

可视局放 UHF 空间定位系统及时延估计实现

王 骏,包立珠

(江苏省电力公司检修分公司苏州分部,江苏 苏州 215131)

摘要:文中介绍的可视局放 UHF 空间定位系统利用 4 个位于不同高度云台上的 UHF 天线阵列,检测局放中的 UHF 信号,基于时延估计和空间几何解算实现放电信号准确定位,并通过摄像对局放点进行可视化。首先分析了局部放电 UHF 电磁波的辐射及其定位原理,阐述了可视局放 UHF 空间定位系统组成,重点研究了结合阈值法和过零点插值的时延估计方法。最后通过测试验证系统的有效性。

关键词:局部放电定位;可视;超高频;时延估计

中图分类号:TM406

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)02-0027-04

局部放电(PD)信号能反映变压器绝缘的老化特征,对其定位是检测制造与安装中的缺陷、避免绝缘击穿故障的有效手段^[1]。PD 信号是一个高电流窄脉冲信号,富含的频率成分相当多,超高频(UHF)电磁波具有抗干扰性强、灵敏度高和传播速度稳定等优点,检测局部放电中的 UHF 电磁波,将其应用于局部放电定位及故障诊断是目前的研究热点之一^[2-4]。

目前对变电站设备的局部放电检测和定位主要是针对气体绝缘组合开关(GIS)、变压器、容性设备等具体单一设备进行,而变电站中任意高压设备均有可能发生局部放电事故。局放空间定位改变以往对单个设备安装在线监测装置的常规做法,在全站的空间内安装一组超高频传感器阵列接收局部放电发出的 UHF 电磁波信号,用一套装置对全站设备进行局部放电的监测和预警,获取并分析整个变电站站域放电情况^[5]。局部放电定位中信号时延估计和定位算法是 2 个关键的环节。时延估计算法主要有阈值法、能量积累法和相关估计法等^[5-9],当信号发生畸变时,各种方法求得时延均有较大误差。定位算法主要采用几何定位法、模拟退火法、蚂蚁算法等,但以上方法计算时间较长,而且存在可能无解,改进算法有:空间搜索算法^[10,11],复数域牛顿迭代—网格搜索方法^[12]。

1 可视局放 UHF 空间定位原理

通常变压器绝缘结构中发生的局部放电信号可以看成是由一个点源所发出的,当绝缘介质发生局部放电时,发生正负电荷的中和,形成持续时间在纳秒级的放电脉冲,并向周围辐射电磁波,遵循麦克斯韦的电磁场基本方程。局部放电产生的电磁波向周围空间传播,沿电磁波的传播方向流动,是时间及位置的函数。再考虑到局部放电时所发射出的电磁波在通过箱体夹缝或者 GIS 绝缘缝隙传播时,高频段的电磁波会发生衍

射,传播到设备外面去,因此采用基于时延估计的变电站超高频局放信号检测是完全可行的^[2,11]。

特高频段电磁波信号在均匀介质中匀速传播,基于最小光程差原理,通过处理 4 个以上测量传感器接收到的信号到达时延对放电源进行定位的。可视局放 UHF 空间定位系统采用 4 个 UHF 天线阵列,假定局放信号从输变电设备某一点传播到第 i 个天线的时刻记为 $t_i, i=1, 2, \dots, n$, 设第 i 个天线的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 局放源的三维坐标为 (x_s, y_s, z_s) , 第 1 个天线接收到局放信号的时间和第 i 个天线接收到局放信号的时间差为 t_{1i} , 此处 $i=2, \dots, n$, 由空间几何分析,可知:

$$\begin{cases} ct_{12} = d_1 - d_2 \\ ct_{13} = d_1 - d_3 \\ ct_{14} = d_1 - d_4 \\ ct_{1i} = d_1 - d_i \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $d_i = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2}$ 为放电源到第 i 个天线的距离; c 为电磁波传播速度。通过时延估计得到 t_{1i} , 联立任意 3 个方程即可确定局放源的位置, 多个方程可以有效提高检测准确度。

2 系统组成

系统包括天线阵列、信号放大器、采集存储、时延估计、空间解算、可视投影等部分构成。

2.1 天线及低噪声放大器

局部放电信号是纳秒级的一个高电流窄脉冲信号,富含的频率成分相当多(上限可达到数 GHz),选择 UHF 工作频段时要考虑避开现场干扰、兼顾定位精度。经常用到的手机信号频率 900 MHz 和 1800 MHz,电视信号和广播信号,短波电台等在外场环境中广泛存在,因此其和放电信号频率重叠部分不可用。时延估计是根据载波频率的上升沿比对比时延得到时延差进行定位解算的,要求接收频率的上升沿越陡越好,即信号

