

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.021

# 振荡冲击及交流电压下绝缘子表面金属微粒放电特性研究

高旭泽<sup>1</sup>, 段然<sup>1</sup>, 谭笑<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**近年来由于绝缘子沿面放电引起的绝缘故障较为多见,冲击耐压及冲击下局部放电检测是绝缘考核和诊断的有效手段。文中采用 IEC 60060-3 推荐的振荡型雷电及操作冲击和工频交流电压,针对 110 kV 气体绝缘组合开关设备(GIS)真型绝缘子金属微粒缺陷模型进行了局部放电特性研究。在工频交流(AC)电压下,局部放电起始电压和闪络电压的差值小于 2 种振荡型冲击电压,其随气压增大而增加;在冲击电压下,局部放电大多发生在振荡周期的上升沿处,在电压波谷处会出现相反极性的局部放电脉冲;金属颗粒位置对放电量、放电重复率等影响较大。结论表明,相比于工频交流电压,GIS 绝缘子表面金属颗粒缺陷在外施电压为振荡型冲击电压时易产生局部放电,说明了振荡型冲击电压局部放电检测具有较高缺陷检出能力。

**关键词:**气体绝缘组合开关设备;振荡型冲击电压;局部放电检测;冲击耐压测试

**中图分类号:** TM835.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)05-0147-10

## 0 引言

气体绝缘组合开关设备(gas insulated switchgear, GIS)局部放电检测对于保证其安全可靠运行具有重要的意义<sup>[1]</sup>。电气设备局部放电的出厂试验、现场试验以及在线监测一般都是在工频交流电压下进行的。国际大电网组织(CIGRE)和国际标准委员会(IEC)推荐采用交流耐压试验与局部放电检测相结合的手段,对设备整体及局部的绝缘状况进行测量,这种方法在 GIS 的出厂、现场及检修试验中应用较为成熟,在考核设备绝缘水平上发挥了重要作用<sup>[2-4]</sup>。然而,近年来研究发现,交流激励并非对 SF<sub>6</sub> 气体氛围中各类潜隐性绝缘问题均有效<sup>[5]</sup>。

试验研究及运行经验表明,交流局部放电试验对固定金属尖端以及绝缘子表面颗粒引发的强电晕稳定性放电的检出能力有限<sup>[6]</sup>,而冲击电压激励对上述缺陷更为敏感。因此,冲击电压下的局部放电检测为出厂及现场 GIS 设备的绝缘诊断提供了一种新的试验手段,与交流下局部放电检测手段相结合,能够全面考核设备的绝缘状态<sup>[7]</sup>。

冲击电压下的局部放电被认为是一种特定条件下的预击穿放电现象<sup>[8]</sup>,国内外学者们对此也开展了一定程度的基础研究。然而以往研究多针对间隙的气体放电特性,且各研究多采用双指数冲击电压,且波形参数无统一标准,研究之间缺乏可比性<sup>[9]</sup>;同时,从绝缘诊断角度而言,这种预击穿放电

现象普遍存在于各类绝缘缺陷条件下,需要通过试验获得其发生、发展特性和影响因素,为振荡冲击电压下的局部放电检测和诊断提供实验和理论依据<sup>[10-12]</sup>。

绝缘子表面的颗粒污秽是 GIS 系统中的一种常见缺陷<sup>[13-14]</sup>,这种缺陷会增强局部电场强度,提高三结合点有效电子产生率,降低绝缘子沿面的介电强度,在瞬态过电压下由绝缘子表面缺陷造成的绝缘下降尤为明显<sup>[15-17]</sup>。基于此,文中采用真型 110 kV GIS 母线段,针对 GIS 设备盆式绝缘子薄弱环节开展振荡操作冲击(oscillating switching impulse, OSI)和振荡雷电冲击(oscillating lightning impulse, OLI)下的局部放电特性研究,并与工频交流电压(alternating current, AC)下的放电特性进行对比分析。研究首先通过对不同施加激励下的局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)以及击穿电压(breakdown/flashover voltage, BDV)进行测量,对比分析了各激励下的局部放电活跃区间;然后,对不同激励下典型局部放电脉冲序列进行分析,获得了在 OLI、OSI 以及 AC 电压下颗粒位置(高压接触型、悬浮电位型、接地型)、气压等级(0.05~0.4 MPa)及施加电压水平(PDIV~BDV)对局部放电活跃性(放电量、放电频次)的影响。

## 1 实验回路与测试对象

### 1.1 试验采用的振动冲击电压

IEC 60060-3 标准对 OLI 及 OSI 波形的包络线和振荡频率给出了推荐参数范围,如表 1 所示。

收稿日期:2019-03-17;修回日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1866603)

表 1 OLI 和 OSI 波形以及 IEC60060-3 标准  
Table 1 Waveform parameters of the actual OLI, OSI and the IEC60060-3 recommendation

项目	OLI	参考范围	OSI	参考范围
波前时间 (包络) $t_f/\mu\text{s}$	4.4	0.8~20	33	20~400
半峰值时间 (包络) $t_p/\mu\text{s}$	42	40~100	1 000	1 000~4 000
振荡频率 $f/\text{kHz}$	115	15~400	8	1~15

试验中参考上述标准,采用振荡型 Marx 冲击电压发生器作为电源输出,如图 1 所示。

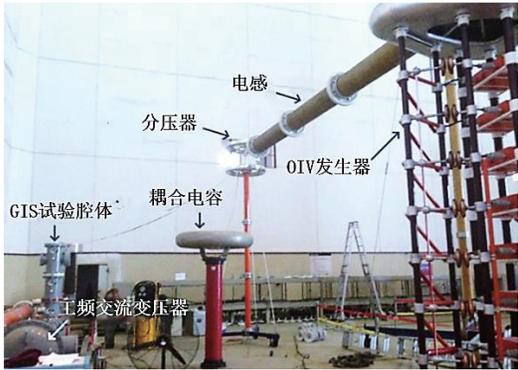
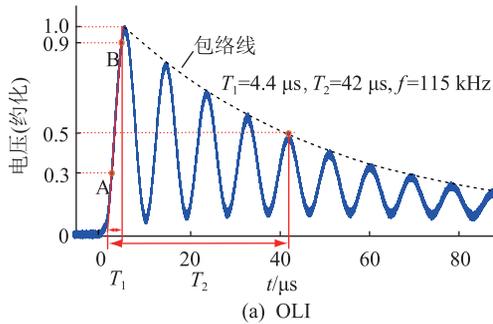


