

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.026

一起110 kV GIS设备自由金属颗粒放电缺陷及解体分析案例

林 岑, 邱 炜, 周 波, 杨红权, 刘彦琴, 刘 鑫, 高 竣, 曾晓维
(国网四川省电力公司成都供电公司, 成都 610000)

摘要:介绍了一起110 kV GIS设备母线PT开关气室超声波信号异常的分析处理案例。通过幅值定位、时延定位和改变设备运行状态,判断缺陷来自于开关气室内部。对局放超声波信号进行多种测试图谱分析,认为该气室底部自由金属颗粒放电是产生异常超声波信号的主要原因。经开罐检查,发现开关静触头均压罩上存在明显刮痕,气室底部存在较多黑色固体碎屑,开关安装工艺不良导致金属碎屑掉落在气室底部,产生局部放电引起超声波信号异常。该起PT开关气室放电是一起较为典型的自由金属颗粒放电案例,为今后类似异常情况的分析处理提供了借鉴与参考。

关键词: GIS设备; 自由金属颗粒放电; 异常超声波; 开关

Discharge Defect of Free Metal Particle of 110 kV GIS Equipment and Its Disassembly Analysis

LIN Cen, QIU Wei, ZHOU Bo, YANG Hongquan, LIU Yanqin, LIU Xin,
GAO Jun, ZENG Xiaowei

(State Grid Sichuan Electric Power Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: The analysis and treatment of abnormal ultrasonic wave in the disconnecting switch (DS) compartment of PT of 110 kV GIS is introduced. It is judged through amplitude location, time delay location and the change of equipment operation state that the defect is from the inside of the DS compartment. Multiple kinds of spectrum analysis on the partial discharge ultrasonic signal are performed, thinking that the free metal particle at the bottom the compartment is the main reason which causes abnormal ultrasonic wave signal. It is found by opening the enclosure that the grading cover of the stationary contact of the blade has obvious scratches and many black solid debris are at the bottom of the gas compartment. The weak installation process of the blade causes the metal debris to drop at the bottom of the gas compartment, generating partial discharge and causing the ultrasonic wave signal abnormal. The discharge of disconnecting switch of PT is a typical metal particle discharge case, which has provided experience and reference for the analysis of the similar abnormal situation in the future.

Key words: GIS equipment; free metal particle discharge; abnormal ultrasonic wave; DS

0 引言

随着城市经济和电网建设的飞速发展,气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)由于其结构紧凑、安全可靠、维护简单的优点,在电力系统得到了广泛的应用^[1-5]。据统计,目前成都电网的GIS站已达140座,近两年新建的变电站也全部采用GIS

变电站。对于GIS设备,其内部空间极为有限,工作场强很高,内部绝缘裕度相对较小,高气压下SF₆气体的击穿强度可达到相当高的水平,然而由于设计缺陷、制造工艺不佳、现场装配技术低等诸多问题,会存在高压导体毛刺、绝缘子内部气隙、金属零部件悬浮电位等故障隐患,产生局部放电,危及电网安全运行^[6-13]。

由于局部放电伴随着声信号和电信号产生, GIS特高频和超声波检测通过对特定频率的高频信号进行分析, 建立局部放电典型图谱库, 通过图谱对比是一种发现并判断缺陷类型的有效手段^[14-21]。在现场实际检测中, 利用示波器进行特征和时延判定, 还可精确判定局部放电发生的位置, 结合气体成分分析和X光拍摄等多种手段综合分析, 具有极高的缺陷检出率。提前发现缺陷并提供可能的缺陷位置, 为后续计划性停电提供了有力的依据, 避免了临时停电导致负荷的大量损失, 同时可针对性检修, 大大缩短处理时间, 降低了电网运行的风险等级^[22-24]。

文中介绍了成都某110 kV变电站利用超声波信号进行放电源定位的自由金属颗粒放电缺陷, 通过多次复测跟踪, 结合多种手段分析, 最终开罐验证形成典型缺陷案例, 也为今后其他类似缺陷处理提供了参考经验。

