

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.02.006

GIS 固体绝缘缺陷所激发特高频信号时频特征研究

周电波¹, 许本茂², 张 劲¹, 丁登伟³, 薛志航¹, 姚 晓¹, 马啟潇¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041; 2. 国网天府新区供电公司, 成都 610041; 3. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213)

摘要: 利用特高频局部放电检测方法及时发现并处理气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)内部固体绝缘缺陷, 是GIS设备运维的重要手段。目前将异常特高频信号与现行标准、规范和典型模拟缺陷图谱进行比对从而诊断缺陷类型及严重程度的方法, 因现场情况复杂、设备结构各异, 准确性有待进一步提升。因此文中针对现场检测中发现的GIS固体绝缘表面放电缺陷和内部气隙放电缺陷, 研究该类缺陷所激发特高频局部放电信号的PRPS统计图谱特征, 并利用傅里叶变换和连续小波变换分析单次特高频原始脉冲的频谱特征和时频特征。通过总结各类典型固体绝缘放电缺陷信号的脉冲持续时间、放电次数、相位宽度、极性效应、频域分布和时频特征等变化规律, 有助于优化特高频检测频带, 提升绝缘类缺陷的检测灵敏度, 有利于检测人员更加准确进行放电类型识别和缺陷综合诊断, 提升现场缺陷检测和诊断水平。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 固体绝缘; 局部放电; 特高频; 时频特征

Study on Time-frequency Characteristics of UHF Signals Excited by Solid Insulation Defects in GIS

ZHOU Dianbo¹, XU Benmao², ZHANG Jin¹, DING Dengwei³, XUE Zhihang¹,
YAO Xiao¹, MA Qixiao¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Tianfu New District Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: Detection and treatment of internal solid insulation defects by ultra-high frequency (UHF) partial discharge method is an important measure for operation and maintenance of gas insulated switchgear (GIS). At present, the accuracy of the method of comparing abnormal UHF signals with current standards, specification and typical simulation defect atlas to diagnose defect types and severity still needs to be improved due to complex site conditions and various structures of equipment. Therefore, in this paper, in view of discharge defects of solid insulation surface and of internal sphere gap of GIS, which is found at site detection, PRPS (phase resolved pulse sequence) statistical spectrum characteristic of UHF partial discharge signal excited by such type of defect is studied. The spectrum and time-frequency characteristics of single UHF original pulse is analyzed by Fourier transform and continuous wavelet transform. The summary of the pulse duration, discharge numbers, phase width, polarity effect, frequency domain distribution and time-frequency characteristics of various solid insulation discharge defect signals can help optimize the UHF detection frequency band, improve the detection sensitivity of insulation defects and can be beneficial for the inspectors to identify more accurately the discharge type and comprehensively diagnose the defects as well as improve the defect detection and diagnosis level at site.

Key words: gas insulated switchgear (GIS); solid insulation; partial discharge; ultra-high frequency; time-frequency characteristics

收稿日期: 2020-08-23; 修回日期: 2020-10-26

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521997180015)。

Project Supported by Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company(521997180015).

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)盆式绝缘子、支撑绝缘子、绝缘拉杆等固体绝缘,存在表面或内部气隙放电,很多情况下缺陷持续发展会导致绝缘击穿,引起大量GIS突发故障。因此,对GIS固体绝缘局部放电缺陷及时、准确地检测和诊断,对设备安全运行意义重大。目前日趋成熟的基于特高频法的GIS局部放电检测技术,对此具有良好的检测灵敏度,以信号图谱特征分析和缺陷定位诊断为核心,广泛应用于电力系统,发现了大量GIS内部缺陷,有力支撑了设备运维工作^[1-4]。

根据现行的标准、规程指导和常用方法,检测

人员对于现场采集的GIS特高频异常信号,通常是比对典型模拟缺陷得到的信号工频相关性、幅值分布、相位分布和放电次数等特征,判断缺陷类型及严重程度,指导设备运维检修。其中GIS固体绝缘局部放电,对模拟试品信号PRPS(phase resolved pulse sequence)图谱研究发现,无论是沿面放电还是内部气隙放电,都具有明显的100 Hz频率相关性、放电次数少、放电幅值分散性较大、放电时间间隔不稳定和极性效应不明显等特征^[5-8]。然而,相对模拟试品,实际运行中的GIS,内部结构、运行工况、运行环境更加复杂,若存在局部放电,缺陷情况和发展程度也各不相同,同时还会受到固体绝缘外形、结构、材料、工艺等因素影响。大量现场检测发现,部分被证实的GIS固体绝缘局部放电缺陷,其特高频信号特征与模拟的典型缺陷信号特征有明显差异,如果机械依照模拟试验结果进行缺陷类型判断并开展设备检查检修,有可能误判缺陷类型,影响设备检修工作开展^[9-13]。

因此,文中针对现场实际检测发现的GIS固体绝缘缺陷,分析缺陷所引发局部放电的特高频信号特征,总结各类信号PRPS统计图谱的频率相关性、放电次数、相位宽度和极性效应,单簇脉冲信号的频谱分布和时频特征等,从而提升GIS固体绝缘局部放电缺陷的现场检测和诊断水平。

1 GIS固体绝缘局部放电及特高频检测系统

1.1 缺陷产生原因

GIS固体绝缘表面存在异物或金属嵌件与绝缘材料间交接不良,内部因浇注工艺不佳或受力不均出现气隙、裂痕,在运行电压下均会导致缺陷部

位场强过大,严重情况下会产生局部放电。其中,固体绝缘表面存在毫米级颗粒等异物,若是暂时附着,在电场作用下会被移至低场强区,避免局部放电乃至绝缘闪络的发生,若异物固定在固体绝缘表面,往往会引起电荷积聚引发局部放电,持续发展可能引起突发性绝缘闪络,而固体绝缘表面交接不良或内部存在气隙、裂痕,特别是当内部气隙、裂痕位于导体和绝缘材料交界部位,在长期运行下可能产生局部放电,此类绝缘缺陷产生的局部放电不可自恢复,随着运行时间推移日益严重直至绝缘击穿。

