

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.009

基于矩形超高频天线阵列的局放源方向定位的研究

赵海洋¹, 赵现平², 李振超², 张恭源²

(1. 国网六安供电公司, 安徽 六安 237001; 2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明 650217)

摘要: 高压设备随着绝缘水平下降会发生局部放电现象(PD), 放电信号由波长不等的电磁波构成, 可能会传播到设备外面的空气中。文中采用由4个盘锥天线构成的矩形天线阵列来接收空气中辐射的超高频局部放电信号, 因矩形天线阵列可在测量时移动, 可通过移动实现局放的检测定位。文中重点研究了利用信号高峰确定各路信号其实时刻和基于各个天线接收信号的时间到达的不同(TDOA)的方向定位算法。通过实验验证了基于矩形天线阵列的方向定位算法的正确有效性。

关键词: 矩形天线阵列; 变电站; 局部放电; 超高频; 方向定位

Direction Location of Partial Discharge Source Based on Rectangular UHF Antenna Array

ZHAO Haiyang¹, ZHAO Xianping², LI Zhenchao², ZHANG Gongyuan²

(1. State Grid Lu'an Electric Power Supply Company, Anhui Lu'an 237001, China; 2. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test & Research (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Partial discharge (PD) occurs when the insulation of high voltage equipment degrades. The discharge signal is composed of electromagnetic waves with different wave lengths, which may radiate into the air outside the equipment. In this paper, rectangular UHF antenna array made up of four disk-cone antennas is used to receive the radiated UHF signals from air. Partial discharge source could be detected and located by moving detection of the array. Emphasis is laid on determining the initial time of each signal and the time difference of the arrive (TDOA) by making use of first peak of signal. Experiments verify the validity of the proposed direction location algorithm based on rectangular antenna array.

Key words: rectangular antenna array; substation; partial discharge; ultra high frequency; direction location

0 引言

运行中的高压电力设备的绝缘水平随着时间逐步下降, 设备发生局放会破坏其绝缘的完整性。若设备局部放电不被及时发现处理, 则可能造成设备故障, 引发电力系统事故^[1-2]。目前针对变电站内设备进行局部放电监测的主要是几种大型昂贵设备, 如变压器、GIS等, 而站内的其他设备如断路器、隔离开关、高压套管等也有可能发生局部放电。如果对变电站内可能发生局部放电的设备逐一安装监测装置, 导致设备的运行成本将呈指数性增加, 且不易维护^[3-4]。局部放电发生时, 由于电荷的迅速转移, 形成持续时间在 ns 级的放电脉冲, 并产生频率分量极其

丰富的电磁信号(上限可达到数 GHz)^[5]。目前的超高频等局放在线监测技术虽然性能已经得到认可, 但因为成本较高, 并没有得到广泛应用^[6]。

若采用一套设备对整个变电站的局部放电进行监测将具有很好的经济效益。英国 Strathclyde 大学对空间电磁波信号定位做了大量的研究, 但在实际应用中仅能得到放电源方位的一个范围很大的方向角, 要进行多次测量才能得到准确的放电源方向^[7-13]。

文中阐述了矩形超高频天线阵列选用的盘锥天线并对其性能进行了测试。重点研究了基于信号高峰时间得到时间差, 提出了新的角度计算方法计算得到局放源在矩形天线阵列的某一方向, 通过多次变换天线位置的测量实现对局放源的方向定位。通过实验, 验证了方向定位算法准确性^[14-19]。

1 基于矩形天线阵列的局放源方向定位系统的组成

1.1 方向定位系统选用的标准天线

为了对发生局放的设备辐射到空中的信号进行方向定位, 要求天线能够有效接收可能来自各个方向的空中的超高频电磁波信号, 所以天线首先应能够接收全方位的信号, 且增益相同, 不存在盲点, 死区及信号幅值差异过大等问题。其次, 天线应具备较低的天线系数, 即具有较高的灵敏度, 不存在无法接收目标频段信号的可能, 同时 4 个天线应该具有较强的一致性, 因此文中的局放检测定位系统采用标准全向的盘锥天线。盘锥天线的结构尺寸示意图见图 1。在对信号具有良好屏蔽作用的电磁兼容实验室内, 通过施加一定频率范围的垂直电场作用于盘锥天线, 矢量网络分析仪测得的天线特性曲线见图 2, 可知天线具有相对平坦的频率响应, 天线的全向能力优异, 对各个方向的信号具有较为稳定一致的接收能力。图 3 为盘锥天线实物。盘锥天线可对 50 m 开外 20 pC 的放电量能进行有效接收, 在设计该系统时, 考虑现场的环境, 设定天线接收 15 m 之内的局放信号。

