

电压波动条件下环氧树脂内部局部放电特性研究

韩锦春, 李禹锋

(太原理工大学 电力系统运行与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 针对电力系统中可能出现的电压暂降/暂升现象, 利用可编程电源对外施电压进行调制, 分析了电压波动对环氧树脂内部局部放电特性的影响规律。结果表明: 电压波动将导致空气间隙的局部放电模式发生改变, 在正负半周表现出不对称特性; 外施电压的波动程度越大, 局部放电的不对称性则越显著。局部放电谱图发生改变的原因在于外部电场与累积在气隙内部表面电荷的共同作用, 一方面, 表面电荷产生的电场将与外部施加的电场叠加, 对气隙内部的总电场进行调制; 另一方面, 随着放电的持续进行, 表面电荷的消散和中和也将影响气隙内部的总电场, 进而导致局部放电在外施电压的正负半周表现出不对称特性。

关键词: 环氧树脂; 电压波动; 局部放电; 内部电场

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.01.012

Study on internal partial discharge characteristics of epoxy resin under voltage fluctuation

HAN Jinchun, LI Yufeng

(Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In view of the voltage dip/swell in the power system, a programmable power supply was used to modulate the applied voltage, and the effect of voltage fluctuation on the internal partial discharge characteristics of epoxy resin was analyzed. The results show that the voltage fluctuation will lead to the change of partial discharge pattern of air gap, which exhibits asymmetry in positive and negative half cycles. The greater the applied voltage fluctuation, the more significant the asymmetry of partial discharge. The reason for the change of partial discharge pattern is due to the combined effect of external electric fields and surface charges accumulated inside the air gap. On the one hand, the electric field generated by surface charges can overlap the applied electric field to adjust the total electric field in air gap. On the other hand, as the discharge continues, the dissipation and neutralization of surface charges can also affect the total electric field in air gap, resulting in the partial discharge exhibit asymmetry in positive and negative half-cycle of the applied voltage.

Key words: epoxy resin; voltage fluctuation; partial discharge; internal electric field

0 引言

局部放电(PD)是电力设备中常见的局部击穿现象^[1-2]。相关研究表明, 设备内部的绝缘缺陷有可能引发电力事故, 而局部放电测试是分析与判断绝缘系统中是否存在内部缺陷的一种重要方式^[3-4]。

一般而言, 根据不同的局部放电测试方法, 施加于电力设备的电压波形不完全相同, 其放电特性也会表现出差异, 其中最为典型的电压波形是 50 Hz 交流电压和直流电压。由于放电机制的不同, 交流电压下局部放电的重复率一般高于直流电压下^[1]。此外, 为了降低现场测试的功率需求, 减小测试电源的体积与质量, 一些局部放电试验也会在振荡波与超低频电压下进行^[5-7]。

在真实工况下, 绝缘系统承受的电压波形可能更为复杂, 因而学者们针对不同电压波形条件下绝缘系统的局部放电特性开展了大量研究^[8-13]。文献[9]研究了高压直流输电系统中直流电压波形对局部放电的影响, 结果表明由于固体绝缘中气隙充电时间常数的变化, 更高的谐波频率可以降低局部放电幅值。文献[10]研究了脉宽调制(PWM)电压下高频变压器的局部放电特性, 发现更快的电压变化率(dV/dt)可以降低局部放电起始电压并导致更高的放电幅值, 而当 PWM 脉冲频率增大时, 则会出现相反的现象。文献[11]研究了交直流复合电压条件下油浸绝缘纸板的局部放电特性, 发现直流电压分量对表面爬电的分布规律影响较大。文献[12]探讨了交流和脉冲叠加电压条件下环氧树脂的表面放

电特性,结果表明当脉冲叠加相位由 45° 向 135° 转变时,高压电极附近正空间电荷的积累可以显著促进负半周的局部放电活动。文献[13]研究了谐波电压对局部放电的影响规律,发现根据谐波成分的不同,局部放电有可能被增强或削弱。

在配电网中,电压波动是电能质量领域的一个常见问题。受到配电网中重载通电、感应电机启动等因素的影响,电网电压容易出现暂时降低;而在非有效接地系统中,当单相接地或两相接地故障发生时,非故障相电压则会出现暂时升高^[14-15]。从放电的角度,在电压波动发生前出现的局部放电将会产生大量电荷并沉积在绝缘内部的气隙表面,形成的电场将影响后续的放电行为;而当电压发生波动时,电力设备所承受的电压波形也将发生改变,并影响气隙内部的电场分布。在变化的外施电场和表面电荷电场的共同作用下,气隙内部的局部放电特性将发生改变,而这方面的研究目前少有报道。

