

# 操作冲击电压及其叠加工频电应力下油纸绝缘尖端放电及燃弧特性研究

吴经锋<sup>1</sup>, 王文森<sup>1</sup>, 丁彬<sup>1</sup>, 张璐<sup>1</sup>, 韩彦华<sup>1</sup>, 李祎<sup>2,3</sup>, 李斯盟<sup>2</sup>

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 具有油纸绝缘绕组结构的关键电力设备在投运时容易出现乙炔超标问题, 进而产生局部放电和燃弧现象。为此, 本文研究操作冲击电压及其叠加工频电应力下油纸绝缘的尖端放电及燃弧特性, 对比分析不同尖端缺陷的放电与燃弧特性, 讨论冲击电压与工频电压叠加相位的影响。结果表明: 含有纸板的缺陷模型击穿后的燃弧过程可分为高频重燃弧阶段、稳定燃弧阶段、电压恢复前的重燃阶段, 其中高频重燃弧阶段具有较高的燃弧频次与较低的恢复电压; 操作冲击电压下, 纯油隙缺陷模型出现多次击穿, 油纸复合绝缘缺陷模型出现纸板直接击穿和油纸先后击穿, 且缺陷模型的类型会影响放电特性及燃弧规律; 叠加相位则是通过影响电应力幅值来影响放电特性与燃弧规律。

**关键词:** 重燃弧; 局部放电; 操作冲击电压; 电抗器; 变压器

中图分类号: TM855 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.007

## Point discharge and arc characteristics of oil-pressboard insulation under switching impulse voltage and superimposing power frequency electrical stress

WU Jingfeng<sup>1</sup>, WANG Wensen<sup>1</sup>, DING Bin<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, HAN Yanhua<sup>1</sup>, LI Yi<sup>2,3</sup>, LI Simeng<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Shaanxi Electric Power Company SGCC, Xi'an 710100, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The key power equipment with the oil-pressboard insulation winding structure is prone to appear the problem of acetylene content exceeding the standard when putting into operation, and then partial discharge and arcing phenomena are produced. Therefore, the point discharge and arcing characteristics of oil-pressboard insulation were studied under switching impulse voltage and superimposing power frequency electrical stress. The discharge and arcing characteristics of different point defects were compared and analyzed, and the influence of the superimposed phase of impulse voltage and power frequency voltage was discussed. The results show that the arcing process of the defect model containing pressboard after breakdown can divide into high-frequency re-arcing stage, stable arcing stage, and re-arcing stage before the voltage restored. Among them, the high-frequency re-arcing stage has higher arcing frequency and lower recovery voltage. Under the switching impulse voltage, the pure oil gap defect model shows multiple breakdown, and the oil-pressboard composite insulation defect model shows that the pressboard breakdown directly and the oil pressboard breakdown successively, and the defect model type affects the discharge characteristics and arcing rule. The superposition phase affects the discharge characteristics and arcing law by affecting the electrical stress magnitude.

**Key words:** re-arcing; partial discharge; switching impulse voltage; reactor; transformer

## 0 引言

随着我国特高压工程的不断发展, 对变压器与并联电抗器等关键设备的绝缘性能提出更高要求<sup>[1-3]</sup>, 特别是在投切暂态过程中, 由操作冲击电压

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007148); 国网陕西省电力公司科技项目(5226KY20001A)

及其叠加工频的电应力导致的绝缘事故频发, 其中最为典型的案例是百万伏并联电抗器投运时乙炔超标, 导致设备内部出现放电现象, 油纸绝缘性能受到影响, 为设备的稳态运行留下安全隐患<sup>[6-9]</sup>。因此, 研究操作冲击电压及其叠加工频电应力下油纸绝缘的放电特性具有重要意义。

目前, 国内外学者针对油纸绝缘在雷电冲击电

压下的击穿特性做了大量研究,包括标准雷电冲击电压与振荡型雷电冲击电压下的击穿特性对比<sup>[10]</sup>、电极类型对击穿特性的影响<sup>[11]</sup>、振荡频率对击穿特性的影响<sup>[12]</sup>等,获得了不同雷电冲击电压形式下的油纸绝缘伏秒特性与击穿概率分布,初步揭示了雷电冲击电压下的绝缘击穿机理。相比于雷电冲击电压,操作冲击电压作用下的油纸绝缘放电特性研究鲜有报道<sup>[13]</sup>,而短时间作用的雷电冲击电压下的研究成果难以适用,特别是操作冲击电压所引发的连续局部放电(简称局放)与击穿重燃弧等特殊放电现象值得深入研究。此外,虽然国内外学者已经开展复杂稳态电应力(交直流复合电应力<sup>[14-15]</sup>、高频交流电应力<sup>[16]</sup>、高频方波电应力<sup>[17]</sup>等)环境下油纸绝缘放电特性与机理的研究,但操作冲击电压叠加工频电应力下的油纸绝缘放电特性研究仍是空白<sup>[18]</sup>。

本文搭建冲击叠加工频电应力下油纸绝缘放电特性实验平台,研究操作冲击电压及其叠加工频电应力下5种油纸绝缘系统常见尖端缺陷的放电特性与燃弧规律,对击穿过程进行阶段划分并分析各阶段的放电特征,在考虑工频叠加电应力环境下探究冲击电压发生相位对放电特性的影响,以期对油浸式电力设备在操作暂态环境下的绝缘设计与状态评估提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 实验回路

操作冲击电压下油纸绝缘放电实验平台与冲击叠加工频电应力下油纸绝缘放电实验平台分别如图1与图2所示,主要包含100 kV冲击电压发生回路、球隙触发控制回路、100 kV/10 kVA工频交流实验系统、测量装置以及保护元件。

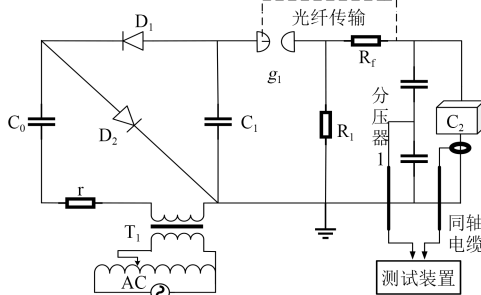


图1 冲击电压实验平台

Fig.1 Impulse voltage experiment platform

利用倍压电路为主电容 $C_1$ (9.69  $\mu\text{F}$ )充电, $R_f$ 为波头电阻, $R_1$ 为波尾电阻,设置 $R_f=176 \text{ k}\Omega$ , $R_1=400 \text{ k}\Omega$ ,使冲击电压发生器输出标准操作冲击电压波形(250/2 500  $\mu\text{s}$ ), $g_1$ 为放电触发球隙, $g_2$ 为隔离球隙,

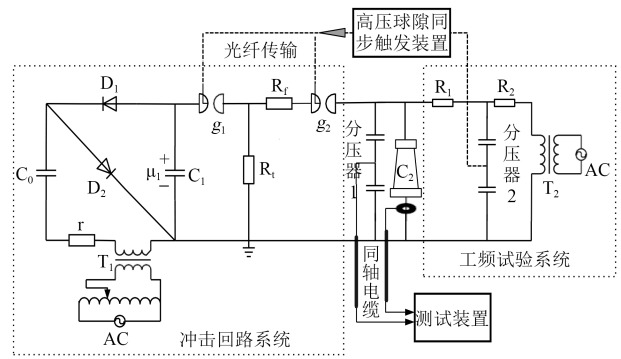


图2 叠加电压实验平台

Fig.2 Superimposed voltage experimental platform

避免工频电应力入侵冲击回路, $C_2$ 表示试品, $R_1$ (1 M $\Omega$ )与 $R_2$ (5 k $\Omega$ )为限流保护电阻。两个分压器的比例均为1 000:1,分压器1用于检测试品端所施加电压的变化;分压器2为球隙同步装置提供工频交流相位。为减少回路局放,实验元器件均用屏蔽线连接,接点均用铜箔包裹,所有实验均在高性能屏蔽室中开展,环境噪声小于5 pC,局部放电实验回路符合IEC 60270:2015规定<sup>[19]</sup>。