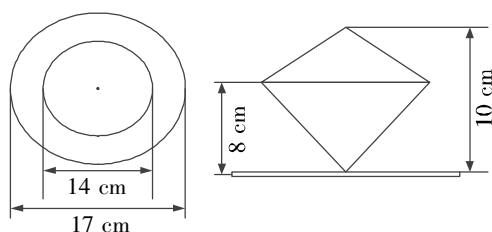


图 1 盘锥天线结构尺寸图

Fig. 1 Structure and size of disk-cone antenna

1.2 局放源方向定位系统的硬件构成

局放源方向定位系统的硬件结构构成示意图见图 4, 矩形超高频天线阵列通过 4 条同等长度的同轴电缆与示波器相连, 这样可以减小因为信号电缆长度不同带来的误差。采集矩形超高频天线阵列接收到的局部放电信号的数字存储示波器为 LeCroy Wave Runner 104MXi, 模拟带宽为 1 GHz、采样率为 10 G/s, 4 通道同时采样时的采样率为 5 G/s。示波器采集到的信号通过 USB 数据线传输至便携式电脑中进行处理计算并显示结果。

将天线装入特制的密闭的盒子内, 以达到保护天线的作用, 见图 5。

2 局放源方向定位原理

2.1 利用首峰确定信号起始时刻

较为准确地实现方向定位的关键是准确地获取

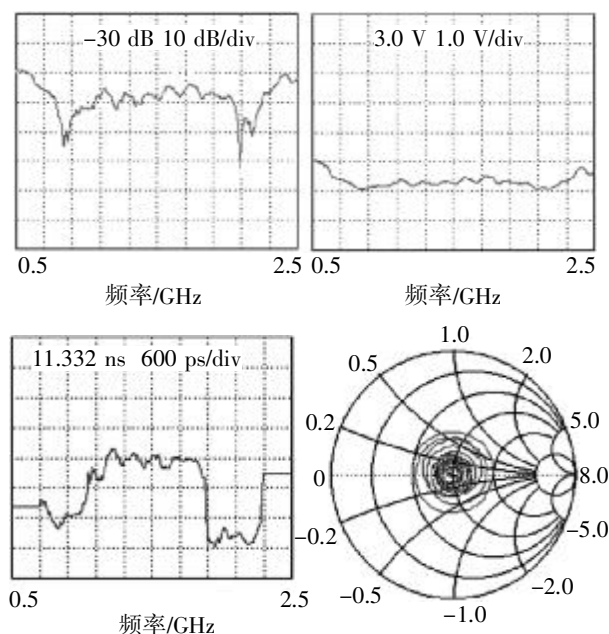


图 2 盘锥天线特性图

Fig. 2 Disk-cone antenna characteristics

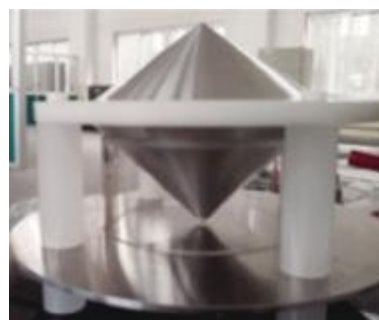


图 3 盘锥天线实物图

Fig. 3 Disk-cone antenna

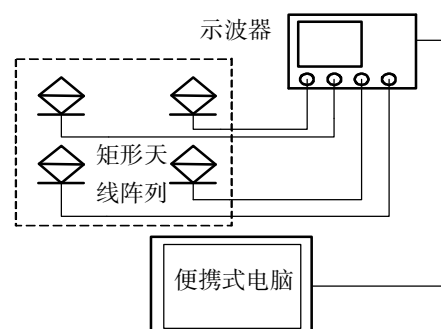


图 4 局放方向定位系统硬件构成示意图

Fig. 4 The schematic diagram partial discharge direction location system hardware

