

## 高压开关柜局部放电声-电联合定位方法研究

霍 天, 吴振升, 桂俊峰

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 高压开关柜发生局部放电预示存在绝缘缺陷, 本文对开关柜局部放电的定位方法进行了研究。在实验室搭建了电晕放电模型, 使用超声波传感器采集由放电引起的超声波信号、高频电流传感器(HFCT)采集局部放电经过耦合电容产生的高频电流。根据超声波相对高频电流的延迟时间进行定位, 放电信号数据由示波器与PC端通信, 通过USB方式传输到上位机, 采用LabVIEW程序对其进行滤波处理、波形分离分析得到放电点的精确位置, 试验表明该方法具有较高的精确度。

**关键词:** 开关柜; 局部放电定位; 超声波; HFCT; 示波器; 非线性规划算法

**中图分类号:** TM855

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)03-0062-05

### 0 引言

变电所开关柜由于绝缘缺陷会发生局部区域的放电, 经过一定阶段缺陷处就会由短间隙局部放电发展到长间隙击穿, 影响到一次设备的绝缘<sup>[1]</sup>。当发生局部放电时, 不同设备中空气或间隙的放电都可视为典型电晕放电, 电晕放电是电力系统中最常见的一种放电类型<sup>[2]</sup>。放电常伴随超声波、电磁波、脉冲电流等现象, 对这些现象进行采集捕捉能比较清晰地观察放电的信息, 目前采用超声波、暂态地电压(TEV)、高频电流传感器(HFCT)等检测方法最为广泛<sup>[3,4]</sup>。

国内外很多文献与研究工作多以TEV的方法对开关柜进行检测, 但目前TEV只停留在检测与数据发掘研究范围, 对通过空气传播电磁波信号的规律研究不成熟<sup>[5]</sup>。HFCT检测主要是耦合接地线中的电磁波形成高频电流, 不需考虑空气传播规律, 所以本文采用超声波与HFCT相结合的方法, 以声-电联合进行定位。

HFCT采集的是高频电流信号, 由局部放电产生的电磁波引起, 而电磁波传播速度远大于声速, 因此将HFCT信号作为定位的基准触发信号。超声波传感器抗干扰能力强, 传播速度以声速传播, 因此采用声-电联合方法能精确检测到延迟间隔, 实现准确定位。

### 1 局部放电检测技术

#### 1.1 超声波法检测

当开关柜发生局部放电时, 内部的空气分子发生剧烈碰撞, 空气分子由于碰撞发出频率大于20

kHz的超声波<sup>[6]</sup>, 超声波信号在空气中以等值波速传播, 通过40kHz中心频率的超声波传感器就可以检测出放电信号。超声波传感器为压电陶瓷式传感器, 当传感器接收到超声波信号时, 压片受力上下极板分别集聚正负电荷, 此时传感器等效为带电荷的电容器, 通过电荷放电可以检测出超声信号波形<sup>[7]</sup>。

#### 1.2 HFCT法检测

为了满足绝缘的要求, 开关柜一般采用有效接地的连接方式。当发生局部放电时, 由放电引起的高频电流通过杂散电容效应流入到接地线缆中, 高频电流传感器固定在接地线上, 通过电磁耦合把高频电流产生的电磁波传输到HFCT中<sup>[8]</sup>。HFCT采用类似罗科夫斯基线圈的结构(如图1所示), 选用高磁导率材料作为HFCT的磁芯, 传感器带宽达600kHz~150MHz, 在磁芯上按一定方向缠绕N匝线圈, 通过长距离同轴电缆连接到积分电阻<sup>[9]</sup>。测量时, 使待测电流穿过HFCT的中心, 在积分电阻上即可测得与待测电流成正比的放电电压。