目前,环氧树脂因其出色的电气性能、化学性能和力学性能,已在开关柜、干式变压器等电气设备中得到广泛应用。然而,环氧树脂材料内部的绝缘缺陷可能会导致局部放电的发生。为了阐明电压波动条件下环氧树脂内部的局部放电特性,本研究利用可编程电源对外施电压进行调制,采用局部放电相位分布(PRPD)谱图和脉冲序列分析(PSA)谱图,分别研究电压暂降和电压暂升对局部放电特性的影响规律,以期揭示气隙内部的局部放电过程提供参考。

1 实验

测试样品和实验平台如图1所示。为了模拟内部气隙缺陷,制作了环氧树脂夹层结构模型,圆柱形气隙的直径为6 mm,深度为3 mm。采用不锈钢平板电极施加电场,电极的直径为50 mm,厚度为10 mm。在实验过程中,利用可编程电源(Chroma 61511型)产生暂降和暂升电压波形,并通过无局放试验变压器(XEDSB-5 kVA/50 kV型)进行升压。将高压差分探头(Pintech PT-5240型,40 kV,75 MHz)连接至平板电极以获取变化的电压波形。使用灵敏度为7 mV/mA、测量带宽为2~100 MHz的高频电流传感器检测局部放电信号,并利用八通道数字示波器(PicoScope 6804E型,采样率为5 GS/s,带宽为500 MHz)对电压波形和脉冲电流波形进行记录并将数据上传至计算机保存。

局部放电测量通常在连续正弦电压下进行,为了研究电压波动对局部放电特性的影响规律,本研

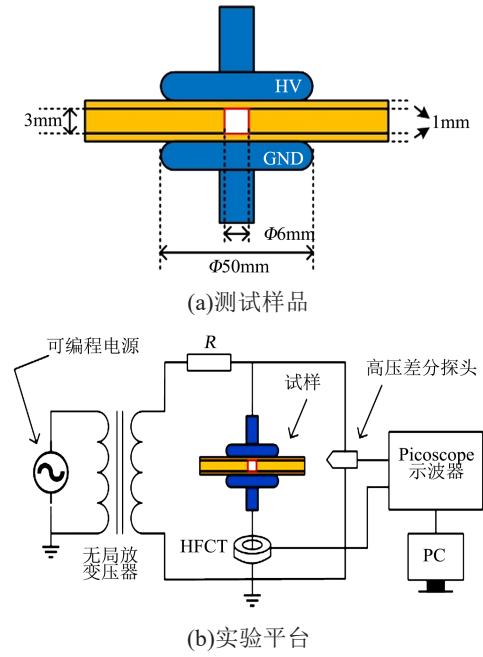


图1 测试样品和实验平台

Fig.1 Test sample and experimental platform

究构建一组电压序列来模拟电力系统中的电压暂降或暂升。电压序列由原始波形周期(OWP)和电压暂降周期(VDP)/电压暂升周期(VSP)组成,每个部分具有相同的周期 $T=20$ ms。OWP和VDP(或VSP)重复 M 次,测量时间 t_m 可以表示为式(1)。

$$t_m = M \cdot 2T \quad (1)$$

对于暂降序列,将OWP的电压固定为8 kV,VDP的电压则以1.6 kV为步长从0 kV逐步变化至6.4 kV,最终共得到5组电压暂降序列,图2(a)为暂降周期电压降低至4.8 kV的电压波形。对于暂升序列,将OWP的电压固定为5 kV,VSP的电压设定为6 kV和7 kV,图2(b)为电压升高至7 kV的电压波形。

