

基于超声波原理的GIS局部放电 现场检测及缺陷定位方法

周电波 罗锦肖 王伟 王杰 马小敏 何良
(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要:对基于超声波原理的气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)局部放电现场检测及缺陷定位方法进行了研究。通过采集大量数据,归纳了各类GIS局部放电的超声波信号特征,并且分析了局部放电信号和机械振动信号在频谱上的差异,有助于对检测信号进行识别。为准确判定GIS局部放电并分析其原因,进一步研究了声电联合定位方法和超声波时延定位方法在GIS现场检测中的应用,结果显示有助于排除现场干扰,具有良好的准确性和定位精度。

关键词:超声波;GIS;局部放电;信号特征;定位

Abstract: The on-site test and fault localization method of partial discharge in gas insulated switchgear(GIS) based on ultrasonic is studied. According to the plenty of collected data, the ultrasonic signal characteristics of different partial discharge type are summarized, and the differences between partial discharge signals and mechanical vibration signals in spectral distribution are analyzed, which can help to recognize the collected data. For accurate judgment of GIS partial discharge and its cause analysis, the application of ultrasonic associated with electromagnetic wave localization method and ultrasonic time-delay localization method to on-site test of GIS is further researched, whose results can reduce the interference signals and make the partial discharge localization result more reliable.

Key words: ultrasonic; gas insulated switchgear(GIS); partial discharge; signal characteristic; localization

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2016)04-0054-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.010

0 引言

由于结构紧凑、占地面积小且运行可靠性高、检修工作量小等优点,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)在电力系统中被广泛使用,装用量日益增加,在许多地区成为主流开关设备^[1]。

尽管GIS运行受环境影响小,检修周期长,但从几十年运行经验看,仍无法避免故障的出现。这其中,绝缘故障占比超过一半,并且随着设备电压等级的提高,绝缘故障率逐步增大^[2-4]。

运行期间GIS内部绝缘缺陷,往往是由局部放电开始发展。局部放电不仅会导致GIS内部某些部位电场被大大增强,而且其引发的电、化学等物理现象还会腐蚀绝缘介质,进一步造成绝缘介质劣化,直至GIS发生绝缘故障。局部放电是GIS绝缘缺陷发展和绝缘故障产生的重要原因;但另一方面,局部放电也是设备绝缘劣化的征兆,对GIS内部局部放电

的有效检测,是尽早发现GIS内部绝缘缺陷,实现早期故障预警的重要手段^[5-6]。

局部放电是一种脉冲放电,会在电力设备内部产生光、声、电和化学等物理现象,上述现象经过国内外专家学者大量研究,已可用作局部放电检测的重要特征量^[7-10]。其中,检测局部放电产生的超声波,根据信号特征实现对局部放电的早期发现、类型识别和缺陷定位,即为超声波局部放电检测法。该方法可适用于各类型GIS的局部放电带电检测,经多年实验室研究和现场应用,已在各地不同程度地形成GIS带电检测工作机制,为GIS安全运行提供了更有力保障。然而,与实验室研究不同,GIS现场超声波局部放电检测受制于超声波信号衰减、变电站干扰众多等因素,检测灵敏度受到限制;并且,运行GIS的超声波局部放电信号特征也与实验室模拟信号存在差异,这就为现场准确检测设备内部绝缘缺陷带来了困难^[11-13]。

基于此,结合大量现场检测结果分析,从信号特征和缺陷定位等方面着手,研究GIS超声波局部放

电现场检测及缺陷定位技术,以提升 GIS 局部放电带电检测水平。

1 超声波局部放电检测及定位系统

GIS 内部局部放电产生的超声波,经 SF₆ 气体传播后,到达 GIS 金属壳体继续传播,使用频带对应的超声波传感器即可检测到金属壳体上传播的超声波信号。根据采集的超声波信号,有助于判断 GIS 内部是否存在局部放电情况,并进一步分析局部放电类型、位置及严重程度。

