

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.013

## 不同电场下CVT电容单元膜纸绝缘损坏机理研究

贺达<sup>1</sup>, 李博文<sup>1</sup>, 杨智<sup>2</sup>, 郑一鸣<sup>2</sup>, 蔺家骏<sup>2</sup>, 张乔根<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310007)

**摘要:** 电容式电压互感器(CVT)在超/特高压电力系统中得到了广泛使用。CVT发生故障将影响电能计量的准确可靠和电网运行的稳定安全。文中以故障发生率最高的CVT电容单元为研究对象,通过制作适用于反映CVT电容心子电极缺陷的试样,搭建对应的实验平台,进行不同电场形式下的击穿实验并分析试样击穿点分布,研究了工频电压、正、负极性雷电冲击电压和交流叠加冲击复合电场下膜纸绝缘的损坏机制。实验结果表明,CVT电容心子的铝箔电极边缘缺陷是导致膜纸绝缘损坏的主要原因,电极缺陷的种类及变化决定了击穿点的空间分布规律。聚丙烯薄膜对正负空间电荷“陷阱”效果的差异性,会引起复合电场不同叠加幅值、叠加相位下击穿点主导类型的转变。

**关键词:** 电容式电压互感器;膜纸绝缘;交流叠加冲击复合电场;电极边缘;击穿特性

### Study on Damage Mechanism of Film-paper Insulation of CVT Under Different Electric Fields

HE Da<sup>1</sup>, LI Bowen<sup>1</sup>, YANG Zhi<sup>2</sup>, ZHENG Yiming<sup>2</sup>, LIN Jiajun<sup>2</sup>, ZHANG Qiaogen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Capacitor voltage transformers (CVT) are used widely in EHV/UHV power systems. The failure of CVT not only affects the accuracy and reliability of electric energy measurement but also the stable and safe operation of power grid. In this paper the CVT capacitor unit with the highest fault rate is taken as the research object. By making the sample suitable for reflecting the electrode defects of CVT capacitor core, the corresponding experimental platform is set up to perform the breakdown experiment under different electric field conditions and analyze the breakdown point distribution of the sample. Moreover, the damage mechanism of film paper insulation under power frequency voltage, positive and negative polarity lightning impulse voltage and AC superposition impulse composite electric field is studied. The experimental results show that the edge defect of aluminum foil electrode of CVT capacitor core is the main cause for the insulation damage of film paper, and the types and changes of electrode defects determine the spatial distribution of breakdown points. However, the difference in the 'trap' effect of polypropylene film on positive and negative space charges will lead to transformation of the dominant type of breakdown point under different superposition amplitude and phase.

**Key words:** capacitor voltage transformer (CVT); film-paper insulation; AC superposition impulse composite electric field; electrode edge; breakdown characteristics

## 0 引言

电容式电压互感器(capacitive voltage transformer,

CVT)是结合电容分压器和中间变压器,进行电压监测、保护及通讯等应用的电器设备。与电磁式电压互感器相比,CVT凭借体积小、重量轻、维护工作量

收稿日期:2025-07-11; 修回日期:2025-10-18

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS20007M)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company Ltd.(5211DS20007M).

少、电场强度裕度大、绝缘可靠性高等诸多优点,在电力系统特别是超/特高压电力系统中得到了广泛使用<sup>[1-3]</sup>。CVT 主要由电容单元和电磁单元组成,其中电容单元由高压电容和低压电容构成。随着 CVT 在电力系统中的大量应用,由 CVT 引发的电网故障是电磁式电压互感器的 2 倍<sup>[4-5]</sup>。运行经验表明,CVT 设备缺陷中电容单元故障最多。少部分电容单元的击穿将造成二次电压异常升高或降低,直接影响其测量精度<sup>[6-7]</sup>;多节电容心子击穿会导致剩余元件承担过高的电压,使故障迅速发展,导致电容单元绝缘介质雪崩击穿,引发重大事故<sup>[8-9]</sup>。

引起 CVT 电容单元绝缘损坏的原因有两方面:内因源于电容单元本身结构缺陷,CVT 电容单元的绝缘介质主要为油浸膜纸复合绝缘,电极常为铝箔电极,元件间不同的电气连接方式下存在着不同的引线片结构。在实际生产过程中,电容心子由于铝箔电极边缘剪裁不齐或折边处理,不可避免地存在着毛刺和褶皱等绝缘弱点。电容心子的电极边缘为电场线集中处,电极边缘存在的毛刺、褶皱和引线片的插入进一步加剧了电场的畸变。有研究表明发生击穿的电容器中 78.89% 的击穿点均位于铝箔电极边缘<sup>[10]</sup>;不少研究者运用试验、仿真计算的方式分析了铝箔电极折边处理<sup>[11]</sup>、存在毛刺<sup>[12-13]</sup>、边缘不齐等因素对电极端部电场的影响。外因归咎为 CVT 工作环境导致的过电压条件。膜纸绝缘所处的电场形式不同,其放电特性具有显著差异:110 kV 电压等级 CVT 电容单元绝缘裕度大,单节电容心子击穿电压达到了额定值的 15~16 倍<sup>[14]</sup>;而在雷电过电压等高频暂态过电压作用时,脉冲电压下膜纸绝缘介质的空间电荷将对击穿电压产生显著影响,一方面电荷在“陷阱”缺陷处的入陷、脱陷等过程伴随着能量的释放和转移,是绝缘结构老化、破坏的重要原因<sup>[15]</sup>;另一方面,空间电荷的存在、转移和消失会加强或削弱介质内部的局部电场,从而影响电介质的绝缘性能<sup>[16-17]</sup>;有学者通过试验分别探究了交流和正极性脉冲电压下膜纸绝缘中聚丙烯薄膜的“陷阱”效果对于击穿电压的影响规律<sup>[18-19]</sup>;文[20-21]对比了全膜电容器在交、直流电场下击穿点分布规律的不同。但是,目前对于 CVT 电容单元在工频和冲击电压共同作用下膜纸绝缘击穿特性的研究几乎没有,对于 CVT 电容心子内部电极缺陷类型的分析不够清楚,CVT 中箔式电容器在复合电场下的损坏机制尚不明确。

文中通过制作模拟 CVT 电容心子内部电场分布和电极构造的单层膜纸绝缘试样,搭建了适用于

膜纸绝缘试样的交流—雷电冲击叠加电场耐压试验平台,完成了 CVT 电容单元膜纸绝缘在工频、标准雷电冲击电压以及二者叠加复合电场下击穿电压的幅值和击穿点分布规律的统计,探究了 CVT 箔式电容器内部电极结构和聚丙烯薄膜表面“陷阱”效果对膜纸绝缘损坏机制的影响。

