

# 550 kV GIL 三支柱绝缘子表面金属异物局部放电 发展规律和闪络特性研究

李星<sup>1</sup>, 丁登伟<sup>1</sup>, 吴传奇<sup>2</sup>, 许渊<sup>3</sup>, 唐刚<sup>1</sup>

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610213; 2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430077; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Partial Discharge Development and Flashover Characteristics of Metal Particle on 550 kV Triple Post GIL Insulator Surface

LI Xing<sup>1</sup>, DING Dengwei<sup>1</sup>, WU Chuanqi<sup>2</sup>, XU Yuan<sup>3</sup>, TANG Gang<sup>1</sup>

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Supply Co., Ltd., Wuhan 430077, Hubei Province, China;

3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** During operation, unpredictable insulator flashovers occur frequently in the gas insulated transmission line (GIL) and gas insulated switchgear (GIS). Metal particles are considered an important cause of flashover. However, the partial discharge (PD) and flashover characteristics of metal particles on the ultra/extra-high voltage GIL/GIS insulator surface have not been fully understood, thereby hindering condition diagnosis and fault warning. In this paper, a test platform for an actual 550 kV GIL triple insulator and metal particles with different lengths at different positions are set. The ultra-high frequency (UHF) method, pulse current method, and ultrasonic method are used for PD detection. The flashover characteristics of different defects are studied, and the PD development before flashover is investigated. The results indicate that the closer the defect to the particle trap, the lower the flashover voltage, and the smaller the ratio of flashover voltage to PD inception voltage. Before flashover, the PRPD and  $\varphi-N$  patterns also change significantly. There is a significant change in the proportion of discharge during the positive and negative half cycles. The apparent charge, UHF signal amplitude, and discharge repetition rate fluctuate significantly without exhibiting any significant upward trend.

**KEY WORDS:** gas insulated transmission line (GIL); gas insulated switchgear (GIS); metal particle; partial discharge; flashover characteristics

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202422154A-1-1-ZN)。  
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China  
(5500-202422154A-1-1-ZN).

**摘要:** 运行过程中, 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)绝缘件无预警闪络事故时有发生。金属异物被认为是诱发闪络的重要原因, 但超/特高压 GIL/GIS 绝缘件表面金属异物局部放电和闪络特性尚未被完全掌握, 导致状态诊断和故障预警困难。该文搭建了 550 kV GIL 三支柱绝缘子真型试验平台, 模拟不同位置和长度金属异物缺陷, 采用特高频法、脉冲电流法和超声波法同步进行局部放电测量。研究了不同缺陷闪络特征, 分析了缺陷闪络前局部放电发展变化规律。结果表明, 金属异物距离微粒捕捉器越近, 闪络电压越低, 且闪络电压与局部放电起始电压比值越小。从局部放电起始到闪络过程中, 脉冲电流信号表现为微弱、偶发特征, 放电量 1~10 pC, 放电重复率可低至几次/s。闪络前, 局部放电量、特高频信号幅值和放电重复率波动明显, 但均无显著增长趋势; 整个试验中始终无明显超声信号。缺陷发展过程中, 工频正负半周期内放电次数占比变化明显, PRPD 和  $\varphi-N$  图谱形态正负半周期对称性改变。

**关键词:** 气体绝缘输电线路; 气体绝缘开关设备; 金属异物; 局部放电; 闪络特性

## 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)具有输送容量大、高可靠、免维护、环境气候影响小等特点, 被广泛应用于大型水电站、变电站、换流站等电能生产与传输环节<sup>[1-2]</sup>, 其运行可靠性直接关系到整个电网的安全稳定。

运行中, GIL/GIS 放电故障时有发生<sup>[3-4]</sup>。局部

放电(partial discharge, PD)监测是 GIL/GIS 状态诊断和评估的关键有效手段<sup>[5-7]</sup>,全部特高压和部分超高压 GIL/GIS 安装有局部放电在线监测装置。但实际情况是在众多的绝缘故障前,局部放电在线监测装置几乎都未能进行有效预警。

GIS/GIL 内绝缘件故障主要包括沿面闪络和绝缘内部炸裂。研究表明,在机械、热和电应力综合作用下,支柱绝缘子容易发生脆裂<sup>[8-9]</sup>。文献[10]研究发现,绝缘子炸裂前没有明显放电现象,裂纹扩展阶段所用时间长,产生的微弱放电不易被检测。试验结果与现场支柱绝缘子炸裂现象一致。

针对 GIL/GIS 绝缘沿面闪络特性及故障预警问题,开展了广泛研究<sup>[11-13]</sup>。文献[14-15]认为绝缘表面金属异物诱发沿面闪络前放电发展存在电晕放电、电晕放电和沿面流注放电共存、沿面流注放电 3 个主要阶段,以此可作为故障诊断和预警的基础。文献[16]认为可将绝缘子表面金属异物诱发闪络前的放电发展分为 4 个阶段,第 1、2 阶段,放电产生的光电信号幅值小、重复率低;第 3、4 阶段,放电产生的光电信号明显增大。这些研究普遍认为,金属异物诱发绝缘子沿面闪络前均存在不同程度放电发展过程,即放电严重程度逐渐增强过程。通过检测发展过程中的局部放电信号,可以实现绝缘状态评估和故障预警。这显然难以解释现场频繁发生的无预警闪络故障。

为此,文献[17-19]建立了高灵敏局部放电试验平台,实现了微弱放电信号(灵敏度 $<0.02$  pC)测量,揭示了绝缘表面毫米级微小金属异物局部放电的微弱和偶发特征。文献[20-23]通过缩比模型下的长时期恒压试验,获得了绝缘表面厘米级金属异物的间歇性放电特性,并分析了现有检测和监测策略的有效性。上述研究虽然可在一定程度上解释现场闪络无预警的原因,但这些研究大多基于缩比模型或低电压等级绝缘子或模拟厘米级金属异物,与实际情况差异大。相比低电压等级,超/特高压 GIL/GIS 绝缘子尺寸效应凸显,运行场强增加,绝缘裕度降低,对金属异物等缺陷耐受能力差,绝缘表面微缺陷局部放电偶发性、随机性增强,其诱发闪络前放电发展规律尚未被掌握。

