

# GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析

杨景刚, 贾勇勇, 赵科, 王存超, 高山

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

**摘要:**为了研究组合电器(GIS)典型绝缘缺陷局部放电信号的超声波特性,在一段 110 kV GIS 试验段上,设计和模拟了 GIS 中的母线金属尖刺缺陷、筒壁金属尖刺缺陷、悬浮电位缺陷、盆式绝缘子内部气泡缺陷、自由金属颗粒缺陷等 5 种典型局部放电模型和铁心电磁振动模型,使用超声波法对其放电和振动信号进行检测。结果表明,不同缺陷的局部放电或超声信号在幅值、相位特征、相位分布(PRPD)谱图特征等方面会呈现不同的特点,为缺陷的模式识别提供了试验依据。

**关键词:**组合电器;典型绝缘缺陷;局部放电;超声波特征

**中图分类号:** TM51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2015)02-0010-05

组合电器(GIS)作为电力系统中运行的重要设备,一旦发生故障,将会影响电力系统的正常供电,造成巨大的经济损失和不良的社会影响,则 GIS 的运行可靠性非常重要。由于 GIS 内部的绝缘缺陷绝大多数是从局部放电发展而来,因此研究检测局部放电是预防 GIS 绝缘故障的有效手段<sup>[1-4]</sup>。超声波检测法是国内外研究 GIS 局部放电的热点方法之一,该方法通过检测局部放电超声波信号来对 GIS 进行诊断,消除干扰的影响,从而实现局部放电信号的精确提取,可以较全面地研究局部放电的本征特征<sup>[5]</sup>。本文在研究超声波检测法的基础上,建立检测系统,设计制作 GIS 典型绝缘缺陷模型,最终获得局部放电信息。

## 1 局部放电超声波检测

在 GIS 内部发生局部放电时会产生电荷中和过程,相应的会产生较陡的电流脉冲,电流脉冲的作用将使得局部放电发生的局部区域瞬间受热而膨胀,形成一个类似爆炸的效果,放电结束后原来受热而膨胀的区域恢复到原来的体积,这种由于局部放电产生的一涨一缩的体积变化引起了介质的疏密瞬间变化,形成超声波,从局部放电点以球面波的方式向四周传播,因此当发生局部放电时也伴随着超声波的产生;另一方面,超声波检测法还可以检测运动颗粒产生的机械波,一般工程上应用超声波区分颗粒的运动状态。

由于超声波法受电气干扰小以及它在缺陷定位上的广泛应用,因此人们对超声波法的研究比较深入,使用固定在 GIS 外壳上的超声波传感器接收缺陷局部放电、自由微粒运动产生的超声波,由此来确定故障源的位置和劣化程度的应用较为广泛。关于 GIS 典型缺陷局部放电信号超声波检测法相关研究是国内外相关领域的研究热点和难点问题,已取得一定的研究成果,如局部放电超声波检测技术研究和装备研制等方面已

取得长足发展,市场上已有技术成熟的仪器设备。但关于 GIS 设备绝缘缺陷引发的局部放电超声信号特征仍未获得公认的结论,制约了该技术的现场应用。本文将超声法和数字化测量两者结合,旨在通过检测典型局部放电模型放电或是自由颗粒跳动的超声波信号,经数字化处理后,获得各种谱图和统计量,为进一步研究不同缺陷类型的局放特征提供数据和试验依据。

## 2 典型缺陷与检测系统的设计

GIS 内部发生故障的原因往往是多方面的,GIS 在制造和组装过程中,难免会留下一些微小缺陷。根据相关文献和现场试验经验,制作了高压母线金属尖刺突起、筒壁(地电位)金属尖刺突起,结构如图 1 所示。