幅度越大越好,而定位精度与信号的接收频率关系密切。通过将 30~1800 MHz 频段分成若干频段判断各频段干扰信号的幅度大小,获得干扰信号幅度最小的频段,若 2 个频段干扰信号幅度相同,则选择频段高的频段作为干扰信号幅度最小的频段;在干扰信号幅度最小的频段中选择信噪比最高的频点作为放电信号的接收频率。

考虑外场测试环境,要求天线接收时对地面反射信号进行抑制,因此设计采用螺旋天线,频率范围为 1100~1700 MHz,这个天线方向性较强,且增益可达 10 dB,满足系统接收要求。每个接收通道增加了一个低噪声放大器和带通滤波器,提高信噪比。4 个天线位于不同高度云台上,其摆放位置依据实际安装的平台来决定,天线间距尽量大一些,不要在一个平面上,如图 1 所示。

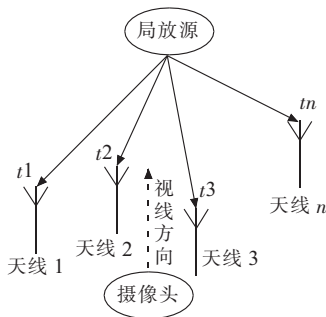


图 1 天线阵列示意图

2.2 信号采集

利用带存储功能的采集系统来同步采集并存储天线阵列接收到的同一放电源辐射的超高频电磁波。利用通道 1 作为触发源,同步采集信号。通过 LAN 网络将采集的数据传送到主机进行处理。

2.3 定位算法

将非线性方程组式(1)写成 $F(X)=0$ 的形式(其中 $X=[x, y, z]^T$),有:

$$F(X) = \begin{pmatrix} d_2 - d_1 - ct_{12} \\ d_3 - d_1 - ct_{13} \\ d_4 - d_1 - ct_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ f_3(X) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)可利用牛顿迭代法求解。牛顿迭代法求解收敛的条件较强,而在实际的测量计算中,由于各种干扰噪声、测量误差等因素的影响,可能导致牛顿迭代法不能收敛。在这种情况下,迭代初值的选取对迭代的收敛也有一定的影响,用逐层网络搜索法选取该初值,在牛顿迭代法仍然不收敛的情况下,认为网格搜索的结果即为方程组的解^[10,11]。

2.4 可视投影

局放源在摄像图像上投影,依据局放源的三维坐标、摄像头的位置坐标、视线方向、视角等参数,进行投影,可以在摄像图像上显示局放源。空间点 P 通过一

个 3×4 的投影矩阵 M 映射到像平面上的点 $p, p=MP$, 投影矩阵 M 可以分为 3 个部分:

$$M = KTG = K \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R t \\ 0 \ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: R 为旋转矩阵; t 为平移矢量; 中间矩阵 2 个负号代表通过镜头物体呈倒像; K 为相机标定矩阵,它包含相机内部参数数据。

$$K = \begin{pmatrix} f_u & -f_u \cos\theta & u_0 \\ 0 & f_v / \sin\theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)中: f_u, f_v 为相机焦距,分别以像素为单位沿水平方向和垂直方向测量; u_0, v_0 为相机主点,均可取为 0; 为相机水平与垂直轴向间的夹角,相机转动时该角度发生变化。

因此,空间点 (x, y, z) 映射到像物理坐标 (x_r, y_r) 可写为:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & -f_u \cos\theta & u_0 \\ 0 & f_v / \sin\theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R t \\ 0 \ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_r = \frac{x_1}{x_3} \\ y_r = \frac{x_2}{x_3} \end{cases} \quad (6)$$

3 结合阈值法和过零点插值的时延估计

时延估计是基于时间差的变电站局部放电定位算法的基础,也是决定定位准确度的关键。系统结合阈值法和过零点插值进行时延估计,首先 4 通道同步触发采集局放信号,依据触发电平设定一阈值,将超过阈值后的波形的第一个过零点作为信号的初始时刻。

3.1 4 个通道同步触发

同步触发保证 4 个通道采集存储的信号为同一时刻的局放信号。设定高速采集系统为单次、边沿触发,触发源选择通道 1。单次触发可以捕捉单次出现或多次出现但不太具有周期性的信号。边沿触发检测触发源的边沿、极性和电平。当信号的电平变化方向与设定相同(上升沿或下降沿),其值变化到与触发电平相同时,采集系统被触发,并捕捉波形。其他 3 路信号同步捕获。采集系统保留预触发的数据。捕捉波形是遵循先进先出的原理存储到采集系统内存中去的。当波形点满足了触发条件时,该点就被固定在存储器定义的触发点上,这时存储器变成了只进不出,直到填满存储深度为止。存储器起点到触发点这段时间记录的波形数据就是预触发数据。

