

# 基于超高频窄带法的 GIS 局部放电的研究

袁 鹏, 史 文, 杨景刚, 黎大健, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了提高 GIS 运行的可靠性, 笔者简要说明了超高频法检测 GIS 局部放电的原理, 并在实验室以一段 220 kV 电压等级的 GIS 母线为试验对象, 设计和模拟了 GIS 中典型的 4 种局部放电模型, 并使用自主研发的超高频窄带检测系统对其局部放电信号进行检测。试验结果表明, 该超高频窄带系统能有效测量 GIS 局部放电信号, 同时获得了不同类型缺陷所产生的超高频信号及其对应的特征, 为今后 GIS 局部放电模式识别提供了数值依据。

关键词: GIS; 局部放电; 超高频法

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0040-04

## Study of Partial Discharge in GIS Based on Narrow Band UHF

YUAN Peng, SHI Wen, YANG Jing-gang, LI Da-jian, LI Yan-ming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The principle of partial discharge detection of gas insulation switchgear with ultra high frequency is discussed. A 220 kV GIS bus bar cavity is adopted as a test object to design and simulate four typical defect models in GIS. The PD signals produced by the four models are obtained via the PD detection system, which is developed by the authors on the basis of the narrow band UHF method. The experimental results indicate that the system has good sensitivity for detecting PD signals in GIS. Moreover, the UHF PD signals and their corresponding characteristics of the four defect models are obtain, which would become a reference to PD pattern recognition for GIS.

**Key words:** gas insulation switchgear(GIS); partial discharge(PD); ultra high frequency(UHF)

### 0 引言

GIS 被广泛应用, 其安全运行对整个电力系统的稳定至关重要, 一旦发生缺陷, 必将造成重大损失。GIS 内可能因生产制造或长期运行中出现的潜伏性绝缘缺陷而导致不同程度的局部放电, 长期放电会引起绝缘劣化, 甚至击穿或闪络。GIS 内局部放电检测是发现这类缺陷的有效手段, 对掌握绝缘状况、提高 GIS 运行可靠性具有重要意义。

超高频检测法是目前国内外研究 GIS 局部放电的热点方法之一。超高频检测法是通过检测局部放电辐射出的超高频电磁波来判断有无放电和绝缘状态的, 其具有抗干扰能力强、灵敏度高、利于在线监测等优点。

笔者主要使用自主研发的超高频窄带检测系统对 GIS 中的几种典型缺陷进行局部放电测量试验。

### 1 超高频法及检测系统

#### 1.1 超高频检测法

正常运行中的 GIS 内充有高气压 SF<sub>6</sub> 气体, 其绝缘强度和击穿场强都很高。当局部放电在很小范围内发生时, 气体击穿过程很快, 将产生持续时间为 ns 级的脉冲电流, 同时向四周辐射出大量的超高频电磁波。而 GIS 腔体结构相当于一个良好的同轴波导, 电磁波可在 GIS 内部传播且衰减较小。使用超高频传感器接收这些电磁波, 进而来分析 GIS 内部有无放电、放电强度及缺陷类型等信息<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 检测系统

笔者采用的窄带检测系统由超高频局部放电电感器、信号传输电缆、信号调理单元、数据采集卡、便携式工业控制计算机及其相关的控制单元等部分组成。

GIS 中局部放电产生的电磁波经超高频传感器接收后, 电磁信号转换为电信号并经放大处理, 然后经过同轴通讯电缆传送到控制部分的信号调理单元。放电信号经过调理后, 送入工业控制计算机内的数据采集卡进行信号的采集存储等处理。计算机