高压球隙同步触发装置可实现交流电压任意相位叠加操作冲击电压的功能,且相位误差小于0.5%。局放信号采集装置如图3所示,由DPO4104 B型皮尔森线圈(模拟带宽为1 GHz,采样率为5 GS/s,灵敏度为1 mV)与数字示波器(工作频带为50 Hz~10 MHz,灵敏度为1 V/A)组成。

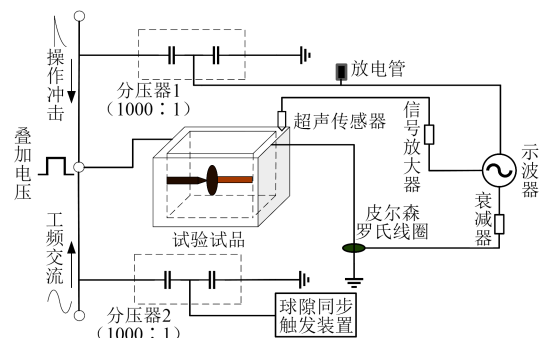


图3 信号采集装置

Fig.3 Signal acquisition device

#### 1.2 油纸试样及缺陷模型

采用针板电极形式模拟极不均匀电场环境,共构建5种尖端缺陷:纯油隙缺陷、纸板绝缘缺陷、油纸复合绝缘缺陷、强垂直分量沿面缺陷与弱垂直分量沿面缺陷,缺陷模型的具体布置方式与尺寸如图4所示。

板电极与条形电极材质为黄铜,针电极材质为钨,其尖端曲率半径约为100  $\mu\text{m}$ 。针电极接高压,板电极与条形电极接地。实验用油为25#克拉玛依

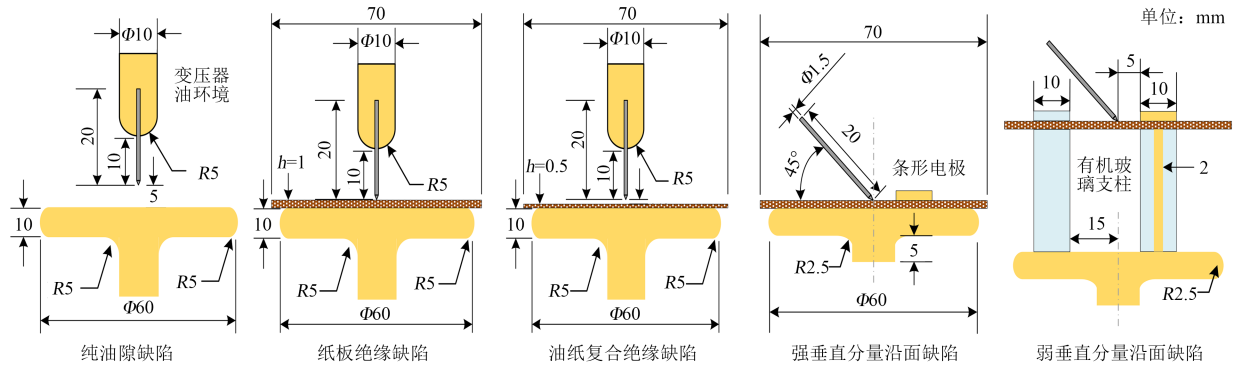


图4 缺陷模型布置方式与尺寸

Fig.4 Defect model layout and size

变压器油, 纸板为魏德曼生产的厚度分别为 1 mm 与 0.5 mm 的纸板且被裁剪成 7 cm×7 cm 的正方形, 纸板在 110℃、50 Pa 的条件下烘干 48 h, 然后在 80℃、50 Pa 的条件下浸油 24 h<sup>[20-23]</sup>。

### 1.3 实验方法

在操作冲击电压下的放电实验中, 施加的电应力幅值为各模型对应的 50% 击穿概率电压, 如表 1 所示。操作冲击叠加工频电压下的放电实验中, 冲击电压分量幅值仍为各模型的 50% 击穿概率电压 ( $U_{50}$ ), 工频分量幅值为各模型的局放起始电压 ( $U_{PDIV}$ ), 如表 1 所示。叠加相位选取 90°、180°、270°, 分别研究工频正峰值、过零点、负峰值处叠加操作冲击电压下的油纸绝缘尖端缺陷放电特性。

表 1 5 种缺陷模型的局放起始电压与 50% 击穿概率电压

Tab.1 Partial discharge inception voltage and 50% breakdown probability voltage of five defect models

缺陷模型	$U_{PDIV}/kV$	$U_{50}/kV$
纯油隙缺陷	10.5	29.3
纸板绝缘缺陷	9.2	32.4
油纸复合绝缘缺陷	9.7	29.6
强垂直分量沿面缺陷	7.0	20.5(闪络)
弱垂直分量沿面缺陷	8.6	21.3(闪络)

实验中, 获取放电作用下的操作冲击电压信号(后文统称电压信号)与放电引发的回路脉冲电流信号(后文统称放电信号), 5 种缺陷的不同工况各采集 50 组放电数据进行统计分析。

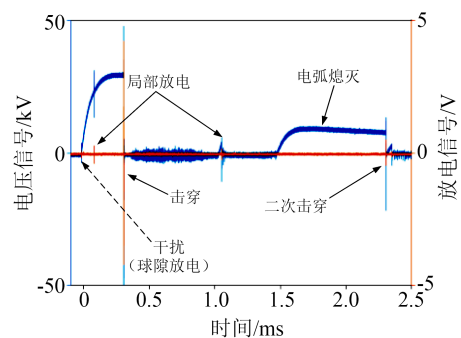
## 2 击穿燃弧特性分析

### 2.1 操作冲击电压下的击穿燃弧特性

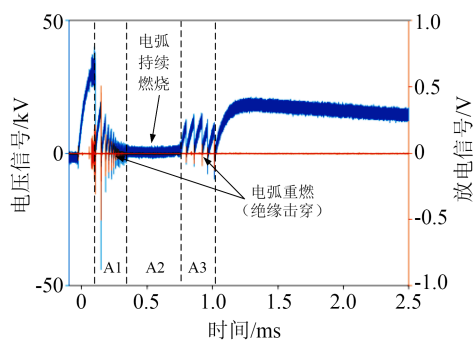
绝缘击穿状态下的操作冲击电压波形如图 5 所示。其中, 在操作冲击电压起始时刻测得的脉冲信号为实验回路球隙放电引起的干扰信号。

由图 5(a)可知, 操作冲击电压下纯油隙缺陷的击穿现象可描述如下: 首次击穿之前通常会发生至

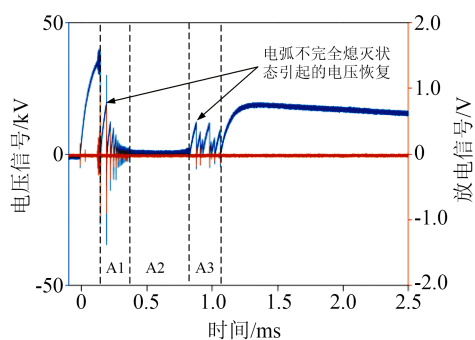
少一次局放, 局放产生的流注并未发展成贯通的放电通道, 但其形成的残余电荷使击穿更容易发生; 击穿一旦发生, 冲击电压信号几乎跌落为零, 此时油隙中形成持续电弧(平均持续时间为 1.2 ms), 此过程中由于电弧的不稳定演变, 仍会在外回路引起