用于现场研究的超声波局部放电检测及定位系统,由多个超声波传感器、信号放大器和 1 台 4 通道高采样率示波器组成,此外,为了便于信号特征观测,还配备 1 台单通道超声波局部放电检测主机,可以多种模式显示检测信号与工频周期的相关性。在需要采集多个测点信号以进行缺陷定位时,每个测点通道由 1 个超声波传感器和 1 个信号放大器组成,最多可有 4 个测点通道连接示波器,考虑到声电联合定位需要,示波器采样率应不低于 5 GS/s,带宽应不低于 500 MHz。

系统所用的超声波传感器,具有 0.1 mV 或 0.2 mm 微粒的高测量灵敏度,如图 1 所示,测量频带为 10 ~ 200 kHz,谐振频率为 30 kHz。系统所用的放大器,可以提供差分放大方式,具有环境噪声抑制能力强、放大线性度好等优点,放大倍数 20 dB、40 dB 和 60 dB 可调,放大器接入示波器的情况下,需为其提供电源以实现原始信号放大。

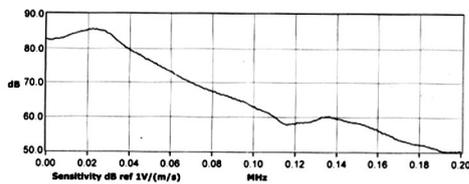


图 1 超声波传感器频带测试图

2 GIS 超声波局部放电现场检测方法

根据实验室建立的典型 GIS 内部绝缘缺陷模型,先前的研究获得了尖端放电、自由金属微粒放电、悬浮放电、内部绝缘气隙放电和沿面放电等超声波信号的特征,为带电检测结果分析和缺陷识别提供了重要参考。但在现场检测中,被测设备内部结

构不一、缺陷位置各异,再加上存在的诸多干扰,仅凭实验室获取的典型缺陷图谱对比判断可能产生误判。因此,立足 GIS 超声波局部放电现场检测,选取多座 500 kV 变电站,对站内 500 kV GIS 和 220 kV GIS 进行全面超声波局部放电检测,根据采集的局部放电信号和干扰信号,研究各类 GIS 局部放电信号特征及干扰信号识别方法。

2.1 GIS 超声波局部放电现场检测流程

首先进行背景噪声测量,选取被测 GIS 邻近汇控柜、支架和电缆箱,读取检测数据并保存作为背景噪声与设备检测信号进行比对。

依次选取 GIS 超声波局部放电检测位置,原则上各检测位置距离不超过 0.5 m,检测点选取气室中下部壳体,可以提高自由金属微粒的检测灵敏度。每一点检测前,将检测部位擦拭干净,检测时,将超声耦合剂均匀涂抹于超声波传感器瓷质检测面,再施加适当压力紧贴于被测部位金属壳体外表面,确保超声波传感器检测面和金属壳体间超声耦合剂排挤出所有空气,以减小超声波信号传播衰减。每一检测位置的结果观察时间应不低于 15 s,如果发现信号无异常,幅值和 50 Hz/100 Hz 频率相关性较低,则记录数据,继续下一位置以相同方式检测。

检测期间,对断路器气室、隔离开关气室、母线气室和 TV 气室进行重点检测,对于测得异常信号的气室,在有条件情况下,辅以特高频局部放电和 SF₆ 气体分解产物检测手段作为验证。

2.2 异常超声波信号判断及缺陷类型识别

现场检测发现,超声波法对 GIS 内部绝缘气隙放电和沿面放电检测灵敏度较低,明显不及特高频法对这两类局部放电缺陷的检测灵敏度。

据统计,部件松动等原因引发的悬浮放电缺陷,在 GIS 内部绝缘缺陷中占比突出,并且,其产生的超声波信号具有典型特征。如图 2 和图 3 所示,首先,与其他类型局部放电缺陷相比,悬浮放电信号幅值明显较大;其次,悬浮放电信号具有 100 Hz 频率相关性,对于不同原因引起的悬浮放电,相位模式下聚