收稿日期: 2008-01-14; 修回日期: 2008-10-13

作者简介: 袁 鹏(1975-), 男, 博士研究生, 从事电力设备检测和故障诊断技术的研究。

通过并行接口实现对信号调理单元的控制,即实现对系统选通频带的中心频率和滤波器的带宽的选择和控制。经过系统处理,可得到放电信号的能量分布、放电次数、放电出现的相位等信息,并绘制PRPD谱图、李莎如图和 $n-q-\phi$ 三维谱图等。该检测系统检测频段为400~800 MHz,在此频段范围内,可避免电晕信号(<300 MHz)和手机等通讯信号(>800 MHz),受到的干扰更小,测量到的信号更接近真实的放电信号,这也是窄带检测系统的优势所在。

其中,在超高频信号调理单元使用了混频技术,该技术可将采集信号频率从1 GHz降到几十 MHz,既可保留原局部放电信号超高频分量的峰值和相位特征,又大大降低了对信号采集系统的要求。同时,通过调节混频器本振信号的频率即可完成对选通信号中心频率的选择,通过改变混频器后的低通滤波器的带宽即可改变选通频带的带宽。这样对非选通频带的干扰也具有较好的抑制能力<sup>[2]</sup>。

笔者使用了一种适合GIS现场安装的超高频传感器——套筒天线。该天线采用同轴结构形式,主要由辐射管、阻抗转换器、扼流装置、转换接头和天线底座等组成,在测量系统所选择的检测频带内具有良好的频率响应和较高的灵敏度,其驻波比和增益分布见图1中A、B。

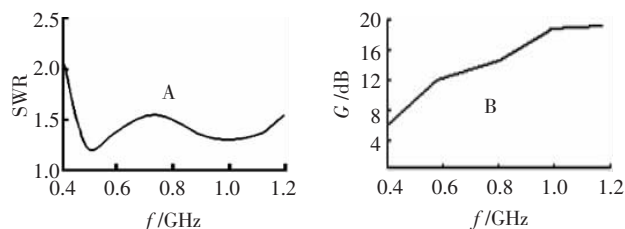


图1 天线特性曲线图

该天线体积小,可灵活地安装在GIS的盆式绝缘子、进出线套管等处。

## 2 试验电路及缺陷模型

### 2.1 试验回路

建立试验回路见图2。

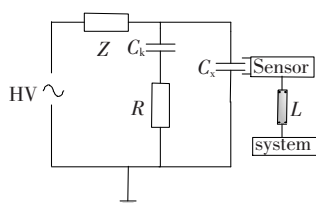


图2 试验回路示意图

图2中,HV为高压发生装置,变压器为100 kV无晕试验变压器,高压引线采用直径为 $\phi 10$  mm的软铝管,Z为水电阻, $C_k$ 为试品等效电容, $C_x$ 为耦合电容,R为检测阻抗(试验中同时采用脉冲电流法测

量局部放电信号)。Sensor为超高频传感器,L为电缆,将传感器接收到的信号传输到处理系统。

试品是一段220 kV GIS单相母线段(内导体直径/外壳内直径尺寸为106/320 mm),见图3。



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。笔者选取了高压母线金属尖刺、GIS筒壁上的金属尖刺、悬浮电位和盆式绝缘子表面污秽等4种缺陷模型进行试验,其结构见图4。

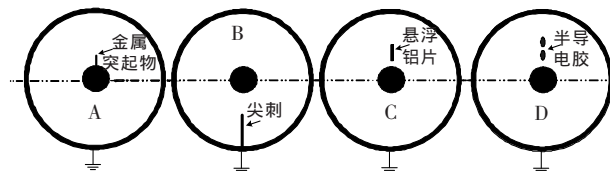


图4 缺陷结构示意图

试验时,在母线表面安装一根长为53 mm、尖端处等效半径为100  $\mu\text{m}$ 的钢针来模拟高压母线金属尖刺缺陷,见图4-A;在筒壁内测径向安装一枚长为60 mm、尖端处等效半径为130  $\mu\text{m}$ 钢针来模拟GIS筒壁上的金属尖刺缺陷,见图4-B;通过绝缘螺杆将铝片固定在高压母线上,两者相距1.5 mm,绝缘螺杆可以用于调节悬浮铝片与导杆的间隙距离,其长度足以避免沿面闪络,以此来模拟悬浮电位缺陷,见图4-C;在绝缘子上涂抹半导体物质,厚度小于1 mm,以此模拟盆式绝缘子表面污秽缺陷,见图4-D。

