

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.004

基于特高频传感阵列的局部放电定位误差分析及优化布置

熊俊¹, 杨森¹, 侯慧娟², 李光茂¹, 吴晓桂¹, 陈敬德², 盛戈皞²

(1. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州 510410; 2. 上海交通大学智能电网实验室, 上海 200240)

摘要: 局部放电的测量和诊断已成为评估高压电力设备运行状态的重要方法之一。但目前的局部放电监测主要以单个设备监测为主, 测试仪器程序多, 成本高, 维护工程大。文中介绍了利用 4 个以上传感器组成传感阵列接收特高频电磁波对变电站设备局部放电源定位的方法, 分析讨论了基于时差法的定位算法, 分析其主要误差来源, 理论推导了定位结果误差与传感器阵列布置及信号到达时延序列误差的关系, 最后给出了特高频传感器阵列布置的优化方法。

关键词: 局部放电; 特高频; 传感器阵列; 定位算法; 误差分析; 优化布置

Error Analysis and Placement Optimization of Partial Discharge Location Based on UHF Sensors Array

XIONG Jun¹, YANG Sen¹, HOU Huijuan², LI Guangmao¹,
WU Xiaogui¹, CHEN Jingde², SHENG Gehao²

(1. Electric Power Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510410, China;
2. Smart Grid Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The measurement and diagnosis of partial discharge (PD) is accepted as one of the most valuable means for assessing the quality of high voltage (HV) power apparatus and their running status. However, the current partial discharge monitoring is mainly based on single equipment, which needs multi-process test equipment, high cost, and large maintenance engineering. This paper introduces the use of four antennas array to receive ultra-high frequency (UHF) signal, and to define 3-D coordinate system, then PD source in the field of the substation is located. Furthermore, the principle of the location algorithm based on time difference is discussed and the origin of its location error is analyzed. Then the connection of location error and the placement of UHF sensors array and the error of time difference has been discussed theoretically. Finally, the optimal placement of the radio frequency antenna array is provided.

Key words: partial discharge; UHF; antenna array; location algorithm; error analysis; optimal placement

0 引言

局部放电既是绝缘劣化的征兆和表现形式, 又是绝缘进一步劣化的原因^[1], 因此局部放电检测是目前绝缘检测与诊断的最有效的方法。目前对于变电站设备的局部放电检测和定位主要针对单一设备进行。而变电站中的任何高压电力设备均可能会发生局部放电故障, 要想对全站的电气设

备实施一次监测, 就需要在每一个设备上安装局部放电监测装置, 所需的费用较高, 监测系统的使用效率低, 而且对众多在线监测装置本身的维护工作量也很大^[2-8]。

文中讨论的系统改变以往对单个设备安装在在线监测装置的常规做法, 在变电站全站的室内采用一组超宽带特高频(UHF)传感器接收局部放电发出的特高频电磁波信号, 用 1 套装置对局部放电的监测和定位, 获取和分析变电站设备的放电情

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2016-07-29

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(K-GZM2014-016)。

Project Supported by South Power Grid Corporation Technology Project(K-GZM2014-016).

况^[9-14]。利用该监测装置对变电站中可能存在放电缺陷的设备进行初步定位,确定设备或设备部件有了缺陷和故障风险后再进行深入分析和定位,成本低,效率高。

英国 Strathclyde 大学对变电站空间局部放电定位的可行性进行了初步研究和验证^[15-18]。笔者在给出基于时差法的局部放电定位系统原理及实现方法的基础上,深入讨论了基于时差法的定位算法,分析其主要误差来源,理论推导了定位精度与多路信号到达时延序列误差及传感器阵列布置的关系,最终通过定量分析给出了传感器阵列的优化布置方法。

1 基于特高频传感器阵列的局放检测定位系统原理

该系统利用全向传感器阵列接收由局部放电产生的特高频电磁波信号实现变电站局部放电的定位。在变电站内布置 4 个传感器,连接信号采集系统,同步采集并存储传感器阵列接收到的同一局部放电电源辐射的特高频电磁波信号。通过信号处理,提取信号的波头时刻,来测量它们接收到同一局部放电电源的特高频信号的时延序列,基于放电信号的时延序列实现变电站全站范围内的局部放电电源精确定位,系统示意图见图 1。