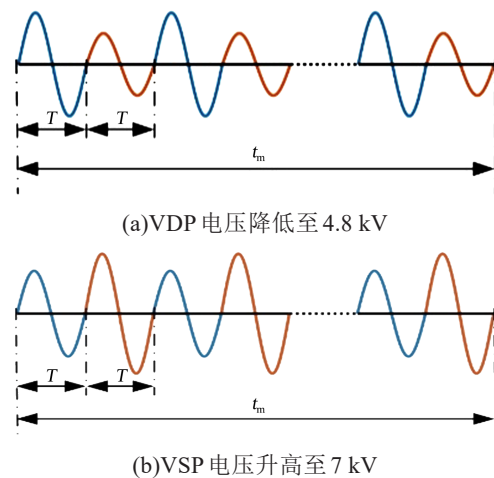


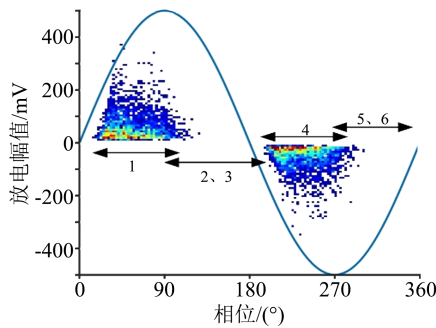
图2 电压暂降/暂升序列

Fig.2 Voltage dip/swell sequence

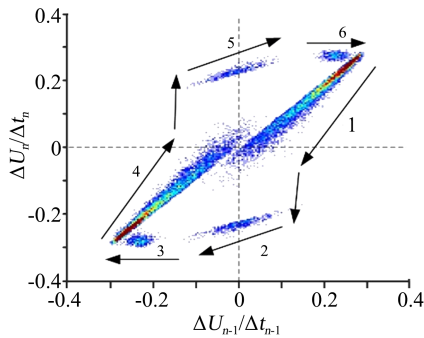
2 结果与讨论

2.1 连续正弦电压下的局部放电

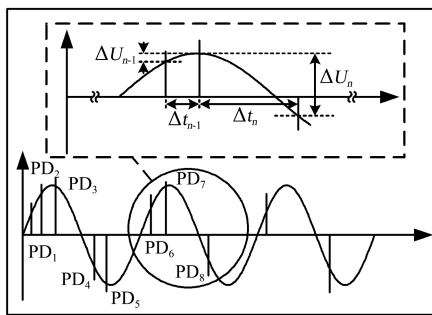
PRPD 谱图主要用于描述放电幅值和放电相位之间的关系,从中提取统计参数可以对局部放电特性进行分析^[4]。当施加 5 kV 的连续正弦电压时,获得的 PRPD 谱图如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出,正负半周的平均放电幅值和放电相位接近,放电重复率基本相同。放电密度的中心在点簇的头部,相应的脉冲幅值较低。PRPD 谱图表现出“龟背状”对称形式,这与典型气隙缺陷局部放电的特征一致^[16-17]。



(a)PRPD 谱图



(b)PSA 谱图



(c)PSA 方法的基本原理

图 3 连续正弦电压下典型气隙模型的局部放电测试结果

Fig.3 PD test results of typical air gap model under continuous sinusoidal voltage

通过 PRPD 谱图可分析放电幅值和相位之间的关系,但这种方法也忽略了连续脉冲之间的相关性。而 PSA 谱图则是研究连续脉冲时间演变的有

力工具^[18-19]。图 3(b)是典型气隙放电的 PSA 谱图,图中不同点簇和图 3(a)中对应的相位分布关系用数字 1~6 进行标记。图 3(c)为 PSA 方法的基本原理,第 n 个放电脉冲可由其发生时间 t_n 和施加的外部电压 U_n 唯一确定,PSA 模式可由参数 $\Delta U_n/\Delta t_n$ 构成,具体表示为式(2)。

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta t_n} = (U_n - U_{n-1}) / (t_n - t_{n-1}) \quad (2)$$

式(2)中: ΔU_n 是电压差; Δt_n 是时间差。

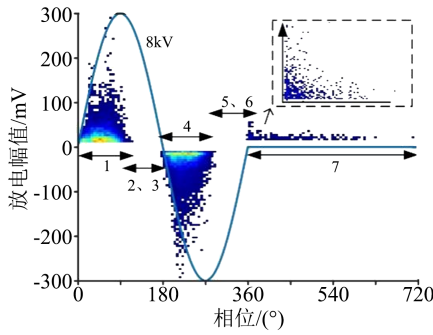
PSA 谱图中每个数据点的坐标为 $(\Delta U_{n-1}/\Delta t_{n-1}, \Delta U_n/\Delta t_n)$ 。当 3 个连续放电脉冲的相位分布发生改变时,在 PSA 谱图中将形成不同的点簇。如图 3(c)所示,对于分布在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 相位区间的 3 个连续脉冲(例如 PD_1 、 PD_2 、 PD_3),随着外施电压的增大, ΔU_n 总是正值,并且参数 $\Delta U_n/\Delta t_n$ 也是正值,而这将导致点簇 1 的形成。点簇 2 和点簇 3 则反映了放电脉冲极性的转变,当前两个放电脉冲出现在正半周期而第 3 个放电脉冲出现在负半周期时(例如 PD_6 、 PD_7 、 PD_8),点簇 2 形成;当第 1 个放电脉冲出现在正半周期而后两个放电脉冲出现在负半周期时(例如 PD_3 、 PD_4 、 PD_5),点簇 3 形成。相类似的,当外施电压过渡至负半周时,点簇 4、5 和 6 将会出现。由于施加电压的极性是相反的,点簇 4、5、6 和点簇 1、2、3 沿 45° 线中心对称。