1 异常概况

2018年7月, 在对某110 kV变电站110 kV GIS设备进行带电检测时, 发现110 kV II母PT间隔1282、12820三工位开关气室存在超声波异常信号, 而构架背景信号正常、其他气室测点信号正常。异常点超声波信号特征无规则的脉冲信号, 无明显50 Hz或100 Hz相位相关性, 脉冲幅值高, 脉冲频率分布在20 kHz以上, 可测得典型飞行图谱, 见图1, 具有自由金属颗粒放电的特征, 无特高频异常信号。SF₆分解产物测试和X光检测未见异常。后续多次跟踪复测, 发现超声波异常信号幅值波动性较大, 且存在明显增大的趋势, 随即拉开1282 PT开关, 异常信号消失。综合分析判断, 1282开关气室内部存在局部放电缺陷。

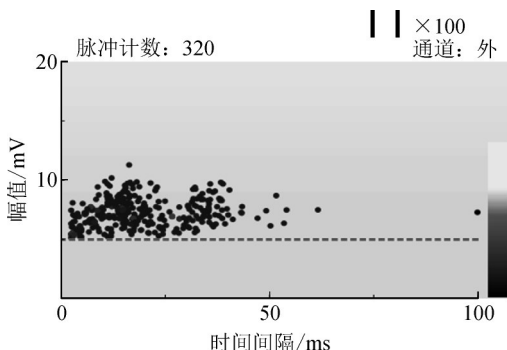


图1 1282开关气室超声波飞行图谱

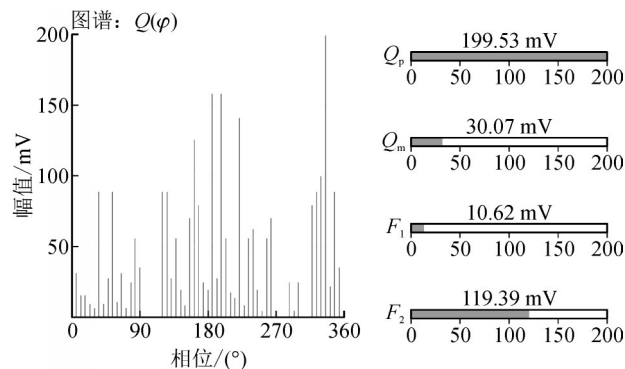
Fig. 1 Abnormal ultrasonic signal of DS 1282

2 缺陷检测经过

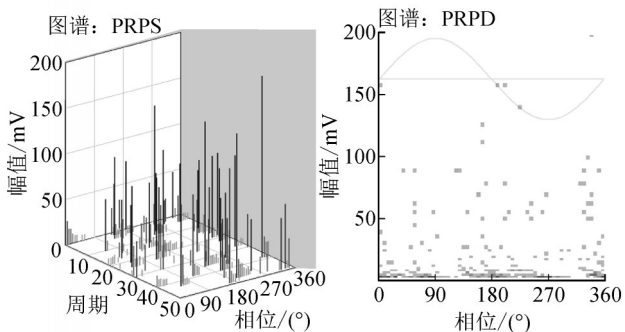
2.1 超声波信号普测

2018年07月, 对110 kV II段母线PT间隔1282

开关气室进行多次普测(背景选择GIS下部构架, 幅值均在5 mV以下), 分别采用3个厂家的带电检测仪器进行检测, 均可测得该异常超声波信号。信号图谱见图2, 从图2中可以看到, 该超声波信号幅值较大, 周期峰值可达200 mV左右, 无明显50 Hz或100 Hz频率相关性, 在PRPS图谱中可以看到放电信号脉冲相位分布离散, 幅值大小不一, 无明显聚集效应, 具有自由颗粒放电特征。调整频带宽度, 分别测量10~20 kHz, 20~50 kHz, 50~100 kHz, 100~200 kHz的脉冲信号, 除了10~20 kHz超声波信号周期峰值为20 mV左右, 其余频带超声波信号峰值均在150 mV以上, 说明信号主要位于高频段, 为放电信号频带, 而非振动信号。此外, 调整信号频带, 超声波信号幅值变化明显, 缺陷可能更靠近于GIS罐体而非中心导体, 但不能排除中心导体也存在缺陷。



