

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.09.021

基于时间反转聚焦成像的局部放电特高频定位方法

马鹏堦^{1,2}, 王致杰¹, 沈盼³, 王鸿¹, 杨皖昊¹, 付晓琳¹

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 国网盐城市大丰区供电公司, 江苏 盐城 224100; 3. 江苏宏源电气有限责任公司, 南京 211100)

摘要: 针对传统的到达时间差算法中时延估计存在误差的问题,提出了利用时间反转算法进行局部放电特高频定位的方法,该方法可以忽略波形模态的影响,无需直接进行时延估计。给出了该方法的具体步骤以及叠加和相乘两种幅值聚焦计算方式,分析了叠加和相乘两种幅值聚焦计算方式的特点。利用高斯—劳伦兹拟合函数局放模型,通过有限元分析软件进行仿真,验证了该方法的可行性,然后在实验室利用模拟放电源在气体绝缘组合电器气室内进行双通道定位实验,考虑了不同信噪比和多源情况对定位的影响,与时延定位法中的峰值法、互相关法以及能量积累法相比,该方法具有更高的定位精度,最后通过现场检测验证了该方法的实用性。

关键词: 特高频; 局部放电; 时间反转; 幅值聚焦; 定位

Partial Discharge UHF Localization Method Based on Time Reversal Focusing Imaging

MA Pengchi^{1,2}, WANG Zhijie¹, SHEN Pan³, WANG Hong¹, YANG Wanhao¹, FU Xiaolin¹

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. State Grid Yancheng Dafeng District Electric Power Company, Jiangsu Yancheng 224100, China; 3. Jiangsu Hongyuan Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of error of time delay estimation in traditional time difference of arrival (TDOA) algorithm, a time reversal (TR) algorithm for UHF localization of partial discharge (PD) is proposed. This method can ignore the influence of waveform modes and does not need to estimate the time delay directly. The specific steps of this method and the amplitude focusing calculation methods of superposition and multiplication are given. The characteristics of the two amplitude focusing calculation mode of superposition and multiplication are analyzed. Gauss-Lawrence fitting function model of partial discharge is used. The feasibility of the method is verified by the use of partial discharge model of Gaussian-Lorentz fitting function and by way of the finite element analysis software. Then, a two-channel positioning experiment is performed in the gas compartment of the gas-insulated combined switchgear by the use of simulation discharge source in the test laboratory and the influence of different signal/noise ratio and multiple sources on the positioning is considered. This method, compared with the peak method, cross-correlation method and energy accumulation method in the time-delay positioning method, has higher positioning accuracy. Finally, the practicality of this method is verified by field detection.

Key words: ultra-high frequency; partial discharge; time reversal; amplitude focusing; positioning

0 引言

电力设备的绝缘性能劣化程度可以通过局部放电(partial discharge, PD)表现出来,同时局部放电会加剧绝缘劣化^[1-4]。因此为了使电力设备安全可靠的运行,定期对电气设备进行局放检测,及时发现局部放电并对放电源进行精准定位具有重要

意义^[5-6]。

到达时间差(time difference of arrival, TDOA)算法是目前特高频(ultra-high frequency, UHF)局部放电定位的基本方法,TDOA算法的原理简单,其中时差提取的准确度决定了局放源定位的精度。在最常用的信号波形特征点法^[7]中,UHF信号初始峰确定是解决精确定位的关键所在,而初始峰确定

收稿日期:2022-03-20; 修回日期:2022-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477099);上海市自然科学基金资助项目(15ZR1417300)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477099), Natural Science Foundation of Shanghai (15ZR1417300).

受波器采样率、现场干扰以及检测人员的经验制约^[8]。为了提高UHF法对PD定位的精度,国内外学者提出了多种用于求取时间差的方法以减少计算误差,如互相关函数法^[9]、能量积累法^[10]等。在低信噪比时,互相关函数法时延估计值更为准确,但是高信噪比会导致时延估计值误差过大;能量积累曲线也可能在脉冲信号到达前因干扰等情况的影响而出现拐点,导致信号起始时刻的误判断^[11]。上述时差提取法主要是对波形特征的辨别和提取,仍然存在一定误差。文[11]默认时延误差的存在,通过粒子群算法对定位结果进行优化,缩小误差;文[12]利用伪信号起始时刻法建立PD定位方程组,并利用静态伪距方程代数法求解该非线性方程组,不仅提高了算法的求解速度,还降低了算法迭代时对初值的依赖性。

为了避开求取时差和算法精度带来的误差以及超高采样率带来的硬件开销,文中利用时间反转法(time reversal, TR)进行特高频局部放电定位,在无需求取时差的情况下可以对PD源进行定位。时间反转技术最先应用于声学^[13-14],可分为两个步骤:①记录不同传感器接收到的信号源发出的信号;②将接收到的信号进行时间反转,在对应的传感器处通过介质追踪回去,即先到后发、后到先发,是有效实现信号源信号重构的一种方法^[15-16]。根据互易原理,经过TR变换的信号在信号发生处产生聚焦^[17],这样就无需考虑波形模态的干扰,在时空上让信号源再次聚焦,在相位不变的情况下,信号在同一时刻汇聚到一点,此时信号能量也没有变化^[18-19]。