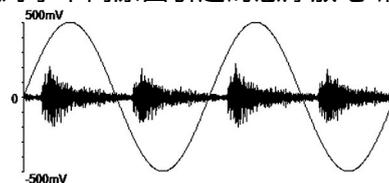


图 2 TV 线圈松动产生的超声波时域信号波形

集的相位跨度有所不同。需要注意的是,如图4所示,作为悬浮放电的一种,自由金属微粒放电幅值分散性较大,且许多情况下却未显示出相位相关性。

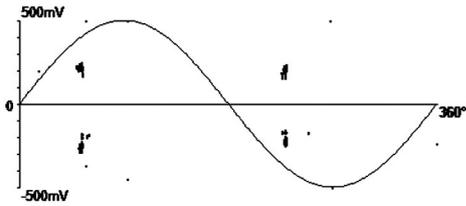


图3 TV线圈松动产生的超声波相位聚集图

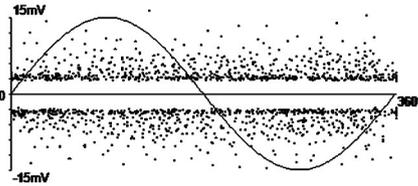


图4 自由金属微粒放电超声波相位聚集图

尖端放电即电晕放电,可分为导体尖端放电和金属外壳内表面尖端放电,作为一种典型的局部放电缺陷,其产生的超声波信号同样具有典型特征。如图5和图6所示,现场实测得到的尖端放电波形具有显著的极性特征,振荡脉冲往往出现在某半周,放电幅值分散性小、放电时间间隔均匀,具有50 Hz频率相关性,对于某些情况的尖端放电,一个工频周期会出现两个振荡脉冲但两半周信号幅值差异明显。



图5 GIS导体毛刺产生的超声波时域信号波形



图6 GIS导体毛刺产生的超声波相位聚集图谱

2.3 超声波局部放电信号频谱分析

尽管通过超声波信号特征可以初步筛选出疑似存在异常的GIS部位,但与实验室环境不同,现场存在诸多干扰,仅凭信号特征无法完全甄别异常信号来自于GIS内部局部放电还是外部干扰。特别是GIS因基础或伸缩节振动在壳体上产生的超声波信号,与许多GIS内部局部放电信号一样,具有100 Hz

频率相关性,每个工频周期出现两个振荡脉冲,并且幅值特征和时间间隔也未体现出与局部放电信号的差别。因此,有必要进一步对异常超声波信号进行分析。

利用频谱分析方法,可以发现局部放电信号与机械振动信号在频谱分布上存在差异,这有助于识别机械振动信号。局部放电激发的超声波信号频谱分布较宽,能量集中部分接近100 kHz,甚至到200 kHz都有能量分布,而机械振动引起的超声波信号能量集中部分在相对较低频段,通常低于50 kHz。图7所示为现场测得的典型超声波局部放电信号的频谱分布,可见该信号主要分布在20~80 kHz,主频在50 kHz附近;图8所示为现场测得的典型超声波机械振动信号的频谱分布,该信号主要分布在10~40 kHz,主频在20 kHz附近。

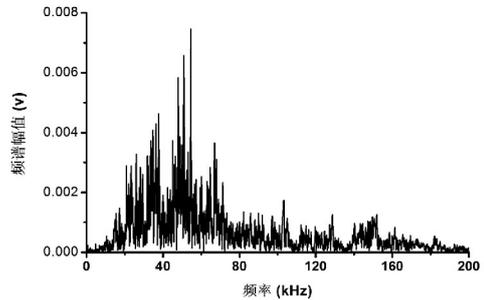


图7 典型超声波局部放电信号频谱分布

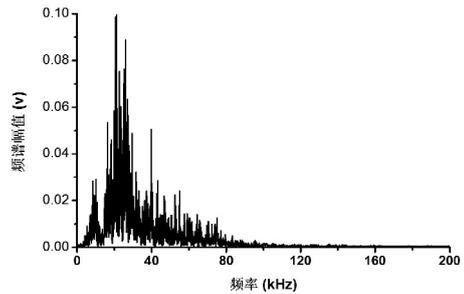


图8 典型超声波机械振动信号频谱分布

3 基于超声波的GIS局部放电定位方法

利用单个超声波传感器测得信号并进行信号特征对比和频谱分析,可一定程度识别异常信号类型。然而,变电站内设备众多,即使在GIS壳体用超声波传感器检测到具有显著局部放电特征的异常信号,也无法确切判定信号是否来源于GIS内部局部放电。为此,在现场基于超声波原理对异常信号源进行定位,从而确定其位置是非常必要的。这不仅能够判定GIS内部局部放电缺陷的存在,而且结合所

