

# 1 000 kV GIS 超声波在线检测系统设计与应用研究

汤会增

( 国网河南省电力公司检修公司 ,河南 郑州 450007)

**摘要:** 提出了 1 000 kV GIS 超声波局部放电在线检测系统整体设计方案 ,并对系统的硬件和上位机界面进行设计。信息采集处理单元以 TMS320 单片机为控制核心 ,基于 AD620 的前置放大单元具有较高检测精度。运用 1 000 kV GIS 超声波检测系统对 4 种绝缘缺陷进行模拟试验 ,得出超声波检测法的特点。该系统成功发现某 1 000 kV GIS 盆式绝缘子故障 ,工程实际应用效果良好。

**关键词:** 超声波; TMS320; GIS 局部放电; 前置放大器

**Abstract:** An overall design scheme of on-line detection system for ultrasonic partial discharge in 1 000 kV gas insulated switchgear (GIS) is presented ,and the hardware part and software part of detection system are designed. Information acquisition and processing unit takes TMS320 single-chip microcomputer as control core ,and the preamplifier unit based on AD620 has a higher precision. Through the simulation tests of four conventional insulation defects by ultrasonic detection system in 1 000 kV GIS ,the characteristics of ultrasonic detection system are summarized. The proposed system has successfully found a basin-type insulator damage in 1 000 kV GIS ,which has a good engineering practical application effect.

**Key words:** ultrasonic; TMS320; GIS partial discharge; preamplifier

中图分类号: TM595 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0024-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.006

## 0 引言

气体绝缘组合电器 (gas insulated switchgear ,GIS) 是将断路器、隔离开关、接地开关、母线等多种设备全部封闭在充满 SF<sub>6</sub> 气体 (作为绝缘和灭弧介质) 金属外壳中的组合式开关电器<sup>[1]</sup> ,1 000 kV GIS 是特高压输变电工程中的关键设备 ,一旦出现故障 ,将可能造成电网重大事故发生<sup>[2]</sup>。绝缘降低是 GIS 设备故障的主要原因 ,对 GIS 进行在线局部放电 (partial discharge ,PD) 检测可有效掌握 GIS 内部绝缘状况 ,预防 GIS 故障跳闸造成电网事故。GIS 发生局部放电时会产生包括纵波、横波和表面波的声波向四周传播 ,超声波检测法 ,即用超声探头检测局部放电处的超声、振动信号 ,是目前监测 GIS 设备局部放电的有效方法之一<sup>[3]</sup>。

## 1 检测系统设计

### 1.1 检测原理及结构

超声波测量法原理如图 1 所示 ,超声波传感器安装在 GIS 外壳上 ,不会对 GIS 运行和操作产生任何影响 ,其通常测量 20 ~ 100 kHz 频率范围 ,可以剔除外界的干扰信号 ,获得较好的信噪比 ,抗电磁干扰性能好 ,原理简单 ,可以实现放电类别识别和定位 ,易于实现在线监测。

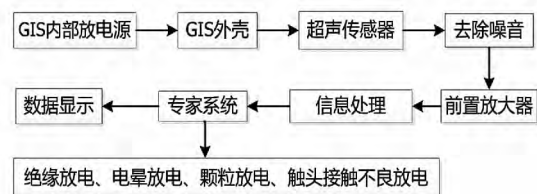


图 1 超声波在线检测系统原理框图

在 1 000 kV GIS 外壳或盆式绝缘子上装设超声波探头 ,超声探头实时采集 GIS 放电信号并将这些信号用光纤传输到光中继站 ,转化为电信号后经过放大、处理和存储后 ,有上位机软件进行分析处理 ,并提供显示、打印及远传。系统结构框图如图 2 所示。