文中将时间反转技术用于局部放电特高频定位,首先给出了基于时间反转聚焦成像的局部放电特高频空间定位方法的具体步骤,以及聚焦时刻每个点能量幅值计算的两种方法:叠加和相乘;然后通过有限元分析软件在二维平面进行仿真分析,研究了该方法的可行性,分析了每个点的两种能量幅值计算方法的特点;在实验室利用人工模拟放电源在气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)气室内进行双通道定位实验,并与其他3种定位方法进行对比分析,验证了该方法的有效性,分析了不同信噪比(signal-noise ratio, SNR)和多源情况对定位结果的影响;最后,将该方法应用于变电站内开关柜PD定位中,进一步验证了该方法的实用性。

1 TR定位方法

1.1 TR基本原理

时间反转处理方式具有自适应性,可在传播介质

和传感器传递特征未知的情况下,实现对信号源的聚焦^[20]。传输介质和传感器组成信号传输系统^[21],如在某种传输介质中,传感器接收到信号源 $A(\omega)$ 传来的信号,则接收到的信号 $S(\omega)$ 可表示为

$$S(\omega) = A(\omega) \cdot H(r, \omega) \quad (1)$$

式(1)中: $H(r, \omega)$ 为传输介质的传递函数; r 为传感器到信号源的距离; ω 为角频率。

将时域上的信号 $S(t)$ 进行时间反转,即在信号 $S(\omega)$ 的频域取共轭^[22],经过TR变换的信号 $S(-t)$ 可表示为

$$S(-t) = S^*(\omega) = A^*(\omega) \cdot H^*(r, \omega) \quad (2)$$

式(2)中,*为卷积符号。

由互易性原理可知,当传播路径不变时,传感器和信号源的位置可以交换,且频率响应不变。因此将信号 $S^*(\omega)$ 由对应传感器发出,信号源处接收到的信号 $C(\omega)$ 可表示为

$$C(\omega) = A^*(\omega) \cdot H^*(r, \omega) \cdot H(r, \omega) \quad (3)$$

式(3)中, $H^*(r, \omega) \cdot H(r, \omega)$ 为实、偶、正函数,相同相位的傅里叶逆变换会在时间零点相互叠加,并生成主相关峰值,将几个传感器接收到的信号均利用该方法操作时,多个信号同时累加,信号发生处的信号幅值由于聚焦明显增强,这就是TR聚焦的基本原理。

1.2 PD源信号增强方法

若将上述TR聚焦方法用在PD定位中,在没有外加激励信号的情况下,PD信号由产生绝缘缺陷的地方发出,见图1。PD信号通过不同传播路径进行传播,最终被不同位置的传感器接收,然后将接收到的PD信号进行TR变换,并将其在对应的传感器上发出,最终在PD信号发出的地方增强形成聚焦。由于信号源自身信号不强,信号经过TR变换发射出去后再次被接收,加上干扰信号的存在,这将会影响定位的精确度,为了避免能量损失及干扰信号的二次影响,利用数据处理的方式实现TR聚焦。

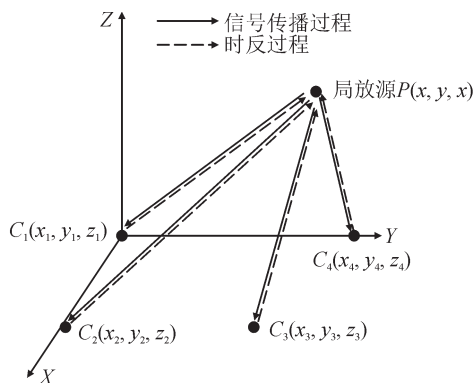


图1 局放信号传播及时反示意图

Fig. 1 Schematic diagram of local signal propagation and time reversal

图1中,假设PD源发出的信号为 $P(\omega)$,图中4个传感器接收到的信号分别为 $C_i(\omega)$, $i=1,2,3,4$,令PD源到各个传感器的传播通道传递函数为 $H_i(\omega)$, $i=1,2,3,4$,那么各个传感器接收到的信号和信号源有如下关系

$$C_i(\omega) = P(\omega)H_i(\omega) \quad (4)$$

各个传感器接收的信号都是由信号源发出,按照TR聚焦原理,将这些信号进行TR变换,PD信号将于特定的时间在各自所对应的传感器上激发出去,使得激发出去的这些信号能够在信号源处实现时间和空间上的聚焦。根据上述条件推导出此时在PD源处得到的信号 $P'(\omega)$ 可表示为

$$P'(\omega) = \sum_{i=1}^4 C_i^*(\omega)H_i(\omega) = \sum_{i=1}^4 P^*(\omega)H_i^*(\omega)H_i(\omega) \quad (5)$$