2.2 电压暂降的影响

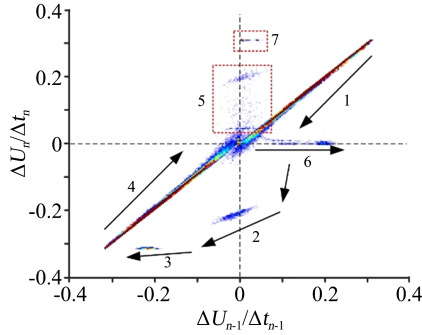
当外施电压为暂降序列时,测量时间 t_m 中的周期数为 100。图 4 为 VDP 电压为 0 kV 时的局部放电测试结果。由 4(a)可知,随着暂降电压的逐渐降低,局部放电模式显著改变。当电压完全降低至 0 kV 时,在该阶段仍然能够检测到局部放电脉冲。放电脉冲分布在整个暂降周期内,但放电幅值逐渐衰减。并且放电是不稳定的,每个周期的平均放电次数较低,只存在 1~2 个放电脉冲。

从图 4(b)可知,对于 PSA 谱图,当暂降电压下降至 0 kV 时,谱图中点簇 5 和点簇 6 的位置将发生变化。当前两个放电脉冲出现在原始波形周期的负半周期,而第 3 个放电脉冲出现在暂降周期时,点簇 5 形成,如图 4(c)中的 PD_2 、 PD_3 、 PD_4 。由于暂降周期内的局部放电是不稳定的,并且放电脉冲分布在较宽的相位区间内,脉冲 4 的发生时间 t_n 是不确定的,因而参数 $\Delta U_n/\Delta t_n$ 始终为正值,并随着第 3 个脉冲的位置而不断变化,导致 PSA 谱图中的点簇 5 分布在更宽的范围。而当第 1 个放电脉冲出现在原始波形周期的负半周期,另外两个放电脉冲发生在暂降周期中(例如 PD_3 、 PD_4 、 PD_5)时,参数 $\Delta U_{n-1}/\Delta t_{n-1} > 0$, $\Delta U_n/\Delta t_n = 0$,这将导致点簇 6 沿着 Y 轴分布并呈现细长条状。

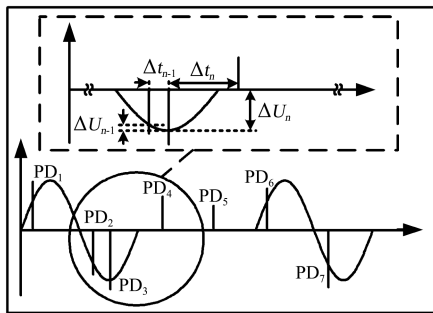
如图 4(a)所示,当暂降电压下降为 0 kV 时,仍



(a)PRPD 谱图



(b)PSA 谱图



(c)PSA 方法的基本原理

图4 电压暂降序列(VDP=0 kV)下的局部放电测试结果

Fig.4 PD test results under voltage dip sequence (VDP=0 kV)

然能够检测到局部放电,产生这一现象的原因主要在于气隙内部沉积了表面电荷。研究表明,当局部放电发生后,累积的表面电荷将会在气隙内部产生电场,从而影响后续的放电行为^[17,20-23]。气隙内部典型的电场分布情况如图5所示。从图5可以看出,当暂降电压下降为0 kV时,气隙内部的总电场完全由表面电荷产生的电场 E_q 决定,而暂降周期内出现的局部放电脉冲则由电场 E_q 所引发。在局部放电出现后,新产生的自由电荷将中和原有的表面电荷,削弱气隙内部的电场强度,进而导致较低的放电幅值和放电重复率^[24]。