## 1 试验条件

### 1.1 试验试样

为还原 CVT 电容单元内部绝缘介质所处电场,文中设计制作了能够同时反映箔式电容器由电极结构导致的多类型绝缘缺陷的单层膜纸绝缘试样。该试样由电极结构、绝缘介质、引线片结构 3 部分组成。3 部分原料均来自于实际 110 kV CVT 设备所使用的电容心子产品。试验电极为一对厚度 6  $\mu\text{m}$  的铝箔电极;绝缘介质采用膜—纸—膜复合绝缘,单层总厚度为 40  $\mu\text{m}$ ;引线片为 12 cm $\times$ 5 cm $\times$ 30  $\mu\text{m}$  的铝箔片,采用隐式铝箔引线片压接式串联结构,并配有实际产品采用的规格为 10 cm $\times$ 7 cm $\times$ 105  $\mu\text{m}$  的绝缘衬纸。浸渍剂采用二芳基乙烷 (PXE)。

实际产品与试样结构组成见图 1。图 1 中,铝箔电极与膜纸绝缘层由直接从卷绕后的电容心子成品裁剪获得,以使其空间相对位置与实际产品保持一致。同时对铝箔电极的两条短边边缘进行了折边处理,插入引线片并向上、向下弯折后即可将两电容电极引至试样外侧以进行加压。定量控制不同试品的铝箔电极折边距离、引线片以及绝缘衬纸插入深度,使其符合实际 CVT 设备产品规格需求。每件试样制作完成后通过曲别针固定,在 PXE 中保持 65  $^{\circ}\text{C}$  真空浸渍处理 24 h,试验所使用 PXE 浸渍剂处理方法同上,处理后的试样与试剂均密封保存。

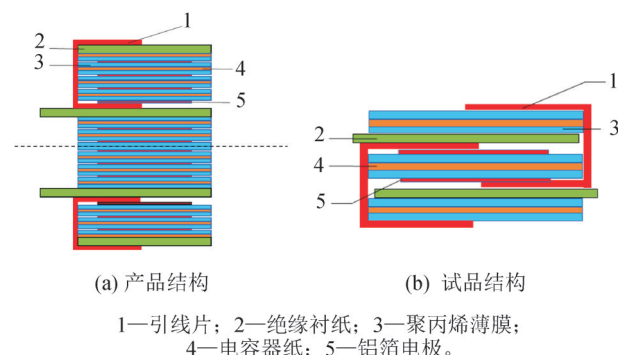


图 1 电容心子产品与试样结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of capacitor core product and test sample

研究表明,随着现代真空技术的发展,成品

CVT电容心子中几乎无残留气体,而铝箔电极边缘导致的局部场强畸变成为了电容心子损坏的主要原因<sup>[22]</sup>。为探究不同电场形式下CVT电容心子的击穿规律,对试品中的铝箔击穿点可能发生的位置进行了空间区域的划分见图2。图2中,每一个试样表面分可分为:A类区域为电容心子长边有引线片插入处;B类区域为CVT电容心子长边无引线片插入处,在一个心子中的总长度可达7~10 m,无折边处理过程,该边铝箔电极边缘由自动化工艺统一切割而成;C类区域边电极电容心子短边,在一个心子中的长度一般为8 cm或10 cm,边缘断口由手工裁剪而成,在实际生产中通常会进行折边处理,折边后可能存在着上下电极边缘不平齐或产生褶皱毛刺等问题,见图3;D类区域为CVT电容心子中电场近似匀强电场的内部区域,理论上是电容心子中发生击穿概率最低处。

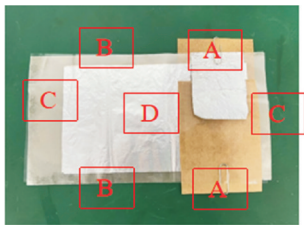


图2 电容心子试样实物图

Fig. 2 Picture of capacitor core sample

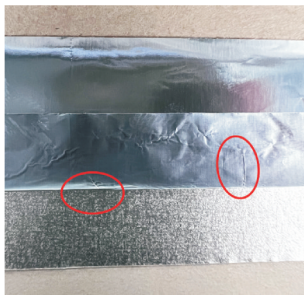
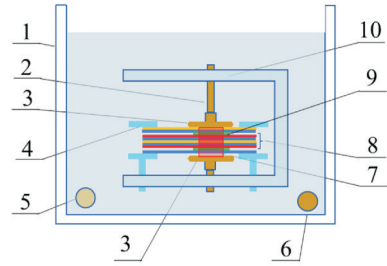


图3 折边处理造成的褶皱缺陷

Fig. 3 Fold defects caused by edge folding

## 1.2 试验平台

提供适用于单层膜纸绝缘试验的电极结构和试验腔体,设计并制造了试验平台,见图4。利用有机玻璃腔体作为提供浸渍环境的容器。千分头和平板电极共同起到对试品内部的支撑、压紧作用。两组有机玻璃控距压板起到对试品边缘的压紧作用。试验回路中的高压源、接地端分别通过穿过有机玻璃腔体的高、低压导杆与上下平板电极相连,进而通过引线片对单层膜纸绝缘施加电压。插入的绝缘衬纸和加装的聚丙烯薄膜在还原实际电容心子结构的同时,防止了在平板电极与内部铝箔之间发生击穿。



1—有机玻璃腔体; 2—千分头; 3—平板电极; 4—控距压板; 5—高压导杆; 6—接地导杆; 7—引线片; 8—单层膜纸绝缘; 9—绝缘衬纸; 10—聚四氟电极架。

图4 试验平台结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test platform structure

## 1.3 试验回路

为在试品上施加叠加相位、幅值可控的工频—雷电冲击复合电压,搭建的试验回路见图5。试验变压器提供幅值最高可达100 kV的交流电压。高压直流源 $E_2$ 和单级双极性冲击发生器共同提供幅值可达60 kV的雷电冲击电压。同步相位触发装置以单片机、过零比较模块为核心,通过单片机内部计时给予晶闸管导通信号,进而通过脉冲变压器在场畸变火花开关上生成脉冲电压实现开关导通。低压直流源 $E_1$ 和脉冲变压器共同控制场畸变火花开关的触发以调节冲击电压的叠加相位。 $C_1(1 \mu\text{F})$ 为触发脉冲产生回路充电电容; $C_2(20 \text{ nF})$ 、 $C_3(20 \mu\text{F})$ 为冲击发生器充电电容; $R_1(20 \text{ M}\Omega)$ 、 $R_2(20 \text{ M}\Omega)$ 为冲击电压产生回路充电电阻; $R_3(6.9 \text{ k}\Omega)$ 、 $R_4(290 \Omega)$ 分别为冲击电压产生回路波前、波尾电阻,在此基础上可以在试品上产生 $(1.3 \pm 0.1)/(52 \pm 2) \mu\text{s}$ 的雷电冲击电压; $R_{p1}(100 \text{ k}\Omega)$ 为脉冲电压回路充电电阻; $R_0(100 \text{ k}\Omega)$ 为脉冲电压触发回路保护电阻; $R_{p2}(112 \text{ k}\Omega)$ 为工频电压回路保护电阻。采用隔离球间隙的方式在叠加前对冲击电压产生回路进行保护,根据所需叠加的电压差值调整开关电极距离,以改变开关的自击穿电压。

