介电特性测试

利用本文作者在文献[19]中搭建的温度、场强可控的油纸绝缘材料电阻率、相对介电常数测试平台进行测试,根据 $\pm 800$  kV换流变压器阀侧绕组绝缘结构中变压器油、纸板和纸承受的最高场强值,结合实际测试腔体的耐压程度、测量装置的关键性能及测试环境,在电阻率测试中,变压器纸板的测试场强为1~25 kV/mm,电工绝缘纸的测试场强为1~10 kV/mm,变压器油的测试场强为1~5 kV/mm;

在相对介电常数测试中,3种材料的测试场强均为1~10 kV/mm。材料的电阻率测量结果表明:随着变压器纸板所承受电场强度的增加,纸板体积电阻率变化较小,25 kV/mm下纸板体积电阻率与1 kV/mm下测试结果基本一致,平均体积电阻率为 $5.91 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 。电工绝缘纸的体积电阻率同样变化较小,平均值为 $7.15 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ 。对于变压器油电阻率而言,5 kV/mm与1 kV/mm下测试结果基本一致,平均电阻率为 $3.14 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ 。相对介电常数测试结果表明:随着绝缘材料所承受电场强度的增加,变压器油、纸和纸板的相对介电常数基本保持不变,变压器绝缘纸板的相对介电常数为3.802,电工绝缘纸的相对介电常数为3.698,变压器油的相对介电常数为2.212。

## 2 电工绝缘纸包覆电极模型油中电场特性

### 2.1 油中初始电场

外施直流电压选择为 $\pm 5$ 、 $\pm 10$ 、 $\pm 15$ 、 $\pm 20$ 、 $\pm 25$  kV,交流调制电压幅值为2 kV,频率为470 Hz,以单层绝缘纸包覆电极为例,试验模型的初始油中电场实测值与RC模型计算值对比如图4所示。从图4可以看出,在直流电压作用初始时刻,油-纸板电场分压为容性场,介质内电场强度与介质的相对介电常数成反比,且油中电场的实测值与RC模型计算值差异较小。经过实验验证,两层纸、5层纸和15层纸包裹电极结构的油中初始电场强度的变化规律和单层纸包裹电极结构一致。

### 2.2 油中稳态电场

根据本文作者已有研究成果,在本文所设计模型及外施电压下,油中空间电场在7 200 s后达到稳态<sup>[17]</sup>,并且对于相同结构的复合绝缘结构模型,如绝缘纸包覆上电极或下电极而言,二者油纸界面电荷的差异仅来自于电荷的极性效应,即绝缘纸对负电荷吸附能力更强,导致界面积聚的负极性电荷更多,对电场的影响更大<sup>[17]</sup>,如图5(a)及图5(b)所示。因此,为了更直观地对不同绝缘结构的油纸界面电荷特性进行对比分析,以绝缘纸包覆上电极模型为例开展讨论,当油中空间电场强度达到稳定值时,不同层数电工绝缘纸板包覆电极结构的油中场强实测值与RC模型的计算值之间对比如图5所示。从图5可以看出:

(1)对于正极性电压下绝缘纸包覆下电极或负极性电压下绝缘纸包覆上电极模型,其界面积聚电荷为正极性。以图5中负极性直流电压下油中电场特性对比为例,当外施电压较低时,油中稳态场强

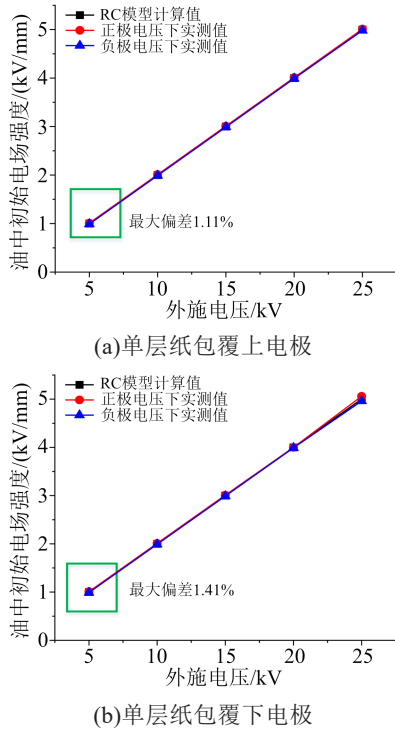


图4 油中初始空间电场实测值与RC模型计算值对比  
 Fig.4 The comparisons between measured value of the initial space electric field strength in oil and the calculated value of RC model