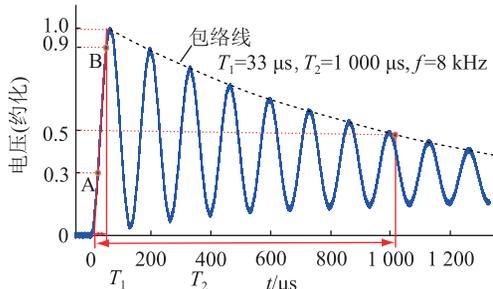
图 1 冲击电压下局部放电测试回路

Fig.1 Measurement circuits of impulse PD and AC PD detections

由冲击发生器实际输出的 OLI 和 OSI 波形及包络线参数分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示,其包络线和振荡频率均满足 IEC 60060-3 标准规定参数。



(a) OLI



(b) OSI

图 2 OLI 和 OSI 波形

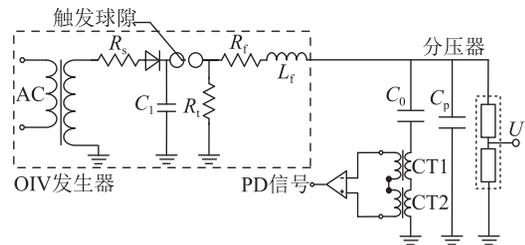
Fig.2 Waveforms of OLI and OSI

### 1.2 冲击下局部放电测试回路

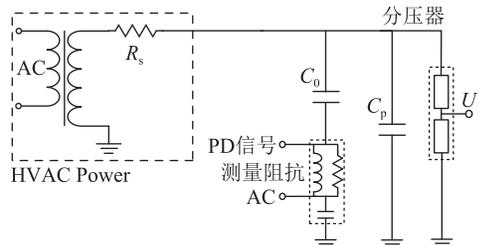
在电压变化率较大的冲击电压下,试品接地线上流过的电流( $I_{total}$ )由 3 种成分构成,包括阻性泄漏电流( $i_R$ )、电容性位移电流( $i_c$ )以及放电迁移电流  $i_{PD}$ ,如式(1)所示。一般阻性电流在设备整体绝缘良好情况下可忽略,但容性位移电流取决于试品电容值( $C$ )和施加电压变化率( $dU/dt$ ),在冲击电压下相对较大(10~100 A)。对于试验中的 GIS 设备而言,试品电容大约为 960 pF,假设将峰值电压为 200 kV 的雷电冲击电压施加在试品上,电容性位移电流峰值将达到 50 A 左右,远大于毫安级的局部放电脉冲电流,使得局部放电脉冲的提取较为困难。因此,传统工频下局部放电耦合方法难以适用于冲击激励条件,应该在局部放电耦合回路中对低频容性电流予以限制。

$$I_{total} = i_R + i_c + i_{PD} = \frac{U}{R_a} + C_a \frac{dU}{dt} + \frac{dQ_{PD}}{dt} \quad (1)$$

在实验中,采用双罗氏线圈并配合高通滤波进行局部放电信号耦合,如图 3 所示。其中 CT1 为高频电流线圈(响应频带为 400~250 MHz,灵敏度为 1 V/A),用于获得包括位移电流和局部放电信号在内的瞬态信号;CT2 为低频电流线圈(响应频带为 10~1 MHz,灵敏度为 5 V/A),用于获取低频下的位移电流信号,并通过差分放大器对上述两个线圈的输出信号进行处理,从而有效限制位移电流,提高局部放电脉冲输出的动态范围。图 4 为采取上述限制手段前后的位移电流测量结果。



(a) 冲击电压试验回路



(b) 工频电压试验回路

图 3 试验测试回路

Fig.3 Test circuit

为了有效辨别试验当中的干扰脉冲和局部放

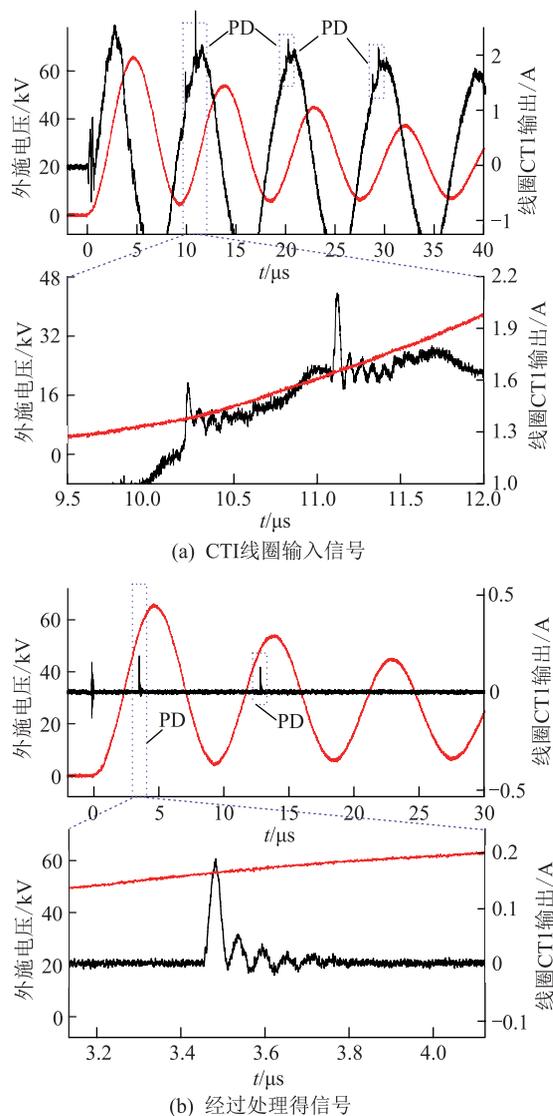


图4 限制前后的电容性位移电流及局部放电信号  
Fig.4 Signals before and after processing output signal of CT1 and processed PD signal

电脉冲,同时采用光电倍增管(PMT)进行局部放电光学探测,选用PMT型号为Hamamatsu-R3896,其光谱范围为185~900 nm,单光子响应时间 $<2.2$  ns,光强倍增范围 $>3\ 000$  A/lm,完全满足局部放电弱光探测的需要<sup>[18]</sup>。试验中的电压信号、局部放电电流脉冲信号及光脉冲信号由高速数字示波器同步记录(LeCroy,采样率为10 GS/s,带宽为600 MHz)。

### 1.3 测试对象及其人工缺陷设置

采用110 kV真型GIS试验腔体进行试验,该试验腔体由多个独立气室、出线高压套管、隔离接地开关、气体变压器及人工缺陷设置腔室组成,如图5所示。其中,人工缺陷设置腔室具有石英玻璃制成的观察窗,110~1 300 nm范围内光透射率在85%以上,保证了光学局部放电探测的效率。