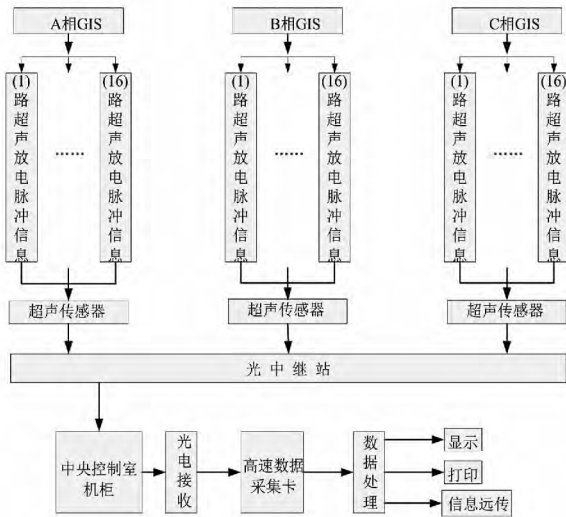


图2 局部放电在线监测系统结构框图

### 1.2 定位方法

GIS局部放电伴随相应的超声脉冲,超声传感器接收同一放电声波的时间因在GIS上的安装位置不同而有所差异,可利用PD产生的声电信号时间差对PD进行空间定位。超声传感器与放电源距离S的关系为 $S = t_n \times C$ 。式中: $t_n$ 为放电点产生的超声波信号到达n号传感器的时间; $C$ 为横波在壳体中的传输速率。通过对某相同信号的时间差、幅值进行同步记录,求出距多个传感器的距离 $S_1, S_2, \dots, S_n$ ,通过对以上所求距离的组合分析来确定PD的坐标。

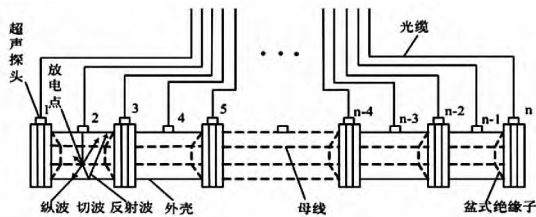


图3 超声波探头的实际安装位置图

## 2 硬件系统

检测系统主要组成部分是超声波传感器、光中继站、前置功率放大器、多通道数据采集系统和上位机软件等。主要技术参数如下:超声探头为低频谐振式 NU40A18TR 传感器;通道数:48个,用于监测GIS内部的放电;运用模式:66路采用并行模式;超声脉冲特性:5 μs;超声频率:30~220 kHz;相位外同步:50 Hz;使用电源:AC 220 V 500 W;光缆与电源线的安装:光缆是用ST头与传感器对接的;电源

线是用二通道的Φ3.5插头对接的。

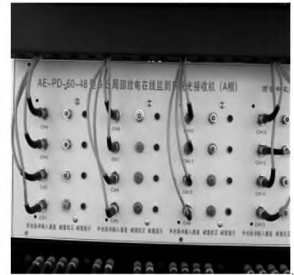


图4 GIS现场的超声波探头 图5 现场小室光接收机

高灵敏度传感器对局部放电检测效果影响较大,系统采用压电陶瓷为材料的 NU40A18TR 外置式传感器,在局部放电产生的机械应力作用下利用压电陶瓷的正压电效应产生交变电场,声传感器将其转换为电信号,其输出电压 $V(t, x) = U(x, t) \times T(t)$ , $U(x, t)$ 为表面位移波, $T(t)$ 为响应函数。利用此超声波传感器来接收GIS表面产生的机械振动,其灵敏度大于-80 dB,频带在17~220 kHz之间,谐振频率40 kHz,外观如图4所示。超声波传感器接收到的采样信号通过前端信号调理电路的处理后再经过射频耦合器隔离和高速A/D转换器将模拟信号数字化;最后再由DSP(digital signal processor)将转换过来的数字信号读取并存入RAM中。

