

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.014

交、直流电压下 126 kV GIS 支柱绝缘子内部气泡缺陷局部放电特性

刘卫东¹, 许 渊², 尹 泽³, 赵 科³, 冯 瑞¹, 杜 非²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 环氧绝缘件作为气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的重要组成部分,在浇注过程中可能产生气泡、裂纹等内部缺陷,影响设备运行可靠性。文中以实际存在内部气泡缺陷的 126 kV 支柱绝缘子为对象,开展交、直流电压下局部放电试验研究,对比了不同电压下绝缘内部气泡缺陷的局部放电特征差异。结果表明,该缺陷在交流和直流电压下的局部放电特性差异显著。交流电压下,放电信号频发,且在工频正负半周期内对称分布;最大放电量超过 80 pC,脉冲电流信号重复率超过 500 次/s;特高频信号幅值最大 350 mV 左右,信号重复率维持在 80~100 次/s 之间,远低于脉冲电流信号重复率。直流电压下,放电信号极为偶发,1 h 内仅几次至几十次,甚至数小时内无任何放电信号。脉冲电流信号主要出现在电压上升期间,电压稳定后仅有少量低幅值信号;特高频信号频次远低于脉冲电流,且仅在电压上升过程中出现 1~2 次放电信号。直流电压下,放电量最大超过 20 pC,特高频信号幅值最大约 600 mV。文中研究结果可为评估交、直流电压下 GIS 绝缘内部缺陷危险程度提供有效支撑。

关键词: 气体绝缘开关设备;局部放电;气泡;交流;直流

Partial Discharge Characteristics of Void Defect Inside A 126 kV GIS Post Insulator Under AC and DC Voltages

LIU Weidong¹, XU Yuan², YIN Ze³, ZHAO Ke³, FENG Rui¹, DU Fei²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Epoxy insulation part is an important component of gas insulated switchgear (GIS), and such internal defects as voids and cracks may be generated during the casting process, which can affect the operation reliability of equipment. In this paper the 126 kV post insulator with void defect is taken as the object, the partial discharge (PD) test at AC and DC voltages is performed, and the differences in PD characteristics of internal void defect of the insulator under different voltages are compared. The results indicate that PD characteristics of the same defect exhibit significant differences under AC and DC voltages. In case of AC voltage, the discharge signals occur frequently and are symmetrically distributed within the positive and negative half cycles of the power voltage. The maximum discharge amplitude exceeds 80 pC and the repetition rate of pulse current signals exceeds 500 times/s. The maximum amplitude of ultra-high frequency (UHF) signals is about 350 mV, and the repetition rate of UHF signal is maintained between 80~100 times/s, far lower than that of pulse current signal. In case of DC voltage, discharge signals are extremely sporadic, with only a few to a dozen discharges within 1 h, and even no discharge for several hours. Pulse current signals primarily appear during the voltage rise process, and only a few low-amplitude signals are present after the voltage stabilizes. The repetition rate of UHF signals is much lower than that of the pulse cur-

收稿日期:2026-02-15; 修回日期:2026-04-22

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5200-202455087A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5200-202455087A-1-1-ZN).

rent signals, and only 1~2 UHF signals appear during the voltage rise process. In case of DC voltage, the maximum apparent charge can exceed 20 pC, and the UHF signal amplitude is approximately 600 mV. The research results in this paper can provide effective support for assessing the hazard level of internal insulation defect in GIS under AC and DC voltages.

Key words: gas-insulated switchgear(GIS); partial discharge(PD); void; alternating current(AC); direct current(DC)

0 引言

气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)和气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)由于其优良特性,被广泛应用于电力系统中^[1-2]。直流输电具有传输距离远、损耗低等特点,是未来实现远海风电和西南水电送出的关键技术。随着新能源大规模开发,直流 GIL 和 GIS 设备被逐渐开发和应用^[3]。目前,±320 kV 直流 GIS 已实现工程应用,±550 kV 直流 GIS/GIL 也已研发成功^[4-7]。

环氧绝缘子作为 GIS/GIL 设备的重要组成部分,起电气绝缘和机械支撑作用。绝缘件状态直接关系到 GIS/GIL 设备运行可靠性。在浇注、运行等过程中,绝缘件内部可能产生气泡、缝隙、裂纹等缺陷,导致运行过程中的局部放电甚至击穿炸裂^[8-13]。

局部放电检测是发现和预警设备内部缺陷的重要手段^[14]。交流 GIS/GIL 设备工程应用时间长,局部放电相关研究也相对成熟,在典型缺陷特性^[15-16]、传感检测技术^[17-19]、诊断分析方法^[20-21]和检测监测装置^[22]等各方面均进行了大量研究。直流电压下,电压形式、电场分布等均与交流电压下不同,导致局部放电特性差异^[23]。

随着直流 GIS/GIL 的发展,直流下的缺陷特性也得到了关注^[24]。通过试验和仿真,获得了直流电压下 GIS/GIL 内自由金属微粒的起跳电压^[25]、运动特性^[26-27]、飞行图谱^[28-29]等特征,并分析了微粒尺寸、材质、形状等因素的影响^[30-31]。Saliha A 和 Luo X 等人则主要研究了金属尖端的局部放电特性,并得到了直流电压下的局部放电图谱^[32-33]。然而,现有研究主要重点关注直流电压下的自由微粒运动、放电特性以及金属尖端放电特性。这些都属于直流电压下相对容易激发局部放电和容易检测的缺陷类型。绝缘件内部缺陷属于 GIS/GIL 设备内常见缺陷,但直流电压下其局部放电特性的相关研究鲜有报道。交、直流电压下绝缘内部缺陷局部放电特征差异有待深入分析,以评估现有交流局放检测方法在直流下的适用性。

文中以 126 kV 支柱绝缘子为对象,搭建交流和直流真型试验平台。开展交流和直流电压下局部放电试验,研究绝缘件内部气泡缺陷局部放电特

性,获得了不同电压形式下的局部放电信号特征区别,并剖析了交、直流电压下放电过程及其差异。文中研究结果有助于深入认识交直流电压下绝缘内部缺陷局部放电特性,提高缺陷检测评估有效性。