的实测值高于RC模型计算值,且两者的差距随着绝缘包覆层数的增加而增大;随着外施直流电压的增加,油中场强实测值逐渐增大,但增速放缓,且实测值与RC模型计算值出现交点,相交处的油中电场强度与包覆层数的变化趋势相反,最大可达

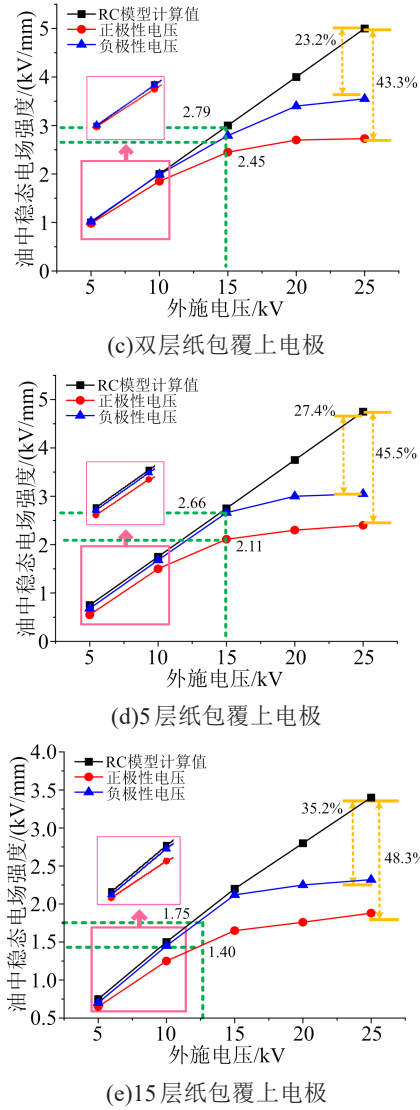
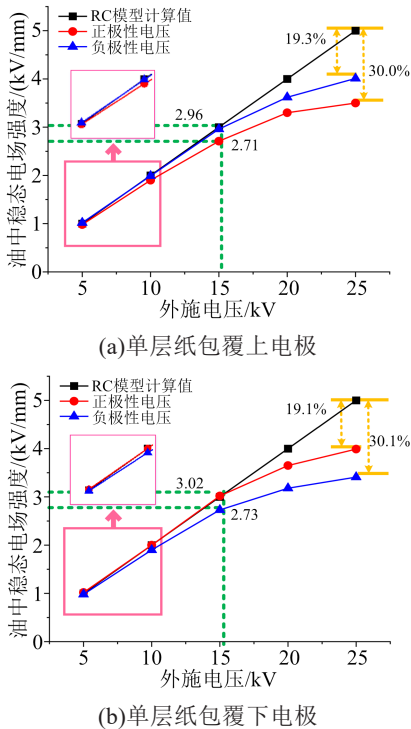


图5 油中稳态场强实测值与RC模型计算值对比  
 Fig.5 The comparisons of measured values of the steady electric field strength in oil and the calculated value of RC model

3.02 kV/mm,最小可达1.40 kV/mm;当外施电压继续增大,油中电场强度小于RC模型计算值,且偏差继续增大,最大偏差为35.2%,如图5(e)所示。

(2)对于正极性电压下绝缘纸包覆上电极或者负极性电压下绝缘纸包覆下电极模型,其界面积聚电荷为负电荷。以图5中正极性直流电压下油中电场特性对比为例,油中稳态场强的实测值始终低于比RC模型计算值,且偏差随着绝缘纸包覆层数的增加而增大,二者之间的偏差最大可达48.3%,如图5(e)所示。

(3)正、负极性电压作用下,油中空间电场强度实测值与RC模型计算值存在较大差异,其原因在于:油浸纸板对于负电荷的吸附能力更强<sup>[17]</sup>,使得相



同模型、相同电压幅值、不同极性电压下, 负极性界面电荷数量更多, 对油中空间电场的削弱作用更强, 导致正极性电压下绝缘纸包覆上电极模型的油中电场强度更低, 与RC模型计算值差异更大。