式(5)中, $H_i^*(\omega)H_i(\omega)$ 其实就是对PD信号的时间反转聚焦叠加,所以信号 $P'(\omega)$ 的波峰幅值能够得到增强,并能够超过实际PD信号 $P(\omega)$ 中的最大波峰的幅值,因此该处理能够使得PD信号得到聚焦并增强。

1.3 PD源信号聚焦成像方法

当 P 点处产生局部放电时,假设局放信号在 t_0 时刻发出,最后一个传感器接收到信号的时间为 t_1 ,取 $t_2 > t_1$,截取 $t_2 - t_0$ 时间段的特高频信号进行TR变换,得到的信号为 f_n ,假设共有 N 个传感器,则 $n=1,2,\dots,N$ 。将 f_n 同时在对应的传感器上发出,在局放源 P 处聚焦信号,则聚焦时刻 t_3 可表示为

$$t_3 = t_2 - t_0 \quad (6)$$

在整个检测空间中任取点 $Q(x_i, y_j, z_k)$,则在聚焦时刻该点的能量幅值可以通过式(7)、(8)得出

$$A_{ijk} = \sum_{n=1}^N K f_n(t_{nijk}) \quad (7)$$

$$t_{nijk} = t_3 - \frac{\sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_j - y_n)^2 + (z_k - z_n)^2}}{v} \quad (8)$$

式(7)、(8)中: A_{ijk} 为 Q 点通过叠加得到的能量幅值; K 为传感器的放大系数; $f_n(t_{nijk})$ 为第 n 个传感器接收到的信号通过TR变换后传播至 Q 点的幅值; $C_n(x_n, y_n, z_n)$ 为第 n 个传感器的坐标; v 为信号传播速度,特高频为电磁波可以用光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s进行计算。

此外,聚焦时刻该点的能量幅值还可以通过式(9)相乘^[23]的方式得到

$$B_{ijk} = \prod_{n=1}^N K f_n(t_{nijk}) \quad (9)$$

基于时间反转聚焦成像的局部放电特高频定位流程见图2。

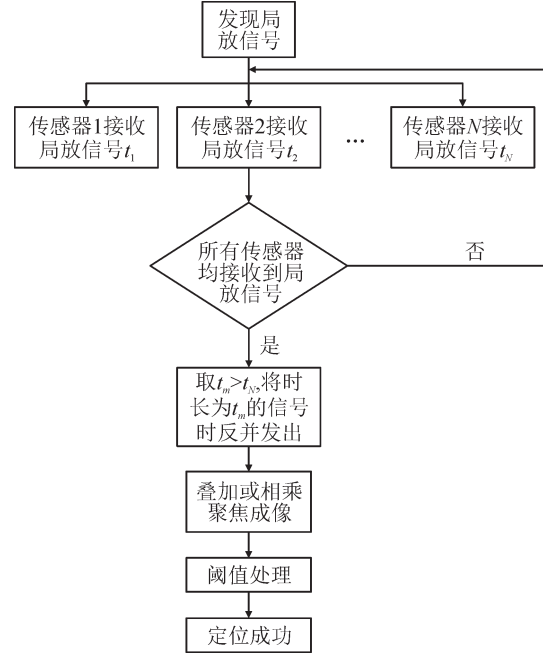


图2 定位流程图

Fig. 2 Positioning flow chart

2 仿真分析

为了验证时间反转算法在局部放电特高频定位中的可行性,利用有限元分析软件在二维平面上进行仿真。首先建立一个平面模型,尺寸为400 cm × 400 cm,布置4个传感器 C_1 – C_4 ,坐标分别为(200 cm, 200 cm)、(200 cm, -200 cm)、(-200 cm, -200 cm)和(-200 cm, 200 cm),设置模拟放电源的位置为(0 cm, 0 cm),仿真信号由式(10)高斯–劳伦兹拟合函数^[24]给出

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \exp\left[-\frac{(x - b_i)^2}{c_i^2}\right] \quad (10)$$

式(10)中:参数 a_i 为波峰的高度; b_i 为波峰所在位置的横坐标的值; c_i 表示波峰的陡度; n 为放电脉冲极值的数量。

由于波峰和波谷幅值的正负值会对成像结果造成影响,这里取TR变换后信号的绝对值,可以避免多个聚焦峰值的出现。用叠加和相乘计算能量幅值的聚焦成像分别见图3、4。其中,叠加聚焦得到的最大幅值为3.359 783 mV,坐标位置为(1 cm, 0 cm);相乘聚焦得到的最大幅值为0.498 058,坐标位置为(0 cm, 0 cm),均与设置的模拟放电源的位置相吻合,所以PD源的真实位置可以通过能量幅值最大点求得。