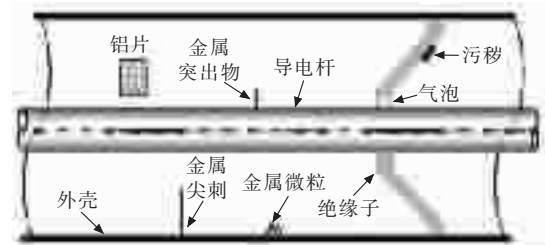


图 1 GIS 常见缺陷示意图

根据参考文献[6,7],主要设计了 5 种 GIS 常见缺陷模型,包括高压母线金属尖刺、筒壁上的金属尖刺、悬浮电位、绝缘子内部气隙及自由金属颗粒等。其中金属尖刺模型为长度 53 mm、尖端处等效曲率半径 100  $\mu\text{m}$  的钢针;金属悬浮电位缺陷是通过聚乙烯绝缘螺杆将金属铝片固定在高压母线上,二者相距一定距离(试验时分别使用 1 mm, 1.5 mm, 2 mm 和 4 mm 的间隙距离),绝缘螺杆可以用于调节悬浮铝片与导杆的间隙距离;绝缘子内部气隙放电模型由三层环氧板粘接而成,上下两层环氧板直径为 45 mm,厚 2 mm,中间夹板带有扁平气泡缺陷,其尺寸为 2 mm(厚度)× 2 mm(直径),2 mm(厚度)× 1 mm(直径)等;而自由金属微粒缺陷则是放置钢制和铝制的金属小球,其直径

分别为 1 mm, 2 mm, 3 mm 不等。

GIS 典型缺陷超声信号的试验与测试系统主要结构示意图如图 2 所示。该系统主要由最大输出电压为 250 kV 的无局放交流试验变压器、保护电阻  $R_z$  (水电阻)、耦合电容  $C_k$  (85 pF)、检测阻抗 (50  $\Omega$ )、 $C_1$  和  $C_0$  组成的分压器、可进行内置缺陷更换的 110 kV GIS 试验段 ( $C_x$ )、AIA 超声信号检测仪和脉冲电流法检测系统组成。脉冲电流法作为辅助手段,用于比较和确认采集获取的放电信号。试验时,将缺陷安装在 GIS 腔体内,试验时充 0.45 MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体。

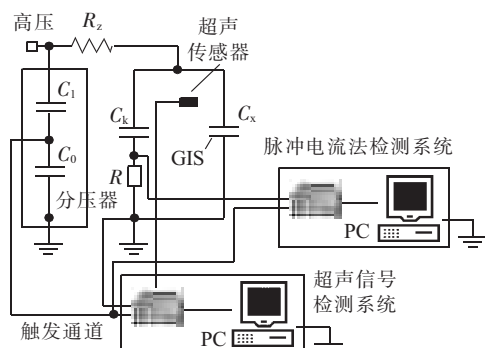


图2 测试系统结构示意图

### 3 缺陷局部放电特性

#### 3.1 母线金属尖刺缺陷

由于加工或安装等原因,GIS 高压母线上可能形成金属突起,其尖刺部分容易形成强场强区,将周围的气体电离,产生局部放电,长期作用会破坏 GIS 绝缘状态<sup>[8]</sup>。试验时,电压从低往高加,直至测量到稳定的超声信号,记录其起始放电和强烈放电时的局部放电信号相位分布图(PRPD),谱图如图 3 所示。

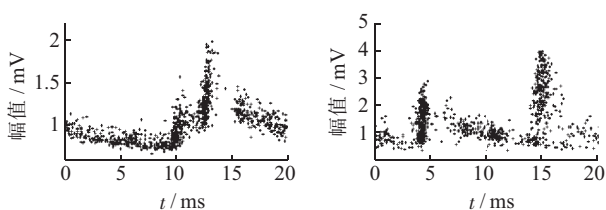


图3 母线尖刺缺陷起始放电和放电强烈时的 PRPD 谱图

从 PRPD 谱图中发现该类型的放电可以分 2 个阶段。电压较低时,仅工频负半周出现少量放电脉冲而正半周基本没有放电,这是因为尖端正极性时,尖端附近电离出的正离子质量较大,移动缓慢而电子则很快向尖端移动,这样形成的反向电场削弱了尖端场强而等效使尖端半径增大而不容易发生放电;相反工频负半周时尖端为负极性,因电子质量小移动速度快而迅速向地电位移动,正离子靠近尖端附近,则正离子对尖端与正极对尖的电场叠加而增大了尖端附近场强,从而容易先出现放电。电压较高时,在工频正半周时气体电