3.2 阈值设定

假设数据采集以第一路信号为触发信号。依据触发电平设置阈值,可设为 V_i ,寻找超过阈值的波形的第一个峰值,在此基础上,往后寻找第一个过零点,作为第一路信号的波前时刻。剩余 3 路信号,阈值设置为 $k_i V_i$,其中,依据该路信号幅度与第一路信号幅度比较,取 k_i 不同值。设 4 路波形幅值为 V_i ,则 k_i 取值为:

$$k_i = \frac{V_i}{V_1} \quad i=1,2,3,4 \quad (7)$$

3.3 高阶插值的过零点确定

当信号采样率很低时,时延估计的精度差,改进措施是对信号进行插值运算,然后再进行时延估计,进而提高时延估计精度^[6]。对整个信号进行高阶插值需要较大的计算量。本系统采用超过阈值的第一个过零点作为信号的波前时刻,通过高阶插值寻找过零点,可以提高时延估计精度,而且计算量小。假设采用线性插值,找到超过阈值的第一个峰值后,继续寻找,找到符号发生变化的 2 个采样点 $S[i], S[i+1]$,如图 2 所示。

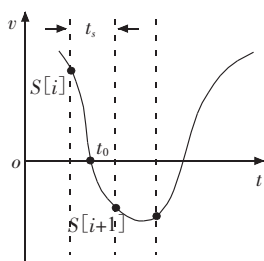


图 2 过零点插值示意

假定采样间隔为 t_s , 线性插值得到的过零点的时刻 t_0 为:

$$t_0 = \left(i + \frac{s[i]}{s[i] - s[i+1]} \right) \times t_s \quad (8)$$

3.4 手动校正

对于定位误差较大时,可以加入手动校正,利用鼠标指定波前时刻过零点的大概位置,然后自动寻找计算第一个过零点。

4 试验检测结果与分析

试验时,4 个位于不同高度云台上的 UHF 天线阵列,天线坐标依次为 $(0,0,510)$, $(4000,0,810)$, $(4000,3000,1115)$, $(0,3000,1420)$,坐标单位统一为 mm。利用带宽为 6 GHz、采样频率为 25 GHz 的带存储功能的采集系统进行信号采集。同步采集的信号波形如图 3 所示。

图 3 中的水平线为阈值电平,垂直线是过零点,通过过零点比较估计时延。改变阈值电平寻找不同的过零点,可得到不同的时延估计。从图 3 可看出,4 个通道在波前位置附近的波形较相似,受到反射干扰较少,利用越靠前的过零点作为波前时刻,定位精度越高。

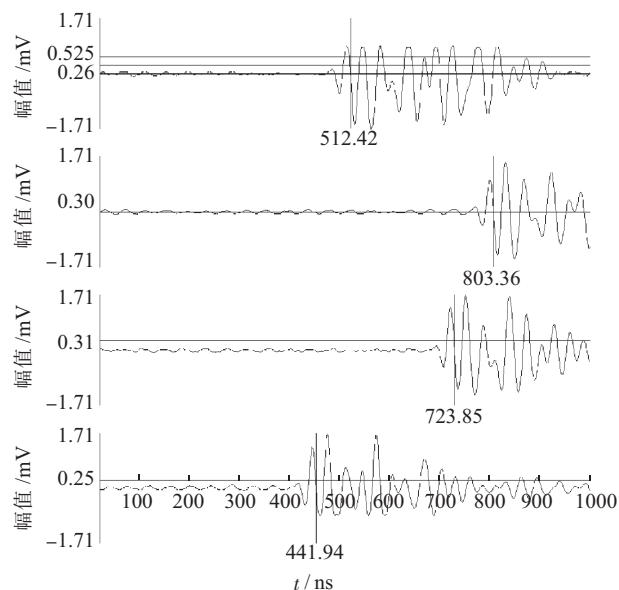


图 3 同步触发的 4 路波形

测试前在已知位置 $(5800,4215,1342)$ 上进行放电,对每个通道时延补偿进行校准,把系统计算的时延与测量得到的时延进行比较,得到每个通道的时延补偿,对以后测量进行校准。

在位置 $(6000,4500,1450)$ 上模拟局部放电,进行多次测量,定位结果如表 1 所示。

表 1 实验测试结果

试验次数	实际位置坐标	检测结果与误差分析	mm		
1	-10 000, 2500, 1000	结果	-9746, 2 434.4, 939.9	-9753, 2488, 840	-9764, 2415, 1004
		误差	-254, 66, 60.1	-247, 12, 160	236, 85, -4
2	-13 000, 4000, 2000	结果	-13 311, 4 115.1, 1859	3080, 4000, 2000	-13 211, 4102, 1990
		误差	311, -115.1, 141	80, 0, 0	211, -102, 10
3	-12 000, 1000, 2000	结果	-11 670, 847, 1952	-11 827, 929.6, 1891	-11 923, 884, 1764
		误差	-330, 153, 48	-173, 70.4, 109	-77, 116, 236
4	-6000, 2500, 1000	结果	-6281, 2 515.4, 883.1	-6 242.3, 2678, 826.6	-6 238.6, 2 582.2, 936
		误差	281, -15.4, 116.9	242.3, -178, 173.4	238.6, -82.2, 64
5	-11 000, 4000, 1800	结果	-11 080, 3800, 2000	-11 120, 3840, 2000	-11 080, 3760, 2000
		误差	80, 200, -200	120, 160, -200	80, 240, -200

