一起1000 kV GIS断路器放电故障分析研究

杨家隆[1],殷泽坤[2],袁思凡[2],程梦盈[2],李　杰[2]

(1.国网江西省电力有限公司,江西 南昌 330077;2.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘　要:针对某特高压变电站的一起1000 kV气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear,GIS)断路器放电故障,对故障气室开展解体检查,进行结构原理分析、分解物成分分析、绝缘件电场仿真计算、断口电容电流计算等工作。通过研究分析,判断厂内装配工艺管控不到位,断路器气室200次操作后清理不彻底,导致气室内部残留异物,异物在电场中运动导致局部电场畸变引发放电。从强化同批设备风险排查,加强现场在线监测与带电检测,加强厂内异物防控措施等方面提出改进建议,为后续特高压GIS设备的质量提升提供参考。

关键词:GIS;特高压;断路器;放电故障;异物

中图分类号:TM 595　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1006-348X(2025)03-0068-05

0　引言

在现代电力生产建设中,气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear,GIS)具备多项优势,包括紧凑的布局设计、简便的维护流程、出色的灭弧性能以及高度的运行可靠性。然而,在其运行过程中,可能会遇到几种典型的故障类型,如漏气、机械故障及绝缘问题。其中绝缘故障往往归因于异物侵入,这是一个值得关注的因素[1]。在GIS的生产、维修及操作各个阶段,都有可能不慎引入外部杂质,这些杂质一旦进入GIS内部环境,便可能触发闪络、放电等绝缘相关事故,进而对设备的持续稳定运行构成潜在威胁[2-5]。以断路器气室为例,在断路器的生产、装配和运行等过程中,都有可能导致断路器室内出现异物[6-8]。在生产过程中,金属零件的加工、切割等工艺可能会产生一些细小的金属屑;在装配过程中,由于操作不当或部件之间的摩擦等,也可能会产生金属颗粒;而在运行过程中,设备内部的磨损等,也可能会产生金属异物。根据断路器的故障数据统计,异物导致的放电故障占比大约为29%,因此,有必要考虑和预防异物对断路器的影响[9-10]。文中旨在深入剖析一起1000 kV GIS断路器异物导致的放电故障,以期提供更深入的工程技术指导。

1　故障概述

2024年5月31日1时48分,某特高压变电站1000 kV双套主保护及1000 kV I母双套母差保护动作。现场检查确认T021 C相断路器气室内部发生故障,无负荷损失。该故障断路器型号为ZF6-1100,2021年7月出厂,2021年12月投运。设备在发生故障64 min前曾开展合闸操作,当时天气为中雨,无落雷。T021 C相断路器投运以来未开展过补气,无漏气现象。查阅SF_6压力在线监测数据,故障前后压力保持在0.63 MPa,无异常。

2　现场检查情况

现场检查T021、T031、T042断路器三相在分位、外观及压力无异常,高抗、避雷器、电压互感器外观无异常,站内引下线、悬式绝缘子、均压环无异常。SF_6气体组分检测发现T021 C相断路器SO_2含量为88.8 μL/L,超出注意值,如表1所示。其余气室无异常,判断T021 C相断路器气室内部发生了放电,其位置如图1所示。