## 3 试验结果及其分析

试验时,GIS内充有0.45 MPa的 $\text{SF}_6$ 气体。电压由低往高加,一直到出现信号特征较明显、重复率高和稳定的放电。

### 3.1 高压母线金属尖刺缺陷模型

高压母线上的尖刺畸变电场使其周围电场集中,形成高场强区,附近的气体遭到电离,产生电晕性质的局部放电。

局部放电先出现在电源电压的正峰处,随着电压的升高,负峰处也出现了放电,记录超高频信号见图5。

图5中,A图为起始放电时记录到的信号,B图为继续升压后记录到的放电信号。从两图可明显看出,起始放电时,正峰值附近放电重复率高,信号幅

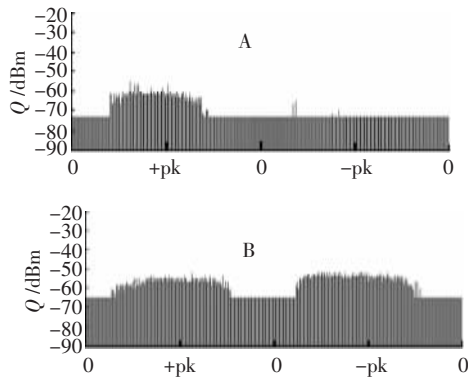


图5 高压母线金属尖刺缺陷模型的PRPD谱图

值较稳定,而负峰值处放电较少,这一现象与文[3-6]的研究结果吻合。因为在高压 SF<sub>6</sub> 气体条件下,尖刺周围的气体遭到电离,其正离子在电场作用下远离尖刺,同时由于 SF<sub>6</sub> 气体分子具有极强的电负性而吸附电子形成负离子群。该负离子群在向尖刺靠近时加强尖刺周围电场,易形成局部放电。

随着电压的升高,电压负峰值处出现放电信号,如图 5-B 所示,与图 5-A 相比较,正峰值处的放电信号特征没有明显的变化,而负峰值处出现幅值更大、重复率更高的放电。在此条件下记录 *n-q-φ* 三维谱图见图 6。

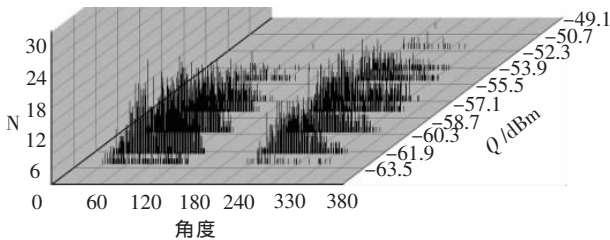


图6 高压母线金属尖刺缺陷模型的 *n-q-φ* 谱图

由图 6 可明显看出,负峰值处的放电量较大,重复率较高,正负峰两处放电呈明显的不对称性。

这个现象说明,在高气压 SF<sub>6</sub> 气体环境下,尖刺缺陷所引起的局部放电,开始以正极性效应为主,随着外施电压的升高,尖刺放电的负极性效应较为明显,而空气条件下尖刺放电主要出现在电源负峰处。由于绝缘气体本身特性的影响,两种环境下的放电存在着明显的区别。

在 400~800 MHz 频段范围内,金属尖刺缺陷放电能量主要集中在 400~550 MHz 范围内,高频分量较小,能量分布见图 7。

图 7 中,阴影部分为采集到的背景噪声信号的能量在 400~800 MHz 频段范围内的分布图;A 线为放电信号能量的分布图。由图 7 可明显看出,在 400~550 MHz 范围内,放电信号能量明显大于背景信号能量,而在高频段则与背景信号相差无几。

