

GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测

黎大健¹, 梁基重¹, 步科伟², 杨景刚¹, 李彦明¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 青海海东供电公司电能计量检测中心, 青海 海东 810600)

摘要: 为了研究超声波法在 GIS 中局部放电检测中的应用, 在实验室以一段 220 kV 电压等级的 GIS 母线腔体为试验对象, 设计和模拟了 GIS 中典型的局部放电模型, 使用超声波方法对其放电信号进行检测。实验结果表明, 不同缺陷类型的超声信号在波形、幅值和 PRPD 图上会呈现出不同的特点, 通过对 GIS 腔体不同位置的检测, 可以精确的定位出缺陷位置。研究表明, 超声的方法在检测 GIS 局部放电信号时有较好的灵敏度和精确的定位, 检测结果为今后对 GIS 局部放电模式识别提供了试验依据。

关键词: GIS; 超声波法; 局部放电; 灵敏度; 定位; PRPD

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0072-04

Ultrasonic Detection of Partial Discharge on Typical Defects in GIS

LI Da-jian¹, LIANG Ji-zhong¹, BU Ke-wei², YANG Jing-gang¹, LI Yan-ming¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Measurement Center of Haidong Supply Company, Haidong 810600, China)

Abstract: For detecting partial discharge of SF₆ gas insulation switchgear (GIS) with the ultrasonic method, a 220 kV GIS bus bar cavity was taken as an object to design and simulate the typical partial discharge models in GIS. PD signals on different defects were thus detected with the ultrasonic method. The experimental results indicated that the ultrasonic signals of different defects showed different characteristics in waveform, amplitude and phase resolved partial discharge chart. The PD source could be accurately located with the ultrasonic method by changing the location of sensor. The research demonstrate that the ultrasonic method has better sensitivity and accuracy in PD source localization, which is helpful in PD pattern recognition for GIS.

Key words: GIS; ultrasonic method; partial discharge(PD); sensitivity; location; phase resolved partial discharge(PRPD)

0 引言

目前, GIS 在电力系统能量传输中得到了越来越广泛的应用, 对 GIS 进行局部放电检测对保证 GIS 正常运行具有重要的意义^[1,2]。局部放电信号包含了丰富的绝缘状态信息^[3], 不仅能检测到许多 GIS 制造与安装中的缺陷, 而且还可能检测出绝缘故障的发生及严重程度, 在事故的早期阶段提出报警, 以便有计划地安排维修, 减少设备的损坏, 避免事故发生所带来的巨大损失。因而局部放电的检测、评价和定位也就成为 GIS 绝缘状况监测的重要手段。

笔者设计和模拟了 GIS 常见的局部放电模型, 使用超声绝缘检测仪器采集并处理局部放电信号, 提取信号中的有效参数, 对比了不同放电模型下超声信号的区别, 并指出了超声波法在局部放电电源定位上的实用性, 为使用超声信号进行 GIS 局部放电检测和局部放电模式识别提供有意义的结果。

1 局部放电与超声法检测

局部放电产生时会辐射出电磁波, 所以电检测法是最普遍的局部放电检测手段, 然而诸如超声波法等非电的检测方法已被证明有效并且发展了很长一段时间, 积累了很丰富的知识体系^[4]。超声波法局部放电检测是一种对电力设备很重要的非破坏性的检测手段。最初的超声法检测是基于超声脉冲回波技术(Ultrasonic Pulse-echo Radar), 主要应用于材料内部裂纹检测。近几年兴起的声发射技术(AE)得到了更广泛的应用。

电力设备内部发生局部放电时会发出超声波, 不同的电力设备、环境条件和绝缘状况产生的声波频谱都不相同^[3]。GIS 中沿 SF₆ 气体传播的只有纵波, 而在 GIS 外腔体中, 既可以传播横波也可以传播纵波^[5]。GIS 中的局部放电可以看作以点源的方式向四周传播, 由于超声波的波长较短, 因此它的方向性较强, 从而它的能量较为集中, 可以通过外壁的超