1.2 缺陷检测手段

就目前而言,对于运行中存在固体绝缘缺陷的GIS,若产生局部放电,基于特高频法的带电检测或在线监测方法是最为有效的发现手段,此外,结合X射线检测也有助于发现表面异物、内部气隙等固体绝缘缺陷。

根据现有研究,固体绝缘导体嵌件与绝缘材料间交接不良和内部气隙、裂痕等缺陷,通常从出现可以被检测的轻微局部放电到绝缘闪络之间还有一段发展过程,在这期间完成缺陷检测诊断、指导设备消缺即可保障设备安全运行,而固体绝缘表面异物放电缺陷,早期运行状态下几乎没有局部放电发生,即使存在局部放电情况,放电量也非常小无法被现有检测系统检测到,一旦局部放电发展到异常信号足以被检测到,很可能已经到了缺陷晚期,很快就会导致设备故障^[14-15]。

1.3 特高频局部放电检测系统

文中开展基于现场检测的GIS固体绝缘放电特高频信号时频特征研究,所用的特高频局部放电检测系统由特高频传感器、前置放大器和采集单元组成。特高频传感器有效高度见图1,特高频传感器在300~1 500 MHz频率范围内有效高度为10.5 mm,加入前置放大器后,在300~1 500 MHz频率范围内有效高度可达59.7 mm,满足特高频局部放电信号检测要求。在采集单脉冲时域信号时,所用采集单元为示波器,单通道带宽2.5 GHz、采样率10 MSa/s,满足采样要求。

2 GIS固体绝缘放电信号时频特征

GIS固体绝缘表面异物放电,因发展过程迅速,期间信号变化复杂,在此仅对盆式绝缘子金属嵌件与绝缘材料间交接不良和固体绝缘内部气隙引发的局部放电信号时频特征进行研究。

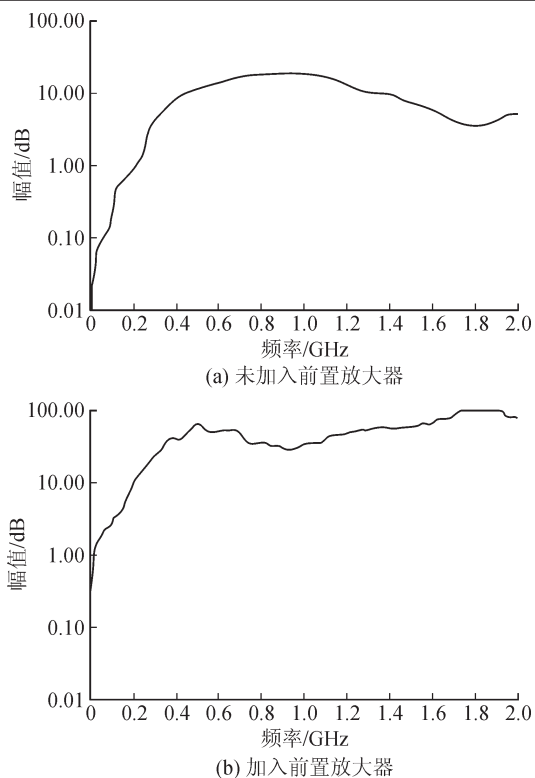


图1 特高频传感器有效高度

Fig. 1 Effective height of UHF sensor

2.1 220 kV 盆式绝缘子表面放电

2017年,对某500 kV变电站220 kV GIS开展特高频局部放电检测(被测设备盆式绝缘子无金属屏蔽),见图2。在I母PT隔离开关气室的多个盆式绝缘子处均测得异常特高频信号,经多通道信号时延定位,计算得到放电源位于最接近I母PT的盆式绝缘子上,对该盆式绝缘子测得的信号进行分析(放电源位于该盆式绝缘子中心导体与绝缘材料交界处,传感器位于该盆式绝缘子边沿)。



图2 220 kV 缺陷盆式绝缘子特高频测点和放电源位置

Fig. 2 UHF measuring points and defect position of 220 kV pot insulator with surface discharge

通过特高频局部放电检测仪采集的220 kV 缺陷盆式绝缘子特高频PRPS图谱(检测期间未发现异常超声波信号)见图3,从信号特征看,呈显著的100 Hz 频率相关性,一个工频周期出现两簇集中放电,放电幅值稳定,放电次数多,相位分布广,从放电脉冲

数量看呈现明显的极性特征。

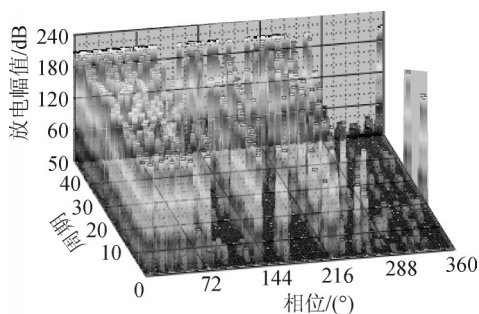


图3 220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频PRPS图谱

Fig. 3 Surface discharge UHF PRPS signal of 220 kV pot

通过示波器采集的220 kV 缺陷盆式绝缘子特高频时域波形图见图4,从图4可见,振荡脉冲信号持续时间约为500 ns,信号幅值超过200 mV。220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频频谱分布见图5,对采集的原始信号进行傅里叶分析,频域范围最高可达600 MHz,主要能量分布集中在200~350 MHz。220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时频分布图见图6,对采集的原始信号进行连续小波变换,得到信号时频分布图,可见特高频信号在波头部分瞬时频率接近700 MHz,但快速衰减,400~650 MHz之间的频谱分量持续近100 ns,也出现明显衰减,200~350 MHz之间的频谱分量持续时间较长,约500 ns。