从表 1 可以看出,定位误差基本在之内。通过在不同位置的放电点上测量,可以发现当放电点到达各天线的距离之差越大、测量结果越准确,放电点距离天线阵列越远、测量误差越大。考虑天线半径、背景噪声、已知位置测量时差计算等误差产生原因,定位结果在误差允许范围以内。

5 结束语

本文重点研究了结合阈值法和过零点插值的时延估计方法,在此基础上研制出可视局放 UHF 空间定位系统。该系统利用 4 个 UHF 传感器组成天线阵列来检测局放信号中的 UHF 信号,实现对放电信号准确定位,然后用画面投影算法实现局放点的可视化。最后通过现场测试验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] 李立学,黄成军,曾奕,等. GIS 局部放电信号超高频包络检波电路的研制[J]. 高压电器,2008,44(5):406-409.
- [2] 刘君华,姚明,王江,等. 基于 GIS 中电磁波传播路径特性的局放源定位方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(21):76-80.
- [3] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等. 基于超高频法的局部放电定位初步研究[J]. 高压电器,2008,44(4):370-373.
- [4] MARKALOUS S, TENBOHLEN S, FESER K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers Using Acoustic and Electromagnetic Signals [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6):1576-1583.
- [5] 侯慧娟,盛戈峰,苗培青,等. 基于超高频电磁波的变电站局部放电空间定位[J]. 高电压技术,2012(6):1334-1340.
- [6] 唐炬,陈娇,张晓星,等. 用于局部放电信号定位的多样本能量相关搜索提取时间差算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(19):125-130.
- [7] 杨景刚,黎大健,赵晓辉,等. 局部放电定位中 UHF 信号到达时延估计法的研究[J]. 变压器,2008,45(6):34-37.
- [8] 易岷. 时延及相关参数估计技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2004.
- [9] 侯慧娟,盛戈峰,朱文俊,等. 基于高阶累积量的局部放电超高频信号时延估计算法[J]. 高电压技术,2013,39(2):342-347.
- [10] 侯慧娟,盛戈峰,苗培青,等. 变电站局部放电特高频信号时延的双谱估计算法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):208-214.
- [11] 高文胜,登伟,刘卫东,等. 采用特高频检测技术的局部放电源定位方法[J]. 高电压技术,2009,35(11):2680-2684.
- [12] 郑书生,李成榕,何梦. 变压器局部放电复数域牛顿迭代—网格搜索定位方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(9):208-214.

作者简介:

王骏(1978),男,江苏苏州人,高级工程师,从事电网运行维护检修管理工作;

包立珠(1982),男,江苏淮阴人,工程师,从事变电运行检修工作。

Implementation of Visual Partial Discharging UHF Spatial Positioning System and Time Delay Evaluation

WANG Jun, BAO Lizhu

(Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Suzhou 215131, China)

Abstract: The visual partial discharging UHF spatial positioning system uses four UHF antenna array at different heights to detect the UHF signals to locate discharging signals based on the signal delay estimation and space geometric analysis. Also it visualizes the discharging point using camera. Firstly, UHF radiation and electromagnetic of partial discharge and its positioning principle are introduced. Then, the components of visual-able UHF spatial positioning system for partial discharging is introduced. Finally, the delay estimation method based on the threshold method and zero-crossing interpolation point method are studied. Testing results verifies the effectiveness and practicality of the system.

Key words: partial discharge localization algorithm; visual; ultra-high frequency; time delay estimation

(上接第 26 页)

Evaluation on Power Network Automatic Switchover System Based on Analytic Hierarchy Process

ZOU Dehu¹, ZHANG Ying², ZHANG Shenqi², ZHANG Le², FU Jing²

(1. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China;

2. Jiangsu Nantong Power Supply Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Different implementations are possible for the automatic switchover system of the power network with a chain structure. This paper proposes a method for comprehensively evaluating different solutions of power network automatic switchover system. Firstly, hierarchical structure of the evaluation index is build. Then, the weight coefficient are determined. Finally, the overall evaluation results are obtained. Analysis on the Nantong regional power grid shows that the comprehensive evaluation method is effective. This evaluation method provides a power network automatic switchover system selection decision support for enterprise.

Key words: automatic switchover system; analytic hierarchy process; evaluation