因此,本文建立了 550 kV GIL 三支柱绝缘子真型试验平台,采用脉冲电流法、特高频法和超声波法同步测量三支柱绝缘子表面毫米级金属异物局部放电信号。采用阶梯加压法,开展金属异物缺陷

诱发沿面闪络试验,研究其闪络特性及闪络前局部放电发展规律。本文研究结果有助于进一步认识超/特高压 GIS/GIL 绝缘子表面缺陷局部放电和闪络特性,为现场缺陷检测和故障预警提供有效支撑。

## 1 试验设置

### 1.1 试验平台

建立如图 1 所示的试验平台,包括无局部放电铠装试验变压器、试验工装和局部放电测量系统。试验工装包含 550 kV GIL 三支柱绝缘子,作为被试绝缘子。图中 UHF(ultra high frequency)表示特高频传感器

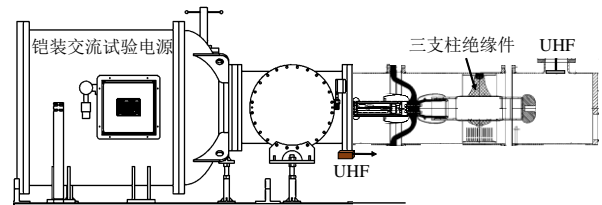


图 1 550 kV GIL 绝缘件局部放电试验平台示意图

Fig. 1 PD test platform for 550 kV GIL insulator

### 1.2 局部放电测量系统

#### 1.2.1 特高频法

所用 UHF 传感器频响特性曲线如图 2 所示,300~1500 MHz 内平均等效高度大于 11 mm。

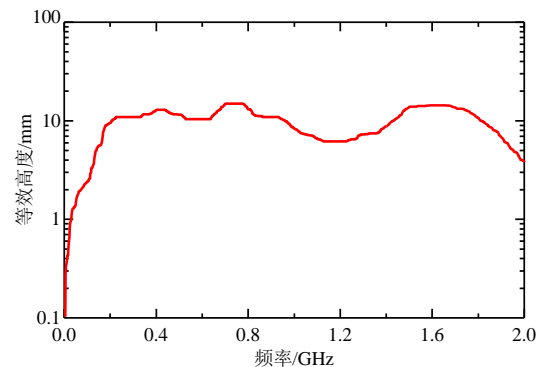


图 2 内置特高频传感器频响曲线

Fig. 2 Frequency response characteristic of UHF sensor

如图 3 所示,试验中共布置 3 个特高频传感器(UHF1~3)。其中:UHF1 为内置特高频传感器;UHF2 为盆式绝缘子浇注口处的外置特高频传感器;UHF3 为背景传感器。通过比较不同特高频传感器



图 3 特高频传感器布置图

Fig. 3 Layout of UHF sensors

测量信号的幅值和时差,可实现内部局部放电和外部干扰识别<sup>[18]</sup>。

### 1.2.2 超声波法

试验中,超声传感器(PAC D9241A)设置在被试三支柱绝缘子带缺陷支腿对应壳体表面。超声传感器谐振频率约 30 kHz,峰值灵敏度为 82 dB;配备超声放大器带宽为 20~200 kHz,放大增益为 60 dB。

### 1.2.3 脉冲电流法

试验中采用高电位脉冲电流法定量测量局部放电量<sup>[24]</sup>。如图 4 所示,与传统脉冲电流法在接地线上接入测量阻抗不同,局部放电高电位测量方法将测量阻抗串联进试验回路高压导体中,可有效抑制外部干扰对局部放电测量的影响。

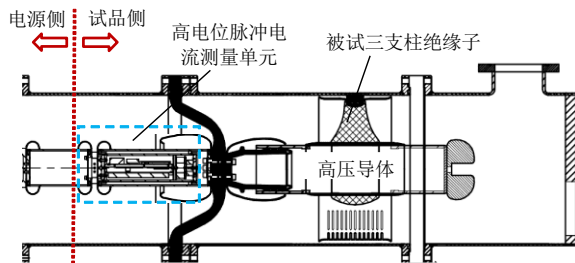


图 4 高电位脉冲电流测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high potential pulse current measurement system

参照标准规定方法<sup>[25]</sup>,对高电位局部放电测量系统进行标定。结果表明,局部放电高电位脉冲电流测量方法最小可测局部放电量约为 0.5 pC。

### 1.3 缺陷设置

实际 GIS/GIL 内缺陷调研发现,现场运行中发现的多为亚毫米和毫米级金属异物<sup>[26]</sup>;相关前期研究表明,当金属异物尺寸过小(例如亚毫米级)时,其难以在运行工况下引发局部放电或者闪络<sup>[17-18,27]</sup>。此外,为方便和容易地控制金属异物的尺寸参数,文中选择规则的线形微粒作为研究对象。因此,综合考虑实际 GIS/GIL 内金属异物尺寸及研究等效性,开展了绝缘子表面缺陷模拟。如图 5 所示,选择直径为 0.2 mm、长度为 2、5 和 8 mm

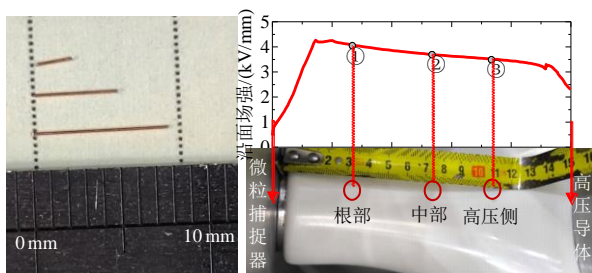


图 5 缺陷设置

Fig. 5 Defect setting

的金属丝;缺陷位置包括绝缘件支腿表面根部、中部和高压侧,分别距离微粒捕捉器 4、8 和 11 cm。

### 1.4 试验方法

试验工装内充入 0.5 MPa SF<sub>6</sub> 气体。采用阶梯加压法进行升压,具体为 100、200、250、300、318、350、400、450、500 kV,每个电压等级下停留 5 min。试验过程中若发生绝缘子沿面闪络,则立即停止试验。