对于单一类型电压作用试验,分别利用升压法和升降压法对膜纸绝缘试样的工频平均击穿电压幅值 $U_{av}$ 和正负极性雷电冲击电压下50%击穿电压幅值 $U_p$ 进行测量。对于复合类型的电压作用试验,由于试品内部绝缘缺陷不明确,为研究电压极性影响,分别进行了2种叠加相位( $90^\circ$ 、 $270^\circ$ )下、正负极性雷电冲击电压的复合电压击穿实验见图6<sup>[23]</sup>。预施加工频电压幅值 $U_{ac}$ 由工频下试品的平均击穿电压 $U_{av}$ 决定。考虑到CVT电容单元绝缘裕度较大,分别设置了 $U_{ac}=10\%U_{av}$ 、 $U_{ac}=40\%U_{av}$ 两种幅值叠加比例,进而比较了不同复合电压时50%击穿电压幅值 $U_s$ 与雷电冲击电压单独作用时50%击穿电压幅值 $U_p$ 的区别。

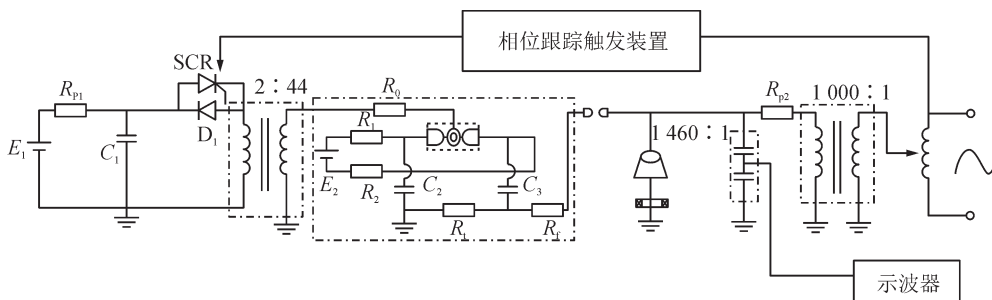


图5 试验回路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test circuit

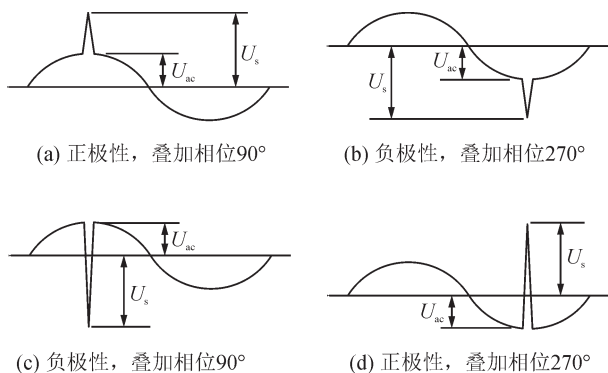
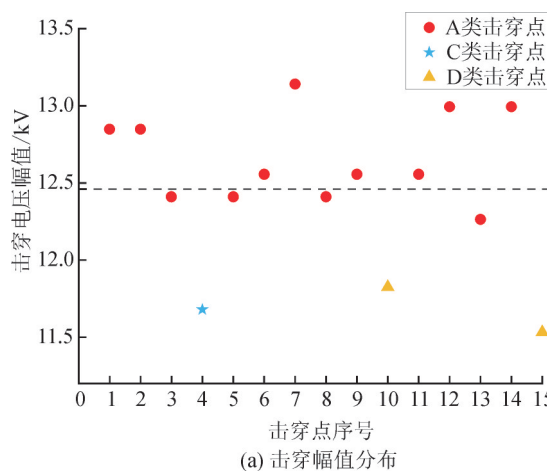
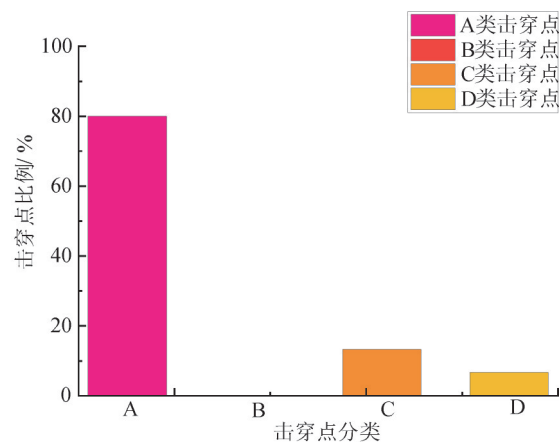


图6 复合电压叠加方案示意图

Fig. 6 Scheme of superimposed voltage



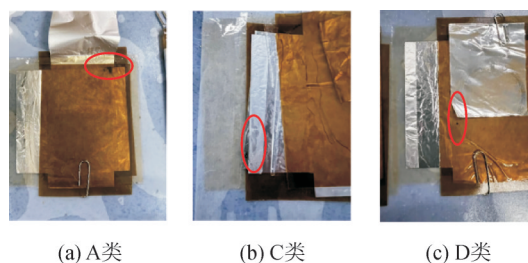
(a) 击穿幅值分布



(b) 击穿点空间分布

图7 工频电压下试品的击穿特性

Fig. 7 Breakdown characteristics of samples under power frequency voltage



(a) A类 (b) C类 (c) D类

图8 不同类型击穿点照片

Fig. 8 Photos of different types of breakdown points

进一步观察解剖后的电容心子击穿点分布,工频电压下,A类区域是最容易优先击穿。C、D类击

## 2 结果和讨论

### 2.1 工频电压击穿实验

为探究试品在工频电压下的击穿特性,确定复合电场中预施加工频电压幅值的上限基准值,利用升压法测量了 CVT 膜纸绝缘试样的工频平均击穿电压  $U_{av}$ 。利用图 5 右半侧工频耐压试验回路,以 1 kV/s 的升压速率调节调压器以控制交流输出电压幅值。同时利用冲击电流线圈实时监测试品的短路冲击电流以触发示波器,记录试品击穿电压波形,观察其电压击穿相位和击穿幅值,用新试品替换已击穿的试品,替换后静置等待 1 min 以保证液体绝缘恢复,重复该过程 15 次后对腔体内的浸渍剂进行替换。以 15 次击穿电压幅值平均值作为该膜纸绝缘试品工频下的平均击穿电压幅值  $U_{av}$ ,之后拆解已击穿的电容心子样品,统计其击穿点类型比例见图 7。

