

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209068

基于微观和统计信息的 GIS 局部放电定位技术

罗颖婷 江俊飞 王磊 石墨 鄂盛龙 李晖 许海林
(广东电网有限责任公司电力科学研究院 广州 510080)

摘要: 特高频时差定位法由于对放电脉冲到达时间差的计算精度要求较高,难以在局部放电监测的实际场景中广泛应用。本文提出了一种基于微观信息和统计信息的 GIS 局部放电定位技术,首先利用放电脉冲的微观信息检定到达时间并修正时间差,然后利用多次定位结果的概率分布确定最终定位结果。现场实验和案例分析表明,该局部放电定位技术能够提高局部放电定位的精度和抗噪声干扰能力,并且无论是单个放电缺陷还是多个放电缺陷,都能够准确定位到放电源的位置。

关键词: 特高频时差定位法;局部放电;微观信息;统计信息

中图分类号: TM595;TM855;TM835 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4037

Partial discharge location technology in GIS based on micro information and statistical information

Luo Yingting Jiang Junfei Wang Lei Shi Mo E Shenglong Li Hui Xu Hailin
(Institute of Electric Power Science, Guangdong Power Grid, Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: UHF time difference location method is difficult to be widely used in pd monitoring scenarios because of its high requirement on the calculation accuracy of arrival time difference of discharge pulses. In this paper, a technique of partial discharge location in GIS based on micro-information and statistical information is proposed. Firstly, the micro-information of discharge pulse is used to verify the arrival time and correct the time difference, and then the probability distribution of multiple location results is used to determine the final location result. Field experiments and case studies show that this method can locate the power supply accurately no matter it is a single discharge defect or multiple discharge defects.

Keywords: UHF time difference location method; partial discharge; micro information; statistics

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因其绝缘性能好、结构紧凑^[1-2]、不易受环境影响,已被广泛应用到高压输变电系统中。然而,在制造、运输、安装以及运行的过程中,GIS设备的内部都有可能产生各种绝缘缺陷,引发局部放电。由于GIS内部电场结构相对较均匀,所以局部放电一旦发生则非常容易迅速扩大发展,最终导致设备故障,威胁到电网的安全运行^[3-5]。因此,及时对GIS中局部放电现象进行监测和定位具有十分重要的意义^[6-8]。

当前已发展得较为成熟的局部放电在线监测技术有特高频检测法^[9-12]、超声波检测法^[13-14]等。但是超声信号在GIS中传播过程中衰减较快,且易受设备振动的干扰,因此超声波检测法一般不适用于GIS的局部放电在线监测。特高频检测法具有抗干扰能力强、灵敏度高、不受机械振动的

影响等特点,是当前局部放电在线监测的主要手段。

特高频检测法可以根据放电脉冲产生的电磁信号到达各传感器的时间差来计算放电源与传感器的距离。因此获取准确的到达时间差,是放电定位结果可靠的前提。

在确定到达时间差(TDOA)方面,目前有能量累计法^[15-16]、第一峰值法^[15,17]、阈值法^[18]、相关法^[19-20]等方法。文献[15]应用第一峰值法和能量累计法,与基于WT+EBWS和NWLDS方法的滤波技术与测量仪器的采样误差补偿相结合,来确定到达时延;文献[18]提出平均时间窗阈值法,即通过确定超高频信号的绝对值或平方值超过预定义的阈值来确定顶到达时间差;文献[19]提出一种基于线性预测分析的时差估计方法,先对实际采集的特高频信号做预测分析,利用先获得的若干个采样信号表示之后某一时刻的采样信号,然后用广义相关法进行时差估计。由于噪声的影响,现场实测中难以精确定位信号波形中第一峰

值,从而造成误差。特别是当信噪比较低时,噪声将信号淹没,现场实测信号通过能量累计法和阈值法难以准确捕捉到信号的到达时间。另一方面,这些方法通常需要进行较复杂的计算,大大地增加了监测设备的运算处理时间。

针对以上问题,本文提出了一种利用放电脉冲的微观信息和定位结果的统计信息的局部放电定位技术。首先利用放电脉冲的微观信息提高时间差的计算精度。然后利用多次定位结果的概率分布确定最终定位结果。在不提高设备成本的前提下,不仅提高了局部放电定位的精度和抗噪声干扰能力,避免了复杂的计算,缩短监测设备的运行时间,并且能同时定位多个放电缺陷。