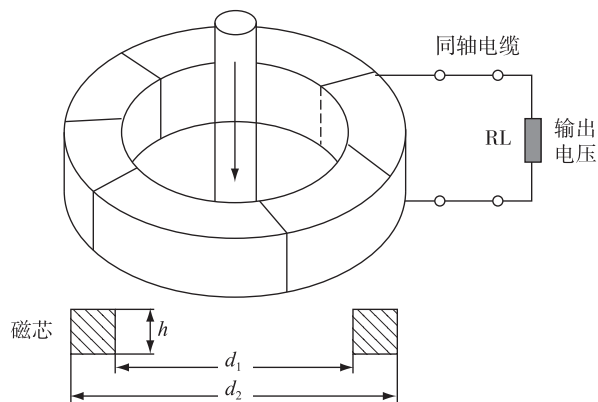


图1 HFCT原理

Fig.1 HFCT schematic diagram

收稿日期:2016-12-25;修回日期:2017-02-23

## 2 上位机与示波器的通信

在局部放电检测领域,大多数检测设备对传感器的适用性单一化,信号波形畸变较大,采集信号不真实,为了避免这些缺点,采集设备采用高精度的示波器。然而示波器处理分析数据能力有限,需要把数据导入计算机进行进一步分析。因此示波器与计算机通信显得尤为重要。本文通过虚拟仪器进行远程通信控制,实时采集放电信号,实现了人机交互<sup>[10]</sup>。

虚拟仪器数据采集系统与下位机设备通信方式有3种方式:(1)采用NI-DAQmx的方式与外围设备通信;(2)采用NI虚拟仪器驱动程序的方式与外围设备通信;(3)采用直接I/O的方式与外围设备通信<sup>[11]</sup>。

下位机示波器采用TDS2024B示波器,四通道输入,彩屏显示,带宽200 MHz,采样率2.0 GS/s,该示波器为开放式系统,能实现通信与底层开发功能。TDS2024B属于第三方公司开发的设备仪器,较采用虚拟仪器驱动程序的方式与示波器进行串口通信。示波器与上位机串口通信参数设置如下。

(1)波特率:波特率作为信道数据传输速度,设置成与示波器的传输速度一致,即9600 bit/s;

(2)数据位:示波器传输的数据为扩展的ASCII码,表示范围为0~255(8位),所以数据位设置为8;

(3)奇偶校验位:奇偶校验位对传输的数据进行检错,有以下4种方式:奇、偶、高、低。一般可以不设置奇偶校验位,故奇偶校验位为none;

(4)停止位:停止位为数据包中奇偶校验位的后一位,示波器传输数据的停止位为1;

(5)流控制:示波器默认为硬件流控制,通过传输电缆上的电压信号控制信号的传输,需要将串口设置成请求发送(RTS)/清除发送(CTS)。

根据示波器串口通信特点,在虚拟仪器中写入通信指令,实现上位机的通信。

## 3 定位算法原理

根据局部放电超声波理论,局部放电产生的超声波在空气中以球面波的形式传播,当传播到开关柜金属外壳时会发生折射与反射。超声波在气体中衰减系数为0.98 dB/m,而在金属固体中的衰减系数达到10 dB/m,固体中的衰减系数远大于气体中的衰减系数。通过金属固体折反射得到的超声波信号非常微弱,这些微弱的超声信号叠加到采集

信号中会使超声波的脉冲得到展宽,因此超声波传感器检测到的信号主要包含直接接收的超声波信号,同时以超声波脉冲起始时间作为延迟时间的计算点可有效减小由于折反射带来的干扰<sup>[12,13]</sup>。

试验中假设开关柜内超声波传播介质为均匀空气介质,超声波在空气中的传播速度为340 m/s,传播速度为等值波速,忽略空气中传播的衰减。

对开关柜内部局部放电点进行定位时,开关柜可以简化为一个固定大小的模型,即放电点位置存在约束条件,根据约束条件求解放电点位置的最优解,本文采用非线性规划算法<sup>[14]</sup>。

通常一个实际问题的非线性规划模型可以描述成式(1)这种形式:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ h_j(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, n \\ x_k^l \leq x_k \leq x_k^h & k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f(x)$ 为目标函数,要求目标函数能达到最优; $g_i(x)$ 为不等式约束条件; $h_j(x)$ 为等式约束条件;变量 $x_k$ 存在上下取值极限 $[x_k^l, x_k^h]$ 。目标函数的最优解就是求得满足约束条件时目标函数的极小值。