离很强烈,大量正离子向板靠近等效减小了尖板间距,不断继续电离而形成电子崩进而形成流注放电,从而在正半周可能出现击穿产生幅值较大的放电脉冲。这样局部放电程度加剧,正半周也出现大量放电脉冲,而且正负半周放电脉冲均处于工频相位正、负峰值附近。

#### 3.2 GIS 筒壁金属尖刺缺陷

GIS 筒壁直接与大地连接,但由于金属尖刺的存在而使电场发生畸变,尖刺处的电场易使周围的 SF<sub>6</sub> 气体发生电离,进而引发局部放电。该缺陷在现实 GIS 设备生产、安装、运输过程中出现的概率较大,是一种较为常见的缺陷类型。试验时,外施电压从低往高加,记录起始放电和强烈放电的 PRPD 谱图如图 4 所示。

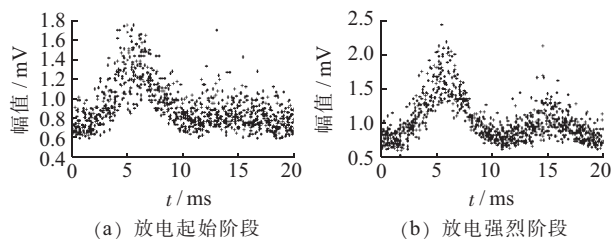


图4 筒壁尖刺缺陷起始放电和放电强烈时的 PRPD 谱图

由图 4 可看出起始放电时信号主要集中在正半周峰值附近,随着电压继续升高,放电量和放电次数继续增大,而负半周也出现一些放电脉冲,相位集中在 270° 附近。由此可见,当金属尖刺所处位置不同时,其引发的局部放电 PRPD 谱图会因为极性效应而呈现不同特性,在电压较低时,相位谱图呈单峰形态,在电压较高时,2 种放电的相位谱图为双峰模式,但信号幅值和信号密度分布有区别。

#### 3.3 GIS 内置悬浮电位缺陷

在试验过程中发现,悬浮电极间隙距离的大小对放电起始电压和放电重复率有较明显的影响,但对放电谱图特性则影响不大,因此本文仅对间隙距离为 2 mm 的缺陷模型放电数据进行分析。与尖刺产生的气体电离性质的放电不同,悬浮电位缺陷所引起的局部放电具有局部击穿性质。因为悬浮电位体与高压母线形成一个电容,当该等效电容两端的电压超过其耐受电压时,高压母线与悬浮电极之间的间隙就被击穿,发生局部放电。当外施电压较高时,缺陷在一个工频周期内可能发生多次充电放电过程,出现多次击穿的现象。记录起始放电和强烈放电时的 PRPD 谱图如图 5 所示(强烈放电时信号幅值较大,故记录到的为经过衰减后的信号,但相位特征未发生改变)。

该类缺陷引发的局部放电主要集中在电源电压的下降沿附近,随着电压的继续升高,相位出现向过零点漂移的现象,且出现多次放电—熄灭—放电的现象。这是因为在较低电压下,悬浮体感应电压较低,还不足以使得悬浮体与电极之间的间隙击穿,所以发生类似于

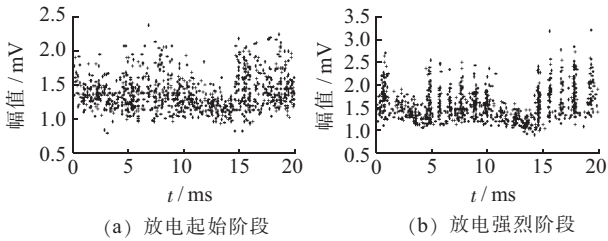


图5 悬浮电位缺陷起始放电和放电强烈时的PRPD谱图

电晕放电的现象,因此采集到的放电信号幅值较小,且集中在施加电压峰值附近;电压升高,悬浮体与高压电极之间的电压差足以击穿SF<sub>6</sub>气体间隙,因此放电信号幅值迅速上升,且放电信号谱图没有明显的波峰,即各个放电信号幅值相差不大,且中心相位向零点漂移。