## 2 表面金属异物闪络特性

绝缘子表面不同位置设置 2 mm 缺陷,电压升高到 500 kV,仍无局部放电产生,也未引发闪络。

5 mm 金属异物距离微粒捕捉器 4 cm,电压升高至约 250 kV 时,开始出现明显局部放电信号(脉冲电流法和特高频法均能检测到明显局部放电信号)。电压进一步升高至 300 kV 后约 2 min 30 s 左右,发生绝缘子沿面闪络。

5 mm 金属异物距离微粒捕捉器 8 cm,电压升高至约 250 kV 时,脉冲电流法、特高频法均能检测到明显局部放电信号。电压升高至 350 kV 后约 1 min 34 s,发生绝缘子沿面闪络。

5 mm 金属异物距离微粒捕捉器 11 cm,电压升高至约 300 kV 时,开始出现局部放电信号,但局部放电信号极少,且很快消失。随后,电压升高至 318 kV 时,重新出现明显局部放电信号。此时,脉冲电流法和特高频法均能检测到明显局部放电信号。最终,电压从 450 kV 升压至 500 kV 过程中发生绝缘子沿面闪络,闪络电压为 477 kV。

8 mm 金属异物距离微粒捕捉器 4 cm,电压升高至约 150 kV 时,开始出现稳定的局部放电信号。随后,电压升高至 200 kV 后约 4 min 35 s,发生绝缘子沿面闪络。

8 mm 金属异物距离微粒捕捉器 8 cm,电压升高至约 200 kV 时,开始出现明显局部放电信号。电压升高至 318 kV 后约 10 s,发生绝缘子沿面闪络。

8 mm 金属异物距离微粒捕捉器 11 cm,电压升高至约 200 kV 时,脉冲电流法和特高频法均能检测到明显局部放电信号。电压升高至 450 kV 后约 3 min 31 s,发生绝缘子沿面闪络。

试验结果表明,缺陷距离微粒捕捉器越近,闪络电压越低,且闪络电压与局部放电起始电压(PD inception, PDIV)的比值越小(见表 1)。即,一旦出现局部放电,则较容易引发闪络。这主要是由于对

被试三支柱绝缘子而言，支腿根部沿面场强高于高压电极附近(见图 5)。此外，如图 6 所示，缺陷距离微粒捕捉器越远，闪络痕迹越明显，黑色碳化通道越宽、颜色越深；同一位置，缺陷长度越长，闪络电压越低，闪络痕迹越细、越浅。

表 1 不同缺陷局部放电起始电压和闪络电压

**Table 1 PDIV and flashover voltage of different defects**

缺陷尺寸/mm	缺陷位置	局部放电起始电压/kV	闪络电压/kV	闪络电压与局部放电起始电压比值
5	根部	250	300	1.20
	中部	250	350	1.40
	高压侧	318	477	1.50
8	根部	150	200	1.33
	中部	200	318	1.59
	高压侧	200	450	2.25

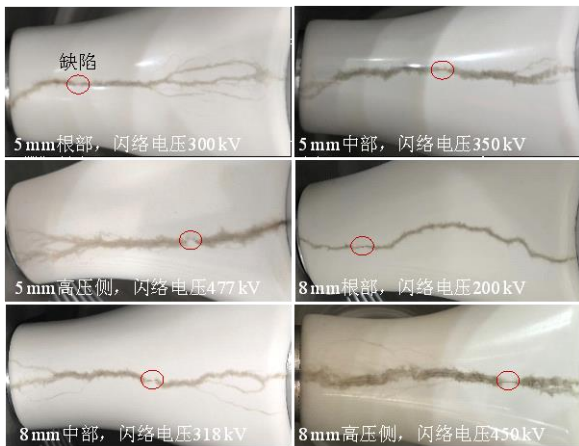


图 6 不同缺陷闪络痕迹

Fig. 6 Flashover trace produced by different defects

### 3 闪络前局部放电变化规律

整个试验过程中，除闪络瞬间外，均无明显局部放电超声信号，后续主要分析从局部放电起始到沿面闪络全过程中的脉冲电流和特高频信号特征。

#### 3.1 脉冲电流信号特征

不同缺陷下，从局部放电起始到沿面闪络全过程中脉冲电流信号重复率和每秒钟最大放电量变化趋势如图 7 所示。由图 7(a)可知，绝缘子根部 5 mm 金属异物诱发闪络前，每秒最大放电量普遍低于 3 pC，放电重复率波动明显，闪络前存在多次增加并减小过程，最高接近 100 次/s，最低仅几次/s。由图 7(b)可知，绝缘子中部 5 mm 金属异物诱发闪络前，放电量波动明显，最大超过 12 pC(测量系统上限)，放电重复率维持在 30~100 次/s 之间；放电量 and 放电重复率仅在局部放电起始阶段有所增加，临近闪络前没有

明显增长趋势。由图 7(c)可知，绝缘子根部 8 mm 金属异物，电压较低时每秒最大放电量 3 pC 左右，放电重复率约 10 次/s；电压升高，放电量 and 放电重复率略有增加；临近闪络前较短时间内，放电重复率有所增加，放电量则有所减小。由图 7(d)可知，绝缘子中部 8 mm 金属异物诱发闪络前，放电量 and 放电重复率波动明显，但无明显增长过程；放电量维持在 1 pC 左右，仅存在偶发大放电(>3 pC)，放电重复率在几次/s 到百次/s 之间波动。