(a) 纯油隙缺陷



(b) 纸板绝缘缺陷



(c) 油纸复合绝缘缺陷

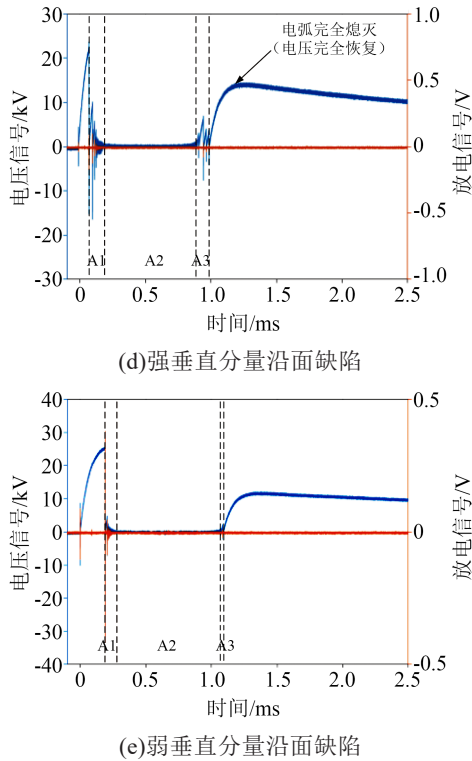


图5 5种模型击穿状态下的操作冲击电压波形  
Fig.5 Switching impulse voltage waveform under breakdown state of five models

微弱的放电脉冲信号；当电弧两端电压不足以维持其发展时，电弧逐渐熄灭，操作冲击电压幅值逐渐回升，在经历一段熄弧时间后（平均熄弧时间为0.9 ms），发生二次击穿，甚至出现更多的重复击穿，但实验发现纯油隙缺陷的重复击穿次数不超过4次。

由图5(b)~(e)可知，含有绝缘纸板的尖端缺陷模型在操作冲击电压作用下的击穿现象（首次击穿及其之后的发展过程）可分解为3个阶段：高频重燃弧阶段（A1）、稳定燃弧阶段（A2）、电压恢复前的重燃弧阶段（A3）。首次击穿之后伴随的高频重燃弧表明击穿通道初期极不稳定，其原因是：①放电通道初始碳化程度不足（电阻较大），当外施功率不足时出现类火花放电，而无法形成稳定电弧；②外电路电感作用引起的谐振使电弧电流出现过零点。当击穿稳定后进入A2阶段，放电通道的电阻作用使缺陷仍承受极低的残余电压，随着冲击电压的幅值不断降低，当其不足以维持稳定电弧时，又会转为类火花放电，经历一定的重燃弧现象后电弧彻底熄灭，这一阶段电弧重燃的主要原因是稳定放电之后产生的残余电荷的影响。

对于油纸复合绝缘缺陷，其击穿模式可分为两类：①连贯式击穿（图5(c)），即油隙击穿与纸板击穿连贯紧密，一气呵成，首次击穿时电压直接跌落为

零；②非连贯式击穿（图6），即油隙先击穿，随后纸板击穿，在整体击穿（电压跌落为零）之前，电压幅值存在提前降低的现象，说明此时油隙中已经产生了较强烈的放电现象。其中，34组实验结果为连贯式击穿，占比为68%，因此可判定连贯式击穿为主要击穿模式。

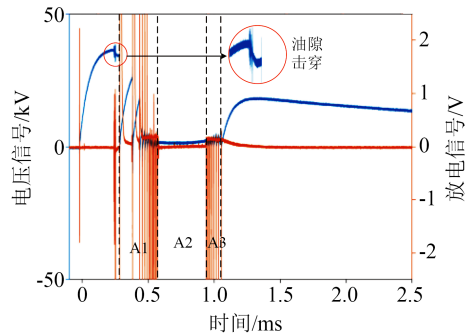


图6 油纸复合绝缘缺陷在特殊击穿状态下的操作冲击电压波形

Fig. 6 Switching impulse voltage waveform under special breakdown condition of oil-pressboard composite insulation defect

为量化分析击穿后的燃弧规律，提取如下燃弧特征： $A1$ 、 $A2$ 与 $A3$ 的持续时间占比( $P_{A1}$ 、 $P_{A2}$ 、 $P_{A3}$ )，表示各阶段在整个燃弧发展过程中的时长比例； $A1$ 、 $A3$ 平均电压恢复幅值占比( $P_{A1rave}$ 、 $P_{A3rave}$ )，表示 $A1$ 、 $A3$ 中由多次不完全熄弧引起的电压恢复的平均幅值占50%击穿概率电压幅值的比例； $A2$ 残余电压( $P_{A2r}$ )，表示 $A2$ 中持续燃弧过程缺陷端口的平均电压幅值占50%击穿概率电压幅值的比例； $A1$ 、 $A3$ 重燃弧频率( $F_{A1a}$ 、 $F_{A3a}$ )，表示 $A1$ 、 $A3$ 中单位时间内出现重燃弧的平均次数（频次/ms）。操作冲击电压下不同缺陷重燃弧区存在的特征量如图7所示。

由图7(a)时间类特征量可知：纸板缺陷击穿过程中重燃弧现象占据主导，而复合缺陷中稳定燃弧现象占据主导。再对比纯油隙的击穿现象不难发现，复合缺陷内部击穿通道（电弧）极不稳定，纸板缺陷更早进入A3阶段，且 $P_{A3}$ 更大，约为复合绝缘缺陷的2倍，表明纸板内放电通道占比越大，电弧越不易维持稳定，这与纸内放电通道的不均匀电阻分布和电荷分布有关。沿面缺陷闪络过程中稳定燃弧现象占据主导，且无论在A1阶段还是A3阶段，弱垂直分量下的重燃弧现象时长占比更小，约为强垂直分量的7/10，闪络现象与纯油隙击穿现象相似。相比于纸板内部击穿类缺陷，沿面缺陷闪络过程具有更显著的稳定燃弧阶段。

由图7(b)幅值类特征量可知：除了弱垂直分量

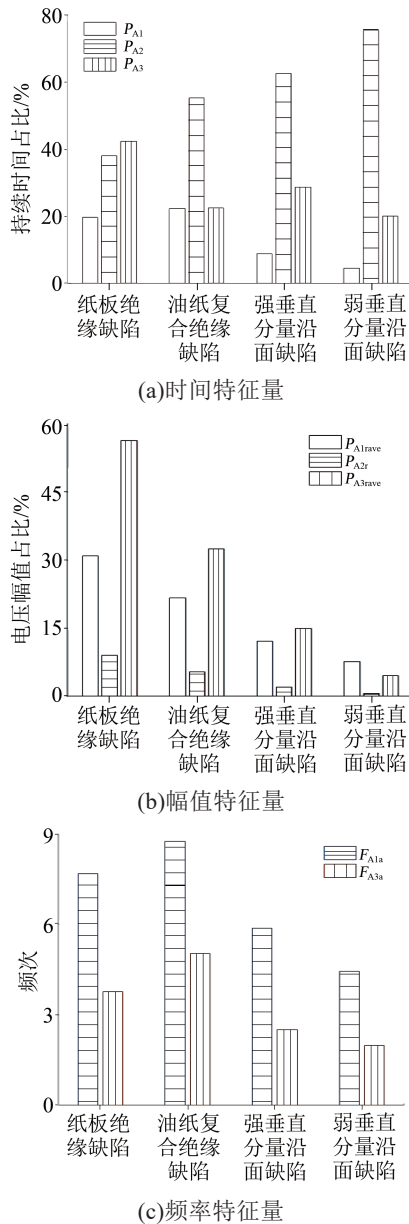


图7 操作冲击电压下不同缺陷重燃弧区存在的特征量  
Fig.7 Characteristic quantities of different defect rekindle arc regions under switching impulse voltage

