

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.029

基于特高频波形形态的套管局部放电定位时延分析方法

印海洋¹, 朱学成², 李成榕¹, 高自伟², 张 强¹, 郑书生¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 黑龙江电力科学研究院, 哈尔滨 150036)

摘要: 现有的套管局部放电测量需要利用套管末屏的接地线, 操作复杂, 且容易受地网中的脉冲信号干扰。为此, 有学者提出了基于特高频阵列信号套管局部放电时差定位遥测法。此方法有效的关键在于准确获取放电源到各传感器间的时间延迟。由于套管各缺陷信号传播路径不同, 导致波形有不同的形态特征, 现有的方法不适合于各种形态的波形, 会造成一定误差。为此, 文中研究了基于特高频波形形态的套管局部放电定位时延分析方法。在实验室搭建了 110 kV 变压器出线套管局放试验平台, 制造了 3 种典型缺陷模型, 测量了局放特高频信号, 获得了各缺陷波形形态特征, 对比分析了现有时延分析方法的适用性。研究表明: ①对于信号传播路径单一的缺陷, 阵列传感器所测信号间相关度高, 相关分析法稳定性好、准确度高; ②对于信号传播路径复杂, 放电源位于油箱内部的缺陷, 信号持续时间长, 最小能量法稳定性好、准确度高。这些结果对推动套管局放定位有一定指导意义。

关键词: 套管; 局部放电; 特高频定位; 时延分析

Analysis of TDOA for Locating PDs in Bushing Based on UHF Signal Features

YIN Haiyang¹, ZHU Xuecheng², LI Chengrong¹, GAO Ziwei²,
ZHANG Qiang¹, ZHENG Shusheng¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150036, China)

Abstract: Since the procedure of preventive test for bushings is complex and easily interfered by the grounding net, it is difficult to find out earlier defects effectively. Some scholars put forward a novel PD location method for bushings based on TDOA of UHF signals. It is vital that it must access the TDOA automatically and accurately regardless of the features of different signals. This paper makes investigation on measurement of TDOA of UHF signals radiated by different partial discharges occurred in bushings. Firstly, the classical method in time domain are introduced; Secondly, methods of TDOA according to the features of UHF signals propagated through various paths are raised; Finally, the accuracy of measurement is proved by the experiment results. Test results show that: 1) for the signals propagated through unitary path which have higher correlation degree, the correlation method has high stability and good accuracy; 2) for the signals propagated through a complex path which show longer duration, especially PDs in the oil barrel, the minimum energy method is more stable and accurate. The research is valuable and meaningful to PD location for bushings.

Key words: bushing; partial discharge; UHF location; time delay analysis

0 引言

变压器出线套管结构复杂、设计紧凑, 在运行过程中由于设计缺陷、安装不当、外部环境因素等

原因容易产生局部放电, 并不断发展, 最终导致套管炸裂, 变压器停运等严重后果^[1-3]。近年来中国电力系统中发生了多起套管爆炸事故, 这些事故往往导致局部区域乃至大面积停电, 给国民经济和社会稳定带来巨大的负面影响。中国从 2009 年开始近 3 年的 220 kV 及以上电压等级变压器的事故统计表

明:套管故障导致的变压器非计划停运次数共 24 次, 共计 2 300 h^[4-6]。由此可见, 套管故障是造成变压器非计划停运的直接原因之一, 具有偶发性强、故障影响时间长等特点。鉴于此, 加强套管绝缘状态的检测和评估对于提高电网安全可靠具有重大意义。

根据现有研究, 有学者提出了基于特高频信号的套管局部放电带电检测与时间差定位的遥测方法^[7]。该方法通过 4 个天线组成的阵列同时采集多组局放信号, 利用计算机自动获取各传感器间时延, 并用牛拉法求解方程组, 从而实现套管局放定位。因此, 该方法准确有效的关键在于局放特高频信号时延的准确自动获取。

现有的时延分析方法主要有: 阈值法、相关系数法、能量累计法等^[8-10]。查找信号过阈值点实现首波到达时刻计算的, 阈值的选取是该方法的关键所在, 过高或过低都可能引起较大的时间误差^[11]。华北电力大学唐志国和西安交通大学王景岗将互相关函数计算方法用于时间差读取^[8, 12], 信号的传播路径, 波形的形态特征对其准确度有较大影响。清华大学高文胜阐述了基于 UHF 信号的能量累计曲线拐点识别的首波到达时刻计算方法, 在此基础上提出了能量最小值法^[13], 以该曲线最小值作为波形起始的标识, 计算量小。

