

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.027

## 微粒缺陷引发220 kV GIS绝缘击穿事故分析及预防措施

雷志城, 黄烜城, 黄涛, 陈敏哲, 刘雨, 石仁强

(江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102)

**摘要:** GIS作为电力系统的关键设备之一,其运行的安全可靠至关重要。对某电厂一起220 kV GIS电缆仓内绝缘击穿事故进行分析,根据故障录波图判断,该事故为先发生了单相接地短路,而后发展为三相短路故障。综合解体和检测情况,复原事故过程为:运行过程中,气室内有异物掉落,进入电缆仓内强电场区域,使电场分布畸变,进而引发单相击穿;由于电缆仓和接地开关气室之间未设置气隔盒子,导致单相击穿后的金属融化液飞溅至接地开关支撑盆子上,引发事故扩大,发生三相短路。吸取该事故教训,提出选用不锈钢吸附剂盒、合理预留GIS内部非标部件绝缘裕度、加强设备状态巡检和评估等预防措施,为后续GIS的安全运行和设计优化提供实践依据。

**关键词:** GIS绝缘击穿; 解体分析; 异物掉落; 电场畸变; 预防措施

### Analysis and Preventive Measures of Insulation Breakdown Accident Caused by Particle Defects in 220 kV GIS

LEI Zhicheng, HUANG Xuancheng, HUANG Tao, CHEN Minzhe, LIU Yu, SHI Renqiang

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** GIS is one of critical equipment of power system and its safe and reliable operation is very important. The insulation breakdown in cable compartment of 220 kV GIS in a power plant is analyzed. It is concluded by the judgement of the fault recording diagram that single-phase grounding short circuit occurs firstly, followed by the three-phase short circuit. Based on the disintegration and detection, the accident process is analyzed as follows: during operation, foreign particle drops in the gas compartment and enters into the strong electric field area of the cable compartment, leading to electric field distribution and single-phase breakdown. Since no insulating barrier is set between the cable compartment and the gas compartment of disconnector, the molten metal splashes onto the support spacer of the earthing switch after a single-phase breakdown, leading to the escalation of the accident and resulting in a three-phase short circuit. Drawing lessons from the accident, such preventive measures as selecting stainless steel adsorbent box, reasonably reserving insulation margin of non-standard parts in GIS, strengthening patrol inspection and assessment of equipment status are proposed so to provide practical basis for safe operation and design optimization of GIS in the future.

**Key words:** insulation breakdown in GIS; disintegration analysis; dropped particle; electric field distortion; preventive measures

## 0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)具有占地面积小、可靠性高、维护工作量小等优点,应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>。在GIS设备的制造、运输安

装、运行过程中,由于清理不彻底、振动磨损等因素,GIS设备内部不可避免地会出现各类自由微粒如灰尘、漆皮、金属碎屑等<sup>[5-9]</sup>。对于GIS设备内部的稍不均匀电场而言,这些微粒,尤其是金属微粒极易畸变电场,引发GIS设备内部击穿,降低安全供电

可靠性<sup>[10-17]</sup>。

文中对某电厂一起220 kV GIS电缆仓内绝缘击穿事故进行分析,通过现场测试、拆解检测和仿真分析等手段,追溯事故原因,判定事故根源主要为GIS气室内异物掉落,进而从安装运维、结构设计等方面提出有效的预防措施。