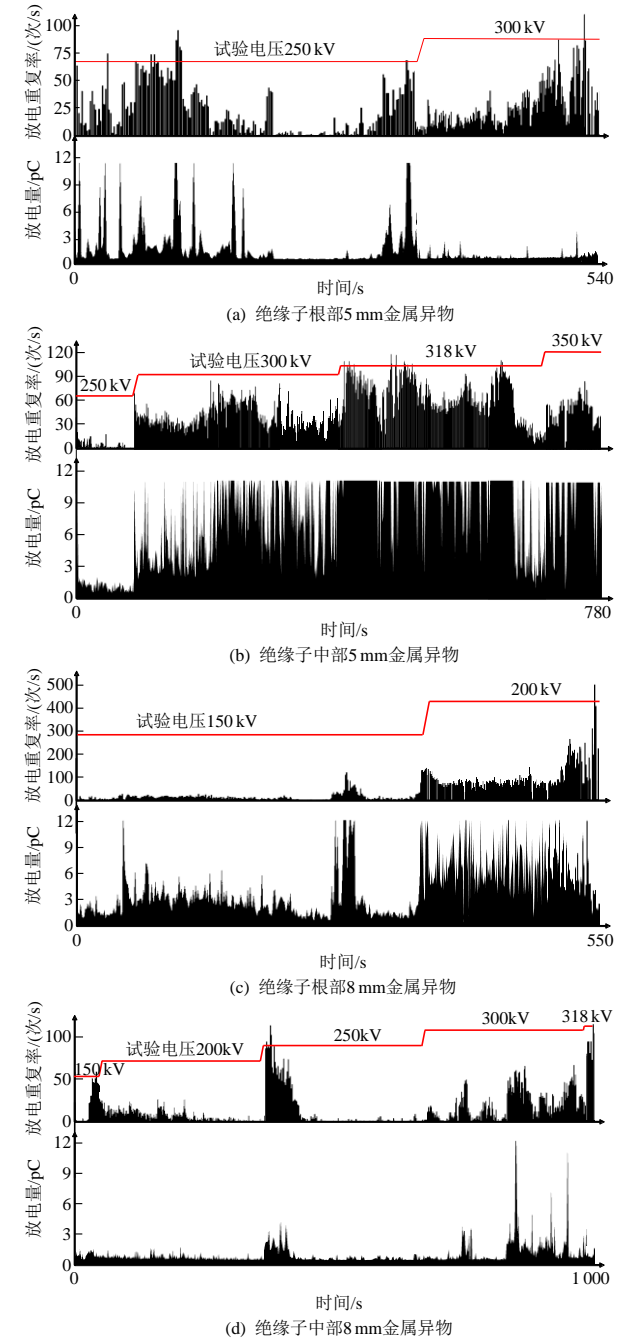


图 7 不同位置尺寸金属异物局部放电脉冲电流信号

Fig. 7 PD pulse current signal generated by different metal particle defects

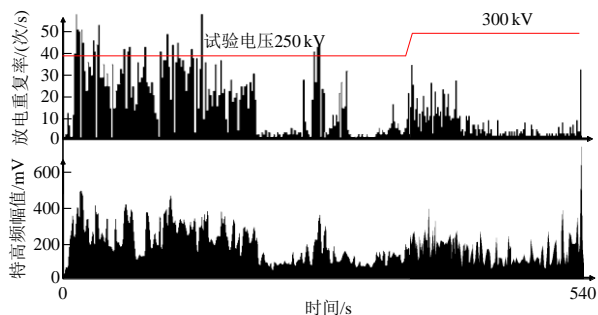
由此可见，从局部放电起始到闪络过程中，脉

冲电流信号始终表现为微弱、偶发特征。脉冲电流信号重复率低,局部放电电量小,普遍低于  $3\text{pC}$ ,仅存在偶发的大放电。闪络前,脉冲电流信号重复率和放电电量波动明显,但均没有显著的逐渐增长过程。

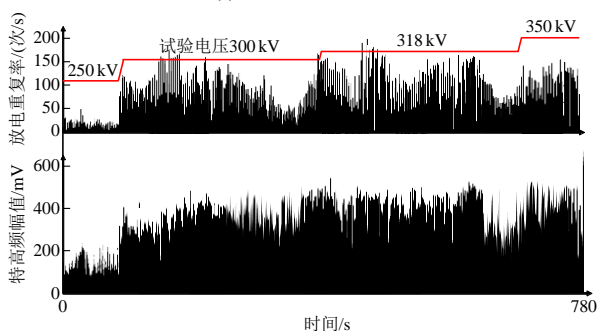
### 3.2 特高频信号特征

试验过程中,内置特高频传感器检测到局部放电信号最明显,后文分析均针对 UHF1 传感信号进行。不同缺陷从局部放电起始到绝缘子沿面闪络整个过程中局部放电特高频信号每秒钟最大幅值和重复率的变化趋势如图 8 所示。可知,在局部放电起始阶段,特高频信号重复率和幅值均较低;且在较低电压下,随着时间推移,特高频信号重复率和幅值均呈下降趋势。整体上,特高频信号变化特征与脉冲电流信号一致,闪络前信号重复率和幅值波动明显,但均没有显著的增长过程。

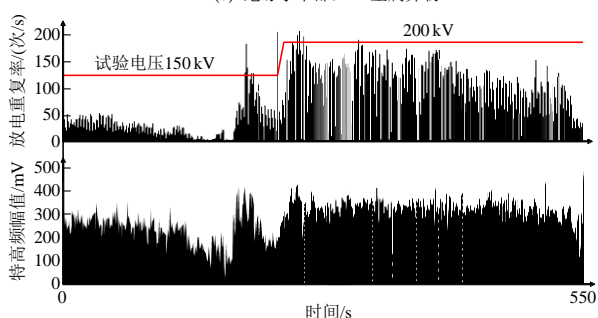
由图 8(a)可知,绝缘子根部  $5\text{mm}$  金属异物引发闪络前,特高频信号重复率和幅值波动较大,存在突然增加或减小情况;在临近闪络前,特高频信号幅值和重复率均较低,重复率低于  $10\text{次/s}$ ,幅值



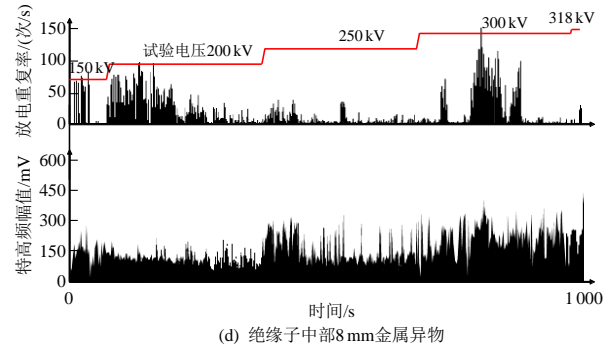
(a) 绝缘子根部  $5\text{mm}$  金属异物



(b) 绝缘子中部  $5\text{mm}$  金属异物



(c) 绝缘子根部  $8\text{mm}$  金属异物



(d) 绝缘子中部  $8\text{mm}$  金属异物

图 8 不同位置尺寸金属异物局部放电特高频信号

Fig. 8 PD UHF signal generated by different metal particle defects

普遍低于  $200\text{mV}$ 。由图 8(b)可知,绝缘子中部  $5\text{mm}$  金属异物引发闪络前,特高频信号重复率在  $100\text{次/s}$  上下波动,每秒最大幅值维持在  $400\text{mV}$  左右。由图 8(c)可知,绝缘子根部  $8\text{mm}$  金属异物引发闪络前,特高频信号重复率略有下降,每秒最大信号幅值则相对较稳定。由图 8(d)可知,绝缘子中部  $8\text{mm}$  金属异物引发闪络前,特高频信号重复率变化较大,存在突然增加或减小情况,最高接近  $150\text{次/s}$ ,最低则低于  $10\text{次/s}$ ;特高频信号幅值较低,且存在明显波动。