### 3.4 盆式绝缘子内部气泡缺陷

高压电气设备中固体电介质承担绝缘作用且还决定设备的机械强度,固体绝缘中气隙(气泡)是最常见的缺陷类型,当固体绝缘材料介质出现缺陷时会导致高压设备内部绝缘击穿,引发严重的运行事故。试验结果表明,气泡尺寸大小对放电起始电压及放电重复率的大小有一定的影响,但对放电信号特征的影响较小,因此本文选择尺寸为2 mm(厚度)×1 mm(直径)的气泡试验结果进行分析。

考虑到此类放电的分散性以及放电模式的时间累计性,试验中对样品首先升压至能采集到放电信号,然后稳定此时施加的电压10 min,然后逐级增大电压,每一级电压下均保持10 min左右以观测放电现象。记录起始放电和强烈放电时的PRPD谱图如图6所示。

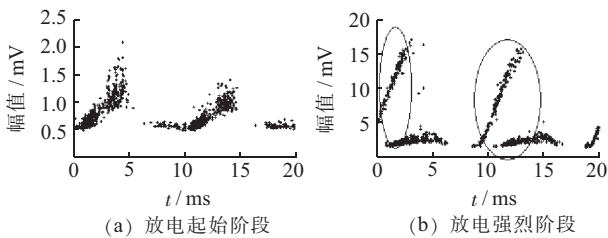


图6 内部气泡缺陷起始放电和放电强烈时的PRPD谱图

PRPD谱图呈现出明显的“兔耳”现象(图中圈中部分)。由于在施加电压过零点附近气隙外加电场极性的反转,与气隙内部对偶极子场强同一方向,2个场强叠加导致气隙内部场强剧增,而使得放电剧烈,所以出现“兔耳”这样信号较强的谱图。

随着施加电压的升高,“兔耳”部分变得更明显,气隙放电的谱图模式变化不大,一般认为是随着局部放电的进行,缺陷气隙内的气体分子不断发生放电分解,产生CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O等电负性分子,这些分子一方面对气隙内的气体放电产生影响,一方面同介质产生化学反应,生成结晶状物体附着在介质表面,改变介质表面的电导率。同时由于放电产生的分子和电子不断轰击介质表面,致使介质表面粗糙程度增加,对放电产生的空间

电荷积聚产生影响,导致放电谱图的变化。比较不同电压下的谱图还可以发现,随着施加电压的增加“兔耳”的相位也随着拉宽。

### 3.5 自由金属颗粒缺陷

自由颗粒撞击腔体和飞行中发生局部放电时都会产生超声波,本文仅对微粒产生的局部放电进行超声波特性研究。试验结果表明,金属微粒的材质、大小会影响微粒的跳动的强烈程度,尺寸越小、材质越轻跳动越强烈,但一旦发生跳动,其超声波信号特征基本一致,因此本文选择铝制、直径为2 mm的微粒试验结果进行分析。记录到的起始放电时的PRPD谱图和飞行图(记录微粒跳动情况,图中横坐标为微粒2次跳动的的时间间隔,纵轴为信号幅值)如图7所示。

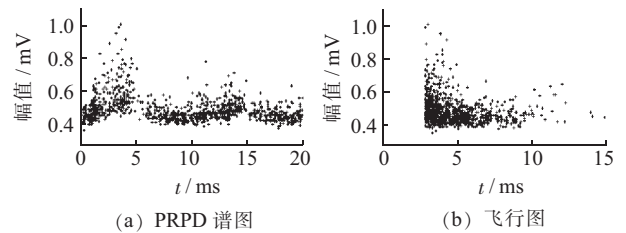


图7 起始放电时的PRPD谱图和飞行图

起始放电时,信号主要集中在电源电压的正峰附近,信号幅值较小,微粒的飞行跳动不活跃,放电幅值与放电时间间隔之间的统计不相关性,在飞行图上没有明显特征。这是因为在电压不高时,金属微粒未发生激烈跳动,模型相当于一个筒壁处金属突起物缺陷模型,此时最先在电源正峰处出现放电信号。随着外施电压逐步升高,微粒逐步发生跳动,放电越来越强烈,记录到起始放电时的PRPD谱图和飞行图如图8所示。