1 特高频局部放电时差定位法

在 GIS 设备的局部放电监测过程中通过检测放电脉冲产生的特高频(0.3 G~3 GHz)信号,以排除周围环境中其他噪声和电磁干扰的影响,抗干扰能力较强。利用特高频传感器接收电磁波,根据放电脉冲到达两个传感器的时间差可以确定放电源与传感器之间的距离^[21-22],是被广泛应用于输、变电设备的局部放电定位中。

如图 1 所示,假设 P 为局部放电缺陷所处的位置, A 和 B 是分别位于局部放电缺陷 P 两侧的传感器 1 和 2 所处的位置,它们之间的距离为 D 。假设一个放电脉冲产生的电磁波从点 P 到达点 A 和 B 的时刻分别为 t_1 和 t_2 ,电磁波在 GIS 内的传播速度为光速 c 。点 P 到 A 、 B 两点的距离 d_1 和 d_2 可分别表示为:

$$d_1 = ct_1 \tag{1}$$

$$d_2 = ct_2 \tag{2}$$

则点 P 到传感器 A 的距离 d_1 可改写为

$$d_1 = ct_1 = D - ct_2 = \frac{D - ct_2 + ct_1}{2} = \frac{D - c(t_2 - t_1)}{2} \tag{3}$$

令 t_1 和 t_2 的时间差表示为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{4}$$

只要获得 t_1 和 t_2 的时间差,就可以得到 d_1 ,距离 d_1 可表示为:

$$d_1 = \frac{D - c\Delta t}{2} \tag{5}$$

由于两个传感器之间的位置和电磁脉冲的传播速度都是确定的,因此决定定位结果精确度的关键是时间差的测量和计算。而由于电磁脉冲以光速传播,因此在几米的距离以内产生的纳秒级别时间差,这对时间差测量的精度的要求是非常高的。另外,在实际的电力设备局部放电场景中,由于机械振动或者周围环境产生的噪声干扰经常存在的,严重影响局部放电定位。

2 脉冲到达时间差检定修正

考虑到局部放电脉冲波形含有丰富的微观信息,本文

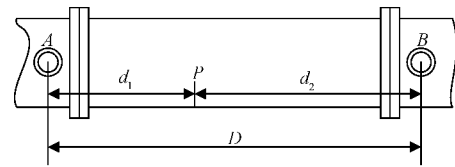


图 1 基于特高频时差定位法示意图

将利用采集到的脉冲波形中的微观信息来完成脉冲到达时间的检定以及对到达时间差的修正。

2.1 脉冲到达时间的检定

局部放电是一种快速上升,缓慢下降的脉冲波形,因此采用上升沿触发机制,以传感器检测到的脉冲电压超过设定阈值的时刻作为脉冲到达传感器的时刻。在这种检定机制下,即使脉冲的大量折反射都在后面到达,不会对率先到达传感器的电磁波波头的检定造成影响。由于局部放电的放电时间相对于其绝缘恢复时间来说很短,即对于某个缺陷,其放电一次后需要比较长的绝缘恢复时间才会出现下一次放电,因此即使 GIS 内同时存在多个缺陷,它们在 $1 \mu s$ 内同时放电,致使波形图完全重合的概率很小。另外,特高频脉冲的长度很短,通常在几十纳秒内衰减, $1 \mu s$ 的采样时间足够包络一个完整的放电脉冲。因此取 $1 \mu s$ 作为采样长度,可以保证当 GIS 内存在多个局部放电缺陷的时候,他们的放电脉冲能够分别被触发采集,从而实现多个放电源的定位。