为了运用非线性规划算法求解局部放电的位置,开关柜柜体可以简化成长方体模型,超声波传感器与局部放电点位置的模型如图2所示。

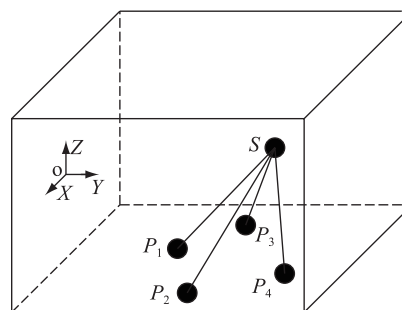


图2 传感器与放电点模型

Fig.2 Sensor and discharge point model

局部放电点 $S(x, y, z)$ 为待求解的位置,超声波传感器 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ )为已知坐标的位置,通过改进非线性规划算法,以放电点与超声波传感器的实际距离减去由延迟计算出来的距离作为目标函数,放电点位置在整个正方体内作为约束条件,具体改进算法如下:

$$d(x, y, z) = \left| \sum_{i=1}^n (l_i - l'_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^n \left\{ [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{\frac{1}{2}} - v\tau_i \right\} \right| \quad (2)$$

$$l'_i = v\tau_i \quad (3)$$

式中:  $i=1,2,3,4$ ; 目标函数  $d(x,y,z)$  为每个传感器与放电点之间实际距离  $l_i$  减去由信号延迟计算出来的计算距离  $l'_i$  累加和的绝对值的最小值;  $v$  为超声波信号在空气中的传输速度, 以等值声速 340 m/s 计算;  $\tau_i$  为超声信号延迟时间。

改进的非线性规划算法的约束条件可以描述成放电点位置一直在开关柜模型中, 即放电点坐标满足开关柜边界的约束条件。

$$\begin{cases} \min d(x,y,z) \\ 0 \leq x \leq x_{\max} \\ 0 \leq y \leq y_{\max} \\ 0 \leq z \leq z_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

#### 4 试验测试与验证

开关柜局部放电产生的原因是生产的绝缘装置存在缺陷或者在运行过程中绝缘发生老化等, 导致耐压强度有所下降, 为了模拟局部放电的产生, 实验室条件下搭建了电晕放电测试平台<sup>[15,16]</sup>。实验测试平台的模型如图 3 所示, 检测时 HFCT 传感器安装在接地线上, 超声波传感器通过移动采集不同位置的超声波信号, 信号通过示波器与上位机通信进行处理分析, 进而提取超声波的延迟时间。

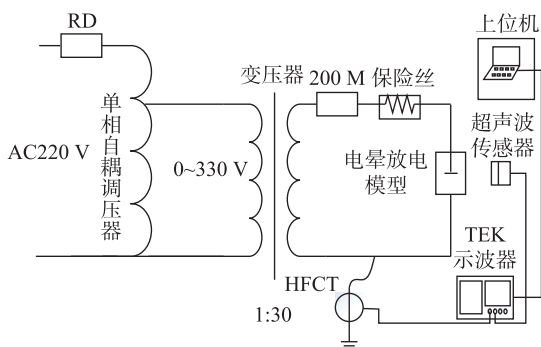


图3 实验测试系统的模型

Fig.3 Model diagram of experimental test system

局部放电定位以 HFCT 采集的电信号作为基准信号, 以超声波传感器采集的超声波信号作为延迟信号。通过空气传播得到的超声波信号非常微弱, 且存在噪声干扰, 原始信号中很难分辨出超声信号的脉冲特征, 难以找到准确的时延。本文通过 LabVIEW 编程实现数字滤波与小波降噪, 对原始信号进行处理分析, 信号处理流程如图 4 所示。

LabVIEW 软件控制示波器连续采集的信号为两路信号, 由于对两路信号处理方法的不同, 此时上位机采用信号分离的方法, 对二维数组采用“索引数组”函数分离成两个一维数组, 分别对这两个