沿面缺陷外,其余缺陷的 $P_{A3rave}$ 均比 $P_{A1rave}$ 大,是 $P_{A1rave}$ 的1.2~1.8倍,但由图5可知恢复电压最大值往往出现在A1阶段。 $P_{A1rave}$ 、 $P_{A2r}$ 、 $P_{A3rave}$ 在纸板缺陷、复合缺陷、强垂直分量沿面缺陷、弱垂直分量沿面缺陷中依次减小,由此可知,与油纸复合模型相比,纸板模型内部劣化通道中需更高的电压以激发二次击穿,与弱垂直分量相比,强垂直分量下需要更高的电压以激发沿面二次闪络,这是由于模型内部劣化通道二次击穿与 $P_{A3rave}$ 相关,在电压恢复速度一定时,恢复电压幅值越高,说明绝缘恢复速度越快,二次击穿所需电压越高。对比不同模型的 $P_{A2r}$ 可知,与纸板模型相比,油纸复合模型内放电通道电阻大

于油中放电通道,与弱垂直分量相比,强垂直分量下的沿面放电通道电阻更大,这是由于回路中电阻是恒定的,燃弧通道内电阻与分到的电压呈正相关,因此 $P_{A2r}$ 越大,通道电阻越大。

由图7(c)频次类特征量可知:在A1与A3阶段,复合绝缘缺陷中出现重燃弧的频次更高,这中由于复合绝缘缺陷的恢复电压幅值较低,每次不完全熄弧持续的时间较短,会出现更多次数的重燃现象。相比于弱垂直分量情况,强垂直分量沿面缺陷的重燃现象更加剧烈,其中恢复电压幅值与重燃频次约为弱垂直分量的2.00倍与1.25倍。此外,无论是恢复电压幅值还是重燃频次,均表明纸板内部放电通道比沿面放电通道更易产生重燃弧现象。

对上述实验现象的讨论如下:

(1)内部击穿类模型间的对比

图8为内部击穿类模型的放电示意图。针尖电极置于变压器油中,且变压器油的电气强度远小于油浸纸板,因此放电总是始于油中流注。从图8可以看出,对于油纸复合绝缘而言,油中流注贯通针电极与纸面间的整个油隙,并在油纸界面注入大量同极性电荷,同时在注入点附近畸变电场并诱发纸板内部的电树枝放电通道,最终导致击穿;对于纯纸板绝缘而言,针电极附近的微油隙最先产生电晕并形成短流注轰击纸面,从而引发纸板内部放电,这也是击穿点往往在针电极边缘处的原因。

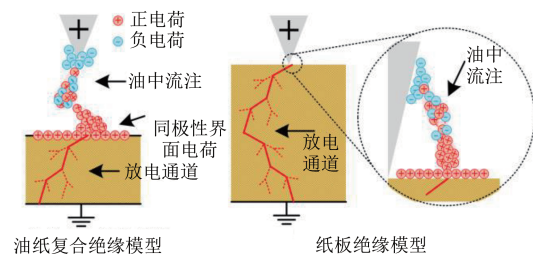


图8 内部击穿类模型的放电示意图

Fig.8 Schematic diagram of discharge in internal breakdown type model

模型击穿后便进入A1阶段,此时纸板内部放电通道由碳化通道部分(由电流烧蚀引起)与油腔/气腔部分(由纤维素断裂及纸板产气引起)组成,放电通道整体电阻仍然较大但碳化部分电阻较低(即电阻分布不均匀),导致击穿电流低且碳化位置分压低,容易在此处产生断弧。油纸复合绝缘中,强烈的油隙流注在油纸界面注入大量同极性电荷,加强纸板内部电场<sup>[24]</sup>,使之即便出现断弧,也会在较低的恢复电压下快速重燃,因此油纸复合绝缘对应的 $P_{A1rave}$ 较低,而 $F_{A1a}$ 较高;相比之下,纸板绝缘中的针

电极边缘短流注所注入的界面同极性电荷反而均匀了针尖附近的电场,使得电弧重燃需要更高的电压,同时高电压的建立需要更长的时间,因此纸板绝缘的 $P_{A1rave}$ 较高,而 $F_{A1a}$ 较低。纸板内部通道完全碳化(形成低电阻通道)所需的时间(即A1阶段的持续时间)与重复放电的频次和放电电压的乘积有关(近似总放电能量),对比上述两类模型的 $U_{50} \times P_{A1rave} \times F_{A1a}$ 不难发现,纸板模型的这一数值略高于油纸复合模型,因此纸板模型的 $P_{A1}$ 略小于复合绝缘模型。此外, $P_{A1}$ 与纸板厚度无关是因为击穿之后的放电通道已经贯穿绝缘,其随后的进一步劣化并未有从上到下的发展趋势,而是整个通道同时劣化。

放电通道完全碳化后便可形成稳定的电弧,进入A2阶段。 $P_{A2r}$ 本质上反映了模型燃弧电阻与回路电阻的比值,而纸板厚度在一定程度上决定了纸内放电通道长度,即影响了放电主通道总电阻,因此纸板模型的 $P_{A2r}$ 几乎是复合绝缘模型的2倍。此外,在A2阶段的稳定燃弧过程中,油中电弧电离产生的大量电荷有助于进一步维持电弧发展,因此油纸复合绝缘的 $P_{A2}$ 更大,甚至占据主导。

当外施电压幅值下降到不足以维持稳定放电时,将进入A3阶段。由于复合绝缘模型更晚进入A3阶段,导致其 $P_{A3rave}$ 与 $P_{A3}$ 较纸板模型更低,但同样由于界面电荷作用,使其 $F_{A3a}$ 更高。

### (2)沿面闪络类模型间的对比

图9为沿面闪络类模型的放电示意图。沿面缺陷模型中,时间类特征、幅值类特征、频次类特征均表明电场强垂直分量条件下具有更明显的重燃弧现象,而弱垂直分量条件下具有更明显的稳定燃弧现象。

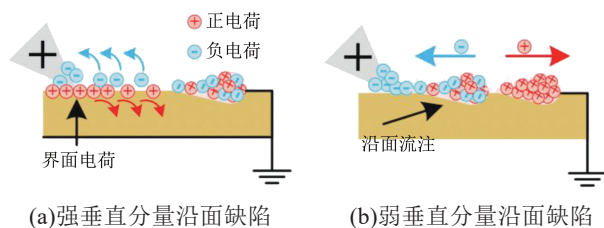


图9 沿面闪络类模型的放电示意图

Fig.9 Schematic diagram of discharge along the surface flashover type model

从图9可以看出,具有强垂直分量的沿面模型中,当发生闪络形成沿面电弧后,大量的空间电荷会在电场强垂直分量作用下积累于油纸界面,形成迁移率较慢的陷阱电荷(特别是在针尖附近),一方面均匀了针尖处的电场,另一方面抑制了后续沿面流注的发展<sup>[25]</sup>,不仅使沿面电弧容易熄灭,也使重燃