## 1 现场事故描述

### 1.1 事故概述

某电厂装机为2×350 MW 超临界机组,2号机组

大修结束后,于2023年1月3日15时55分并网;17时30分,2号机组负荷80 MW;17时37分,发变组保护主变差动保护动作,2号机跳闸,机组停运。

### 1.2 设备情况

该厂发电机出口无断路器,发电机与主变压器用离相封闭母线相连接,发电机励磁方式为静态励磁,主变、启动变高压侧均采用GIS开关。

此次事故发生在2号机主变进线间隔的接地开关气室,见图1中所示位置。

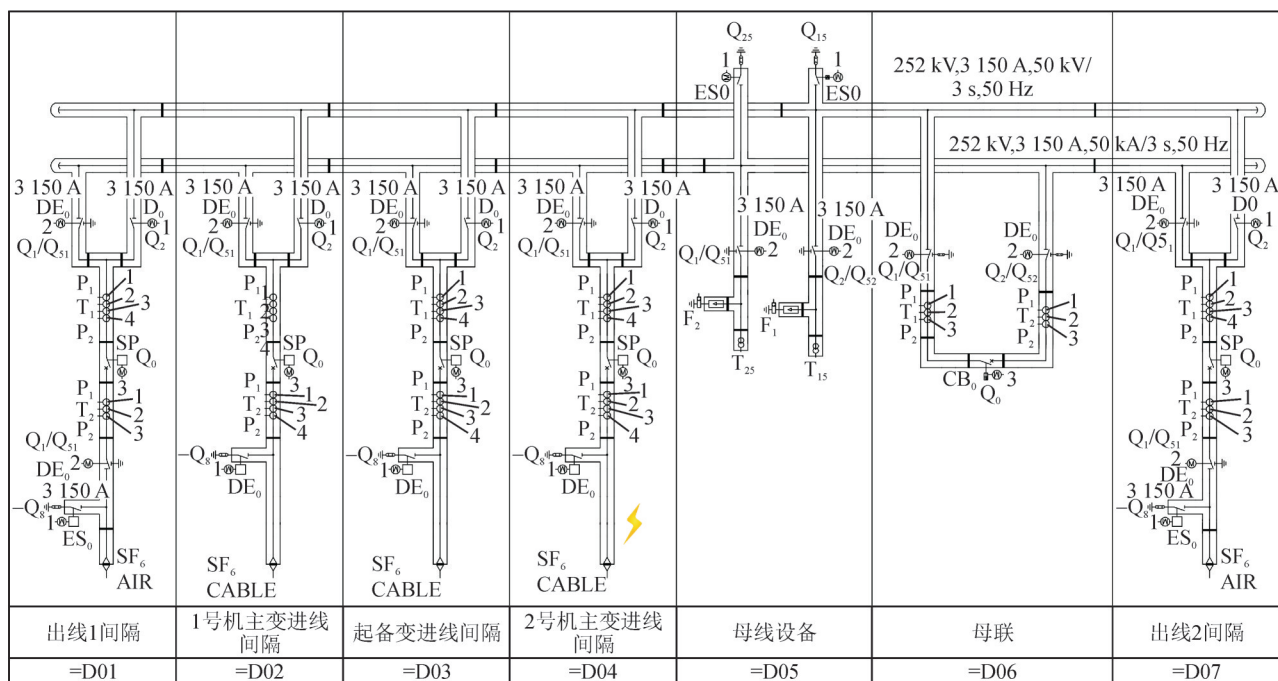


图1 系统运行方式及事故部位

Fig. 1 System operation mode and accident location

## 2 现场检查情况

### 2.1 现场就地检查

对主变进行绝缘电阻测量,未拆除主变高压侧引线,测量2号主变高压侧绝缘为40 kΩ;拆除高压引线后,主变高压侧对地绝缘为62 GΩ,高压引线A相对地绝缘为0,B相对地绝缘为15 GΩ,C相对地绝缘为0。

### 2.2 主变差动保护动作情况

一次系统故障点在GIS侧高压电缆头气室内,该点在主变差动保护范围内,保护动作正确,检查机组故障录波,见图2(CT:1 500/1)。

1)发电机出口二次电流由1.9 A突升至:A相6.57 A,B相5.92 A,C相无明显变化,持续时间约为

96 ms(4个周波)。

2)GIS 2号主变高压侧B相二次电压由60 V降至0,故障持续约96 ms后,A、C相也同时降至0,持续8 ms后,A相恢复,持续8 ms后,主变高压侧开关跳开,A、B、C三相均恢复,整个过程持续约112 ms。

3)GIS 2号主变间隔B相二次电流由0.2 A突升至11 A,其他两相无明显变化,持续96 ms后;A相上升至3.4 A,持续8 ms;B相降至6.0 A,持续16 ms;C相上升至8.8 A,持续14 ms。

4)在开关跳开时故障点已发展为三相短路故障,由于无发电机出口断路器,开关跳开后发电机残压继续通过主变向故障点供电,机端电压衰减至10%时间约为1 s,期间机端二次电流最大约11 A,三相电流基本相等。机端电压衰减至10%时的机端二次电流约为2 A。