1 试验平台及方法

1.1 交流试验系统

为研究交流电压下绝缘内部气泡局部放电特性,建立 550 kV 铠装交流试验系统见图 1。该系统包括 550 kV/275 kVA 无局放铠装交流试验变压器、保护阻抗、耦合电容、试验单元及局部放电测量系统。试验单元由一段 2 m 长 500 kV GIS 管母组成,内设置有被试支柱绝缘子。

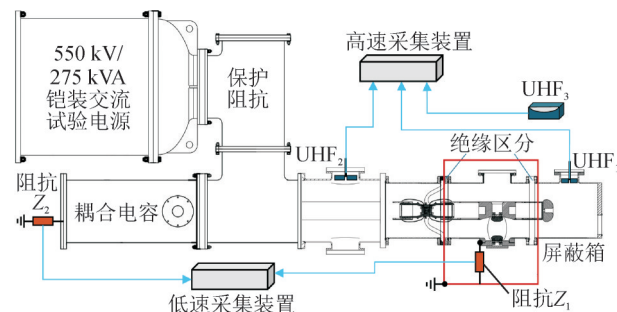


图1 550 kV 铠装交流试验平台

Fig. 1 550 kV AC test platform

1.2 直流试验系统

±400 kV 铠装直流试验平台见图 2。

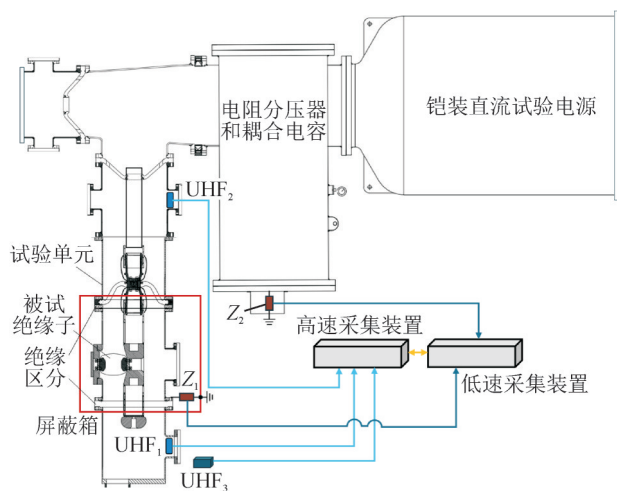


图2 ±400 kV 铠装直流试验平台

Fig. 2 ±400 kV DC test platform

如图 2 所示,直流试验平台主要包括直流试验电源、电阻分压器、耦合电容、试验单元及局部放电

测量系统。试验电源采用 450 kV/10 mA 铠装式直流试验电源,可自动切换正负极性,最高试验电压 ± 450 kV。直流系统中试验单元、局放传感单元均与交流试验系统一致。

1.3 局部放电测量系统

局部放电测量系统包括脉冲电流测量和特高频测量两部分。交、直流试验平台中局部放电传感单元为同一套系统,各传感器布置也相同。

1) 脉冲电流测量。如图 1、2 所示,在被试绝缘子对应筒体两侧增加绝缘区分,使其与试验平台其余筒体绝缘隔离。被试绝缘子筒体通过检测阻抗 Z_1 接地连接至接地屏蔽箱。同时,在耦合电容接地线上串入检测阻抗 Z_2 。采用上述设置,可实现局部放电脉冲电流互参考测量^[34],提高局放测量灵敏度和抗干扰能力。

参照标准 IEC 60270:2025^[35]对局部放电脉冲电流测量系统进行标定,见图 3。

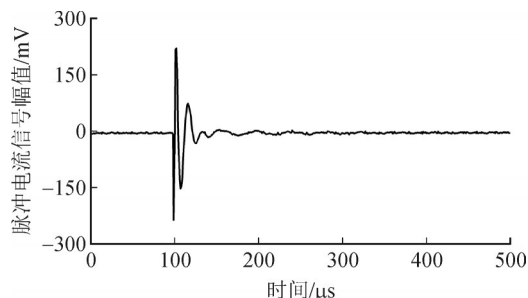


图 3 注入放电量为 5 pC 脉冲时检测结果

Fig. 3 Detection result when injecting a pulse of 5 pC

如图 3 所示,注入放电量为 5 pC 校准脉冲时,测量信号幅值约 240 mV,而系统信号底噪约 15 mV。由此计算,该系统最小可测局部放电量小于 0.5 pC。

2) 局放特高频测量。如图 1、2 所示,共布置有 3 个特高频传感器(UHF₁-UHF₃)。其中 UHF₁、UHF₂ 内置特高频传感器,UHF₃ 放置在外空间作为背景传感器。通过比较不同传感器检测到的信号幅值和时延,可有效地识别外部干扰和内部局部放电,提高局部放电测量的可靠性^[36]。

内置特高频传感器采用双极性天线,在 0.3~1.5 GHz 范围内,平均等效高度大于 11 mm。特高频传感器外接放大器,带宽 50~1 500 MHz,增益为 50 dB。

分别采用高速和低速采集单元同步采集特高频和脉冲电流信号。高速采集单元采样率 2 GS/s,带宽 1 GHz;低速采集单元采样率 5 MS/s,带宽 1 MHz。两个采集单元之间可通过外触发信号进行同步,实现特高频和脉冲电流信号同步采集。

1.4 被试品缺陷情况

为真实反应实际运行过程中绝缘子缺陷的局部放电特性,文中选择现场在运 GIS 中发现的 7 支

异常绝缘件作为被试品,7 支绝缘子内部缺陷、尺寸分别见图 4、表 1。如图 4 所示,X 射线数字成像结果显示,7 支 126 kV 支柱绝缘子低压侧嵌件附近均存在气泡缺陷。缺陷均位于地电极金属嵌件与环氧树脂界面,形态为半椭球形。