### 3 变压器纸板覆盖电极模型油中电场实测特性

#### 3.1 油中初始电场强度

外施电压设置与电工绝缘纸包覆电极一致, 为 $\pm 5$ 、 $\pm 10$ 、 $\pm 15$ 、 $\pm 20$ 、 $\pm 25$  kV, 交流调制电压幅值为2 kV, 频率为470 Hz。在电压施加的初始时刻, 1 mm 变压器纸板覆盖电极模型的油中空间电场强度实测值与RC模型计算值之间对比如图6所示。

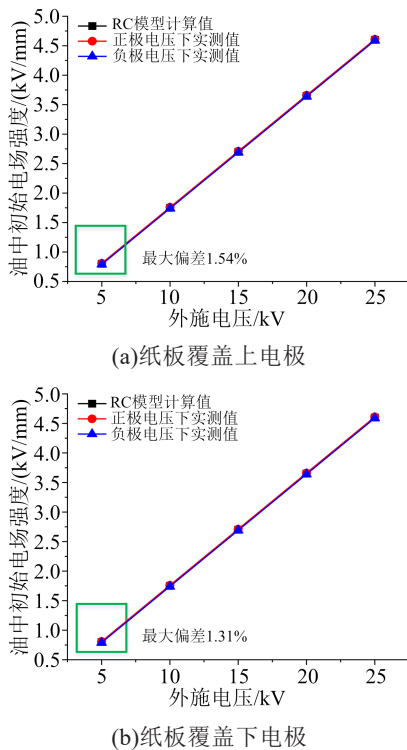


图6 直流电压下纸板覆盖电极绝缘结构模型油中空间电场初始场强实测值与RC模型计算值对比

Fig.6 The comparisons between innitial space electric field strength in oil measured by the insulation structure model with pressboard covering electrodes and the calculated value of RC model under DC voltage

从图6可以看出, 对于纸板覆盖电极模型, 在电压施加的初始时刻, 油-纸板的电场分布为容性场分布, 即油中电场强度测量值和RC模型计算值均与外施电压幅值的变化趋势一致, 即呈线性变化趋势; 初始时刻正负极性电压下的油中空间电场强度实测值均与RC计算值之间相差较小, 最大偏差为1.54%。

#### 3.2 油中稳态电场强度

当油中空间电场达到稳态时, 纸板覆盖电极模型的油中电场强度实测值与RC模型计算值对比如图7所示。

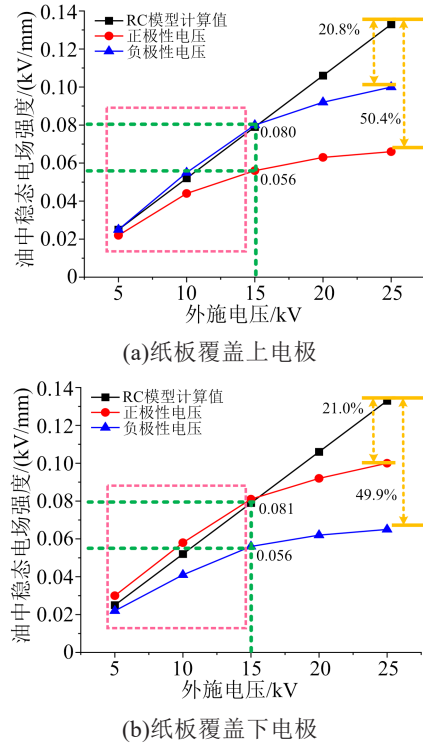


图7 直流电压下纸板覆盖电极绝缘结构模型油中空间电场稳态场强实测值与RC模型计算值对比

Fig.7 The comparisons between steady space electric field strength in oil measured by the insulation structure model with pressboard covering electrodes and the calculated value of RC model under DC voltage

从图7可以看出:

(1) 与不同层数的绝缘纸包覆电极结构中油中电场强度特性类似, 在绝缘纸包覆下电极模型中, 当正极性外施电压较低, 油中电场测量值比RC模型计算值高, 负极性电压下则相反; 随着外施电压的增加, 正极性电压下的油中电场强度实测值与RC模型计算值的曲线相交, 交点处电场强度最大为0.081 kV/mm, 而负极性外施电压下的油中电场强度实测值则始终小于RC计算值; 相同电压极性下, 绝缘纸包覆上电极模型的油中电场强度实测值与RC模型计算值之间的变化趋势与绝缘纸包覆下电极模型相反, 如图7(a)所示; 随着外施电压的持续增大, 油中电场强度实测值与RC模型计算值之间的差异逐渐增大, 且始终低于基于RC模型的电场计算值, 最大偏差为21.0%, 如图7(b)所示。