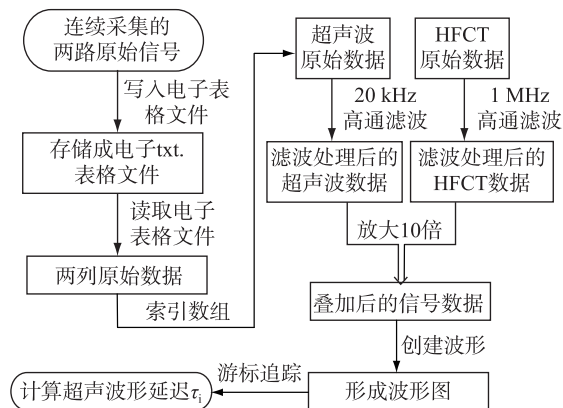


图4 信号处理流程

Fig.4 Signal processing flow chart

一维数组处理分析<sup>[17]</sup>。

超声波信号为频率高于 20 kHz 的信号, 采用高通滤波器抑制低频干扰信号, 截止频率为 20 kHz。同时大量实测数据对比超声波传感器与 HFCT 的灵敏度, 两种波形幅值相差 5~10 倍, 为了使延迟时间计算更精确, 设置放大器放大倍数为 10, 原始超声信号与处理过的信号如图 5 和图 6 所示。

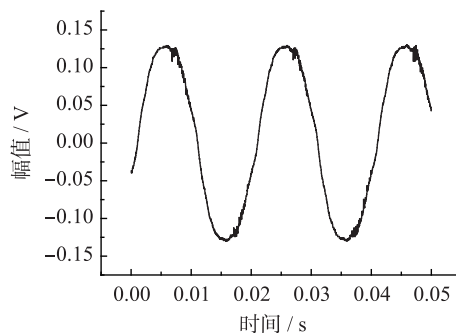


图5 超声波采集的原始波形

Fig.5 Original waveform acquired by ultrasonic sensor

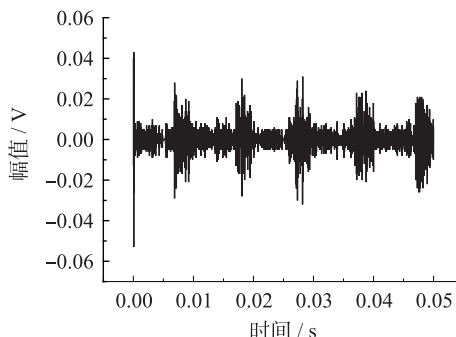


图6 滤波后的超声波波形

Fig.6 Filtered ultrasonic waveform

同样为了滤除 HFCT 信号中掺杂的低频干扰, 得到更清晰的高频电流信号, 根据 HFCT 的频率特性, 采用截止频率 1 MHz 的高通滤波器进行处理, 滤波前和滤波后的波形如图 7 和图 8 所示。