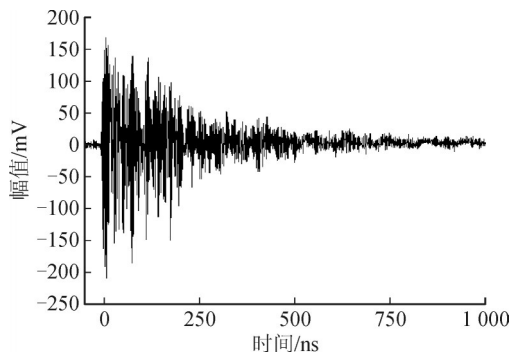


图4 220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时域波形

Fig. 4 Surface discharge UHF time signal of 220 kV pot insulator

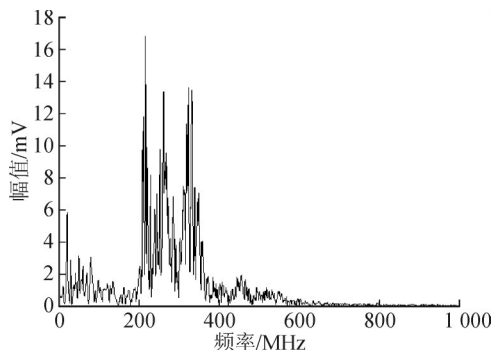


图5 220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频频谱分布

Fig. 5 Surface discharge UHF frequency distribution of 220 kV pot insulator

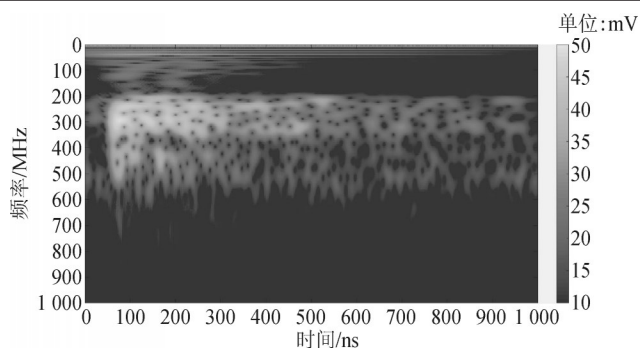


图6 220 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时频分布图
Fig. 6 Surface discharge UHF time-frequency distribution of 220 kV pot insulator

220 kV 盆式绝缘子表面可见小凹痕见图7,根据检测和定位结果对I母进行停电检修,解体后拆下缺陷盆式绝缘子。可见,该220 kV 盆式绝缘子凸面的金属嵌件与绝缘材料交界的表面存在肉眼可见的黑色凹坑,通过高倍放大镜观察的放电痕迹见图8,用高倍放大镜观察,更清晰可见黑色凹坑均是由局部放电造成。通过X射线成像检测未发现该盆式绝缘子存在内部气隙或裂纹。

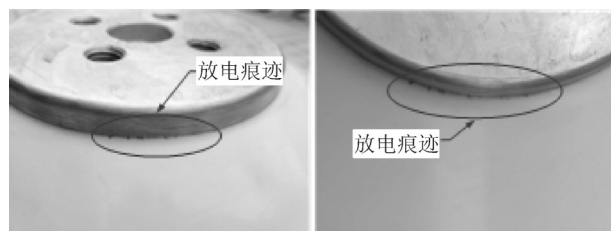


图7 220 kV 盆式绝缘子表面可见小凹痕
Fig. 7 The visible small dent on 220 kV pot insulator surface

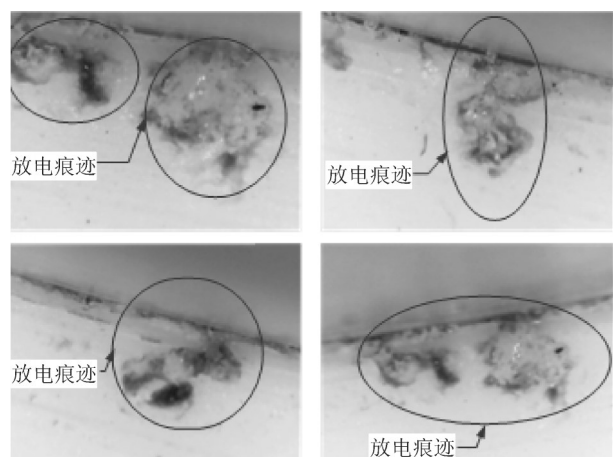


图8 通过高倍放大镜观察的放电痕迹
Fig. 8 The discharge mark watched by high magnified glass

2.2 110 kV 盆式绝缘子表面放电

2018年,对某220 kV 变电站110 kV GIS开展特高频局部放电检测(被测设备盆式绝缘子无金属屏蔽)

见)见图9,在位于165开关间隔和166开关间隔之间I母多个盆式绝缘子处测得异常特高频信号,经多通道信号时延定位,计算得到放电源位于伸缩节旁的盆式绝缘子上,对该盆式绝缘子测得的信号进行分析(放电源位于该盆式绝缘子中心导体与绝缘材料交界处,传感器位于该盆式绝缘子边沿)。