4 个天线接收的天线信号的起始时刻。目前常用的方法有相关法、能量累积法、信号初始峰值法、三次样条插值法等。信号特征点包含波形上升沿、下降沿起始点和波峰波谷最大值点等。在实际中由于背景噪声和信号传播过程中各种因素的影响, 导致信号上升或下降沿的起始点很难确定。由于文中所述系统选用的示波器 4 通道同时采样率为 5 G/s, 满足对高频信号的采样要求, 所以文中选取信号初始峰值



图 5 系统硬件连接图

Fig. 5 System hardware connection diagram

法作为特征点的确定方法。笔者选取第 1 个上升或下降沿的峰值点为信号起始点来读取时间差。图 6 为模拟局部放电源发出的局部放电信号示波器同步采集获得的典型波形。

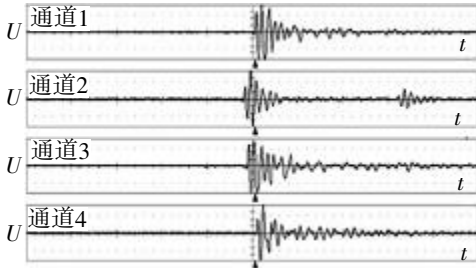


图 6 放电源的放电信号

Fig. 6 Signals from partial discharge sources

通过图 6 不难发现,信号的初始峰位于电压幅值的正半轴,可通过示波器时间卡尺轻易读取两两信号间的时间差值。文中所述局放检测定位系统采用灵活设定信号触发级值来调节信号初始峰的读取,可针对不同电压等级的测量环境进行灵活测量。

2.2 方向定位算法

方向定位算法图见图 7。在获取了 4 个天线信号的首峰时刻后,便可以得到处于对角线天线间的时间差。

$$\Delta t_{xy} = t_x - t_y. \quad (1)$$

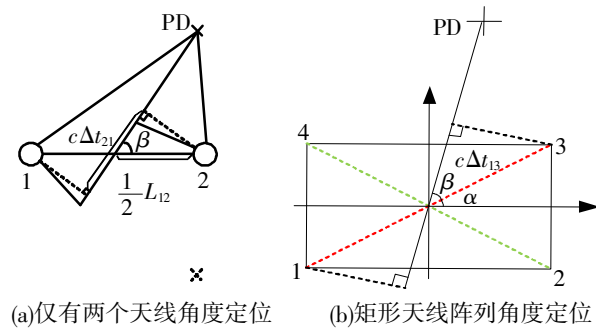


图 7 方向定位算法图

Fig. 7 Direction location algorithm diagram

在实际中,由于要保证系统与带电设备保持一定的安全检测距离,并且矩形天线阵列架装于汽车顶部,矩形天线阵列所在平面与脉冲所在点可近似

为在一个平面上,因此可将三维空间变为二维平面进行计算。当只有两个天线时,天线 1、2 的同步采集得到的信号时差为 $\Delta t_{12} = t_1 - t_2$,信号传到天线 1 和天线 2 的直线距离之差可近似为 $c\Delta t_{12}$,天线之间的距离为 L_{12} ,利用图 7(a)中的三角余弦角度关系,可得

$$\cos\beta = \frac{\frac{1}{2}c\Delta t_{12}}{\frac{1}{2}L_{12}} = \frac{c\Delta t_{12}}{L_{12}}. \quad (2)$$

不难看出只有 2 个天线的情况下,PD 的解有 2 个,无法判断 PD 的具体方位。

文中提出的方向定位方法是基于矩形天线阵列选取处于对角线天线的时间差,处于另外一对对角的两个天线时间差作为判别信号处于坐标轴的象限位置,见图 7(b)。

当采用图 7(b)的矩形天线阵列对信号进行接收时,由于每个天线所在位置坐标的不同,所以信号到达每个天线的时间可能会有所不同,PD 点距离天线 3 最近,距离天线 1 最远,信号到达天线 4 的时间小于到达天线 2 的时间,所以根据天线间的时间差关系不难判断出局放源所在以矩形天线阵列几何中心的坐标轴中的第一象限。天线间的时间差可根据式(1)得到两两间天线的信号到达天线的时间差值。由于天线间的几何距离为已知,并且局部放电磁波信号的传播速度为光速 c 。利用平面几何关系可由式(2)不难得到 β 的值。