由试验结果可知,工频电压下膜纸绝缘试品的平均击穿电压为 12.46 kV,标准差为 0.48 kV,其中 A 类击穿点所占比例最高,达到了 80%,与文[24]中脉冲电容器在老化试验中绝缘损坏的主要位置相同,明显高于其他 3 类,没有出现 B 类击穿点。同时 A 类击穿点击穿电压明显高于 C、D 两类,A 类击穿点平均击穿电压为 12.66 kV,标准差为 0.29 kV。不同击穿点的具体击穿形貌照片见图 8。

穿点击穿电压均明显低于A类区域,没有击穿点出现在B类区域。原因在于:B区域铝箔电极边缘由高精度机械切割而成,出现毛刺缺陷的概率极低,且上下铝箔电极边缘的相对空间位置由自动卷绕机确定,整齐度较高,故在各类电极边缘处场强畸变程度相对较低;而C类区域尽管具有折边处理过程,折边后上下电极边缘可能存在凹凸不齐的情况,且可能存在由弯折导致的褶皱缺陷;对于少部分D类击穿点,可以看到击穿点仍围绕在插入的引线片直角顶点处,观察试品内部可知,引线片对内部接触的铝箔电极造成了机械划伤,进而导致了该处局部场强较高,使得试品在该处优先发生了放电。在利用升压法进行试验的过程中,C类区域曲率半径极小的褶皱在较高的电压下会形成稳定的电晕,部分毛刺甚至会被灼烧平整。这大大削弱了由于褶皱或毛刺造成的电场畸变。因此在保证生产工艺的条件下,工频电压下B、C、D类空间区域发生击穿的概率均低于A类区域。

基于此,考虑到CVT电容心子的聚丙烯薄膜采用单面粗化膜,铝箔边缘与薄膜间不可避免地存在着浸渍剂间隙,试品内部的A、B、C、D类区域可等效的电场模型见图9。图9中:A区域引线片的插入延长了与其接触电极的长度,与其相邻的异极性电极间形成了“棒板电极”见图9(d)、(e);B区域上下平整对齐的电极边缘形成了“棒棒电极”见图9(b);初始状态的C区域可能存在着形同B区域的“针板电极”图9(b)由褶皱、上下电极边缘未对齐而形成的“针板电极”图9(a);但在一定电压大小的持续作用下,褶皱和毛刺缺陷被屏蔽或消除时的C区域电极边缘均可视为“棒棒电极”见图9(b);D区域则对应最均匀的“板板电极”见图9(c)。

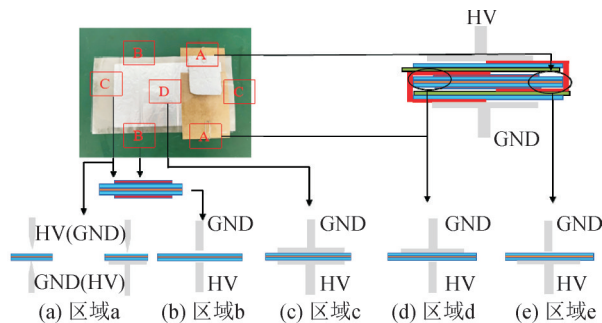


图9 不同区域处等效电场模型

Fig. 9 Equivalent electric field models of different regions

工频电压下击穿发生时的相位见图10。由图10可知,工频电压下,击穿在正、负半周均有发生。根据图9电场模型,图9(d)、(e)对应A类缺陷,电场畸变程度最高。由于A类发生次数最多,故仅对

A类缺陷处的击穿点进行击穿相位的分析。A类击穿点中,发生在正半周的击穿比例为66.7%,发生在负半周的击穿比例为33.3%,即既有击穿发生在与地电极接触的引线片覆盖处图9(d),也有击穿发生在与高压电极接触的引线片覆盖处图9(e),且击穿均发生在正负电压上升沿的峰值附近。但值得注意的是,在图9(d)处发生的击穿均为正半周击穿,而在图9(e)处位置发生的击穿均为负半周击穿。对此,工频电压下图9(d)、(e)过程发生的击穿机制可用模型进行分析,见图11。图11中,当高压端为正极性冲击电压或工频电压正半周时,其内部击穿模型见图11(a)、(b);当高压端为负极性冲击电压或工频电压负半周时,其内部击穿模型见图11(c)、(d)。

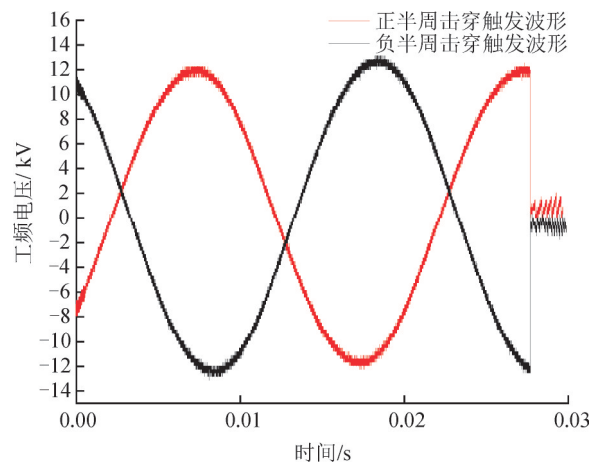


图10 工频电压击穿波形

Fig. 10 Breakdown waveform of power frequency voltage

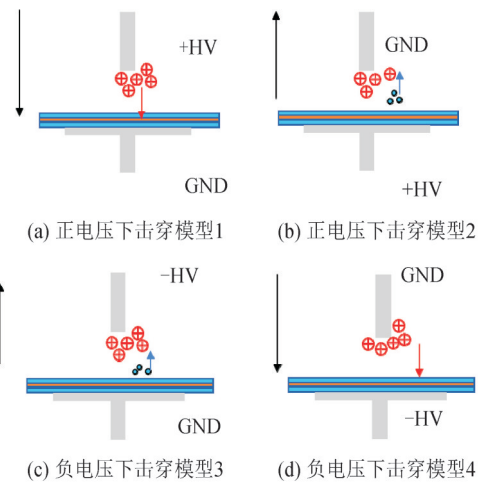


图11 单一电压作用下试品内部击穿模型

图11 单一电压作用下试品内部击穿模型

Fig. 11 Internal breakdown model of the specimen is performed under a single voltage