由于超声波传播过程中衰减较快,因此需要选用增益较大的前置放大单元。如图6所示,前置放大电路采用增益可调的前置放大器AD620,其输入端连接2个0.1 μF耦合电容与100 kΩ的接地电阻 $R_1, R_2$ 构成高通滤波器滤除低频噪声干扰,管脚4、管脚7与电源相连接,管脚5与地相接,管脚1、管脚8与电阻 $R_g$ 进行连接, $R_g$ 为增益可以调节的电阻。由图7可知,在保证信号不失真情况下获得最大增益 $R_g$ 取210 Ω满足频率40 kHz左右信号检测要求,由此可得增益G为

$$G = R'_g / R_g + 1 \approx 230$$

式中 $R'_g$ 为AD620的增益电阻,取值49.9 kΩ。

CPLD(complex programable logic device)采用Altera公司EPM7128S(PLCC84)芯片,DSP采用TI公司的DSP TMS320C6713。基于DSP和CPLD的多通道分布式高速数据采集系统能够实现同时采集现场多个超声波传感器检测到的数据。在逻辑控制模块CPLD的作用下,DSP控制信号能够产生同步采样信号,来控制不同信号的采集,以及模数转换模块进行采样和A/D转换。各模数采集卡中的数据由

DSP 读取并存储在 RAM 中,去除噪声干扰和取样分析工作也在 DSP 中完成,最后将处理后数据通过网络接口传送至上位机。

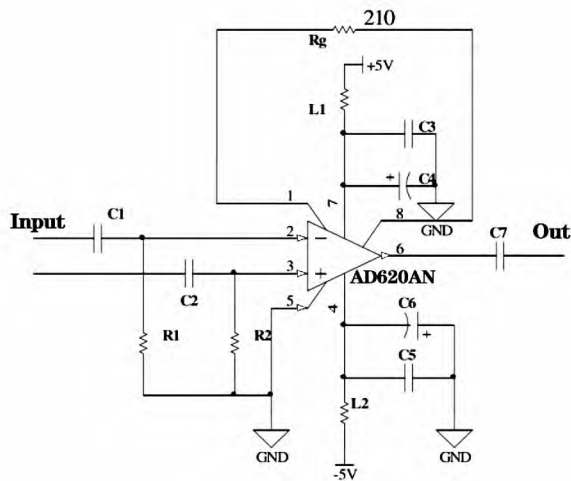


图 6 前置放大电路图

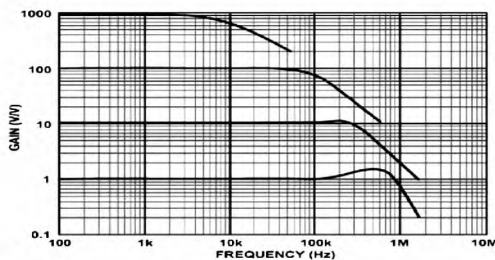


图 7 AD620 的频率与增益对应图

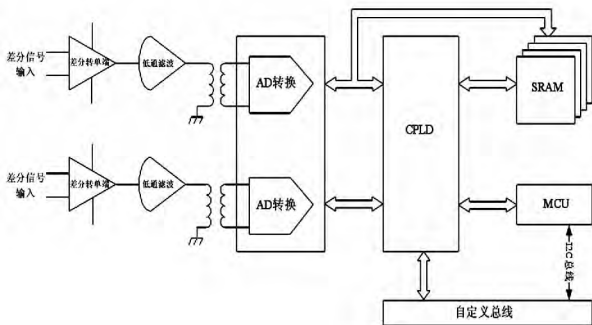


图 8 采样板系统框图

### 3 客户端软件设计

客户端软件采用专家系统进行数据分析处理,综合运用数字滤波、动态阈值等抗干扰方法,来消除或抑制噪音干扰,能够实现同时对多路超声波信号的同步采集、传输、滤波、分析、报警、放电类型识别、放电位置定位、放电趋势分析、二维( $Q-\Phi$ ,  $N-\Phi$ ,  $N-Q$ )和三维( $N-Q-\Phi$ )图表显示打印等功能。