试验中,将PMT安装在观察窗外,保持放电视

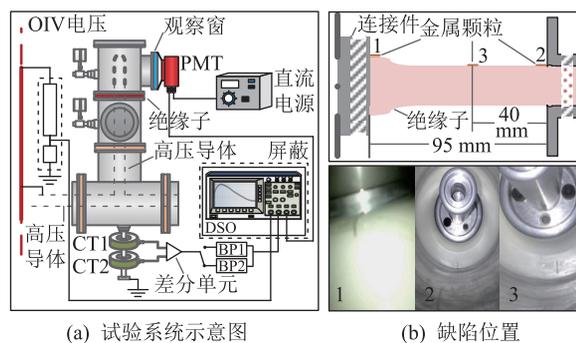


(a) 110 kV GIS (b) 观察窗

图5 试验测试对象实拍

Fig.5 Test object and test chamber

场在PMT端窗内,通过直流电源控制PMT增益为 $7 \times 10^6$ ,如图6(a)所示。缺陷腔室内气压范围为0.05~0.4 MPa,试验时环境温度为21℃。金属棒状颗粒被分别固定在绝缘子表面3个不同位置上,如图6(b)所示。位置1为金属颗粒与高压电极接触,位置2为金属颗粒与接地电极接触,位置3为金属颗粒在绝缘子表面不与电极接触。该金属针电极长度为12 mm,两头等效曲率半径大约为200 μm。试验中发生击穿时,盆式绝缘子可能遭受不可逆的绝缘损伤或开裂,因此在每次击穿后都对绝缘子进行了解体检查或更换,保证试验结果的可比性。



(a) 试验系统示意图 (b) 缺陷位置

图6 测试系统及人工缺陷放置位置

Fig.6 Test system and placement of artificial defects

## 2 测试结果及分析

### 2.1 局部放电起始电压与击穿电压

局部放电的激发由SF<sub>6</sub>气压,初始场强分布以及外施电压形式决定。局部放电起始电压是衡量绝缘状态的重要参数,一般而言,放电的实际起始场强所对应的外施电压值一般小于其测量值,这是由于局部放电检测系统很难对临界电压下低电荷密度的初始电子雪崩做出有效响应。工程上一般将实际测量中50%概率检测到可视脉冲时的电压峰值作为其局部放电起始电压(PDIV)<sup>[19]</sup>。经校验,试验的测试系统在冲击电压和交流电压下局部放电最小可检测值分别为2.5 pC和1.0 pC。

在-OLI、-OSI以及AC电压下,绝缘子表面颗

粒的 PDIV 和 BDV 在不同位置随气压下的结果如图 7 所示。由于极性效应,位置 1 的金属针电极的 PDIV 始终大于位置 2,而 BDV 结果则相反。从图 7 (a)、(b)可直观的比较不同位置下 PDIV 与 BDV 之间的差值大小,即局部放电的活跃区间。可以看出,在 AC 电压下位置 1 和位置 2 的局部放电活跃区间明显大于 OSI 及 OLI 下的结果,并且随着气压的升高,该区间差异更加明显。

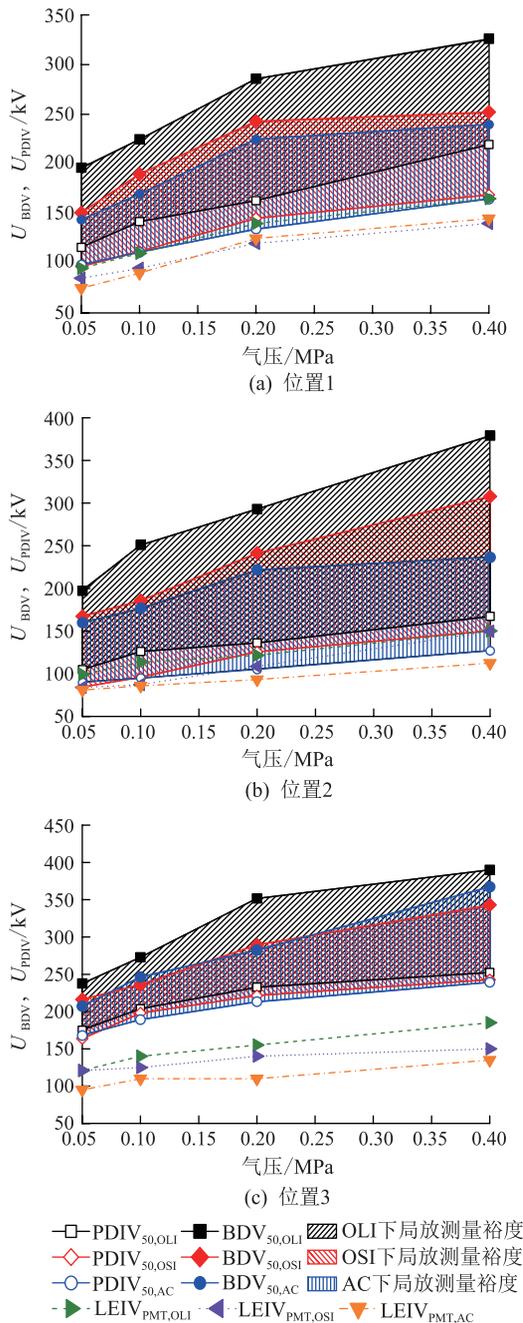


图 7 OSI、OLI 以及 AC 50 Hz 电压下的 PDIV 和 BDV

Fig.7 PDIV and BDV under OLI, OSI, and AC voltages: particle at position

对于位置 3 的金属针电极,其 PDIV 和 BDV 在 OSI 和 AC 电压下较为接近,且在相同气压下,位置

3 的 PDIV 及 BDV 明显大于位置 1 和位置 2 下的结果,这是由于在相同外施电压下,位置 3 处金属颗粒引起的局部电场强度畸变程度弱于位置 1 和位置 2,因而在位置 3 处的局部放电活跃区间相对较小,如图 7(c)所示。此外,由 PMT 光脉冲测量结果所确定的 PDIV 较电流脉冲确定的 PDIV 低,这是由于光子的产生在较弱的电子崩产生和放电发展初期均存在,因此光测法具有更高的灵敏度。不同外施电压形式下,由光脉冲测量确定的放电起始电场 ( $LEIV$ ) 按大小排序为:  $E_{LEIV,AC50 Hz,PMT} < E_{LEIV,OLI,PMT} < E_{LEIV,OSI,PMT}$ 。

瞬态与稳态电压下电场变化率的显著差异是初始有效电子时延、流注发展以及空间电荷稳定性差异的主要来源<sup>[20]</sup>,因此 AC 电压和振荡冲击电压下的耐压试验以及局部放电试验的有效性难以采用施加电压值来衡量,因此仅依据 PDIV 和 BDV 的试验结果尚显不足。