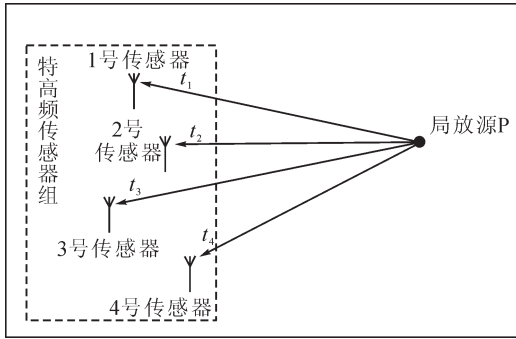


图 1 特高频传感器阵列局放检测定位系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram for partial discharge detection and location system using antenna array

局部放电信号从某一点传播到特高频传感器阵列的第 i 个传感器的时刻记为 t_i , 设第 i 个传感器的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 局部放电电源的坐标为 (x, y, z) , 由空间几何分析可得定位方程组

$$\begin{cases} c\Delta t_{12}=d_1-d_2 \\ c\Delta t_{13}=d_1-d_3 \\ c\Delta t_{14}=d_1-d_4 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: Δt_{1i} 为第 i 个传感器接收到局部放电信号的时间和第 1 个传感器接收到局部放电信号起始时刻的时差, 记 $\Delta t=(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14})^T$, 为电磁波传播

速度, d_i 为局部放电电源到第 i 个传感器的距离, 即

$$\begin{cases} \Delta t_{1i}=t_1-t_i \\ c=3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \\ d_i=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2} \end{cases} \quad (2)$$

用牛顿迭代等方法求解式(1), 即可得到局部放电电源的位置坐标 (x, y, z) , 系统的实现框图见图 2。

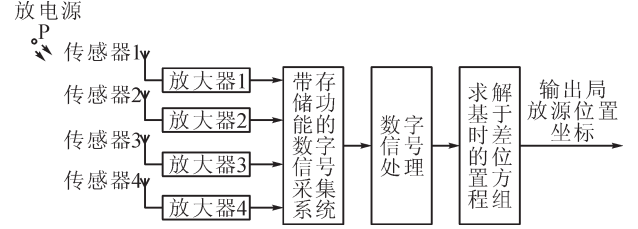


图 2 实现框图

Fig. 2 Implementation diagram

由式(1)可知, 系统定位误差主要来源于 4 个传感器接收信号波头时刻的误差, 而且与传感器阵列的空间布置方式有一定的关系。

2 基于时差法的局部放电三维定位算法误差分析

以下分析系统定位误差与传感器阵列布置及其接收信号时延序列误差的关系。

将式(2)代入式(1), 并对式(1)两边同时求微分, 写成矩阵的形式

$$c \cdot dt = J \cdot dX. \quad (3)$$

式(3)中: $dt=(d\Delta t_{12}, d\Delta t_{13}, d\Delta t_{14})^T$ 为接收信号时延序列的误差; $dX=(dx, dy, dz)^T$ 为系统的定位误差。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{d_1} - \frac{x-x_2}{d_2} & \frac{y-y_1}{d_1} - \frac{y-y_2}{d_2} & \frac{z-z_1}{d_1} - \frac{z-z_2}{d_2} \\ \frac{x-x_1}{d_1} - \frac{x-x_3}{d_3} & \frac{y-y_1}{d_1} - \frac{y-y_3}{d_3} & \frac{z-z_1}{d_1} - \frac{z-z_3}{d_3} \\ \frac{x-x_1}{d_1} - \frac{x-x_4}{d_4} & \frac{y-y_1}{d_1} - \frac{y-y_4}{d_4} & \frac{z-z_1}{d_1} - \frac{z-z_4}{d_4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)得

$$dX = J^{-1} \cdot c \cdot dt; \quad (5)$$

$$(dX)(dX)^T = c^2 J^{-1}(dt)(dt)^T (J^{-1})^T. \quad (6)$$

记 $P_{dx}=(dX)(dX)^T$, 用 2-范数, 即 Euclidean 范数来评估定位误差的大小

$$\|dX\|_2 = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \sqrt{tr(P_{dx})}. \quad (7)$$

