

GIS 支撑绝缘子内部放电缺陷综合诊断方法现场应用

代 晖¹,熊 攀¹,周电波²,杨 帆¹,薛志航²,何宇航²,姚 晓²

(1. 国网四川省电力公司泸州供电公司,四川 泸州 646000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:介绍了基于特高频局部放电检测和 X 射线成像检测的气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)支撑绝缘子内部放电缺陷综合诊断方法,并进行了分析和现场应用研究。以某 110 kV GIS 为例,利用特高频法对运行中的 GIS 进行局部放电检测,在检测到异常信号后,通过干扰排除和多通道信号时延定位确定缺陷位置、缺陷类型。对于支撑绝缘子内部放电缺陷,利用 X 射线成像检测技术对缺陷情况进行确认,从而实现缺陷综合诊断,指导设备检修。

关键词:特高频;X 射线;GIS;支撑绝缘子;局部放电

中图分类号:TM 835 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2021)05-0054-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210511

Application of Comprehensive Diagnosis Method for Internal Discharge Defects of GIS Supporting Insulator

Dai Hui¹, Xiong Pan¹, Zhou Dianbo², Yang Fan¹, Xue Zhihang², He Yuhang², Yao Xiao²

(1. State Grid Luzhou Electric Power Supply Company, Luzhou 646000, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The comprehensive diagnosis method for internal discharge defects of gas insulated switchgear (GIS) supporting insulator is studied based on ultra-high frequency (UHF) partial discharge detection and X-ray imaging detection. Taking a 110 kV GIS for example,UHF method is used to detect the partial discharge of GIS which is in operation, and after detecting the abnormal signals, the defect position and defect type are determined by interference elimination and multi-channel signal time-delay location. For the internal discharge defects of supporting insulator, the defect condition is determined by X-ray detection so as to realize the comprehensive defect diagnosis and guide the equipment maintenance.

Key words:ultra-high frequency (UHF); X-ray; gas insulated switchgear (GIS); supporting insulator; partial discharge

0 引 言

作为状态检修的重要支撑手段,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear,GIS)局部放电带电检测已在电网全面深入开展,发现了大量设备内部潜伏性缺陷,提升了设备运行可靠性。从大量实验室研究和现场检测情况看,在 GIS 各类局部放电中,固体绝缘放电缺陷检测和诊断难度最大。其中,浇筑工艺不良、运行受力不均引起的支撑绝缘

子内部放电缺陷,因激发的超声波信号衰减严重,很难被检测到,因此无法通过相对简单的幅值定位法确定缺陷位置;而在检修期间,因缺陷位于绝缘子内部,肉眼不可见,也为最终的诊断确认和检修消缺带来了困难^[1-3]。

针对现场检测存在的问题,国内外各高校、科研院所和企业持续开展 GIS 固体绝缘局部放电检测和诊断技术的研究。目前,在特征量提取、模式识别和监测预警等方面取得了相当的研究成果,部分成果已逐步应用于现场,有效提升了 GIS 固体绝缘局部

放电缺陷的检出率^[4-7]。然而,从大量现场检测情况和设备检修案例分析来看,仍有相当数量的固体绝缘放电缺陷未能被准确检测及定位,或者被检测以及定位后,由于缺乏检查手段未能最终对缺陷进行准确诊断,从而影响了检修消缺。上述情况表明, GIS 固体绝缘现场局部放电检测技术还有诸多需要提升的地方^[8-12]。

为提升 GIS 支撑绝缘子内部放电缺陷现场检测水平,更好地指导设备运维检修,下面将特高频局部放电检测法、多通道信号时延定位法和 X 射线成像检测法进行结合并开展现场应用,对应用效果的评估表明该综合诊断方法提升了 GIS 支撑绝缘子局部放电检测的灵敏度和准确性。