此时计算得到的 β 角度有一定的误差,通过对处于对角天线时间差添加时间修正因子 Δ 予以修正,其中 Δ 值的大小根据天线间的几何距离而定。在实验中,4 天线组成一个长 112 cm、宽 140 cm 的矩形天线阵列,根据实验实测值进行估计, Δ 一般取 0.2~0.6 ns,得

$$\cos\beta = \frac{c(\Delta t_{13} + \Delta)}{L_{13}}. \quad (3)$$

图 7(b)中的 $\alpha = \arctan \frac{L_{23}}{L_{12}}$ 为已知,从而得知放电源的角度为 $\alpha + \beta$,当变换矩形天线阵列所在位置,得到放电源新的方位,经过多次测量,得到的多组方向相交于一点,这个方向定位交汇点便为放电源,从而实现了放电源的方向定位。

利用天线两两的时间差和三角计算公式,方向定位的算法流程图见图 8,由于天线之间的距离一定,故两两天线接收信号的时间差在一定的范围之内,以此来判断接收的信号数据的正确有效性。

3 实验测试结果

实验角度平面示意图见图 9。在实验室进行测

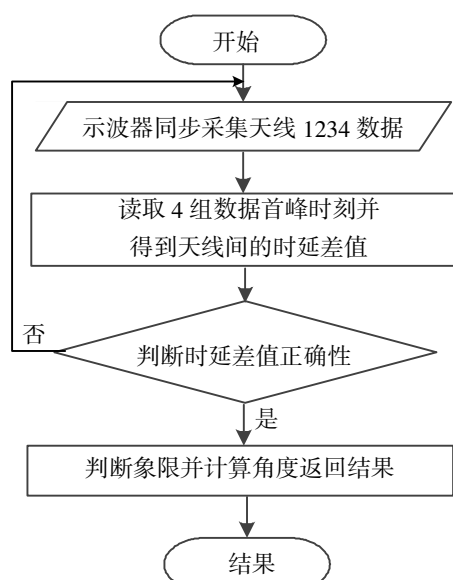


图 8 局放方向定位算法流程图

Fig. 8 The flow chart of direction location algorithm

试来验证方向定位和距离定位算法, 对天线阵列按逆时针标号为 1、2、3、4, 其中天线 1 和天线 2 的距离为 1.4 m, 天线 2 和天线 3 的距离为 1.12 m。

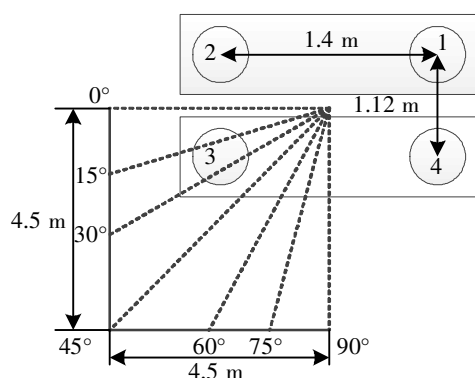


图 9 实验角度平面示意图

Fig. 9 The schematic diagram experiment angle plane

在实验室测量时, 通过模拟放电源变换位置来模拟通过矩形天线阵列的移动达到定位局部放电信号的目的。

实验的测试条件为: 将放电源置于稍高与矩形天线阵列的距离天线阵列中心 4.5 m 处, 放电源和天线之间没有金属障碍物, 见图 9, 作一个以矩形天线阵列的几何中心为顶点的正方形, 并标注 15°、30°、45°、60°、75°、90°。通过示波器读取各天线的首峰时刻, 测得的数据和计算结果见表 1。实景测试图见图 10。

4 结论

文中采用了矩形超高频天线阵列, 利用信号首峰确定信号起始时刻, 得到天线之间的信号到达时间差, 通过以矩形天线阵列的中心作坐标轴, 利用时

表 1 方向定位计算结果

Table 1 Calculation results of direction location

方向 角度/(°)	测量时差 $\Delta t_{13}/\text{ns}$	测量时差 $\Delta t_{24}/\text{ns}$	计算 角度/(°)	角度 误差/(°)
90	4.00	4.00	90.551	-0.551
75	4.67	2.67	79.056	-4.056
60	5.33	0.67	60.973	-0.973
45	6.00	-0.67	46.924	-1.924
30	6.00	-2.00	29.570	0.430
15	5.33	-3.33	10.800	4.200
0	4.67	-4.66	0.127	-0.127