式(7)中, $tr(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

由式(4)-(7)知, 定位误差和信号的时延序列误差 dt , 及信号源到各传感器的相对位置有关, 现讨论在 dt 一定时, 定位误差和传感器布阵方式的关系。假设 $\|dX\|_2 = \sigma^2$, 则由式(6)、(7)知

$$\|dX\|_2 = \sqrt{tr(P_{dx})} = c\sigma^2 \sqrt{tr(J^{-1}J^{-T})}. \quad (8)$$

由矩阵求逆公式

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{J})} \mathbf{J}^* \quad (9)$$

式(9)中: $\det(\mathbf{J})$ 为 $\mathbf{J}$ 的行列式; $\mathbf{J}^*$ 为 $\mathbf{J}$ 的伴随矩阵。代入(8)得

$$\|\mathbf{dX}\|_2 = \frac{c\sigma_i^2}{|\det(\mathbf{J})|} \sqrt{\text{tr}[\mathbf{J}^* \cdot (\mathbf{J}^*)^T]} \quad (10)$$

由伴随矩阵的性质

$$\|\mathbf{dX}\|_2 = \frac{c\sigma_i^2}{|\det(\mathbf{J})|} \sqrt{\text{tr}[\mathbf{J}^T \mathbf{J}]} \quad (11)$$

可以证明矩阵 $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ 正定, 设其特征值从大到小分别为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 > 0$, 则 $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^*$ 的特征值分别为: $\lambda_2 \lambda_3$, $\lambda_1 \lambda_3$ 和 $\lambda_1 \lambda_2$, 可得

$$\text{tr}[(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^*] = \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2; \quad (12)$$

$$\det(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) = [\det(\mathbf{J})]^2 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3. \quad (13)$$

可得

$$\|\mathbf{dX}\|_2 = c\sigma_i^2 \sqrt{\frac{\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}} = c\sigma_i^2 \sqrt{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}}. \quad (14)$$

由平均数不等式可得

$$\|\mathbf{dX}\|_2 \geq 3c\sigma_i^2 \sqrt{\frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}. \quad (15)$$

又

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \text{tr}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) = \sum_{i,j=1}^3 \mathbf{J}_{ij}^2. \quad (16)$$

式(16)中, $\mathbf{J}_{ij}$ 为矩阵 $\mathbf{J}$ 的第 i 行第 j 列元素, 矩阵 $\mathbf{J}$ 代入可得

$$\text{tr}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) = \sum_{i=2}^4 \left[\left(\frac{x-x_1}{d_1} - \frac{x-x_i}{d_i} \right)^2 + \left(\frac{y-y_1}{d_1} - \frac{y-y_i}{d_i} \right)^2 + \left(\frac{z-z_1}{d_1} - \frac{z-z_i}{d_i} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

由变电站内局部放电点的位置与传感器阵列间的距离, 远远大于传感器阵列的阵元间距离, 故有

$$\text{tr}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \approx \sum_{i=2}^4 \left[\left(\frac{x_1-x_i}{\bar{d}} \right)^2 + \left(\frac{y_1-y_i}{\bar{d}} \right)^2 + \left(\frac{z_1-z_i}{\bar{d}} \right)^2 \right] = \frac{\sum_{i=2}^4 d_{ii}^2}{\bar{d}^2}. \quad (18)$$

故有

$$\|\mathbf{dX}\|_2 \geq 3c\sigma_i^2 \frac{\bar{d}}{\sqrt{\sum_{i=2}^4 d_{ii}^2}}. \quad (19)$$

式(19)中: $\bar{d} = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)/4$, 为局部放电电源到传感器阵列的平均位置; d_{ii} 为传感器 1 到传感器 i 的距离。

由式(19)知, 信号源到达传感器时差的误差越小, 定位误差越小; 局部放电电源的位置到传感器阵列的距离越近, 定位误差越小; 传感器布置越分散, 定位误差越小; 在传感器阵列布置平面面积有限的情况下, 以传感器 1 为基准, 其他 3 个传感器到传感器 1 的距离和越大, 定位越准确。