弧所需的电压更高(即 $P_{A1rave}$ 更高)。而在弱垂直分量的沿面模型中,沿面电弧产生的自由电荷难以被纸板陷阱捕获,因此,自由电荷一方面更容易轰击纸板形成二次电子(未受到陷阱电荷的阻碍作用),另一方面有助于电弧续流,导致其电弧不易熄灭,所以 $P_{A1}$ 与 $F_{A1a}$ 均较小。

强垂直分量作用下的沿面流注在A1阶段虽然难以持续,但界面陷阱电荷的注入与抽离仍然会对界面绝缘造成损伤,使其进入A2阶段。然而,同样是因为界面陷阱电荷的阻碍作用,使其A2阶段的持续时间较短(即 $P_{A2}$ 较小),更为迅速地进入A3阶段,同时也增大了油纸界面等效电阻,使其 $P_{A2r}$ 更大。

弱垂直分量作用下的沿面电弧更容易续流,因此会更晚地进入A3阶段,导致其 $P_{A3rave}$ 与 $P_{A3}$ 更小,同时由于不易断弧而使其 $F_{A3a}$ 更小。

### (3)沿面闪络类模型与内部击穿类模型对比

相比于内部击穿类模型,沿面闪络类模型的重燃弧现象更不明显(电弧更加稳定),体现在 $P_{A1}$ 、 $P_{A3}$ 、 $P_{A1rave}$ 、 $P_{A3rave}$ 、 $F_{A1a}$ 、 $F_{A3a}$ 更低,而 $P_{A2}$ 更高。分析其可能的原因如下:①纸板内部击穿产生的气泡容易切断放电通路;②纸板内部电树通道比沿面流注通道更难维持,当电弧断开电压恢复时,电树通道中难以及时电离产生新的电荷,且陷阱电荷(电子与空穴)通过能级跃迁的方式形成的续流难以维持,而在沿面放电过程中,电压恢复后可在油中电离产生大量电荷以维持等离子体放电通道,因此沿面模型的燃弧更加稳定。

## 2.2 叠加相位对击穿燃弧特性的影响

在操作冲击叠加工频电应力实验中,纸板绝缘缺陷与油纸复合绝缘缺陷均未发生击穿,因此仅分析其余3种缺陷模型的击穿现象与燃弧规律,其余3种模型的击穿电压波形如图10所示。其中,操作冲击电压起始时刻测得的脉冲信号仍为球隙放电干扰信号。

由图10可知,纯油隙缺陷模型的击穿燃弧过程依旧无法划分阶段,且与单纯操作冲击电压作用下类似:①在稳定燃弧过程中外电路上检测到较大的脉冲信号,推测是由电弧电流不稳定引起的;②在燃弧过程中有可能出现少次数的电弧不完全熄灭且重燃现象,叠加电应力下的重燃现象不超过2次,且容易出现在 $90^\circ$ 叠加情况下,其原因是在 $180^\circ$ 与 $270^\circ$ 叠加后的电应力幅值较低,油隙电弧一旦开始熄灭便不易再次重燃。沿面缺陷模型在闪络后出现的燃弧过程同样分为高频重燃弧阶段、稳定燃弧

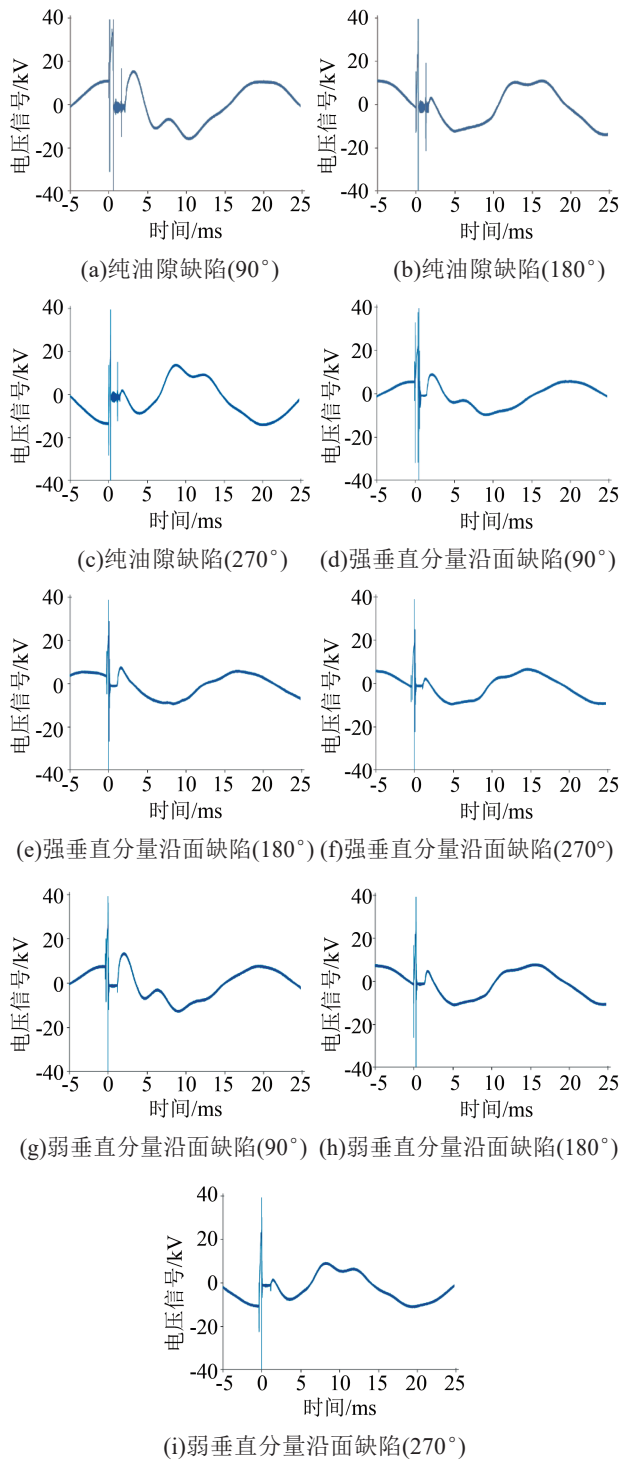


图10 叠加工频电应力下3种模型的击穿电压波形

Fig.10 Breakdown voltage waveforms of three models under superimposed power frequency electrical stress

阶段、电压恢复前的重燃阶段。

此外,叠加冲击电压所引起的放电完全恢复后工频电应力仍然受到较强的畸变作用,但工频电压的畸变并未引起新的击穿或闪络现象。叠加工频电应力下不同缺陷重燃弧区存在的特征量如表2所示。由表2可知,叠加电应力作用下沿面缺陷闪络过程的特征量规律与单纯操作冲击电压下的一致,

