

GIS 中典型缺陷局部放电的超声信号特征分析

GIS 以其可靠性高、维护率低和尺寸小等优点在变电站中广泛应用。然而, GIS 中不可避免的缺陷仍经常引发绝缘击穿事故。设计并模拟了 GIS 中常见的三类局部放电典型缺陷: 金属突出物缺陷、自由金属颗粒缺陷和悬浮电位缺陷, 使用外置的超声传感器采集局部放电产生的超声波信号, 并分析了这些信号的特性。试验结果表明, 三种典型绝缘缺陷局部放电时具有不同的超声信号特征, 超声波法可用于检测和分离 GIS 中常见的绝缘缺陷。

杨立峰/国网西藏电力科学研究院



杨立峰/工程师

随着我国电力工业的迅速发展, 电网电压等级不断升高, 大型电力变压器、电动机和 GIS 趋向大容量、高电压。由于 GIS 一旦发生绝缘击穿故障, 其维修周期长, 这对电力系统恢复正常供电将产生重要影响, 进而造成很大的经济损失以及恶劣的社会影响。因此, GIS 的运行可靠性非常重要^[1,2]。

对 GIS 实际故障的统计分析表明, 因内部绝缘缺陷引发的 GIS 击穿故障占有很大比例。某电网公司内 2010 ~ 2014 年共发生 GIS 故障 43 次, 以 5 年为统计区间, 其故障率为 0.6 次/百间隔·5 年, 其中运行年限 5 年以内的故障次数共 29 次, 占总数的 67.4%, 在近 5 年投运的设备为 1 724 个间隔, 其 5 年内的评价故障率为 1.68 次/百间隔·5 年; 运行年限 6 年以内的故障次数共 34 次, 占总数的 79.1%, 投运 6 年以内的 GIS 的 34 次故障, 由绝缘问题引起的故障有 24 次, 占总数的 70.6%, 而 24 次绝缘故障中, 由盆式绝缘子引起的故障有 11 次, 占总数的 45.8%。运行条件下 GIS 绝缘击穿事故及其机理分析受到国内外的关注^[3,4]。GIS 绝缘故障的前期可能会出现局部放

电, 对其局部放电产生的光、电磁波和振动等物理特征进行检测, 可有效检测 GIS 内部绝缘缺陷^[5,6], 尤其是一些潜伏性和突发性的故障。局部放电检测可用于对 GIS 的绝缘劣化趋势和运行状况进行分析和预估, 必要时可提供故障危害性并发出报警信号, 以便及早采取措施, 避免严重事故的发生, 保证系统运行安全。

测量系统

超声波法具有可带电测量、容易实现故障定位等优点, 非常适合于 GIS 的缺陷检测。针对各种 GIS 典型局部放电模型的超声放电特性, 提取了表征局部放电状态的特征参数, 建立了相应的特征指纹库, 为 GIS 故障诊断和缺陷类型的自动识别奠定了基础。

1. 缺陷模型的建立

GIS 的内部故障以绝缘击穿故障为主, 且造成的后果严重。绝缘故障产生的原因可能是由于高压导体表面突起、自由金属微粒和悬浮电位放电等。常见的几种缺陷的示意图如图 1 所示^[8,9]。