由图9可知,在某一电场形式下,对于A类击穿,试品内部同时存在着一对棒板电极见图11,即

“高压棒电极—接地板电极”(正电压下为图 11(a), 负电压下为图 11(c)), 和“接地棒电极—高压板电极”(正电压下为图 11(b), 负电压下为图 11(d))。不考虑毛刺等偶发缺陷的前提下, 不同极性冲击电压、工频电压不同半周在 A 类缺陷处所引发的击穿将在以上两处做出选择。由于 PXE 浸渍剂绝缘强度低于聚丙烯薄膜, 放电会在曲率半径较小的棒电极周围的油间隙当中优先发生, 该处将因场致电离产生初始自由电荷。

当高压电极电压极性为正时, 在图 11(a)处, 由于正负载流子运动速率存在差异, 棒电极附近的正电荷与板电极之间形成的电场与外电场方向一致, 故对放电发展起促进作用; 而在图 11(b)处, 棒电极附近的正电荷将对向高压电极运动的电子起阻碍吸引的作用, 故对放电发展起抑制作用。因此, 在外施电压为正时, 击穿将更容易在“高压棒电极—接地板电极”图 11(a)处, 其对应图 9(d), 即与地电极接触的引线片所覆盖处。

同理, 当高压电极电压极性为负时不再赘述, 击穿将更容易在“高压板电极—接地棒电极”图 11(d)处, 其对应图 9(e), 即与高压电极接触的引线片所覆盖处。以上分析不仅限于工频电压瞬时值为正(负)时发生的击穿, 同样适用于正(负)极性雷电冲击电压。二者均可等效为经典理论中分析极性效应的“正棒—负板”电极。

## 2.2 雷电冲击电压击穿实验

为探究冲击电压下的击穿特性, 比较复合电场下冲击电压击穿值变化, 利用升降压法测量了 CVT 膜纸绝缘试样正、负极性雷电冲击电压下 50% 冲击击穿电压  $U_p$ 。利用图 5 左半侧冲击电压试验回路, 通过调节直流充电电压, 保证每次增加或减少的施加电压值小于预期击穿电压的 3%, 重复加压 40 次, 对已击穿的试样和浸渍剂环境采用同工频电压击穿实验的处理方式。测得正、负极性雷电冲击电压下 50% 冲击击穿电压值分别为  $U_{p+}=15.8\text{ kV}$ ,  $U_{p-}=15.9\text{ kV}$ 。拆解已击穿的电容心子样品, 统计其击穿电压幅值 3 参数 Weibull 分布以及击穿点类型比例见图 12、13。

由图 13 可知, 正、负极性雷电冲击电压下, 试品的击穿点中 A 类击穿点所占比例均为最高, 正极性为 50%, 负极性为 54.5%, 相比于工频电压略有下降。因为雷电冲击电压的电压上升率远高于工频电压, 试样中其他区域的褶皱、毛刺等缺陷未能持续处于较高的电压中形成稳定的电晕或将毛刺缺陷烧蚀平整, 由此产生的毛刺、褶皱的曲率半径甚至小于 A 类区域对应的“棒板电极”。这也是 C 区域

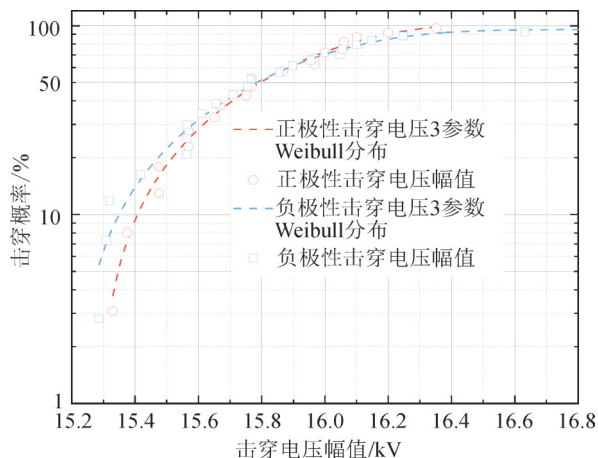


图 12 雷电冲击电压下试品击穿电压概率分布

Fig. 12 Probability distributions of breakdown voltages under the lightning impulse voltage

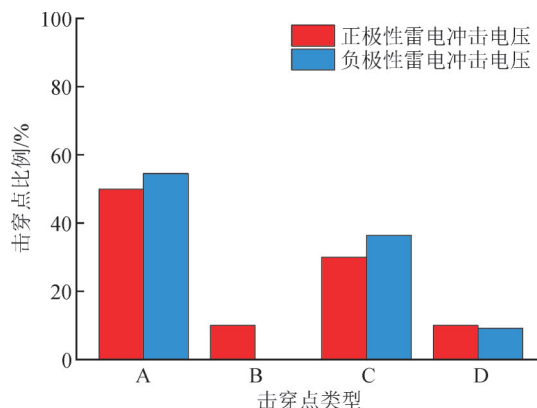


图 13 雷电冲击电压下试品击穿点类型统计

Fig. 13 Statistics of the type of breakdown point of the specimen under the lightning impulse voltage

可等效为图 9 的铝箔短边特有的“针板电极”的原因。最终导致击穿发生在 A、C 类的概率差减小。因此正、负极性雷电冲击电压单独作用时的 A 类缺陷占比会有所下降, C 类缺陷占比会有所上升。

从击穿发生的波形位置观察, 两种电压极性下, 不同击穿点类型的击穿在电压波前、波尾均有发生且比例相近, 并未呈现出明显的规律。另外, 两种极性下的 A 类击穿仍满足正极性雷电冲击电压下击穿点均位于“高压棒电极—接地板电极”, 负极性雷电冲击电压下击穿点均位于“高压板电极—接地棒电极”的规律, 证实了图 9、11 的分析。因此, 试样在正、负极性雷电冲击电压下发生击穿的实质均可视为“正棒负板”电场中的击穿形式。因此由升降压法测得二者的 50% 击穿电压幅值相差极小。

实际工程应用中, 标准 DL/T 1251—2013 要求对于 42.5~300 kV 电压等级 CVT 设备, 其额定绝缘水平由额定雷电冲击耐受电压和额定工频耐受电压确定。其中, 额定雷电冲击耐受电压(峰值)约为

其额定短时工频耐受电压(方均根值)的2.2~2.5倍<sup>[25]</sup>。文中得到的单个试品工频击穿电压(方均根值)约为系统标称电压(方均根值)的15~18倍(受实际电压等级CVT电容器元件串联数影响);50%雷电冲击电压幅值约为额定工频击穿电压(方均根值)的1.8倍,小于标准中额定雷电冲击耐受电压(峰值)与额定短时工频耐受电压(方均根值)的比值。因此,使用额定雷电冲击耐受电压(峰值)对设备绝缘要求进行校验,对于通过了额定短时工频耐受电压试验的设备是十分必要的。