(a) 连续图谱与相位图谱



(b) PRPS与PRPD图谱

图2 1282开关气室多个信号图谱

Fig. 2 Multiple ultrasonic wave spectrum of DS 1282

为了进一步确定信号的最大值位置, 对信号异常气室分别进行轴向方向定位和圆周方向定位, 幅值定位时轴向和圆周方向测点布置分别见图3、4。通过轴向定位发现, 沿着轴向方向信号最大值点位于测点1, 即初测时信号最大点处; 然后在轴向方向信号最大点处沿着该点所处的圆周进行定位(最顶部被挡住无法检测), 发现在圆周方向上, 0°位置(圆周方向气室最底部位置)的信号幅值最大。综合轴向方向定位和圆周方向定位, 初步确定该超声信号

的最大值位于该气室最底部测点1位置处。各测点超声波信号峰值数据见表1。

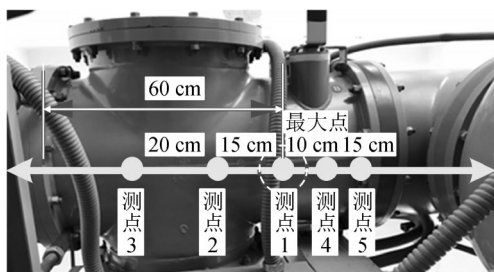


图3 幅值定位时轴向方向测点布置

Fig. 3 Arrangement of measuring points in axial direction

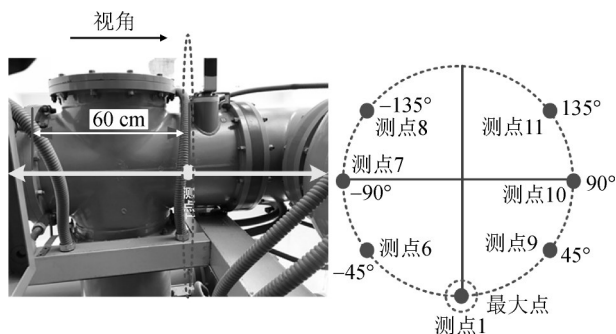


图4 幅值定位时圆周方向测点布置

Fig. 4 Distribution of measuring points in circumferential direction

表1 各测点超声波检测数据

Table 1 The data of ultrasonic signal

测点	1	2	3	4	5	6
峰值/mV	500	250	80	200	40	180
测点	7	8	9	10	11	背景值
峰值/mV	80	20	270	200	70	5

2.2 超声波时差定位

为了进一步确定幅值定位的准确性,采用两个超声波探头进行时差定位:将示波器的一个超声波传感器(通道1)一直贴在幅值定位超声最大点测点1处,然后不断移动另一个传感器(通道2)位置,观察另一个通道2的信号是否始终滞后于通道1信号。

时差定位测试时,通道2传感器的在轴向和圆周方向的测点布置分别见图5、6,以获得最大测点附近各测点的时差信号。给出测点1与测点3、测点5、测点8和测点9的时差波形见图7(上为通道1信号,下为通道2信号)。可以看出通道2传感器不管在轴向还是圆周方向上移动时(除了测点2),异常信号达到通道1传感器的时间始终快于达到通道2传感器的时间,说明之前幅值定位点的确为最靠近放电源的位置。