### 3.2 接地体上的金属尖刺缺陷模型

筒壁直接与地线连接,但由于金属尖刺的存在

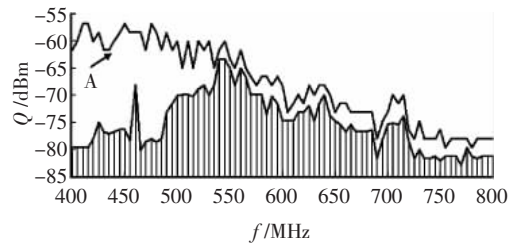


图7 高压母线金属尖刺缺陷模型的能量分布图

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。

该模型产生的局部放电主要集中在电源的正峰值处,与高压母线上尖刺起始放电时的特征相似,*n-q-φ* 图见图 8。

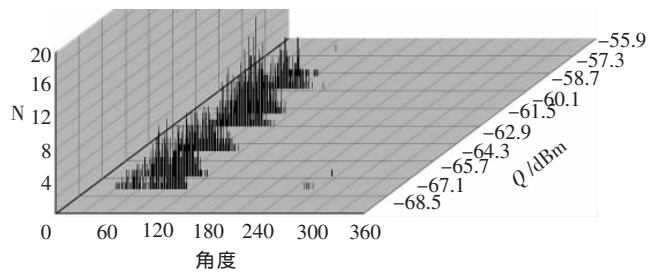


图8 接地体金属尖刺缺陷模型的 *n-q-φ* 谱图

如图 8 所示,局部放电主要集中在电源电压的正峰值处,其信号幅值较高;而负峰值处的放电重复率较低,且信号幅值要小的多。

随着电压的继续升高,负峰处并没有出现较强的放电信号,这与高压母线上的尖刺缺陷有着明显的区别。

该模型产生的局部放电能量分布与高压母线上的尖刺产生的局部放电能量分布相似,也主要分布在 400~550 MHz,见图 9 中 A 线。

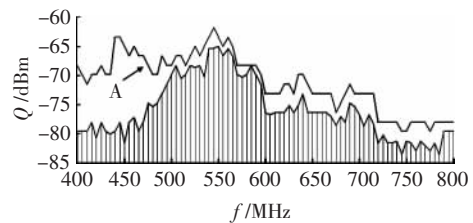


图9 接地体金属尖刺缺陷模型的能量分布图

这也可以说明高压母线或接地体上的尖刺缺陷所产生的局部放电能量主要集中在 400~550 MHz 之间,而在高频段分布较少。

### 3.3 悬浮电位缺陷模型

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耦合出一个电容,当该等效电容两端的电压超过其耐受电压时,高压母线与悬浮铝片之间的间隙就被击穿,发生局部放电,属于容性放电。

该缺陷模型一旦发生放电,信号幅值就较高,信号波形的李萨如图见图 10。

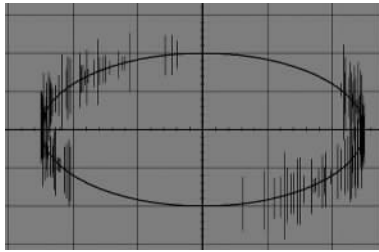


图 10 悬浮电位缺陷模型的李萨如图

如图 10 所示,局部放电主要集中在电源电压的过零点处,并随着电压的升高,电源上升沿处也出现了较强的放电。

随着电压继续升高,一个工频周期内会连续发生多次放电,见图 11。

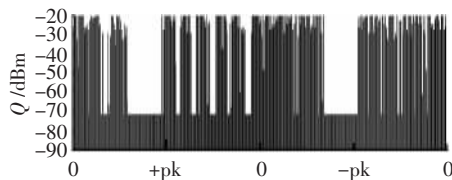


图 11 悬浮电位缺陷模型的 PRPD 谱图

在一个工频周期内,等效电容两端的电压一旦达到其耐受电压,局部放电便随即发生;当等效电容两端电压低于其耐受电压时,放电停止。但由于外施电压还在上升,等效电容又充电至发生第二次局部放电。这样,局部放电将在一个工频周期内多次重复出现。

