

# 交直流交替作用下超特高压交流 GIS/GIL 绝缘沿面闪络研究

李星<sup>1</sup>, 丁登伟<sup>1</sup>, 许渊<sup>2</sup>, 张榆<sup>3</sup>, 毕建刚<sup>2</sup>, 刘卫东<sup>4</sup>

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610213;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

3. 国网四川省电力有限公司电力科学研究院, 四川省 成都市 610041;

4. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084)

## Research on the Insulation Surface Flashover in EHV/UHV AC GIS/GIL Under Alternating AC and DC Voltage

LI Xing<sup>1</sup>, DING Dengwei<sup>1</sup>, XU Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, BI Jiangang<sup>2</sup>, LIU Weidong<sup>4</sup>

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

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan Province, China;

4. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Gas insulated switchgear (GIS) and gas insulated transmission lines (GIL) are key equipment in the power system, and their reliability directly affects the safety and stability of the power grid. In recent years, multiple insulator flashovers have occurred during commissioning and operation, in which the GIS/GIL have passed the on-site handover withstand voltage test, greatly affecting the reliability of power supply. In this paper, common fault characteristics are obtained through comparative analysis of multiple similar faults, and typical fault conditions and causes are grasped. Then, the experiment is conducted for fault replication in the factory. The results indicate that insulator without defects do not discharge under alternating current (AC) and direct current (DC) voltage. Insulators with defects can withstand AC withstand voltage but discharge under DC voltage (<400kV). The experiment phenomenon is consistent with the on-site fault, verifying that the on-site fault is caused by small defects under the alternating AC and DC voltage. Based on this, prevention and suppression suggestions for this type of fault are further proposed. This study can help to gain a deeper understanding of the cause of on-site faults, improve the intrinsic safety of equipment, and ensure the safe operation and long-term stability of GIS/GIL.

**KEY WORDS:** gas-insulated switchgear (GIS); gas-insulated transmission line (GIL); insulator flashover; alternating AC and DC voltage; residual voltage

**摘要:** 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)是电力系统关键核心设备, 其运行可靠性直接关系整个电网能源输送通道的安全稳定。近年来, 交流 GIS/GIL 多次出现通过了现场交接耐压试验之后, 仍在系统调试或实际运行中绝缘件闪络的情况, 极大影响供电可靠性。该文通过多起类似故障的对比分析, 获得了故障的共性特征, 进而掌握典型故障工况和诱因。基于故障分析, 开展了故障复现试验研究。结果表明, 在交直流交替作用下洁净绝缘子未发生放电; 模拟缺陷条件下, 绝缘子能耐受工频耐压但在较低直流电压(<400kV)下发生放电。试验现象与现场故障一致, 证明现场故障可能由 GIS/GIL 内部微小缺陷在工频和直流残压交替作用下引起。基于此, 该文进一步提出针对该类故障的防范抑制建议。该文研究有助于深入认识现场故障成因, 提高设备本质安全, 保障 GIS/GIL 安全投运及长期稳定运行。

**关键词:** 气体绝缘开关设备; 气体绝缘输电线路; 绝缘子闪络; 交直流交替; 直流残压

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2063

## 0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)以其结构紧凑、占地面积小、安装方便、

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0816, 2024NSFSC0117)。

Project Supported by Sichuan Natural Science Foundation (2023NSFSC0816, 2024NSFSC0117).

维护工作量小、环境适应能力强等优点<sup>[1-4]</sup>,在大型水电站、超/特高压变电站、以及特高压直流换流站等电能生产与传输环节应用广泛,是大规模能源送出通道的重要节点<sup>[5-9]</sup>。GIS/GIL 作为电力系统的关键核心设备,其运行可靠性直接关系整个电网能源输送通道的安全稳定<sup>[10-12]</sup>。

GIS/GIL 中通常以绝缘件(包括盆式绝缘子、支柱绝缘子等)作为电气绝缘、机械支撑和气室隔离的主要部件。GIS/GIL 一旦发生绝缘击穿,将导致设备故障或损坏,危及电网安全稳定。近年来,在超特高压 GIS/GIL 设备调试和运行中,多次发生通过出厂和现场交接耐压试验,且首次成功带电的设备,在停电后再次带电过程中发生绝缘件沿面闪络的故障,严重影响设备正常投运和安全稳定运行。

以往研究和现场经验认为,引起绝缘子沿面闪络的原因主要有金属微粒、非金属微粒、表面脏污、划痕、表面电荷等<sup>[13-19]</sup>。此外,开关分合闸产生的暂态电压也被认为是引起绝缘故障的重要因素<sup>[20-23]</sup>。然而,以往这些研究都无法有效解释现场通过了交接耐压试验且第一次带电成功的 GIS/GIL 在后续再次充电时发生放电故障的现象。

论文首先介绍了几起超特高压 GIS/GIL 在调试过程中发生的沿面闪络故障,通过对多起同类型故障进行共性分析,获得该类型故障特点。结合现场故障录波数据,分析了该类故障典型故障工况,揭示了引发故障的原因为交直流交替作用下设备内部残留微小缺陷引起。基于现场故障分析,针对性开展故障复现试验。结果表明,在交直流电压交替作用下,洁净绝缘子无异常;模拟金属异物等缺陷情况下,绝缘子能通过 740kV 工频耐压试验,但在后续施加直流电压时发生放电。复现试验现象与现场故障一致,进一步说明现场类似故障可能是交直流交替作用下 GIS/GIL 内部微小缺陷放电引起。最后,文章给出了针对性的防范抑制建议。

## 1 现场故障共性特征分析

在超特高压变电站和换流站工程调试及运行中,交流 GIS/GIL 多次出现通过了出厂和现场交接试验,仍在调试和运行中闪络的情况,严重影响设备正常投运。首先通过典型故障对比分析,获得类似故障现象共性特征,为揭示故障成因提供基础。

### 1.1 500kV GIL 三支柱绝缘子故障

如图 1 所示,某换流站调试期间,先后合 5061、5062 开关对 500kV #62M 分支母线充电,随后拉开 5062 开关。5062 开关分闸 10min 后,合上 5063 开