3 传感器布阵对定位结果影响的定量分析

在变电站 30 m×50 m 的区域内布置 4 个传感器组成的传感器阵列, 接收局部放电辐射出的特高频电磁波信号。由以上分析知, 基于 4 个传感器接收信号波头时刻的时差, 求解式(1)即可得到局放源的位置坐标, 实现对变电站全站范围内局部放电的监测和定位。以下分情况讨论传感器阵布置对定位结果的影响。

3.1 传感器阵列布置形式对定位误差的影响

首先考虑传感器阵列在变电站内部 10 m×6 m 的小区域范围内的布置方式。

假设传感器阵列 4 个传感器放置的位置坐标分别为 $A_1(0,0,0)$, $A_2(10,0,0)$, $A_3(10,6,0)$, $A_4(4,2,5)$, 见图 3。图 3 中传感器阵列在 xoy 平面内的投影为 Y 形, A_4' 为 A_4 在 xoy 平面内的投影。假定局部放电电源位置在 $(20,10,3)$, 在不考虑各传感器接收到信号波头时差误差时, 计算局部放电电源到达传感器阵列的理论时延序列 $(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14})^T$ 为 $(27.01, 37.94, 15.20)^T$ (单位为 ns), 利用牛顿迭代法等方法反解式(1), 可精确定位到假定的局部放电电源位置 $(20,10,3)$ 。

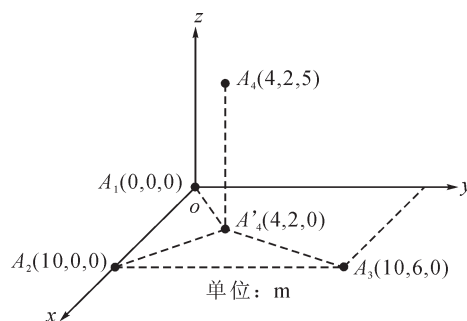


图 3 Y 形传感器布置图

Fig. 3 Antenna arrangement diagram of Y-shape

假设传感器阵列 4 个传感器放置的位置坐标分别为 $A_1(0,0,0)$, $A_2(10,0,0)$, $A_3(10,6,0)$, $A_4(0,6,5)$, 见图 4。图 4 中, 传感器阵列在 xoy 平面内的投影为矩形, A_4' 为 A_4 在 xoy 平面内的投影。同样假定局部放电电源位置在 $(20,10,3)$, 在不考虑各传感器接收到信号波头时差误差时, 计算局部放电电源到达传感器阵列的理论时延序列 $(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14})^T$ 为

$(27.01, 37.94, 6.89)^T$ (单位为 ns), 利用牛顿迭代法等方法反解式(1), 也可精确定位到假定的局放源位置 $(20, 10, 3)$ 。

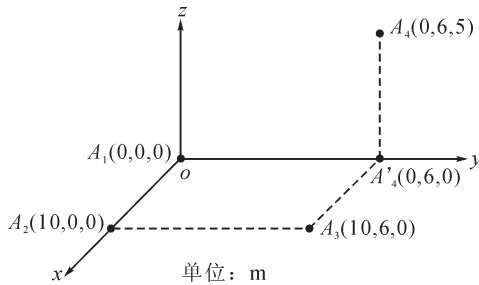


图4 矩形传感器布置

Fig. 4 Antenna arrangement diagram of rectangle

以下考虑传感器1接收到电磁波信号的波头时刻 t_1 误差。由式(2)知, t_1 的误差, 将带来时延序列 $(\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14})^T$ 的误差。在假定采集系统采样率为 25 GHz 的条件下, 比较图 4、5 的 2 种传感器布阵方式在相同的时差误差下系统的定位结果见表 1。

表1 传感器阵列 Y 型布置与矩形布置的定位结果比较

Table 1 Location results of Y-shape and rectangle antenna array arrangement

误差点数	投影为矩形	投影为 Y 形
0	(20.00, 10.00, 3.00)	(20.00, 10.00, 3.00)
1	(20.25, 10.80, 3.09)	(20.15, 11.72, 2.98)
2	(20.44, 10.95, 3.08)	(20.42, 12.10, 2.99)
3	(20.98, 10.68, 2.91)	(20.65, 12.44, 3.00)
4	(21.40, 11.43, 2.95)	(20.90, 12.88, 3.00)
5	(21.67, 11.69, 2.93)	(22.99, 11.99, 3.01)