(2) 随着外施电压的增加, 油中电场强度实测值与

RC模型计算值之间的差异逐渐增大,且实测值始终小于RC计算值,二者的最大偏差为50.4%。

## 4 界面电荷计算与讨论

### 4.1 界面总“净”电荷密度计算方法

本文作者及其他学者相关研究表明相比于积聚在油纸绝缘介质体内的空间电荷,多层油-纸绝缘结构的物理界面比介质本体更容易积聚空间电荷,界面处的电荷密度远大于介质体内的电荷密度,界面电荷对油纸绝缘系统局部电场的增强效应也比介质体内空间电荷对局部电场的增强更加显著<sup>[20]</sup>。因此,以油-纸模型为例,油纸界面处的电荷密度与电位移矢量关系如式(4)~(6)所示。

$$\mathbf{e}_n \cdot (\mathbf{D}_{PB} - \mathbf{D}_o) = \sigma_{total} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{PB} E_{PB} - \varepsilon_o E_o = \sigma_{total} / \varepsilon \quad (5)$$

$$E_{PB} d_{PB} + E_o d_o = U \quad (6)$$

式(4)~(6)中: $\mathbf{D}_{PB}$ 和 $\mathbf{D}_o$ 为绝缘纸和变压器油的电位移矢量; $\mathbf{e}_n$ 为变压器油和绝缘纸在界面处的法向单位矢量; $\sigma_{total}$ 为变压器油和绝缘纸在界面处总的净电荷密度,即界面总电荷密度; $\varepsilon$ 为真空介电常数; $\varepsilon_{PB}$ 、 $\varepsilon_o$ 分别为油浸电工绝缘纸和变压器油的相对介电常数; $E_o$ 和 $E_{PB}$ 分别是油中和包覆电极的电工绝缘纸中的电场强度; $d_{PB}$ 和 $d_o$ 分别是包覆电极所用电工绝缘纸总厚度和油道间隙。

根据式(4)~(6)所示推导过程,代入2.2节中稳态情况下油中电场的测量值,即可联立得出油纸界面处的电荷密度。

### 4.2 界面极化电荷密度计算方法

由于变压器油、电工绝缘纸和变压器纸板的介电常数和体积电阻率等相关参数存在差异<sup>[18]</sup>,在两介质相交的界面处会产生夹层极化现象,即为油纸绝缘界面处的极化电荷<sup>[18]</sup>。

RC模型也称为Maxwell-Wagner双层介质电容器模型,其等效电路模型如图8所示<sup>[18]</sup>。图8中, $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 分别是介质1和介质2的相对介电常数; $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 分别是介质1和介质2的电导率; $d_1$ 和 $d_2$ 为介质1和

介质2的厚度; $S$ 为两介质分界面的面积; $U$ 为外施电压; $C_1$ 、 $C_2$ 和 $R_1$ 、 $R_2$ 分别对应介质1和介质2的等效电容值和电阻值; $U_1$ 和 $U_2$ 为施加在介质1和介质2上的电压。

根据图8所示RC等效模型可推导出两介质在界面处的电荷密度 $\sigma$ ,如式(7)所示。

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{\varepsilon_o(\gamma_1 \varepsilon_2 - \gamma_2 \varepsilon_1)}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} U \quad (7)$$

### 4.3 电工绝缘纸包覆电极模型界面电荷密度对比

利用电工绝缘纸包覆电极模型的油中空间电场强度实测值,以及油、纸材料的相对介电常数、电阻率实测值,结合相关结构参数,计算得到不同外施电压幅值下油-纸界面处的总净电荷密度和极化电荷密度结果如图9所示,为了更直观地表示不同极性之间的差异性,界面电荷密度均采用绝对值。

通过图9中绝缘纸包覆电极模型界面电荷密度对比分析可知:

(1)正极性界面电荷:油纸模型在介质分界面处的电荷极性始终与未覆盖侧的电压极性相同。以图9中负极性电压曲线为例,在油纸的界面处积聚了正电荷。当外施电压较低时,由于正、负电荷极性效应的存在<sup>[17]</sup>,油-纸面积聚的正极性电荷密度小于RC模型计算的极化电荷;随着外施电压的增大,由电场实测值计算得到界面总净电荷密度也随之增加,并与极化电荷密度的曲线出现交点,两条曲线相交处所对应的外施直流电压下的场强与图5中两曲线相交处的电场值一致,最大可达3.02 kV/mm,最小为1.40 kV/mm;当外施电压继续增加,油-纸在界面处的正电荷密度持续增加,大于RC模型计算的极化电荷密度,且两者的差距与包覆层数的变化趋势相反,最大可达919.00%,最小可达123.75%。

