

一起 330kV 气体绝缘金属封闭开关设备 金属毛刺放电缺陷分析与处理

黎宏飞 高宗宝 张靖 马亚光

(国家能源集团科学技术研究院有限公司, 成都 610000)

摘要 本文介绍一起 330kV 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)母线气室超声波信号异常分析与处理案例。通过幅值定位、改变设备运行状态,判断缺陷来自主变侧母线气室。通过对局部放电超声波信号进行散点图和相位幅值图分析,确定该气室底部金属异物放电是产生异常超声波信号的主要原因。打开检修孔检查,发现罐体底部有一银白色金属尖锐异物,经排查确认该异物为生产阶段产生。此次 GIS 母线气室放电缺陷是一起典型的金属尖端放电处理案例,可为类似异常缺陷的处理提供参考。

关键词: 金属尖端放电; 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS); 异常超声波信号; 气室

Analysis and treatment of metal burr discharge defects in a 330kV gas insulated switchgear

LI Hongfei GAO Zongbao ZHANG Jing MA Yaguang

(China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610000)

Abstract The article introduces a case of analyzing and processing abnormal ultrasonic signals in the busbar air chamber of a 330kV gas insulated switchgear (GIS). By locating the amplitude and changing the operating status of the equipment, it is determined that the defect comes from the busbar chamber on the main transformer side. By analyzing the scatter plot and phase amplitude plot of the partial discharge ultrasonic signal, it is believed that the discharge of metal foreign objects at the bottom of the gas chamber is the main cause of the abnormal ultrasonic signal. After inspection of the manhole, it is found that there is a silver white metal sharp substance at the measuring point on the bottom of the tank body, which is generated during the production. This GIS busbar air chamber discharge is a typical case of metal tip discharge treatment, providing reference for the treatment of similar abnormal defects in the future.

Keywords: metal tip discharge; gas insulated switchgear (GIS); abnormal ultrasonic signal; air chamber

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)具有占地面积少、安全、稳定、维护量少等优点,在 110~1 000kV 电压等级均有应用。然而,部分厂家的制造工艺和品控能力仍有欠缺^[1],导致 GIS 出现内部异物、盆式绝缘子缺陷、绝缘拉杆缺陷、导体接触缺陷、设计缺陷等。据不完全统计,110kV 及以上 GIS 异物放电占故障统计

总量的 30%,盆式绝缘子故障约占 10%。根据用户反馈统计,GIS 制造和安装过程中出现问题的概率最高,因此在制造和安装环节加强管控可大大降低 GIS 故障发生率^[2]。