此外,还发现当通道2传感器位于测点2位置处时,通道1和通道2信号出现交替领先的情况,见

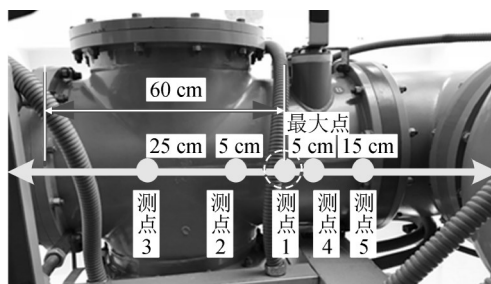


图5 时差定位时轴向方向测点布置

Fig. 5 Arrangement of measuring points in axial direction

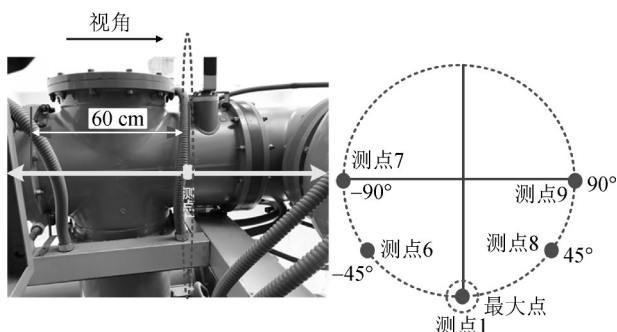


图6 时差定位时圆周方向测点布置

Fig. 6 Distribution of measuring points in circumferential direction

图8。初步分析是因为此次放电类型疑似为自由颗粒放电,且存在两种可能性。一种可能性是在电场作用下,自由颗粒在GIS气室随机跳动,导致其位置不断发生改变,从而使得放电信号到达两个传感器的时差不固定,在测试过程中,放电源位置移动较少,因此信号最大点变化不大;另一种可能性至少存在两个放电源,GIS罐体底部可能有多个金属颗粒碎屑,金属颗粒均集中在超声最大测点附近,在电场作用下每次发生跳动或局部放电的金属颗粒不同,因此出现测点1和测点2时差交替领先的情况。

2.3 缺陷验证

由于负荷原因,不能立刻停电检修,但缺陷的进一步发展极有可能造成事故停电,影响供电可靠性,为了避免缺陷进一步发展引发停电事故,通过断开PT开关改变1282开关GIS气室的电场分布来尝试隔离缺陷。次日凌晨,在拉开PT开关前,对该缺陷部位进行再次复测,信号依旧存在,且信号幅值有所增大,立即拉开PT开关,开关断开后,再次测试该缺陷部位,异常放电信号消失。通过改变设备运行状态,再次验证了该缺陷来自于该PT开关气室内部,与带电检测结果一致。