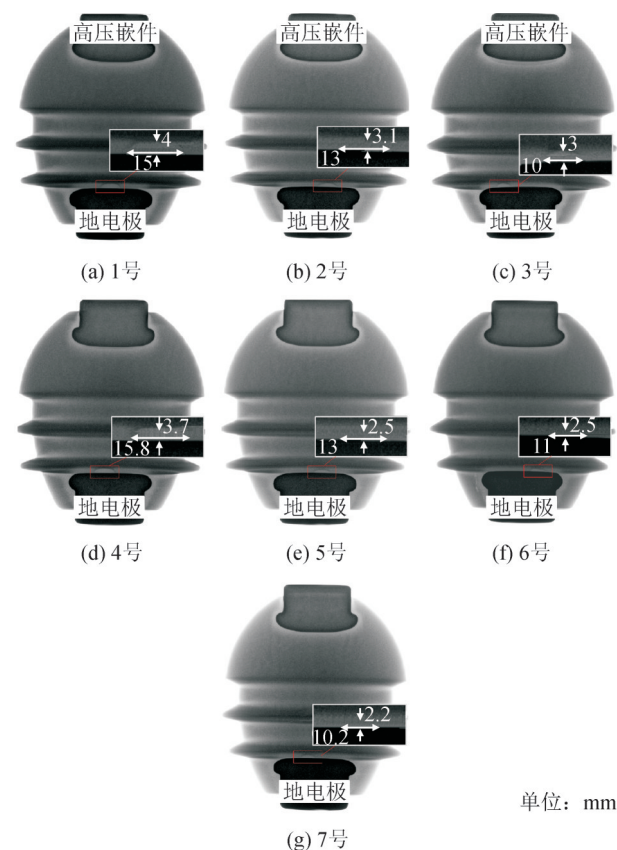


图 4 126 kV 支柱绝缘子内部缺陷 X 射线成像结果

Fig. 4 X-ray image of internal defect of the 126 kV post insulator

表 1 支柱绝缘子内部气泡缺陷尺寸

Table 1 Defect size of the void inside the post insulators

试品编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
长轴/mm	15.0	13.0	10.0	15.8	13.0	11.0	10.2
短轴/mm	4.0	3.1	3.0	3.7	2.5	2.5	2.2

1.5 试验加压流程

交流电压下,采用阶梯加压法。以 5 kV 为步长,每个电压停留 5 min,逐步升高电压,直至出现稳定的局部放电信号。本试验中,电压升高至 10 kV (文中交流电压均指有效值)时开始出现局部放电信号,随后分别在 15、20 kV 下保持 10 min,进行局部放电特性测量。

直流电压下,分别进行正极性、负极性和正负极性交替条件下的局部放电试验。单一极性直流加压流程为,以 50 kV 为步长,每个电压下停留 20 min,升高电压至 200 kV 后维持电压 24 h。正负极性直流交替加压流程见图 5。直接升高电压至 200 kV,并维持 2 h,然后降低电压转换极性,正、负极性交替循环 2 次。

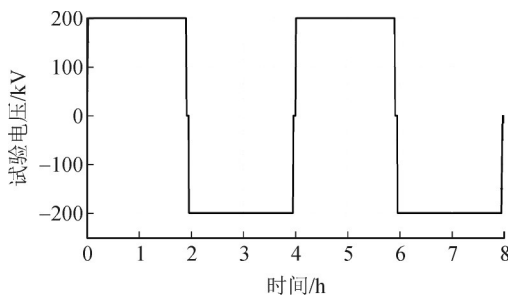


图5 正负极性直流交替加压流程

Fig. 5 Application of alternating positive and negative polarity DC voltage

试验过程中,全程进行局部放电脉冲电流和特高频信号监测。脉冲电流触发阈值设置为0.5 pC,特高频触发阈值设置为40 mV。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果概况

对如图4所示的7支绝缘子均按照上述加压流程开展试验。结果表明,虽然不同缺陷绝缘子在交流电压下的局部放电起始电压(见表2)、放电频次和幅值等略有差异,但其局放信号图谱特征基本相似(见图6);且不同缺陷在交流和直流电压下的局部放电差异性也是相似的。因此,后文仅以1号缺陷绝缘子的试验结果为例,对交直流电压下绝缘内部缺陷局放特性的差异性进行说明。

表2 不同支柱绝缘子交流局部放电起始电压

Table 2 AC PD inception voltage of different insulators

试品编号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号
局放起始电压/kV	10	14	15	10	18	20	23

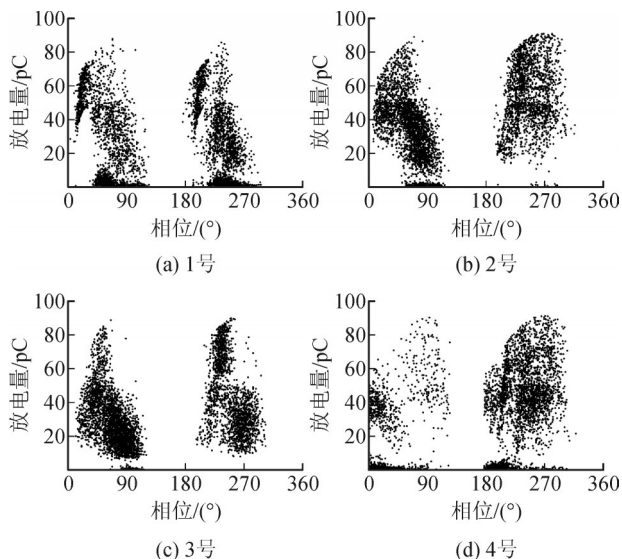


图6 20 kV下不同支柱绝缘子局部放电脉冲电流信号图谱

Fig. 6 PD patterns of pulse current signals of different post insulators under 20 kV

2.2 绝缘内部气泡缺陷交流电压下局部放电特征

交流电压下,电压升高至10 kV左右开始出现稳定的局部放电信号,能检测到明显脉冲电流和特高频信号。

随后,电压分别升高至15、20 kV,放电有所增强,最大放电量超过80 pC,脉冲电流信号重复率变化较小,均超过500次/s。不同电压下脉冲电流信号PRPD图谱见图7。