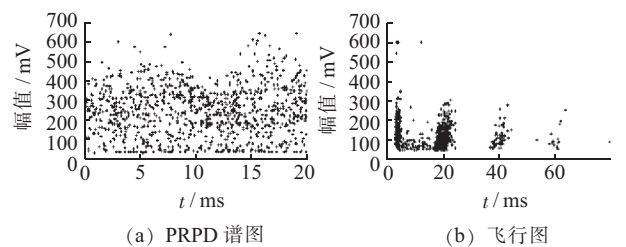


图8 金属微粒运动时的PRPD谱图和飞行图

自由微粒自由跳动时的超声波脉冲信号较均匀地分布在0~360°的相位周期上,试验中90%以上的测量有类似的结果,因此可以说,自由运动颗粒在自由跳动时信号幅值大且无明显的相位相关性是其一大特征。虽然颗粒撞击外壳的时刻与工频相位无关,但超声信号幅值、飞行时间却都表现出较强的周期性变化,飞行时间大约为20 ms。这是因为当颗粒与金属外壳碰撞时,立刻得到新的电荷从而有一个向上的电荷力使其向上运动,如果忽略飞行中发生放电导致的电荷损失,奇数次半个工频周期后颗粒将获得反方向的电荷力,当电荷力达到最大且和重力方向一致(指向地电

极)时,撞击的动量达到极大,检测到的超声信号也达到极大,因此在飞行图上体现出飞行时间与信号幅值的比较有规律的周期性变化特性。

### 3.6 铁心电磁振动信号

由于铁心饱和,TV,TA或变压器等会产生电磁振动信号。这些信号会对超声波法检测局部放电带来干扰。本文主要从试验室检测结果和现场实测结果入手,分析该类信号的超声波特征。

(1) 试验室模拟。传感器通过实验变压器外壳进行测量变压器内部电磁振动情况时 PRPD 谱图、有效值和峰值周期序列图和飞行模式图如图 9 所示。

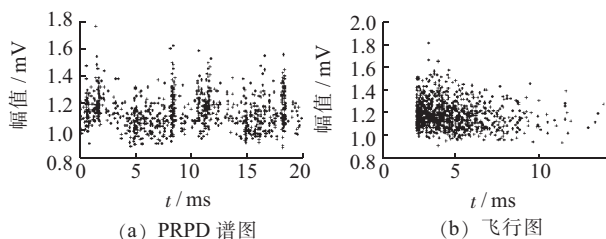


图 9 试验模拟的 PRPD 谱图和飞行图

图 9 显示出与 4 倍频电压相关的峰值(“4 峰”),这区别于背景噪声、局部放电以及自由金属颗粒。飞行模式则具有随机分布的特性,无明显的有规律的特征。

(2) 现场实测。2 组实际测量变压器电磁振动情况得到的 PRPD 谱图、有效值和峰值周期序列图和飞行模式图如图 10 所示。

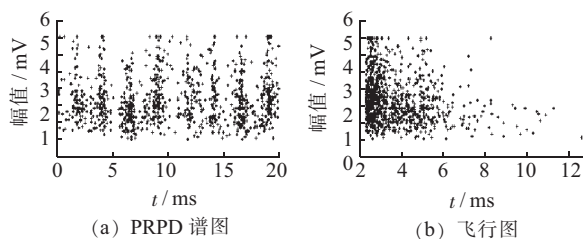


图 10 现场实测的 PRPD 谱图和飞行图

图 10 与图 9 进行对比,实测结果和试验室测量结果有所区别。但测量结果显示,其共同点是 PRPD 谱图呈现“多峰”现象,而试验室测量时额定电压下 PRPD 谱图呈现“4 峰”,而实测结果额定电压下为“8 峰”,这是由于负荷不同,使铁心饱和的程度有所不同,从而使电磁振动信号呈现出不同现象。但飞行模式则具有相同的表征。