由于每个脉冲的峰值都不同,到达不同的传感器时的衰减程度不同,因此检测阈值也不应是固定的。本文采用动态阈值法进行检测,如图 2 所示,当采样率在 100 Ms/s 时,每 μs 可采样 100 次。每次上升沿触发时,同时保存触发时刻前 20 个采样点和触发时刻后 80 个采样点,然后将传感器采集到的前 m 个点的电压信号中的最大值的 2 倍作为阈值,可表示为:

$$T_i = 2\max |x_{qi}(n)| \tag{6}$$

式中: $x_{qi}(n)$ 表示第 i 个传感器采集到的第 q 个脉冲波形的前 m 个采样点中的第 n 个的幅值。

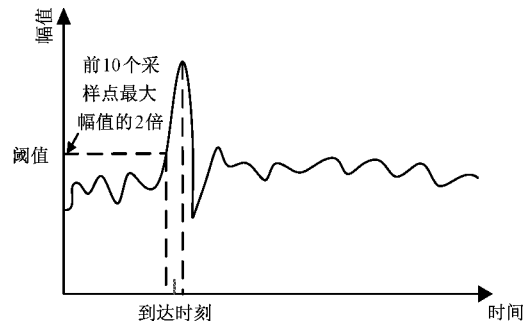


图 2 到达时刻确定方法

将每次采集到的脉冲电压信号首次超过设定阈值 T_i 的时刻与该脉冲极大值对应的时刻的中点记录为脉冲到达传感器 1 和传感器 2 的时刻 t_{q1} 和 t_{q2} 。

2.2 到达时间差的确定及修正

记录了第 q 个放电脉冲分别到达传感器 1 和传感器 2 的时刻 t_{q1} 和 t_{q2} 后,可以将到达时间差初步定为:

$$\Delta t_q = t_{q2} - t_{q1} \quad (7)$$

为了修正计算所得的时间差,在两个到达时刻 t_{q1} 和 t_{q2} 附近加宽度为 $2p$ 的窗取出一段脉冲波形,其幅值表达式为:

$$y_{qi}(n) = x_{qi}(\Delta t_q - (p + 1) + n) \quad (8)$$

式中: n 的取值范围为 $n=1, 2, \dots, 2p+1$ 。

然后计算两个传感器采集到的第 q 个脉冲波形在宽度为 $2p$ 的窗内的相关性 $R_{q12}(j)$:

$$R_{q12}(j) = \sum_{n=0}^{2p-j} y_{q1}(n+j)y_{q2}(n) \quad (9)$$

式中: j 用来表示在窗内的位置,其取值范围为 $j=-p, -p+1, \dots, p$

通过比较得到的 $R_{q12}(j)$,找出其最大值对应的 j ,通过式(10)对第 q 个放电脉冲分别到达传感器 1 和传感器 2 的时间差进行微调。通过对比提取的两段波形相似性,如果相似性低就通过微调时间进行波形平移,然后再计算相似性。微调公式为:

$$\Delta t'_q = \Delta t_q + j \quad (10)$$

3 基于统计信息的定位结果修正

受到硬件成本和数据存储空间的制约,在线监测系统普遍使用的是 100 Ms/s 或 200 Ms/s 采样率的采集卡。以 100 Ms/s 采集卡为例,当采样间隔达到 10 ns 时,只能采到脉冲的包络,以此来检定脉冲到达时间时,放电源位置的计算结果误差可达 3 m。

为在低采样率采集卡上实现误差级别为零点几米的定位,可借助样本分布的统计学原理解决该问题。虽然单次的到达时间检定误差可达到 10 ns,但对于多个脉冲多次检定来说,在真实的放电源位置附近的定位结果次数理论上是最多的。因此,采用多次定位并取定位结果分布的均值的方法进一步得出的定位结果,可以提高定位精度。

3.1 定位结果的概率分布

假设 t_1 为脉冲实际到达传感器 1 的时刻, t'_1 为计算得到的脉冲到达传感器 1 的时刻, e_1 为两者的误差,可表示为:

$$e_1 = t'_1 - t_1 \quad (11)$$

在采样率为 100 Ms/s 时,即每 10 ns 采样一次。由上述分析可知,该情况下单次的到达时间检定误差可达到 10 ns,而 e_1 在 $[-10, 10]$ ns 区间内在相同时间间隔的分布概率是等可能的,故满足均匀分布。

假设 t_2 为传感器 2 的时刻, t'_2 为计算得到的脉冲到达传感器 2 的脉冲实际到达和计算到达时刻的误差 e_2 同理在 $[-10, 10]$ ns 区间满足均匀分布。

则到达时间差可以表示为:

$$t'_1 - t'_2 = (t_1 - t_2) - (e_1 - e_2) \quad (12)$$

计算得到的到达时间差与实际到达时间差的误差是 $(e_2 - e_1)$ 。而 e_1 和 e_2 是两个独立的均匀分布,因此 $(e_2 - e_1)$ 满足正态分布,即 $(t'_1 - t'_2)$ 也满足正态分布。