关再次对 500kV #62M 分支母线充电,5063 开关瞬时跳开。故障录波显示,母线 B 相发生故障。

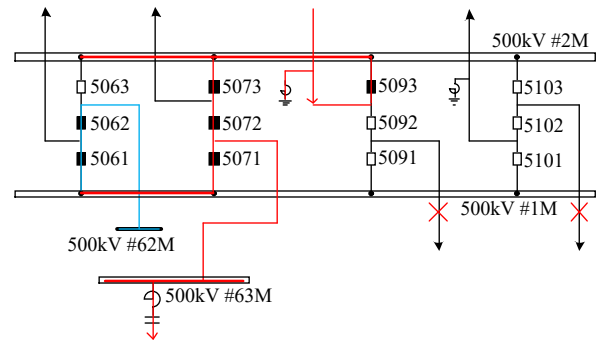


图 1 某换流站 500kV #62M 母线故障前系统带电情况  
Fig. 1 System situation before the fault of the 500kV #62M busbar at a converter station

气体分解物分析发现 63-13B 气室存在异常,解体确认故障绝缘子为该气室拐弯处三支柱绝缘子。如图 2 所示,故障三支柱绝缘子外观完整、无破裂,放电痕迹集中 12 点钟支腿上,支腿表面烧蚀产生明显的黑色碳化层。高压导体及绝缘子根部的微粒捕捉器表面均有烧熔痕迹,微粒捕捉器边沿的壳体上部残留形状不规则的喷溅状金属颗粒。



图 2 故障三支柱绝缘子烧蚀痕迹

Fig. 2 Burnout mark of the faulty tri-post insulator

### 1.2 500kV GIL 单支柱绝缘子故障

某换流站开展交流调试期间,完成 500kV 第六串中开关联锁试验后,重新合上 5061 开关对 5061、5062 开关 T 区充电过程中 5061 开关跳闸(见图 3)。该分支在之前调试中已完成多次充电,本次故障前的合闸操作为该分支母线第 7 次带电。

开展气体分解物分析并解体检查确认,放电部位为出线气室拐弯位置的支柱绝缘子表面(见图 4)。如图 4(a)所示,绝缘子朝下部位约 3/4 范围被黑色

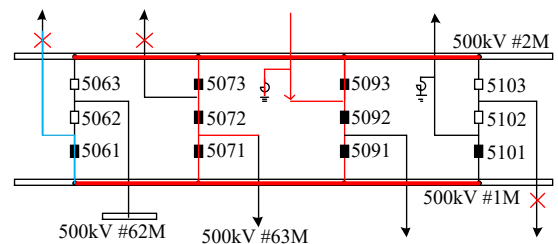


图 3 某换流站 500kV 支柱绝缘子故障前系统带电情况  
Fig. 3 System situation before the fault of 500kV post insulators at a converter station

碳化物覆盖;壳体表面有熔融颗粒滚动后留下的黑色痕迹。安装绝缘子的手孔边沿有明显烧蚀痕迹,固定绝缘子的盖板表面有金属喷溅。如图 4(b)所示,酒精清擦后,绝缘子外观完整,无明显裂纹。

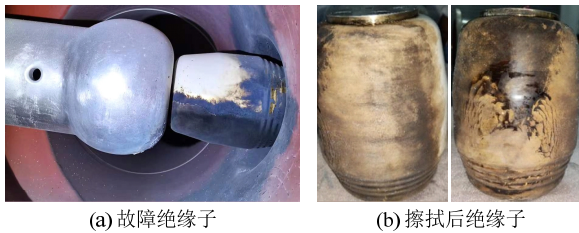


图 4 清擦前后故障支柱绝缘子表面状态

Fig. 4 Surface condition of faulty post insulator before and after wiping

### 1.3 1100kV GIS 盆式绝缘子故障

如图 5 所示,某 1100kV GIS 变电站系统调试过程中,合上 T043 断路器,投入 1000kV #2 母线(本次合闸为该母线第三次充电)。T043 断路器 B 相和 C 相充电过流保护动作, T043 断路器分闸。

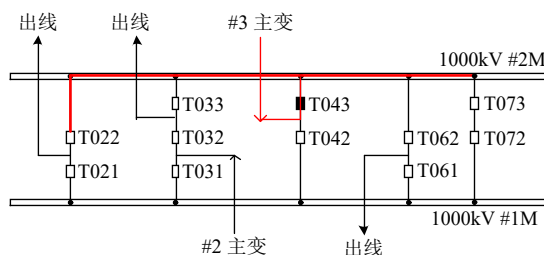


图 5 某 1100kV GIS #2 母线故障前系统带电情况  
Fig. 5 System situation before the fault of the 1100kV #2 busbar

现场通过气体分解物分析并解体检查确认, II 母 C 相和 B 相发生盆式绝缘子发生沿面闪络。如图 6(a)所示, C 相故障绝缘子闪络区域在凹面 11:30 方向附近,绝缘盆清擦后未发现裂纹等异常缺陷。如图 6(b)所示, B 相故障绝缘子闪络区域同样在凹面十一点半方向附近,绝缘盆清擦后也未发现裂纹等异常缺陷。此外,还可以看到,两次放电的盆式绝缘子表面大面积强烈放电痕迹附近均有一条较细的放电痕迹。

### 1.4 同类型故障共性特征

现场调研发现,上述同类型故障曾在超/特高压 GIS/GIL 变电站/换流站集中出现 3 次,具体为:

1) 某特高压变电站调试过程中,连续发生 5 次(6 处)GIS 母线绝缘子沿面放电,全部发生在空充母线过程中。故障集中发生在 B、C 两相,而装有电磁式电压互感器(potential Transformer, PT)的 A 相母线未发生故障。故障母线前期均通过了现场交接耐压试验,且均成功完成第一次充电。后续在 GIS 母线三相均加装 PT,系统调试和运行中未再发生

类似故障。

2) 某 500kV 变电站调试期间共发生两次绝缘子沿面放电故障。故障均发生在母线正常运行一段时间后,停电后进行空载母线充电过程中;且均发生在未安装 PT 的 B、C 相。后续调试过程中,改变操作方式,采用带高抗的方式切除长母线,类似故障未再发生。

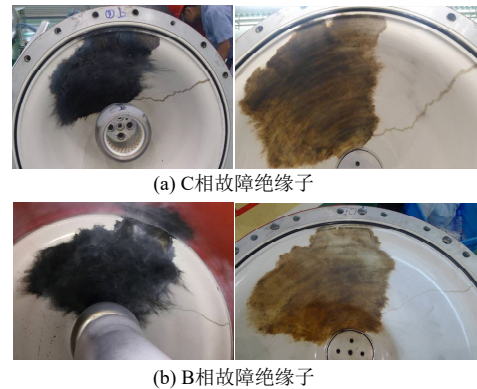


图 6 清擦前后故障盆式绝缘子表面状态

Fig. 6 Surface condition of faulty basin insulator before and after wiping

3) 某 500kV 换流站调试期间 500kV GIL 母线发生 7 次绝缘子沿面放电,其中 5 次发生在空充母线过程中。故障前, GIL 通过了交接耐压试验,母线充电调试过程中断路器第一次合分闸均成功,后续再次合闸时发生故障。后续对全部对接面进行重新开盖点检清洁,未再发生放电。同时,通过对该站故障录波数据的深入分析发现(共有 3 次有效录波数据,另外 4 次故障时对应的电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)未接入录波系统),切除母线后,母线上分别产生了-410、429、-427kV 的残压,并在分闸后 2.2、2.4、33s 左右出现异常放电脉冲,随之在后一次空充母线或交流耐压中即发生绝缘子沿面放电。