表2 传感器阵列安装在变电站4个角的定位结果

Table 2 Location results of antenna array arranged on 4 corners of substation

误差点数 n	传感器4 高度/m			
	0	5	10	15
0	(20.00, 10.0, -3.00)	(20.00, 10.0, 3.00)	(20.00, 10.0, 3)	(20.00, 10.0, 3.00)
1	(20.25, 10.0, 5.10)	(20.15, 10.2, 3.05)	(20.40, 9.7, 4)	(20.60, 9.6, 3.00)
2	(20.35, 10.0, 7.00)	(20.65, 9.6, 6.00)	(20.30, 9.9, 4)	(20.30, 9.8, 3.90)
3	(20.30, 10.2, 9.05)	(20.55, 9.8, 6.80)	(20.30, 10.5, 2)	(20.30, 10.5, 2.00)
4	(20.35, 10.6, 9.05)	(20.65, 9.4, 7.80)	(20.40, 10.6, 2)	(20.40, 10.6, 1.95)
5	(20.35, 10.6, 8.40)	(20.80, 9.6, 8.60)	(20.35, 10.7, 3)	(20.65, 10.6, 3.00)

从表 2 的结果分析知, 适当增加传感器 4 的高度可以提高系统的定位精度。从几何上分析, 4 个传感器在同一平面内 ($z_4=0$) 时, 关于 xoy 平面对称的点, 到 4 个传感器的距离分别相等, 故即使信号到达 4 个传感器的时差没有误差时, 定位结果也可能在关于 xoy 平面对称的点。结合式(16), 可以解释在采样率不够高时, 若不考虑传感器阵列安装、电磁波衰减等因素, 传感器阵布置在变电站 4 个角比布

由传感器阵列布置方式及表 1 的结果可得, 传感器阵列布置在变电站内部的小区域范围, 且布置范围大小相似时, xoy 平面投影为矩形的传感器阵列布置比投影为 Y 形的传感器阵列定位精确。结合式(16)的结果分析, 平面投影为矩形比 Y 形的周长更大。

3.2 传感器阵列布置分散度对定位误差的影响

4 个传感器的坐标分别为 $A_1(0, 0, 0)$, $A_2(50, 0, 0)$, $A_3(50, 30, 0)$, $A_4(0, 30, z_4)$ 。当 $z_4=0$ 时, 传感器阵列的示意图见图 5。

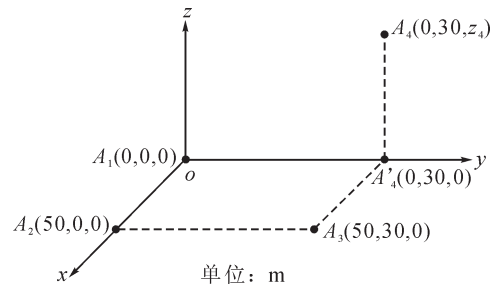


图5 布置在变电站 4 个角传感器阵列图

Fig. 5 Antennas array diagram arranged on four corners of the substation

通过理论分析和计算得, 在系统采样率为 25 GHz 的情况下, 该传感器布阵方式的定位误差比 3.1 节中小区域范围的布阵方式小得多。现比较采样率为 1.5 GHz, 传感器 4 高度 (z_4) 不同时, t_1 的误差 (以采样点数计) 引起的定位结果。假定局部放电源的位置在 $(20, 10, 3)$, 系统的定位结果见表 2。

置在变电站小区域内的布置方式, 定位结果更加精确。从定位结果分析知, 这种布阵方式下, 传感器阵列平面放置时, 局部放电源 xoy 平面的误差在 50 cm 以内。在传感器 4 的高度升高 10 m 后, 局部放电源的 z 坐标误差也在 1 m 以内。