这里不再赘述,只分析叠加相位对特征量的影响规律。

A1阶段:随叠加相位的增大,无论是强垂直分量情况还是弱垂直分量情况, $P_{A1rave}$ 与 $F_{A1a}$ 均减小10%~25%,但两类模型的 $P_{A1}$ 却分别减小和增大。对于强垂直分量情况,随叠加相位的增大,闪络时刻由工频作用积累的瞬态界面电荷逐渐减少(在270°甚至积累了与过电压极性相反的界面电荷),因此随相位的增大,界面电荷对电弧的阻碍作用减弱,电弧不易熄灭( $F_{A1a}$ 较小)或在较低的电压下恢复( $P_{A1rave}$ 较小),且更容易进入稳定阶段( $P_{A1}$ 较小)。此外,随叠加相位的增大,闪络时刻的叠加电压逐渐降低,闪络形成的沿面流注头部在较弱的背景电场下不易扩散而较为集中,因此电弧更容易产生或维持(相比高背景电场下的流注头部更为扩散,增加了其等效曲率半径,反而不利于流注的发展),这也是弱垂直分量条件下 $P_{A1rave}$ 与 $F_{A1a}$ 均减小的可能原因,但其 $P_{A1}$ 增大的原因及机理有待进一步研究。

A2阶段:随叠加相位的增大,无论是强垂直分量情况还是弱垂直分量情况, $P_{A2}$ 均增大10%左右,但 $P_{A2r}$ 几乎不变。其可能的原因是高幅值电压下稳定电弧的电荷(流注)扩散范围更大(电场更加均匀),其放电通道中的强场电离反而需要更高的电压维持,A2阶段外回路几乎占据所有分压,使电弧端口电压极低,故而导致高幅值电压下(叠加相位靠前)更容易熄弧进入A3阶段。当然,高幅值电压下的电弧热效应(热电离)更强烈,有利于维持电弧,但考虑到暂态击穿过程的持续时间,认为电弧热效应的差异并未充分体现。

A3阶段:随叠加相位的增加,无论是强垂直分量情况还是弱垂直分量情况, $P_{A3}$ 、 $P_{A3rave}$ 与 $F_{A3a}$ 均减小5%~25%。低幅值下的沿面流注电荷密度较低,当电压降低后,流注容易消散,因此电弧容易熄灭,且熄灭后因外施电压较低而不易重燃(即使可以重燃,也需要经历较长的流注发展时间),故而使 $P_{A3}$ 、 $P_{A3rave}$ 与 $F_{A3a}$ 均减小。

### 3 放电特性分析

#### 3.1 操作冲击电压下放电特性分析

未发生击穿或闪络时,缺陷模型承受的操作冲击电压波形与放电脉冲信号如图11所示,其中操作冲击电压起始时刻的脉冲仍为干扰信号。由图11可知,操作冲击电压下的局部放电可能出现在波头,也可能出现在波尾;可能仅发生一次放电,也可能出现放电序列。当放电幅值较大时,甚至会在操作电压信号上叠加高频脉冲,其位置与放电脉冲信号位置一致。

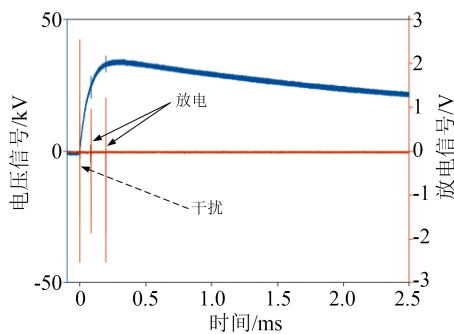
表2 叠加工频电力下不同缺陷重燃弧区存在的特征量

Tab.2 Characteristic quantities of different defect rekindle arc regions under superimposed power frequency electrical stress

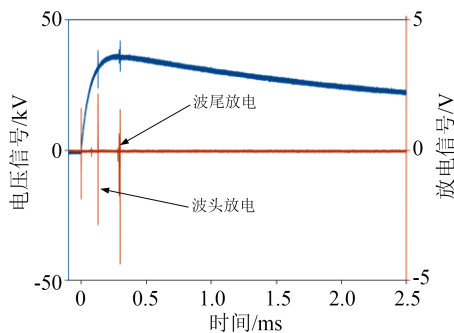
缺陷模型	$P_{A1}/\%$	$P_{A2}/\%$	$P_{A3}/\%$	$P_{A1rave}/\%$	$P_{A2r}/\%$	$P_{A3rave}/\%$	$F_{A1a}$	$F_{A3a}$
强垂直分量沿面缺陷(90°)	19.42	44.84	35.74	53.31	1.20	28.26	4.66	2.13
强垂直分量沿面缺陷(180°)	18.75	48.65	32.60	42.67	1.21	25.84	3.91	1.98
强垂直分量沿面缺陷(270°)	16.36	53.12	30.52	36.54	1.21	23.89	3.49	1.82
弱垂直分量沿面缺陷(90°)	5.32	53.68	41.00	51.05	1.05	34.28	6.22	2.76
弱垂直分量沿面缺陷(180°)	6.17	57.36	36.47	46.46	1.04	32.55	4.80	2.58
弱垂直分量沿面缺陷(270°)	8.34	62.64	29.02	42.28	1.05	30.92	4.21	2.39

对于油纸复合绝缘缺陷,其局部放电模式可分为两类:①油隙放电类(图11(c)),即油隙并未完全击穿,仅发生电晕或流注放电;②油隙击穿类(图12),即油隙完全击穿但纸板并未击穿,此时不仅能测得高频的放电脉冲信号,也能观测到操作冲击电压在放电时刻出现的微小电压降落。

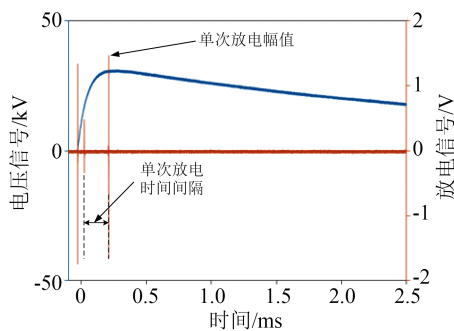
为探寻操作冲击电压下不同缺陷模型的局放特性,提取如下特征量:平均放电幅值( $U_{dave}$ ),表示



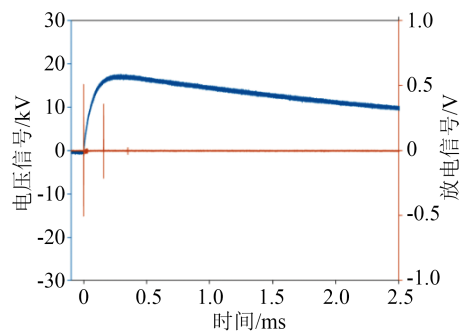
(a)纯油隙缺陷



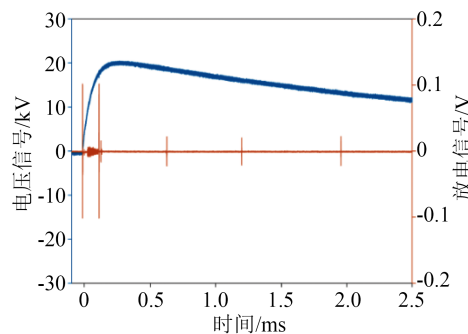
(b)纸板绝缘缺陷



(c)油纸复合绝缘缺陷



(d)强垂直分量沿面缺陷



(e)弱垂直分量沿面缺陷

图11 操作冲击电压下不同缺陷模型的局放波形

Fig.11 PD waveforms of different defect models under switching impulse voltage

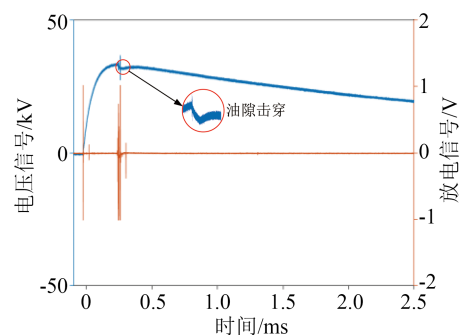


图12 油纸复合绝缘缺陷模型的特殊局放波形

Fig.12 Special PD waveform of oil-paper composite insulation defect model

单次冲击作用下所产生全部放电的平均幅值;平均放电间隔( $T_{dave}$ ),表示单次冲击作用下产生两次放电的平均时间间隔;平均放电频次( $F_{dave}$ ),表示单次