1 设备结构

青海某水电厂 330kV GIS 最高运行电压 363kV,4 号主变高压油气套管末端安装 GIS 封闭母线和一组隔离开关(以下称 T4 GIS)。试验前

拆除电缆与隔离开关之间连接导体, 试验过程中未涉及电缆部分, 试验 T4 GIS 结构如图 1 所示, C

相母线气室呈 Z 字型, 与 A、B 相相比, C 相气室最长。

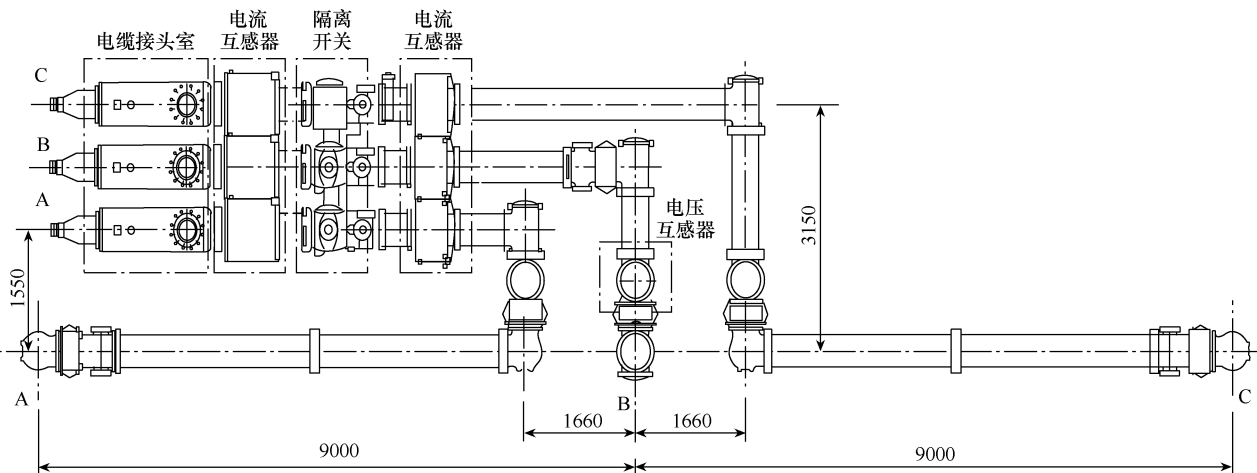


图 1 试验 T4 GIS 结构

2 缺陷概况

T4 GIS 位于 4 号主变上层, 通过油气型套管与主变高压侧连接, GIS 隔离开关两侧分别为主变和长约 600m 的高压电缆。根据 GB 50150—2016《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》, 电缆试验电压为 323.9kV。根据 DL/T 618—2022《气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程》, GIS 试验电压为 510kV。因此, 不能通过电缆对 GIS 直接进行耐压试验, 要从主变侧做工装或在 GIS 上安装组合式耐压设备。经现场勘察发现, 主变做工装后, 绝缘距离无法满足外施耐压对空气绝缘裕度的要求, 最优选择是在 GIS 上安装组合式耐压设备^[3]。本次耐压试验首次设计使用 GIS 电压互感器励磁升压完成, 将大容量电磁式电压互感器与普通互感器相结合, 作为励磁升压设备, 运行状态切换为普通电压互感器^[4], 无需另行拆除。试验电压互感器设计容量为 180kV·A, 试验频率为 50Hz, 安装位置如图 1 所示电压互感器位置。

由于场地限制, 此次试验定制一套试验设备, 包括工频试验电压互感器、调压器、灭弧装置、控制器, 局部放电测试仪由光纤与控制器进行通信并同步初始相位。按照规程要求, 当交流耐压结束后降压至 251.5kV 时, 开展局部放电试验^[5]。GIS 由气体母线气室、电压互感器、电流互感器、隔离开关、接地开关组成。A、B 相 GIS 局部放电试验时, 超声波局部放电背景噪声为 2.5mV, 放电信号最高幅值分别为 3.2mV、3.6mV, 略高于背景噪声。在测

试过程中, C 相母线约 5~9s 出现一次高达 75mV 的局部放电信号, 从频率相关性分析, 存在 50Hz 相位弱相关性。超声波局部放电信号特征测试结果如图 2 所示, 相位幅值散点图如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 0°~360° 相位之间均存在放电信号, 呈现较混杂的放电图谱。超声信号最大幅值点多出现在 90°~100° 与 260°~280°, 从电压象限分析, 处于正弦信号的正负最大值附近, 与电气介质击穿形成的局部放电相似^[6-8]; 放电点集中在 100° 附近, 说明 GIS 内部以较低能量放电为主^[9]。根据 DL/T 1250—2023《气体绝缘金属封闭开关设备带电超声局部放电检测应用导则》, 10~20mV 区间放电图谱与自由颗粒放电典型图谱相似, 20~80mV 区间放电图谱具有悬浮电位典型放电图谱的特征。

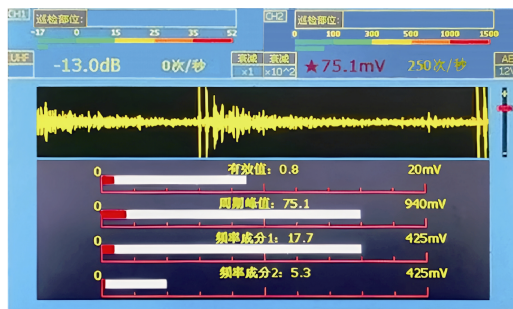


图 2 超声波局部放电信号特征测试结果

为定位最大信号位置, 以 C 相母线 GIS 第二段绿色盆式绝缘子为原点, 水平方向开展探寻式检测。对于水平结构气室, 选择底部作为探测点, 最终选定 9 个测试点。C 相母线测试点位设置如图 4 所示。