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-27

作者简介: 黎大健(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态检测与故障诊断。

声传感器收集超声放电信号并对信号进行分析,见图1^[6]。

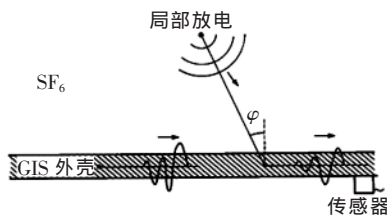


图1 超声波法检测GIS局部放电示意图

在很多种情况下,电检测法并不能十分有效地工作,特别是当背景干扰严重或试品容量过大时,并且很多情况下电检测法并不能给出局部放电点定位的依据,而超声检测法在抗干扰和局部放电源定位上有很大的优势。所以,在现场中超声方法与电检测法联合应用于局部放电在线检测,已取得良好的效果^[7]。

2 局部放电测量电路及试样

2.1 局部放电测量电路

测量系统接线见图2。试品为一段220 kV GIS单相母线腔体(内导体外直径/外壳内直径尺寸为106 mm/320 mm),见图3。由于试验中同时采用脉冲电流法测量局部放电信号,所以在电路中添加耦合电容 C_k 和检测阻抗 R 。为了避免非GIS内部局部放电信号的干扰,实验中使用的变压器为无局部放电变压器,高压引线采用直径为 $\phi 10$ 的软铝管最大地保证了“干净”的实验背景。为了避免GIS击穿后损坏 R 以及测量系统,线路上还串联了保护电阻 Z ,同时还保证了测量系统良好接地。

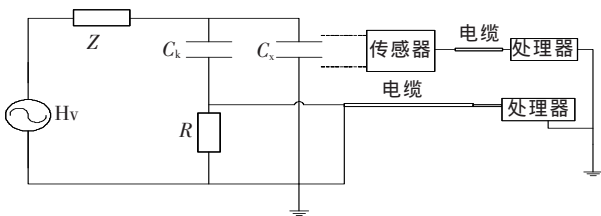


图2 测量系统示意图



图3 试验中使用的GIS实物图

2.2 缺陷模型

GIS中常见的缺陷包括:金属突起物缺陷、金属悬浮缺陷、自由颗粒缺陷以及绝缘子缺陷等。由于篇幅限制,笔者只选取金属突起和金属悬浮两种缺陷用于描述超声波法检测局部放电。金属突起通常是由于不良加工、机械破坏或组装时擦刮而出现的,尖头突出形成绝缘气体中的高场强区,导致局部放电的

产生。实验中在高压导杆表面径向安装一根银针来模拟这种放电类型,见图4(a)。模型为一根长度为50 mm、尖端处等效半径为 $100 \mu\text{m}$ 的针尖模型,固定在高压导杆上。这种模型有利于电晕放电的产生。第2种模型见图4(b),用与高压导杆间距为1.5 mm的铝片模拟导杆上的悬浮电位放电。每次当铝片与高压导杆之间的电压差超过他们之间气隙所能承受的电压时就会产生局部放电。

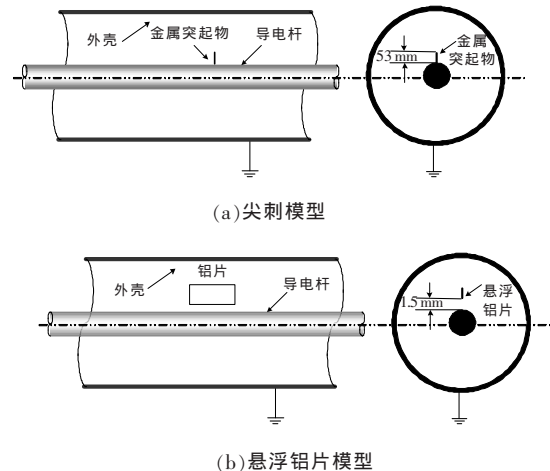


图4 GIS缺陷模型示意图

3 试验结果及分析

针对两种放电模型,利用图2进行了局部放电测量。通过电缆将压电式传感器的数据传送到处理器,也可以输入到示波器查看时域波形。超声传感器的谐振频率为30 kHz,前端增益40 dB。

使用超声检测法,通过比较两种局部放电模型的试验结果,可以看到两种放电模型下放电特性的区别。

3.1 放电模型局部放电超声信号比较

(1)高压导杆上的尖刺尖端处电场集中,产生电晕放电。放电发生于导杆附近时,局部放电源可以看成是一个点源向其四周发射球面波,其高频部分直接往腔体传播,而低频部分向多个角度传播,传播路径较远^[6]。由于 SF_6 的声波吸收率相对很强(其值为26 dB/m,类似条件下空气仅为0.98 dB/m),并且随频率增大而增加,所以电晕放电中高频部分的声波会有很大衰减^[8]。声波传播到腔壳上时,会发生部分的反射和折射。