冲击作用下共产生放电的频次；单次冲击作用下波头局放占比( $P_{hd}$ )，表示单次冲击作用下局放发生在波头处的频次占全部放电频次的比例；单次冲击作用下波尾局放占比( $P_{td}$ )，表示单次冲击作用下局放发生在波尾处的频次占全部放电频次的比例。不同缺陷的平均放电幅值与平均放电间隔如图13所示，波头波尾放电概率及放电频次如表3所示。

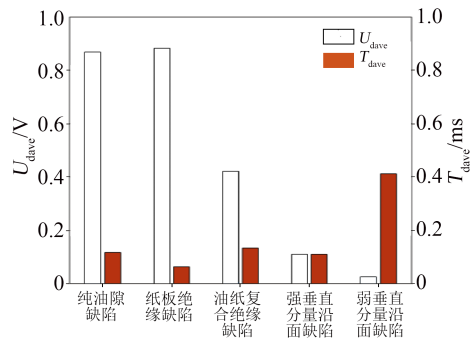


图13 不同缺陷的时间与幅值特征量

Fig.13 Time and amplitude characteristic quantities of different defect

表3 不同缺陷的放电概率及频次

Tab.3 Discharge probability and frequency of different defect

缺陷模型	$P_{hd}/\%$	$P_{td}/\%$	$F_{dave}$
纯油隙缺陷	83.5	16.5	1.6
纸板绝缘缺陷	54.3	45.7	2.9
油纸复合绝缘缺陷	63.8	36.2	2.1
强垂直分量沿面缺陷	82.0	18.0	1.8
弱垂直分量沿面缺陷	25.0	75.0	3.7

由图13与表3可知，不同模型的放电特性存在较大差异：纯油隙模型的 $U_{dave}$ 与纸板绝缘模型几乎相等，且 $P_{hd}$ 最大，但 $T_{dave}$ 与 $F_{dave}$ 分别约为纸板绝缘模型的2倍与11/20；纸板绝缘模型相比于油纸复合绝缘模型，前者的 $U_{dave}$ 与 $T_{dave}$ 分别约为后者的2.15倍与2/5，且后者在波头放电的概率较前者增大了9.5%， $F_{dave}$ 约为前者的72%；在沿面模型中，强垂直分量下的 $U_{dave}$ 与 $P_{hd}$ 分别为弱垂直分量下的4.00倍与3.28倍，但弱垂直分量下的 $T_{dave}$ 与 $F_{dave}$ 分别约为强垂直分量下的4倍与2倍；将所有模型对比后发现，纯油隙、纸板、油纸复合绝缘模型较沿面模型的 $U_{dave}$ 更大，且 $F_{dave}$ 介于强垂直分量与弱垂直分量之间。

对各类模型在操作冲击电压下的局部放电特性规律及其机理进行简单讨论如下：

#### (1) 内部击穿类模型的放电特性

纯油隙模型、纸板模型、油纸复合模型在操作冲击电压下均呈现高幅值短间隔的放电模式。相

比之下，纸板模型的放电幅值最高、间隔最短、放电频次最大。纯油隙模型与油纸复合模型中均以针尖处电晕放电或短流注放电为主（忽略图12所示的特殊情况），而纸板模型中以针尖附近微油隙击穿放电为主，击穿后对油纸界面进行充电并注入大量电荷，因此放电幅值更高，然而，由于微油隙流注放电及其转变后的类沿面放电具有方向随机性（由电极表面粗糙状态、纸面陷阱分布、放电发展随机性等因素引起），需要经历多次不同方向的放电才能建立起稳定的界面屏蔽电荷并阻碍微油隙中放电的发展，因此纸板模型中会在短时间内出现多次高幅值放电。此外，同样是以电晕放电或短流注放电为主的纯油隙模型与油纸复合模型，其放电量差异较大，这是由于在较快的前沿电压作用下，油隙因其相对介电常数小而更容易分压，导致油纸复合绝缘中油隙分压较高（针尖电场更强），电离产生的空间电荷扩散范围更广，均匀了针尖电场，反而不利于放电的发展（即使放电演变过程中电离产生的电荷量较少，放电幅值较低）。

针尖电晕（或短流注）类放电更容易发生在波头，说明其放电时延较短。假设模型产生有效电子的概率相同（放电统计时延近似相等），那么电晕（或短流注）放电比微油隙流注放电具有更短的放电形成时延，在一定程度上说明其放电范围更小或发展速度更快。

#### (2) 沿面闪络类模型的放电特性

相比于强垂直分量情况，弱垂直分量沿面模型在操作冲击电压下的局部放电呈现低幅值、多次数、长间隔的模式。低幅值是因为其放电过程中并未对油纸界面进行充电，注入电荷较少；多次数是因为没有界面电荷屏蔽作用，可在较低电压下（波尾）再次发生放电，长间隔则是由于在低电压幅值下发生放电，需要经历更长的电荷消散时间。

弱垂直分量沿面模型的放电容易发生在波尾，是因为波尾持续时间长，为长间隔放电提供了条件；强垂直分量沿面模型的放电容易发生在波头，是因为波头电压变化速度快，容易使电极与界面屏蔽电荷层之间形成新的电位差。

### 3.2 叠加电应力下的局放特性

在分析操作冲击电压叠加工频电应力的局放数据时发现其波形与操作冲击电压下的波形相似，仅在相位发生改变后，其特征量的变化才较为明显，故此处重点研究相位变化对局放产生的影响，各缺陷模型的放电特征量如表4~5所示。

由表4~5可知，叠加相位对放电特征量的影响

表4 不同缺陷放电阶段的时间与幅值特征量

Tab.4 Time and amplitude characteristic quantities of defects during different discharge stages

缺陷模型	$U_{dave}/V$	$T_{dave}/ms$
纯油隙缺陷(90°)	0.651	0.284
纯油隙缺陷(180°)	0.437	0.455
纯油隙缺陷(270°)	0.311	0.848
纸板绝缘缺陷(90°)	0.609	0.698
纸板绝缘缺陷(180°)	0.466	0.746
纸板绝缘缺陷(270°)	0.338	0.898
油纸复合绝缘缺陷(90°)	0.565	0.597
油纸复合绝缘缺陷(180°)	0.452	0.689
油纸复合绝缘缺陷(270°)	0.328	0.844
强垂直分量沿面缺陷(90°)	0.245	0.779
强垂直分量沿面缺陷(180°)	0.152	0.947
强垂直分量沿面缺陷(270°)	0.123	1.020
弱垂直分量沿面缺陷(90°)	0.189	1.072
弱垂直分量沿面缺陷(180°)	0.165	1.133
弱垂直分量沿面缺陷(270°)	0.152	1.238

表5 不同缺陷放电阶段的放电概率及频次

Tab.5 Discharge probability and frequency of defects during different discharge stages