表1　现场SF_6气体成分检测结果

μL/L

相别	SO_2(注意值1)	CO	H_2S(注意值1)
C相	88.8	2.4	0

收稿日期:2025-01-24

作者简介:杨家隆(1992),男,硕士,工程师,现从事物资招标采购管理工作。

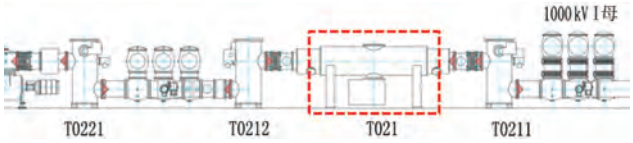

图1　T021 C相断路器气室位置示意图

对故障气室开盖，通过手孔观察，发现断路器中部支撑绝缘子表面、支撑绝缘子下法兰、罐体下口相贯线位置有放电烧蚀痕迹，筒体底部散落少量黑色异物，如图2所示。

图2　绝缘支撑件放电烧蚀情况

3　返厂解体情况

3.1　设备解体检查情况

检查发现故障断路器气室、罐体内壁、支撑绝缘子、屏蔽罩表面附着少量放电分解物，绝缘筒底部法兰区域散落金属熔融物，如图3所示。

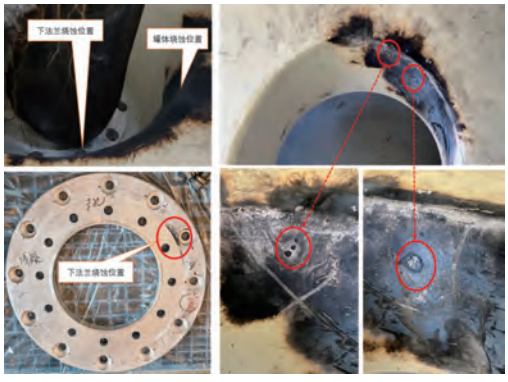

图3　支撑绝缘子附近罐体情况

检查发现支撑绝缘子屏蔽法兰、下连接法兰以及下出口壳体相贯线偏下位置存在放电烧蚀痕迹。下出口壳体25°方向，存在面积约34 mm × 20 mm的椭圆形烧蚀区域；45°方向，存在面积约27 mm × 33 mm的烧蚀区域，距下法兰平面25 cm。由图4可知支撑绝缘子表面5~8点钟方位（面向手孔俯视），存在大面积放电熏黑痕迹，并伴有多条树枝状放电和密集的放电粉尘静电吸附痕迹（树枝状），其中3条为贯穿性放电通道。

图4　支撑绝缘子表面状况

对支撑绝缘子表面放电痕迹清理打磨后，发现8点钟方位存在一条宽约2.0 mm、深约0.5 mm的贯穿性表面放电通道，如图5所示。对支撑绝缘子螺栓紧固情况进行检查，螺栓均紧固完好，上法兰M20螺栓力矩复检满足180 N·m，下法兰M24螺栓力矩复检满足420 N·m。整体解体示意图如图6所示，变直机构传动轴销，外观无磨损痕迹；断路器断口，主触头、弧触头外观无异常，无异常磨损痕迹；断路器合闸电阻，电阻片连接正常，表面无异常破损，双侧合闸电阻的动静触头均存在烧蚀痕迹。

图5　支撑绝缘子打磨后及合闸电阻触头情况

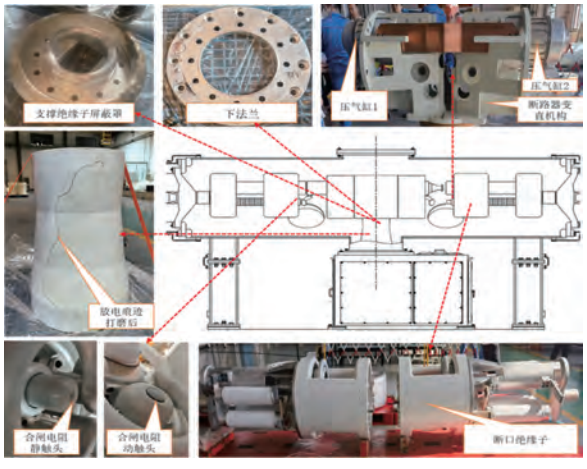

图6　整体解体示意图

收集罐体内部各位置6处异物进行成分检测分

析，结果见表2（其余部位因异物量少而无法测试）。

表2 异物成分分析

序号	位置描述	检测结果
1	支撑绝缘子底部位置	样品含有Al、F、C、S、Mg、O、Ti
2		样品含有F、Al、O、C、S
3		样品含有F、A1、Mg、C、O、S、Ca
4		样品含有F、A1、C、O、S、Mg、Si、Ti、Ca、Fe
5	支撑绝缘子上法兰位置	样品含有C、O、Mg、Si、Ti、Al、Fe、Ca、S、P、Na、Cl
6	罐体底部位置	样品含有Al、F、C、O、S