从上述对比分析可以看到,该类故障共性特征主要表现为:

1) 所有故障绝缘子返厂进行 X 光和着色探伤,未发现异常;绝缘子表面擦拭后进行的常规电性能试验也均顺利通过,放电非绝缘件本体缺陷引起。

2) 故障 GIS/GIL 前期均通过出厂耐压和现场交接试验考核,并在调试中首次充电成功。故障均发生在后续再次合闸时或合闸后短时间内。

3) 故障 GIS/GIL 母线均未安装有 PT,同站安装 PT 的母线则未发生类似故障。在部分工程实践中,通过对多次发生类似故障的 GIS/GIL 加装 PT 或改变操作方式后,同类型故障未再发生。

4) 仿真和现场测试表明,发生故障的变电站/

换流站，投入 GIS/GIL 母线时，系统操作过电压、快速暂态过电压未超过允许值(见图 7)，系统未出现谐振过电压，满足绝缘配合标准规定。过电压不是导致故障的原因。

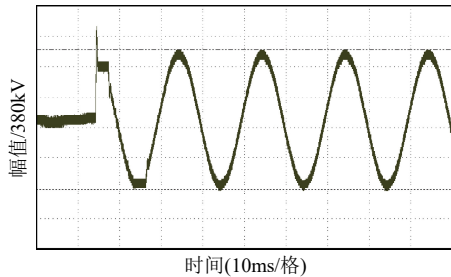


图 7 某特高压 GIS 断路器合闸暂态过电压  
Fig. 7 Transient overvoltage during circuit breaker closing in a UHV GIS

鉴于上述情况，分析认为该类交流 GIS/GIL 长母线故障可能与断路器开断后母线残余电压有关。

## 2 断路器分闸后母线残压下的异常放电

现场多次发现，故障发生的前一次断路器分闸后几秒至数十秒时间内，故障母线 CVT 监测到异常放电脉冲。为明确故障诱因，对该异常放电脉冲开展进一步分析。

### 2.1 断路器典型分闸波形解析

断路器切除长母线过程中，CVT 监测电压典型波形如图 8 所示。断路器分闸熄弧后，母线上残压等于熄弧点处的工频电压值。图 8(a)中可见，A 相残压为-131kV，B 相残压为 349kV，C 相残压为-435kV，最高可接近工频运行电压峰值。CVT 中间变压器饱和后，CVT 监测电压值迅速衰减。长母线上残压越大，CVT 中间变压器饱和点与熄弧点的时间间隔越小。分闸后，由于 CVT 本身特性限制，不能监测直流电压，残压下的监测值为零(见图 8(b))。

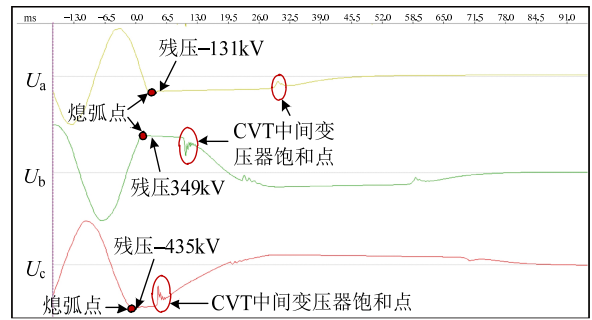
### 2.2 GIS/GIL 故障前后母线 CVT 监测波形分析

根据 CVT 监测数据，分析了 GIS/GIL 放电故障前后母线电压变化特性，主要分析发生放电故障的前一次断路器分闸后 CVT 监测电压情况。

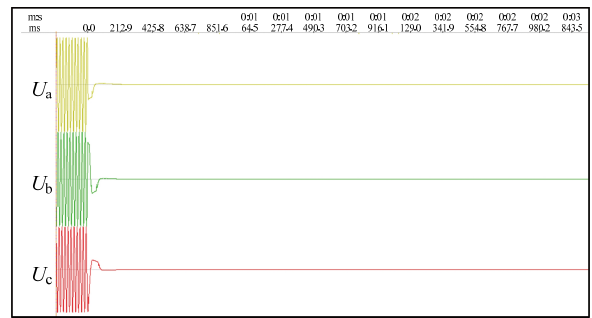
#### 2.2.1 某换流站 GIL 管母 B 相故障

某 500kV 换流站#62M GIL 调试期间，首先通过 5062 断路器对#62M GIL 充电，然后断开；接着用 5063 断路器对#62M GIL 充电时，B 相出现故障。

5062 断路器分闸时，#62M GIL 出线端 CVT 记录的电压波形如图 9 所示。图 9(a)中可见，5062 断路器分闸过程中电弧熄灭后，B 相残压最高，约为-410kV。如图 9(b)所示，在断路器分闸后约 2.2s 左右，B 相出现了异常放电脉冲，幅值与残压幅值相近，极性与残压相反。

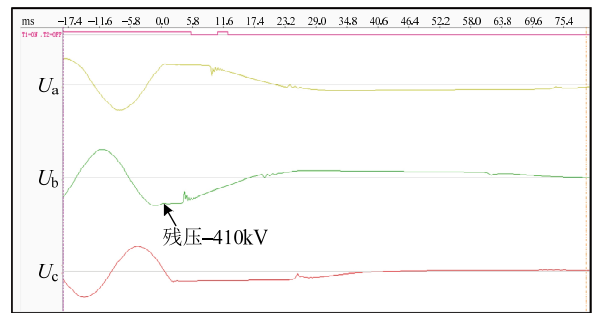


(a) 分闸过程

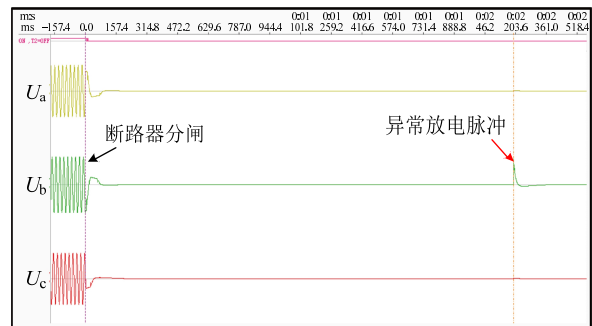


(b) 分闸后长时电压

图 8 GIS 断路器分闸过程 CVT 电压监测  
Fig. 8 Voltage monitoring of CVT during GIS circuit breaker opening