根据这一原理,利用时差定位法可实现多个局部放电脉冲信号的定位。以定位结果为 x 轴,以定位次数为 y 轴,将多次定位结果绘制在图上。初始化令 x 轴上的每点对应的 y 值均等于 0,当某个脉冲的定位结果为 x_1 时, x 轴上该对应的点的定位次数加 1。对所有脉冲定位结果执行该操作,得到定位次数关于定位结果的分布图,利用定位结果分布的峰值作为最终的定位结果。

3.2 定位结果修正

在现场的局部放电定位中,噪声干扰是不可忽视的问题。除此之外,当 GIS 中有多个放电缺陷时,脉冲幅值小和放电频次低的放电信号容易被脉冲幅值大和放电频次高的放电信号掩盖,导致定位时可能只关注到某一个缺陷的放电脉冲,而忽略了其他的放电缺陷。噪声信号会受到环境的影响,导致的定位结果不完全服从正态分布。不同的放电缺陷基本不会同时放电,它们的放电脉冲不会相互干扰。综上,当多个放电缺陷同时存在时,即便存在噪声信号,多次定位结果相互叠加能得到一个近似有多个正态分布曲线叠加的曲线,如图 3 所示,此时可以直接通过峰值确定放点的位置。

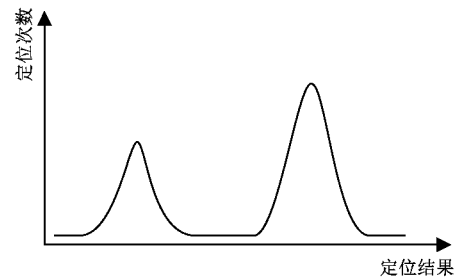


图 3 多放电缺陷定位结果分布

如果两个放电缺陷位置较接近,则会出现两个峰值不完全分离的情况,可以通过在 PRPD 图谱上选择不同的观察区域内脉冲的定位结果进行分离。

4 模拟实验与现场案例分析

本章将通过模拟实验以及实际现场案例分析,验证本文所提的 GIS 局部放电定位技术的准确性和可行性。

4.1 模拟实验

实验室模拟实验的 GIS 装置如图 4 所示,传感器 1 和传感器 2 分别放置在两个盆子上,两个盆子之间的距离为 1.5 m,在传感器 1 右侧 0.2 m 处,设置一个颗粒放电缺陷。对收集到的 398 个放电脉冲分别按照本文所提方法进行定位,其中以传感器 1 作为参考传感器。以定位到的放电源与传感器 1 的距离为 x 轴,单位为 m,以定位次数为 y 轴。基于 PD 源到传感器 1 与传感器 2 的时间差定位,当某一