3 开罐检修

2020年11月,对该PT开关气室进行停电检修,打开侧面检修孔盖板后,发现罐体内部存在较多黑

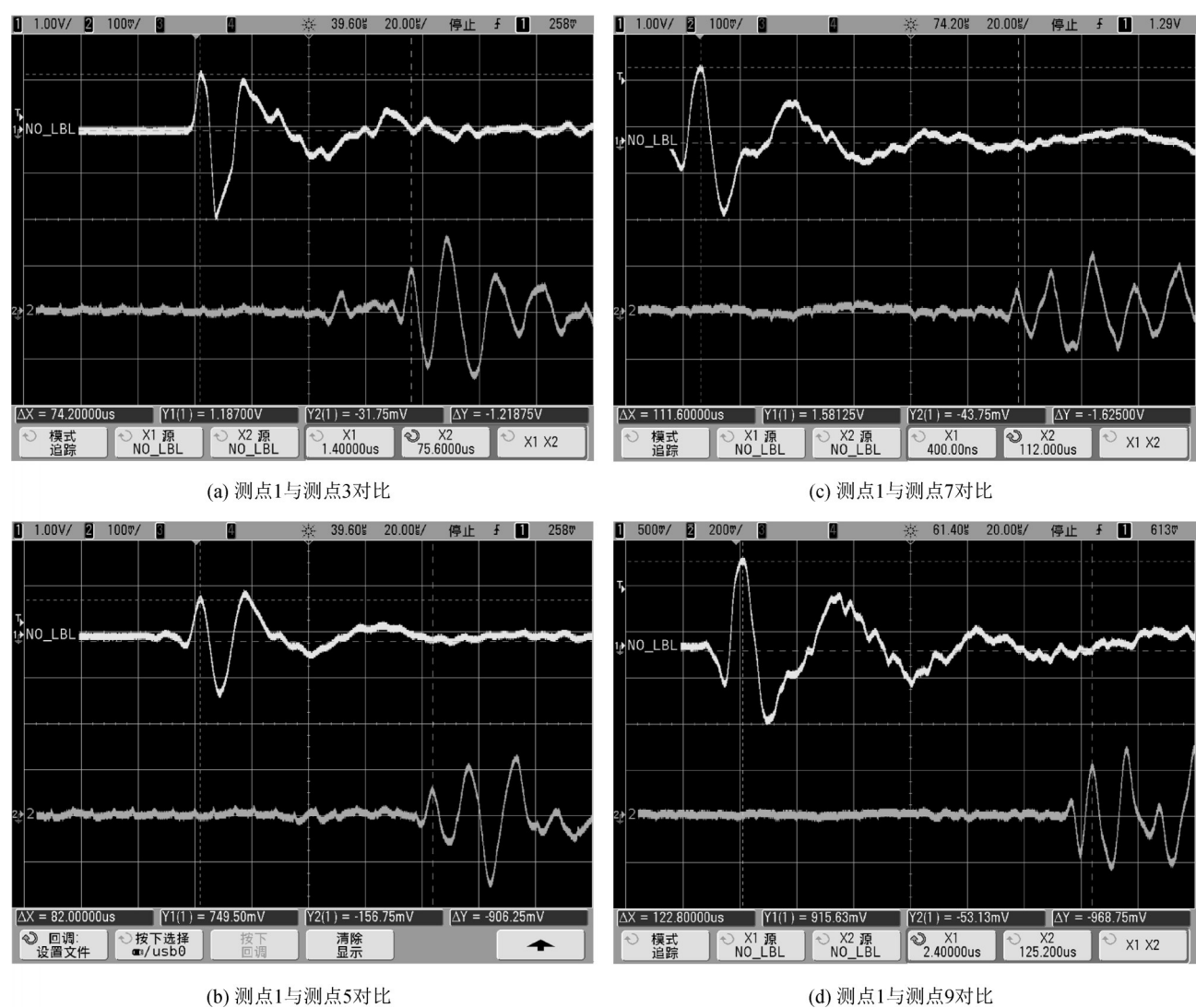


图7 时差定位图谱

Fig. 7 Wave spectrum of time difference location technology

色固体颗粒,颗粒状物质尺寸较小,开关静触头的均压罩交界面上有黑色斑点,该均压罩交界面材质或安装过程工艺存在缺陷,见图9。经现场分析判断,1282开关气室在安装过程中清洁不到位,存在微小金属颗粒碎屑,长期运行后金属颗粒在电场作用下运动,跳动的金属颗粒撞击GIS罐体底部,产生异常超声波信号。与一般的局部放电不同,由于GIS罐体为圆柱形,金属颗粒由于重力的作用,主要在罐体底部小范围内运动,加之金属颗粒尺寸较小,局部高场强也未使金属颗粒产生明显烧蚀痕迹,引发较为强烈的局部放电,因此未检测到特高频信号和异常气体组分。