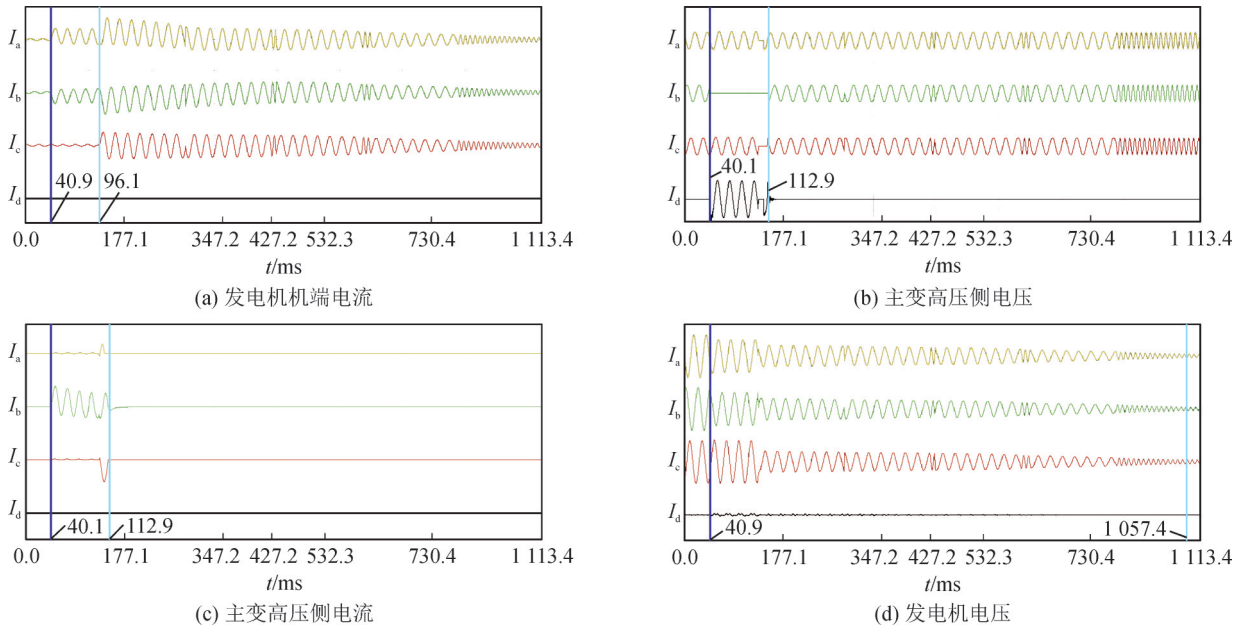


图2 机组故障录波情况

Fig. 2 Fault recording of generator set

### 3 故障气室拆解分析

#### 3.1 拆解部件检查

将B相电缆终端从电缆筒底部脱开时,有金属异物脱落,且在其附件沿着筒壁边沿有分布较为密集的烧蚀点,见图3。

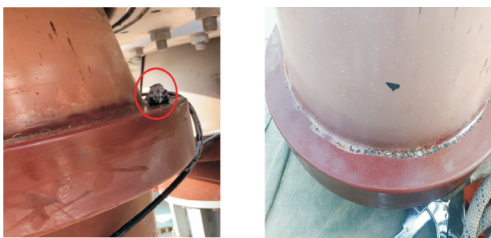


图3 金属异物脱落及其附近分布的烧蚀点

Fig. 3 Ablative point of metal foreign body shedding and distribution near it

三相电缆筒中A、C相未见明显异常情况,在B相电缆筒内壁发现有两处击穿孔,呈竖直方向分布,见图4。其中,位于电缆筒上方的击穿孔,孔径较大,四周主要分布灰白色粉末伴随少量黑色粉末;下方的击穿孔,孔径相对较小,四周分布粉末范围更广,且由中心向四周颜色分布为灰黑色—灰白色—黑色。

吸附剂盒位于B相电缆筒的侧上方,靠近接地开关触头绝缘盆附近。打开吸附剂端盖后,发现吸附剂盒网兜烧毁,骨架存在一定程度融化,仅残留部分吸附剂颗粒及其粉末,见图5。

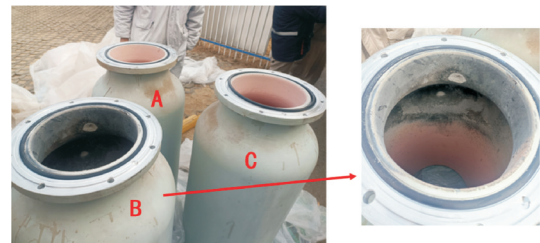


图4 B相GIS电缆筒内壁的两处击穿孔

Fig. 4 Two breakdown holes in the inner wall of B-phase GIS cable tube

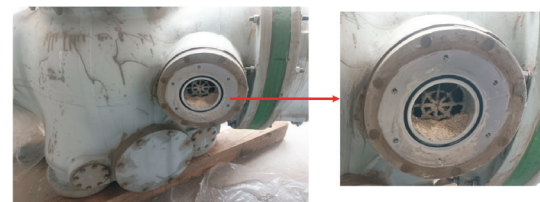


图5 烧毁的吸附剂盒

Fig. 5 Burnt out adsorbent box

根据现场检查,接地开关气室底部、导杆上方、均压罩上方均有不同程度的粉末积聚,主要为灰白色,底部粉末堆积最厚且存在结块状的粉末,导杆及均压罩上方的粉末较细,且积聚相对较薄,见图6。

B相电缆连接杆上方靠近接地开关触头绝缘盆的筒壁上,发现自下而上的高温金属液飞溅痕迹,见图7。

对导体连杆进行检查,A、C相电缆连接杆及均压罩完好,未见明显异常;B相电缆连接杆及均压罩部分烧蚀严重,表面有粉尘积聚。电缆连接杆及均压罩上有燃弧烧蚀痕迹,与GIS筒内壁上的两处击