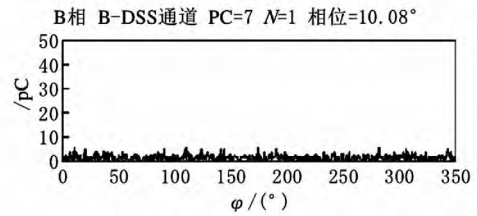


图 9 局部放电电测系统软件显示二维界面

### 4 常见局部放电类型模拟试验

利用上述设计的超声波在线检测系统对 GIS 模型进行检测,根据图 10 所示组建测试系统电路,实际测试系统模型如图 11 所示。其中变压器采用工频试验变压器 200B4M-380 V/1 000 kV;限流滤波阻抗为工频试验保护电阻(GR 1 000-1/6);超声波传感器为 NU40A18TR 低频谐振式传感器。

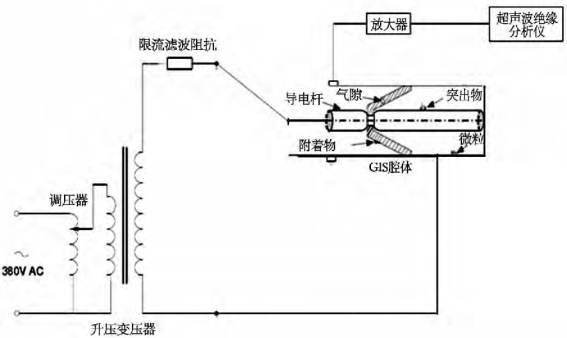


图 10 GIS 超声波局部放电测试系统电路图

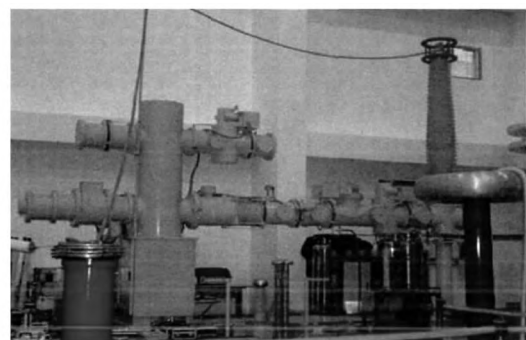


图 11 GIS 超声波局部放电测试系统模型图

在 GIS 模型内部分别设置 4 种绝缘缺陷:导电杆上系一根长约为 12 mm 的铜丝模拟突出物缺陷,绝缘子表面沾上直径 0.2 mm 铜丝模拟附着物缺陷,环氧树脂绝缘棒中设置一个长约 15 mm、直径为 10 mm 孔洞后再将表面封好来模拟绝缘子气隙缺陷,用数个约  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  和  $2 \times 3 \text{ mm}^2$  的矩形薄铝片模拟微粒缺陷。试验过程中缓慢升高试验电压,仔细观察示波器中的信号及波形,超声波局放测试装置检测出如图 12 所示的放电灰度图。