另外,根据两种幅值聚焦理论计算方式以及图3、4的聚焦成像结果对比两种幅值聚焦计算方

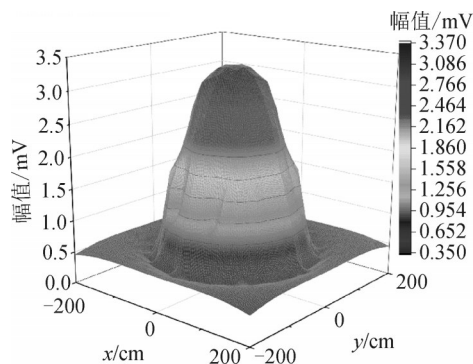


图3 幅值叠加聚焦

Fig. 3 Amplitude superposition focusing

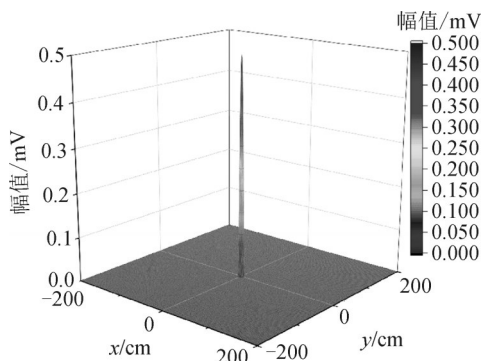


图4 幅值相乘聚焦

Fig. 4 Amplitude multiplication focusing

法,可以发现:叠加时,只要参与叠加的信号幅值不都为零,在成像图中都会显示出来,相邻成像点的幅值变化较小,成像图较为平滑,能够较为真实的反映出实际幅值大小和幅值变化情况,在聚焦点,所有信号在一点进行累加,幅值更高,颜色也越深,但是由于幅值变化趋势不明显,对于阈值处理要求也更高,聚焦点不突出;相乘时,只要出现幅值是零或者接近零的信号,得到的幅值就会为零或者非常微弱,在成像图中也很难显示出来,相邻点的幅值变化也会较大,突出聚焦点,减少小信号造成的干扰,快速准确地定位出局放源的位置,但是只要有信号出现误差,就会放大误差,容错率比求和方式低。

3 实验验证

3.1 实验平台及数据处理

为了进一步检验TR法的有效性,在实验室的GIS气室内进行模拟放电源的双通道定位实验。PD定位实验平台见图5。选取一段长300 cm的GIS直筒,模拟放电源采用实验室制作的针—板放电模型^[25],见图6(a)。示波器的型号为LeCroy8254,带宽为2.5 GHz,最大采样率为20 GSa/s,为了消除信号传输过程中的时延误差,将UHF传感器经过相同长度的同轴电缆直接连接到示波器。以盆式绝缘子A为

原点建立坐标系,将特高频传感器放置在A、B两个盆子处,放电源位置在145 cm处。示波器采集到的信号波形见图7,经过TR变换后的结果见图8,叠加聚焦和相乘聚焦得到的幅值分布见图9,最大值均在142.8 cm处,说明PD信号在该位置形成聚焦。该位置即通过定位得出的PD源位置,定位误差为2.2 cm,在误差允许范围内。另外,图9的聚焦图进一步验证了叠加聚焦的连续性和相乘聚焦的突出性。