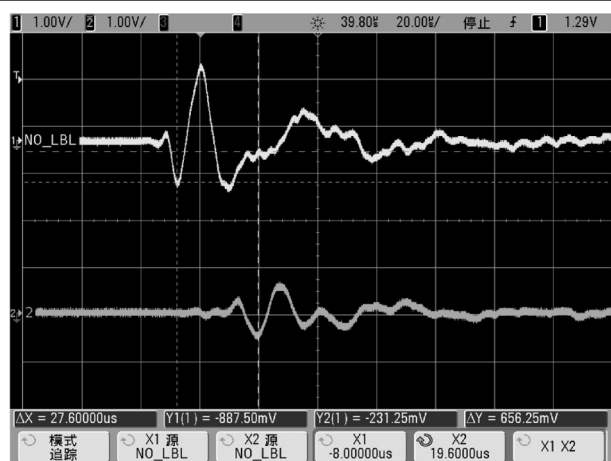
4 结论与建议

4.1 结论

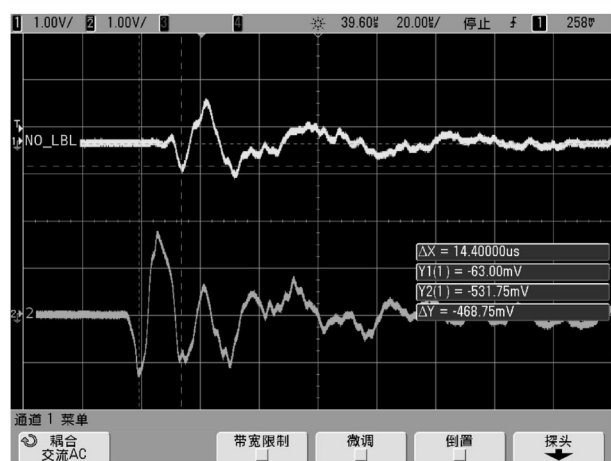
1)文中通过超声波检测发现PT开关气室存在

异常超声信号,利用频带分析,幅值定位,时延定位等多种手段判断GIS内部存在自由金属颗粒放电。断开PT开关,异常信号消失,验证了缺陷的存在。停电开罐检修发现罐体内部存在较多黑色固体颗粒,开关静触头的均压罩交界面上有黑色斑点,底部的微小金属颗粒在局部高电场作用下运动,是产生异常超声波信号的原因。停电检修结果验证了带电检测手段的有效性,实现了精准检修,缺陷高效闭环处理。

2)虽然特高频检测和SF₆气体分解产物检测发现局部放电缺陷较为普遍,但该案例中超声波检测技术对于自由颗粒局放缺陷检测更为有效,因此综合各种手段进行GIS设备全面的分析排查必不可少,各种检测手段的互补性有利于发现缺陷发展的早期情况,有效避免事故发生。



(a) 测点1领先于测点2



(b) 测点2领先于测点1

图8 测点1与测点2信号传播时间交替领先

Fig. 8 Alternate lead of point 1 and point 2



图9 1282开关气室开罐情况

Fig. 9 Internal situation of DS 1282

4.2 建议

结合本次缺陷发现及验证过程,提出下一步建议:

1)安装工艺的质量把控是保障电力设备安全稳定运行的重要前提,尤其针对GIS设备,更应加强对设备的安装及验收的全过程技术监督,建议充分发挥技术监督专业的优势,加强质量管控。

2)对该批次均压罩进行普查普测工作,后续可进一步开展金属材料监督,分析均压罩材质成分,挖掘金属材料方面的原因,同时对使用该产品的GIS设备进行全面带电测试排查,及时发现并处理缺陷隐患。

参考文献:

- [1] 陈敏,陈隽,刘常颖,等. GIS超声波、超高频局部放电检测方法适用性研究与现场应用[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 186-191.
CHEN Min, CHEN Juan, LIU Changying, et al. Applicability research with field applications on ultrasonic and UHF partial discharge detection methods for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 186-191.
- [2] 杨帆,李雅海,卢文斌,等. 高压电气设备局部放电过程超高频信号监测方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 55-60.
YANG Fan, LI Yahai, LU Wenbin, et al. Ultra - high frequency signal monitoring method for partial discharge process of high - voltage electrical equipment[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 55-60.
- [3] 刘君华,郭灿新,姚明,等. 局部放电磁波在GIS中传播路径的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1044-1048.
LIU Junhua, GUO Canxin, YAO Ming, et al. Analysis on the propagation routes of electromagnetic waves of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1044-1048.
- [4] 丁登伟,高文胜,刘卫东. 采用特高频法的GIS典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [5] 辛文成,姚森敬,陈浩敏,等. 计及电磁模特高频信号的局部放电模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 108-115.
XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 108-115.
- [6] 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.