对支撑绝缘子底部位置的异物成分进行元素分析，Al、Mg、Fe、Si、Ti为罐体、支持绝缘子上下法兰、变直机构屏蔽罩（铝合金）的主要元素，F、S为SF_6气体的主要元素，C、O、Si、Ca为罐体内壁涂层（环氧底漆）的主要元素。对支撑绝缘子上法兰位置的异物成分进行元素分析，C、O、Si、P、Ca为罐体内壁涂层（环氧底漆）的主要元素，Al、Mg、Fe、Ti为罐体、支持绝缘子上下法兰、变直机构屏蔽罩（铝合金）的主要元素，S为SF_6气体的主要元素，Al、O、Na、Cl为支持绝缘子（环氧树脂）的主要元素。对罐体底部位置的异物进行元素分析，Al为罐体、支持绝缘子上下法兰、变直机构屏蔽罩（铝合金）的主要元素，C、O为罐体内壁涂层（环氧底漆）的主要元素，F、S为SF_6气体的主要元素。

检出的主要化学元素来自罐体、法兰、屏蔽罩、SF_6气体以及环氧底漆因放电产生的分解物，并未检出不锈钢、合金钢、钨铜合金以及镀镍和镀银的Cr、Mn、Mo、Ni、Ag、Cu、W等化学元素，排除压气缸、弧触头、主触头、轴销等传动环节异常磨损的可能。

3.2 试验检测情况

3.2.1 支撑绝缘子检测

对故障支撑绝缘子的贯穿性放电通道清理打磨后，开展X射线检测，结果正常；开展工频耐压（1100 kV/5 min,1.17-1.85 pC）及局放试验（762 kV/10 min,0.89-1.37 pC），结果均满足要求。

3.2.2 主回路电阻检测

测量灭弧室主回路电阻值为27 μΩ，满足标准值要求（≤35 μΩ）。断路器主回路接触性能良好，接触部位无异常磨损或过度烧蚀情况。

3.2.3 合闸电阻、并联电容检测

合闸电阻左右两串阻值测量值分别为297.40 Ω与297.33 Ω，单串和整体电阻值均满足标准要求；并联电容电容量测量（821.280 pF，821.507 pF），满足标准要求。

3.3 设备绝缘性能分析

3.3.1 电场仿真校核

对该产品开展电场校核，结果见表3，高电位部件、壳体部件及绝缘支座沿面切向电场均低于控制值，如图7所示。

表3 电场校核结果

kV·mm^{-1}

结构	计算最大场强值	0.6 MPa下许用场强值
高电位部件	22.80	33.60
低电位部件	15.60	20.20
绝缘支座沿面切向	7.51	16.80

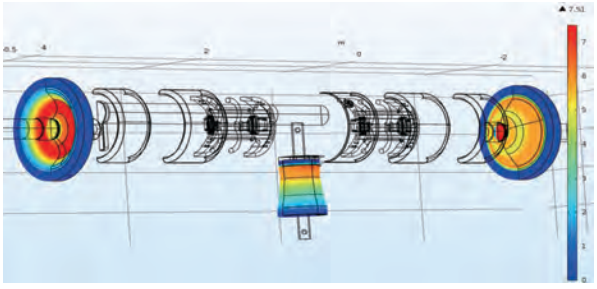

图7 支撑绝缘子表面切向电场

3.3.2 绝缘裕度摸底

该型双断口断路器曾在2022年开展绝缘裕度摸底试验，包含零表压试验和高参数下的工频、雷冲试验。连续5次零表压试验的工频放电电压平均值为954 kV，放电位置均位于断路器断口静侧屏蔽罩。该断路器在表压0.32 Mpa下通过了1000 kV工频耐压和2400 kV雷电冲击耐压试验，根据气压折算，其绝缘裕度为国标的1.43倍，表明结构设计在正常情况下，具有一定的绝缘裕度。