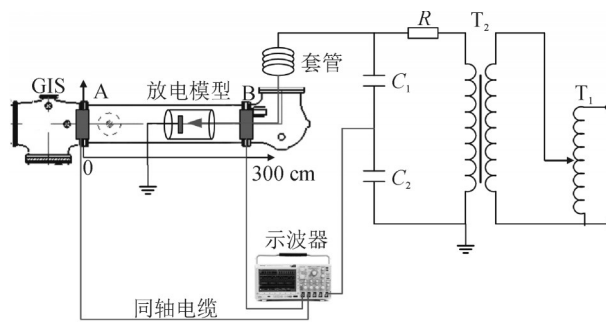


图5 GIS气室及坐标建立示意图

Fig. 5 Diagram of GIS and coordinate establishment

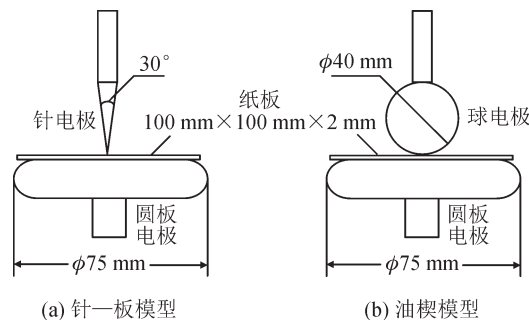


图6 针—板模型和油楔模型结构

Fig. 6 Needle plate model and oil wedge model

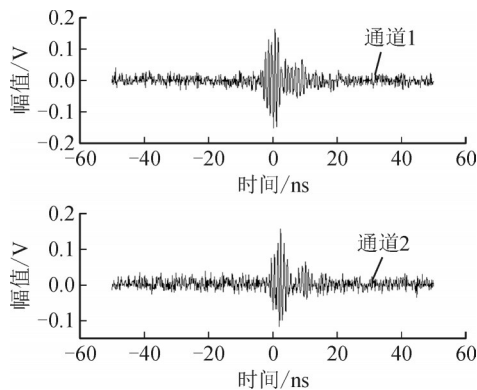


图7 双通道示波器采样信号

Fig. 7 Sampling signal of two-channel oscilloscope

3.2 白噪声对定位精度的影响

进一步地,为了分析TR法在不同信噪比下的定位效果,将检测到的PD信号(图7)人为添加不同程度的高斯白噪声,得到不同SNR下的聚焦幅值曲线见图10。由图10可知,即使SNR较低时,TR方法仍然能够很好的在局放源位置实现聚焦。为了对

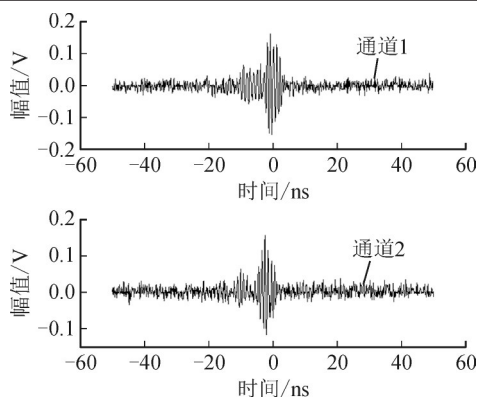


图8 时间反转后的信号

Fig. 8 Time reversal signal

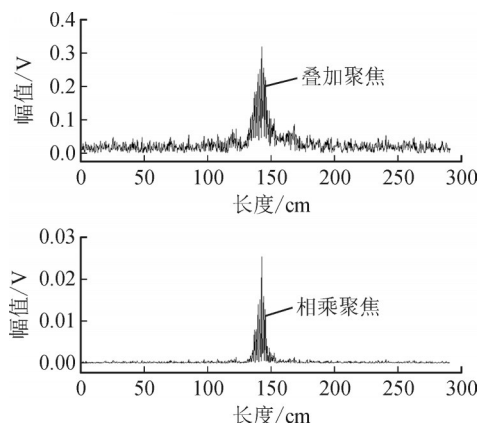


图9 双通道聚焦幅值

Fig. 9 Two-channel focusing amplitude

比验证文中时间反转法的精确性,分别使用峰值法、互相关法和能量积累法对局放源进行定位,定位结果见表1。

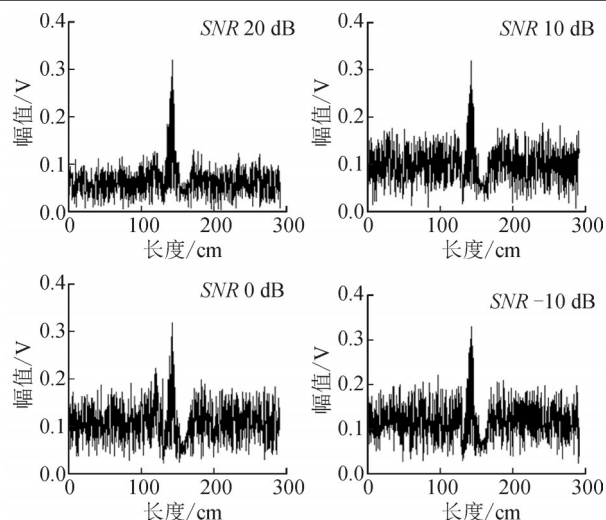
由图10和表1的结果可知,TR法的定位结果优于相比较的其他方法。并且TR法具有较好的抗噪能力,同时随着SNR的降低,TR方法的定位误差明显小于其他方法。

3.3 多PD源情况下的定位结果

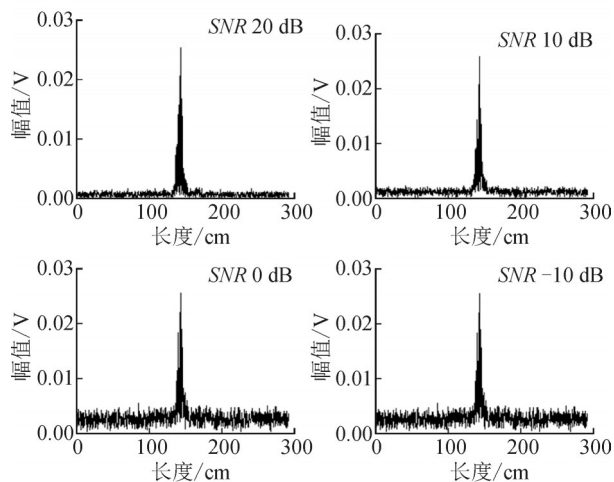
为了测试TR法在多PD源情况下的定位效果,增加油楔放电模型^[25],如图6(b)所示,并与针—板模型同时进行定位实验。将两个模拟放电源分别放在50 cm和250 cm处,TR法定位结果见图11,两个PD源定位结果分别为42.9 cm和244.2 cm,误差为7.1 cm和5.8 cm,与单源定位结果相比,定位误差有所增大,但仍在误差允许范围内,同时也说明TR法能实现对不同类型PD源的定位。