图 10 实验现场实景图

Fig. 10 The picture of experiment scene

间差确定局放源所在象限, 并通过三角关系计算出角度, 通过时间修正因子予以时差修正, 从而得到放电源的角度。得到如下结论:

1) 系统选用的超高频天线的灵敏度比较高, 通过测试, 盘锥天线对超高频局放信号的接收具有一个较为平稳的频率响应。

2) 通过两两天线间的时间差便可确定局放源的具体象限, 从而选取对应的对角线时差来计算角度, 通过另一时间差来确定时间差修正因子, 实验证明通过修正后, 计算后的角度误差较小。

3) 实际中的天线和放电源的三维空间关系可近似为二维平面关系予以计算, 对定位结果的影响可以忽略。

综上所述, 笔者对基于矩形超高频天线阵列的局放源方向定位研究侧重的两点, 一是对系统选用的盘锥天线特性做了测试, 二是基于放电信号首峰确定天线时间差和放电源的方向定位算法研究。在实际中, 电磁波会遇到障碍物会发生反射、折射, 这对时间差的准确性有一定的影响, 需要做下一步研究。

参考文献:

- [1] MOORE P J, PORTUGUE I, GLOVE I A. A non-intrusive partial discharge measurement system based on RF technology [C]//Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Ontario, Canada: [s.n.], 2003: 13-17.
- [2] 姚陈国, 周电波, 陈攀, 等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1670-1676.

- YAO Chenguo, ZHOU Dianbo, CHEN Pan, et al. UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [3] JUDD M D, LI Yang, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors, Part 2: Field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.
- [4] JUDD M D, LI Yang, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors, Part 1: sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 5-14.
- [5] 高文胜, 丁登伟, 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.
- GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong, et al. Location of PD by searching in space using UHF method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2680-2684.
- [6] 侯慧娟, 盛戈崑, 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, 38(6): 1334-1340.
- HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Partial discharge location based on radio frequency antenna array in substation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1334-1340.
- [7] 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.
- ZHAO Xiaohui, YANG Jinggang, LU Xiuli, et al. Study of PD location based on the UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 370-373.
- [8] TENBOHLEN S, DENISOV D, HOEK S M. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.
- [9] MOORE P J, ILLANA E P, GLOVER I A. Partial discharge investigation of a power transformer using wireless wideband radio-frequency measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 528-530.
- [10] PORTUGUES I E, MOORE P J, GLOVER I A, et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 20-29.
- [11] PHILIP J G O, REID A J, JUDD M D. Sensor response characteristics for UHF location of PD sources[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: [s.n.], 2008: 1119-1122.
- [12] 唐志国, 李成榕, 黄兴泉, 等. 基于辐射电磁波检测的电力变压器局部放电定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 96-101.
- TANG Zhiguo, LI Chengrong, HUANG Xingquan, et al. Study of partial discharge location in power transformer based on the detection of electromagnetic waves [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(3): 96-101.
- [13] 张晓星, 王震, 唐炬, 等. 气体绝缘变压器局部放电超高频在线监测系统[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1692-1697.
- ZHANG Xiaoxing, WANG Zhen, TANG Ju, et al. GIT partial discharge UHF on-line monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1692-1697.
- [14] 唐炬, 周加斌, 胡忠, 等. 变压器油中局放 UHF 信号能量与放电量的关系[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1009-1013.
- TANG Ju, ZHOU Jiabin, HU Zhong, et al. Relationship between UHF signal energy and charge quantity of partial discharge in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1009-1013.
- [15] GUASTAVINO F, DARDANO A, TORELLO E. Measuring partial discharges under pulsed voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1640-1648.
- [16] MARKALOUS S M, FESER S T, FESER K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1576-1583.
- [17] 唐炬, 魏刚, 孙才新, 等. GIS 局部放电检测用超宽带振子天线传感器研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 29-31.
- TANG Ju, WANG Gang, SUN Caixin, et al. Research on the dipole antenna sensor with broadband for partial discharge detection in GIS[J]. High voltage Engineering, 2004, 30(3): 29-31.
- [18] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. 采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2462.
- LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge location in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2458-2462.
- [19] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- TANG Ju. Study of outer sensors for on-line monitoring partial discharge in GIS and interference suppression with complex wavelet [D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2004.
- 赵海洋(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备的在线监测与故障诊断。
- 赵现平(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气设备绝缘在线监测、高电压设备局部放电与故障诊断。

(编辑 袁妮)