4 故障原因分析

4.1 故障原因分析

1）故障前后T021 C相断路器气室内部SF_6压力均保持正常，排除故障气室内部SF_6压力不足引发放电的可能。

2）故障发生在T021 C相断路器合闸操作64 min后，故障前变电站附近无落雷，避雷器动作次数无变化，排除过电压引发放电的可能。

3）解体发现T021 C相断路器气室内部各部件连接良好，无变形和脱落，各距离尺寸符合设计要求，排除组部件移位、脱落、变形引发放电的可能。

4）故障支撑绝缘子在打磨后耐压及局放试验合

格，故障前在线监测无典型的绝缘缺陷特高频局放信号，排除支撑绝缘子内部缺陷引发放电的可能。

5）基于前述分析判断故障原因为异物放电，故障发展过程为：

（1）内部残留异物经合闸操作后，在气流、振动及电场作用下，运动至支撑绝缘子表面导致电场畸变，绝缘子表面沿面闪络发展至低电位的下法兰；

（2）由于电动力的作用，电弧在漂移的过程中发展至出口相贯线的壳体，造成两处明显的烧蚀点，放电过程示意图见图8。

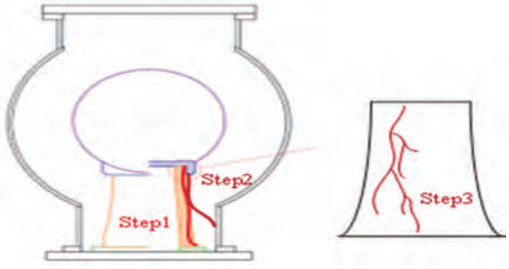

图8　放电过程示意图

6）支撑绝缘子表面碳化通道形成原因。如图9所示，故障发生后，T021断路器跳开，1000 kV I母跳闸，T022断路器重合成功带电，T021断路器靠近T0212隔离开关侧的静触头经T0212（合闸状态）带电，即T021断路器一侧电压为1000/$\sqrt{3}$ kV，断口电容为820 pF，另一侧电压为0。流经故障支撑绝缘子最大电流为T021断路器断口容性电流，根据$I=U\cdot 2\pi fC$公式计算，得出盆式绝缘子最大容性电流为148 mA。

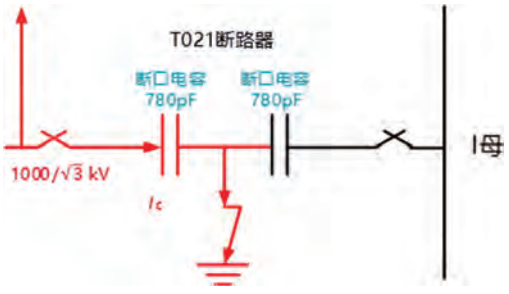

图9　电容电流计算示意图

T021断路器从5月31日1时48分跳闸，至5时22分T0211隔离开关拉开，约214 min的时间，故障支撑绝缘子表面不断进行充放电，留下树枝状放电痕迹；当表面绝缘薄弱处绝缘彻底劣化后，持续流过容性电流，逐步烧蚀出一条明显的碳化通道。

4.2　异物来源分析

断路器现场安装无需开盖清理，充气过程中增设过滤网，可基本排除充气过程带来异物。

解体检查对接螺栓无松动，各部位焊缝焊接良好，传动拐臂、轴销、压气缸无异常磨损或镀层脱落痕迹，合闸电阻片连接正常。分解物成分未检出不锈钢、合金钢、钨铜合金以及镀镍和镀银的Cr、Mn、Mo、Ni、Ag、Cu、W等化学元素，可排除压气缸、弧触头、主触头、轴销等设备运行过程中传动部件异常磨损的可能。

综上，分析异物产生的原因为厂内装配工艺管控不到位，断路器气室200次操作后清理不彻底，残留异物于断路器气室内。

5　措施与建议

1）强化同批次设备风险排查。综合长时特高频局放检测、高灵敏气体成分分析、超声波局放检测、X射线[11]等技术手段，对站内1000 kV GIS设备开展一次全面检测，检测结果按照流程上报、分析、处置。

2）强化在线监测。对1000 kV GIS设备自投运以来在线监测数据进行一次全面分析，加快在线监测装置的升级完善，提供开放性的数据分析软件，便于事件分析，全面加强在线监测管理。

3）强化带电检测。按相关标准固定的周期要求，严格开展例行和专项带电检测，检测时重点关注同组清理人员装配的气室。对局放异常的间隔加强在线监测监视，每半年开展一次7×24 h偶发局放长时带电检测。

4）强化断路器检修及操作管控。加强1000 kV GIS设备操作前中后的在线监测数据分析，并开展专项带电检测，提升设备状态感知能力；优化GIS断路器例行试验方案，合理减少断路器动作次数，减轻断路器短时间内反复、集中传动可能带来的机械应力影响。

5）加强异物防控。一是进一步强化落实GIS异物防控技术措施，梳理厂内装配、清理和现场安装过程中管控薄弱环节，增加该型断路器出厂机械操作磨合次数；二是制定并落实各类典型零部