### 3.3 放电图谱特征变化

图 9—12 分别为绝缘子表面不同金属异物诱发沿面闪络前特高频信号 PRPD 图谱。图中每个图谱均为连续累计  $5000\text{次}$  放电信号获得。可知,对不同缺陷,从局部放电起始到沿面闪络过程中,放电信号相位分布范围均存在不同程度变宽,且工频正负半周期内放电分布中心相位分别向  $0^\circ$  和  $180^\circ$  方向移动。放电起始到闪络前,正、负半周期内图谱形状和幅值分布均发生变化。由图 9 可知,绝缘子中部  $5\text{mm}$  金属异物工频正半周期内放电信号幅值增加;临近闪络前,正半周期内开始出现零星较大幅值放电信号。由图 10 可知,绝缘子高压侧  $5\text{mm}$  金属异物特高频信号幅值,尤其是工频正半周期内放电信号幅值明显增强,负半周期图谱形状变化明显。由图 11 可知,绝缘子根部  $8\text{mm}$  金属异物正半周期内放电信号明显增强,负半周期内信号幅值变化较小但图谱形态变化明显。由图 12 可知,绝缘子中部  $8\text{mm}$  金属异物局部放电信号幅值略有增加,尤其是负半周期内信号幅值和图谱形态变化明显。

对闪络前不同缺陷不同电压下放电图谱进行统计分析,获得局部放电信号  $\varphi-N$  图谱如图 13 所

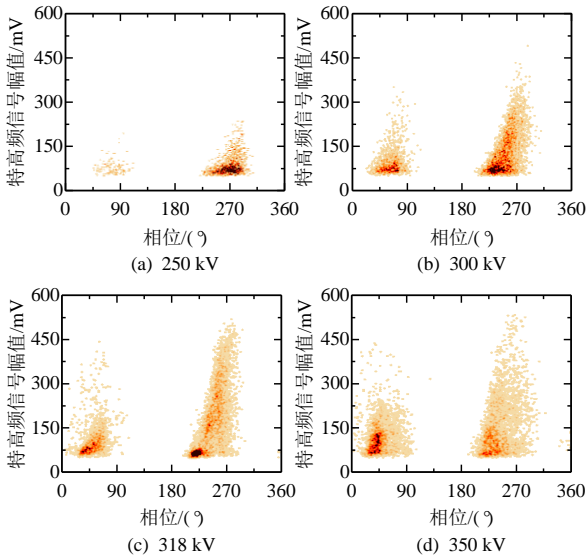


图 9 5 mm 金属异物(距微粒捕捉器 8 cm)PRPD 图谱  
**Fig. 9 PRPR pattern of 5 mm metal particle 8 cm away from particle trap**

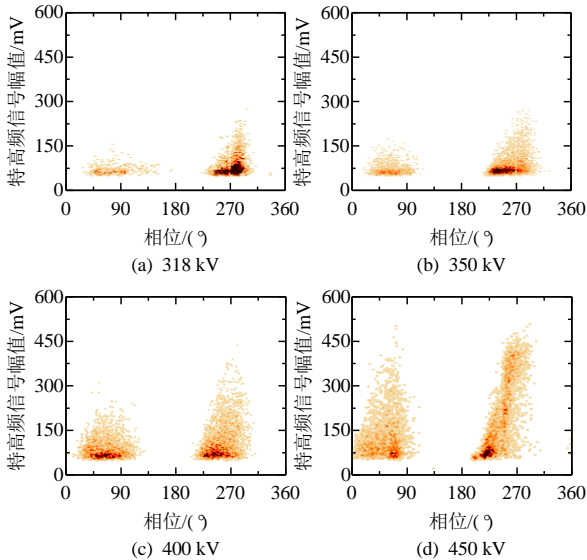
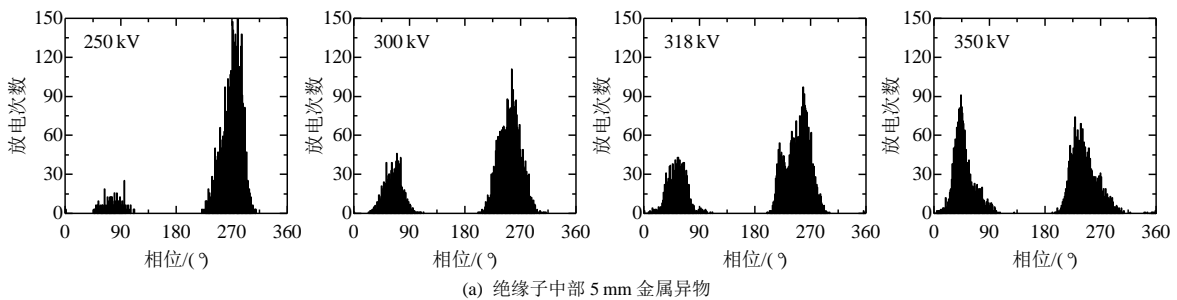


图 10 5 mm 金属异物(距微粒捕捉器 11 cm) PRPD 图谱  
**Fig. 10 PRPR pattern of 5 mm metal particle 11 cm away from particle trap**

示。图 13 中，将工频相位等分为 360 个区间，针对图 9—12 中对应的 5 000 次放电，统计每个相位区间内的放电次数。可知，绝缘子中部和高压侧 5 mm 金属异物及绝缘子中部 8 mm 金属异物引发闪络前，正半周期内放电次数逐渐增加，负半周期内