4 测试实验

实验室测试验证传感器优化布置方式见图 6。

传感器布置见图6中的1、2、3、4号坐标点。第1种布置传感器阵列投影为矩形,第2种布置摆放在同一平面长方形的4个顶点上;第3种布置为第2种情况下传感器1号垫高0.26 m,而2、3、4号位置不变。模拟放电源P点位置为(0.35,3.86,2.28),单位为m。局部放电模拟器可以模拟不同放电量的针尖之间及针尖—板局部放电,其主要性能指标:模拟接触放电和空气放电500~16 500 V,误差在5%以内;放电脉冲上升时间0.6~1 ns,极性可正、负,连续放电最高可达20 Hz,产生的放电信号频谱在0~2 GHz范围。接收传感器的带宽为0.2~6 GHz,系统采用带存储功能的高速示波器作为信号采集系统,来同步采集并存储传感器阵列接收到的同一放电源辐射的超高频电磁波。示波器的带宽为6 GHz,采样率为25 GHz。

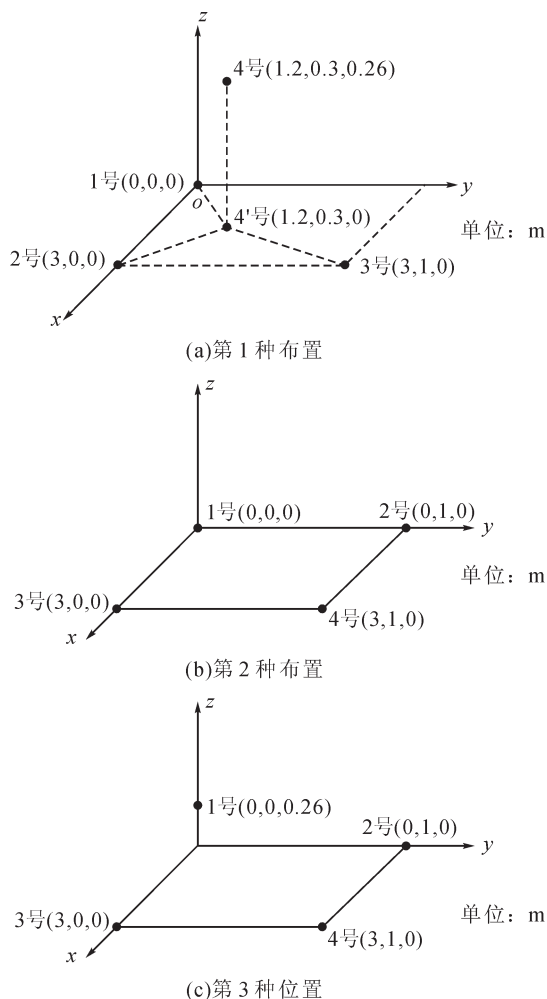


图6 实验室测试传感器布置

Fig. 6 Sensors placement in laboratory test

图6中的3种传感器布阵方式得到的局部放电源定位结果分别见表3~5。

表3中6组定位结果的平均位置为(0.47,4.19,2.49),单位为m。与实际的模拟局部放电源P点位

表3 第1种布置的定位结果

Table 3 Location results of the first case						m
坐标名称	对应数值					
x	0.42	0.48	0.53	0.58	0.42	0.38
y	4.12	4.18	4.28	4.21	4.20	4.16
z	2.55	2.52	2.56	2.40	2.44	2.48

表4 第2种布置的定位结果

Table 4 Location results of the second case						m
坐标名称	对应数值					
x	0.34	0.34	0.34	0.26	0.34	0.32
y	4.04	4.04	4.02	4.34	4.00	4.02
z	-2.46	-2.46	-2.52	-2.46	-2.46	-2.30

表5 第3种布置的定位结果

Table 5 Location results of the third case						m
坐标名称	对应数值					
x	0.36	0.32	0.36	0.36	0.36	0.36
y	4.00	4.10	4.00	4.00	4.00	4.00
z	2.40	2.52	2.46	2.40	2.40	2.40

置相比,定位的绝对误差为40.90 cm。

表4中6组定位结果的平均位置为(0.32, 4.08, -2.44),单位为m。从几何上分析,如果P和P'关于xoy平面对称,那么这2点到1、2、3、4号传感器的直线距离对应相等,故信号源在P和P'点,特高频信号传播到达同一传感器所需的时间相同,即到达2个传感器的时差也相同,故当4个传感器放在同一平面上的时候,定位结果有可能在放电源关于这个平面的对称点附近。