4 现场测试

为验证TR定位法在现场真实环境中的有效性和准确性,将其应用在现场局部放电特高频定位中。在某变电站的局部放电检测过程中,发现某开



(a) 不同SNR下叠加定位结果



(b) 不同SNR下相乘定位结果

图10 不同SNR下定位结果

Fig. 10 Localization results under different SNR

关柜内的超声波和特高频信号异常,利用PMDT-PDetector手持式多功能局放测试仪现场记录的超声波图谱见图12,10 ms时基下的特高频信号见图13。两种检测图谱都具有工频周期性,初步判定为绝缘缺陷产生的PD信号。

随后对该放电信号进行定位。首先,利用超声波幅值定位法进行初步定位,判断放电源位于开关柜后侧中上部,放电信号可能由母线室传出。然后,利用TR法进行特高频精确定位。根据开关柜的尺寸建立的坐标系见图14,点划线是开关柜后侧的缝隙,小方框是开关柜背部的观察窗,4个传感器 C_1 – C_4 分别放在缝隙处和观察窗处采集特高频信号,并通过改变传感器的位置进行多次定位,TR法计算结果的平均位置坐标为(20.6 cm, 145.2 cm, 198.1 cm)。结合开关柜图纸分析,判断PD源位于A相母排处。

表1 不同SNR下各种定位方法结果对比

Table 1 Results of various positioning methods under different SNR

定位方法	20 dB		10 dB		0 dB		-10 dB	
	定位结果/cm	绝对误差/cm	定位结果/cm	绝对误差/cm	定位结果/cm	绝对误差/cm	定位结果/cm	绝对误差/cm
峰值法	136.9	8.1	134.2	10.8	155.3	10.3	133.3	11.7
互相关法	139.4	5.6	139.3	5.7	150.2	5.2	138.6	6.4
能量积累法	141.7	3.3	140.2	4.8	149.9	4.9	139.6	5.4
TR法	142.8	2.2	142.8	2.2	147.4	2.4	142.5	2.5

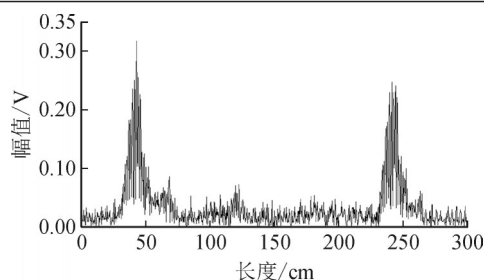
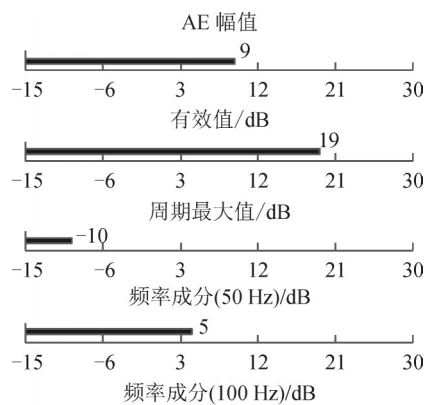
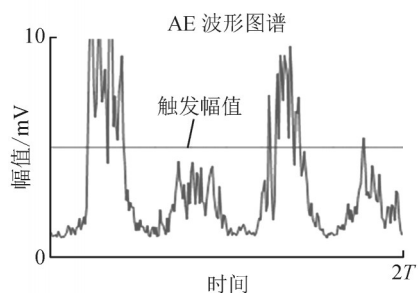


图11 多源定位结果

Fig. 11 Result of multi-source positioning



(a) AE 幅值



(b) AE 波形

图12 超声波检测图谱

Fig. 12 Ultrasonic inspection chart

停电后,通过检查发现,由于A相母排与黄色绝缘板距离太近,从而导致母排对绝缘板放电,母排和绝缘板有明显的烧蚀痕迹,见图15(a)。对A相的绝缘板进行改造,加大A相母排与绝缘板之间的距离,并对母排放电处进行打磨处理,处理后照片见图15(b)。在对开关柜完成解体处理并送电24 h后,进行局放复测,发现PD信号消失,缺陷处理成功。