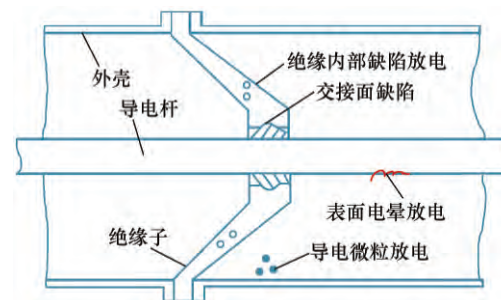


图 1 GIS 内部常见绝缘缺陷类型

根据 GIS 设备绝缘缺陷放电形式和特点, 设计了三种模拟 GIS 内 PD 的物理模型: 金属突出物缺陷模型、悬浮电位缺陷模型和自由金属颗粒缺陷模型。相关示意

关键词/Keywords

GIS ·
局部放电 ·
超声波法 ·
典型缺陷 ·

图如图 2 所示。

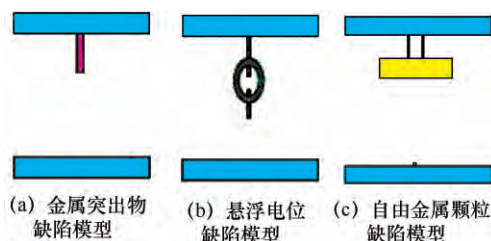


图 2 模型示意图

这些模型的放电比较接近真实的局部放电情况，而且在试验室条件下比较容易放电。试验时，模型置于充 SF_6 气体的压力容器中， SF_6 气压为 0.4 MPa。

2. 超声检测

图 3 为局部放电时的超声波信号检测装置。

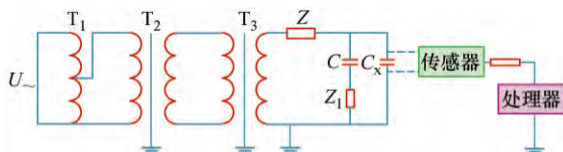


图 3 局部放电超声波信号检测示意图

图中， T_1 、 T_2 和 T_3 分别为自耦调压器、隔离变压器和无局部放电高压试验变压器，其中无局部放电变压器额定电压为 400 kV，额定功率 200 kW； C_x 为试品即试验所用模型； Z 为水电阻； C 为 100 kV 耦合电容器； Z_i 为 50 Ω 的检测阻抗；示波器用于观测时域波形（电路图中未予标出），使用 4 054（4 通道，带宽为 500 MHz，采样率为 2.5 GS/s）；所用的超声波传感器频率响应曲线如图 4 所示。

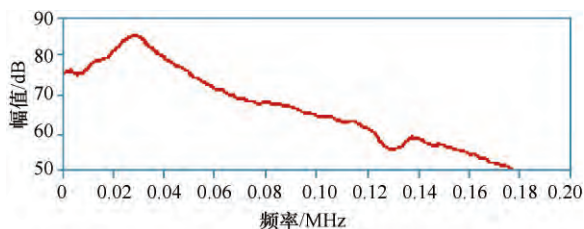


图 4 超声波传感器频率响应曲线

超声波传感器的中心谐振频率约为 30 kHz。由于超声信号很弱，传感器输出信号只有毫伏级。因此，设计了一个 40 dB 的前置放大器，将超声波信号放大器处理后再传送到超声波检测数据处理系统。

结果与分析

1. 金属突出物模型

图 5a 和 5b 分别为高压端金属突起发生电晕放电初始和稳定后的 PRPD 图。从图中可以看出，该种缺陷放电相位集中在工频的正、负峰值对应的相位，可归类为电晕放电。由于金属突起在高压端，而突起易形成极不均匀的电场。电压较低时，尖端局部放电首先在工频负半周出现。随着工频电压的增加，正半周开始出现少量的放电脉冲。继续升高电压，局部放电的重复频率也增加，放电对应的相位区间随之增加。电压升至 25 kV 时，最大放电量由 14.5 kV 时的约 2.6 mV 增大至 4.8 mV。负半周放电次数明显高于正半周，但正半周最大放电量高于负半周。

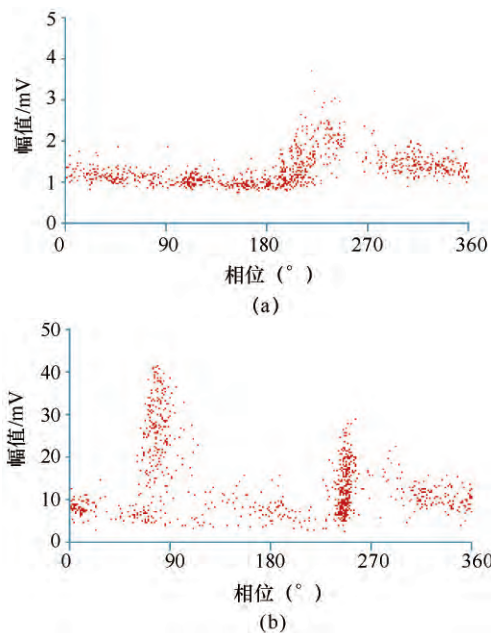


图 5 高压端金属突起超声相位谱图

金属突出物缺陷（高压端突起）的放电可以分为两个阶段。低电压下的初始放电阶段，这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，不容易发生放电；相反，工频负半周时尖端为负极性，由于电子质量小、移动速度快而迅速向地电位移动，正离子靠近尖

端附近,这样正离子对尖端与正板对尖的电场叠加进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,大量正离子向板靠近等效减少了尖板间距,不断继续电离而形成电子崩,进而形成流注放电,从而在正半周也出现局部击穿进而产生幅值较大的放电脉冲。随着局部放电程度的加剧,正、负半周局部放电的脉冲对应的工频相位也逐渐扩大。