(a) 绝缘子中部 5 mm 金属异物

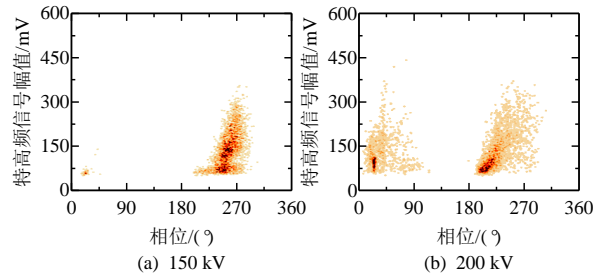


图 11 8 mm 金属异物(距微粒捕捉器 4 cm)PRPD 图谱  
**Fig. 11 PRPR pattern of 8 mm metal particle 4 cm away from particle trap**

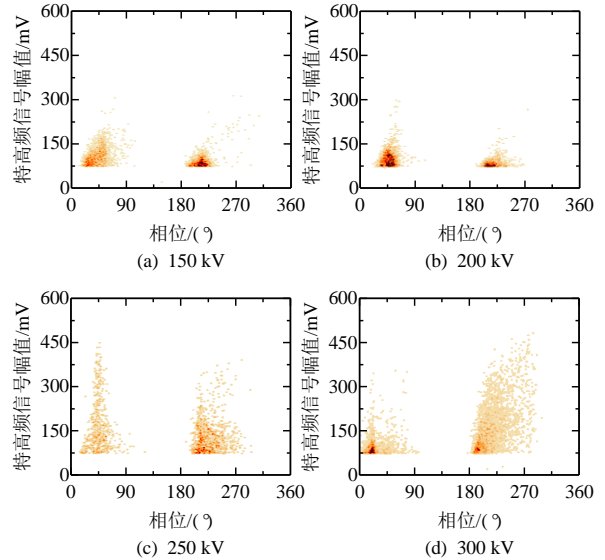


图 12 8 mm 金属异物(距微粒捕捉器 8 cm)PRPD 图谱  
**Fig. 12 PRPR pattern of 8 mm metal particle 8 cm away from particle trap**

放电次数逐渐减少；绝缘子根部 8 mm 金属异物，闪络前，正半周期内放电次数减少，负半周期内放电次数增加；随着放电发展，放电的相位分布变宽，但  $\varphi-N$  图谱始终呈尖峰状分布。

针对不同缺陷，分析闪络前不同阶段(不同电压下)工频正负半周期内特高频信号重复率占比，得到结果如图 14 所示。可知，不同金属异物缺陷诱发闪络前，工频正负半周期内局部放电特高频信号占比变化显著，正(负)半周期内放电次数显著增加，负(正)半周期内放电次数显著减少。如图 14(a)所示，正半周期内特高频信号占比从 16% 增加至

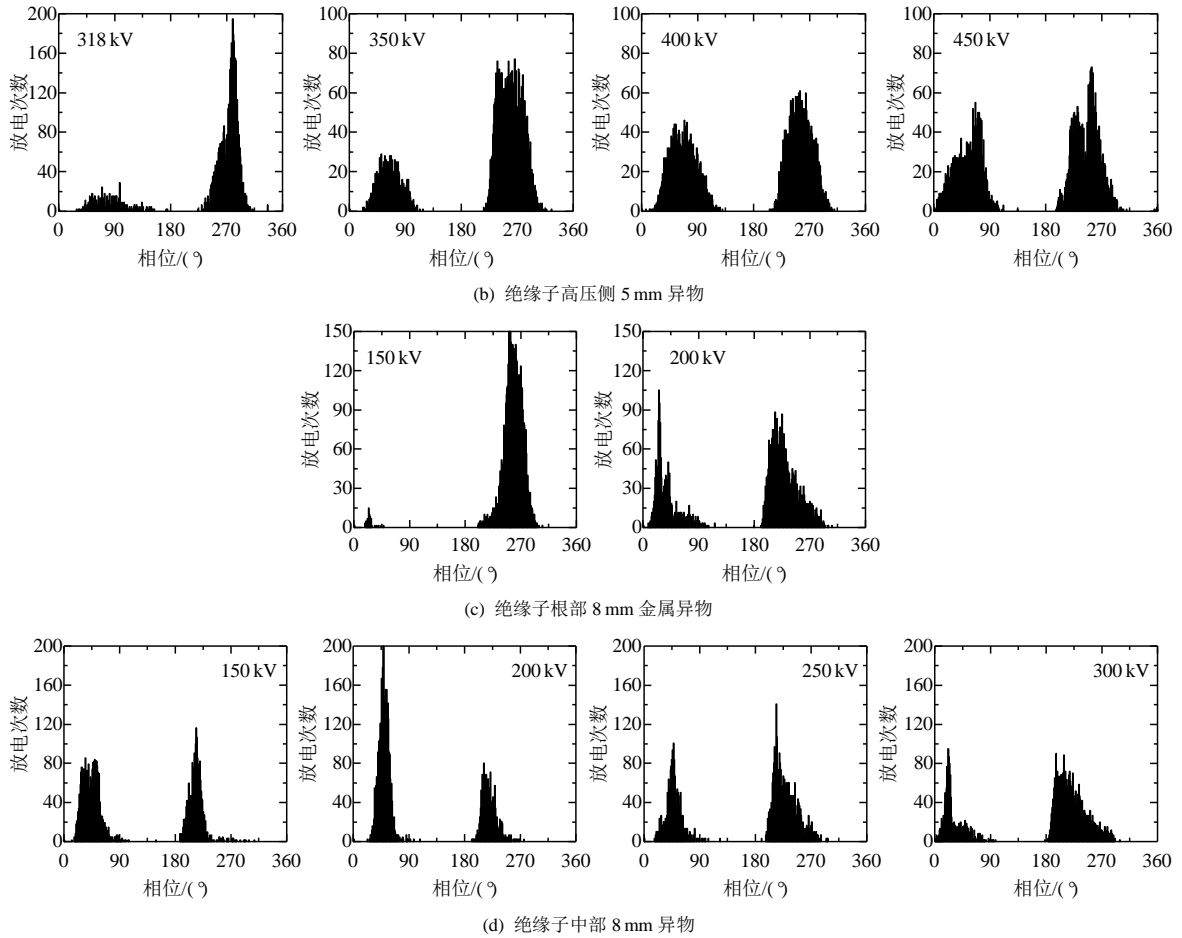


图 13 不同位置尺寸金属异物局部放电特高频信号  $\phi-N$  图谱  
Fig. 13 PD  $\phi-N$  patterns of UHF signals of different defects