(a) 分闸过程



(b) 分闸后

图 9 5062 断路器分闸后的 CVT 电压监测波形  
Fig. 9 Voltage monitoring of CVT during 5062 circuit breaker opening

#### 2.2.2 某换流站 GIL 管母 A 相故障

某 500kV 换流站调试过程中，#62M GIL B 相发生击穿，5063 断路器跳闸；B 相故障清除后再次耐压时，升压至约 270kV 时，A 相发生放电故障。B 相故障时 5063 断路器分闸后 CVT 监测电压波形如图 10 所示。图 10(a)中可见，5063 断路器分闸后，A 相残余电压最高，约为 429kV。如图 10(b)所示，

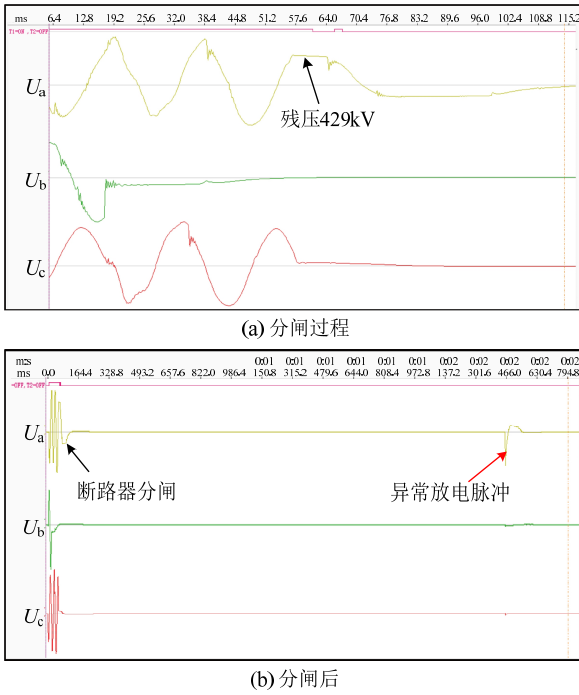


图 10 5063 断路器分闸后的 CVT 监测波形  
Fig. 10 Voltage monitoring of CVT during 5063 circuit breaker opening

分闸后约 2.4s 后，A 相出现异常放电脉冲，幅值与残压幅值相近，极性与残压相反。

### 2.2.3 某换流站分支母线 C 相故障

在某 500kV 换流站开展第六串中开关联锁试验中，首先拉开 5061 开关，接着拉开 5063 开关，5062 开关因中开关联锁跳闸。随后，再合上 5061 开关时，5061 和 5062 开关之间的出线分支母线 C 相发生故障击穿。拉开 5063 开关时，分支母线出线端的 CVT 记录到的电压波形如图 11 所示。图 11(a)中可见，5063 断路器分闸过程中电弧熄灭后，C 相分支母线上的残压最高，约为-427kV。如图 11(b)所示，在 5063 断路器分闸，工频电压消失 35s 之后，C 相出现了异常放电脉冲。异常放电脉冲幅值与残压相近，极性与残压相反。

通过上述分析可以看到：

- 1) 发生故障的前一次断路器分闸后，长母线上存在直流残压；分闸后 1min 以内，CVT 监测到异常放电脉冲，幅值与残压接近，极性与残压相反。
- 2) 出现异常放电脉冲的长母线残余电压水平较高，最小残余电压值为 410kV。

由此说明，断路器分闸后的异常放电脉冲与直流残压有直接关系。

### 2.3 分闸后 CVT 监测波形中异常放电脉冲成因

如图 12(a)所示，运行状态(或充电状态)下，分支母线带电。如图 12(b)所示，断路器断开，分支母线与系统电源断开，分支母线上存在残余电压。

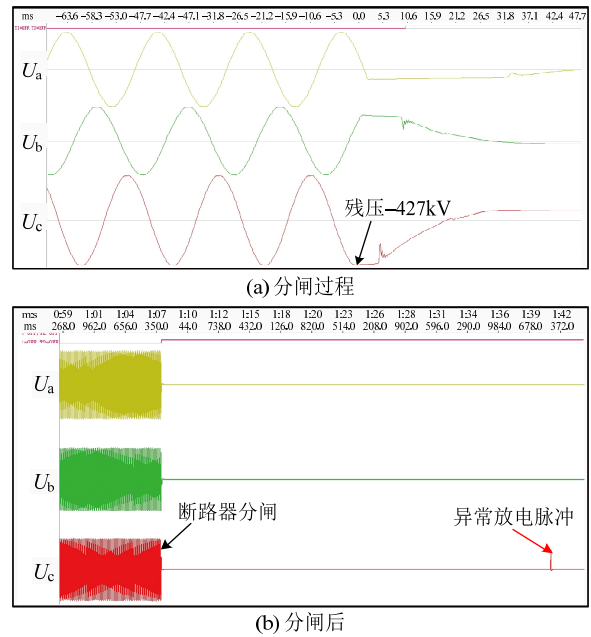


图 11 开关联锁试验中 5063 断路器分闸后的 CVT 监测波形  
Fig. 11 Voltage monitoring of CVT during 5063 breaker opening in the switch interlock test

如图 12(c)所示，若残压下分支母线发生对地放电击穿，产生的暂态电流将以对地电容和 CVT 为回路流通，同时 CVT 铁磁单元绕组中也将流过暂态电流，此时 CVT 监测到异常放电脉冲。若分支母线残压为正极性，则放电时 CVT 测量到异常脉冲将为负极性，与现场实际测量结果一致。

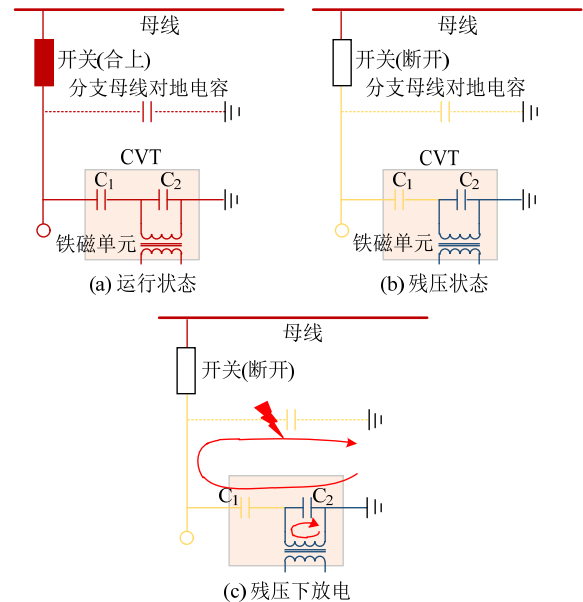


图 12 系统工况和残压下异常放电脉冲过程  
Fig. 12 System condition and abnormal discharge pulse under residual voltage