图6为VDP电压为3.2 kV时的局部放电结果。从图6(a)可以看出,当暂降电压下降至3.2 kV时,在暂降周期的正半周能够检测到局部放电,而负半周则没有发生放电。此时,正半周的最大放电幅值为

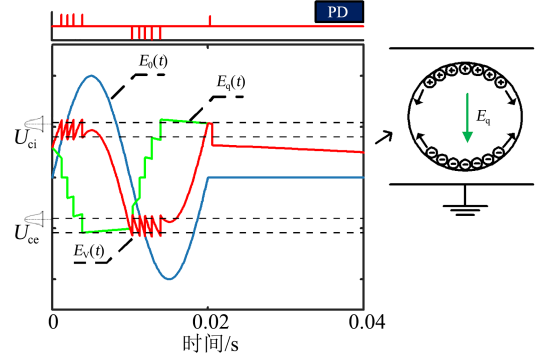
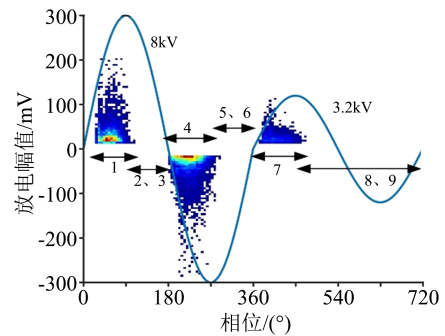
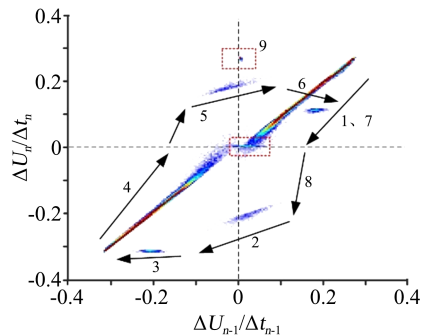


图5 气隙内部各电场分布(VDP=0 kV)

Fig.5 Distribution of electric fields in air gap (VDP=0 kV)



(a)PRPD 谱图



(b)PSA 谱图

图6 电压暂降序列下的局部放电结果(VDP=3.2 kV)

Fig.6 PD results under voltage dip sequence (VDP=3.2 kV)

114.2 mV,每个周期的平均放电次数为11次。随着外施电压的改变,PSA谱图也将表现出不同形式。当外施电压为连续正弦电压时,如图3(b)所示,点簇1、2、3沿45°线与点簇4、5、6对称。而当施加暂降序列电压后,暂降电压导致参数 $\Delta U_n/\Delta t_n$ 减小,因此点簇2与点簇5、点簇3与点簇6不再对称,如图6(b)所示。

当暂降电压为3.2 kV时,气隙内部的电场由外部电场和表面电荷产生的电场共同决定。显然,在电压暂降阶段,外部电场方向与累积在气隙表面上电荷所产生的电场 E_q 方向一致。尽管外施电压低于局部放电起始电压,但叠加后的总电场强度可以诱导局部放电出现。然而随着放电的持续进行,新生成的自由电荷将中和气隙中先前累积的表面电

荷,导致电场 E_q 下降,从而对局部放电形成抑制作用,使得气隙内部无法产生一个由表面电荷形成的反向电场,因此在暂降电压的负半周,其总电场强度要低于正半周,并且没有观察到局部放电脉冲出现。