经实际测量,TR法成功定位出放电缺陷,并且

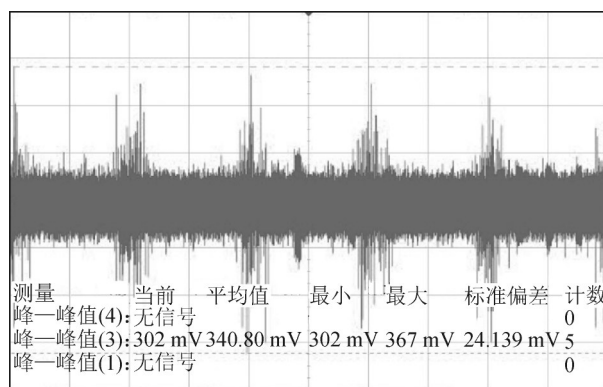


图13 10 ms时基下的特高频信号

Fig. 13 UHF signal at 10 ms time base

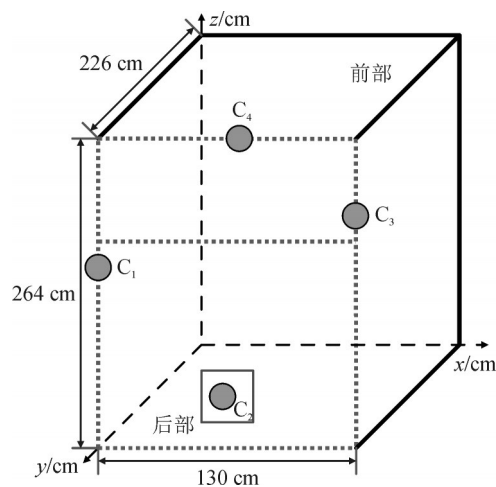


图14 坐标系建立及UHF传感器位置示意图

Fig. 14 Diagram of coordinate system establishment and UHF sensor position

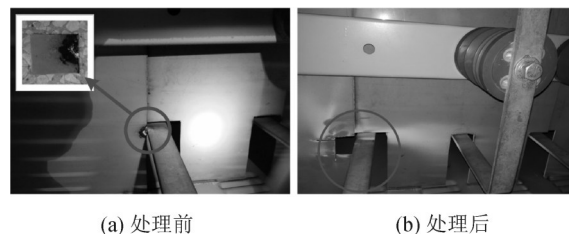


图15 故障点示意图

Fig. 15 Diagram of fault point

满足局部放电定位精度要求,验证了TR法良好的实用性。经实际测量,TR法成功定位出放电缺陷,并且满足局部放电定位精度要求,验证了TR法良好的实用性。

5 结论

针对传统的TDOA算法中时延估计存在误差的问题,开展了相关研究,主要结论如下:

1)提出了利用TR法进行局部放电特高频定位的方法,该方法可以忽略波形模态的影响,无需直接进行时延估计。将仿真和实验结果与3种常用的提取时间差的方法进行了对比,验证了该方法在不同信噪比和多源情况下的可行性和准确性,同时TR法也能够对不同类型的PD源进行定位,并通过现场检测验证了TR法的实用性。

2)对叠加和相乘两种幅值聚焦计算方法进行了对比,发现叠加方式能反映幅值连续变化情况,相乘方式下幅值聚拢性强,更能突出局放源的位置。

参考文献:

- [1] 陈敬德,高兆丽,罗林根,等.基于BP神经网络的特高频局部放电定位误差校正[J].高电压技术,2018,44(6):2040-2047.
CHEN Jingde, GAO Zhaoli, LUO Linggen, et al. Error correction of UHF partial discharge location method based on BP network[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2040-2047.
- [2] 刘 溟,张锡洋,邹建明,等.三维定位方法在变电站局部放电检测中的应用[J].电测与仪表,2019,56(5):111-118.
LIU Ming, ZHANG Xiyang, ZOU Jianming, et al. Application of three-dimensional location method of partial discharge detection in substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5):111-118.
- [3] 余昌佳,梅 飞,叶昱媛,等.基于优化VMD与噪声估计的间隔阈值局部放电去噪方法[J].高压电器,2020,56(3):141-149.
SHE Changjia, MEI Fei, YE Yuyuan, et al. Partial discharge signal denoising method based on optimized VMD and noise estimation for interval threshold[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):141-149.
- [4] 刘佳鑫,毕海涛,郎业兴,等.GIS自由颗粒放电缺陷的联合检测与分析[J].高压电器,2020,56(1):175-180.
LIU Jiaxin, BI Haitao, LANG Yexing, et al. Joint detection and analysis for free particle discharge defect in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):175-180.
- [5] 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]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19):125-130.
- [6] 徐学伟,李静鹏,马 驰,等.基于UHF信号特征参数指纹图谱的局部放电定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(24):84-91.
XU Xuewei, LI Jingpeng, MA Chi, et al. A partial discharge localization method based on fingerprint spectrum of UHF signal feature parameter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24):84-91.
- [7] 陈 敏,卢 军,陈 隽,等.GIS局部放电源的时差定位方法研究[J].高压电器,2014,50(5):46-50.
CHEN Min, LU Jun, CHEN Jun, et al. Research on localization method of partial discharge source in GIS based on time difference[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5):46-50.
- [8] 唐 炬,张晓星,曾福平.组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断[M].北京:科学出版社,2016.
TANG Ju, ZHANG Xiaoxing, ZENG Fuping. UHF detection and fault diagnosis of partial discharge of combined electrical equipment[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [9] 刘佳鑫,唐佳能,郎业兴.基于插值互相关函数的GIS局部放电特高频时差定位方法[J].高压电器,2018,54(2):62-67.
LIU Jiaxin, TANG Jianeng, LANG Yexing. Approach for time-delay location of UHF signals of GIS partial discharge based on interpolating cross-correlation function[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2):62-67.
- [10] 侯慧娟,盛戈皞,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.
- [11] 李 沐,冯新岩,蔺晓琨.基于TDOA和TS-PSO的变压器特高频局部放电空间定位方法[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1834-1842.
LI Mu, FENG Xinyan, MAN Xiaokun. A transformer partial discharge UHF localization method based on TDOA and TS-PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6):1834-1842.
- [12] 王振浩,熊 毅,龙 超,等.基于伪信号起始时刻代数求解的变电站局放定位[J].电测与仪表,2017,54(8):93-98.
WANG Zhenhao, XIONG Yi, LONG Chao, et al. Partial discharge location in substation based on algebraic solution to pseudo-time of signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8):93-98.
- [13] 李元奇.基于时间反转的雷达目标成像方法研究[D].成都:电子科技大学,2017.
LI Yuanqi. Research on the imaging method based on time-reversal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