图5描绘了电晕放电超声信号的PRPD谱图和时域波形图以及对其快速傅里叶变换所得的频谱分析图,从图5(a)中可以看到采集到的超声信号都在5 mV以下。由于尖-板放电时的极性效应,尖端电晕放电信号在放电起始时刻主要集中在负半周,其峰值附近的放电信号尤为强烈。从图5(b)可以看到采到的超声波有很长的“尾巴”,主要是由于声波在腔体、

法兰上的反射造成的。对此时域波形进行频域分析,结果见图 5(c),可看到超声信号的能量比较集中,主要在 15~30 kHz,而在高于 30 kHz 以上的能量很小。

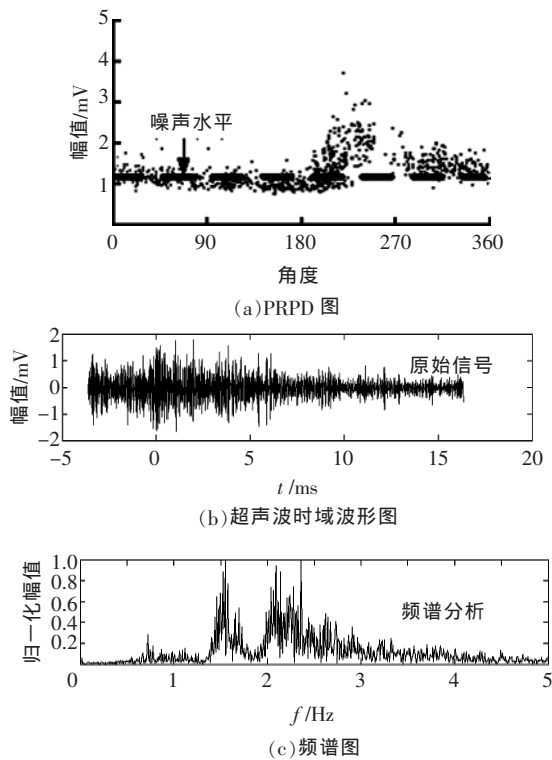


图 5 尖刺模型放电信号(气压为 0.35 MPa,传感器频率为 30 kHz)

超声传感器输出的信号幅值等比于声源能量的开方值^[7],统计不同电压下采集到的信号幅值可以观察放电点发出的声能量的变化,见图 6。从图中可以看到,随着电压的增加,电晕层半径增大,放电强度增加,采集到的声波幅值也随之增大。但整体上,采集到的超声信号很弱,其原因可能有:

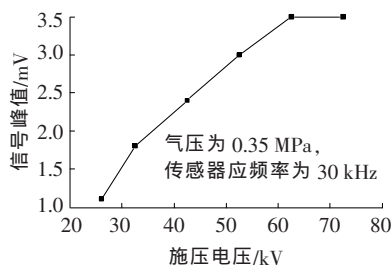


图 6 尖刺模型超声信号幅值变化曲线

(1)放电源位于中心导杆,声波传播相对较远,在腔体上又产生折射和反射,因此超声信号衰减较大^[9]。

(2)负电晕时尖刺处场强游离的正离子缓慢移向尖刺电极并与电极上的电荷中和,游离出的电子被电场力斥出游离区。因区外场强迅速减小,电子运动速度减慢,在电负性 SF₆ 中形成质量大的负离子,它运动速度低,在电晕层外围区域聚积为大量负空间电荷并减弱电晕区的场强,使游离停止,此后正离子逐渐向阴极迁移,负离子则向外扩散,使尖刺电极附近电场重新增强,游离再次发生。如此不断重复就

形成重复脉冲放电现象。因 SF₆ 电负性气体中负离子质量较大,其运动速度远小于电子,因而在正、负离子间形成的电场减弱该处原有电场,使放电不易发展,放电脉冲相对较弱^[10]。