图9 110 kV 缺陷盆式绝缘子特高频测点和放电源位置
Fig. 9 UHF measuring points and defect position of 110 kV pot insulator with surface discharge

通过特高频局部放电巡检仪首次及在此之后6个月分别采集的110 kV 缺陷盆式绝缘子特高频PRPS图谱(检测期间未发现异常超声波信号)见图10,从信号特征看,首次检测的信号呈的100 Hz 频率相关性,一个工频周期出现两簇放电,放电次数少,相位分布窄,但信号幅值和放电脉冲数量呈现明显的极性效应。6个月后,随着缺陷进一步发展,检测的信号也呈现显著的100 Hz 频率相关性,一个工频周期出现两簇集中放电,但放电幅值增大且较稳定,放电次数增加,相位分布有所扩大,极性效应不明显。

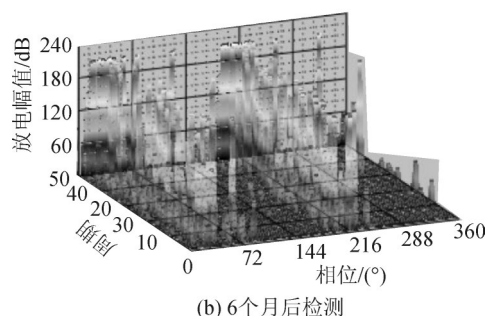
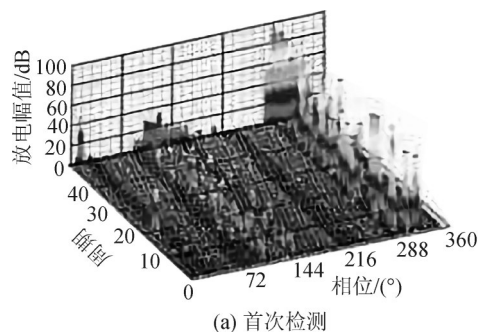


图10 110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频PRPS图谱
Fig. 10 Surface discharge UHF PRPS signal of 110 kV pot insulator

通过示波器采集的 110 kV 缺陷盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时域波形图谱见图 11。从图 11 可见, 振荡脉冲信号持续时间约为 600 ns, 信号幅值超过 300 mV。110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频频域分布见图 12, 对采集的原始信号进行傅里叶分析, 频域范围最高可达 600 MHz, 主要能量分布集中在 200~380 MHz。110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时频分布图见图 13, 对采集的原始信号进行连续小波变换, 得到信号时频分布图, 从图 13 可见, 特高频信号在波头部分瞬时频率接近 900 MHz, 但快速衰减, 600~900 MHz 之间的频谱分量持续近 100 ns, 出现明显衰减, 300~600 MHz 之间的频谱分量持续近 300 ns, 出现明显衰减, 150~300 MHz 之间的频谱分量持续时间较长, 约 600 ns。

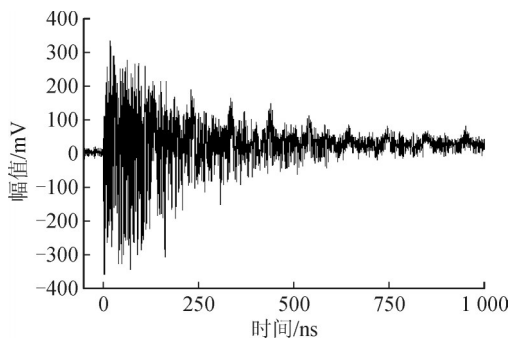


图 11 110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时域波形

Fig. 11 Surface discharge UHF time signal of 110 kV pot insulator

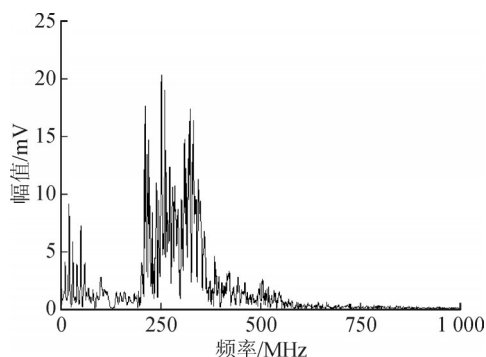


图 12 110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频频域分布

Fig. 12 Surface discharge UHF frequency distribution of 110 kV pot insulator

110 kV 盆式绝缘子表面可见小凹痕见图 14, 根据检测和定位结果对 I 母进行停电检修, 解体后拆下缺陷盆式绝缘子。从图 14 可见, 该 110 kV 盆式绝缘子凸面的金属嵌件与绝缘材料交界的表面存在肉眼可见的黑色凹坑, 通过高倍放大镜检查的放电痕迹见图 15, 用高倍放大镜检查, 更清晰可见黑色凹坑均是由局部放电造成。通过 X 射线成像检测未发现该盆式绝缘子存在内部气隙或裂纹。

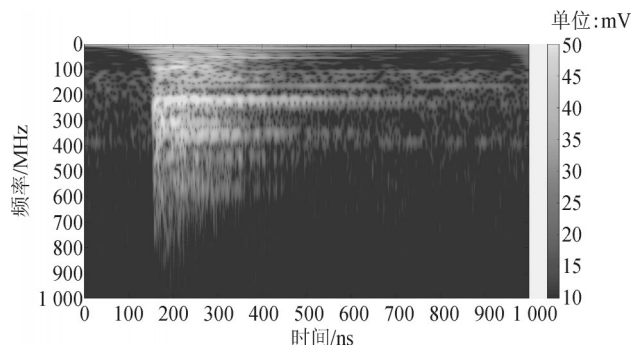


图 13 110 kV 盆式绝缘子表面放电缺陷特高频时频分布图

Fig. 13 Surface discharge UHF time-frequency distribution of 110 kV pot insulator