### 3 交直流交替作用下绝缘沿面放电诱因

相应产品的电场设计校核、绝缘裕度试验表明设备内部场强和绝缘裕度符合要求。故障后开展的电性能试验也表明，放电非绝缘件本体缺陷引起。

仿真和实测显示,投入 GIS/GIL 母线时,系统操作过电压、快速暂态过电压未超过要求值,系统未出现谐振过电压,变电站/换流站整体过电压水平在绝缘配合标准规定范围内。过电压也不是导致该类故障的原因。

交流 GIS/GIL 内,断路器开断空载长母线时,通常在交流电压峰值附近熄弧,空载母线上将存在残余电荷,产生残余电压,其幅值约 0.6~1.0pu,最高接近工频峰值。若母线上没有残余电荷泄放通道(例如 PT),残压将长时存在,保持到下一次合闸操作。如图 13 所示,断路器分闸后,未安装 PT 的母线残余电压接近工频电压峰值,未见明显衰减。

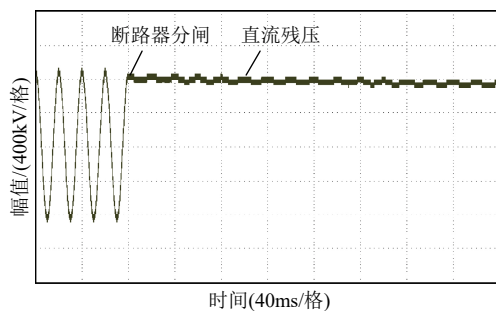


图 13 断路器分闸后空载母线电压变化

Fig. 13 Voltage of the no-load busbar after the circuit breaker opening

发生放电故障的 GIS/GIL 均通过了出厂和现场交接耐压试验,充电调试过程中断路器第一次合分闸也均成功,但后续再次合闸时或合闸后短时间内即发生绝缘子沿面闪络故障。在多次故障中,还观察到这样的现象:在发生故障的前一次断路器分闸后几秒至几十秒内,CVT 监测到异常放电脉冲;断路器再次合闸时,即出现放电故障。耐压试验电压远高于调试运行电压,且故障均发生在断路器合分闸之后,说明故障不仅与交流电压有关,还与断路器分闸后直流残压下的异常放电有关。

此外,故障后的盆式绝缘子表面大面积强烈放电痕迹附近都有一条细的放电痕迹(见图 6),这与数千安培接地电流的放电痕迹不一样。该细线型放电痕迹为瞬态低能量放电痕迹,为直流残压作用下的放电产生。

综上所述,结合现场故障共性特征和故障工况分析,调试过程中发生的故障原因可归结为:GIS/GIL 内金属异物等缺陷在直流残压下发生瞬态低能量放电,导致沿面绝缘性能下降,在后续交流电压作用下引发放电故障。直流残压作用下,交流 GIS/GIL 绝缘子沿面电场分布改变,同时绝缘子表面电荷积聚,绝缘裕度降低。此外,直流残压下,绝缘件附近金属微粒起跳并可能附着在绝缘件表

面,降低绝缘件耐受能力。金属微粒和表面电荷等因素共同作用,引发绝缘表面异常放电或弱击穿(直流残压能量有限,放电相对轻微),绝缘表面残留放电痕迹,导致绝缘性能受损。后续断路器再次合闸时,在交流电压作用下绝缘表面缺陷和放电痕迹进一步发展,最终引发沿面闪络故障。是否引起最终的闪络,则取决于断路器分闸后直流残压大小、直流残压作用时间及绝缘子表面状态等因素。直流残压低、GIS/GIL 内无缺陷,则即使承受交直流电压交替作用,也不会发生故障。安装有 PT 的交流 GIS/GIL,母线残余电荷快速释放,不存在直流残压下绝缘子表面微缺陷引起的弱击穿,避免了后续合闸时或合闸后缺陷进一步发展引起的沿面闪络故障。

#### 4 交直流交替作用下沿面故障复现试验

上述分析表明,母线残余电压是引发故障的重要因素。在残压下,母线发生异常放电,导致绝缘受损,后续系统再次带电即发生故障。此外,现场还发现,在多次发生故障的 GIS/GIL 内,通过重新开盖点检清洁后,未再发生放电,表明内部异物也是放电的重要诱因。为此,基于现场故障工况和故障诱因分析,开展了故障模拟复现试验验证。

##### 4.1 试验平台

如图 14 和 15 所示,建立交直流电压交替作用试验平台,主要由直流电源、交流电源、试验工装、被试品构成。直流电源采用最大直流电压 800kV 下最大 20mA 电流输出的倍升直流发生器。交流电源最高试验电压 1100kV。试验工装由 2 个 550kV 套管、2 台 550kV 隔离开关与接地开关及 T 形母线构成。两只套管分别连接交、直流电源,隔离开关用于实现交直流电源交替切换。被试品与 T 形母线对接,分别连接至交、直流电源。如图 14(b)所示,被试品采用 2 段 1.5m 长 GIL 试验段,包含 2 个固定三支柱绝缘子,2 个滑动三支柱绝缘子。试验时,试品气室充入 SF<sub>6</sub> 气体(表压为 0.5MPa)。

##### 4.2 试验加压流程

为模拟现场条件下交直流电压交替作用,采用图 16 和表 1 所示的试验加压流程。交流电压施加过程参照 550kV GIS/GIL 耐压流程,直流电压最高电压幅值为 450kV (交流运行电压峰值)。

##### 4.3 无缺陷试品试验

按厂内操作规范用酒精和真丝布分别清洁绝缘件和导体表面,保持试验 GIL 内洁净无异物。按照上述加压流程,进行洁净无缺陷状态下 500kV 三支柱绝缘件的交直流交替作用试验。结果表明,洁