在施加电压逐渐升高的过程中,绝缘缺陷会经历局部放电产生、发展、消散及闪络过程。工程上希望设备在达到击穿之前尽可能早地获得局部放电信息,从而保证较大的裕度空间来进行绝缘诊断。因此对局部放电发展初期的有效检测至关重要。基于如上考虑,引入局部放电激发效率  $\xi$ ,其定义式如式(2):

$$\xi_{AC,OLI,OSI} = \frac{U_{BDV}}{U_{PDIV}} \quad (2)$$

该参数可以表征各种施加电压对局部放电的激发效果, $\xi$  的值越小则施加电压对缺陷的发现能力越强。图 8 为 3 种施加电压在不同气压下对绝缘子沿面金属导体缺陷的激发效率,当金属颗粒与高压板电极接触时(图 8(a)), $\xi_{AC}$  相对较小,当金属颗粒与接地板电极接触时(图 8(b)),除了气压在 0.05 MPa 的情况之外, $\xi_{OLI}$  均大于  $\xi_{OSI}$  和  $\xi_{AC}$ ;当金属颗粒处于绝缘子表面中间位置时(图 8(c)), $\xi_{AC}$  小于  $\xi_{OLI}$ ,除了气压为 0.05 MPa 时, $\xi_{AC}$  大于  $\xi_{OSI}$ 。大多数试验条件下, $\xi_{OSI}$  和  $\xi_{OLI}$  大于  $\xi_{AC}$ 。

## 2.2 局部放电脉冲序列

文中通过试验来分析 OSI、OLI 及 AC 电压下从局部放电到预击穿过程中的脉冲序列特征及差异。

金属颗粒在绝缘子上的位置决定了局部电场畸变的模式,同时也决定了局部放电发生时放电主脉冲的极性<sup>[21]</sup>。在高压电极上施加正向电压时,若金属棒颗粒在位置 1,则会在棒颗粒另一端产生正极性脉冲;若金属棒颗粒在位置 2,在金属棒颗粒另一端会产生负极性脉冲;如果金属棒颗粒在位置 3,

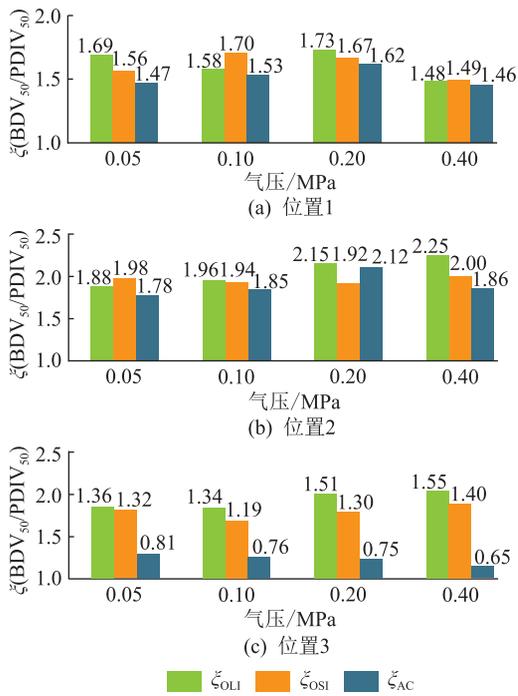


图8 不同电压下3种外施电压的激发系数  
Fig.8 Efficiency factors of OLI, OSI, and AC voltages at various gas pressures

靠近高压电极一端的尖端会发生负极性放电,而另一端会发生正极性放电;若金属棒颗粒在位置3,结果与位置1下的情况相反。

在 OLI 电压下,大部分局部放电脉冲发生在振荡波形的上升沿处,如图 9(a)所示,正极性脉冲序列由 2—3 个脉冲信号组成,其幅值大约为 10 mA。随着冲击电压幅值的增加,放电脉冲幅值以及频次均显著增加,同时,脉冲出现在更多的振荡周期中;图 9(b)给出金属棒颗粒在位置 2 下局部放电脉冲,负极性局部放电脉冲序列由多个幅值较小脉冲(约为 10 mA)组成,在振荡波形的下降沿处出现一些极性相反的较弱脉冲,随着冲击电压幅值的增加,脉冲信号出现在更多振荡周期中;金属棒颗粒在位置 3 时,脉冲序列由一个或者 2 个幅值相对较大的脉冲(幅值大于 5 mA)以及多个幅值相对较小的脉冲(小于 5 mA)组成,并且也会随着冲击电压幅值的增加而显著增加,如图 9(c)所示。

在 OSI 电压下,局部放电活动发生在振荡波形的上升沿以及峰值处,如图 10(a),位置 1 的正极性局部放电脉冲序列具有较高的峰值,大约在 10 mA 左右,随着外加电压幅值的升高,脉冲信号的幅值以及数量也会相应增加;如图 10(b),相比于正极性脉冲,位置 2 的负极性脉冲数量变多,但幅值普遍较小;如图 10(c)所示,随着外加电压的提高,局部放电脉冲幅值和数量增加,但是与 OLI 电压下不同的