1 GIS 带电检测方法

1.1 特高频局部放电带电检测法

GIS 支撑绝缘子内部存在气隙或者裂纹,由于缺陷位置局部场强增加到一定程度会引起局部绝缘击穿,每一次击穿放电都会产生一个陡脉冲电流,激发出频率在特高频频段(300 MHz ~ 3 GHz)的电磁波信号。该特高频电磁波信号在 GIS 内传播,经盆式绝缘子、隔离开关/接地开关观察窗等非金属屏蔽部位泄漏到 GIS 外部。利用特高频传感器在非金属屏蔽部位接收局部放电产生的电磁波信号后,通过信号特征判断缺陷类型、诊断缺陷情况,即为特高频局部放电带电检测法。

1.2 多通道信号时延定位法

GIS 支撑绝缘子内部放电激发的超声波信号在传播中经历多层界面衰减,很难传输至金属壳体被超声波传感器检测到,而由于特高频传感器仅能在非金属屏蔽部位接收电磁波信号,无法像超声波传感器一样直接在缺陷部位进行检测,因此,对于 GIS 支撑绝缘子内部放电,无法通过幅值定位法找到缺陷位置,只能通过多通道信号时延定位法进行缺陷精确定位。

多通道时延定位法通过多个不同位置的特高频传感器接收局部放电电磁波信号,读取信号到达各传感器的时延,经过定位算法计算来确定局部放电源的位置。对于 GIS 这种独特的管道结构而言,使用时延定位方法时可将其视为线形结构,在一维或

二维空间内进行定位计算,在理想情况下,仅需 2 个相邻测点同时接收信号,并采用式(1)进行计算即可得到放电源位置^[13]。时延定位方法硬件方面需要采样率最低为 5 GS/s、带宽最低为 500 MHz 的高性能 4 通道示波器。

$$\Delta t = t_2 - t_1(L - x)/c - x/c$$

$$x = \frac{1}{2(L - c\Delta t)} \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在 GIS 内部 SF₆ 气体中的等效传播速度,约为 3×10^8 m/s; L 为两个特高频传感器间的距离; Δt 为信号到达两个特高频传感器的时间差; x 为局部放电源到达某个特高频传感器的距离。

1.3 X 射线成像检测法

X 射线有很强的穿透性,在对着物体照射后,一部分射线能量被物体吸收,还有一部分射线能量因散射被消耗,故最终穿透物体的 X 射线强度有一定程度的减弱。单色窄束射线衰减规律如式(2)所示。

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (2)$$

式中: I_0 为照射到物体前的 X 射线强度; I 为穿透物体后的 X 射线强度; μ 为 X 射线的衰减系数; T 为吸收体等效厚度,cm。

基于上述原理,可以实现 X 射线成像检测。对被检物体完成 X 射线成像检测后,把胶片放到观光灯上观察透射光线,可看到由对比度(胶片上相邻区域的黑度差)构成的不同形状的身影,据此可观察到被检物体内部情况。

随着相关技术的飞速发展,比胶片成像技术更加灵活、准确的 DR 直接数字成像技术被逐步用于电力设备检测。X 射线 DR 直接数字成像技术将大量的新型 X 射线探测元根据需要以阵列方式组合到一起,再结合相应的信号、图像处理单元形成整套检测系统,实现从 X 射线发射、穿透射线接收到信号处理、图像优化的全过程。相比传统的 X 射线检测机,DR 直接数字成像 X 射线检测系统便于携带、使用灵活、射线能量强,现场开展 GIS 成像检测能够通过信号数字化处理获得更理想的图片。

2 GIS 支撑绝缘子内部放电缺陷现场检测

以某 110 kV 变电站 110 kV GIS 为例(该 GIS

为河南平高电气股份有限公司生产的 ZF5 - 110 型 GIS),开展特高频局部放电带电期间检测,在 I 母多个盆式绝缘子位置检测异常信号。检测仪器显示,异常信号幅值可达 65 dB,呈现显著的 100 Hz 频率相关性,初步分析具有局部放电信号特征,如图 1 所示。