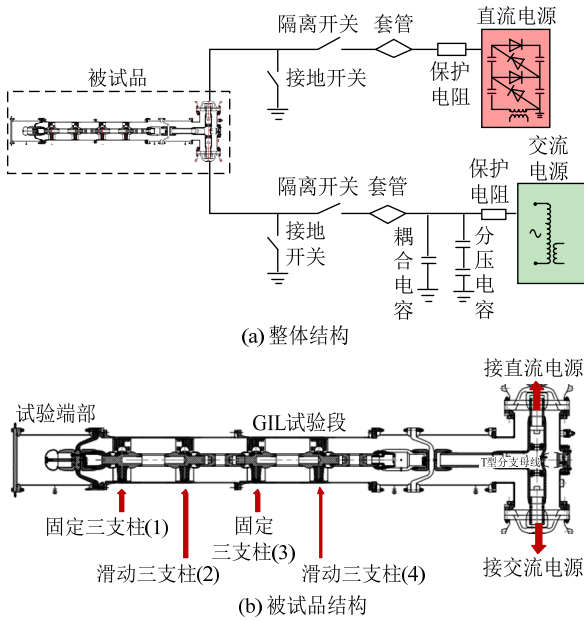


图 14 试验平台示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the experiment platform

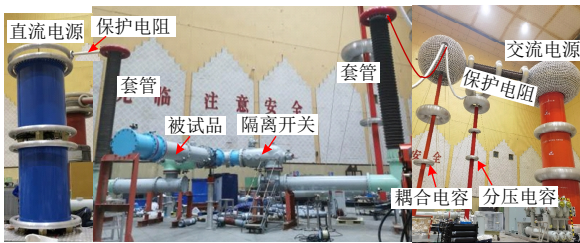


图 15 实验平台实物图

Fig. 15 Photo of the experiment platform

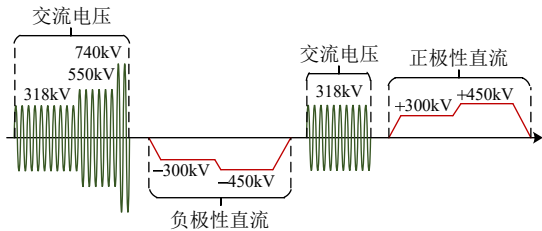


图 16 厂内复现试验交直流电压交替作用示意图

Fig. 16 Schematic diagram of alternating AC and DC voltage application in the factory reproduction test

表 1 试验加压流程

Table 1 Test voltage application

电压形式	电压幅值及持续时间
AC	318kV/5min—550kV/3min—740kV/1min
-DC	300kV/5min—450kV/5min
AC	318kV/5min
+DC	300kV/5min—450kV/5min

净状态下，交流 740kV 及直流±450kV 电压下，绝缘件均未发生放电。

#### 4.4 真丝布擦拭导体后擦拭绝缘子表面

采用真丝布擦拭导体后再擦拭三支柱绝缘子支腿表面，模拟现场可能出现的混擦情况。如图 17 所示，分别在两支三支柱绝缘子支腿 1/2 部位和根部模拟上述缺陷。

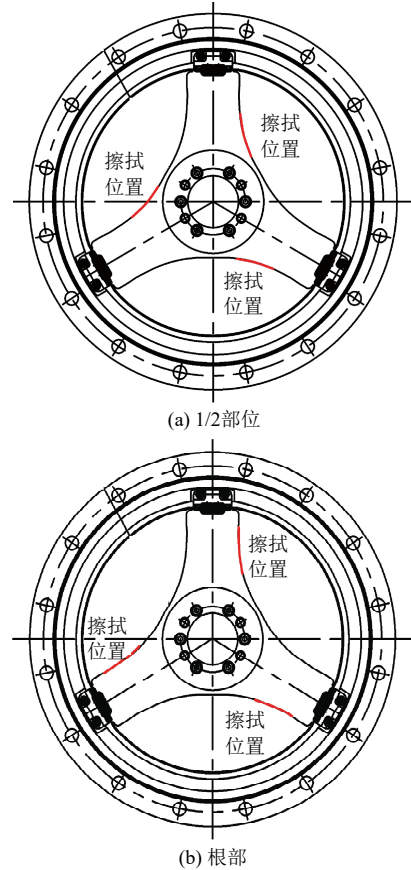


图 17 真丝布擦拭三支柱缺陷设置示意图

Fig. 17 Defect setting for wiping insulator with contaminated silk cloth

缺陷设置完成后，开展交直流电压交替作用试验，具体加压流程如表 2 所示。施加负极性直流电压至 300kV 时发生放电。放电绝缘件为图 17(a)所示绝缘件。如图 18 所示，闪络痕迹大致沿合模缝从低压侧向高压侧发展，并在绝缘子腹部位置拐向高压电极，闪络痕迹与现场故障相似。

表 2 真丝布混擦缺陷试品加压试验结果

Table 2 Test results of insulators wiping with contaminated silk cloth

电压形式	电压幅值及持续时间
AC	318kV/5min—550kV/3min—740kV/1min
-DC	300kV(试品放电)



图 18 真丝布混擦三支柱绝缘子引起的放电痕迹

Fig. 18 Discharge trace on tri-post insulator surface induced by mix-wiping with silk cloth

### 4.5 绝缘子表面及微粒捕捉器上金属微粒

如图 19 所示,选择 4 个三支柱绝缘子进行金属微粒缺陷设置。金属微粒分别设置在三支柱支腿根部、支腿中部、支腿靠近高压侧和微粒捕捉器上。其中,支腿表面缺陷为 B8 中掺入微米级金属微粒后涂抹在绝缘子表面,见图 20(a);微粒捕捉器上缺陷为 2~5mm 金属微粒,见图 20(b)。

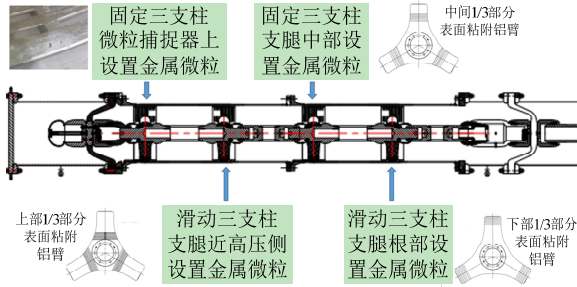


图 19 金属微粒缺陷设置示意图

Fig. 19 Schematic diagram of metal particle setting

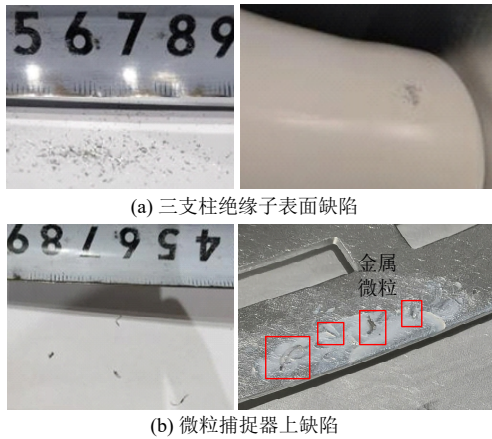


图 20 金属微粒缺陷设置

Fig. 20 Metal particle defect setting

缺陷设置完成后,进行交直流电压交替作用试验,具体加压流程如表 3 所示。在施加负极性直流电压时,电压升高至 400kV 后 5min 左右发生试品放电;后续施加正极性直流电压至 370kV 时发生第二次试品放电。