- [7] 吴旭涛,赵晋飞,马云龙,等.基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022,43(4):108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of gis based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [8] 吴迪,陈仁刚,崔勇,等.一起500 kV GIS异响缺陷的检测分析与处理[J]. 电气技术, 2014(11):43-46.
WU Di, CHEN Rengang, CUI Yong, et al. Detection analysis and treatment for accidents caused by abnormal sound of 500 kV GIS[J]. Electrical Engineering, 2014(11): 43-46.
- [9] 王彦彪,陈振勇,郭文萍,等.基于双注意力机制优化CNN架构的GIS局部放电模式识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(2):22-29.
WANG Yanbiao, CHEN Zhenyong, GUO Wenping, et al. PD pattern recognition for GIS based on CNN architecture optimized by the double attention mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 22-29.
- [10] 何金,陈荣,张驰,等.基于多法向光电阵列的GIS同轴母线局部放电溯源方法及仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2022,38(4):76-85.
HE Jin, CHEN Rong, ZHANG Chi, et al. Research on partial discharge tracing method and simulation of GIS coaxial bus based on multi normal photoelectric array[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 76-85.
- [11] 王赞,郑理威,陈忠贤,等.基于光纤EFPI传感器的GIS局部放电研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 67-75.
WANG Zan, ZHENG Liwei, CHEN Zhongxian, et al. Research on partial discharge of GIS based on optical fiber EFPI sensor[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 67-75.
- [12] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS中局部放电特高频信号与放电严重程度的关联分析[J]. 高压电器, 2014, 50(9):6-11.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and PD severity in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 6-11.
- [13] 孙天龙. 基于卷积神经网络与特高频技术的局部放电模式识别研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(10):32-37.
SUN Tianlong. Partial discharge pattern recognition based on convolutional neural network and UHF technology[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(10): 32-37.
- [14] 李晓峰,刘振,庞先海,等.特高频局部放电检测技术在GIS设备上的典型应用[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 100-103.
LI Xiaofeng, LIU Zhen, PANG Xianhai, et al. Typical application of UHF partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 100-103.
- [15] 宋方超,梁雯,张春旭,等.磁致伸缩效应对GIS超声波局部放电检测的影响及实例分析[J]. 高压电器, 2019, 55(3):234-238.
SONG Fangchao, LIANG Wen, ZHANG Chunxu, et al. Impact of magnetostrictive effect on ultrasonic detection of GIS partial discharge and example analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 234-238.
- [16] 李鲁博,王荣亮,宋晓博.特高频法在GIS局部放电检测与定位上的应用[J]. 山西电力, 2018(2):17-21.
LI Lubo, WANG Rongliang, SONG Xiaobo. Application of partial discharge detection and location for GIS based on ultra-high frequency method[J]. Shanxi Electric Power, 2018(2): 17-21.
- [17] 郑莹莹,吕俊涛,周大洲,等. GIS设备金属颗粒放电的带电检测方法[J]. 山东电力技术, 2018, 45(11):15-18.
ZHENG Yingying, LYU Juntao, ZHOU Dazhou, et al. Live detection method for metal particle discharge in GIS equipment[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(11): 15-18.
- [18] 杨景刚,刘媛,宋思齐,等. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11):86-90.
YANG Jinggang, LIU Yuan, SONG Siqi, et al. Research on vibration detection technology of GIS mechanical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 86-90.
- [19] 董建新,刘江明,郦于杰,等. GIS绝缘子表面金属异物缺陷长间歇稀疏性局放检测研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11):73-79.
DONG Jianxin, LIU Jiangming, LI Yujie, et al. Research on long-interval sparse partial discharge in GIS and its sudden breakdown[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 73-79.
- [20] 邵先军,何文林,刘浩军,等.基于数值仿真与多源聚类的GIS局部放电诊断与回归分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10):3163-3172.
SHAO Xianjun, HE Wenlin, LIU Haojun, et al. Partial discharge diagnosis and regression analysis on GIS based on numerical simulation and multiple sources clustering[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3163-3172.
- [21] 李德军,沈威,郭志强. GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J]. 高压电器, 2009, 45(3):