### 2.3 复合电场击穿实验

为研究预施加工频电压对雷电冲击电压击穿特性的影响,按上述试验方案进行了以下11种电场形式下的50%击穿电压幅值 $U_50$ 和击穿点空间分布比例的统计分析,结果见图14。

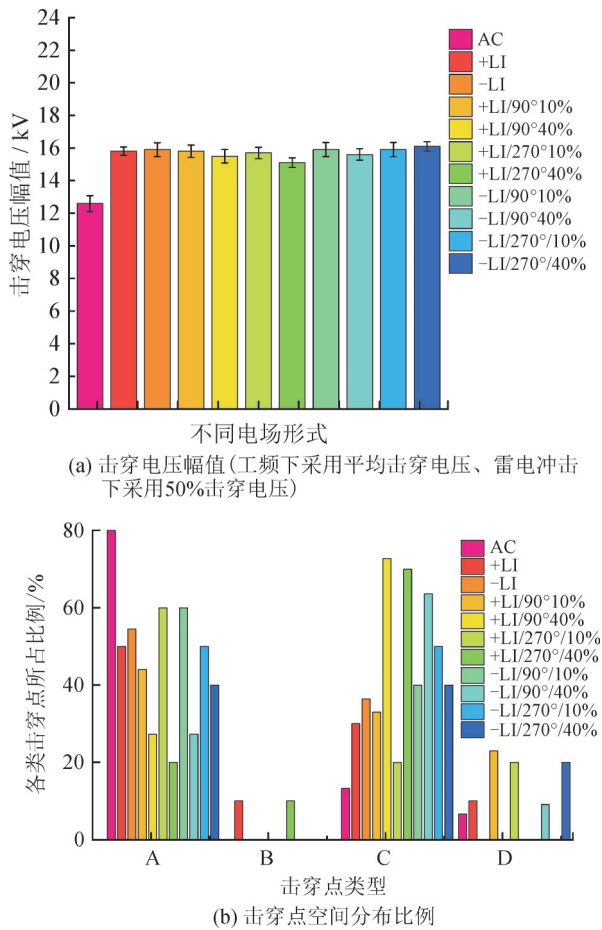


图14 不同电场形式下试品击穿点击穿幅值和击穿点类型统计

Fig. 14 Statistics of the breakdown amplitude and breakdown point type of the specimen under different electric field forms

从击穿幅值看,不同叠加比例、叠加相位下,负极性雷电冲击电压 $U_50$ 均略高于正极性雷电冲击电压。10%工频击穿电压幅值叠加比例下,正、负极性

雷电冲击电压50%击穿电压 $U_50$ 均未发生明显变化;而40%工频击穿电压幅值叠加比例下,负极性雷电冲击电压 $U_50$ 仅在90°反极性叠加下略有降低,正极性雷电冲击电压 $U_50$ 则在90°、270°叠加相位均下降明显。从击穿点空间上看,绝大多数电场形式下A类缺陷均占主导。其中工频电压下A类击穿点所占比例最高,达到了80%。对于复合电场,除40%叠加幅值比例下的90°、270°叠加相位下正极性雷电冲击电压,以及90°叠加相位下负极性雷电冲击电压,对应的击穿点中C类击穿点占主导外,其他电场形式下A类击穿点所占比例达到了50%以上。结合以上3种反常击穿点类型的电压形式对应的击穿值均略低于该冲击电压单独作用时的击穿值,故推测预施加工频电场加强了试品C类区域的场强。

另一方面,对于复合电场下击穿出现的波形位置,10%幅值叠加比例的复合电场中,不同击穿点类型的击穿在冲击电压的波前、波尾均有发生,且比例接近。而在40%叠加比例的复合电场中,叠加相位为90°时的负极性雷电冲击电压下,A类击穿点均发生在波尾,而C类击穿点发生在波前的概率较高,约占C类的85.7%;叠加相位为270°时的正极性雷电冲击电压下,A类击穿点在波前、波尾发生概率相近,而C类击穿点发生在波前的概率较高,约占C类类型的69.2%;叠加相位为270°时的负极性雷电冲击电压下,A类击穿点中71.4%发生在波尾,C类击穿点中83.3%发生在波前;叠加相位为90°时的正极性雷电冲击电压下,A类击穿点中83.3%发生在波尾,C类击穿点在波前与波尾发生概率相近。综上所述,只有在40%叠加比例的复合电场下,发生频率较高的A、C两类击穿点才会呈现出明显的波形位置分布规律,总体上表现为:A类击穿点容易发生在波尾位置,C类击穿点则容易发生在波前位置。这也直接导致了C类击穿点占主导地位的3类复合电场形式对应的50%击穿值均略低于冲击电压单独作用时的击穿值。

针对这3类复合电场下击穿点的“反常”现象分析如下:首先,所有电场形式下B类击穿点所占比例极低的事实说明,对于CVT电容心子产品所使用的铝箔电极,其本身长边边缘几乎不存在能引起电场明显畸变的毛刺。而C区域的短边边缘由折边处理导致褶皱、毛刺缺陷产生的可能性远大于其他区域。但是,在复合电压下,10%叠加比例的预施加工频电压并不会对毛刺缺陷的屏蔽或消除有明显影响,因此冲击电压的击穿幅值和击穿点类型比例均与其单独作用时相差不大;而在40%叠加幅值下,C

区域的毛刺缺陷不会被消除, 反而仍是局部电场畸变最强处。尽管由于铝箔电极与聚丙烯薄膜间油间隙的存在, 毛刺处电场强度可能无法产生直接的电荷注入, 但聚丙烯薄膜和电容器纸均为混合材料, 包含较多的可电离物质<sup>[26]</sup>。如聚丙烯薄膜在生产过程中会用苯甲酸类作为成核剂、二苯甲酮类作为吸收剂。这些杂质的含量一般高达 4 mol%<sup>[27]</sup>, 在低于 40 kV/mm 场强下即会发生偶极子极化甚至离子电离<sup>[29-28]</sup>, 进而受电场影响持续运动或被材料表面的“陷阱”捕获<sup>[30-33]</sup>。文<sup>[34]</sup>通过电声脉冲法发现, 膜纸复合绝缘中聚丙烯薄膜在电场作用下会积聚负电荷, 且临近电极电压为负极性时, 负电荷会积聚在靠近电极的薄膜表面, 而临近电极电压为正极性时, 负电荷将积聚在远离电极的膜纸界面。