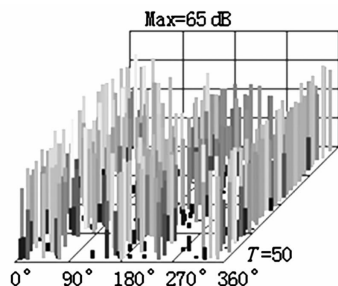


图 1 实测支撑绝缘子内部放电特高频 PRPS 图谱 1

2.1 信号图谱特征分析

在盆式绝缘子位置测得异常特高频脉冲信号的情况下,首先分析信号是设备内局部放电信号还是设备外干扰信号。将传感器离开盆式绝缘子放置于外部空间,不断移动传感器观察不同位置检测到的异常信号幅值,若盆式绝缘子处检测到的信号幅值大于外部空间所有位置检测到的异常信号幅值,则初步判断异常信号来自于 GIS 内部;否则,异常信号有可能来自 GIS 外部,而在外部空间中检测到的异常信号幅值最大位置,可由此继续检测找到外部干扰方向乃至位置。以所检测的 110 kV GIS 为例,特高频传感器在盆式绝缘子位置检测到的异常信号幅值始终大于在外部空间中检测到的信号幅值,因此判断异常信号来自 GIS 内部。在初步判断异常信号来自 GIS 内部的情况下,对异常信号进行特征分析,判断缺陷类型。

该 110 kV GIS 盆式绝缘子部位用不同设备检测的特高频 PRPS(phase resolved pulse sequence)图谱如图 1 和图 2 所示,可见异常信号普遍呈显著的 100 Hz 频率相关性(即一个工频周期出现 2 簇放电脉冲),具有悬浮电位放电或固体绝缘放电特征。对图 1 所对应的放电缺陷,用示波器对其进行信号检波,如图 3 所示,可见信号在一个工频周期内出现至少 2 个幅值较大的脉冲,但脉冲幅值、间隔时间均有差异,体现出一定的极性,初步判断为固体绝缘内部气隙放电特征。正负半周放电脉冲幅值、个数和时间间隔是否具有对称性等取决于支撑绝缘子内部气隙、裂纹情况以及缺陷发展阶段、放电严重程度。

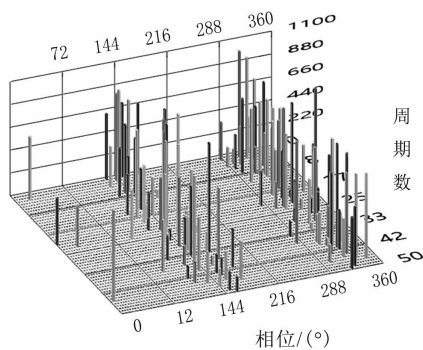


图 2 实测支撑绝缘子内部放电特高频 PRPS 图谱 2

2.2 支撑绝缘子缺陷精确定位

以如图 1 所示异常信号对应的 I 母存在局部放电缺陷的 110 kV GIS 为例,通过时延定位法对 GIS 内部放电缺陷进行精确定位,为确保定位的准确性,在轴向和圆周方向分别进行定位计算。

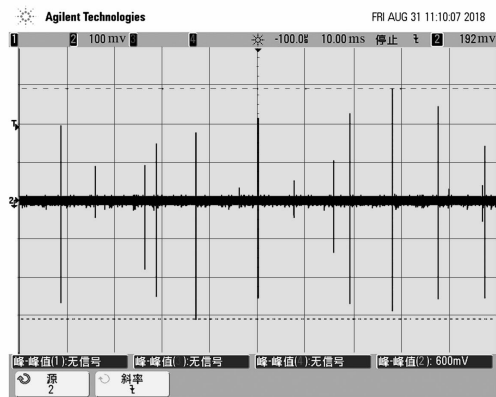


图 3 实测支撑绝缘子内部放电特高频检波图谱



图 4 轴向定位特高频测点布置

如图 4 所示为多个特高频测点布置,首先在轴向确定缺陷位置。如图 5 所示为图 4 中 3 个特高频传感器采集到的异常信号波头,特高频信号到达测点 1 的时间领先于到达测点 2 和测点 3,表明缺陷最接近测点 1,测点 1 信号领先测点 2 约 1 ns,测点 1 与测点 2 距离约 75 cm,利用式(1)进行计算,得到缺陷位于测点 1 和测点 2 之间;从设备结构看,缺陷