表5中6组定位结果的平均位置为(0.35, 4.02, 2.43),单位为m。与实际的模拟局部放电源P点位置相比,定位的绝对误差为29.68 cm,小于第1种Y型布置方法的定位误差,考虑传感器半径、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 结论

笔者在给出系统原理及实现方法的基础上,深入讨论了基于时差法的定位算法,分析其主要误差来源,理论推导了定位结果误差与传感器阵列布置及4路信号到达时差误差的关系,并最终给出了特高频传感器阵列布置的优化方法,得到如下结论:

1)局部放电源到达传感器时差的误差越小,定位误差越小;局部放电源的位置到传感器阵列的距离越近,定位误差越小。

2)利用基于传感器阵列和时延序列的局部放电定位算法得到变电站内局部放电源的精确位置,传

传感器阵列应布置得尽量分散。

3)适当增加传感器阵列中 1 个传感器的高度差, 可以提高局放源 z 坐标的精度;

4)若传感器阵列布置需在固定小区域范围时, xoy 平面投影 4 边形的周长越大, 越有利于局放源精确定位, 例如平面投影为矩形的传感器阵列布置比投影为 Y 形的传感器阵列定位精确。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MOORE P J, PORTUGUES I E, GLOVER I A. Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2264-2272.
- [3] 唐志国, 常文治, 王彩雄, 等. 超宽带射频技术对变压器多局部放电源的定位[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1612-1617.
TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, WANG Caixiong, et al. Multi-PD sources location by UWB RF detection in power transformers [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (7): 1612-1617.
- [4] 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.
TANG Ju, CHEN Jiao, ZHANG Xiaoxing, et al. Time difference algorithm based on energy relevant search of multi-sample applied in PD location[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(19): 125-130.
- [5] 唐志国, 李成榕, 常文治, 等. 变压器局部放电定位技术及新兴 UHF 方法的关键问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1): 36-40.
TANG Zhiguo, LI Chengrong, CHANG Wenzhi, et al. The partial discharge location technology of power transformer and the key issues of newly developed UHF method[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(1): 36-40.
- [6] 王 辉, 黄成军, 姚林鹏, 等. 利用重排分布理论的 GIS 局放信号时频分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2236-2241.
WANG Hui, HUANG Chengjun, YAO Linpeng, et al. Timer-frequency analysis of partial discharge for GIS using the theory of reassignment distribution[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2236-2241.
- [7] 段大鹏. 基于 UHF 方法的 GIS 局部放电检测与仿生模式识别[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
DUAN Dapeng. GIS partial discharge detection and biomimetic pattern recognition based on UHF method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [8] 侯慧娟, 盛戈皞, 苗培青, 等. 基于特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.
- [9] 张晓星, 王 震, 唐 炬, 等. 气体绝缘变压器局部放电特高频在线监测系统[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.
- [10] 苏育才, 姜翠波, 张跃辉. 矩阵理论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
SU Yucai, JIANG Cuibo, ZHANG Yuehui. Matrix theory [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [11] Ross S M, 龚光鲁. 应用随机过程概率模型导论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
ROSS S M, GONG Guanglu. Introduction to stochastic process probability model[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2007.
- [12] 刘君华, 姚 明, 黄成军, 等. 采用声电联合合法的 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 localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (10): 2458-2462.
- [13] REID A J, JUDD M D. Identification of simultaneously active PD sources using passive comparison of UHF signals [C]//Universities Power Engineering Conference (UPEC). Glasgow, UK: [s.n.], 2009: 1-4.
- [14] TENBOHLEN S, PFEFFER A, COENEN S. On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localisation [C]//Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium. Santiago, USA: [s.n.], 2010: 1-5.
- [15] MARKALOUS S M, TENBOHLEN S, FESER K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1576-1583.
- [16] LIU M J, LI Z H. An onlin UHF PD monitoring system for power transformer and its applications [C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Chengdu, China: PEEC, 2010: 1-4.
- [17] JUDD M D, LI Y, HUNTER I B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors, part I: Sensors and signal interpretation[J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2005, 21(2): 5-14.