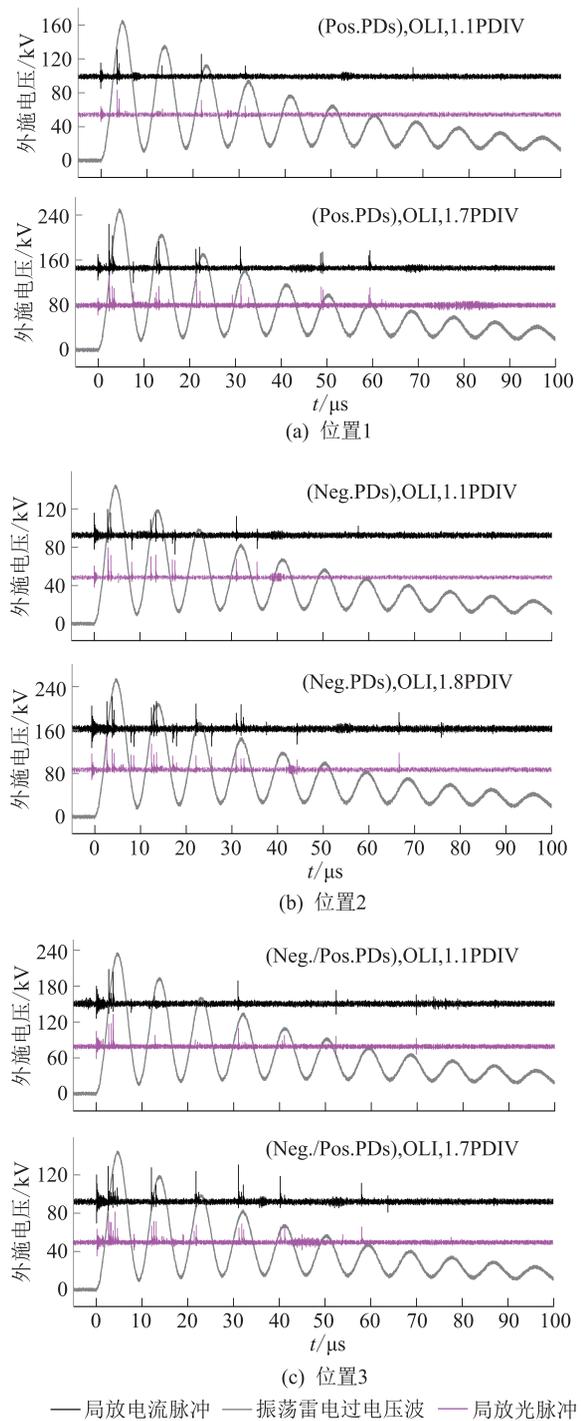
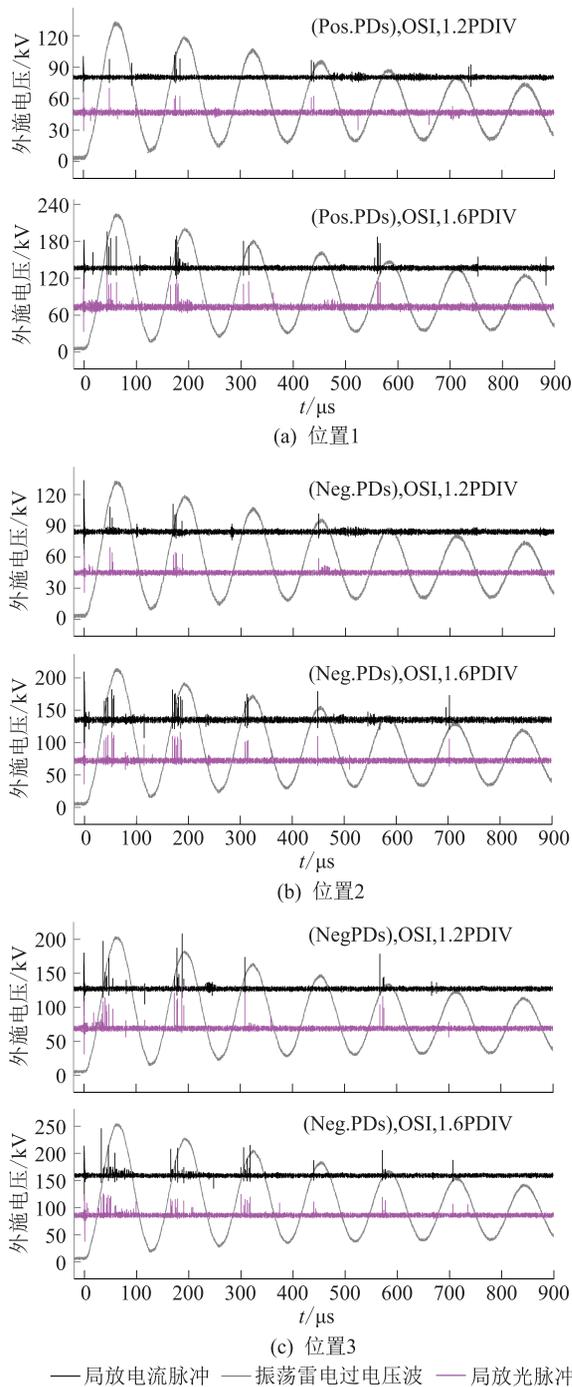


图9 OLI 电压下电流脉冲和光脉冲  
Fig.9 PD current and light sequences under OLI particle at position

是,OSI 电压下,几乎不能检测到极性相反的脉冲信号。

AC 电压下,局部放电活动发生在交流电压半波峰值处,如图 11(a)、(b)所示,位置 1 和位置 2 由于电场相反,局部放电序列呈现对称特性。通常情况下,由于极性效应的存在,负极性脉冲首先被检测到。如图 11(c)所示,位置 3 下的电压正半周期正极性脉冲信号大而稀疏,负极性脉冲信号小而密集



—局放电流脉冲 —振荡雷电过电压波 —局放光脉冲

图 10 OSI 电压下电流脉冲和光脉冲

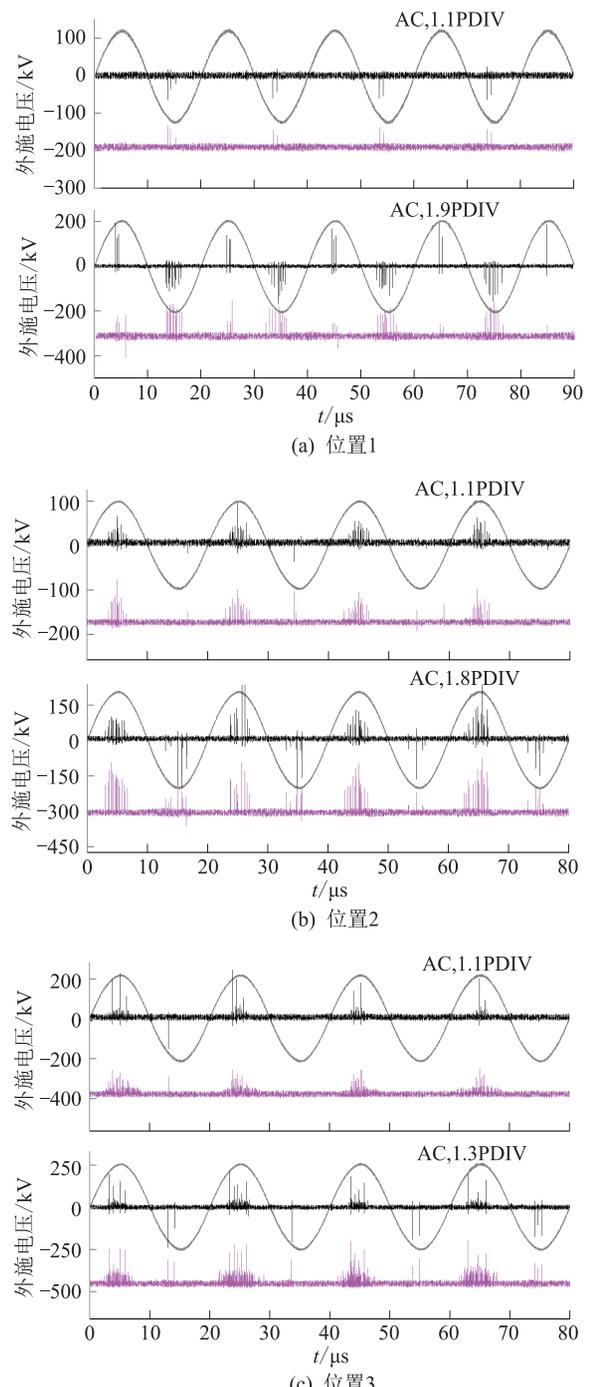
Fig.10 PD current and light sequences under OSI particle at position