表 3 金微粒缺陷试品加压试验结果  
Table 3 Test results of metal particle defects

电压形式	电压幅值及持续时间
AC	318kV/5min—550kV/3min—740kV/1min
-DC	300kV/5min—350kV/5min—400kV/5min (5 分钟末试品放电)
AC	318kV/5min
+DC	100kV/1min—300kV/2min—370kV (试品放电)

试验后发现,共有两个绝缘子发生放电,分别如图 21 所示。发生放电的分别为微粒捕捉器上和支腿中部设置缺陷的三支柱绝缘子。缺陷在微粒捕捉器上时,闪络发生在 12:00 方向支腿侧面,放电痕迹曲折;试验后发现设置在微粒捕捉器上的金属微粒缺失,确认为试验过程中发生起跳运动吸附到

绝缘表面,引发放电。缺陷在支腿中部时,闪络痕迹大致沿合模缝从中部缺陷处向两侧(低压和高压)发展,并在靠近绝缘子腹部位置分叉,拐向高压电极,闪络痕迹与现场故障相似。

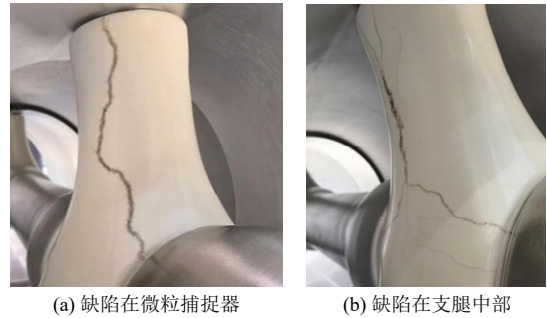


图 21 金属异物引起的三支柱绝缘子表面放电痕迹  
Fig. 21 Discharge trace on tri-post insulator surface induced by metal particles

复现试验表明,在交流电压和正负极性直流电压交替作用下,洁净绝缘子未发生放电。真丝布擦拭导体后擦拭绝缘子表面以及绝缘子支腿中部和微粒捕捉器上设置金属微粒的情况下,三支柱绝缘子能通过 740kV 工频耐压试验,但在后续施加直流电压时发生异常放电,放电电压均未超过 400kV,低于现场可能出现的直流残压最大值(450kV)。直流电压下释放能量较小,直流闪络痕迹较交流闪络痕迹更细小。直流闪络痕迹与图 6 所示大面积强烈放电痕迹旁边较细的放电痕迹类似。此外,对比图 18 和图 21 可知,闪络电压越低,闪络痕迹越细、越浅,这主要也与直流下的能量释放较少有关。

工厂复现试验说明,当存在金属异物或绝缘件导体混擦等缺陷时,GIS/GIL 能通过交流耐压试验,但可能在直流残压下发生沿面放电,这进一步印证前述故障诱因猜想。即现场调试过程中的故障是由 GIS/GIL 内部微小缺陷在交直流交替作用下发生放电引起。

## 5 讨论

超/特高压 GIS/GIL 电场设计均具有一定绝缘裕度,若设备内部无缺陷,合空载母线操作过程中的直流残压、过电压等均难以引发放电。厂内复现试验也证明了这一点。因此,现场发生该类故障主要有两点原因共同作用:一是设备内部存在金属异物等缺陷;二是设备承受直流残压作用。因此,故障抑制措施可从上述两方面入手,主要有:

1) 控制设备内部金属异物。严格执行现场标准化安装和清洁工艺,避免引入外部异物,避免导体和绝缘件混擦(即避免擦拭导体后的真丝布擦拭绝缘件)。

2) 母线带高抗或变压器转热备用。利用高抗或变压器来泄放断路器分闸后的母线残余电荷, 从而避免母线长时间承受直流残压。如图 22 所示, 带线路高抗分合闸后, GIS 母线电压快速衰减至零。

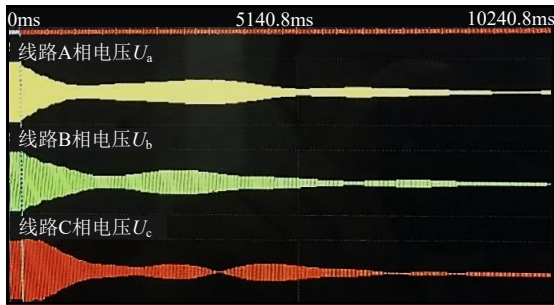


图 22 带线路高抗分闸后母线电压变化

Fig. 22 Voltage of busbar after opening of the line with high resistance

3) GIS/GIL 长母线三相均加装 PT。如图 23 所示, 利用 PT 在直流残压下迅速饱和的特点释放母线残余电荷, 消除母线直流残压。

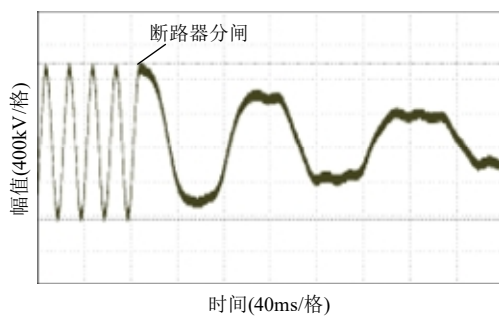


图 23 断路器分闸后带 PT 的 GIS 母线电压

Fig. 23 Voltage of busbar with PT after circuit breaker opening

4) 研究掌握该类故障机理及检测方法。分析交流 GIS/GIL 产生直流残压的具体工况及位置; 分析不同能量残余电荷(不同母线长度情况)沿绝缘子表面释放对绝缘子绝缘性能损伤程度; 研究交流 GIS/GIL 交直流交替现场试验检测方法, 提前发现设备内部缺陷。

## 6 结论

近年来超/特高压 GIS/GIL 多次发生通过交接试验后调试运行过程的绝缘沿面放电故障。文中通过典型故障对比分析, 获得该类故障共性特征为: 均通过出厂和交接耐压试验, 均发生在母线第二次及以后带电过程中, 均发生在未安装 PT 的相别, 系统过电压水平均满足设计要求。