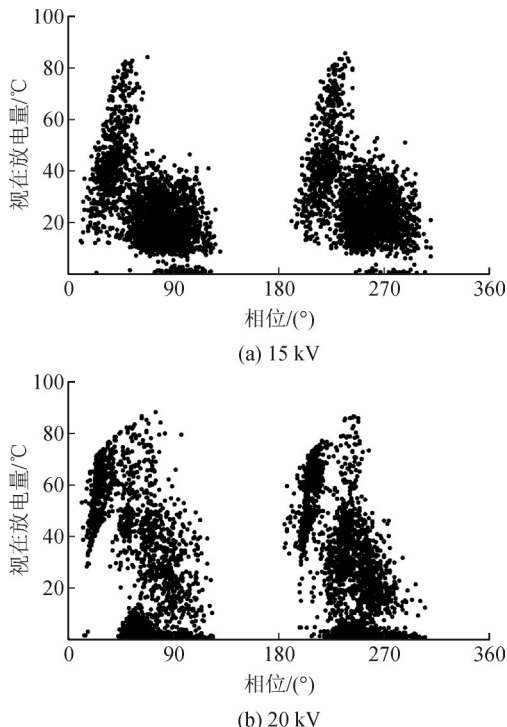


图7 不同电压下脉冲电流信号PRPD图谱

Fig. 7 PRPD patterns of pulse current signals at different voltages

由图7(a)可见,15 kV电压下,脉冲电流信号在工频正负半周期内基本对称分布,信号相位分布范围较宽,集中在10°~130°和100°~310°之间。图7(a)中PRPD图谱还显示,脉冲电流信号存在明显的3簇信号,分别为:相位30°、210°附近、幅值20~80 pC的第1簇信号;相位90°、270°附近、幅值10~40 pC的第2簇信号;以及相位90°、270°附近、幅值小于5 pC的第3簇信号。由图7(b)可见,20 kV电压下,脉冲电流信号在工频正负半周期内依然基本对称分布,整体信号相位分布范围变化不大。同样地,PRPD图谱中脉冲电流信号也存在明显的3簇信号,但各簇信号幅值均有所增加,第1簇信号幅值集中在20~80 pC间,第2簇信号幅值范围更广(10~60 pC),第3簇信号最大幅值增加至10 pC左右。此外,各簇信号相位分布范围也略有变化,第1簇信号的相位分布

范围向 0° 、 180° 方向压缩,第3簇信号相位分布范围变宽,覆盖 $45^\circ\sim 135^\circ$ 和 $225^\circ\sim 315^\circ$ 范围。

15、20 kV 下特高频幅值和重复率相差不大,幅值最大 350 mV 左右,信号重复率维持在 80~100 次/s 之间,远低于脉冲电流信号重复率。不同电压下特高频信号 PRPD 图谱见图 8。

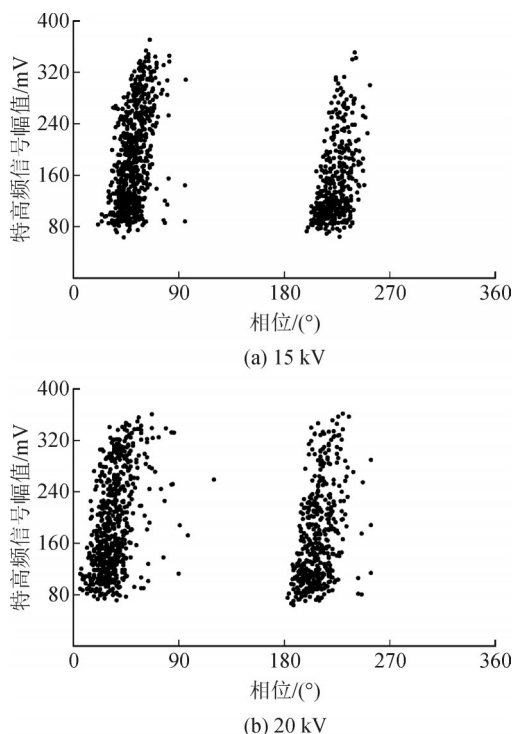


图 8 不同电压下特高频信号 PRPD 图谱

Fig. 8 PRPD patterns of UHF signals at different voltages

由图 8(a)可见,15 kV 电压下,特高频信号在工频正负半周期内分布略不对称,正半周期内信号次数更多、幅值略高;放电信号分布集中,相位范围 $30^\circ\sim 70^\circ$ 和 $200^\circ\sim 240^\circ$ 。与脉冲电流信号不同,特高频信号 PRPD 图谱中仅存在一簇信号,相位分布范围对应脉冲电流信号中的第一簇信号。图 8(b)可见,20 kV 电压下,特高频信号分布形态与 15 kV 电压下基本相似,但信号相位分布范围略有差异。20 kV 电压下,特高频信号相位分布范围向 0° 、 180° 方向偏移,主要集中在 $10^\circ\sim 50^\circ$ 和 $180^\circ\sim 230^\circ$ 之间。

2.3 绝缘内部气泡缺陷直流电压下局部放电特征

直流电压下,绝缘内部气泡缺陷的局部放电信号极为稀少。文中试验中,脉冲电流法和特高频法均可以通过多个通道信号的幅值比较,实现局部放电和干扰识别,因此对单个放电脉冲也能可靠有效地识别,确保了对直流下偶发信号的准确检测。

不同直流电压下局部放电脉冲电流信号变化趋势见图 9。图 9 中可见,直流电压下,局部放电信号极为稀少,正极性直流下 24 h 内放电次数 51 次,

负极性直流下 24 h 内放电次数 28 次,正负极性直流交替下 8 h 内放电次数 90 次。如图 9(a)、(b)所示,单极性直流电压下,脉冲电流信号主要出现在电压升高过程中,且大幅值信号均出现在该过程中;电压稳定后,仅出现较少、幅值较小的放电信号(放电量小于 2 pC)。如图 9(c)所示,正负极性直流交替时,放电信号同样集中出现在电压上升过程中,电压稳定期间仅有少量小幅值信号。此外,从图 8 中还可可见,相比负极性直流电压,在恒定正极性直流电压下,微小放电的次数更多。