集,当外加电压增大时也会在负半周期出现少量局部放电脉冲。

总体而言,在 OSI 和 OLI 电压下,脉冲信号多出现于振荡周期的上升沿处,并且随着冲击电压幅值的增加,脉冲幅值以及数量也会相应增加。大多数具有相反极性的脉冲出现在 OLI 电压下,而在 OSI 电压下很少出现极性相反的脉冲信号。

### 2.3 振荡冲击电压下局部放电信号的分布

在振荡冲击电压下,局部放电随电压振荡而周



—局放电流脉冲 —振荡雷电过电压波 —局放光脉冲

图 11 AC 电压下电流脉冲和光脉冲

Fig.11 PD current and light sequences under AC voltages particle at position

期性地发生。图 12 为在 OSI 和 OLI 前 10 个周期内所统计的局部放电幅值及脉冲数,大多数局部放电活动发生在振荡的前 5 个周期内,主要是因为振荡冲击电压的包络线所形成的背景电场值在 5 个周期后不足以维持局部放电产生。在 OLI 和 OSI 下,局部放电大多在第 1 和第 2 周期出现,其放电频次随着冲击电压的包络曲线电压值的降低而明显降低。大多数情况下,位置 3 的局部放电脉冲数最多,位置

1 的局部放电脉冲数最少,但是位置 1 脉冲幅值最大,位置 3 脉冲幅值最小。

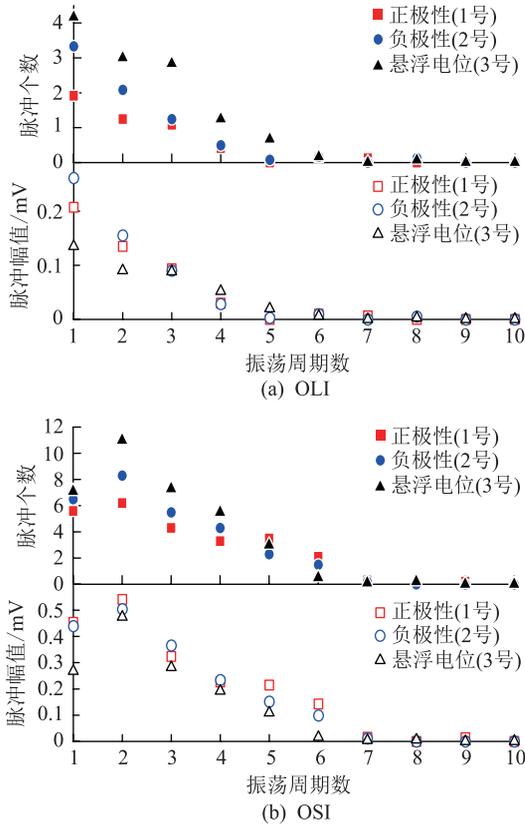


图 12 前 10 个周期下局部放电脉冲数及其幅值  
Fig.12 PD numbers and PD magnitudes  
in the first ten oscillating periods

#### 2.4 局部放电的活跃性随气压的变化

图 13 给出了金属颗粒处于 3 种不同位置时局部放电脉冲平均幅值随气压的变化趋势。在绝对气压从 0.05 MPa 升至 0.4 MPa 时,不同激励电压下的局部放电平均脉冲幅值均不同程度减小,对于相同气压,不同位置下的局部放电平均脉冲幅值(用  $I$  表示)可按大小排序为  $I_1 > I_2 > I_3$ ; 对与相同气压,相同位置,不同外施电压形式的局部放电平均脉冲幅值可按大小排序为  $I_{OLI} > I_{OSI} > I_{AC50Hz}$ 。可以看出,在 AC 电压和振荡冲击电压下,局部放电平均脉冲幅值差异明显,表明在冲击电压下尤其是 OLI,可以在相对较低的电压水平下使金属表面颗粒缺陷引起局部放电。

在放电从金属-绝缘子-气体的 3 交界点开始沿电场方向发展时,放电电荷不仅积聚在气体中,同时也积累在金属棒颗粒附近的绝缘子表面上。在变化率较小的 AC 电压下,这种电荷积累效应较为显著。在 AC 电压下,针尖附近有效电离区域的体积增加缓慢,使得放电发展得到限制,导致放电脉冲幅值相对较小;在冲击电压下,有效电离区域的

体积随冲击电压幅值的增加迅速增大,且超过电荷积累区,从而正向雪崩不断向电场方向发展,产生幅值较大的脉冲信号,意味着冲击电压下能够检测到小尺度缺陷所激发的局部放电脉冲。

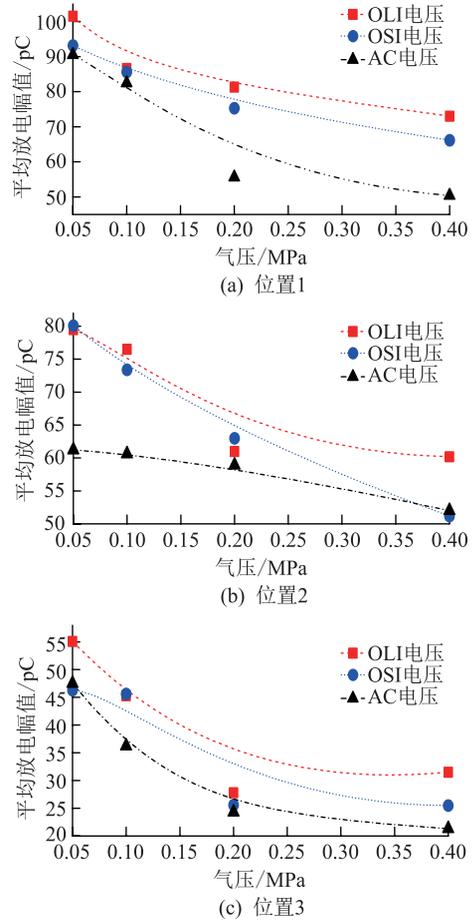


图 13 不同气压下,不同位置局部放电平均脉冲幅值  
Fig.13 Average magnitudes of PDs  
excited at various positions

### 3 振荡冲击下沿面放电产生机制分析

绝缘子表面放电的电晕稳定是由放电通道头部的正离子或负离子聚集而引起的,当空间电荷的迁移速度  $v_{cr}$  大于放电临界区域  $V_{cr}$  边界(由外施电场变化决定)的扩展速度时,放电的发展会受空间电荷限制,相反,  $v_{cr} < V_{cr}$  时,放电继续沿电场方向向前发展。在  $SF_6$  强电负性气体-金属电极-绝缘子交界面处的局部放电发展包含两部分,其一为气体中电子倍增过程,其二为介质表面电子的吸附和发射过程,在上述两种过程都会明显受电子吸附作用的影响。将上述初始电子或二次表面发射电子通过介质表面对放电发展的影响分为两部分:当电子能量足够强,撞击介质表面产生二次电子发射,放电发展受到促进,此过程可用介质表面电子发射系数为  $\alpha_s$  来描述;当电子能量不够强,撞击介质表面后