只可能位于 3 个特高频测点下方的母线上,计算得到,放电源距离测点 1 约 22.5 cm,距离测点 2 约 52.5 cm。

如图 6 所示,在图 4 测点 1 所在盆式绝缘子布置 2 个特高频传感器,对缺陷进行圆周方向定位。图 7 为图 6 中 2 个特高频传感器采集到的异常信号波头,特高频信号到达测点 1 的时间略微领先于到达测点 2,表明缺陷更接近测点 1。测点 1 信号领先测点 2 约 0.4 ns,测点 1 与测点 2 距离约 50 cm,利用式(1)进行计算,忽略母线与盆式绝缘子高度差,得到缺陷位于测点 1 和测点 2 之间,距离测点 1 约 19 cm,距离测点 2 约 31 cm。

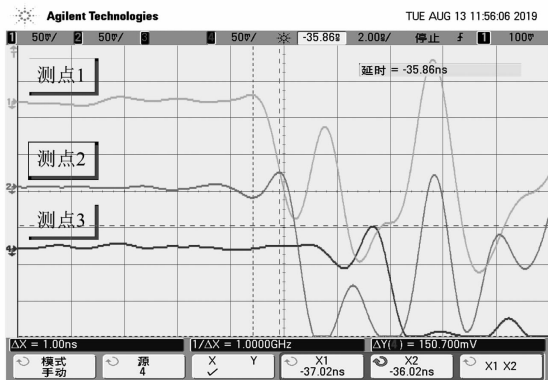


图 5 轴向定位三通道信号时域波形

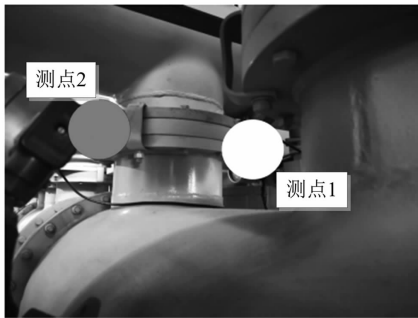


图 6 圆周方向定位特高频测点布置

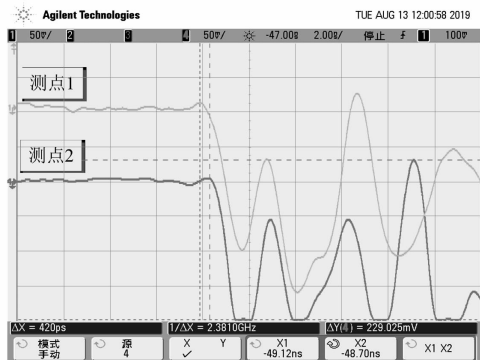


图 7 圆周方向定位两通道信号时域波形

综合轴向定位和圆周方向定位结果,局部放电缺陷位于母线上,具体位置在圆圈所示的手孔上,如图 8 所示。综合设备结构进行分析,因缺陷部位无接头和屏蔽罩,排除因接触不良导致的悬浮电位放电缺陷;由于存在支撑绝缘子,初步分析为支撑绝缘子局部放电缺陷。



图 8 轴向缺陷所在位置

3 GIS 支撑绝缘子 X 射线成像检测

根据特高频局部放电带电检测和精确定位结果,对 GIS 进行解体检修,取下检测到异常信号的支撑绝缘子。对于存在内部放电的支撑绝缘子,从外表无法检查到放电痕迹,考虑到多通道信号时延定位有可能因为信号折反射和叠加等因素导致定位结果存在一定误差,现场解体检修必须要确定存在缺陷的支撑绝缘子得以更换,设备才能重新投入运行。在此情况下,必须在变电站现场以最快速度确认支撑绝缘子内部状况,而利用 X 射线 DR 直接数字成像技术对支撑绝缘子进行无损透视检测是便捷、高效且相对准确的方法。以所述存在局部放电缺陷的支撑绝缘子为例,开展现场 X 射线成像检测,现场检测装置包含 X 射线发射机和成像板,被检测支撑绝缘子放置于 X 射线发射机和成像板之间(靠近成像板)进行检测,如图 9 所示。检测完毕后可在数字图像处理系统中对图像进行优化。如图 10 所示,经 X 射线成像检测,存在局部放电缺陷的支撑绝缘子内部可见一道斜向贯穿性裂纹。结合同时期、同厂家、同类型支撑绝缘子多次出现内部气隙、裂纹缺陷这一情况,分析是生产期间浇注工艺不良所致。据此,验证了带电检测和精确定位结果,找到并更换