(2)负极性界面电荷:以图9中正极性电压下油纸界面电荷特性为例,其界面积聚负电荷。当外施电压增大时,基于RC等效模型所得的界面极化电荷密度始终小于根据电场实测值而得的总净界面电荷密度,而两者的差距随着绝缘纸包覆层数的增加(油中场强的降低)而减小,偏差最大可达1444.17%,最小可达为161.01%。

(3)界面总净电荷密度和界面极化电荷密度均随着外施电压的增加而逐渐增大,说明在场强逐渐升高的过程中,除极化电荷外,介质分界面处还积聚了其他来源形式的电荷,且其在界面的总净电荷密度中所占比例也越来越大;但二者之间的偏差随着绝缘纸包覆层数的增加而减小,即油中场强越

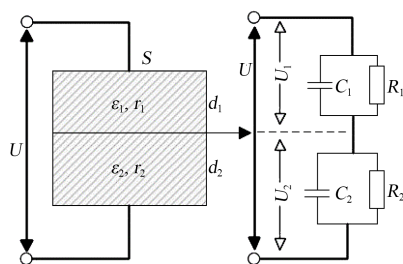


图8 RC模型等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of RC model

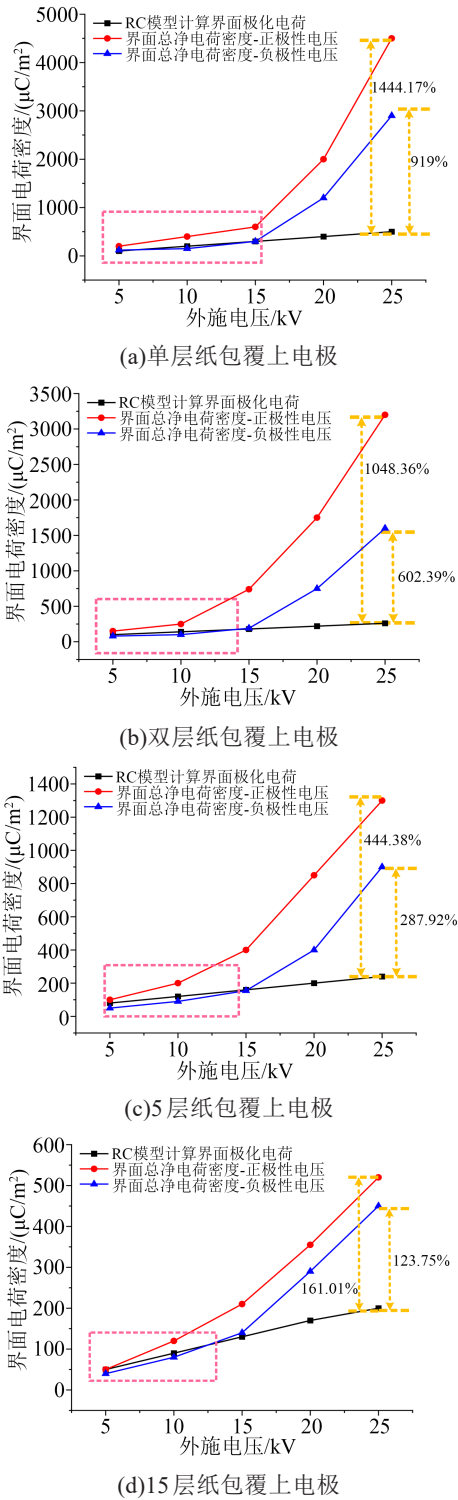


图9 电工绝缘纸包覆电极模型界面总净电荷密度与界面极化电荷密度对比

Fig.9 The contrast between measured total interface charge density and interface polarization charge density of the model with insulating paper wrapping electrodes