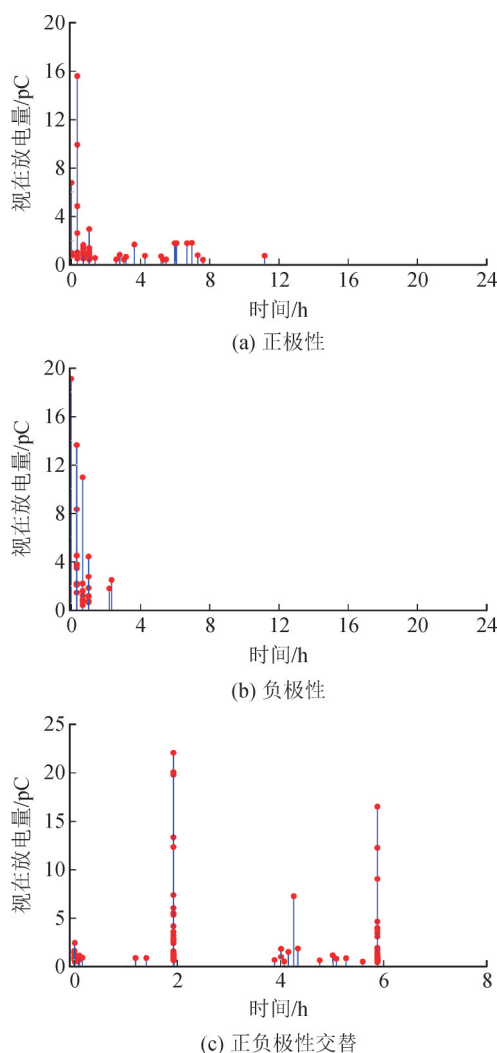


图 9 不同直流电压下局部放电脉冲电流信号

Fig. 9 PD pulse current signals under different DC voltages

不同极性直流电压下局部放电特高频信号见图 10。由图 10 可见,局部放电特高频信号仅出现在电压上升期间,特高频信号次数明显低于脉冲电流信号。正极性直流电压下,分别在升压至 50 kV 和 200 kV 过程中各出现 2 次特高频信号。负极性直流电压下,仅在升压至 50 kV 过程中出现 1 次特高频信

号。正负极性直流电压交替下,在第一次升压过程中出现2次特高频信号,随后在每次极性转换后的升压过程中各出现1次特高频信号。

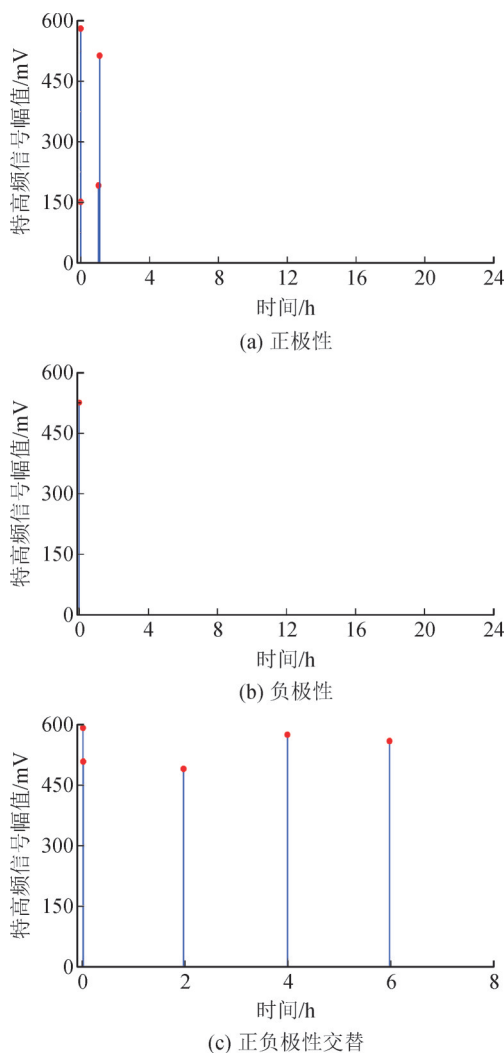


图10 不同直流电压下局部放电特高频信号

Fig. 10 PD UHF signals under different DC voltages

整体上,特高频信号极为偶发,但幅值较大,约500~600 mV,仅在连续出现2次特高频信号时,可能出现较小幅值的信号,约100~200 mV。

3 讨论

3.1 交直流电压下绝缘内部气泡缺陷局放特征差异

从上述结果可以看到,交流和直流电压下,绝缘内部气泡缺陷的局部放电特性差异显著。

交流电压下,电压升高至10 kV左右即开始出现明显且稳定的局部放电信号;直流电压下,电压升高至接近50 kV时才出现零星偶发的放电信号,且放电信号多出现在电压上升过程中。交、直流电压下,局部放电起始电压相差约4~5倍。这主要由交、直流电压下,气泡缺陷与环氧树脂内电场分布不同引起。不同介质中电场分布见图11。

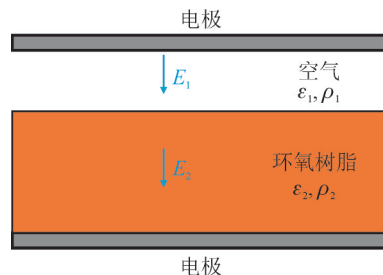


图11 不同介质中电场分布示意

Fig. 11 Illustration of electric field distribution in different media

如图11所示,不同介质中,交流电场按照介电常数反比分布,即 $E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1$ 。气泡缺陷为绝缘子浇筑过程产生,其内部为低气压空气,相对介电常数小于1,而环氧树脂相对介电常数一般为3~5,因此气泡内交流电场强于环氧树脂内。直流电场按介质电阻率分布,即 $E_1/E_2 = \rho_1/\rho_2$ 。空气体电阻率为 $10^{14} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$,具体取决于气体压力、湿度等;环氧树脂体电阻率一般为 $10^{15} \sim 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$,具体由温度、填料等决定。考虑到浇筑过程中形成的气泡缺陷内气压相对低,电阻率比大气压下更高,可认为气泡内气体体电阻率略低于环氧树脂。同等外施电压下,气泡内直流电场强度远低于交流电场,因此直流下发生局部放电的起始电压更高。