穿孔相对应,见图8。



(a) 侧边观察 (b) 顶部观察

图6 接地开关气室内部粉末散落情况

Fig. 6 Powder scattering in the grounding switch gas chamber

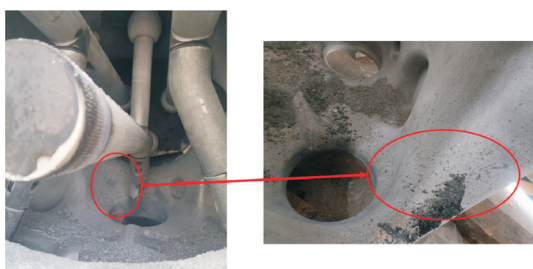


图7 高温金属液的飞溅痕迹

Fig. 7 Splash marks of liquid metal at high temperature

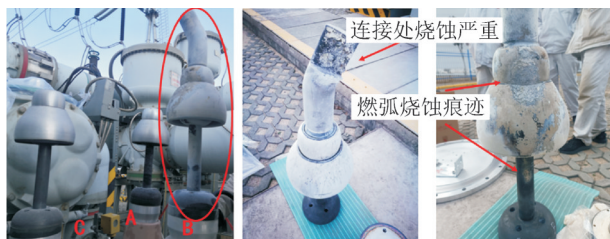


图8 导体连杆检查

Fig. 8 Conductor connecting rod

在拆除快速接地开关操动机构后,将GIS端盖取下,发现接地开关触头绝缘盆上部(A、C相)和其对应的端盖上部附着黑色粉末,A、C相接地开关触头上方堆积较多的黑色粉末,而B相接地开关触头上方堆积相对较少的黑色粉末,GIS端盖下部堆积大量黑色颗粒和粉末,见图9。



图9 快速接地开关操动机构侧端盖内部情况

Fig. 9 End cap situation over FES operating mechanism

将快速接地开关触头绝缘盆拆下,观察其靠近导杆侧的触头及绝缘盆情况,发现表面附有大量的黑色燃烧产物,且三相触头的位置底部有融化痕

迹;用无水乙醇擦拭干净后,发现三相间有多处明显的放电通道,见图10。

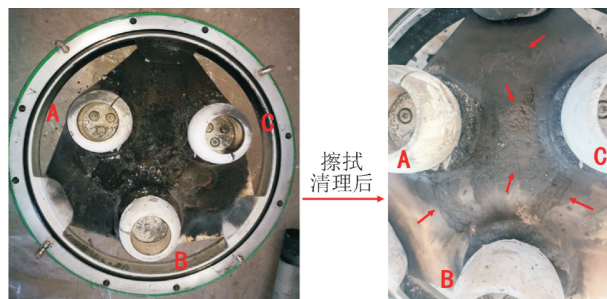


图10 接地开关触头绝缘盆放电通道

Fig. 10 Discharge channel of FES insulation basin

### 3.2 断裂螺栓检测

观察掉落螺栓残件,螺栓标注性能等级为8.8级。对螺栓正常母材区进行检测,螺栓硬度为295 HB,GB/T 3098.1—2010标准中对8.8级螺栓的硬度要求为245~316 HB,符合要求;根据螺栓检测的光谱结果,见表1,螺栓材质为添加元素的碳钢(添加元素为Mn),成分符合要求。

表1 螺栓的光谱检测结果

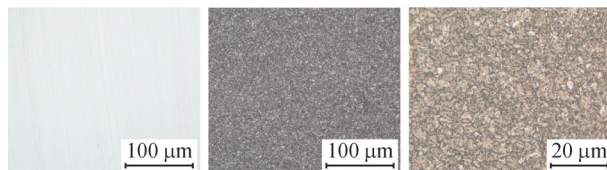
Table 1 Spectroscopic test results of bolts

元素	重量百分比	$\pm 2\sigma$
Cr	0.124	0.027
Mn	0.817	0.076
Fe	98.040	0.250
Nb	0.045	0.018
其他	0.910	0.011

螺栓的扫描电镜检测结果见图11,螺栓在长度方向上组织形貌见图11(a),可见明显完全相变与热影响区痕迹,说明螺栓断口附近经历了一次超高温(温度超过1 200 °C)循环。对未受热影响区域进行组织观察,主要形貌见图11(b)-(d),螺栓残件心部未见明显夹杂见图11(b),心部组织为索氏体,未见明显异常组织形貌见图11(c)、(d)。



(a) 组织形貌



(b) 心部组织

(c) 无异常组织1

(d) 无异常组织2

图11 螺栓的金相观察结果

Fig. 11 Metallographic observation results of bolt residuals

### 3.3 粉末成分检测

对气室内部粉末成分检查是判别击穿过程中参与物质的重要手段。气室内主要存在以下物质：作为绝缘介质的 SF<sub>6</sub> 会产生 S 和 F 元素；铝合金材质的外壳会产生铝 Al、镁 Mg、锰 Mn 等元素；环氧材质的绝缘盆子主要会产生碳 C 和氧 O 元素；铜导杆和镀银层会产生铜 Cu 和银 Ag；不锈钢材质的螺栓会产生铁 Fe、锰 Mn、铬 Cr 等；分子筛吸附剂会产生硅 Si、铝 Al、钙 Ca、钠 Na 等。文中对 GIS 气室内各个位置散落的粉末进行采样检测，采样点 1 为图 9 左的触头上部，采样点 2 为图 6(b) 的导杆均压罩上部，采样点 3 为图 10 左的 FES 支撑绝缘盆子表面，采样点 4 为图 6(a) 的导杆上部。