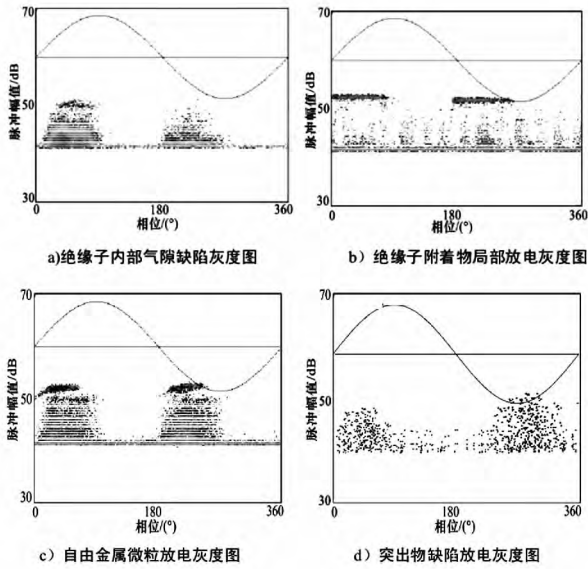


图 12 GIS 4 种缺陷下的局部放电示意图

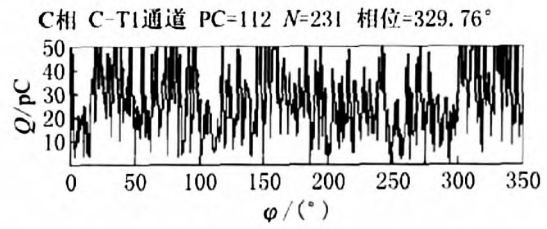
图 12 中 a) 绝缘子气隙缺陷在相位的正半周上和负半周都有放电现象,正半周较负半周的局部放电点总数多、相对脉冲幅值大。图 b) 绝缘子附着污染物缺陷局部放电产生的灰度图比较分散,电压较低时放电不明显,局部放电次数在相位上的分布范围较宽,放电特点并不明显。图 c) 自由金属微粒的局部放电灰度图相对较为集中,放电次数也更为集中,正半周与负半周均有放电现象,正半周的放电点与负半周基本均衡,负半周上放电幅值比绝缘子内部气泡缺陷幅值大一点。局部放电集中在  $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$  和  $180^{\circ} \sim 260^{\circ}$  之间,表现为周期性的波动,具有良好的对称性。图 d) 金属突出物缺陷灰度图中,可以看出在工频正半周和负半周也都存在放电现象,在  $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$  放电量较少一些,但到  $240^{\circ} \sim 360^{\circ}$  时放电现象开始明显,而且放电幅值也变大了。

通过实验测试可知,超声波传感器与 GIS 之间无任何电气联系,不受电气干扰,通过时间间隔可以定位 PD。通过增大传感器增益和采用带通滤波器来减小外界不同频率特性振动因素的影响,在故障类型检测中对金属尖端、自由颗粒、悬浮电等缺陷具有较高灵敏性。

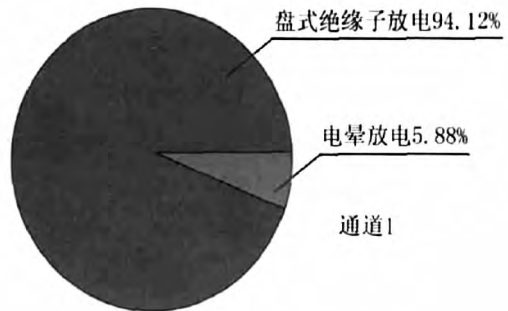
### 5 一起局部放电实例分析

2013 年 03 月 12 日 12:30 某特高压变电站 1 号主变压器 1000 kV 侧 GIS 组合电器 C 相隔接组合气室与母线气室间盆式绝缘子闪络放电,1 号主变压器

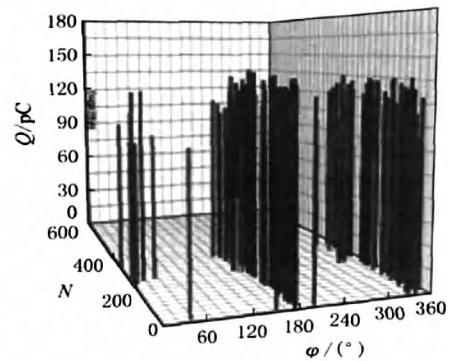
三侧开关跳闸后失电,造成华中地区部分电号,如图 13(a) 中 C 相 C-T1 通道放电量达到 112 pC,网波动。12:24 超声波在线检测系统发出告警脉冲个



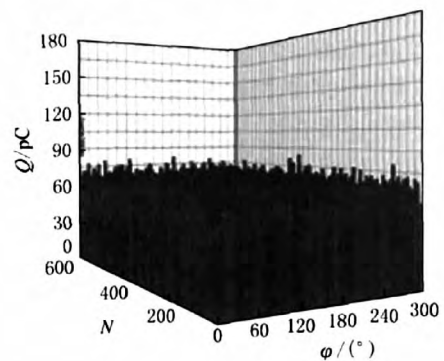
(a) 二维图 Q- $\phi$



(b) 放电类型分析图



(c) 放电三维图 N-Q- $\phi$



(d) 现场干扰三维图

图 13 超声波信号现场分析图

数 231 C - T1 通道即为安装在 C 相间隔组合气室与母线气室间盆式绝缘子的超声波探头,图 13( b) 显示放电类型为盆式绝缘子放电。由于故障电流较大,1 号主变压器保护动作,GIS 设备停电,放电现象消失,所以只能对放电初期信号进行采集。