(下转第 31 页)

- different compensation topologies in inductively coupled power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 133-139.
- [7] 王国东, 乔振朋, 王赛丽, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输拓扑结构研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(5): 58-63.
WANG Guodong, QIAO Zhenpeng, WANG Saili, et al. Research on topology of magnetically coupled resonant wireless power transmission[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 58-63.
- [8] 黄杰, 胡清, 聂蓉. 非接触电能传输系统补偿网络的建模分析[J]. 微计算机信息, 2009, 25(7): 263-265.
HUANG Jie, HU Qing, NIE Rong. Modeling analysis for compensation network of contactless power transfer system[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(7): 263-265.
- [9] SAMPLE A P, MEYER D A, SMITH J R. Analysis experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554.
- [10] SHIN J, SHIN S, KIM Y. Design and implementation of shaped magnetic resonance based wireless power transfer system for roadway powered moving electric vehicles[J]. Transactions on Industrial Electronics, IEEE, 2013, 61(3): 1179-1192.
- [11] SONG B, SHIN J, CHUNG S. Design of a pickup with compensation winding for on line electric vehicle (OLEV) [C]//Wireless Power Transfer (WPT). Perugia: IEEE, 2013: 60-62.
- [12] 邹爱龙, 王慧贞, 华洁. 基于 LCL 补偿的多负载移动式感应非接触电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4000-4006.
ZOU Ailong, WANG Huizhen, HUA Jie. The movable ICPT system with multi-loads based on the LCL compensation circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4000-4006.
- [13] 黄晓生, 陈为. 用于磁感应耦合式电能传输系统的新型补偿网络[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 3020-3026.
HUANG Xiaosheng, CHEN Wei. A novel compensation network for ICPT systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 3020-3026.
- [14] 杨民生, 王耀南, 欧阳红林, 等. 基于可控电抗器的无接触电能传输系统动态补偿[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 183-189.
YANG Minsheng, WANG Yaonan, OUYANG Honglin, et al. Dynamic compensation of contactless power transmission system based on controlled reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical, 2009, 24(5): 183-189.
- [15] 牛王强, 沈爱弟, 顾伟, 等. 可变负载非接触电能传输系统的无功功率补偿[J]. 上海海事大学学报, 2011, 12(1): 49-53.
NIU Wangqiang, SHEN Aidi, GU Wei, et al. Reactive power compensation for contactless power transfer systems with variable load[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2011, 12(1): 49-53.
- [16] 马皓, 孙轩. 原副边串联补偿的电压型耦合电能传输系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 48-52.
MA Hao, SUN Xuan. Design of voltage source inductively coupled power transfer system with series compensation on both sides of transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 48-52.
- [17] 张旭. 感应耦合式电能传输系统的理论与技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
ZHANG Xu. Research on theory and technique of inductive coupled power transfer system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [18] 陈珂睿. 非接触式电能传输系统功率传输效率研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
CHEN Kerui. Research on power and efficiency of inductively coupled power transfer system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [19] KIM S, PARK H H, KIM J. Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4): 1057.

陈忠华(1965—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为电接触理论及其应用、无线电能传输技术。

(上接第 25 页)

- [18] 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): 77-81.
LIU Junhua, YAO Ming, WANG Jiang, et al. A partial discharge location method based on the characteristics of the electromagnetic wave propagation route in GIS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 77-81.

熊俊(1983—), 男, 高级工程师, 长期从事电力生产技术管理工作。

杨森(1989—), 男, 助理工程师, 长期从事高压设备技

术监督、状态监测技术应用工作。

侯慧娟(1984—), 女, 博士, 长期从事电力设备在线监测与故障诊断。

李光茂(1987—), 男, 工程师, 长期从事高压设备技术监督、状态监测技术应用工作。

吴晓桂(1986—), 男, 助理工程师, 长期从事高压设备技术监督、状态监测技术应用工作。

陈敬德(1993—), 男, 硕士, 从事电力设备在线监测与故障诊断研究。

盛戈碑(1974—), 男, 副教授, 长期从事输变电设备状态监测及其智能化。