缺陷模型	$P_{bd}/\%$	$P_{fd}/\%$	$F_{dave}$
纯油隙缺陷(90°)	85.5	14.5	2.8
纯油隙缺陷(180°)	73.8	26.2	2.1
纯油隙缺陷(270°)	58.4	41.6	1.7
纸板绝缘缺陷(90°)	46.4	53.6	2.9
纸板绝缘缺陷(180°)	21.6	78.4	2.3
纸板绝缘缺陷(270°)	12.7	87.3	1.9
油纸复合绝缘缺陷(90°)	73.5	26.5	2.4
油纸复合绝缘缺陷(180°)	54.8	45.2	1.8
油纸复合绝缘缺陷(270°)	31.6	68.4	1.6
强垂直分量沿面缺陷(90°)	56.6	43.4	2.6
强垂直分量沿面缺陷(180°)	38.4	61.6	1.9
强垂直分量沿面缺陷(270°)	29.7	70.3	1.2
弱垂直分量沿面缺陷(90°)	48.8	51.2	3.1
弱垂直分量沿面缺陷(180°)	32.8	67.2	2.5
弱垂直分量沿面缺陷(270°)	29.5	70.5	2.2

规律如下:所有缺陷情况下随着相位的增加, $U_{dave}$ 与 $F_{dave}$ 减小了12%~54%, $T_{dave}$ 增大了6%~199%,且 $P_{fd}$ 增大了11.7%~41.9%。随叠加相位的增大(90°~270°),电应力幅值降低,导致针尖处的电场强度降低,其引发的放电不仅电荷量较低且发展速度更慢,因此 $U_{dave}$ 与 $F_{dave}$ 减小(局部放电程度降低),且波尾出现放电的趋势越来越明显。

然而,与击穿(闪络)时的情况不同,工频电压下产生的瞬时界面电荷并未对局部放电产生促进

作用,其原因如下:局部放电过程中外施电压并未因短路而跌落,相比于外施电压产生的背景电场,界面电荷引起的电场畸变可忽略,因此局部放电程度的强弱主要取决于外施电压幅值;而在击穿闪络过程中,外施电压降低至电弧残余电压,回路电流成为维持电弧的关键,而界面电荷(瞬时内)对电弧续流的贡献不可忽略。

## 4 结论

本文探究了极不均匀电场中5种典型油纸绝缘缺陷模型在操作冲击电应力及其叠加工频电应力下的放电特性燃弧规律,得到如下主要结论:

(1)操作冲击电压下纯油隙尖端缺陷击穿后,其燃弧阶段仍会激发高频放电脉冲信号,并有一定概率出现不超过两次的电弧重燃现象;含有纸板的缺陷模型击穿后的燃弧过程可分为高频重燃弧阶段、稳定燃弧阶段、电压恢复前的重燃阶段。

(2)纸板缺陷的燃弧过程中反复重燃弧占据主导,其余模型则是稳定燃弧占据主导;与电压恢复前的重燃阶段相比,高频重燃弧阶段的恢复电压幅值较低但重燃频次更高;沿面放电重燃弧现象较弱,燃弧残余电压较低。

(3)油隙缺陷、纸板绝缘缺陷、油纸复合缺陷容易产生高幅值短间隔的放电现象,其中含有油隙的缺陷形式易在波头产生放电;沿面缺陷易产生低幅值长间隔的放电现象,强垂直分量作用下易在波头产生放电,弱垂直分量作用下易在波尾产生放电。

(4)叠加相位的不同使电应力幅值不同,较低的电应力幅值使电压恢复前的重燃阶段的重燃弧现象减弱,也使未击穿情况下的局部放电程度减弱。

## 参考文献:

- [1] 张鹏,齐波,李文璞,等.考虑部位和性能的电力变压器差异化评价方法[J].中国电机工程学报,2019,39(20):6138-6147.
- [2] 王晓蕾.非正弦波电压下电气设备局部放电特性研究综述[J].绝缘材料,2022,55(1):1-11.
- [3] 施围,邱毓昌,张乔根.高电压工程基础[M].第2版.北京:机械工业出版社,2014:34-75.
- [4] 李斯盟,李清泉,刘洪顺,等.正极性直流电压下油纸绝缘针板电极局放脉冲波形与局放机理[J].中国电机工程学报,2018,38(20):6173-6187.
- [5] 白鹭,李冠良,杨成鹏,等.试验方法及电极布置形式对变压器油局部放电起始电压的影响[J].绝缘材料,2021,54(5):85-91.
- [6] 于会民,张培恒,王会娟,等.不同组成变压器油及油纸绝缘体系受雷电冲击后油中溶解气体变化[J].绝缘材料,2020,53(10):89-95.
- [7] WANG X, WANG Z. Study of dielectric behavior of ester trans-

- former liquids under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(6):1916-1925.
- [8] LIANG J, ZHANG L, LI J, et al. Study on oscillating switching impulse voltage generation for power transformer onsite test[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(5):2223-2230.
- [9] 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,2020,53(11):59-65.
- [10] 林春耀,靳宇晖,张哲铭,等.极不均匀场中振荡型雷电冲击电压下变压器油击穿特性研究[J].西安交通大学学报,2017,51(12):121-127.
- [11] 靳宇晖,师泯夏,胡德贵,等.正极性振荡型雷电冲击电压下的油纸绝缘沿面闪络特性[J].高电压技术,2019,45(6):1775-1782.
- [12] 王喆,张乔根,王同磊,等.不同波形参数冲击电压下油-隔板绝缘放电特性[J].高电压技术,2015,41(6):1974-1980.
- [13] 曹铎耀,郭若琛,蔡玲珑,等.双指数及振荡型操作冲击电压下变压器匝间击穿特性[J].高电压技术2022,48(6):2265-2275.
- [14] 李斯盟,李清泉,刘洪顺,等.基于雷达谱图的正直流复合电压下油纸针板模型局放阶段识别[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5897-5908.
- [15] 张永武,张涛,高金伟,等.不同比例复合电压下油纸绝缘针板电极模型的局部放电特性研究[J].高压电器,2021,57(7):84-91.
- [16] 尤昕宇,李晓楠,刘成,等.高频脉冲电压下油纸绝缘局部放电特性研究[J].绝缘材料,2021,54(10):66-72.
- [17] 张开放,张黎,赵彤,等.高频正弦电应力对气-固绝缘局部放电的影响[J].高电压技术,2019,45(12):3879-3888.
- [18] 李晓楠,刘凯,杨雁,等.高频表面电荷输运对油纸绝缘局部放电的影响[J].中国电机工程学报,2022,42(3):1223-1232.
- [19] International Electrotechnical Commission. High-voltage test techniques: Partial discharge measurements: IEC 60270: 2015 [S]. Geneva,Switzerland:IEC,2015.
- [20] LI S, LI Q, HE D, et al. PD classification in oil-pressboard insulation by simulating a needle-plate model with +DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019, 26(1):261-269.
- [21] International Electrotechnical Commission. Specification for cellulosic papers for electrical purposes - Part 2: Methods of test: IEC 554-2:1984[S]. Geneva,Switzerland:IEC,1984.
- [22] International Electrotechnical Commission. Pressboard and presspaper for electrical purposes - Part 2: Methods of test: IEC 60641-2:2004[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2008.
- [23] International Electrotechnical Commission. Fluids for electro-technical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear: IEC 60296-2003[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2003.
- [24] LI S, WEI Z, LI Q, et al. Polarity effect of PD in oil-pressboard insulation under highly uneven electric field[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119: 105907.
- [25] LI S, LIU Z, JI S. Characteristics of creeping discharge caused by a needle electrode in oil-pressboard insulation under +DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2021,28(1):215-222.

收稿日期:2022-01-11 修回日期:2022-03-23

作者简介:吴经锋(1977-),男(汉族),陕西西安人,高级工程师,主要从事变压器、开关等电力设备状态的评价工作。