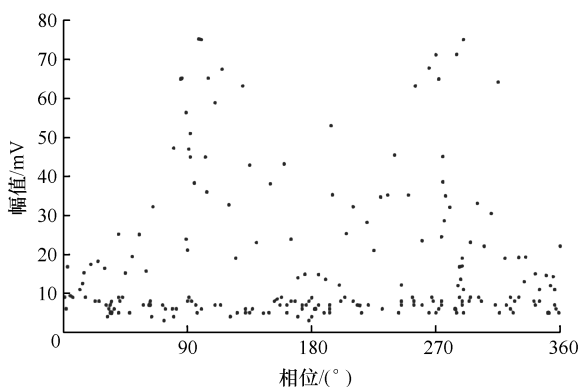


图3 相位幅值散点图

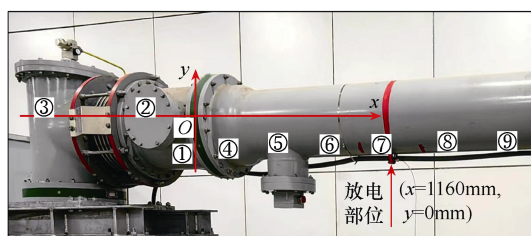


图4 C相母线测试点位设置

C相母线水平方向测试数据见表1。从表1可以看出,测试点①~③的信号水平较低,由于主变未投运可直接排除主变侧振动产生干扰影响^[10];测试点⑧、⑨的测试值小于测试点⑦,排除试验电压互感器传导振动信号的干扰;最大信号点定位在测试点⑦,位于x轴1160mm处。C相母线异常部位如图5所示。

表1 C相母线水平方向测试数据

测试点	背景噪声/mV	测试值/mV	信号情况
①	2.5	3.1	峰值稳定
②	2.5	3.2	峰值稳定
③	2.5	3.2	峰值稳定
④	2.5	8.9	峰值跳动
⑤	2.5	18.8	峰值跳动
⑥	2.5	38.1	峰值跳动
⑦	2.5	75.1	峰值跳动
⑧	2.5	32.4	峰值跳动
⑨	2.5	21.3	峰值跳动

为更精确地定位异常部位,从C相母线水平方向测试点⑦取截面,进行轴向圆周测试。测试点⑦水平轴向圆周测点布置如图6所示,测试数据见表2。通过分析圆周测试图谱,放电信号在测点7附近最大,幅值为75.1mV。

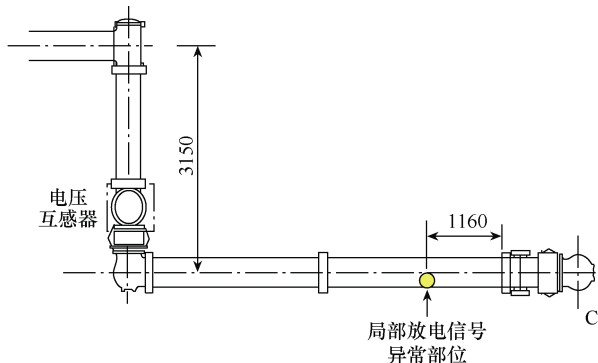


图5 C相母线异常部位

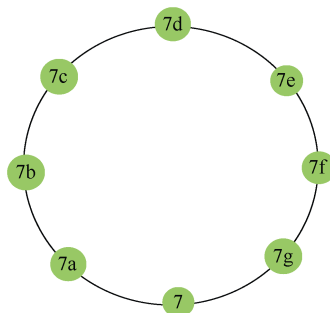


图6 测试点⑦水平轴向圆周测点布置

表2 测试点⑦水平轴向圆周测试数据

测点	背景噪声/mV	测试值/mV	信号情况
7	2.5	75.1	峰值跳动
7a	2.5	43.4	峰值跳动
7b	2.5	24.2	峰值跳动
7c	2.5	19.6	峰值跳动
7d	2.5	11.4	峰值跳动
7e	2.5	19.6	峰值跳动
7f	2.5	23.8	峰值跳动
7g	2.5	27.4	峰值跳动

3 缺陷分析

在交流耐压试验过程中,电压值依次为:老练净化阶段209.5kV(10min)、251.5kV(5min),耐压阶段510kV(1min)。在老练净化阶段清除GIS内部可能存在的导电微粒或非导电微粒,此时进行局部放电测试,可能会检测到较强的局部放电信号,但多是金属毛刺等微小颗粒在灼烧过程中的放电^[11]。为准确分辨出放电缺陷类型,将GIS超声局部放电试验电压提升10%,即276.6kV,使用超声局部放电设备全程监视,有异常情况立即停止试验^[12];随着电场强度的增加,微粒放电在相位幅值散点图上的最低放电幅值可能增加,电晕放电的最高放电幅