被吸附,放电发展受到限制,此过程可用介质表面吸附系数  $\eta_s$  来描述。当金属尖端为负极性时,雪崩电离形成的电子在向远离负极方向迁移的过程中,一部分受强电负性的  $\text{SF}_6$  分子吸附形成负离子(气体电子吸附系数为  $\eta$ ),另一部分被介质表面陷阱捕获形成残留电荷(介质表面吸附系数  $\eta_s$ );雪崩电离过程中还伴随着光辐射,它不但会加速放电通道头部的空间电离过程(气体电子电离系数为  $\alpha$ ),还会促使介质表面陷阱电子的逸出(表面电子发射系数  $\alpha_s$ )。上述两种过程使得电离向远离负极方向在介质表面不断发展,但由于介质表面残留电荷对电场的影响,使得雪崩电离不易快速发展为流注,当总电离系数  $(\alpha - \alpha_s) < \text{总吸附系数}(\eta - \eta_s)$  时,放电不再向前发展,在电荷消散后,再一次的雪崩电离又重新开始于金属尖端。当背景电场足够强,满足  $(\alpha - \alpha_s) > (\eta - \eta_s)$  时,放电将沿固体绝缘介质表面继续发展,当电离通道发展长度达到流注起始临界长度  $x_{cr}$ (即电子崩累积电子数达到  $K_{cr}$ ,如式(3))时,放电由电子崩转变为流注。

$$\begin{cases} \int_0^{l_{cr}} \{\alpha[E(x)] - \bar{\eta}[E(x)]\} dx \geq K_{cr} \\ \bar{\alpha}[E(x)] = \alpha[E(x)] + \alpha'[E(x)] \\ \bar{\eta}[E(x)] = \eta[E(x)] + \eta'[E(x)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $l_{cr}$ 为流注临界发展长度; $K_{cr}$ 为流注发展自持系数。

由于冲击电压的变化率较大,内部背景电场的衰减时间和放电形成电荷的消散时间在数量级上相差不大,因此空间及介质表面的聚集电荷对放电的影响较大。

在外施电压不断上升时,沿介质表面的背景电场  $E_b$  不断增大,当  $E_b > E_{cr}$  时,电子崩爆发,随着  $E_b$  的不断上升,大于  $E_{cr}$  的空间区域随之向前延伸,在此期间所产生的电子崩放电将迅速地向前发展,如图 14(a) 所示。随着外施电压的继续上升,  $E_b > E_{cr}$  的区域将大于流注起始临界长度  $l_{cr}$ ,此时电子崩放电将有可能发展为流注,如图 14(b)。当外施电压开始下降,  $E_b$  也不断减小,  $E_b > E_{cr}$  的空间区域也逐渐退缩,此时放电形成的负电荷在电极前方聚集,形成反向电场  $E_r$ ,当总电场  $E_{total}(=E_b - E_r) < E_{cr}$  时,放电将不再继续发展,放电形成的负电荷朝远离负极的方向扩散,在此过程中有一部分负电荷被介质表面吸附,如图 14(c)。随着施加电压的继续下降,  $E_b$  将小于  $E_r$ ,使得介质表面的总电场  $E_{total} < 0$ ,当累积电荷足够多时,会产生反向电子崩,如图 14(d) 所示。

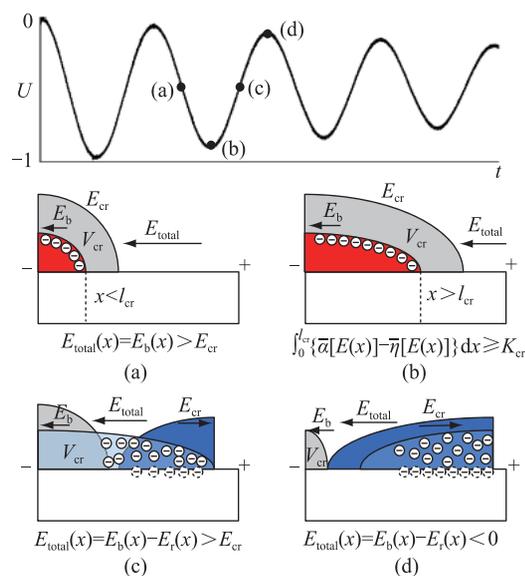


图 14 振动冲击激励下绝缘子沿面局部放电形成机制

Fig.14 Propagations of discharge along the insulator surface with varying background electric field

## 4 结论

文中针对 110 kV 真型 GIS 母线段的盆式绝缘子,在雷电和操作振荡冲击电压下,对不同位置的绝缘子表面金属颗粒缺陷所激发的局部放电进行了对比试验研究,并得到以下结论:

(1) 当金属颗粒与高压或者接地电极接触时,在 AC 电压下局部放电活跃区间( $U_{BDV} - U_{PDIV}$ )小于冲击电压下放电活跃区间,当气压增加时,区间差值差异更加明显。

(2) 在 OLI 和 OSI 下,在振荡周期的上升沿处局部放电发生频繁,然而在电压波谷处,也会出现相反极性的局部放电脉冲。局部放电主要发生在冲击电压的前 5 个周期内,多数情况下,处于绝缘子中间位置金属颗粒引起的局部放电脉冲数最多,而处于高压位置的脉冲最少。同时,高压位置脉冲幅值最大,而绝缘子中间位置脉冲幅值最小。

(3) 随着气压的逐渐升高,高压位置和接地位置局部放电发生时的局部放电脉冲平均幅值均减小,不同位置下的局部放电平均脉冲幅值可按大小排序为  $I_1 > I_2 > I_3$ ,相同气压,相同位置,不同外施电压形式的局部放电平均脉冲幅值可按大小排序为  $I_{OLI} > I_{OSI} > I_{AC}$ 。

### 参考文献:

- [1] 周洁睿, 任明, 李金忠. 冲击电压下 GIS 局部放电检测方法的对比研究[J]. 绝缘材料, 2017(12): 64-71.  
ZHOU Jierui, REN Ming, LI Jinzhong. Comparative study of partial discharge detection methods in GIS under impulse voltage[J]. Insulating materials, 2017(12): 64-71.