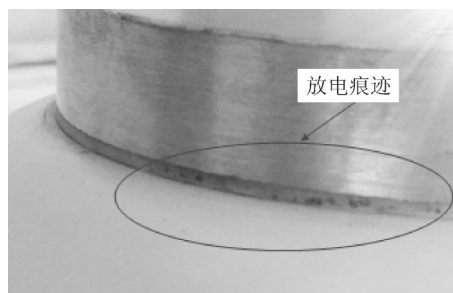


图 14 110 kV 盆式绝缘子表面可见小凹痕

Fig. 14 The visible small dent on 110 kV pot insulator surface

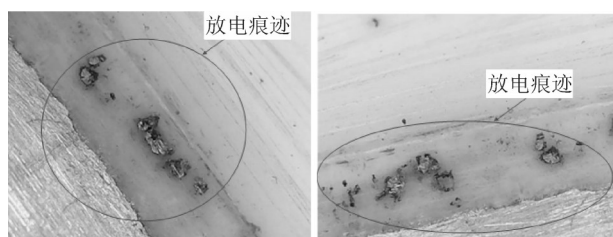


图 15 通过高倍放大镜检查的放电痕迹

Fig. 15 The discharge mark watched by high magnified glass

2.3 110 kV 支撑绝缘子气隙放电

2016 年, 对某 110 kV 变电站 110 kV GIS 开展特高频局部放电检测(被测设备盆式绝缘子无金属屏蔽)见 16, 在某出线间隔与 I 母连接的多个盆式绝缘子处测得异常特高频信号, 经多通道信号时延定位, 计算得到放电源位于特高测点 1 和特高频测点 2 之间的 I 母区域, 疑似为支撑绝缘子局部放电缺陷。特高频测点 1 处(传感器距离放电源约 40 cm, 之间无特殊结构)采集的信号幅值最大, 对该信号进行分析。

通过特高频局部放电巡检仪采集的特高频测点 1 处 PRPS 图谱(检测期间未发现异常超声波信号)见图 17, 从信号特征看, 呈显著的 100 Hz 频率相关性, 一个工频周期出现两簇放电, 放电幅值很大且不稳定, 放电次数很少, 相位分布窄, 极性效应不明显。

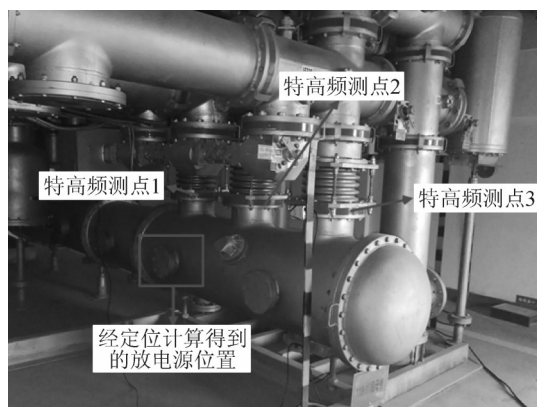


图16 110 kV缺陷支撑绝缘子特高频测点和放电源位置

Fig. 16 UHF measuring points and defect position of 110 kV supporting insulator with air gap discharge

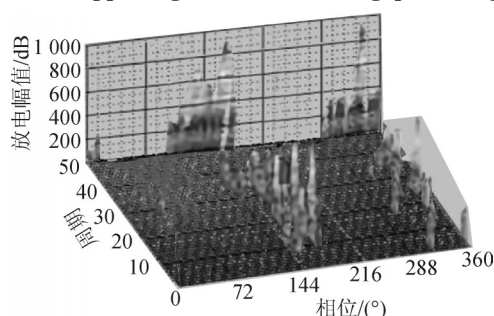


图17 110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频PRPS图谱

Fig. 17 Air gap discharge UHF PRPS signal of 110 kV supporting insulator

通过示波器采集的特高频测点1处时域波形谱见图18,从图18可见,振荡脉冲信号持续时间约为400 ns,信号幅值超过300 mV。110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频频域分布见图19,对采集的原始信号进行傅里叶分析,频域范围最高超过1 000 MHz,主要能量分布集中在450~600 MHz。110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频时频分布图见图20,对采集的原始信号进行连续小波变换,得到信号时频分布图,从图20可见,特高频信号在波头部分瞬时频率接近1 000 MHz,但快速衰减,600~900 MHz之间的频谱分量持续近100 ns,出现明显衰减,500~600 MHz之间的频谱分量持续时间较长,约400 ns。

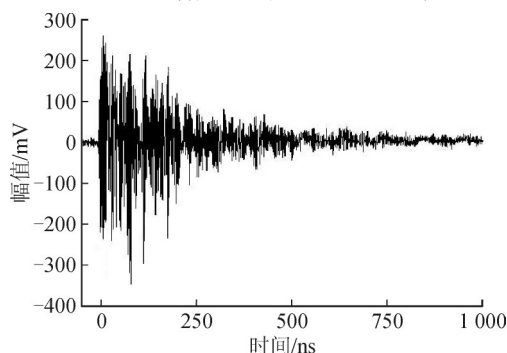


图18 110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频时域波形

Fig. 18 Air gap discharge UHF time signal of 110 kV supporting insulator

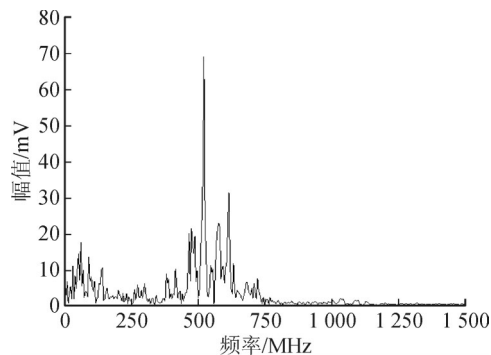


图19 110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频频域分布

Fig. 19 Air gap discharge UHF frequency distribution of 110 kV supporting insulator