图7为VDP电压为4.8 kV、6.4 kV时的局部放电测试结果。

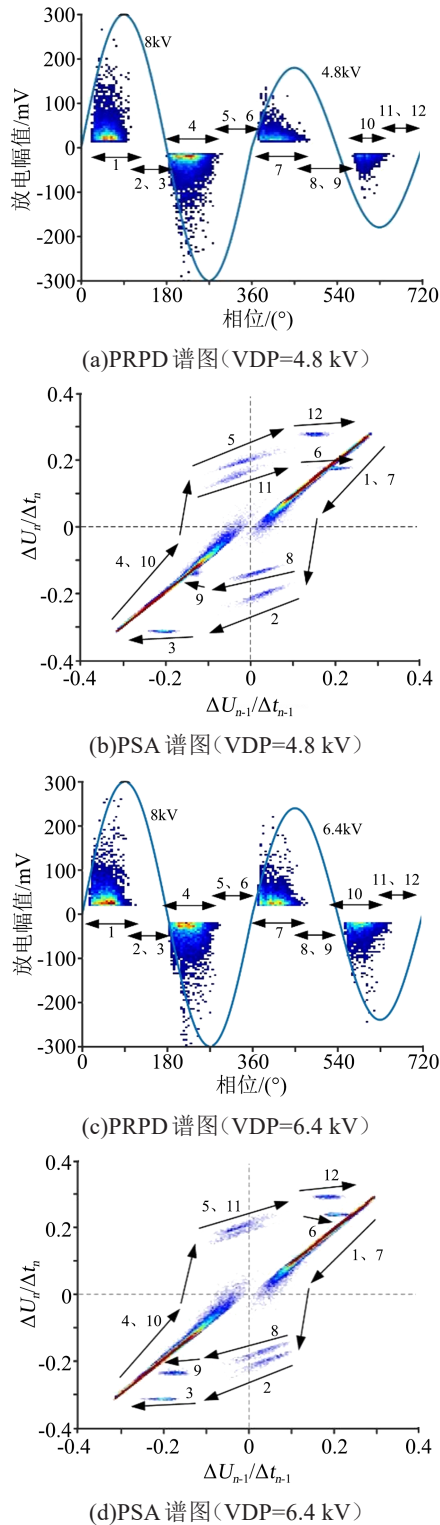


图7 电压暂降序列下的局部放电测试结果
Fig.7 PD test results under voltage dip sequence

从图7(a)和图7(c)可以看出,当暂降电压为4.8 kV和6.4 kV时,局部放电脉冲将在正负半周同时出现,但正负半周的平均放电次数和放电幅值均存在明显的不对称性。当暂降电压为4.8 kV时,正负半周的平均放电次数分别为21.6次和7.7次,最大放电幅值分别为133.9 mV和114.2 mV。当暂降电压为6.4 kV时,虽然在暂降周期中正负半周的放电幅值几乎相等,但平均放电次数不同,且正半周的放电强度要高于负半周。从图7(b)和图7(d)可以看出,对于PSA谱图,由于在原始波形周期和电压暂降周期内均出现了局部放电,谱图呈现出两个电压等级下PSA谱图的叠加。但由于施加电压幅值存在差异,两幅PSA谱图并没有完全重叠在一起,使得点簇的数量增加。

当暂降电压为4.8 kV和6.4 kV时,外施电压已高于局部放电起始电压,因而在暂降周期内,电压正负半周均出现了局部放电,但正半周的放电重复率要高于负半周,这主要是由外施电场和表面电荷产生的电场 E_q 共同作用所导致的。当暂降电压为6.4 kV时,气隙内各电场的典型分布情况如图8所示。从图8可以看出,在暂降电压的正半周,表面电荷形成的电场主要由原始波形周期决定,而在暂降电压的负半周,表面电荷形成的电场主要由暂降周期的正半周决定。显然,由于外施电压较低,暂降周期的局部放电强度要弱于原始波形周期,因而表面电荷形成的电场也相对较弱,使得PRPD谱图表现出不对称性。

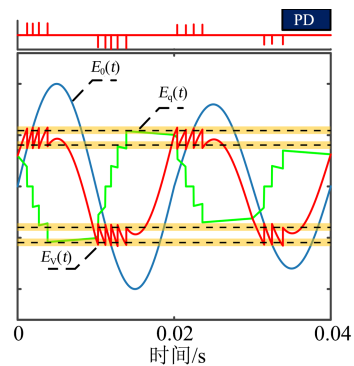


图8 气隙内部各电场分布(VDP=6.4 kV)
Fig. 8 Distribution of electric fields in the air gap
(VDP=6.4 kV)

2.3 电压暂升的影响

当施加电压为暂升序列时,所得局部放电测试结果如图9所示。其中,原始波形周期的电压幅值为5 kV,暂升周期的电压幅值分别为6 kV和7 kV。由于外部施加电压高于局部放电起始电压,因而局部放电模式与暂降电压为4.8 kV和6.4 kV时类似,正负半周都存在局部放电。不同之处在于,暂升周期负半周放电强度高于正半周。当暂升周期电压