次定位到放电脉冲与传感器 1 的距离为 d m 时,该位置的定位次数加 1,直到将所有定位结果都绘制到图上,如图 5 所示。

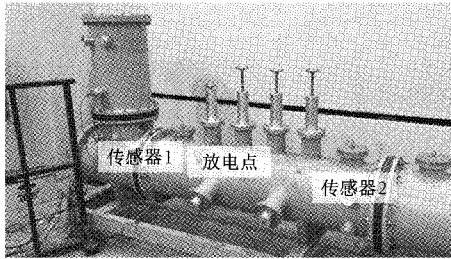


图 4 实验室模拟实验装置

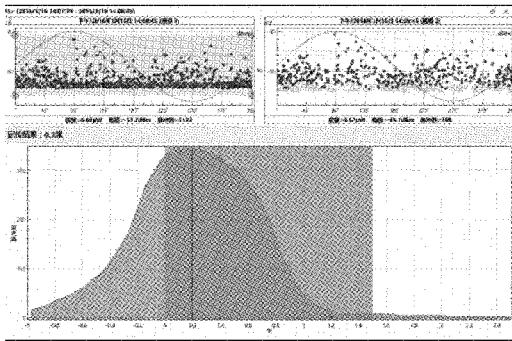


图 5 颗粒放电缺陷定位结果分布

由图 5 可知,图中出现了一个以 0.2 为中的正态定位分布结果,因此 x 轴上拥有概率最大值的点位于传感器 1 右侧 0.2 m 处,与预设缺陷位置完全一致。

4.2 案例分析

为了验证本文所提的 GIS 局部放电定位技术的适用性,分别对两个案例进行分析。

1) 案例 1:220 kV 的 GIS 浮动电极缺陷定位

图 6 给出了一个 220 kV 的 GIS 现场装置。在某主变间隔的盆式绝缘子上分别安装传感器 1 和传感器 2,相距约 1.5 m。定位的结果分布如图 7 所示。PRPD 图谱中不仅有浮动电极放电信号,还有大量的噪声干扰信号,因此定位时只选择 PRPD 图谱中幅值较大的 152 个脉冲信号的定位结果绘制分布图。



图 6 220 kV 的 GIS 设备

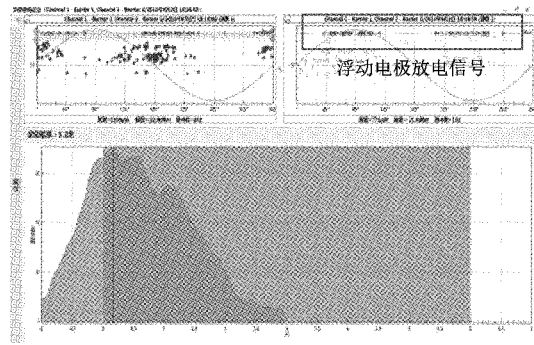


图 7 浮动电极放电缺陷定位结果分布

概率最大值的点位于传感器 1 右侧 0.2 m 处。考虑 0.3 m 左右定位误差裕量,推测缺陷位于传感器 1 所在绝缘盆子处或左侧 GIS 与套管连接处。解体后发现 GIS 与套管连接处因内部螺丝松动,产生浮动电极放电,已产生大量放电粉末如图 8 所示,定位结果较准确。

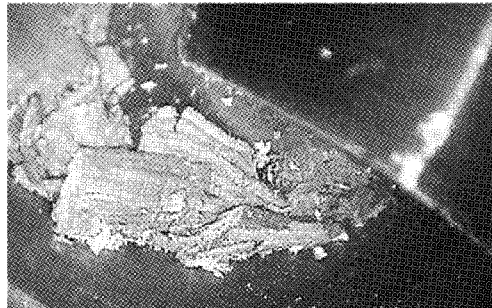


图 8 放电产生的粉末

2) 案例 2:220 kV 的绝缘缺陷定位

在某 220 kV 变电站 GIS 支撑绝缘子上分别安装传感器 1 和传感器 2,相距约 2.8 m。PRPD 图谱中有绝缘缺陷放电信号,同上述案例,定位的结果分布如图 9 所示。

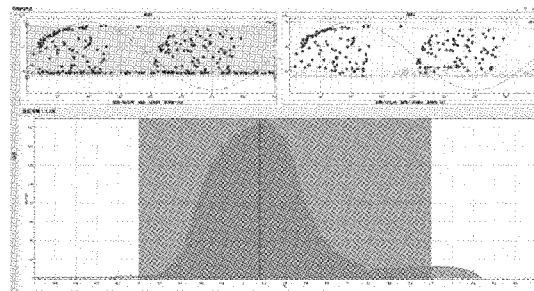


图 9 绝缘放电缺陷定位结果分布

根据概率最大值的点的位置,推测缺陷位于通道 1 传感器与通道 2 传感器之间,距离通道 1 传感器 1.2 m 处。定位结果在现场装置的位置示意图如图 10 所示。

根据定位结果对该 GIS 部位进行了解体,检查拆下的三相支撑绝缘子外观无异常,但采用 X 光对支撑绝缘子进行拍摄后,发现其内部存在一个 12 mm×5 mm 的空穴,即为内部绝缘缺陷,验证了定位结果较准确,如图 11 所示。