了缺陷支撑绝缘子,设备经规定试验后重新投入运行,缺陷消除。



图9 支撑绝缘子现场 X 射线成像检测

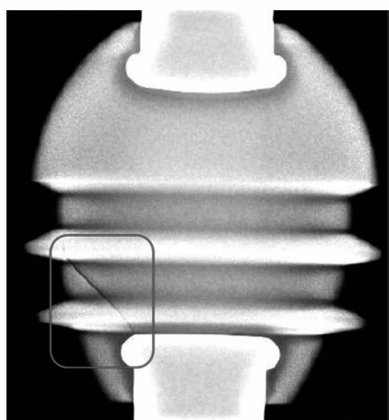


图10 缺陷支撑绝缘子 X 射线成像检测图片

4 结 论

上面对基于特高频法和 X 射线检测法的 GIS 支撑绝缘子内部放电缺陷综合诊断方法进行了分析和现场应用,通过特高频法检测及定位存在内部放电缺陷的支撑绝缘子,再通过 X 射线成像检测确定支撑绝缘子缺陷情况,提升了运维检修效率。

1) 支撑绝缘子内部放电缺陷激发的特高频信号普遍呈显著的 100 Hz 频率相关性,放电脉冲幅值、个数和时间间隔取决于支撑绝缘子内部气隙、裂纹情况以及缺陷发展阶段、放电严重程度。

2) GIS 支撑绝缘子数量集中,为提升定位准确性,应在轴向和圆周方向均进行放电源定位计算。

3) X 射线成像检测用于透视电力设备、电气材料内部具有较好的效果,既可用于缺陷确认诊断,还可以为家族性机械缺陷、材料缺陷排查提供可靠检测手段,其中,对于绝缘件内部气隙、裂纹和罐体内部异物等缺陷,具有良好的检测效果和检测准确性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 周电波,许本茂,张劲,等. GIS 固体绝缘缺陷所激发特高频信号时频特征研究[J]. 高压电器,2021,57(2):33-41.
- [3] 邱伟,蔡川,杨红权,等. 一起 252 kV GIS 盆式绝缘子放电故障分析[J]. 四川电力技术,2019,42(3):75-79.
- [4] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
- [5] 李继胜,赵学风,杨景刚,等. GIS 典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术,2009,35(10):2440-2445.
- [6] 宋辉,代杰杰,李喆,等. 运行条件下 GIS 局部放电严重程度评估方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1231-1241.
- [7] 何樱,华征,侯智剑,等. 类均值核主元法在 GIS 局部放电模式识别中的应用研究[J]. 电测与仪表,2016,53(2):84-89.
- [8] 汤会增. 1000 kV GIS 超声波在线检测系统设计与应用研究[J]. 四川电力技术,2016,39(2):24-28.
- [9] 张聪聪,王刚,高栋,等. 基于卷积网络的 GIS 局部放电缺陷诊断方法与应用[J]. 电工电能新技术,2021,40(3):72-80.
- [10] 马宏明,周年荣,肖丹,等. 交直流电压条件下 GIS 局部放电检测对比研究[J]. 中国电力,2014,47(3):125-129.
- [11] 刘谨,王哲斐. 基于时间指纹的特高频局部放电定位法[J]. 湖北电力,2020,44(5):23-28.
- [12] 李鹏,毕建刚,于浩,等. 变电设备智能传感与状态感知技术应用[J]. 高电压技术,2020,46(9):3097-3113.
- [13] 周电波,罗锦,肖伟,等. 基于超声波原理的 GIS 局部放电现场检测及缺陷定位方法[J]. 四川电力技术,2016,39(4):54-57.

作者简介:

代 晖(1973),男,高级工程师,主要从事输变电设备管理工作;

熊 攀(1983),男,高级工程师,主要从事变电一次设备检修管理工作。

(收稿日期:2021-03-09)