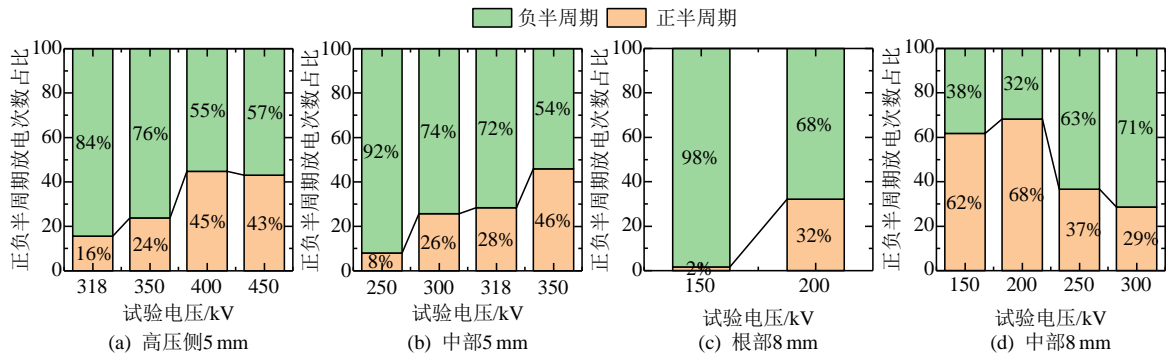


Fig. 14 Proportion of UHF signal in positive and negative half cycles of different defects

43%；如图 14(b)所示，正半周期内特高频信号占比从 8%增加至 46%；如图 14(c)所示，正半周期内特高频信号占比从 2%增加至 35%；如图 14(d)所示，正半周期内特高频信号占比从 62%减少至 29%。

### 3.4 讨论

以往基于缩比模型和长尺寸金属异物的研究普遍认为，金属异物在诱发绝缘子沿面闪络前均存在不同程度的放电发展过程，即放电严重程度逐渐增强的过程<sup>[12-16]</sup>。通过检测这一发展过程中的局部

放电信号，可以实现绝缘状态评估和故障预警。但实际情况却是，在众多特高压 GIS/GIL 绝缘子沿面闪络故障前，局部放电监测装置未能检测到有效的异常局部放电信号。相比超特高压 GIS/GIL，低电压等级 GIS/GIL 绝缘件绝缘裕度更大，小尺寸金属异物难以引发闪络<sup>[18-19]</sup>，以往在低电压等级试验平台上的研究未能获得闪络前局部放电发展规律。

相比低电压等级，超/特高压 GIS/GIL 绝缘件绝缘裕度更低，绝缘表面金属异物局部放电的偶发性

和随机性更强。基于 550kV GIL 绝缘件真型试验平台, 本文研究发现, 毫米级金属异物从局部放电起始到闪络过程中, 脉冲电流信号表现为微弱、偶发特征, 放电重复率可低至几次/s。诱发沿面闪络前, 局部放电量较低, 且无明显增长趋势; 特高频信号幅值和重复率波动明显, 但没有显著的逐渐增长过程。此外, 闪络前, 局部放电信号的相位分布变宽, 同时放电信号的相位分布中心也发生偏移; 且放电信号 PRPD 和  $\varphi-N$  图谱形态改变, 主要是正负半周期的对称性发生变化。分析认为, 相位分布中心偏移主要是由于电压升高, 正负半周期内发生首次放电的相位前移; 首次放电会带来表面电荷沉积, 影响后续放电。放电正负半周期内对称性变化主要是因为金属异物两端不对称; 且随电压升高, 异物两端放电变化程度不一致引起。

试验结果表明, 2mm 长金属异物难以引发绝缘子沿面闪络, 而 5 和 8mm 长金属异物易在运行电压下诱发绝缘子沿面闪络。因此, GIS/GIL(包括绝缘件)设计中需重点考虑金属异物的抑制与防护(微粒捕捉器、驱赶电极、绝缘子形状优化、电极/筒体覆膜等), 避免异物运动并吸附到绝缘子表面。此外, 相同缺陷在绝缘子表面不同位置的闪络电压差异较大(最高可相差 2 倍左右)。缺陷所在位置沿面电场强度越高, 闪络电压与局部放电起始电压的比值越小, 闪络越难预警。在绝缘子及附件结构设计中控制沿面电场均匀, 有利于提高对金属异物缺陷的耐受能力。

此外, 从试验结果可知, 绝缘表面金属异物诱发闪络前, 局部放电特高频信号幅值和频次均没有显著增长过程, 采用传统的幅值阈值和频次阈值可能难以有效预警。在未来故障预警方面可考虑如下几点:

1) 结合缺陷位置的严重程度评估。一般认为绝缘沿面缺陷引发放电随机性较大, 危险程度高。因此, 在缺陷诊断过程中可首先进行缺陷定位, 判断缺陷是否与绝缘件有关, 结合缺陷位置综合分析缺陷严重程度。

2) 放电信号变化趋势分析。从本文研究结果可知, 绝缘沿面金属异物缺陷发展过程中频次波动明显, 存在突然增加或降低趋势。现场检测经验也表明, 沿面缺陷诱发闪络故障前放电信号幅值和频次可能存在显著增加或减少。

3) 基于放电信号图谱特征的分析。文中结果表

明, 闪络前局部放电特高频信号 PRPD 和  $\varphi-N$  图谱形态变化, 比如, 工频正负半周期放电对称性改变。

## 4 结论

本文基于 550kV GIL 三支柱绝缘子真型试验平台, 研究了绝缘子表面金属异物缺陷的闪络特性, 获得了闪络前局部放电发展变化规律。得到主要结论如下:

1) 金属异物距离微粒捕捉器越远(沿面场强越小), 闪络电压越高, 闪络痕迹越明显。同一位置, 金属异物长度越长, 闪络电压越低, 闪络痕迹越细、越浅。5 和 8mm 金属异物闪络电压可分别低至 300 和 200kV 左右, 低于 550kV GIL 额定运行电压。因此, 在 GIS/GIL 绝缘件设计中应注重均匀沿面场强和抑制金属异物, 提高设备耐受水平。