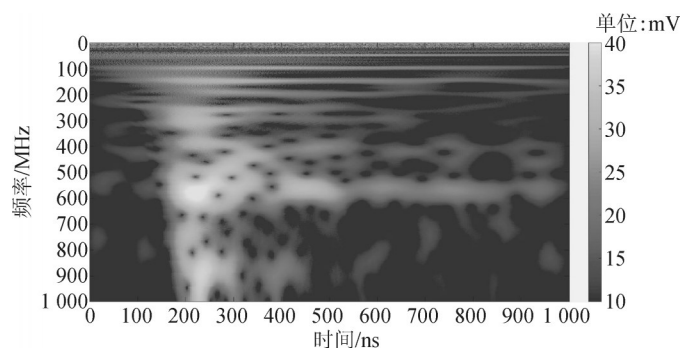


图20 110 kV支撑绝缘子气隙放电缺陷特高频时频分布图

Fig. 20 Air gap discharge UHF time-frequency distribution of 110 kV supporting insulator

经X射线检测的110 kV支撑绝缘子内部气隙见图21,根据检测和定位结果对I母进行停电检修,解体后取出定位区域内I母3只支撑绝缘子。3只绝缘子表面均未见放电痕迹,通过X射线成像检测发现,A相支撑绝缘子存在内部气隙,气隙位于导体和绝缘材料交界部位,在运行状态下该缺陷激发出异常特高频信号。

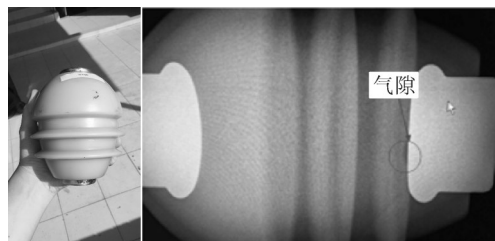


图21 经X射线检测的110 kV支撑绝缘子内部气隙

Fig. 21 The air gap in 110 kV supporting insulator detected by X ray

2.4 110 kV 绝缘拉杆气隙放电

2020年,对某220 kV变电站110 kV GIS开展特高频局部放电检测(被测设备盆式绝缘子无金属屏蔽)见图22,在母联112开关间隔1121隔离开关气室与I母连接的盆式绝缘子处测得异常特高频信号,相邻盆式绝缘子未测得异常特高频信号。同时,在1121隔离开关气室可测得异常超声波信号,经定

位,放电源位于隔离开关位置。对母联 112 开关间隔 1121 隔离开关气室与 I 母连接的盆式绝缘子(传感器距离放电源约 50 cm,之间无特殊结构)处测得的异常特高频信号进行分析。



图 22 110 kV 缺陷绝缘拉杆特高频测点

Fig. 22 UHF measuring point of 110 kV insulated tension pole with air gap discharge

通过特高频局部放电巡检仪采集的 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频 PRPS 图谱(检测期间测得与特高频信号特征相似的异常超声波信号)见图 23,从信号特征看,呈显著的 50 Hz 频率相关性,一个工频周期出现一簇放电,放电幅值不稳定,放电次数少,相位分布窄,从信号幅值和放电脉冲数看呈现明显的极性效应。

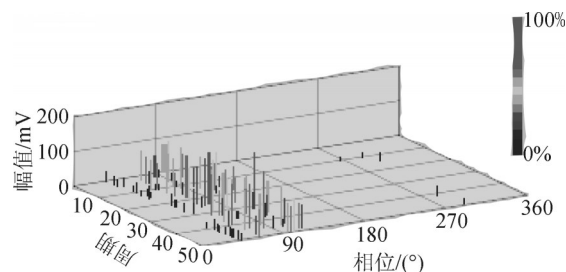


图 23 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频 PRPS 图谱
Fig. 23 Air gap discharge UHF PRPS signal of 110 kV insulated tension pole

通过示波器采集的 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频时域波形图谱见图 24,从图 24 可见,振荡脉冲信号持续时间不足 100 ns,信号幅值超过 200 mV。110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频频域分布见图 25,对采集的原始信号进行傅里叶分析,频域范围最高超过 1 000 MHz,主要能量分布集中在 480~700 MHz。110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频时频分布图见图 26,对采集的原始信号进行连续小波变换,得到信号时频分布图,从图 26 可见,特高频信号在波头部分瞬时频率接近 1 000 MHz,但快速衰减,250~300 MHz 和 500~700 MHz 之间的频谱分量持续近 150 ns,出现明显衰减,其余频段分量均较小。

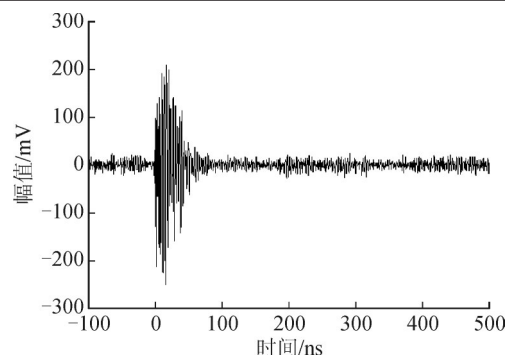


图 24 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频时域波形

Fig. 24 Gap discharge UHF time signal of 110 kV insulated tension pole

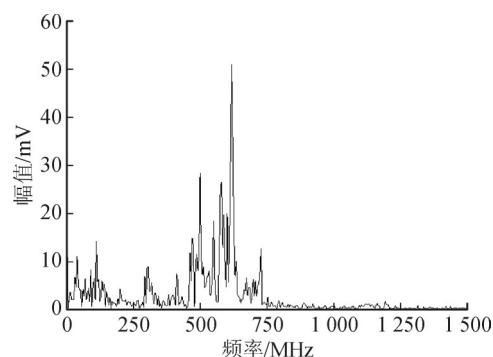


图 25 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频频域分布

Fig. 25 Gap discharge UHF frequency distribution of 110 kV insulated tension pole