在位置的设备结构有助于分析缺陷原因及缺陷类型,为下一步处理提供依据。

3.1 声电联合定位法

检测到具有局部放电特征的异常信号后,应首先判断信号来源于 GIS 内部还是变电站其他设备,在有条件的情况下,使用声电联合定位法具有较好的效果。

声电联合定位法将超声波传感器和特高频传感器接入示波器,同时采集信号。由于特高频信号相对超声波信号速度极快,因此,特高频信号可以认为是瞬间到达,特高频信号和超声波信号之间的时延就可认为是超声波信号从信号源到超声波传感器的时间,以超声波等值声速乘以传播时间就得到信号源与超声波传感器的距离,以此来判断局部放电的位置。



图 9 超声波传感器和特高频传感器布置

某 500 kV GIS 隔离开关气室在检出异常信号后,使用声电联合定位法计算信号源位置,如图 9 所示为超声波传感器和特高频传感器的布置情况,此外,为排除外界电晕,设置一背景特高频传感器检测空间电晕。如图 10 所示为示波器采集到的超声波信号和特高频信号,放电同时激发了超声波信号和特高频信号,被超声波传感器和盆式绝缘子处的特高频传感器测得,而背景特高频传感器则未测得信号。将测得波形展开后,由于两类信号传播速度的巨大差异,在展开到微秒级时,可清晰地看到超声波

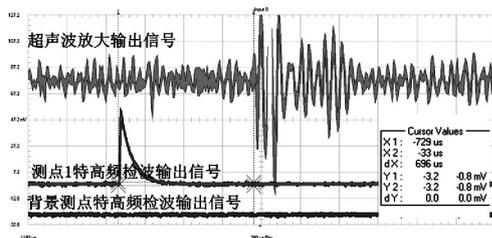


图 10 触发的超声波信号和特高频信号

的起始沿到特高频脉冲信号的时延约为 700 μs。该时延乘上超声波在 SF₆ 气体中的传播速度 140 m/s,得到放电点到超声波传感器的距离约 0.1 m,表明放电点在该 GIS 隔离开关气室内部。

3.2 超声波时延定位法

对于盆式绝缘子完全屏蔽无法进行特高频局部放电检测的情况,相比幅值比较定位法,超声波时延定位法受设备结构影响小,定位结果更为准确。如图 11 所示,超声波时延定位法需要将多个超声波传感器布置在 GIS 壳体不同位置接收信号;如图 12 所示为示波器采集的各检测通道超声波局部放电信号,读取信号到达各传感器的时延后,利用空间定位式(1)进行计算,可以得到局部放电源的坐标位置。

$$c \times \Delta t_{ij} = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} - \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2 + (z_s - z_j)^2} \quad (1)$$

式中: c 表示超声波在 GIS 内部 SF₆ 气体中的等效传播速度;约为 140 m/s; Δt_{ij} 表示信号到达传感器 i 和传感器 j 的时间差; (x_s, y_s, z_s) 表示放电源的位置坐标; (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) 分别表示传感器 i 和传感器 j 的位置坐标 $i, j = 1, 2, 3, 4$ 。



图 11 多通道超声波局部放电定位

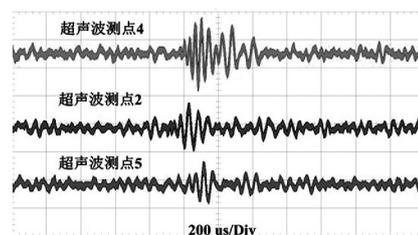


图 12 多通道超声波局部放电信号

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利用简化方法进行定位计算。在理想情况下,仅需 2 个布置在 GIS 壳体不同位置的相邻传感器同时接收异常超声信号,并利用式(2)进行计算即可得到放电点位置。

(下转第 72 页)

tems 2001 ,16(3) :435 - 443.