此外,直流电压下电压上升过程中,电场分布由容性分布向阻性分布转换,气泡内电场比稳态直流下高,因此放电主要出现在电压上升期间。直流电压下气泡—环氧界面易积聚电荷,产生与外施电场相反的电场;在电压上升期间,气泡内电荷电场与外施电场的平衡被破坏,放电易发生。

此外,还可以看到,交流电压下,局部放电频次高,平均每个工频周期内,脉冲电流信号10次左右,特高频信号2次左右。然而,直流电压下,放电极偶发,1 h内放电次数仅几次至几十次,甚至数h内无任何放电,且放电主要出现在电压上升期间。这主要与交、直流电压下缺陷内部电荷积聚行为差异有关。交流电压下气泡内放电过程见图12。

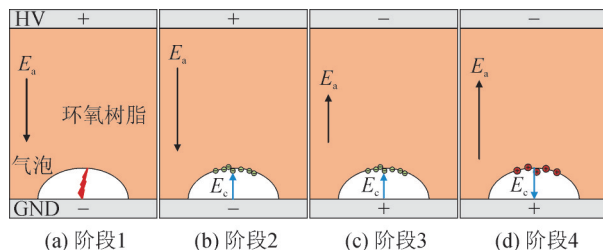


图12 交流电压下气泡内放电过程示意

Fig. 12 Schematic of the discharge process inside a void under AC voltage

在工频正半周期, 电压升高, 缺陷内部电场强度超过临界场强, 气泡内发生局部放电, 见图 12(a); 放电产生的正负带电粒子向缺陷两侧移动, 负粒子运动至缺陷上侧环氧树脂表面并累积, 产生与外施电场 E_a 方向相反的空间电荷电场 E_c , 缺陷内部电场被削弱, 放电停止, 直到电压上升至更高或者极性反转, 见图 12(b); 工频电压极性反转后, 空间电荷电场与外施电场极性相同, 加强缺陷内部电场, 使得局部放电在较低电压下发生, 并中和缺陷表面积累的电荷。随后, 当电压继续上升时, 再次发生放电, 缺陷与环氧界面将积累正极性电荷, 再次抑制缺陷内电场, 见图 12(c); 然而, 由于交流电压下, 外部电场交变, 空间电荷电场对外施电场的抑制是暂时的和周期性的, 放电始终存在, 见图 12(d)。

正极性直流电压下气泡内放电过程见图 13。如图 13(a)所示, 在正极性直流电压下, 当电压升高时缺陷内部电场强度超过临界场强时, 气泡内发生局部放电。如图 13(b)所示, 放电产生的正负带电粒子向缺陷两侧移动, 负粒子运动至缺陷上侧环氧树脂表面并累积, 产生与 E_a 方向相反的电荷电场 E_c , 缺陷内部电场被削弱, 放电停止。由于外施电场始终保持单一方向, 因此放电将在较长时间内被抑制, 直到电压进一步升高、累积电荷消散或者电压极性反转。因此, 直流电压下局部放电信号多出现在电压上升期间, 在电压稳定后局部放电信号较少、幅值也较小, 正负极性转换后的放电信号幅值通常较大。

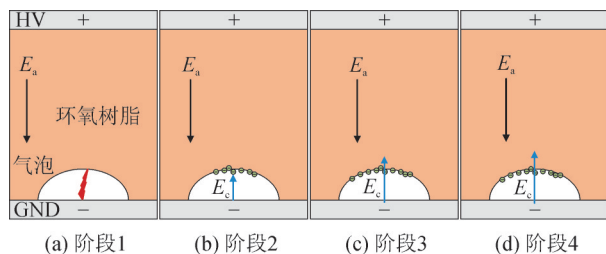


图 13 正极性直流电压下气泡内放电过程示意

Fig. 13 Schematic of the discharge process inside a void under positive DC voltage

3.2 交流局放检测诊断方法对直流下气泡缺陷的适用性

交直流电压下, 文中试验中的局部放电均由绝缘件气泡内部局部击穿产生。采用检测带宽为 0.05~1.5 GHz 的宽频放大器进行信号采集, 通过快速傅里叶变换获得交直流电压下局部放电信号频谱见图 14。

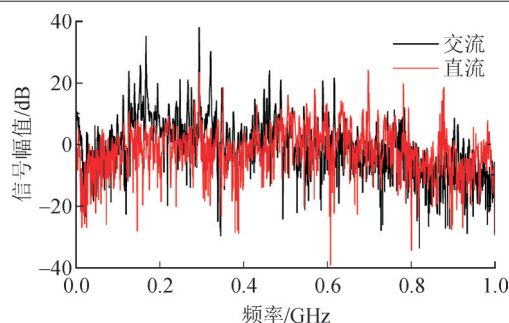


图 14 交直流电压下局部放电特高频信号频谱对比

Fig. 14 Spectrum of PD UHF signals under AC and DC voltages

由图 14 可见, 交流和直流电压下, 局部放电特高频信号频谱分布整体相似, 主要分布在 100~800 MHz 之间。交流电压下低频分量相对更高, 直流下高频分量占比略多。这主要是直流下局部放电起始电压更高, 放电击穿更剧烈、更陡, 激发特高频信号更大。交直流电压下局部放电信号频谱分布相似, 因此用于交流 GIS/GIL 设备局部放电检测的特高频传感系统设计对直流下绝缘内部缺陷的局部放电检测依然有效。

然而, 从上述试验结果可以看到, 该绝缘内部气泡缺陷在交、直流电压下表现出的局部放电统计特性差异显著。现有交流 GIS/GIL 设备局部放电在线监测大多采用定时轮采策略, 即每隔固定的时间间隔采样一次(例如, 间隔 3 min 持续采样 1 s)。直流下固体绝缘内部缺陷局部放电表现为强偶发性、随机性, 采用传统交流局放监测策略可能造成该偶发局部放电信号的遗漏和丢失。此外, 现行的交流设备局部放电诊断多基于局部放电信号幅值和频次阈值、趋势等分析, 对直流电压下绝缘内部气泡缺陷, 交流诊断判据并不适用、有效性不足。