- [14] 魏 炜,汪承灏.有平界面存在时时间反转法的自聚焦性能[J].应用声学,1999(3):1-5.
WEI Wei, WANG Chenghao. Self - adaptive focusing by time reversal through interface between different media[J]. Journal of Applied Acoustics, 1999(3):1-5.
- [15] WU F, THOMAS J L, FINK M. Time reversal of ultrasonic fields - Part II: Experimental results[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect, Freq., Contr., 1992, 39(5):567-578.
- [16] 郑文军.复杂多散射环境下EM-TRM成像技术应用研究[J].电子科技大学学报,2013,42(3):46-49.
ZHENG Wenjun. Application of EM - TRM imaging technique in complex and multi-scattering environment[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(3):46-49.
- [17] FINK M. Time - reversal of ultrasonic field - Part I: Basic principles[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect, Freq., Contr., 1992, 39(5):555-566.
- [18] 王 强,袁慎芳.复合材料板脱层损伤的时间反转成像监测[J].复合材料学报,2009,26(3):99-104.
WANG Qiang, YUAN Shenfang. Time reversal imaging method for composite delamination monitoring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3):99-104.
- [19] 张海燕,孙修立,曹亚萍,等.基于时间反转理论的聚焦Lamb波结构损伤成像[J].物理学报,2010,59(10):7111-7119.
ZHANG Haiyan, SUN Xiuli, CAO Yaping, et al. Structural damage imaging based on time-reversal theory for focusing of Lamb waves[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10):7111-7119.
- [20] 李 昕,罗更生,龙盛蓉,等.钢板声发射时间反转聚焦增强定位方法[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1792-1799.
LI Xin, LUO Gengsheng, LONG Shengrong, et al. Location method of acoustic emission by time reversal focusing and enhancing for steel plate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1792-1799.
- [21] 李秋锋,陈建娟,何才厚,等.基于时间反转聚焦的声发射源定位算法[J].传感技术学报,2015,28(11):1659-1663.
LI Qiufeng, CHEN Jianjuan, HE Caihou, et al. Location algorithm for source of acoustic emission based on time reversal[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(11):1659-1663.
- [22] 王少锋,王道瑞,王建国.基于压电换能器的声发射源定位成像研究[J].压电与声光,2019,41(3):421-424.
WANG Shaofeng, WANG Daorui, WANG Jianguo. Research on acoustic emission source localization imaging based on piezoelectric transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(3):421-424.
- [23] 彭国平,张在东,卢 超,等.焊缝声发射源二维时间反转成像定位方法研究[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2017,31(3):90-94.
PENG Guoping, ZHANG Zaidong, LU Chao, et al. Study on 2D location imaging method of acoustic emission source based on time reversal for weld seam[J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2017, 31(3):90-94.
- [24] 周 倩,唐 炬,唐 铭,等. GIS内4种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J].中国电机工程学报,2006,26(8):99-105.
ZHOU Qian, TANG Ju, TANG Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8):99-105.
- [25] 程养春,张振亮.基于随机森林的变压器多源局部放电诊断[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5246-5256.
CHENG Yangchun, ZHANG Zhenliang. Multi-source partial discharge diagnosis of transformer based on random forest[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17):5246-5256.

马鹏辉(1993—),男,硕士,助理工程师,主要从事电力设备带电检测技术方面的研究(E-Mail: 1145849211@qq.com)。

王致杰(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为电气设备故障诊断。