低,界面总电荷密度与RC模型计算的极化电荷密度越接近。

4.4 变压器纸板覆盖电极模型界面电荷密度对比

针对油-纸板复合绝缘,利用本文的界面电荷

计算方法,得到不同直流电压幅值下油-纸板界面处的总“净”电荷密度和极化电荷密度结果如图10所示。

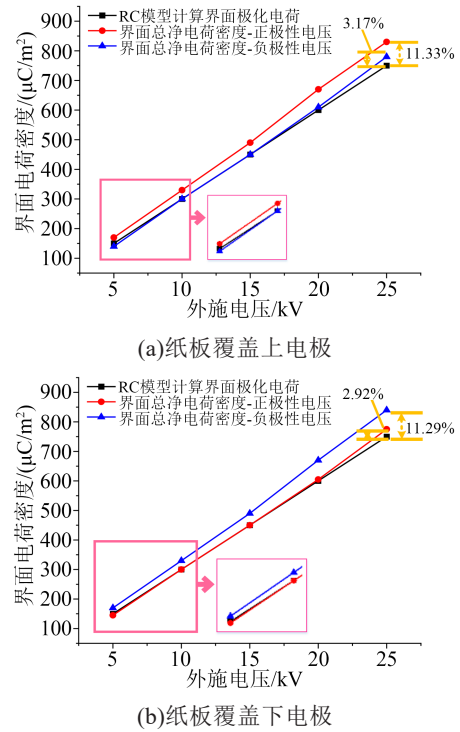


图10 纸板覆盖电极模型界面总净电荷密度与界面极化电荷密度对比

Fig.10 The comparisons of measured total interface charge density and interface polarization charge density of the model with pressboard covering electrodes

通过图10中绝缘纸板覆盖电极模型的界面电荷特性对比分析可知:

(1) 正极性界面电荷:与绝缘纸包覆电极模型界面电荷特性类似,当外施直流电压幅值较低时,由于极性效应的影响,相较于负电荷,油纸界面积聚的正电荷数量更少;当外施电压增大时,由电场实测值所得的界面总净电荷密度也随之增加,并与极化电荷密度的曲线出现交点,两条曲线相交处所对应的外施直流电压下的场强与图7中两曲线相交处的电场值一致,最大为0.081 kV/mm,最小为0.056 kV/mm;随着外施电压的进一步增加,正电荷密度也随之增大,且其与基于RC模型所计算得到的界面极化电荷密度的差值也越来越大,偏差最大为3.17%。

(2) 负极性界面电荷:随着外施直流电压幅值的增加,油-纸板界面积聚的负极性电荷始终大于RC模型计算的极化电荷量,且二者的偏差逐渐增加,最大为11.33%。

通过对比图9电工绝缘纸包覆电极模型和图10

变压器纸板覆盖电极模型的界面电荷特性,可以看出:①直流电压作用下,油纸复合绝缘结构界面电荷除极化电荷外,存在其他来源的电荷;②分析两个模型的油中电场强度和界面电荷特性,当油中场强较高时(油-纸模型),界面总电荷密度与RC模型极化电荷密度差异巨大,但随着绝缘层数的增加,油中场强的降低,差异逐渐减小;而在油-纸板模型中,由于纸板电阻率相对于电工绝缘纸更高,其油中电场进一步降低,导致界面总电荷量与RC模型计算的极化电荷密度进一步接近;③即使在油中场强较低、总电荷与极化电荷接近时,油中电场实测值仍然与RC模型计算值存在一定的差异,归因于油纸界面电荷的极性效应,导致面积聚的正、负电荷量差异对较弱的油中场强产生了较大的影响。

## 5 分析与讨论

综合考虑不同界面电荷产生的原理,即场致电离电荷机理,认为变压器油中中性分子或离子对分离产生阴、阳离子并在电场作用下运动到界面形成界面电荷;载流子注入机理认为在外施电场作用下,模型内部发生双极性载流子注入,并迁移至界面形成界面电荷。据此,本文在不同界面电荷产生机制的试验探索中,采用的试验模型如图11所示,其中,上电极包覆厚度为1.0 mm(15层)的电工绝缘纸,下电极覆盖厚度为1.0 mm的纸板,油隙间距为5 mm。

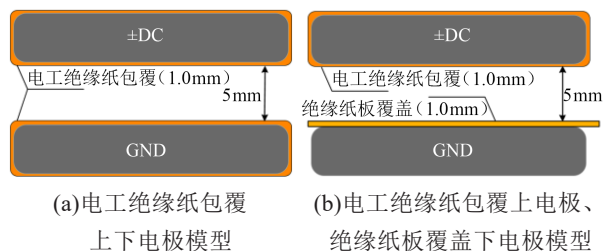


图11 不同类型界面电荷产生机制探索实验模型

Fig.11 Experimental model for exploring the generation mechanism of different types of interfacial charges