2. 悬浮电位模型

图 6a 和 6b 分别为悬浮电位放电开始放电时和放电稳定后的超声信号相位谱图。起始放电信号比较强烈,起始放电最高幅值达到 300 mV,较大幅值的放电信号集中于 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 区间,即工频周期的上升沿部分。电压升高导致放电脉冲幅值变化比较小,但是放电重复率增加很明显,而谱图形状变化不大。

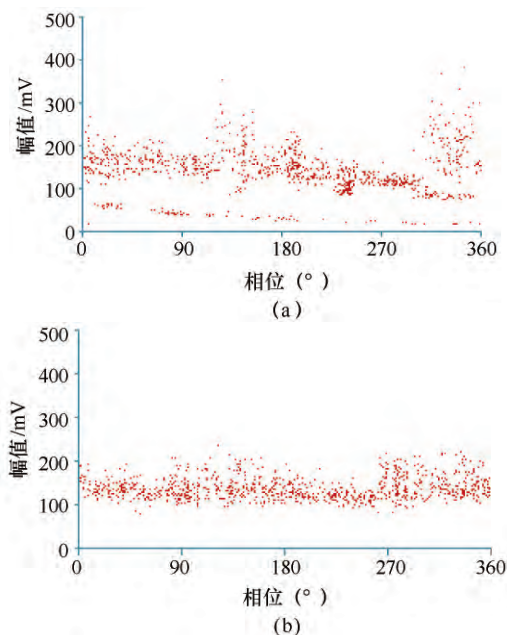


图 6 悬浮放电超声相位谱图

对模型施加电压时,当外加电压升高使间隙承受的电压超出其耐受电压则发生击穿,而由于间隙大小不变,外加电压变化时等效电容的充放电次数改变但放电量基本不变,只有放电次数和放电相位区间改变。悬浮电位放电相位特征明显,均发生在工频正、负半周的上升沿。随着气压的升高,间隙耐受电压增加使得悬浮放电起始电压随之增大。

3. 自由金属颗粒模型

当施加的工频电压较低时,自由导电颗粒所获得的静电力不足以使其发生运动而静止于外壳内表面,这与地电位突起尖刺缺陷很相似。当电压高于某一值时,突起会发生局部放电,因此其 PRPD 谱图会呈单峰或双峰特性,如图 7 所示。可以看出,局部放电先发生在工频电压正峰值,对应的突起相当于负峰值。随着电压的增加,正、负半周均出现局部放电,但幅值较小,均小于 3 mV。

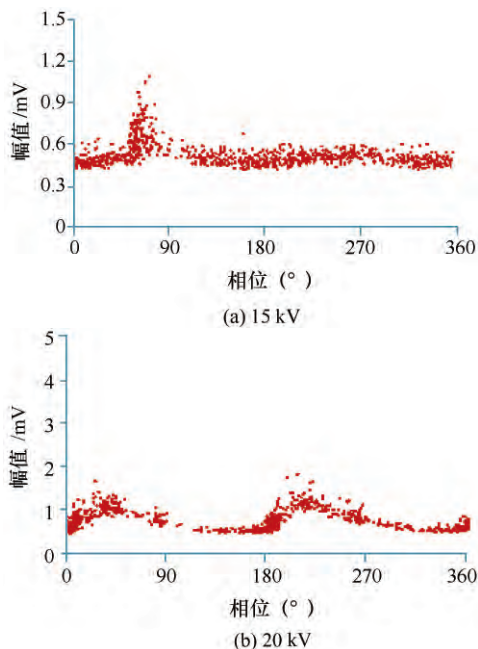


图 7 单峰和双峰两种 PRPD 谱图

电压增加到某一值时,自由金属颗粒可带上足够的电荷而发生运动,可在下电极表面滚动或在两电极间跳动及上下运动。图 8 为自由金属颗粒发生跳动时的超声波信号随工频相位的分布谱图。由图 8 可见,这个工频相位区间上都会出现相当数量的声脉冲,与相位的相关性不高,说明运动颗粒与外壳的碰撞是随机的。

基于以上分析,当颗粒静止时,超声波信号幅值较小,且有较强的相位相关性;而当颗粒自由跳动时,超声信号幅值非常大,且没有明显的相位相关性。

图 9 为自由金属颗粒在 18 ~ 32 kV 下的飞行时间图。图 9 中,超声信号出现三角状分布群现象,其分布周期为 20 ms。随着电压的增加,金属微粒跳跃高度增加,运动持续时间增加,金属微