试验室和现场测量结果表明,由于铁心饱和而引起的超声信号其 PRPD 谱图呈现“多峰”现象,在整个工频周期内均出现超声信号,没有特别明显的相位特征,其飞行模式特征表明,飞行时间较短,约几毫秒左右,有别于微粒缺陷特征。

### 3.7 信号衰减特性

通过在 GIS 外壳上挪动超声波传感器的位置,改变放电源与传感器之间的距离,结果发现,高压导杆上

发生电晕放电时,在放电源正对的腔体周围 20 cm 之内采集到的放电信号幅值均比较大,随着传感器与放电源距离的增大,幅值下降,当距离达到约 70 cm 时,传感器采集到的信号下降到噪声水平,特别地如果经过了绝缘子的阻挡,那么在绝缘子后采集不到放电信号,如图 11 所示。

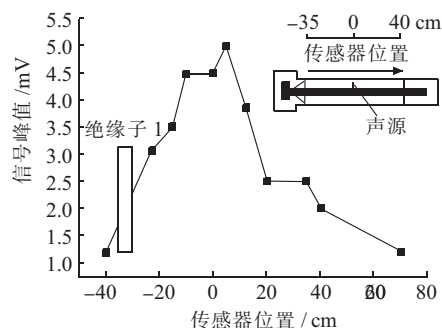


图 11 放电信号幅值随检测距离变化曲线

由于超声波在  $\text{SF}_6$  气体中传播时发生衰减,因此当增大传感器与放电源之间的距离时,超声波强度衰减,采集到的信号幅值随之减小。超声波在绝缘子上发生部分反射,造成能量损失,更重要的是声波在环氧材料内的衰减非常大,因此隔着一个绝缘子很难采集到局部放电产生的超声信号。

## 4 现场应用

2010 年 3 月,对某变电站 220 kV GIS 进行局部放电带电检测时,发现某间隔 B 相分支母线—绝缘盆子处存在较强的局部放电信号,检测结果如图 12 所示。

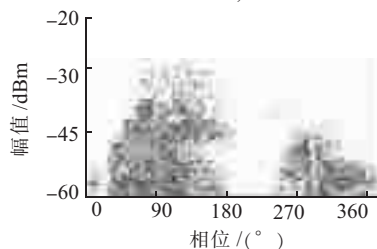


图 12 现场检测到的局部放电信号

与本文研制的典型缺陷模型引发的局部放电信号特征进行比对,发现该图呈现出明显的典型绝缘子内部气隙缺陷特征——“兔耳”现象,由此可判断该处盆式绝缘子内部存在内部气隙缺陷。随后对该设备进行了解体,并对该处盆式绝缘子进行 X 光探伤,发现在其浇铸口下部发现一条长约 150 mm、直径约 2 mm 的气泡,如图 13 中方框所示。

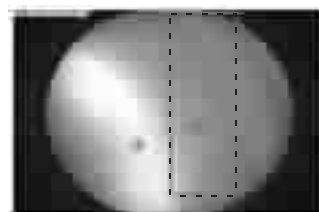


图 13 绝缘子 X 光探伤图

对其进行解剖后,发现其内部存在明显气泡,进一步验证了本文研制设计的典型缺陷模型与实际缺陷具有等效性,缺陷模型产生的局部放电特性可用于现场检测结果的判断与 GIS 设备状态评估。解体照片如图 14 所示。

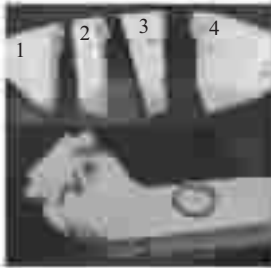


图 14 绝缘子解剖图

## 5 结束语

通过本文研究,可得到以下 GIS 典型缺陷局部放电的超声波信号特征:

(1) 金属尖刺缺陷。当金属尖刺所处位置不同时,其引发的局部放电 PRPD 谱图会因为极性效应而呈现不同特性,在电压较低时,相位谱图呈单峰形态,在电压较高时,2 种放电的相位谱图为双峰模式,但信号幅值和信号密度分布有区别。