- 99-103.
LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [22] 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.
LIU Hongjing, LI Wei, REN Zhigang, et al. Comparative study on partial discharge test effectiveness of different insulation defects in GIS[J]. Insulating Materials, 2018, 51(9): 53-60.
- [23] 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.
- [24] 牛 勃, 马飞越, 丁 培, 等. GIS局部放电智能巡检定位技术及应用[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 188-196.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Intelligent inspection and location technology of GIS partial discharge and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 188-196.
- 林 岑(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断工作(通信作者)(E-mail: 466958838@qq.com).
- 邱 炜(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断工作。
- 周 波(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电气设备状态诊断工作。
- 杨红权(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电设备一次检修技术工作。
- 刘彦琴(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事变电设备一次检修技术工作。
- 刘 鑫(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事变电设备二次检修技术工作。
- 高 竣(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高电压试验技术工作。
- 曾晓维(1991—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电测仪表及热工检定技术工作。

(上接第184页)

- University, 2003.
- [91] BAUR M, MOHAUPT P, SCHLICK T. New results in medium voltage cable assessment using very low frequency with partial discharge and dissipation factor measurement[C]//17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2003). Barcelona: IET, 2003: 1-5.
- [92] XIE Cheng, WANG Yuli, SHAO Xianjun, et al. The application research of very low frequency diagnostic methods in acceptance tests on new cable systems of medium voltage [C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018: 47-53.
- [93] SALATHE D. New methods for offline PD diagnosis on MV cable systems[C]//2015 30th International Power System Conference (PSC). Tehran: IEEE, 2015: 374-379.
- [94] OYEGOKO B, HYVONEN P, ARO M, et al. Selectivity of damped AC (DAC) and VLF voltages in after-laying tests of extruded MV cable systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 874-882.
- [95] LU Yuxin, ZHAO Xuefeng, GENG Yingjie, et al. A low-cost DAC system for on-site PD testing of HV cables based on ACRF and capacitor bank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2551-2553.
- [96] YANG Saike, LI Hongjie, XU Penglei, et al. A novel DAC generator for PD testing of MV cable insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 499-501.
- [97] 瑞士 ONSITE. 振荡波和0.1 Hz超低频正弦集成技术在配电网综合试验和诊断中的应用[EB/OL]. [2023-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/p227-_8x6GVqlBa80i3nZA.
ONSITE Switzerland. The application of integrated technology of oscillating wave and 0.1 Hz very low frequency sinusoidal wave in comprehensive testing and diagnosis of distribution cables[EB/OL]. [2023-11-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/p227-_8x6GVqlBa80i3nZA.
- 王 超(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配网运行和安全管理。
- 陈 云(1993—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为高压电力设备绝缘试验与检测新技术、先进设备及绝缘材料开发等(通信作者)(E-mail: chenyun2@csg.cn)。
- 肖佳朋(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事输变电设备状态感知、特高压运维工作。
- 黄 韬(1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事电网规划设计工作。
- 吴春芳(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事配网生产技术支持。
- 甄威扬(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事主配网生产技改修理项目管理。
- 郝艳捧(1974—), 女, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为输电设备状态感知技术、介质阻挡放电和局放等气体放电理论、输变电设备外绝缘安全等。