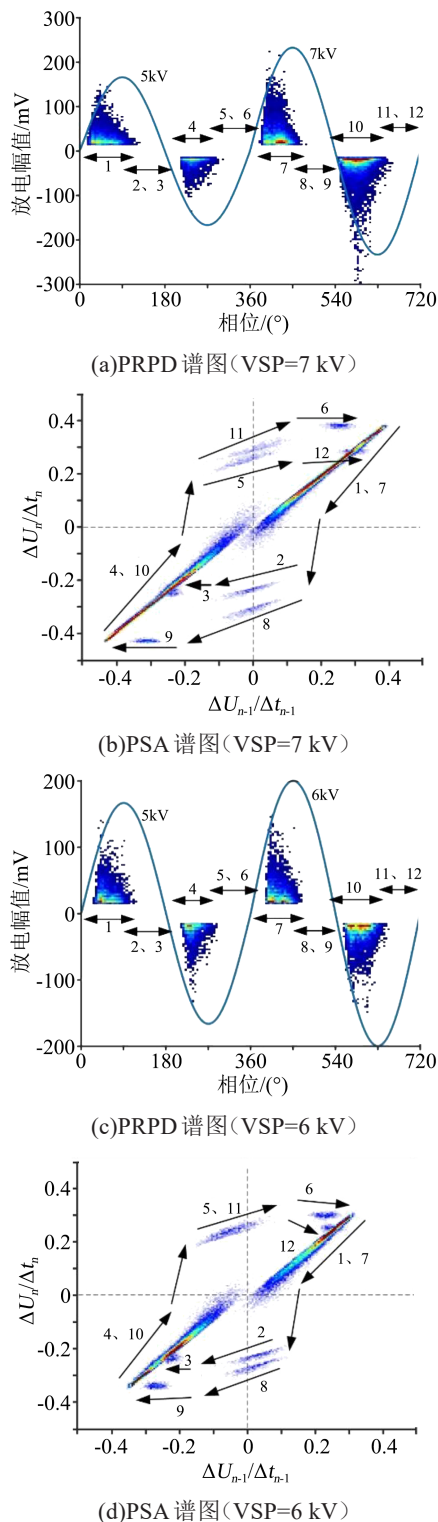


图9 电压暂升序列下的局部放电结果

Fig.9 PD results under voltage swell sequence

为7 kV时,正半周的平均放电次数为38次,而负半周的平均放电次数为46次,正半周最大放电幅值为224 mV,而负半周的最大放电幅值为299 mV,如图9(a)所示。当暂升周期电压为6 kV时,正负半周最大放电幅值相近,但是负半周的平均放电次数高于正半周,如图9(c)所示。从图9(b)和图9(d)可以看

出,对于PSA谱图,其表现为两个不同电压等级下PSA谱图的叠加。由于暂升周期电压幅值的升高,参数 $\Delta U_n/\Delta t_n$ 增大,使得PSA谱图中点簇的落点范围更大。

对于暂升电压周期,其负半周的平均放电次数要高于正半周,产生该现象的原因在于外施电压和表面电荷的共同作用。在暂升电压的正半周,表面电荷形成的电场主要由原始波形周期决定,而在暂升电压的负半周,表面电荷形成的电场主要由暂升周期的正半周决定。随着外施电压幅值的增大,在暂升周期内局部放电强度将明显提高,气隙内部能够累积更多的表面电荷,进而能够在气隙中形成更大的内部电场,使得局部放电更容易发生,因此在暂升周期的负半周放电强度要高于正半周。

3 结论

通过可编程电源产生电压暂降/暂升序列,利用PRPD谱图和PSA谱图分别分析了电压波动对气隙内部局部放电的影响规律,特别关注于电压暂降和电压暂升条件下局部放电的相关特性,主要得到如下结论:

(1)当电压发生波动时,变化的外施电压和气隙内部累积的表面电荷能够显著影响气隙的电场分布,进而导致原本具有对称特征的局部放电谱图表现为非对称性。

(2)对于暂降周期,随着电压幅值的下降,能够观察到3种典型的放电谱图,即正负半周均出现局部放电、仅有正半周出现局部放电、较弱的局部放电分布在整个暂降周期。

(3)对于暂升周期,电压幅值的升高有助于表面电荷形成更强的电场,进而导致暂升周期正半周的放电强度低于负半周。

参考文献:

- [1] LI Chuanyang, SHAHSAVARIAN T, BAFERANI M A, et al. Understanding DC partial discharge: Recent progress, challenges, and outlooks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022,8(3):894-909.
- [2] JIANG Jun, ZHANG Bendong, LI Zhi, et al. Partial discharge features for power electronic transformers under high-frequency pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021,49(2):845-853.
- [3] WANG Yanbo, CHANG Dingge, QIN Shaorui, et al. Separating multi-source partial discharge signals using linear prediction analysis and isolation forest algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,69(6):2734-2742.
- [4] SHAHSAVARIAN T, PAN Yue, ZHANG Zhousheng, et al. A review of knowledge-based defect identification via PRPD patterns

- in high voltage apparatus[J]. IEEE Access,2021,9:77705-77728.
- [5] 王伟,梁聪,祁志强,等.0.1Hz超低频与振荡波电压下热缩和冷缩电缆附件典型缺陷局部放电对比研究[J].绝缘材料,2022,55(10):93-98.
- [6] NIASAR M G, WANG Xiaolei, KIIZA R C. Review of partial discharge activity considering very-low frequency and damped applied voltage[J]. Energies,2021,14(2):440.
- [7] MORSALIN S, PHUNG B T, CAVALLINI A. Measurement and modeling of partial discharge arising from different cavity geometries at very low frequency[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(4):1110-1118.
- [8] 吴经锋,王文森,丁彬,等.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[J].绝缘材料,2023,56(1):34-44.
- [9] FLORKOWSKI M, KUNIEWSKI M, ZYDRON P. Measurements and analysis of partial discharges at HVDC voltage with AC components[J]. Energies,2022,15(7):2510.
- [10] GUO Zhicheng, HUANG A Q, HEBNER R E, et al. Characterization of partial discharges in high-frequency transformer under PWM pulses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(9):11199-11208.
- [11] LI Xudong, LI Jian, JIANG Tianyan, et al. Analysis of creeping discharges on oil-impregnated pressboard under combined AC and DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(6):2380-2388.
- [12] HE Cong, ZHANG Liang, ZHANG Xuanrui, et al. Study on the influence of switching impulse superposition phase on AC partial discharge of epoxy surface in SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1596-1598.
- [13] FLORKOWSKI M. Influence of harmonics on partial discharge measurements and interpretation of phase-resolved patterns[J]. Measurement,2022,196:111198.
- [14] MA Li, TIAN Dingrong, LIU Taofeng, et al. An evaluation method for bus and grid structure based on voltage sags/swells using voltage ellipse parameters[J]. IEEE Access,2021,9:101959-101971.
- [15] MITRA R, GOSWAMI A K, TIWARI P K. Optimal selection of voltage sag mitigating devices for micro-level customer in distribution system[J]. IET Renewable Power Generation,2018,13(1):191-200.
- [16] 张莎,宋建成,温敏敏,等.干式变压器绝缘气隙放电特性研究[J].绝缘材料,2018,51(9):41-47.
- [17] CHENG Pan, WU Kai, GEORGE C, et al. Understanding partial discharge behavior from the memory effect induced by residual charges: A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(6):1951-1965.
- [18] PATSCH R, BERTON F. Pulse sequence analysis - A diagnostic tool based on the physics behind partial discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2002,35(1):25-32.
- [19] 蒲路,倪辉,赵学风,等.基于脉冲序列分析表征XLPE电缆附件中的局部放电特性研究[J].绝缘材料,2016,49(12):45-51.
- [20] WU Kai, CHENG Pan, MENG Yongpeng, et al. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(2):612-619.
- [21] CHENG Pan, TANG Ju, WU Kai. The effect of PD process on the accumulation of surface charges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2016,44(11):2545-2552.
- [22] FLORKOWSKI M, FLORKOWSKA B, ZYDRON P. Chopped partial discharge sequence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(6):3451-3458.
- [23] FLORKOWSKI M, FLORKOWSKA B, ZYDRON P. Partial discharge echo obtained by chopped sequence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(3):1294-1302.
- [24] MACHADO G D O, GOMES L C, SILVEIRA A W F V D, et al. Impacts of harmonic voltage distortions on the dynamic behavior and the PRPD patterns of partial discharges in an air cavity inside a solid dielectric material[J]. Energies,2022,15(7):2650.

收稿日期:2023-01-19;修回日期:2023-03-23。

作者简介:韩锦春(1998-),男(汉族),山西晋中人,硕士生,研究方向为电缆及其附件中的局部放电;通信作者:李禹锋(1990-),男(汉族),吉林四平人,讲师,博士,主要从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作。