GIS 气室内可能存在的异物主要有：充气过程中管路中的异物被带入隔离开关内部；动触头镀银层脱落；分合闸过程中触头和触指摩擦掉落金属碎屑；传动部位动作产生的异物；安装或检修期间遗落物品（沙粒、毛发、配件等）；吸附剂盒中泄露的吸附剂微粒<sup>[18]</sup>。螺栓的光谱检测结果见表 2，从表 2 可以看出，本次事故气室内粉末中发现的可疑成分主要为钙 Ca、硅 Si、铁 Fe，若是金属螺栓引发的击穿事故，应在气室内发现大量铁 Fe，可能存在锰 Mn、铬 Cr 等元素，而在 3.3 中的粉末检测结果来看，铁 Fe 成分占比微量，无铬 Cr 和锰 Mn 成分；其次，钙 Ca、硅 Si 为分子筛吸附剂的成分。因此，排除击穿事故是由螺栓掉落引发，存在吸附剂掉落的可能性较大。

表 2 螺栓的光谱检测结果

Table 2 Spectroscopic analysis results of bolts

元素	原子百分比/%				
	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5
C	33.89	24.49	74.44	24.62	29.03
O	0.00	0.00	2.33	7.28	1.88
F	52.60	59.40	18.65	50.95	53.99
Al	13.15	15.95	3.30	16.80	13.60
S	0.26	0.00	1.27	0.14	0.40
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
Fe	0.00	0.15	0.00	0.20	0.29
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20

### 3.4 仿真校验

利用有限元仿真分析软件对现场 B 相电缆支撑杆非标件和原厂配备的标准件进行电场分布对比，结果见图 12，上方小均压罩的最大电场强度均为 23.42 V/m，而采用标准支撑导杆件，均压罩边缘处的最大电场强度为 19.92 V/m，导体支撑杆上的最

大电场强度为 11.43 V/m；若采用非标件，同位置点的最大电场强度分别为 26.84、15.13 V/m。因此，可以看出，支撑导杆选择比标准件直径小的非标件时，对其设备内部电场分布影响较大。

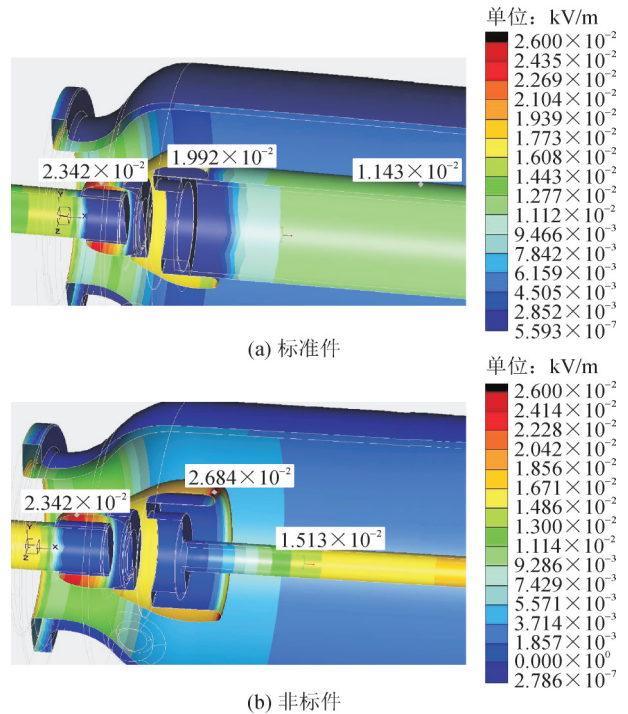


图 12 故障点处的电场分布校验

Fig. 12 Check of electric field distribution at the fault point

## 4 事故原因分析及预防措施

### 4.1 事故过程分析

根据本次故障发生时的故障录波图及现场检查情况，根据几个关键点进行如下分析：

1) 根据故障录波数据，可判断此次事故首先发生 B 相击穿，形成单相短路故障，在此过程中气室的整体绝缘水平劣化，接地开关绝缘子表面受到脏污，进而发展为三相金属短路故障。

2) 大修完成后，于 2022 年 12 月 20 日对 GIS 系统进行了 SF<sub>6</sub> 微水检测，GIS 2 号主变接地开关气室的微水检测，露点温度为 -32.2 ℃ (对应微水体积分数为 299.45 μL/L)，不大于电力行业标准 DL/T 596—2021 规定非灭弧气室 500 μL/L 的要求，且 SF<sub>6</sub> 分解物 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO、HF 均未检出<sup>[19]</sup>。因此在此次事故发生前，气室内部的 SF<sub>6</sub> 未发生劣化，绝缘良好，可以排除停电检修前气室内部存在长期过热或局部放电缺陷的可能。