件表面异物清理标准化工艺、绝缘件表面清擦材料及工艺要求；三是开展支撑绝缘子附近金属异物引发绝缘击穿的模拟试验；四是优化产品设计，研究微粒捕捉器等提升异物容错能力，解决异物引发放电问题。

6 结语

文中详细分析了某特高压变电站1000 kV断路器的放电故障，通过现场检查和解体分析，确定了故障原因为内部残留异物导致的放电，并根据此次故障所暴露出的工艺管控不到位的问题，除要求运维人员加强对设备的管控和检测外，还针对该型断路器提出了增加出厂机械操作磨合次数、开展金属异物绝缘击穿模拟试验和开发微粒捕捉器等要求，为特高压设备的运行维护提供了参考，有助于提升特高压输电技术的可靠性和稳定性，保障电力系统安全运行。

参考文献：

[1] 张丕沛，郭晨瑞，李杰，等. GIS内部异物放电故障的特征机理研究[J].山东电力技术，2023，50(5)：41-47.

[2] 和晓辉，周磊，邱鹏锋，等.220 kV GIS隔离开关对地放电故障案例分析[J].云南电力技术，2023，51(2)：69-74.

[3] 朱建武，周保红.GIS隔离开关触头烧损故障分析[J].江西电力，2010，34(3)：20-21.

[4] 吴星，刘志刚，饶鸿猷，等.GIS组合电器内部放电诊断试验及原因分析[J].江西电力，2022，46(9)：38-42，62.

[5] 张语桐，吴泽华，徐家忠，等.特高压GIS用单支撑绝缘子绝缘结构优化设计[J].电工技术学报，2023，38(1)：258-269.

[6] 徐志钮，郭一帆，李先锋，等.机械缺陷对GIS外壳振动影响[J].电力工程技术，2022，41(5)：156-164，185.

[7] 杨勇，史方颖，潘巧梅.海上风电用气体绝缘金属封闭开关设备抗振可靠性研究[J].电气技术，2022，23(8)：31-35，40.

[8] 李星，刘卫东，许渊，等.冲击振动下GIS内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J].中国电机工程学报，2023，43(7)：2838-2848.

[9] 韩帅，高飞，廖思卓，等.GIS盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J].绝缘材料，2022，55(2)：12-22.

[10] 李杰，李晓昂，吕玉芳，等.正弦振动激励下GIS内自由金属微粒运动特性[J].电工技术学报，2021，36(21)：4580-4589，4597.

[11] 刘衍，周友武，徐鹏，等.X射线数字成像技术在GIS检测中的应用研究[J].江西电力，2014，38(6)：72-74.

（上接第64页）

[13] Jiaming Sun，Zehong Shen，Yuang Wang，et al.LoFTR：Detector-free local feature matching with transformers[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）.Virtual Event：IEEE，2021：8922-8931.

[14] Wang Yifan，He Xingyi，Peng Sida，et al.Efficient LoFTR：Semi-dense local feature matching with sparse-like speed [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）.Seattle：IEEE，2024：21666-21675.

[15] Ronneberger O，Fischer P，Brox T. U-Net：Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention（MICCAI）.Munich：Springer，2015：234-241.

[16] 李博，刘会斌，王胜辉，等.基于GANR-UNet的绝缘子红外图像分割及低零值故障诊断研究 [J/OL].华北电力大学学报（自然科学版），2024：1-11[2025-03-15].https://link.cnki.net/urlid/13.1212.tm.20240115.1750.002.

[17] 李炳超，王军，李海丰，等.弱纹理飞机蒙皮曲面图像特征匹配及拼接[J].电子测量技术，2024，47(5)：124-132.

[18] 李唐兵，付鹏，朱向前，等.绝缘子串红外图像中绝缘子盘面和钢帽区域的自动提取方法[J].红外技术，2014，36(8)：644-648.

[19] Barath D，Noskova J，Ivashechkin M，et al.MAGSAC++，a fast，reliable and accurate robust estimator [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）.Seattle：IEEE，2020：1304-1312.

[20] Perera C J，Premachandra C，Kawanaka H.Low pixel resolution hyperspectral image mosaics generation using learning-based feature matching[J].IEEE Access，2023，11：104084-104093.