2) 绝缘子表面毫米级金属异物从局部放电起始到闪络过程中, 脉冲电流信号表现为微弱、偶发特征, 放电量 1~10pC, 特高频信号幅值集中在 200mV 以下, 放电重复率可低至几次/s。诱发沿面闪络前, 局部放电量、特高频信号幅值和重复率波动明显, 但均没有显著的逐渐增长过程。

3) 绝缘子表面毫米级金属异物引发沿面闪络前, 放电 PRPD 和  $\varphi-N$  图谱形态改变; 局部放电信号相位分布范围变宽, 同时放电信号相位分布中心发生偏移; 工频正负半周期放电对称性改变, 某一半周期内放电次数占比显著增加, 而另一半周期内放电次数占比显著减少。

## 参考文献

- [1] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [2] 李庆民, 薛乃凡, 王媛, 等. 交直流输电管道绝缘运行安全关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1629-1648.  
LI Qingmin, XUE Naifan, WANG Yuan, et al. Key technologies for operation safety of AC/DC gas insulated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 024, 44(4): 1629-1648(in Chinese).
- [3] 国家电网公司运维检修部. 高压开关设备典型故障案例汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.  
Operation and Maintenance Department of State Grid Corporation of China. Compilation of typical fault cases of high voltage switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012(in Chinese).

- [4] 张欣, 李高扬, 黄荣辉, 等. 不同运行年限的 GIS 缺陷率统计分析与维护建议[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 184-188.  
ZHANG Xin, LI Gaoyang, HUANG Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 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 (in Chinese).
- [8] DU Boxue, ZHANG Wenjin, LIANG Hucheng. Combined effects of electrical and mechanical stresses on insulation breakdown-Part I: Tree growth of epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2362-2369.
- [9] DU Boxue, GUO Zhijun, LIANG Hucheng. Combined effects of electrical and mechanical stresses on insulation breakdown-Part II: Bursting breakdown of GIL insulator [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2370-2377.
- [10] 刘智鹏, 魏来, 李庆民, 等. GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 359-369.  
LIU Zhipeng, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Defects evolution process and mechanism of discharge embrittlement of GIL post insulator inserts and epoxy interface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 359-369(in Chinese).
- [11] 许渊. 运行中 GIS 绝缘子表面金属颗粒诱发放电研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.  
XU Yuan. Investigation on mechanism of metallic particle induced flashover of GIS insulators in operation condition [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020(in Chinese).
- [12] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.  
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860(in Chinese).
- [13] 李晓昂, 杨晓宇, 吕肖肖, 等. GIS 带电操作下金属微粒起跳吸附及诱发绝缘子沿面闪络特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1025-1037.  
LI Xiaolang, YANG Xiaoyu, LYU Xiaoxiao, et al. Metal particles movement and its induced insulator flashover characteristics in GIS under electrified operation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1025-1037(in Chinese).
- [14] QI Bo, LI Chengrong, XING Zhaoliang, et al. Partial discharge initiated by free moving metallic particles on GIS insulator surface: severity diagnosis and assessment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 766-774.
- [15] 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. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 101-108(in Chinese).
- [16] ZHAO Junping, AN Zhenjie, LV Bin, et al. Characteristics of the partial discharge in the development of conductive particle-initiated flashover of a GIS insulator[J]. Energies, 2020, 13(10): 2481.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 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.

- [19] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 基于高灵敏测量的 GIS 绝缘子表面微金属颗粒局部放电特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2707-2714.  
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Partial discharge characteristics of metal particles on spacer surface in GIS based on high sensitivity measurement [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2707-2714(in Chinese).
- [20] 王红梅, 丁登伟, 贾志杰, 等. 恒压下 GIS 盆式绝缘子表面缺陷的长间歇性放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6188-6194.  
WANG Hongmei, DING Dengwei, JIA Zhijie, et al. Research on intermittent discharge characteristics of defects on the surface of disc-insulators of GIS under long-time constant voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6188-6194(in Chinese).
- [21] ZHAO Chenhao, TANG Zhiguo, ZHANG Liangen, et al. Entire process of surface discharge of GIS disc-spacers under constant AC voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(5): 591-597.
- [22] 李伟, 张连根, 李乐颖, 等. GIS 绝缘子表面金属异物附着缺陷局部放电 UHF 信号间歇性与有效检出率分析[J]. 绝缘材料, 2024, 57(8): 122-129.  
LI Wei, ZHANG Liangen, LI Leying, et al. Analysis on UHF signal intermittency and effective detection rate of partial discharge of metal particles on GIS insulator surface[J]. Insulating Materials, 2024, 57(8): 122-129(in Chinese).
- [23] 李阳, 唐志国. 恒压下 GIS 环氧树脂绝缘子沿面放电发展全过程状态特征研究与诊断[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 123-130.  
LI Yang, TANG Zhiguo. Research and diagnosis of state characteristics in the whole process of creeping discharge development of GIS epoxy resin insulating parts under constant voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 123-130(in Chinese).
- [24] 李星, 丁登伟, 张榆, 等. GIS/GIL 设备局部放电高电位脉冲电流测量方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(11): 5472-5480.  
LI Xing, DING Dengwei, ZHANG Yu, et al. High potential partial discharge pulse current detection method for GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5472-5480 (in Chinese).
- [25] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 局部放电测量: GB/T 7354-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements: GB/T 7354-2003[S]. Beijing: China Standard Press, 2018(in Chinese).
- [26] YOU Haoyang, ZHANG Qiaogen, GUO Can, et al. Motion and discharge characteristics of metal particles existing in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 876-885.
- [27] LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Partial discharge and movement characteristics of micron-sized metal particles on insulator surface in gas-insulated switchgear with long-time AC stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 2152-2160.



李星

在线出版日期: 2024-12-19。

收稿日期: 2024-10-21。

作者简介:

李星(1994), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高压电器设备状态检测和故障诊断、绝缘失效机理、设备智能化等方面的研究, lx1230716@126.com。

(编辑 张蕾)