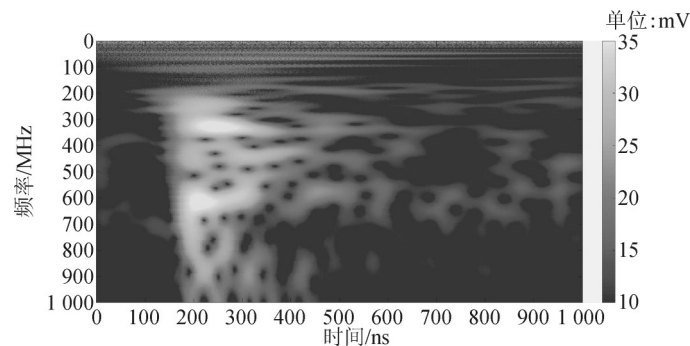


图 26 110 kV 绝缘拉杆气隙放电缺陷特高频时频分布图

Fig. 26 Gap discharge UHF time-frequency distribution of 110 kV insulated tension pole

经 X 射线检测的 110 kV 绝缘拉杆内部气隙见图 27,根据检测和定位结果对 1121 隔离开关气室进行停电检修,气室内未见放电痕迹,取出 3 只隔离开关绝缘拉杆。3 只绝缘拉杆表面均未见放电痕迹,通过 X 射线成像检测发现, A 相绝缘拉杆存在内部气隙,气隙位于导体和绝缘材料交界部位,在运行状态下该缺陷激发出异常特高频信号。

3 综合分析

根据现场实测的盆式绝缘子金属嵌件与绝缘材料交接不良局部放电缺陷,其对应的特高频信号

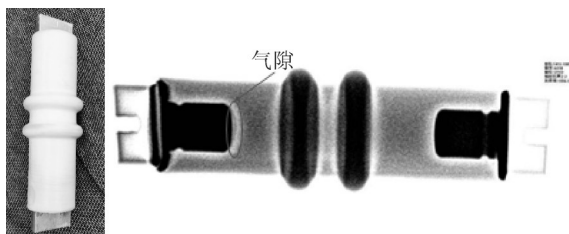


图 27 经 X 射线检测的 110 kV 绝缘拉杆内部气隙

Fig. 27 The gap in 110 kV insulated tension pole detected by X ray

PRPS 图谱,通常具有 100 Hz 频率相关性,但在缺陷发展的不同时期,放电次数、相位宽度和极性特征存在明显差异,随着缺陷发展到一定程度,信号幅值、放电次数和相位宽度增加,同时,正负半周信号特征逐步趋于一致且更加稳定。此类缺陷 PRPS 图谱特征的不确定性,使得现场检测中根据 PRPS 图谱特征判断放电类型容易出现差错。从此类信号的时域波形特征看,脉冲持续时间约为 500~600 ns,从频域特征和时频分布看,信号能量最强频段为 200~400 MHz。

根据现场实测的固体绝缘内部气隙局部放电缺陷,其对应的特高频信号 PRPS 图谱,信号幅值不稳定、放电次数少、放电时间间隔不规律、相位分布窄,极性效应显著,甚至 50 Hz 频率相关性明显大于 100 Hz 频率相关性,与部分实验室模拟缺陷检测结果存在较大差异。此类缺陷 PRPS 图谱特征的不确定性,使得现场检测中根据 PRPS 图谱特征判断放电类型容易出现差错。从此类信号的时域波形特征看,脉冲持续时间约为 100~400 ns,从频域特征看,信号能量最强频段为 450~700 MHz。

对比固体绝缘表面放电缺陷和内部气隙放电缺陷,PRPS 图谱特征都具有不确定性,但总体而言,内部气隙放电缺陷放电次数更少、相位分布更窄。从时频特征进行分析,内部气隙放电缺陷脉冲持续时间更短、频域更高,但两类缺陷信号能量最强频段均远低于 1 GHz,对于有金属屏蔽须打开浇筑孔封闭金属进行检测的情况,由于浇筑孔处主要通过频率在 1 GHz 以上的信号,可能会严重影响固体绝缘局部放电缺陷检测成效甚至无法检测到存在的缺陷。

4 结论

1)基于现场检测,对固体绝缘导体和绝缘材料间接不良导致的表面放电缺陷和内部气隙放电缺陷产生的特高频局部放电信号特征进行分析,发现缺陷发展不同时期信号特征有明显差异,与典型模拟缺陷图谱也有不同。

2)对固体绝缘表面放电缺陷和内部气隙放电缺陷进行了时频分析,有助于信号特征的识别和现场检测频带的优化,同时,由于固体绝缘放电缺陷高频信号频域较低,若盆式绝缘子有金属屏蔽须打开浇筑孔封闭金属进行检测,可能严重影响检测效果,建议在此类情况下加强超声波法的应用。

3)由于固体绝缘放电特高频信号的统计图谱特征存在不确定性,同时考虑到信号传播过程中的畸变,现场检测除通过典型图谱对缺陷类型进行识别外,还应根据缺陷所在部位结构、设备历史运行数据进行综合分析,得出更加准确结论指导运维检修工作开展。