#### 3.4 盆式绝缘子表面污秽缺陷模型

该缺陷模型一旦发生放电,放电重复率不是很大,但信号幅值较高,放电相位集中在  $0^\circ$  左右,见图 12。

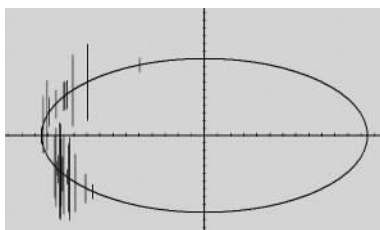


图 12 绝缘子污秽缺陷模型的李萨如图

该缺陷模型所产生的局部放电能量分布见图 13。如图 13 所示,在整个  $400\sim 800$  MHz 频段范围内均有较强的能量分布,且远大于背景信号(图中阴影部分为背景信号能量分布),如图中 A 线所示。而尖刺缺陷所产生的局部放电信号能量主要集中在  $400\sim 550$  MHz,两种类型的信号之间存在明显的区别。

#### 3.5 系统灵敏度

试验时,每更换一种缺陷模型,就使用基于脉冲

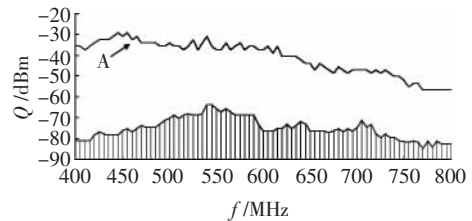


图 13 绝缘子污秽缺陷模型的能量分布图

电流法的局部放电测量仪器对测量系统进行标定。

标定结果表明,笔者使用的超高频局部放电电容测量系统能检测到视在放电量为  $5\text{ pC}$  的放电信号,甚至在高压母线尖刺缺陷和接地体尖刺缺陷试验中,其灵敏度可达  $2\sim 3\text{ pC}$ 。但由于超高频窄带信号水平与局部放电严重程度之间的联系还受很多不确定因素的影响,如传感器的性能、GIS 腔体对超高频信号的折反射等,目前使用超高频检测结果对设备的局部放电水平进行定量评估还需要更深入的研究。

## 4 结论

(1) 试验结果表明,文中使用的超高频测量窄带检测系统抗干扰能力强,灵敏度高,能准确测量 GIS 中的局部放电信号并反映其超高频信号特征;

(2) 笔者设计的 4 种 GIS 典型缺陷模型特征明显,可用于 GIS 局部放电试验;

(3) 高压 SF<sub>6</sub> 气体环境下,高压母线上的尖刺起始放电时,正峰值附近的放电重复率高,随着电压的升高负峰处也出现较强的放电,两处放电呈现明显的不对称性,这一特征与空气条件下尖刺放电有着明显的区别;

(4) 积累了 4 种典型缺陷的试验数据、信号特征、能量分布特征等,为以后 GIS 局部放电模式识别提供了数据依据。

## 参考文献:

- [1] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3 (2): 213-228.
- [2] 袁 鹏, 李清泉, 王国利, 等. 应用混频技术提取超高频 PD 信号及其仿真[J]. 高电压技术, 28(10): 26-27.
- [3] 李 信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究[J]. 华北电力大学学报, 2005(6): 41, 42.
- [4] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS 局部放电缺陷诊断试验研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92;
- [5] 张晓星, 唐 炬, 孙才新, 等. 一种基于线性鉴别分析的 GIS 局部放电模式识别 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2006, 10(29): 1-4.
- [6] 蒋建玲. 用超高频法研究 GIS 中局部放电的特征[J]. 华北电力大学学报, 2003(1): 34-38.