值可能更高^[13]。通过观察放电图谱的变化,可更准确地判断放电类型。不同测试电压下测试点⑦局部放电信号测试数据见表 3,试验电压与局部放电信号幅值关系如图 7 所示。提升测试电压后,在 276.3kV 电压下局部放电信号出现最高幅值 618.2mV,提升测试电压后超声波信号特征测试结果如图 8 所示。从图谱分析来看,异常点放电比较稳定,若为导电微粒放电,则微粒在老练阶段会随电场移动并附着在罐体两侧端部,而该放电部位在罐体中部,因此可排除导电微粒放电^[14];升高电压并稳定一段时间后,局部放电信号未消失且有增大的情况,可推断放电异物未被烧蚀^[15]。

表 3 不同测试电压下测试点⑦局部放电信号测试数据

试验电压/kV	背景噪声/mV	测试值/mV	信号情况
209.5 (运行电压)	2.5	37.9	峰值跳动
220.2	2.5	49.0	峰值跳动
230.1	2.5	54.6	峰值跳动
240.0	2.5	75.4	峰值跳动
251.5 (超声局部放电)	2.5	75.8	峰值跳动
260.3	2.5	173.0	峰值跳动
270.1	2.5	215.1	峰值跳动
276.3	2.5	618.2	峰值跳动

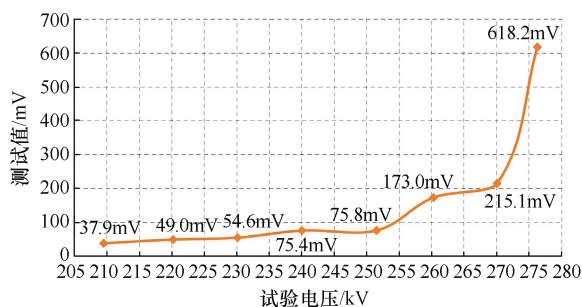


图 7 试验电压与局部放电信号幅值关系

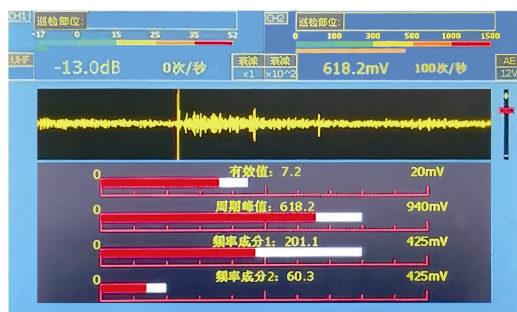


图 8 提升测试电压后超声波信号特征测试结果

4 缺陷处理

打开异常放电 GIS 气室底部两个检修孔,经仔

细检查发现,罐体底部测试点⑦附近有一银白色尖锐物质,两端翘起,长约 3.2mm,最宽部位约 0.4mm,取出检查后确认该尖锐物质为金属材料,如图 9 所示。经排查,在安装过程中未打开此段气室,金属异物为生产或加工过程残留异物。处理金属异物并回装后,重新进行耐压与局部放电试验。该段母线水平方向超声局部放电复测数据见表 4,测试结果合格。

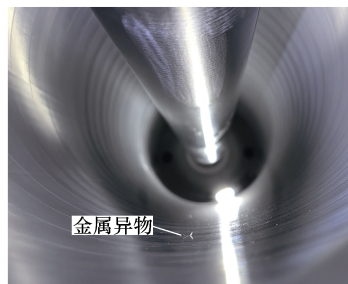


图 9 金属异物

表 4 C 相母线水平方向超声局部放电复测数据

测试点	背景噪声/mV	测试值/mV	信号情况
①	2.5	3.3	峰值稳定
②	2.5	3.3	峰值稳定
③	2.5	3.6	峰值稳定
④	2.5	3.5	峰值跳动
⑤	2.5	3.7	峰值跳动
⑥	2.5	3.5	峰值跳动
⑦	2.5	3.6	峰值跳动
⑧	2.5	3.8	峰值跳动
⑨	2.5	3.6	峰值跳动

5 结论

由于场地、试验条件限制,部分发电企业未对安装于主变上部与高压电缆之间的 GIS 开展交流耐压试验。本文案例说明,不论安装在何种位置,均应开展 GIS 耐压和带电局部放电试验,避免设计、生产和安装过程中产生的缺陷酿成重大事故,造成巨大损失。