参考文献:

- [1] 邵先军,詹江杨,常丁戈,等. 550 kV GIS 盆式绝缘子多气泡放电的测试与诊断[J]. 高电压技术,2020,46(2): 554-560.
SHAO Xianjun, ZHAN Jiangyang, CHANG Dingge, et al. Test and diagnosis of multiple voids discharge for 550 kV GIS insulation spacer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 554-560.
- [2] 陈飞. GIS 设备的发展和应用研究[M]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2007.
CHEN Fei. Investigation of GIS development and application[M]. Hangzhou: Master Thesis of Zhejiang University, 2007.
- [3] 周云锋,杨景刚,张子阳. 组合电器盆式绝缘子内部气隙缺陷的带电检测与分析[J]. 高压电器,2012,48(9): 112-116.
ZHOU Yunfeng, YANG Jinggang, ZHANG Ziyang. On-line detection and analysis of gas cavity in insulator of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 112-116.
- [4] 何宁辉,朱洪波,周秀,等. GIS 内部缺陷检测及诊断分析技术研究[J]. 电测与仪表,2019,56(24): 86-91.
HE Ninghui, ZHU Hongbo, ZHOU Xiu, et al. Research on GIS internal defect detection and diagnosis analysis technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 86-91.
- [5] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于超高频法的典型 GIS 局部放电检测[J]. 高压电器,2012,48(4): 7-12.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 7-12.
- [6] SHIBUYA Y, MATSUMOTO S, TANAKA M. Electromagnetic waves from partial discharges and their detection using patch antenna[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 862-871.

- [7] JUDD M D. Using finite difference time domain techniques to model electrical discharge phenomena[C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]:[s.n.], 2000:2.
- [8] 党晓婧, 黄荣辉, 刘顺桂, 等. 基于时频域特征的局部放电单脉冲波形分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20):52-56. DANG Xiaojing, HUANG Ronghui, LIU Shungui, et al. Analysis of single - pulse waveform of partial discharge based on time-frequency characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20):52-56.
- [9] 宋东波, 黄 洁, 朱太云, 等. 一起 GIS 固体绝缘件局部放电缺陷的定位与分析[J]. 高压电器, 2018, 54(5):74-79. SONG Dongbo, HUANG Jie, ZHU Taiyun, et al. Localization and analysis of a partial discharge defects in GIS solid insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):74-79.
- [10] 马飞越, 王 沛, 王 博. GIS 母线支撑绝缘子气隙放电综合诊断与分析[J]. 高压电器, 2018, 54(11):147-152. MA Feiyue, WANG Pei, WANG Bo. Comprehensive diagnosis and analysis of air gap discharge in the GIS busbar support insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):147-152.
- [11] 黎卫国, 张长虹, 杨 旭, 等. 500 kV GIL 三支柱绝缘子炸裂故障分析与防范措施[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):221-227. LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Analysis and protecting measures on burst fault of three - pillar insulator of 500 kV GIL[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):221-227.
- [12] 张晓星, 舒 娜, 徐晓刚, 等. 基于三维谱图混沌特征的
- GIS 局部放电识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1):249-254. ZHANG Xiaoxing, SHU Na, XU Xiaogang, et al. GIS partial discharge recognition based on chaos features of the three-dimensional spectra[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1):249-254.
- [13] 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.
- [14] 张齐根, 李晓昂, 刘 琳, 等. GIS 中 SF₆ 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术, 2019, 45(9):2689-2698. ZHANG Qiaogen, LI Xiao'ang, LIU Lin, et al. “One-zero” phenomenon of discharge induced by defects in SF₆ insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9):2689-2698.
- [15] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14):4315-4324. XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of sub-millimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14):4315-4324.
- 周电波(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事变电设备状态检测、在线监测方面的生产工作和技术研究(E-mail: 425851891@qq.com)。
- ~~~~~
- (上接第 32 页)
- [14] 董昭德. 接触网[M]. 第二版. 北京: 中国铁道出版社: 2012:33-43. DONG Zhaode. Catenary[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2012:33-43.
- [15] LI Jianbiao, YANG Qing, SIMA W, et al. A new estimation model of the lightning shielding performance of transmission lines using a fractal approach[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1712-1723.
- [16] 李建标. 雷电先导分形模型及线路耐雷性能评估方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. LI Jianbiao. Research on lightning leader fractal model and the method to estimate the lightning shielding performance of transmission[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [17] HE J L, TU Y P, ZENG R, et al. Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 815-822.
- [18] 李瑞芳, 金 亮. 雷电发展对高速铁路周围电场分布影响的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8):22-27. LI Ruifang, JIN Liang. Effect of lightning development on electric field distribution around high - speed railway[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8):22-27.
- [19] 李瑞芳, 陈力生, 陈 奎, 等. 基于分形理论的高速铁路高架桥接触网系统雷击空间电场研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(9):57-64. LI Ruifang, CHEN Lisheng, CHEN Kui, et al. Study on space electric field of lightning strike to HSR viaduct catenary system based on fractal theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9):57-64.
- 杨 雪(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事 500 kV 变电站二次设备管理运维工作(E-mail: luck_yangxue@163.com)。
- 李中梅(1994—), 女, 硕士, 主要从事电力系统高压试验及二次设备管理运维工作。
- 李瑞芳(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事防雷接地相关研究(通信作者)。
- 李飞鹏(1993—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事 500 kV 变电站二次设备管理运维工作。
- 王 胜(1993—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事 500 kV 变电站二次设备管理运维工作。