(2)与尖刺产生的电晕放电不同,悬浮铝片与导杆耦合出一个电容,属于容性放电。当发生局部放电时,用超声传感器能采到很大的放电信号(达到 500 mV),并且在工频信号正负半周均能检测到放电信号,见图 7(a)。图 7(c)是对图 7(b)所示的时域信号进行快速傅里叶变化的结果,可以看到其能量主要集中在 20 kHz 左右,与前面尖刺放电的结果很相似。

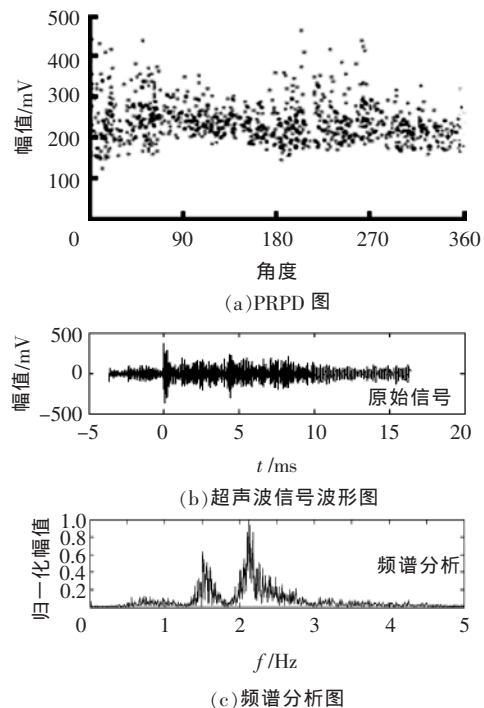


图 7 悬浮铝片模型放电信号(气压为 0.35 MPa,传感器频率为 30 kHz)

图 8 为不同电压下采集到的声波幅值及有效值随施加电压的变化规律。可以看到,随着放电电压增大,超声波幅值比较稳定,主要是因为悬浮间隙间的电容值比较固定,放电时间隙两端的电压差也比较稳定,所以放电量也比较稳定。通过有限元软件计算悬浮气隙的电容,可以估算其放电量约为 4 000 pC。

3.2 局部放电源定位

局部放电源定位是局部放电检测中很重要的一步^[11,12],一般的处理方法有:时延估计法和基于信号幅值差法^[8]。前者又分声-声法和电-声法,声-声法需要两个或两个以上传感器用于提取信号到达时间差,电-声法以放电的电脉冲作为触发基准信号,同时记录电脉冲信号和多路超声波信号,并加以比较,以测得电信号与超声波信号的时延。通过信号到达时延可以估算放电点的位置。时延估计法操作简单,但需要多个传感器采集信号且在具有强电磁干扰的现场中定位准确度不高^[13]。在超声波法定位中最简单实用的方法是基于信号幅值变化法:当传感器最

接近于声源处时信号幅值最大,见图9。在一段腔体中,当传感器位置偏离放电点时,采集到的超声信号水平急剧下降,如果将传感器移到另外的腔体上时,则采集到的超声信号完全“淹没”在背景噪声中,可见根据超声信号幅值衰减可以很好地对放电点定位。

3.3 超声检测法灵敏度

如前所述,超声传感器输出的信号幅值等比于

声源能量的开方值,参考已经进行放电量标定的脉冲电流法,观察超声波信号峰值随放电量增大的变化,见图10,两者呈线性增长。从图中可以看到超声法能检测到视在放电量约为10 pC的放电信号,甚至有些试验表明其灵敏度可达2~5 pC^[14-17]。由于声信号水平与局部放电放电量大小的联系之间还有很多不确定的因素,目前使用超声法局部放电检测