此外, 由于绝缘内部缺陷在直流下的局放信号偶发, 不利于检测和诊断, 对于直流绝缘件, 可在出厂、交接等环节试验采用施加交流电压的手段提高缺陷(尤其是绝缘内部缺陷)检出效果。

4 结论

文中以实际 126 kV 缺陷支柱绝缘子为对象, 建立交、直流真型试验平台, 研究了交流和直流电压下绝缘内部气泡缺陷局部放电特性, 并分析了不同电压下放电过程及其差异, 主要结论如下:

1) 交流电压下, 工频正负半周期内放电信号对称分布; 最大放电量超过 80 pC, 脉冲电流信号重复率超过 500 次/s; 特高频信号幅值最大 350 mV 左右, 信号重复率维持在 80~100 次/s 之间, 低于脉冲电流

信号重复率。

2)直流电压下,放电表现出强偶发性;脉冲电流信号主要出现在电压上升期间,电压稳定后仅有少量低幅值信号,放电量最大超过20 pC;特高频信号仅出现在电压上升过程中,幅值最大约600 mV,频次远低于脉冲电流信号。

3)相比交流电压,直流电压下绝缘内部气泡缺陷的局部放电起始电压更高、放电频次更低。直流电压下,绝缘件内部气泡缺陷1 h内放电次数仅几次至几十次,甚至数小时内无任何放电。现有交流GIS/GIL局部放电监测定时轮采方法对直流电压下绝缘内部缺陷检测有效性低,会引起信号丢失和遗漏。

文中研究了实际绝缘内部气泡缺陷的局部放电特性,但气泡尺寸、位置、形态等因素对交直流电压下局部放电特性及其差异性的影响规律尚待研究。GIS设备内常见的其余缺陷(如绝缘表面异物、金属尖端、自由微粒、悬浮电位等)在交流和直流电压下的局部放电特性差异也需进一步研究。

参考文献:

- [1] Riechert U, Halaus W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2012, 22(1): 60-82.
- [2] 南振乐, 李振军, 刘朋飞. 复杂地形条件下的GIL工程设计[J]. *高压电器*, 2016, 52(6): 193-198.
Nan Zhenle, Li Zhenjun, Liu Pengfei. Engineering design of GIL used at complex terrain[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(6): 193-198.
- [3] Li Chuanyang, Zhang Changhong, Lyu Jinzhuang, et al. China's 10-year progress in DC gas-insulated equipment: from basic research to industry perspective[J]. *iEnergy*, 2022, 1(4): 400-433.
- [4] Hallas M, Neumann C, Hinrichsen V, et al. Commissioning and service experience with a ± 550 kV DC GIL conducted in frame of a CIGRE prototype installation test[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(4): 2843-2853.
- [5] 申萌, 王博, 王子瑜, 等. ± 550 kV直流GIS长期带电试验研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(5): 1-11.
Shen Meng, Wang Bo, Wang Ziyu, et al. Analysis on long term live test of ± 550 kV DC GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(5): 1-11.
- [6] 何方, 张琦立, 魏书荣, 等. 考虑并网灵活性的大规模海上风电场集群接入系统规划研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 33-40.
He Fang, Zhang Qili, Wei Shurong, et al. Planning of large-scale offshore wind farm cluster access system considering grid-connected flexibility[J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 33-40.
- [7] 王亮, 刘亚南, 柳强, 等. 基于自启动系统的海上风电并网技术[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(2): 134-140.
Wang Liang, Liu Yanan, Liu Qiang, et al. Grid-connected technology of offshore wind power based on self-starting system[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(2): 134-140.
- [8] 吴德贯, 彭翔, 李红元, 等. 一起500 kV GIL绝缘子炸裂故障分析[J]. *电瓷避雷器*, 2016(1): 40-43.
Wu Deguan, Peng Xiang, Li Hongyuan, et al. Analysis of a 500 kV GIL insulator burst fault[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2016(1): 40-43.
- [9] 杜伯学, 姚航, 梁虎成, 等. 时变温差工况下直流GIL/GIS盆式绝缘子动态电场畸变抑制[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(9): 2851-2859.
Du Boxue, Yao Hang, Liang Hucheng, et al. Electric field relaxation of basin spacer under variable temperature gradient in DC GIL/GIS[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(9): 2851-2859.
- [10] 陈圣, 徐博文, 庚振新, 等. 基于几何形状及表面介电分布的GIL三支柱绝缘子优化设计[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(12): 27-34.
Chen Sheng, Xu Bowen, Geng Zhenxin, et al. Optimization design of GIL three-pillar insulators based on geometric shape and surface dielectric distribution[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(12): 27-34.
- [11] 李玄, 尹奕淳, 师伟, 等. 三支柱绝缘子微缺陷超声临界纵波探测方法与应用[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(21): 6905-6921.
Li Xuan, Yin Yichun, Shi Wei, et al. Ultrasonic critical longitudinal wave detection method and application for microdefects in tri-post insulators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(21): 6905-6921.
- [12] 张秋敏, 马思维, 孟然. 改进YOLOv5s的绝缘子缺陷检测研究[J]. *电子设计工程*, 2025, 33(10): 181-185.
Zhang Qiumin, Ma Siwei, Meng Ran. Research on improving YOLOv5s for insulator defect detection[J]. *Electronic Design Engineering*, 2025, 33(10): 181-185.
- [13] 张滢滢, 郝艳捧, 米鸿儒, 等. GIS绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展[J/OL]. *高电压技术*, 1-16[2026-02-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250476>.
Zhang Yingying, Hao Yanpeng, Mi Hongru, et al. Progress on curing characteristics and defect generation mechanism of GIS insulators[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 1-16[2026-02-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250476>.
- [14] 张兴辉, 常文治, 杜非, 等. GIS局部放电多特征量传感研究进展[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 8-16.
Zhang Xinghui, Chang Wenzhi, Du Fei, et al. Research progress of multi-physics sensing in partial discharge of GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 8-16.
- [15] Gao Wensheng, Ding Dengwei, Liu Weidong. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [16] Gao Wensheng, Ding Dengwei, Liu Weidong, et al. Analysis of the intrinsic characteristics of the partial discharge induced by typical defects in GIS[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(3): 782-790.
- [17] 李星, 丁登伟, 许渊, 等. 特高频-超声波法联合的GIS/GIL局部放电信号降噪与缺陷定位[J]. *高电压技术*, 2025, 51(5): 2384-2393.
Li Xing, Ding Dengwei, Xu Yuan, et al. Signal denoising and defect localization for GIS/GIL partial discharge based on ultra-high frequency and ultrasound method united[J]. *High Voltage*