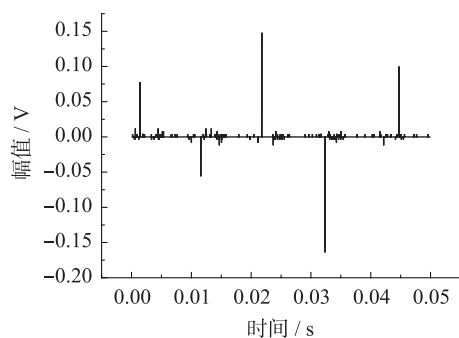


图7 HFCT采集的原始波形  
Fig.7 Original waveform acquired by HFCT

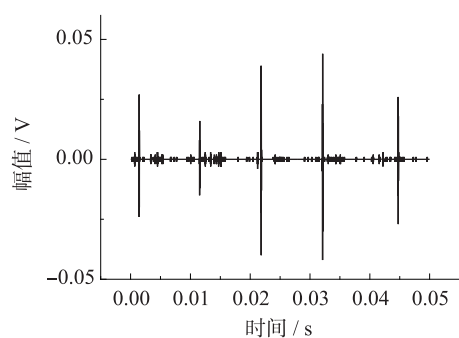


图8 滤波后的高频CT波形  
Fig.8 Filtered HFCT waveform

对处理过的两路信号进行叠加,叠加后的波形如图9所示。为了准确计算延迟时间,对两路信号 $x$ 轴游标追踪,把高频电流传感器采集到的放电信号脉冲时间节点作为0时刻,超声信号脉冲的起始点时刻作为延迟的计算点,通过改变超声波传感器的位置 $P_i$ ,计算出4个不同测量点处的时差 $\tau_i$ ,图5—9为在位置 $P_1$ 处采集的信号,4个不同位置处超声波传感器坐标和计算的时间延迟见表1。

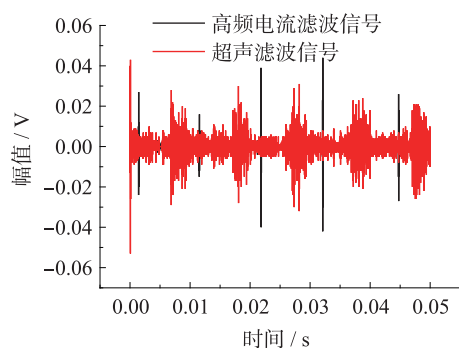


图9 处理后的超声和HFCT波形叠加  
Fig.9 Superposition of processed ultrasonic waveforms and HFCT waveforms

根据上述条件,把已知点坐标和从上位机 LabVIEW 中计算得到延迟时间带入到非线性规划算法中,通过 MATLAB 中 fmincon 函数即可求解出放电点的坐标位置 $S(0.5110, 0.3785, 0.2360)$ ,实际放电点坐标 $S(0.5, 0.4, 0.2)$ ,由此可求出计算偏差为

表1 超声波传感器位置与延迟时间  
Table 1 Ultrasonic sensor position and delay time

超声传感器 $P_i$	位置 ( $x, y, z$ )/m	信号延时 $\tau_i$ /ms
$P_1$	(0.2, 0.2, 0)	1.54
$P_2$	(0.4, 0.1, 0)	1.25
$P_3$	(0.6, 0.5, 0)	0.66
$P_4$	(0.8, 0.3, 0)	0.88

0.043 4 m,计算精度较高,因此本文对后期研究提供了一定的理论与方法。

## 5 结语

本文在电信号和非电信号检测定位的理论基础之上,介绍了基于示波器通信的联合定位的方法。首先运用示波器 NI-VISA 通信协议,编写连续采集多路信号的程序,对 HFCT 和超声波信号同步采集,并进行分离、滤波、处理分析,精确计算出延迟时间。运用非线性规划算法对放电模型进行计算,得出放电点的坐标位置。同时在实验室搭建了电晕放电的最小定位系统,根据实验测试结果,测试误差在 5 cm 之内,对以后应用于实际工程之中提供了理论与实践依据。

## 参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.  
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2583-2601.
- [2] 刘嘉林,董明,安珊,等. 电力变压器局部放电带电检测及定位技术综述[J]. 绝缘材料,2015,48(8):1-7.  
LIU Jialin, DONG Ming, AN Shan, et al. Review of partial discharge live detection and location technology for power transformer [J]. Insulating Materials, 2015, 48(8):1-7.
- [3] 杨景刚,贾勇勇,赵科,等. GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2):10-14.  
YANG Jinggang, JIA Yoneyone, ZHAO Ke, et al. Analysis of partial discharge ultrasonic wave characteristic of typical defects in GIS [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2):10-14.
- [4] 王流火,吕鸿,王增彬,等. 开关柜局部放电检测定位技术的应用研究[J]. 广东电力, 2014, 27(4):91-94.  
WANG Lihuo, LYU Hong, WANG Zengbin, et al. Study on application of partial discharge detecting and positioning technology for switch cabinet [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(4):91-94.
- [5] 甘强,吉亚民,陈轩. 一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3):10-12.