- [2] 文韬, 张乔根, 赵军平, 等. 特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):30-33.  
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of field standard lightning impulse withstand voltage test technology for UHV GIS equipment [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 30-33.
- [3] 仇新艳, 李付亮, 彭春燕, 等. 特高压变压器交流耐压及局部放电试验装置[J]. 高压电器, 2009, 45(4):94-96.  
QIU Xinyan, LI Fuliang, PENG Chunyan, et al. AC withstand voltage and partial discharge test device for UHV transformer [J]. High Voltage Appliances, 2009, 45(4): 94-96.
- [4] BOECK W. Gas insulation systems -activities of cigre WG 15.03 [M]. Gaseous Dielectrics IX. Springer US, 2001:569-574.
- [5] 侍海军, 王光前, 张少炎. GIS 现场绝缘试验技术[J]. 高压电器, 2005, 41(1):55-58.  
SHI Haijun, WANG Guangqian, ZHANG Shaoyan. GIS field insulation test technology [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2005, 41(1): 55-58.
- [6] 罗杨, 吴广宁, 王鹏, 等. 连续方波脉冲电压下温度对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19):154-160.  
LUO Yang, WU Guangning, WANG Peng, et al. Effects of temperature on partial discharge characteristics of polyimide films under continuous square wave pulse voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 154-160.
- [7] 孙强, 董明, 任重, 等. 现场用 GIS 冲击耐压试验及局部放电检测装置设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3):639-644.  
SUN Qiang, DONG Ming, REN Zhong, et al. Design of GIS impulse voltage resistance test and partial discharge detection device for field use [J]. High Voltage Technology, 2012, 38(3): 639-644.
- [8] 汪泓, 张乔根, 邱毓昌. GIS 中绝缘子与电极接触不良时闪络特性的分析[J]. 绝缘材料, 2003, 36(1):45-47.  
WANG Feng, ZHANG Qiaogen, QIU Yuchang. Analysis of flashover characteristics of insulators and electrodes in GIS [J]. Insulating Materials, 2003, 36(1): 45-47.
- [9] 胡鹏, 李成钢, 陈大兵. 电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):102-105.  
HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing. Cable GIS terminal epoxy casing cracking analysis and countermeasures [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 102-105.
- [10] 齐波, 高春嘉, 邢照亮, 等. 操作冲击电压下 GIS 绝缘子表面电荷的积聚特性[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15):4538-4547.  
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. Surface charge accumulation characteristics of GIS insulators under switching impulse voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4538-4547.
- [11] 郭治锋, 赵学风, 吴磊, 等. 振荡型冲击电压下 GIS 绝缘气隙模型的局部放电研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(3):21-25.  
GUO Zhifeng, ZHAO Xuefeng, WU Lei, et al. Partial discharge study of GIS insulation air gap model under oscillating impulse voltage [J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(3): 21-25.
- [12] 李润秋, 董明, 孙强, 等. 标准操作冲击电压下 220kV GIS 中典型缺陷局部放电特征[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(10):13-18.  
LI Runqiu, DONG Ming, SUN Qiang, et al. Partial discharge characteristics of typical defects in 220 kV GIS under standard operating impulse voltage [J]. Power Grid and Clean Energy, 2011, 27(10): 13-18.
- [13] IMANO A M. Dielectric rigidity of a gas-support interface with metal contaminant in the dry air and SF<sub>6</sub>-air mixtures [J]. Canadian Journal of Physics, 2006, 84(5):381-398.
- [14] 李天辉, 贾伯岩, 顾朝敏, 等. 1 100 kV GIS 现场交流耐压试验放电定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3):116-121.  
LI Tianhui, JIA Boyan, GU Chaomin, et al. Research on discharge location technology of 1 100 kV GIS field AC withstand voltage test [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 116-121.
- [15] LAZARIDIS L A, MIKROPOULOS P N. Flashover along cylindrical insulating surfaces in a non-uniform field under positive switching impulse voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2008, 15(3):694-700.
- [16] 田可新, 王钢. GIS 绝缘子在冲击电压下沿面闪络的分析[J]. 高压电器, 2003, 39(6):14-16.  
TIAN Kexin, WANG Gang. Analysis of surface flashover of GIS insulators under impulse voltage [J]. High Voltage Appliances, 2003, 39(6): 14-16.
- [17] 季洪鑫, 李成榕, 庞志开, 等. 电压波形对 GIS 自由金属颗粒放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13):218-226.  
JI Hongxin, LI Chengrong, PANG Zhikai, et al. Effect of voltage waveform on discharge characteristics of free metal particles in GIS [J]. Journal of Electrical Technology, 2016, 31(13): 218-226.
- [18] 陈焕栩, 解浩, 张建文, 等. 基于灰度共生矩阵纹理特征的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5):25-30.  
CHEN Huanxun, XIE Hao, ZHANG Jianwen, et al. Partial discharge pattern recognition based on gray level co-occurrence matrix texture feature [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 25-30.
- [19] 文韬, 张乔根, 马径坦, 等. 冲击电压波形参数对 SF<sub>6</sub> 稍不均匀电场棒-板间隙放电电压的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):936-941.  
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, MA Jintan, et al. Effects of impulse voltage waveform parameters on discharging voltage in rod-plate gap of slightly inhomogeneous SF<sub>6</sub> electric field [J]. High Voltage Technology, 2016, 42(3): 936-941.

[20] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS 绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1):101-108.

QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Phenomena and characteristics of partial discharge along the surface of fixed metal particles on GIS insulators [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31 (1): 101-108.

[21] 吴旭涛, 李军浩, 张亮, 等. 振荡型冲击电压下局部放电的检测及干扰分析[J]. 高压电器, 2016(4):92-97.

WU Xutao, LI Junhao, ZHANG Liang, et al. Detection and interference analysis of partial discharge under oscillating im-

pulse voltage [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2016 (4): 92-97.

作者简介:



高旭泽

高旭泽(1994),男,硕士在读,研究方向为高压电力设备状态监测与绝缘诊断。(E-mail:gaoxz1114@126.com);

段然(1996),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

谭笑(1989),男,博士,高级工程师,从事电力电缆带点检测及状态评估技术研究工作。

## Discharge characteristics of metal particles on insulator surface under oscillation impulse and AC voltage

GAO Xuze<sup>1</sup>, DUAN Ran<sup>1</sup>, TAN Xiao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In recent years, insulating faults caused by surface discharge of insulators are more common. Impulse withstand voltage detection and partial discharge detection under impulse are effective means for insulation evaluation and diagnosis. In this work, PD diagnosis was performed under standard oscillating lightning impulse (OLI), oscillating switching impulse (OSI) and alternating current (AC) voltages on a 110 kV gas insulated switchgear (GIS) bus model with artificial particles on the insulator surface. The results demonstrated that PDs under OIVs occurred at the rising slopes of the oscillating periods. Most of the reverse polarity pulses were found under OLI voltage, few were found under OSI voltage, and none were found under AC voltage. PD sequences excited from the negative needle point were composed of small and compact pulses. In contrast, positive-point excited PD sequences were composed of larger pulses but fewer of them. These results prove that the defects of particles on the insulator surface are more sensitive to OIVs than to AC voltage.

**Keywords:** gas insulated switchgear; oscillating impulse voltage; PD detection; impulse withstanding testing

(编辑 杨卫星)