基于故障特征分析, 开展了故障复现试验。结果表明, 洁净绝缘子在工频耐压和正负极性直流电压交替作用下为发生放电; 导体和绝缘子混擦、绝缘子或微粒捕捉器表面存在金属微粒情况下, 三

柱绝缘子能通过 740kV 工频耐压试验, 但在后续施加直流电压时发生闪络, 闪络电压不超过 400kV。复现试验现象与现场故障一致, 说明现场类似故障可能是由微小缺陷在交直流交替作用下引起。即 GIS/GIL 内金属异物等缺陷在直流残压下发生微放电, 导致沿面绝缘性能下降, 在后续交流电压作用下引发放电故障。

针对金属异物和直流残压耦合作用的故障诱因, 文中提出了控制设备内部金属异物、长母线带高抗或变压器分闸、长母线三相均加装 PT 等故障防范抑制措施。同时, 后续应加强交直流交替作用下交流 GIS/GIL 沿面故障机理及检测方法研究, 提前发现潜在缺陷, 提高设备可靠性, 保障设备顺利投运。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-A technology milestone[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, 22: 60-82.
- [2] 李鹏, 李志兵, 孙倩, 等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计[J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3305-3312.  
LI Peng, LI Zhibing, SUN Qian, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3305-3312(in Chinese).
- [3] KOCH H. Gas insulated transmission lines (GIL)[M]. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2012.
- [4] GREMAUD R, DOIRON C B, BAUR M, et al. Solid-gas insulation in HVDC gas-insulated system: Measurement, modeling and experimental validation for reliable operation[R]. Paris: CIGRE, 2016.
- [5] 陈锋, 陈石毅, 汪宇轩, 等. 基于动态电弧模型的 GIL 接地电流特性研究[J]. *电网技术*, 2025, 49(4): 1717-1725.  
CHEN Feng, CHEN Shiyi, WANG Yuxuan, et al. Study on GIL grounding current characteristics based on dynamic arc model[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(4): 1717-1725(in Chinese).
- [6] 黄蕾, 唐悦, 茅鑫同. 电力“蛟龙”过江 华东特高压环网闭环[N]. *国家电网报*, 2021-12-20(002).
- [7] ERIKSSON A, PETERSSON K G, KRENICKY A, et al. Experience with gas insulated substations in the USA[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(1): 210-218.
- [8] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation (GIS)[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. San Francisco: IEEE, 2005: 920-926.
- [9] 高克利, 颜湘莲, 王浩, 等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3105-3113.  
GAO Keli, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL)[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(10): 3105-3113(in Chinese).
- [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] 张瑞霖, 张悦, 孙晓兰, 等. 基于可变形卷积与自监督对比学习的 GIS 局部放电诊断方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5022-5033.  
ZHANG Ruilin, ZHANG Yue, SUN Xiaolan, et al. GIS Partial Discharge Diagnosis Method Based on Deformable Convolution and Self-supervised Contrastive Learning[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5022-5033(in Chinese).
- [12] 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, 2024, 44(4): 1629-1648(in Chinese).
- [13] 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).
- [14] 胡新文, 李晓昂, 王舒啸, 等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 339-348.  
HU Xinwen, LI Xiaolang, WANG Shuxiao, et al. Free metal particles movement and its induced gap breakdown characteristics in GIS under impact vibration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 339-348(in Chinese).
- [15] 李庆民, 魏来, 薛乃凡, 等. 交直流 GIS/GIL 微纳粉尘可视化探测技术研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3607-3624.  
LI Qingmin, WEI Lai, XUE Naifan, et al. Research advances in visualization detection technology of micron-nano dust in AC and DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3607-3624(in Chinese).
- [16] LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Surface charge accumulation and pre-flashover characteristics induced by metal particles on the insulator surfaces of 1100 kV GILs under AC voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 134-142.
- [17] 庞曦, 许天蕾, 刘鹏, 等. 考虑温度梯度的高压直流 GIL 盆式绝缘子空间电荷仿真[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1014-1024.  
PANG Xi, XU Tianlei, LIU Peng, et al. Space charge simulation for basin insulator of high voltage DC GIL considering temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1014-1024(in Chinese).
- [18] 马径坦, 赵军平, 游浩洋, 等. GIS 支撑绝缘子表面状况对其雷电冲击闪络特性的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 63-69.  
MA Jingtian, ZHAO Junping, YOU Haoyang, et al. Influence of surface conditions on flashover characteristics of supporting insulators in GIS under lightning impulse[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 63-69(in Chinese).
- [19] 罗远, 齐波, 杨霄, 等. GIS 盆式绝缘子表面微弱放电的光学检测方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4377-4386.  
LUO Yuan, QI Bo, YANG Xiao, et al. Study on optical detection method of the surface weak discharge of gis basin insulator[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4377-4386(in Chinese).
- [20] OKABE S, UETA G, UTSUMI T, et al. Insulation characteristics of GIS insulators under lightning impulse with DC voltage superimposed[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 1-9.
- [21] 马径坦, 张乔根, 吴治诚, 等. 直流叠加冲击电压对 GIS 中自由导电微粒检测的有效性[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 737-742.  
MA Jingtian, ZHANG Qiaogen, WU Zhicheng, et al. Effectiveness of detecting free conductive particle in GIS using impulse voltage with DC superimposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 737-742(in Chinese).
- [22] 操松元, 张贵富, 傅中, 等. 直流叠加冲击电压时 GIS 母线闪络特性[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 208-214.  
CAO Songyuan, ZHANG Guifu, FU Zhong, et al. Flashover characteristics of GIS busbar under DC superimposed impulse voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 208-214(in Chinese).
- [23] 吴细秀, 李园芳, 杨馨, 等. SF6/N2 介质条件下 GIS 隔离开关操作动态击穿特性研究及其操作过电压的计算[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1742-1751.  
WU Xixiu, LI Yuanfang, YANG Xin, et al. Dynamic breakdown characteristics of GIS disconnecting switch operation and its calculation of operating overvoltage in SF6/N2 medium[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1742-1751(in Chinese).



李星

在线出版日期: 2025-07-04。

收稿日期: 2024-11-22。

作者简介:

李星(1994), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压电器设备状态监测与智能诊断、绝缘故障机理、设备智能化等, E-mail: lx1230716@163.com;

丁登伟(1985), 男, 通信作者, 博士, 教授级高工, 研究方向为电器设备状态监测、设备智能化等, E-mail: sunnyall123@126.com。

(责任编辑 李健一)