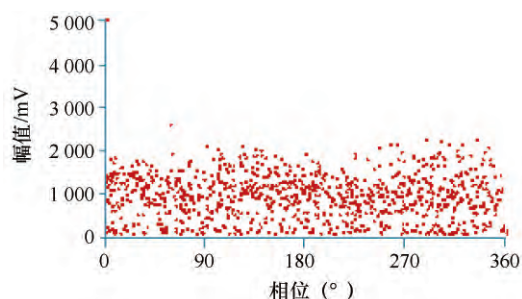


图8 超声信号相位分布图

粒撞击外壳产生的超声信号幅值也增加,导致三角状分布增多,且信号幅值增加。这是GIS中自由金属颗粒缺陷局部放电的一种典型模式。

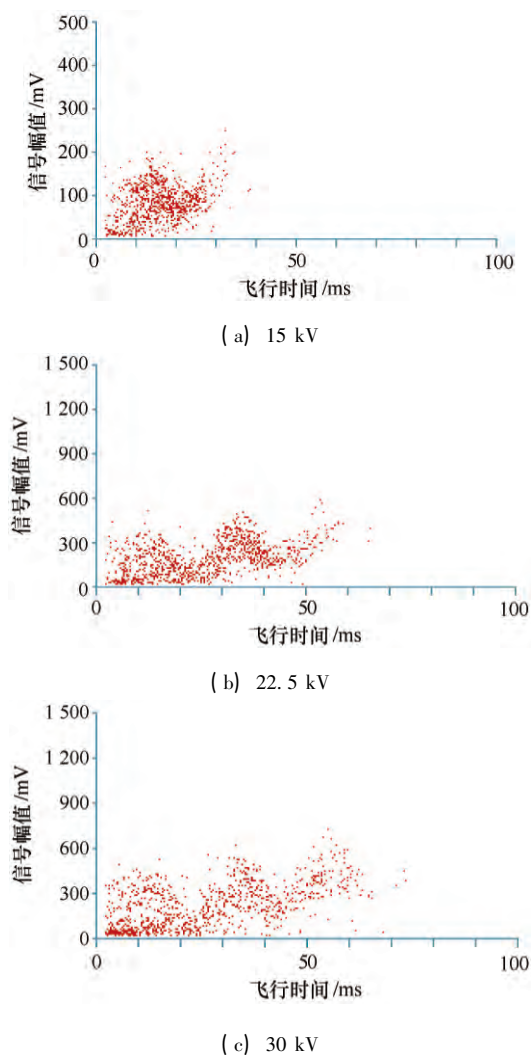


图9 电压变化时颗粒的飞行时间图

金属颗粒模型在外加电压不是很高时,在地电位静止不动,这时表现出了电晕放电的特征。而当电压足够高使得颗粒自由运动时,测得的局部放电相位相关性较弱,且信号幅值较高。

结束语

通过模拟试验分析了GIS内典型的三种局部放电模型的超声波信号特性。试验结果表明,三种类型放电时产生的超声波信号指纹差异显著,特别在自由金属颗粒,局部放电检测中体现出独特的优势。三种典型缺陷的PRPD谱图呈现不同的特征,并体现了一定的规律性,检测结果提供了具有多样性和重复性的指纹数据,为将来基于超声波信号的GIS内缺陷模式识别数据库提供了试验基础。

参考文献

- [1] 冈部成光. GIS内金属异物的局部放电特性和诊断技术 [J]. 电气评论 B, 1995, 115 (10): 1221-1227.
- [2] Morcos MM, Ward SA, Anis H, et al. Insulation integrity of GIS/GITL systems and management of particle contamination [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16 (5): 25-37.
- [3] 贾江波, 查玮, 杨兰均, 等. 直流电压下绝缘子附近球形导电微粒运动特性 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (11): 18-21.
- [4] 日本电气学会报告第561号. GIS绝缘物及金属异物的影响 [J]. 1995.
- [5] 苑舜. 全封闭组合电器局部放电超声传播特性及监测问题的研究 [J]. 中国电力, 1997, 30 (1): 7-10.
- [6] Changjoon Lee, Wonjong Kang, Heecheol Lee, et al. The spectrum analysis of UHF PD signals from artificial defects in GIS using UHF PD measuring system [C]. Netherlands: XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, 2003.
- [7] 姚勇, 岳彦峰, 黄兴泉. GIS超高频/超声局放检测方法的现场应用 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (2): 422-424.
- [8] 司文荣, 李军浩, 袁鹏, 等. 气体绝缘组合电器多局部放电源的检测与识别 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (16): 119-126.
- [9] 谭向宇, 郭浩, 张乔根, 等. 直流下GIS内运动金属微粒的超声特性及状态识别 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (2): 391-395.

(收稿日期: 2014-10-31) EA