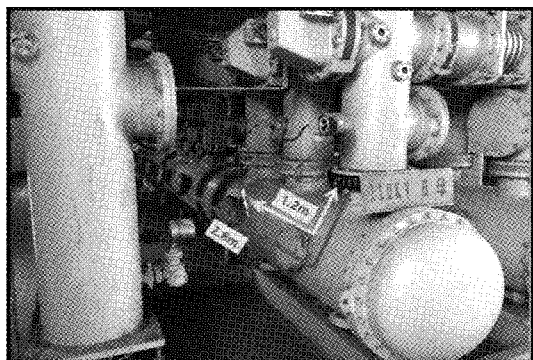


图10 定位结果在现场装置的位置示意图

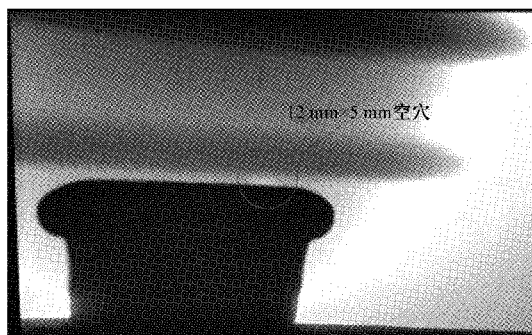


图11 内部绝缘缺陷示意图

3) 案例3:500 kV的GIS双缺陷定位

对一个500 kV的GIS装置的局部放电脉冲进行多次定位,传感器1和传感器2分别安装在相距约10 m的GIS母线的绝缘盆子上如图12所示。由图13的定位结果分布可知,定位分布图中出现两处峰值,表示该段GIS中存在两处放电缺陷。



图12 500 kV的GIS设备

分别选择两种信号的定位结果再次绘制分布图,如图14和15所示。由图14可知,选择PRPD图谱中的尖端放电脉冲信号12个,定位结果位于距传感器1右侧2.8 m左右。

由图15可知,选择PRPD图谱中的空穴放电缺陷脉冲信号40个,也就是40个绝缘放电脉冲信号,定位结果位于距传感器1右侧10.3 m左右,即传感器2右侧0.3 m左

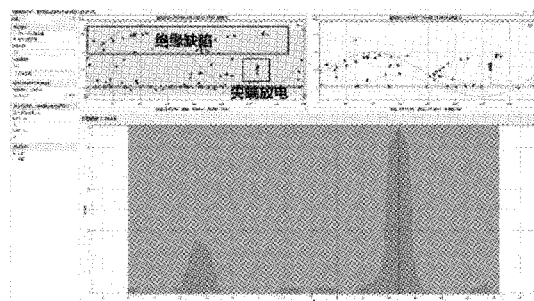


图13 双放电缺陷定位结果分布

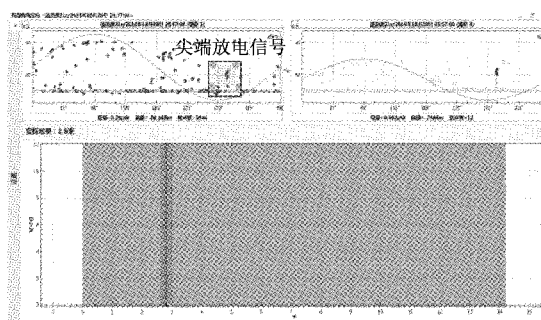


图14 尖端放电缺陷定位结果分布

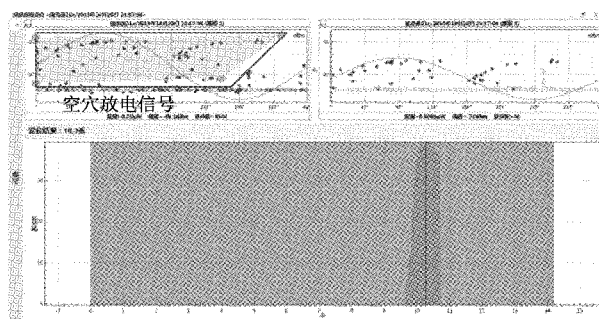


图15 空穴放电缺陷定位结果分布

右。根据诊断及定位结果,考虑到现场长度测量、GIS管道径向长度引入的定位误差,由于空穴类缺陷多发生在绝缘盆子上,故认定空穴缺陷实际发生位置为传感器2安装处的绝缘盆子,此时定位精度约为0.3 m。