### (1) 电工绝缘纸包覆上、下电极模型

在正极性外施电压为5、10、15、20、25 kV作用下,对图11(a)的电工绝缘纸包覆上、下电极模型中油中空间电场特性进行实测,根据界面总净电荷密度和界面极化电荷的计算方法,得到上、下两个界面RC极化电荷密度与实测界面总电荷密度对比,如图12所示。由图12可以看出,在电工绝缘纸包覆上下电极模型中,由于电工绝缘纸体积电阻率较低,其与变压器油组成的油纸复合绝缘结构界面极

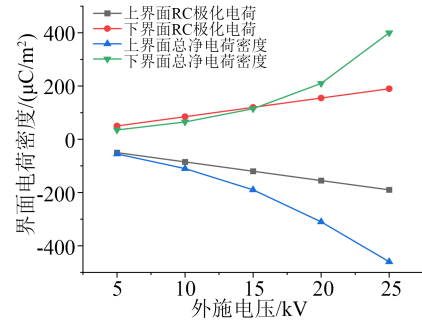


图12 绝缘纸包覆电极模型的油纸界面极化电荷与实测总净电荷密度对比

Fig.12 Comparison of the polarized charge density and total charge density at the oil-paper interface of insulating paper-coated electrode model

化电荷量较低;随着外施电压的增加,图中不同界面RC模型极化电荷与界面总净电荷量同样出现了偏离,即出现了其他形式的界面电荷。

(2) 电工绝缘纸包覆上电极-纸板覆盖下电极模型界面电荷积聚情况

为了进一步讨论高场强下、实际绝缘结构中其他形式界面电荷的产生机理,本文将图11(a)中下电极包覆的电工绝缘纸替换为绝缘纸板,即图11(b)试验模型;以纸板覆盖下电极模型,正极性外施电压工况下试验结果为例,图11(b)试验模型中上油-纸界面极化电荷与界面总电荷量的对比结果如图13所示。

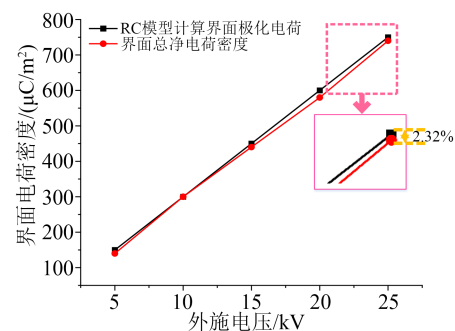


图13 纸-油-纸板模型内油-纸界面总净电荷密度与界面极化电荷密度对比

Fig.13 Comparison of total charge density and polarized charge density at the oil-paper interface in the paper-oil-paperboard model

对比图12和图13中界面电荷特性的实测和计算结果可以看出:

(1) 图12和图13中界面电荷的数值差异来自于不同试验模型下电工绝缘纸以及变压器纸板的关键介电参数实测结果差异。当外施电压为+25 kV时,图12中界面总净电荷密度与界面极化电荷

密度存在较大的偏差,说明此时,存在其他形式的界面电荷产生,可能为场致电离电荷或载流子注入电荷。

(2)在图13中,同样在外施电压为+25 kV时,随着高电阻率介质变压器绝缘纸板的引入,油中电场强度相比于图11(a)模型内出现降低,界面总净电荷密度与极化电荷密度的差异逐渐降低,界面极化电荷密度重新占据主要作用,其偏差仅为2.32%。

(3)在双极性载流子注入电荷模型中,其电荷来源于不同电极向绝缘介质中注入的同极性载流子,即上电极注入正电荷,下电极注入负电荷;分析可知,如果存在明显的电极注入电荷,在外施电压不变的情况下,仅仅改变下电极处绝缘介质无法改变上电极正电荷注入情况,即图13中油-纸上界面总净电荷密度与RC界面极化电荷密度应同样存在较大差异,而图11的试验结果表明,二者差距较小。因此,在本文所采用试验模型、电压条件下,界面电荷主要来源于界面极化和油中空间电荷场致电离。