- GAN Qiane, JI Yamin, CHEN Xuan. Analysis of abnormal result of partial discharge test in a 220 kV transformer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(3):10-12.
- [6] 程述一. 基于超高频和超声阵列信号的变压器局放定位方法研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11):70-73, 93.
- CHENG Shuyi. Location method for transformer partial discharge based on UHF and ultrasonic array signals [J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11):70-73, 93.
- [7] 黄诗敏. 10 kV 开关柜局部放电带电检测技术应用与仿真分析研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- HUANG Shimin. Research on application and simulation analysis of 10 kV switchgear partial discharge live detecting technique[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 张磊祺, 盛博杰, 姜伟, 等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测和定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2706-2715.
- ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, et al. On-line partial discharge localization in Cross-bonded HV cable systems [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2706-2715.
- [9] 赵学风, 孙振权, 姚秀, 等. 冲击电压下局部放电测量用高频电流传感器[J]. 高电压技术, 2009, 35(11):2704-2708.
- ZHAO Xuefeng, SUN Zhenquan, YAO Xiu, et al. High-frequency current transducer for measurement of PD under impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11):2704-2708.
- [10] 罗军, 袁扬, 廖俊必. 基于LabVIEW的泰克示波器与计算机的通信[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(2):503-506.
- LUO Jun, YUAN Yang, LIAO Junbi. Communications between TEK oscilloscopes and computer based on LabVIEW[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(2):503-506.
- [11] 魏义虎, 陈雷. 基于LabVIEW-VISA方式的串口通信研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(24):129-131.
- WEI Yihu, CHEN Lei. Serial port communication based on LabVIEW-VISA[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(24):129-131.
- [12] 韩奇. 电力变压器局部放电超声波定位方法的仿真研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2015.
- HAN Qi. Simulation on ultrasonic-based method to detect partial discharge in power transformer[D]. Shenyang: University of Technology, 2015.
- [13] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2003.
- LI Yanqing. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in transformer [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [14] 孙云亭, 蔡振江, 程曼, 等. 多超声波传感器局部放电源定位方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):416-422.
- SUN Yunting, CAI Zhenjiang, CHENG Man, et al. Research on partial discharge source localization method of multi-ultrasonic-sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(3):416-422.
- [15] 李鹏. 聚酰亚胺基耐电晕、高导热微纳米复合材料的制备及其电气绝缘性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- LI Peng. Investigation on the preparation and electrical insulation properties of high thermally conductive and corona resistant polyimide-based micro-nano composites[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [16] 孙雷, 周健, 张宇. 串联变压器现场局部放电试验[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6):65-69.
- SUN Lei, ZHOU Jian, ZHANG Yu. Discussion on site partial discharge test of series transformers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):65-69.
- [17] 张金. LabVIEW 程序设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.
- ZHANG Jin. LabVIEW program design and application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.

作者简介:



霍天

霍天(1992—),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为电气设备局部放电检测;

吴振升(1974—),男,山东潍坊人,副教授,主要研究方向为电力系统自动化;

桂峻峰(1975—),男,河南信阳人,讲师,研究方向为电气设备在线监测。

## Acoustic-electric Joint Localization Method of PD in High Voltage Switch Cabinet

HUO Tian, WU Zhensheng, GUI Junfeng

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The partial discharge of switchgear indicates the existence of insulation defects. The location method of partial discharge in switchgear is studied. The corona discharge model was built in the laboratory, the ultrasonic signal is collected by the ultrasonic sensor and high frequency current sensor (HFCT) is used to collect high frequency current produced by coupling capacitance of partial discharge. Using delay time of ultrasonic relative high frequency current for positioning, data of discharge signal will be transferred from oscilloscope to PC communicated by USB. LabVIEW program is used to filter and analyze the waveform to obtain the exact position of the discharge location. Experiments show that the method has high accuracy.

**Key words:** switchgear; partial discharge location; ultrasonic; HFCT; oscilloscope; nonlinear programming algorithm

(编辑 刘晓燕)