结合图 11 的分析, 此时 C 区域发生的击穿将由其本身具备的“针板电极”电场形式引发。同时由于褶皱、毛刺缺陷位置的随机性, 正、负极性雷电冲击电压下发生的击穿均可等效为“正针—负板”电场下的击穿形式见图 15。预施加工频电压使薄膜中积聚了一定量负电荷, 故当褶皱或毛刺缺陷处产生正极性冲击电压时, “正针电极”与负空间电荷间的电场将大大增强, 使得击穿更容易在 C 区域起始。在后续流注发展过程中, 流注中的正电荷更容易积聚在聚丙烯薄膜表面, 增加了流注的电荷密度<sup>[19, 35]</sup>, 使得击穿进一步发展。综上, C 区域“正针—负板”电场下的冲击电压击穿过程在放电起始、发展过程中均受到了空间电荷的促进作用, 使得该处的击穿优先完成。因此, 复合电场下正极性雷电冲击电压的击穿点在 C 类区域的比例明显增大。

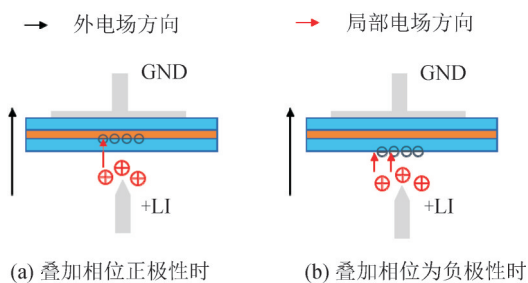


图 15 聚丙烯薄膜陷阱效果的影响

Fig. 15 Effect of traps on polypropylene film

基于上述分析, 由于空间电荷积聚位置的不同, 在工频电压负半周进行叠加时, 聚丙烯薄膜表面积聚的负电荷对毛刺处的电场畸变效果要强于叠加相位为正半周时的畸变效果。那么, 为什么负极性雷电冲击电压下, 叠加相位为 270° 时击穿点类型反而没有 90° 时变化明显的原因在于: 负极性冲击电压下, 放电始于地电极处毛刺产生的正极性冲

击电压, 而高压电极和地电极间的参考极性恰恰相反。因此当高压电极工频电压相位为 270° 时, 临近地电极处的聚丙烯薄膜聚集的实则是电压相位为 90° 时所对应的空间电荷; 而当高压电极电压相位为 90° 时, 临近地电极处的聚丙烯薄膜聚集的实则是 270° 所对应的空间电荷。因此负极性雷电冲击电压下, 聚丙烯薄膜表面空间电荷在相位上的积聚规律与正极性雷电冲击电压下恰好相反。

### 3 结论

文中对 CVT 电容单元膜纸绝缘介质在工频电压、正、负极性雷电冲击电压、以及二者叠加的复合电场下的击穿特性进行了研究。探究了 CVT 电容心子内部由电极边缘、引线片插入、褶皱毛刺等绝缘缺陷, 以及聚丙烯薄膜表面的“陷阱”效果对膜纸绝缘损坏机制的影响。对结果总结如下:

1) 试品击穿电压幅值、击穿点分布的规律反映了其内部的击穿机制。CVT 电容心子膜纸绝缘内部的电场形式可划分为 5 种类型。在工频电压作用下, 膜纸绝缘的损坏集中发生在场强最高的被引线片覆盖的铝箔电极边缘处; 雷电冲击电压下, 膜纸绝缘的损坏则主要发生在被引线片覆盖的铝箔电极边缘和电容心子铝箔的短边折边处, 分别对应“棒—板”、“针—板”电极。

2) 单一电场作用下, 试品内部的击穿均可视为发生在“正棒(针)—负板”间的放电模型。因此, 工频电压下试品的击穿在交流电压正负半周均有发生, 击穿点的空间位置与其发生时的时间相位具有一致性。不同极性雷电冲击作用下其击穿电压的幅值相差不大, 击穿点的空间位置与电压极性具有一致性。

3) 复合电场下, 膜纸绝缘中聚丙烯薄膜表面对于正负载流子“陷阱”效果的不同, 使预施加工频电压对雷电冲击电压的击穿特性产生了明显影响。某些叠加相位下, 一定幅值以上的预施加工频电压将使得毛刺缺陷处的聚丙烯薄膜积聚负空间电荷, 该电荷会促进正极性雷电冲击电压在膜纸绝缘中的击穿过程, 使得发生在铝箔电极短边边缘的击穿点占主导地位。

4) 实际应用中, 对于 42.5~300 kV 电压等级 CVT 设备, 如受实验条件限制, 仅使用额定雷电冲击耐受电压(峰值)对设备的绝缘要求进行校验是可行的; 反之, 额定短时工频耐受电压试验不能替代额定雷电冲击耐受电压试验。