- Engineering, 2025, 51(5): 2384-2393.
- [18] 弓艳朋, 彭江, 毕建刚, 等. GIS 特高频传感器现场校验有效性影响因素[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 101-106.
- Gong Yanpeng, Peng Jiang, Bi Jiangang, et al. Study on factors affecting validity of field calibration of GIS UHF sensors[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 101-106.
- [19] 李军浩, 韩旭涛, 王昊天, 等. 电气设备局部放电检测技术述评: 2015—2025[J]. 高电压技术, 2025, 51(7): 3132-3158.
- Li Junhao, Han Xutao, Wang Haotian, et al. Review of partial discharge detection technology in electrical equipment: 2015—2025[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3132-3158.
- [20] 闫泽玉, 刘云鹏, 范晓舟, 等. 基于多感知双阶融合神经网络的 GIS 绝缘缺陷诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(16): 6535-6548.
- Yan Zeyu, Liu Yunpeng, Fan Xiaozhou, et al. Diagnosis of GIS insulation defects based on multi-perception dual-order fusion neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6535-6548.
- [21] 梁文滔. 基于故障树的 220 kV GIS 设备典型故障分析及差异化运维策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- Liang Wentao. Typical fault analysis and differentiated operation and maintenance strategy of 220 kV GIS equipment based on fault tree analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [22] 费章君. 局部放电检测方法和识别算法研究及在线监测系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- Fei Zhangjun. Detecting and identifying, and online monitoring of partial discharge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
- [23] 马宏明, 周年荣, 肖丹, 等. 交直流电压条件下 GIS 局部放电检测对比研究[J]. 中国电力, 2014, 47(3): 125-129.
- Ma Hongming, Zhou Nianrong, Xiao Dan, et al. Study on partial discharge detection in GIS under AC voltage and DC voltage[J]. Electric Power, 2014, 47(3): 125-129.
- [24] 卢武, 杨华, 张俊, 等. 直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发沿面闪络的机理研究与抑制策略综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1010-1024.
- Lu Wu, Yang Hua, Zhang Jun, et al. Review on mechanism study and suppression strategy of metal particles induced surface flashover in DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1010-1024.
- [25] Okabe S, Ueta G, Utsumi T. Behavior of metallic particles in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2889-2897.
- [26] 黎大健, 杨景刚, 米楚明, 等. 基于超声波信号的 GIS 内自由金属颗粒危险评估研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 53-57.
- Li Dajian, Yang Jinggang, Mi Chuming, et al. Risk assessment of basis of free metallic particles in GIS based on ultrasonic signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 53-57.
- [27] 刘鹏, 李智凯, 田汇冬, 等. 直流电压下气体绝缘输电线路中微粒运动特性研究及微粒陷阱效能分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5740-5750.
- Liu Peng, Li Zhikai, Tian Huidong, et al. Research on motion characteristics of metal particles and capture efficiency of particle traps in gas insulated transmission lines under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5740-5750.
- [28] Geske M, Neumann C, Berg T, et al. Assessment of typical defects in gas-insulated DC systems by means of pulse sequence analysis based on UHF partial discharge measurements[C]//VDE High Voltage Technology 2020(ETG-Symposium), 2020: 1-8.
- [29] Neumann C, Hallas M, Hinrichsen V, et al. PD measurements on a DC gas-insulated transmission line (DC GIL) conducted in the frame of the prototype installation test according to recommendation of CIGRE JWG D1/B3. 57[C]//VDE High Voltage Technology 2020(ETG-Symposium), 2020: 9-16.
- [30] 李庆民, 刘思华, 王健, 等. 直流气体绝缘线路中自由金属微粒的局部放电特性与影响因素[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 367-374.
- Li Qingmin, Liu Sihua, Wang Jian, et al. Characteristics of partial discharges caused by free metal particle and influencing factors in DC gas insulated line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 367-374.
- [31] 孙继星, 陈维江, 李志兵, 等. 直流电场下运动金属微粒的带电估算与碰撞分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 779-786.
- Sun Jixing, Chen Weijiang, Li Zhibing, et al. Charge estimation and impact analysis of moving metal particle under DC electric field[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 779-786.
- [32] Abdul Madhar S, Mráz P, Rodrigo Mor A, et al. Study of corona configurations under DC conditions and recommendations for an identification test plan[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(118): 105820.
- [33] Luo Xinyu, Tang Ju, Pan Cheng, et al. Influence of pulse bursts on PD magnitude distributions in SF₆ gas under positive DC voltage[C]//2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application(ICHVE), 2018: 1-4.
- [34] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
- Xu Yuan, Liu Weidong, Chen Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [35] IEC 60270: 2025 High-voltage test techniques - charge-based measurement of partial discharges[S].
- [36] Li Xing, Liu Weidong, Xu Yuan, et al. Discharge characteristics and detectability of metal particles on the spacer surface in gas-insulated switchgears[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 187-196.

刘卫东(1961—), 男, 研究员, 主要从事电力设备状态检测和诊断、SF₆断路器开断特性、电力系统操作暂态的测量、分析和抑制、电力系统故障电流限制器技术(通信作者)(E-mail: lwd_dea@mail.tsinghua.edu.cn)。