3) B 相电缆筒壁上的两处击穿孔呈垂直方向分布，位于电缆支撑杆及其上方的均压罩附近，与图

12的仿真校核对比,确认其为气室故障点附近的电场最强处。但这两处的电场强度分布均匀,且绝缘未劣化的情况下,难以发生击穿,结合击穿孔竖直分布的特点,认为运行过程中有异物从上方掉落,在掉落的过程中在电缆支撑杆及其上方的均压罩与电缆筒壁之间碰触,或使气室内电场分布畸变,导致了绝缘击穿,发生B相短路接地。

4)B相击穿过程中,有高温金属液飞溅至开关绝缘盆上方,造成绝缘盆上的三相开关之间发生沿面闪络,使得三相导通,并在主变高压侧开关跳开后,由发电机残压为开关绝缘盆上的三相短路提供后续能量(约1 s),导致绝缘盆表面烧毁严重。该过程可由绝缘盆表面放电通道和故障录波图验证。

## 4.2 事故溯源

由于GIS气室的吸附剂盒材质为高强度聚丙烯材料,属于塑料材质,吸附剂为4A分子筛,吸附剂框采用网板结构。采用塑料材质的吸附剂盒存在下列问题:一是,随季节变化骤冷骤热易造成塑料材质老化,最终引起干燥剂盒破损;二是,吸附剂自身具有一定质量,对于在GIS顶部或侧面安装的吸附剂盒,长时间在吸附剂质量作用下易发生变形破裂;三是,塑料材质热膨胀系数大,金属材质热膨胀系数小,两者存在较大差异,在温度变化时,GIS金属壳体热胀冷缩程度要小于塑料吸附剂盒,在长期运行中吸附剂盒容易破损。

安装分子筛粒时,可能存在部分破损的分子筛颗粒,容易存在颗粒泄露的情况;或者安装过程中吸附剂受外力作用损伤、网兜开裂导致破碎的小颗粒或粉末状吸附剂泄露,这些掉落物将可能破坏GIS系统内的电场。因此,认为造成此次绝缘击穿事故的掉落异物可能是吸附剂或安装过程中遗留的其他金属粉尘颗粒。

## 4.3 事故过程复原

该220 kV GIS快速接地开关气室发生绝缘击穿事故,认为是有异物落入至B相电缆筒中(可能是由于安装期间吸附剂盒网布因外力损伤开裂导致破碎的吸附剂泄露,或有残留的微小异物从B相电缆筒上方掉落),导致原本电缆筒壁与电缆支撑杆及其均压罩之间的均匀电场畸变而发生击穿,产生巨大的电动力致使导体连接部分振动,产生巨大应力,使连接面接触不良,增大了接触电阻,并在应力和短路大电流的双重作用下,导致导体连接部分的螺栓严重烧毁并断裂,并引发单相接地二次保护动作。

击穿后,气室的绝缘严重劣化,并伴有高温金属液飞溅至上方临近的接地开关绝缘盆,导致接地

开关绝缘盆子上的三相触头相间短路,并在发电机残压的作用下,三相间持续燃弧,最终导致绝缘盆子的严重烧毁。

## 4.4 预防措施及建议

在设备施工和运行管理方面,主要有以下3个预防措施:

1)加强设备安装工艺的管控,设备厂家应对于关键工序的安装制定现场安装作业指导书,安装施工单位应严格按照要求进行安装调试,运维单位应在安装调试阶段,安排专业人员进驻,监督安装过程,应采取有效防尘、防潮措施,并防止GIS内部遗留异物、部件产生划痕等情况。

2)合理制定GIS设备的大修周期计划,对重新投用的部分以及旧的GIS系统部分应进一步加强运行中的状态检修工作,利用好在线局部放电检测装置,以便对设备的长期运行进行评估。

3)积极开展运行中GIS的局放带电检测工作,及时发现设备内部存在的早期缺陷。在大修后进行局放检测,在大负荷前、经受短路电流冲击后必要时进行局放检测,对于局放量异常的设备,应同时结合气体检测等手段进行综合分析和判断<sup>[20-24]</sup>。

在GIS产品优化上,需要生产厂家应从设计阶段予以改进,不断完善,提高产品的可靠性,降低故障率,主要有以下3点建议:

1)选用不锈钢材质的吸附剂盒。根据《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施(2018修订版)》的规定<sup>[25]</sup>,吸附剂罩的材质应选用不锈钢或其他高强度材料,结构应设计合理,吸附剂应选用不易粉化的材料并装于专用袋中,绑扎牢固。

2)关键气室设置气隔盆子。本次事故GIS的电缆仓气室位于接地开关气室下方,因未设置气隔盆子,导致事故扩散。因此,GIS设计时应考虑在结构布置上应使内部故障电弧对其继续工作能力的影响降至最小,电弧效应限制在起弧的隔室或故障段的另一些隔室之内,事故后,余下的设备应具有继续 ze 正常工作的能力。