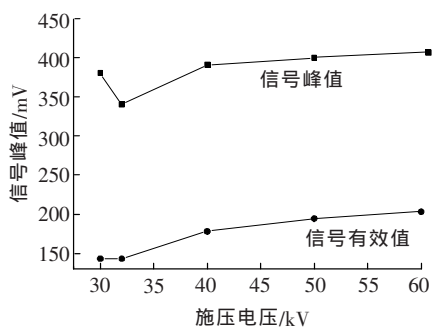


图8 悬浮铝片超声信号水平变化图

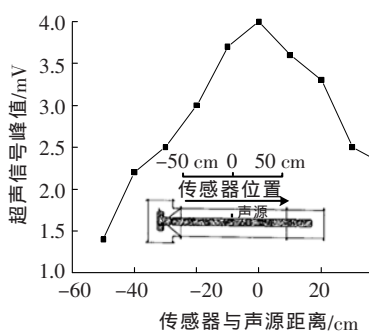


图9 超声信号水平与传感器位置

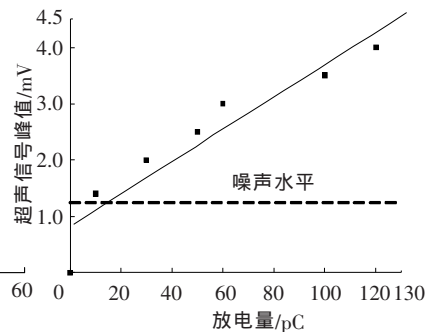


图10 超声传感器灵敏度

结果对设备绝缘评估还需要做进一步的研究。

4 结论

(1) 超声波法能有效检测到GIS内局部放电信号。

(2) 不同缺陷类型测量到超声波信号有不同的特点,其时域波形图、频域分析图和PRPD图等都不尽相同,可以利用这些特征量进行GIS内部缺陷的模式识别。

(3) 利用超声信号幅值差法能有效地对局部放电源定位。

(4) 超声波法在检测GIS内部局部放电有较好的灵敏度,可达10 pC。

由于超声波在GIS中的传播是一个复杂的过程,超声在传播过程中遇到障碍会产生一系列的反射和折射,所以使用超声法检测GIS内部缺陷还需要更深入的研究与探索。

参考文献:

- [1] 邵涛,周文俊,朱宜飞,等.特高频法检测GIS局部放电的试验研究[J].高电压技术,2001,27(3):15-16.
- [2] 刘卫东,金立军,黄家旗,等.日本SF₆电器局部放电监测技术研究近况[J].高电压技术,2001,27(2):76-79.
- [3] 罗永芬,李彦明,刘丽春.基于超高频和超声波相控接收原理的油中局部放电定位法仿真研究[J].电工技术学报,2004,19(1):35-39.
- [4] LUNDGAARD L E. Partial Discharge-part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection-fundamental Consideration[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-30.
- [5] HAQUE M E, DARUS A B, YAACOB M M, et al. Application of Acoustic Sensing and Signal Processing for PD Detection in GIS[C]// International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 1997: 745-749.
- [6] LUNGAARD L E, RUNDE M, SKYBERG B. Acoustic

Diagnosis of Gas Insulated Substations: A Theoretical & Experimental Basis [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1990, 5 (4): 1751-1759.

- [7] LUNDGAARD L E. Partial Discharge-part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-practical Application [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(5): 34-42.
- [8] 王昌长,李福祺,高胜友.电力设备的在线监测与故障诊断[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [9] HAQUE M E, DARUS A B, YAACOB M M. Diagnosis of GIS Based on Acoustic Sensing Technique[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997: 97.
- [10] 金立军,胡青,邱国海,等.GIS电晕监测[J].高电压技术,2005,31(3):25-27.
- [11] 郭志强,江秀臣,沈威.GIS放电定位技术[J].高压电器,2007,43(2):140-142.
- [12] BOZZO R, GUASTAVINO F. PD Detection and Localization by Means of Acoustic Measurements on Hydrogenerator Stator Bars [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 660-666.
- [13] 孙才新,罗兵,顾乐观,等.变压器局部放电源的电-声和声声定位法及其评判的研究[J].电工技术学报,1997,12(5):49-52.
- [14] KYRKJEEIDE A S S, LARSEN V. Acoustic Insulation Analyzer for Periodic Condition Assessment of Gas Insulated Substations [C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: 919-924.
- [15] LEIJON M, MING L, HOFF P. SF₆ Gas Pressure Influence on Acoustical Signals Generated by Partial Discharges in GIS [C]// 7th ISH Conference, 1991: 75.
- [16] BARGAGIA A, KOLTUNOWICZ W, PIGINI A. Detection of Partial Discharges in Gas Insulated Switchgear[J]. IEEE Trans. Po. Del., 1992, 7(3): 1239-1249.
- [17] SCHLEMPER H D, KURRER R, FESER K. Sensitivity of On-site Partial Discharge Detection in GIS [C]// 8th ISH Conference, 1993: 66.