## 参考文献:

- [1] SHEN Xin, SHU Hongchun, CAO Min. Research on capacitance voltage transformer harmonic measurement[J]. Sensors and Materials, 2019, 31(5): 1499-1512.
- [2] ZHANG Chuanji, LI Hongbin, YANG Jian, et al. Detecting measurement error drifts of a capacitor voltage transformer on-line and its field application[J]. Measurement Science & Technology, 2019, 30(10): 6501-6509.
- [3] 陈豪钰, 李振华, 张绍哲, 等. 基于MHA-CNN-SLSTM和误差补偿的短期互感器误差预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 74-84.  
CHEN Haoyu, LI Zhenhua, ZHANG Shaozhe, et al. Short-term transformer error prediction based on MHA-CNN-SLSTM and error compensation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 74-84.
- [4] 刘刚, 江波. 电容式电压互感器故障分析及预防措施[J]. 变压器, 2012, 49(9): 68-72.  
LIU Gang, JIANG Bo. Fault analysis and preventive measures of capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2012, 49(9): 68-72.
- [5] 王欢, 王忠东, 卢树峰, 等. 基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 73-80.  
WANG Huan, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 73-80.
- [6] 张竹. 电容式电压互感器计量误差状态评估和预测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
ZHANG Zhu. Research on condition evaluation and prediction methods for the metering error of capacitor voltage transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [7] 张凯煜, 沈云超, 郭全军, 等. 一起500 kV电容式电压互感器电压异常事件的分析与处理[J]. 变压器, 2023, 60(8): 65-70.  
ZHANG Kaiyu, SHEN Yunchao, GUO Qunjun, et al. Analysis and treatment of an abnormal voltage event of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(8): 65-70.
- [8] 何建, 余睿, 杨漪俊. 电容式电压互感器常见故障及监测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(5): 38-42.  
HE Jian, YU Rui, YANG Yijun. The common faults and its monitoring of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(5): 38-42.
- [9] 陈璐, 李光茂, 张梦慧, 等. 一起110 kV电容式电压互感器异响原因分析[J]. 变压器, 2023, 60(12): 68-72.  
CHEN Lu, LI Guangmao, ZHANG Menghui, et al. Cause analysis of abnormal noise of a 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12): 68-72.
- [10] 陈首兴, 李丁九. 重复频率脉冲电容器[J]. 电力电容器与无功补偿, 1989, 10(1): 13-19.  
CHEN Shouxing, LI Dingjiu. Repetitive impulse power capacitors[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 1989, 10(1): 13-19.
- [11] SONG Minglan, HU Shouyu. Polypropylene film dielectric used in power capacitors[C]//International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials(ICPADM). Beijing: IEEE, 1988: 674-677.
- [12] 彭倩, 吴广宁, 张星海, 等. 局部放电对脉冲电容器的绝缘老化及其失效的影响分析[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 489-492.  
PENG Qian, WU Guangning, ZHANG Xinghai, et al. Influence of partial discharge on insulation aging and failure of pulse capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 489-492.
- [13] 朱博峰, 张晓, 张冠祥, 等. 高压大容量介电储能脉冲电容器电热耦合仿真分析与原位测试[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 217-225.  
ZHU Bofeng, ZHANG Xiao, ZHANG Guanxiang, et al. Finite element simulation and in-situ testing of electrothermal coupling in dielectric energy storage pulse capacitor for electromagnetic launch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 217-225.
- [14] 王岩, 林浩, 李慧, 等. 电容式电压互感器元件耐压试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 45-49.  
WANG Yan, LIN Hao, LI Hui, et al. Study on withstand voltage test of capacitor voltage transformer element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 45-49.
- [15] 周力任, 吴广宁, 高波, 等. 聚酰亚胺薄膜中电荷输运机理和空间电荷特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 6-11.  
ZHOU Liren, WU Guangning, GAO Bo, et al. Charge transport mechanism and space charge characteristic in polyimide film[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 6-11.
- [16] 陈广辉. 交流电场下XLPE电缆空间电荷测量系统研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
CHEN Guanghui. Study of the cable space charge measurement system under AC stress[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 黄猛, 李怡然, 吴延宇, 等. 计及界面电荷和极性效应的油纸复合绝缘非线性电路等效模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3422-3432.  
HUANG Meng, LI Yiran, WU Yanyu, et al. Equivalent nonlinear circuit model with interface charge and polarity effect for oil-paper composite insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3422-3432.
- [18] SAITOH K, KAWAKAMI Y, MURATA M. On the AC breakdown MECHANISM of the laminated oil-impregnated PPLP[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). Victoria, Canada: IEEE, 1992: 236-241.
- [19] SAITOH K, KAWAKAMI Y, MURATA M. The effects of polypropylene on the impulse breakdown mechanism of the laminated oil-impregnated PPLP[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). Victoria, Canada: IEEE, 1992: 242-247.
- [20] 方田, 李化, 国江, 等. 并联电容器绝缘介质的击穿性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 66-70.  
FANG Tian, LI Hua, GUO Jiang, et al. Study on breakdown performance of insulation medium of shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 66-70.
- [21] 陈力, 汤霖, 左中秋, 等. 基于变异系数法和灰色关联度的高压并联电容器综合评价研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 27-32.  
CHEN Li, TANG Lin, ZUO Zhongqiu, et al. Research on comprehensive evaluation of high voltage shunt capacitor based on

- coefficient of variation method and grey correlation degree[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(5): 27-32.
- [22] CHENG Lu, LI Zhou, LIU Wenfeng. Design optimization of power capacitor major insulation based on partial discharge performance [C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis(CMD). Xi'an:IEEE, 2016:282-286.
- [23] UETA G, TSUBOI T, TAKAMI Jun, et al. Insulation characteristics of gas insulated switchgear under lightning impulse and ac superimposed voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(3): 1026-1034.
- [24] WU Guangning, ZHOU Liren, ZHANG Xueqin, et al. Study on the failure factors of composite insulation in high-voltage storage capacitors[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(2): 186-193.
- [25] 电力用电容式电压互感器使用:DL/T 1251—2013[S]. 2013. Technical specification of power capacitance voltage transformer for use:DL/T 1251—2013[S]. 2013.
- [26] 王云杉, 周远翔, 李光范, 等. 油纸绝缘介质的空间电荷积聚与消散特性[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 873-877. WANG Yunsha, ZHOU Yuanxiang, LI Guangfan, et al. Space charge phenomena in oil-paper insulation materials under high voltage direct current[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(5): 873-877.
- [27] GREAVES, W R, FOWLER E P, GOODINGS D R. The direct piezoelectric effect in extruded polyethylene[J]. *Journal of Materials Science*, 1974(10): 1602-1608.
- [28] AHMED N H, SRINIVAS N N. Review of space charge measurements in dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4(5): 644-656.
- [29] 王辉, 李晓军, 李庆宇, 等. 基于偏压热刺激电流法的油纸绝缘介电性能研究[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(1): 47-51. WANG Hui, LI Xiaojun, LI Qingyu, et al. Study on dielectric properties of oil-paper insulation based on bias thermally stimulated current method[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(1): 47-51.
- [30] 夏源, 杨丽君, 吕晓露, 等. 基于介质响应电流频变特性的油纸绝缘受潮状态评估方法[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(11): 3444-3456. XIA Yuan, YANG Lijun, LYU Xiaolu, et al. Evaluation method of oil-paper insulation damp state based on the frequency-dependent characteristics of dielectric response current[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(11): 3444-3456.
- [31] DOUGHTY K, DAS - GUPTA D K, COOPER D E. Anomalous polarization effects in low density polyethylene with AC charging [C]//Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena (CEIDP). Hill Falls, USA:IEEE, 1983:460-466.
- [32] LAURENT C, TEYSSEDE G, ROY S L, et al. Charge dynamics and its energetic features in polymeric materials[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(2): 357-381.
- [33] HANLEY T L, BURFORD R P, FLEMING R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2003, 19(1): 13-24.
- [34] XU Zhiqiang, SU Wen, CHEN G. Space charge properties of PPLP insulation [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). Toronto:IEEE, 2016:153-156.
- [35] OCHIAI S, ITO M, MIZUTANI T, et al. TSC in silicone oil/polypropylene system and their interaction[J]. *IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan*, 1983, 103(12): 695-700.

贺达(1998—),男,硕士研究生,主要从事电容器绝缘介质方面的研究(通信作者)(E-mail:hedahv@stu.xjtu.edu.cn)。