[16] David A K ,Lin xu jun. Dynamic Security Enhancement in Power Systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems , 2002 ,17(2) : 431 - 438.

[17] Found A A ,Tong J. Stability Constrained Optimal Rescheduling of Generation [J]. IEEE Trans. on Power Systems ,1993 8(8) :105 - 112.

[18] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调 [J]. 电力系统自动化 2002 26(4) :1 - 4.

[19] 鲍颜红 徐泰山 许立雄 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算 [J]. 电力系统自动化 2010 34(1) : 32 - 35.

作者简介:

兰 强(1985) 工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

方勇杰(1964) 研究员级高级工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(收稿日期:2016 - 02 - 22)

(上接第 57 页)

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

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

式中: c 为超声波在 GIS 内部 SF₆ 气体中的等效传播速度,约为 140 m/s; t_1 为信号到传感器 1 的时间; t_2 为信号到传感器 2 的时间; L 为两传感器的距离; x 为放电点到其中一个传感器的距离。

顺序定位则是超声波时延定位的最简化方法,无需进行精确计算。将一个传感器(中心传感器)固定在 GIS 某个检测位置,将其他传感器放置在中心传感器四周邻近位置,如果中心传感器的信号总是领先于其他传感器的信号,则可判断放电电源靠近中心传感器的位置。采用顺序定位法依次对每个 GIS 测点进行检测,即可确定异常信号是否来自 GIS 内部并找到信号源具体位置。

4 结 论

1) 基于大量现场开展的 GIS 超声波局部放电检测工作,研究了基于超声波原理的 GIS 局部放电现场检测及缺陷定位方法,就原始信号特征、信号频谱和信号源定位方法进行了分析。

2) 对实测得到的 GIS 局部放电及相关干扰的超声波信号特征进行了研究。分析了 GIS 内部悬浮放电、尖端放电的幅值和相位分布特点,分析了机械振动信号与局部放电信号在频域上的主要差异。

3) 研究了声电联合和超声波时延定位法在 GIS 局部放电检测及定位中的应用,声电联合定位法有助于排除干扰、初步定位,而超声波时延定位法则有助于精确计算局部放电缺陷在 GIS 内部的位置。

参考文献

[1] 洪国耀 赵羲英 陈冰. 小型化 SF₆ 气体绝缘金属封闭开

关设备的研究开发 [J]. 高压电器 2012 48(10) :78 - 82.

[2] 律方成 金虎 王子建 等. 主分量稀疏化在 GIS 局部放电特征提取中的应用 [J]. 电工技术学报 2015 30(8) :282 - 288.

[3] 丁登伟 唐诚 高文胜 等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及其传播特性 [J]. 高电压技术 2014 40(10) :3243 - 3251.

[4] 王建生 邱毓昌. 气体绝缘开关设备中局部放电的在线监测技术 [J]. 电工电能新技术 2000 19(4) :44 - 48.

[5] 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.

[6] 韩小莲. GIS 局部放电检测系统的研究 [D]. 西安:西安交通大学 1995.

[7] R. J. Van Brunt. Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona - Recent Advances and Future Challenges [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 1994 11(5) :761 - 783.

[8] 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.

[9] Boggs S. A Stone G. C. Fundamental Limitations in the Measurement of corona and Partial Discharge [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation , 1982 17(2) :143 - 150.

[10] 司文荣 李军浩 黎大健 等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术 [J]. 电工电能新技术 , 2008 27(2) : 21 - 25.

[11] L. E. Lundgaard. Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 1992 8(5) :34 - 43.

[12] 苑瞬. 全封闭组合电气局部放电超声传播特性及监测问题的研究 [J]. 中国电力 1997 1(1) :7 - 10.

[13] Lars E Lundgaard. Particles in GIS Characterization from Acoustic Signatures [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation , 2001 18(6) :1064 - 1074.

(收稿日期:2016 - 05 - 06)