5 结 论

针对传统时差定位法对到达时间差精确度要求高、易受噪声干扰等问题,本文提出了一种基于放电脉冲的微观信息和定位结果的统计信息的局部放电定位技术。

通过现场实验和案例分析,可以发现:利用局部放电定位结果的概率分布确定最终定位结果,提高了定位结果的准确度;当在局部放电伴随着噪声干扰的情况下,该技术能够只选择放电脉冲信号绘制定位结果分布图,抗噪声干扰能力强,能够准确定位放电源位置;当GIS中具有多个放电缺陷时,定位结果的分布图中有多个峰值,能够分别准确定位到不同位置的放电源。为GIS故障定位提供了一种实用

的思路和方案,如何对算法更加优化使得定位结果更为精确是后续研究的重要内容。

参考文献

- [1] 李建波,高文胜,刘卫东. 直流 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程及严重程度评估[J]. 高压电器,2018,54(5):9-16.
- [2] 齐波,李成榕,耿弼博,等. GIS 设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术,2011,37(7):1719-1727.
- [3] 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.
- [4] 代少升,杨雨,聂合文,等. UHF 局部放电信号包络检波电路设计与实现[J/OL]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2021,33(5):736-742.
- [5] 王彩雄. 基于特高频法的 GIS 局部放电故障诊断研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [6] 李捷,罗红娥,顾金良,等. 脉冲功率源控制及在线电流检测技术研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(5):73-77.
- [7] 李通,谢庆,张宏伟,等. 基于信号稀疏分解的局放超声阵列定位法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1301-1310.
- [8] 李蜀丰,徐永绍,刘秉政,等. 基于改进 MUSIC 的声源定位方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(8):212-219.
- [9] 何金,田涛,宋晓博,等. 基于特高频法的开关柜局部放电识别方法研究[J]. 高压电器,2020,56(11):90-95,101.
- [10] 郝曙光,李璐,张伟政,等. 基于特高频法的 GIS 金属尖端缺陷局部放电检测和分析[J]. 高压电器,2020,56(6):88-92.
- [11] 张晓龙. 基于特高频法的 GIS 设备局部放电检测技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [12] 金协杰. 基于特高频法的 GIS 局部放电故障智能诊断与方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [13] 毛文奇,吴水锋,谢国胜,等. GIS 设备局部放电带电检测技术应用综述[J]. 湖南电力,2016,36(2):9-13.
- [14] 王卫东,赵现平,王达达,等. GIS 局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器,2012,48(8):13-17,23.
- [15] XAVIER G, OLIVEIRA A, SILVA A, et al. Application of time difference of arrival methods in the localization of partial discharge sources detected using bio-inspired UHF sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, PP(99):1-1.
- [16] 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):208-214,1.
- [17] XUE N, YANG J, SHEN D, et al. The location of partial discharge sources inside power transformers based on TDOA database with UHF sensors[J]. IEEE Access, 2019, PP(99):1-1.
- [18] MIRZAEI H R, AKBARI A, GOCKENBACH E, et al. A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(2):26-39.
- [19] 田妍,王勇,杨森,等. 基于线性预测分析时差估计的特高频局部放电定位方法[J]. 高压电器,2019,55(12):181-186.
- [20] GHOSH R, CHATTERJEE. A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation: A Publication of the IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2017, 24(1):237-245.
- [21] 周南,罗林根,高兆丽,等. 基于神经网络的局部放电特高频时延定位误差修正算法[J]. 高电压技术,2018,44(11):3641-3648.
- [22] 马建涛,冯新岩,崔勇,等. 特高频时差定位法在 GIS 局部放电检测中的应用[J]. 山东电力技术,2018,45(10):49-52.

作者简介

罗颖婷,硕士,高工,主要从事电力设备在线监测及故障诊断技术研究。

E-mail:393252744@qq.com

江俊飞,工程师/博士,主要从事变电设备状态监测及故障诊断。

E-mail:17728145673@139.com

王磊,高工/硕士,主要从事带电检测及设备状态检测。

E-mail:393252744@qq.com

石墨,工程师/硕士,主要从事电力设备状态监测及故障诊断。

E-mail:18028601486@139.com

鄂盛龙,工程师/硕士,主要从事变电设备状态监测及故障诊断。

E-mail:18928751025@139.com

李晖,工程师/硕士,主要从事电力设备状态监测及故障诊断。

E-mail:18022308427@139.com

许海林,工程师/硕士,主要从事变电设备状态监测及故障诊断。

E-mail:18922228119@139.com