将故障间隔 GIS 转检修后解体检查,发现绝缘子内部出现长且深的裂纹,与超声波检测系统检测结果一致。

## 6 结 论

所设计的基于 TMS320 单片机的 1 000 kV GIS 超声波在线检测系统,采用空间时间差的方法进行局部放电故障定位,采用灵敏度高的超声波传感器和基于 AD620 的前置放大电路图,通过带通滤波器排除外界振动干扰,能够有效检测金属尖端、自由颗粒、悬浮电、盆式绝缘子故障等绝缘缺陷,但此检测法现场要在 GIS 外壳和盆式绝缘子上安装多个传感器。

### 参考文献

[1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

(上接第 14 页)

### 参考文献

[1] 张瑞明, 张新燕. 基于普通异步发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2011( 1): 175 - 179.

[2] 闫存富, 孔令云, 路素青. 小型风力发电机常见故障分析[J]. 电源技术, 2014( 12): 2451 - 2452.

[3] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25( 12): 27 - 32.

[4] 范高峰, 赵海翔, 王伟胜, 等. 基于恒速风电机组的风电场并网过程仿真[J]. 电网技术, 2007, 31( 14): 20 - 23.

[5] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学第二版[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

[6] DlgSILENT Gmb H. Dynamic Modelling of Doubly - fed Induction Machine Wind Generators [R]. Technical RePort , Aug 2003.

[7] 李钢, 慈建斌, 李洪星, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的风

出版社, 1994.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[3] 周广, 刘勇, 金正波, 等. 1 000 kV HGIS 在线特高频技术在局放监测的应用[J]. 华中电力, 2011, 24( 5): 57 - 62.

[4] Lundgaard, L. E., G. Tangen, B. Skyberg, et al. Acoustic Diagnosis of GIS; Field Experience and Development of Expert System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2013, 28( 1): 287 - 293.

[5] 罗勇芬, 孟凡凤, 李彦明. 局部放电超声波信号的检测及预处理[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40( 8): 964 - 968.

[6] Hasegawa y, Izumi K, Kobayshi A, et al. Investigation on Phenomena Caused by Insulation Abnormalities in Actual GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9( 2): 796 - 804.

作者简介:

汤会增(1982), 硕士研究生、工程师, 从事电力设备在线检测技术研究和超特高压变电运维管理工作。

(收稿日期: 2015 - 11 - 19)

光互补并网发电系统建模与仿真[J]. 电源技术, 2014( 10): 1893 - 1897.

[8] 院海, 晁勤, 吐尔逊. 基于 PSCAD 的并网型风机建模及仿真[J]. 可再生能源, 2008, 26( 2): 15 - 18.

[9] Trudnowski D J, Gentile A, Khan J M, et al. Fixed Speed Wind Generator and Wind Park Modeling for Transient Stability Studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19( 4): 1911 - 1917.

[10] 魏巍, 王渝红, 李兴源, 等. 大型风电场建模及接入甘肃嘉酒电网仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33( 18): 96 - 101.

[11] 韩肖清, 胡月星, 张伟, 等. 基于 MATLAB 的并网风电场动态仿真[J]. 太阳能学报, 2008( 2): 175 - 179.

作者简介:

赛尔山伙加·居曼(1989), 硕士, 主要研究风发电及并网技术;

张新燕(1964), 博士研究生、教授、硕士生导师, 主要从事风力发电技术、风机并网故障分析、故障诊断等方面的研究工作。

(收稿日期: 2015 - 11 - 12)