(2) 悬浮电位缺陷。局部放电主要集中在电源电压的下降沿附近,随着电压继续升高,相位出现向过零点漂移的现象,且出现多次放电—熄灭—放电的现象。

(3) 绝缘子内部气泡缺陷。气泡缺陷的最大特征是在正负半周上升沿处出现“兔耳”状分布,并随着电压升高“兔耳”幅值增大、“兔耳”起始相位变小的趋势。

(4) 自由金属颗粒缺陷。微粒未运动时,相当于接地体上的尖刺缺陷,局部放电信号表现出尖刺局放特征;微粒运动时,缺陷放电发生在整个工频周期内,超声信号幅值、飞行时间却都表现出较强的周期性变化。

(5) 铁心电磁振动信号。于铁心饱和而引起的超声信号其 PRPD 谱图呈现“多峰”现象,在整个工频周期内均出现超声信号,没有特别明显的相位特征。

(6) 超声信号衰减特性。在放电源正对的腔体周

围 20 cm 之内采集到的放电信号幅值均比较大,随着传感器与放电源距离的增大,幅值下降,当距离达到约 70 cm 时,传感器采集到的信号下降到噪声水平,特别地信号经过绝缘子后将衰减到噪声水平。

通过现场应用,证明本文设计缺陷模型和由此获得的局部放电特性与实际缺陷具有一定的等效性,可用于现场检测结果的判断与 GIS 设备状态评估。由于 GIS 局部放电是一个复杂的过程,超声波在传播过程中遇到障碍会产生一系列的反射和折射,所以使用超声波法检测 GIS 内部缺陷还需要深入的研究和探索。

### 参考文献:

- [1] 黎大健,梁基重,步科伟,等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器,2009,45(1):72-75.
- [2] 金逸,刘伟,查显光,等.智能变电站状态监测技术及应用[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):12-15.
- [3] 陈久林,徐陈成,吴在军,等.基于无线传感器网络的输电线路在线监测系统[J]. 江苏电机工程,2013,31(6):39-42.
- [4] 吴威,宋亮亮.江苏电网 500 kV 智能变电站建设技术综述[J]. 江苏电机工程,2013,31(6):51-54.
- [5] 王建明,李鹏.基于波形特征量的变压器平衡绕组故障诊断方法[J]. 江苏电机工程,2013,31(6):62-65.
- [6] 周倩,唐炬,唐铭,等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):99-105.
- [7] 金立军,张明锐,刘卫东. GIS 局部放电故障诊断实验研究[J]. 电工技术学报,2005,20(11):88-91.
- [8] 周云锋,张子阳,杨景刚,等.基于超声波法的 GIS 盆式绝缘子内部气隙放电特性研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):3-5.

### 作者简介:

杨景刚(1984),男,陕西咸阳人,工程师,从事变电设备状态评价、全过程技术监督工作;

贾勇勇(1986),男,江西九江人,工程师,从事开关类变电设备状态评价工作;

赵科(1985),男,江苏无锡人,工程师,从事开关类变电设备状态评价工作;

王存超(1984),男,江苏徐州人,工程师,从事开关类变电设备状态评价工作。

高山(1974),男,江苏盐城人,高级工程师,从事变电设备状态评价、全过程技术监督工作。

## Analysis of Partial Discharge Ultrasonic Wave Characteristic of Typical Defects in GIS

YANG Jinggang, JIA Yongyong, ZHAO Ke, WANG Cunchao, GAO Shan

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** For analyzing the partial discharge ultrasonic wave characteristic of typical defects in SF<sub>6</sub> gas insulation switchgear (GIS), a 110 kV GIS is taken as an object to design typical partial discharge models, namely point electrode model, floating electrode model, air interstice model in insulator and metal particle and iron core electromagnetic shock model for GIS. Experiments using ultrasonic method to detect PD signals for different defects thus have been implemented. The experimental results show that the ultrasonic signals of different defects have different characteristics in waveform, amplitude and phase resolved partial discharge chart, which is helpful in PD pattern recognition for GIS.

**Key words:** gas insulation switchgear (GIS); typical defects; partial discharge; ultrasonic wave characteristic