3)非标构件应预留合适绝缘裕度。由于该GIS内的导杆与电缆终端尺寸不匹配,采用了非标准尺寸的电缆支撑杆,相较于GIS原部件设计的电场分布,在均压罩边沿处产生较高的局部电场区域,不利于设备的安全稳定运行。

## 5 结语

文中结合故障录波图、现场拆解情况、实验室检测和仿真验证,对一起220 kV GIS电缆仓内绝缘

击穿事故进行分析, 判定了此次单相短路接地发展至三相相间短路事故的起因为异物掉落, 并从设备施工、运行管理和 GIS 产品设计方面提出了合理化建议, 为后续 GIS 的安全运行提供实践依据。

## 参考文献:

- [1] ZENG Fuping, WU Siying, LEI Zhicheng, et al. SF<sub>6</sub> fault decomposition feature component extraction and triangle fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 581-589.
- [2] 岳 嵩, 朱 勇, 何龙寿, 等. 基于改进动态电弧模型的 GIS 快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 114-120.  
YUE Song, ZHU Yong, HE Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [3] 马慧敏, 张星宇, 戴雨薇, 等. 特高压组合电器运行状况和典型故障分析[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(5): 27-30.  
MA Huimin, ZHANG Xingyu, DAI Yuwei, et al. Analysis of operating conditions and typical failures of UHV composite apparatuses[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2021, 39(5): 27-30.
- [4] 孟维东, 汤 伟, 魏俊梅. 高压直流 GIS 母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 80-86.  
MENG Weidong, TANG Wei, WEI Junmei. Research on insulation performance of busbar in HVDC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 80-86.
- [5] 史 文, 杨正理, 陈海霞, 等. GIS 中自由金属微粒缺陷局部放电信号特征分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 139-144.  
SHI Wen, YANG Zhengli, CHEN Haixia, et al. Characteristic analysis of partial discharge signals of free metal particle defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 139-144.
- [6] 张连根, 路士杰, 李成榕, 等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属粉尘运动和放电特征[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 444-452.  
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Movement and discharge characteristics of micron-scale metal dust in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 444-452.
- [7] 常亚楠, 李庆民, 王 健, 等. 交流 GIS 提上式微粒陷阱优化设计方法[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 14-21.  
CHANG Yanan, LI Qingmin, WANG Jian, et al. Optimal design method of lifting particle trap in AC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 14-21.
- [8] WANG Jian, HU Qi, CHANG Yanan, et al. Metal particle contamination in gas-insulated switchgears/gas-insulated transmission lines [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(5): 1011-1025.
- [9] 涂嘉毅, 关向雨, 赵俊义, 等. 基于 SVD-IACMD 的 GIS 振动信号去噪算法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 163-172.  
TU Jiayi, GUAN Xiangyu, ZHAO Junyi, et al. GIS vibration signal denoising algorithm based on SVD - IACMD[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 163-172.
- [10] 牛 勃, 孙尚鹏, 魏 莹, 等. 微米级异物对 GIS 设备绝缘状态影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 93-100.  
NIU Bo, SUN Shangpeng, WEI Ying, et al. Study on influence of micron-level metal dust on the insulation condition of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 93-100.
- [11] 张 彬, 张周胜, 于瑞冬, 等. 直流均匀电场下金属微粒运动状态与识别[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 265-273.  
ZHANG Bin, ZHANG Zhousheng, YU Ruidong, et al. Motion state and identification of metal particles in a uniform DC electric field [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 265-273.
- [12] 陈予伦, 常丁戈, 杨鼎革, 等. GIS 中金属微粒诱发沿面局部放电发展过程的研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 153-158.  
CHEN Yulun, CHANG Dingge, YANG Dingge, et al. PD creeping discharge development process induced by metallic particles in GIS [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 153-158.
- [13] 鲁沛乐, 严英杰, 刘亚东, 等. 有载分接开关绝缘油中金属颗粒运动规律及其对介电性能的影响[J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 1-11.  
LU Peile, YAN Yingjie, LIU Yadong, et al. Movement law of metal particles in insulating oil of on-load tap-changer and its influence on dielectric properties[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 1-11.
- [14] 马飞越, 牛 勃, 张 涛, 等. 高压下 GIS 中异物金属颗粒运动过程的研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 35-41.  
MA Feiyue, NIU Bo, ZHANG Tao, et al. Study on movement process of foreign metal particles in GIS at high voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 35-41.
- [15] 马飞越, 张 涛, 丁 培, 等. 运行电压下 GIS 异物颗粒飞行特征速查法研究及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 118-125.  
MA Feiyue, ZHANG Tao, DING Pei, et al. Research and application of quick check method for the flying characteristics of foreign particles in GIS under operating voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 118-125.
- [16] 尉元龙, 何柏娜, 崔荣喜, 等. 金属微粒对直流 GIL 盆式绝缘子电场的影响[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 198-207.  
WEI Yuanlong, HE Baina, CUI Rongxi, et al. Effect of metal particles on the electric field in DC GIL basin insulator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 198-207.
- [17] 梁瑞雪, 刘 衡, 胡 琦, 等. GIS/GIL 内微米级金属粉尘动力学行为与诱发放电特性研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7153-7166.  
LIANG Ruixue, LIU Heng, HU Qi, et al. Research advances in the kinetic behavior and induced discharge characteristics of micron metal dust within GIS/GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7153-7166.
- [18] 庄 丞, 曾建斌, 袁传镇. 表面异物对 252 kV 气体绝缘组合电器盆式绝缘子绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4208-4216.  
ZHUANG Cheng, ZENG Jianbin, YUAN Chuazhen. Effect of surface foreign matters on the insulation property of 252 kV gas insulated switchgear basin insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4208-4216.
- [19] 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2021[S]. 2021.

- Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021 [S].2021.
- [20] 常亚楠,王 健,李庆民,等. 交直流气体绝缘管道输电设备微粒污染治理措施研究进展[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 91-100.  
CHANG Yanan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. Research progress of particle contamination suppression measures in AC and DC gas-insulated transmission equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 91-100.
- [21] 张国宝,赵恒阳,杨 为,等. 基于局放与X射线成像检测的GIS缺陷联合诊断及应用[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 197-202.  
ZHANG Guobao, ZHAO Hengyang, YANG Wei, et al. Joint diagnosis and application of GIS defects based on partial discharge and X-ray imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 197-202.
- [22] 刘长银,宋人杰,赵 萌,等. 基于变权重和组合隶属度函数的GIS气体绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 102-106.  
LIU Changyin, SONG Renjie, ZHAO Meng, et al. Gas insulation state assessment of GIS equipment based on variable weight and combined membership function[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 102-106.
- [23] 何 清,邓万婷,王 伟,等. GIS典型放电条件下SF<sub>6</sub>气体分解产物与故障能量和故障类型对应关系研究[J]. 湖北电力, 2022, 46(2): 89-96.  
HE Qing, DENG Wanting, WANG Wei, et al. Study on relationship between SF<sub>6</sub> gas decomposition products and fault energy and fault types under typical GIS discharge[J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(2): 89-96.
- [24] 薛乃凡,李庆民,刘智鹏,等. 微纳粉尘运动行为与微弱放电探测技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3380-3392.  
XUE Naifan, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Research advances of the detection technology for kinetic behavior and weak discharge of the micro-nano dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3380-3392.
- [25] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
SGCC. Eighteen major anti-accident measures for power grids of state grid corporation of China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- 雷志城(1994—),男,硕士,工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: lei.zhicheng@qq.com)。  
黄焯城(1983—),男,本科,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: hxcmz@163.com)。

(上接第214页)

- [20] 陈容均,严宣辉,杨超城. 面向时间序列的混合图像化循环胶囊分类网络[J]. 计算机应用, 2023, 43(3): 692-699.  
CHEN Rongjun, YAN Xuanhui, YANG Chaocheng. Fusion imaging-based recurrent capsule classification network for time series[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(3): 692-699.
- [21] 袁智勇,白 浩,邵向潮,等. 基于一维多尺度轻量级DenseNet的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 33-43.  
YUAN Zhiyong, BAI Hao, SHAO Xiangchao, et al. Detection method of high impedance grounding fault in distribution network based on one-dimensional multi-scale lightweight DenseNet[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 33-43.
- [22] 黄宜军,汪金友. 小波分析在微弱信号测量中的应用研究[J]. 计量学报, 2007, 28(2): 163-166.  
HUANG Yijun, WANG Jinyou. Application of wavelet threshold denoising to weak signal measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(2): 163-166.
- [23] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). USA: IEEE, 2016: 770-778.
- [24] 吴忠强,卢雪琴. 基于深度迁移学习和LSTM网络的微电网故障诊断[J]. 计量学报, 2023, 44(4): 582-590.  
WU Zhongqiang, LU Xueqin. Microgrid fault diagnosis based on deep transfer learning and LSTM network[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(4): 582-590.
- [25] 李长鹏,吴小钊,张文凯,等. 中压气体绝缘金属封闭开关设备泄压孔设计方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 155-160.  
LI Changpeng, WU Xiaozhao, ZHANG Wenkai, et al. Research on the design method of pressure relief hole of medium voltage gas insulated metal-enclosed switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 155-160.
- 周庭栋(1986—),男,工程师,本科,主要从事电网基建工作(E-mail: 1621146145@qq.com)。  
尚 海(1988—),男,工程师,本科,主要从事主要电网工程建设、工程管理研究(E-mail: 715129161@qq.com)。  
何永涛(1986—),男,工程师,本科,主要从事输电线路工程工作(E-mail: 465238000@qq.com)。  
李盼盼(1989—),女,助理工程师,本科,主要从事电力系统自动化研究(通信作者)(E-mail: 2150476830@qq.com)。  
甘 平(1984—),女,助理工程师,本科,主要从事电力系统继电保护研究与应用研究(E-mail: 328929758@qq.com)。