试验中出现超声局部放电信号异常,而通过特高频测试并未出现异常,可能是因放电点放电能量不高,经过耦合传递到盆式绝缘子上的信号较弱。通过放电频谱和幅值定位及提高试验电压等手段判断出 GIS 内部存在异常放电点,打开检修孔观察到金属异物是产生超声局部放电信号异常的原因。从

整个闭环处理过程和结果来看, 超声局部放电检测是有效的、精确的。超声局部放电检测和高频局部放电检测各有优缺点, 应同时采取多种方法进行检测和分析, 以确保检测结果的可靠性。

参考文献

- [1] 石磊, 于彤, 方烈, 等. SF₆ 放电分解机理及其在故障分析领域的研究进展[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 1-9.
- [2] 丁登伟, 唐诚, 高文胜, 等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.
- [3] 郭伟, 汪隆臻, 张宿新, 等. 基于声-电-气联合检测的 GIS 缺陷分析与处理[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 243-248.
- [4] 陈长杰, 唐炬, 任晓龙, 等. 电极材料对 SF₆ 气体局部放电分解特性的影响[C]//重庆市电机工程学会 2010 年学术会议论文集, 重庆, 2010.
- [5] 林岑, 邱炜, 周波, 等. 一起 110kV GIS 设备自由金属颗粒放电缺陷及解体分析案例[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 214-220.
- [6] 张铭洋, 高有华, 李茜, 等. 1000kV GIS 中燃弧电阻模型对快速瞬态过电压的影响[J]. 电气技术, 2023, 24(12): 7-13.
- [7] 刘君华, 郭灿新, 姚明, 等. 局部放电电磁波在 GIS 中传播路径的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1044-1048.
- [8] 吴迪, 陈仁刚, 崔勇, 等. 一起 500kV GIS 异响缺陷的检测分析与处理[J]. 电气技术, 2014, 15(11): 43-46.
- [9] 顾寅, 缪金, 肖焱艳, 等. 基于 FLUENT 的示踪氦气在 GIS 绝缘空气中扩散规律及泄漏检测研究[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 42-46.
- [10] 刘弘景, 李伟, 任志刚, 等. GIS 不同绝缘缺陷的局放检测有效性对比研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(9): 53-60.
- [11] 王艳新, 闫静, 王建华, 等. 基于多级二阶注意力孪生网络的小样本 GIS 局部放电诊断方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2255-2264.
- [12] 胡智莹, 耿秋钰, 魏来, 等. 直流 GIS/GIL 中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3338-3349.
- [13] 李泽, 王辉, 钱勇, 等. 基于加速鲁棒特征的含噪局部放电模式识别[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 775-785.
- [14] 郭超, 周波, 谭学敏, 等. GIS 隔离开关内悬浮放电缺陷带电检测与解体分析[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 168-174.
- [15] 方舟, 张伟, 刘辉, 等. 基于图像形态学特征的 GIS 局部放电模式识别算法与监测系统[J]. 电气技术, 2024, 25(10): 48-54.
- [16] 展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
- [9] 董浩文, 张倩颖, 陈兆艺, 等. 基于多元线性回归与时间序列的风力发电中风速捕捉综合预测研究[J]. 机电信息, 2020(27): 8-9.
- [10] 郭利进, 何西硕, 徐新喜, 等. 基于灰色多元线性回归融合模型的故障率预测[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(11): 2047-2053.
- [11] XIONG Pingping, DANG Yaoguo, WU Xianghua, et al. Combined model based on optimized multi-variable grey model and multiple linear regression[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(4): 615-620.
- [12] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 92-95.
- [13] 黄超艺, 杨赞锋, 吴荣福, 等. 采用皮尔逊相关性的故障区段定位新方法[J]. 电气技术, 2018, 19(6): 56-60.
- [14] 车远宏, 贾雍, 汤卓, 等. 皮尔逊相关系数在风电功率组合预测中的应用[J]. 广西电力, 2016, 39(3): 50-53.

收稿日期: 2024-11-18

修回日期: 2024-12-12

作者简介

黎宏飞 (1988—), 男, 四川省成都市人, 学士, 高级工程师, 从事绝缘技术监督、高压绝缘技术的研究工作。

收稿日期: 2024-06-28

修回日期: 2024-09-30

作者简介

姜凯 (1989—), 男, 江苏省南京市人, 硕士, 中级工程师, 主要从事新能源系统大数据分析、应用处理方面的研究工作。