## 6 结论

(1)当液-固双层油纸界面积聚正电荷时,在外施电压较低时,油中空间电场强度实测值小于RC模型计算值;随着外施电压的增加,油中场强实测值与RC模型计算值差异逐渐减小,并出现交点,对于油-纸结构,交点最低场强约为1.40 kV/mm;随着外施电压的持续增加,油中场强实测值始终小于RC模型计算值。当界面电荷为负极性时,油中场强始终小于RC模型计算值;正、负电荷作用下油中场强的差异来源于纸板对于负电荷更强的吸附能力,即电荷极性效应。

(2)分析油-纸、油-纸板模型界面电荷特性差异,可以得到:对于油-纸模型,其界面总净电荷密度计算值与RC模型计算极化电荷密度存在差异。当油中场强较低时,界面总电荷密度与RC极化电荷密度差异较小,即极化电荷占主导地位;随着油中场强的增加(外施电压增加或者固体介质电阻率降低),界面总净电荷密度与RC极化电荷密度差异逐渐增大,即在油纸的分界面处存在着除极化电荷以外的其他来源形式的电荷,在本文的试验模型、实验条件下,其主要为场致电离电荷,并且逐渐占据主导地位。

## 参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [2] 张杰. 换流变压器内部电场分析及油纸绝缘试验系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2008.
- [3] 张杰. 混合电场作用下换流变压器阀侧绕组电场分析[J]. 南方电网技术, 2009,3(S1):66-170.
- [4] 张施令,彭宗仁. 换流变压器套管的电气绝缘结构研究与设计优化[J]. 绝缘材料, 2020,53(12):65-72.
- [5] QI B, ZHAO X L, LI C R, et al. Electric field distribution in oil-pressboard insulation under AC-DC combined voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(4): 1935-1941.
- [6] QI B, ZHAO X L, LI C R, et al. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015,22(4):2148-2155.
- [7] TAKADA T, SAKAI T. Measurement of electric fields at a dielectric/electrode interface using an acoustic transducer technique[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1983,18(6):619-628.
- [8] 于会民,王会娟,张培恒,等. 不同类型变压器油的油纸复合绝缘空间电荷积聚与消散特性研究[J]. 绝缘材料, 2021,54(6):84-90.
- [9] 周远翔,薛磊,黄欣,等. 不同含水量油纸绝缘的交直流空间电荷特性研究[J]. 绝缘材料, 2022,55(2):57-66.
- [10] CHEN G, TANAKA Y, TAKADA T, et al. Effect of polyethylene interface on space charge formation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005,11:113-121.
- [11] ZHOU Y X, WANG Y S, LI G F, et al. Space charge phenomena in oil-paper insulation materials under high voltage direct current [J]. Journal of Electrostatics, 2009,67:417-421.
- [12] HAO J, ZOU R H, LIAO R J, et al. New method for shallow and deep trap distribution analysis in oil impregnated insulation paper based on the space charge detrapping[J]. Energies, 2018,11(2):271.
- [13] LI S T, MIN D M, WANG W W, et al. Linking traps to dielectric breakdown through charge dynamics for polymer nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(5):2777-2785.
- [14] 吴镨,朱庆东,王浩森,等. 温度梯度下双层油纸绝缘系统的空间电荷分布特性[J]. 高电压技术, 2012,38(9):2366-2372.
- [15] GAFVERT U, JAKSTS A, TORNVIST C, et al. Electrical field distribution in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Electric Insulation, 1992,27(3):647-660.
- [16] OKUBO H. HVDC electrical insulation performance in oil/pressboard composite insulation system based on Kerr electro-optic field measurement and electric field analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018,25(5): 1785-1797.
- [17] QI B, GAO C J, ZHAO X, et al. Interface charge polarity effect based analysis model for electric field in oil-pressboard insulation under DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(5):2704-2711.
- [18] 吴昊. 换流变压器油纸绝缘结构油中电场和界面电荷特性的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- [19] 高春嘉,齐波,李成榕,等. 高密度电工纸板关键介电特性及性能评价方法[J]. 电工技术学报, 2020,35(14):3075-3086.
- [20] 郝建,廖瑞金, CHEN G, 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.

收稿日期:2022-07-03 修回日期:2022-08-17

作者简介:高春嘉(1991-),男(汉族),山东招远人,讲师,博士,研究方向为电介质空间电场/界面电荷特性、新型电工绝缘材料。