以上的时域时延分析方法已大量运用在变压器定位中^[14-16], 而由于套管局放特高频信号的传播途径异于变压器, 其波形特点、信噪水平与变压器局放信号有显著差异, 时延分析方法的适用性有待检验。为此, 文中结合常见套管缺陷类型制作了 3 种典型位置放电模型, 建立了套管局放测试研究试验平台, 获得了不同模型下的局放特高频信号, 结合波形形态特征对比了各经典时延分析方法, 确定了适合套管局放不同波形形态的时延分析的方法, 实现了算法的自动化, 并用定位结果衡量了时延分析的精度。

1 时域时延分析方法

1.1 阈值法

首先设定阈值(thr), 使其不小于背景噪声的幅值, 同时又小于信号幅值。然后逐个将每个时刻的 UHF 信号幅值绝对值($|u(t)|$)与 thr 相比, $|u(t)|$ 第 1 次超过 thr 时对应的时刻就是首波到达时刻。为了增加信噪比, 将信号电压幅值($u(t)$)转换为功率($p(t)$), 然后再针对功率波形应用阈值法, 见式(1), 其中 R 为示波器阻抗, 50 Ω 。

$$p(t) = \frac{u^2(t)}{R} \quad (1)$$

1.2 相关分析法

对于由两个传感器测得的 UHF 离散信号 $u_1(i)$ 和 $u_2(j)$, 两信号的互相关函数定位为式(2)。

$$R_{21}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_1(i)u_2(i+n)] \quad 1 \leq n \leq N \quad (2)$$

当 $R_{21}(n_0) = \text{Max}(R_{21})$, 此时 n_0 即为两通道间时延。

1.3 能量累积法

从信号采集起始时刻起, 利用每个时刻的 UHF 信号幅值计算每个时刻的累积能量。计算方法见式(3)。式(3)中: t_i 是信号采集起始时刻; $u(t')$ 是时刻 t' 的 UHF 信号幅值; R 是采集系统的输入阻抗。

$$W(t) = \int_{t'=t_i}^t \frac{u^2(t')}{R} dt' \quad (3)$$

累积能量随着时间延迟逐步增长。在 UHF 信号到达时刻之前, 背景噪声较小, 累积能量较小、增长缓慢; 在 UHF 信号到达之后, 累积能量迅速增大。因此, 在信号到达时刻累积能量曲线出现了拐点。通过计算拐点可以得出信号到达时刻。为了便于首波到达时刻的自动计算, 通过数学运算将拐点转换为极小值点。转换方法见式(4)。式(4)中: t_o 是信号采集终止时刻; T_s 是采集时间长度(即 $t_o - t_i$), 该方法亦被称之为最小能量法。

$$W'(t) = \int_{t'=t_i}^t \frac{u^2(t')}{R} dt' - \frac{t-t_i}{T_s} \int_{t'=t_i}^{t_o} \frac{u^2(t')}{R} dt' \quad (4)$$

由式(4)中 $W'(t)$ 形成的曲线被称为最小能量曲线。极小值也可以通过求导获得, 见式(5), 其中

$\frac{1}{T_s} \int_{t'=t_i}^{t_o} \frac{u^2(t')}{R} dt'$ 为在采集时间内 UHF 信号的平均功率。

$$\frac{dW'(t)}{dt} = \frac{u^2(t)}{R} - \frac{1}{T_s} \int_{t'=t_i}^{t_o} \frac{u^2(t')}{R} dt' = 0 \quad (5)$$

1.4 算法自动实现

由上述算法简介可以看出, 阈值法需要事先设定阈值(thr), 虽有学者^[17]提出可以利用波形本身的噪声水平作为阈值参考, 此时的阈值(thr)是关于波形噪声水平的一个自适应量, 但仍没有摆脱人工选择对倍数 k 的影响; 各传感器离放电源距离不同, 噪声水平有所差别, k 值可能需针对各通道单独设置; 算法相对复杂, 不适合现场对信号进行实时处理分析。

相关分析法以逐点右移计算互相关系数的方式实现算法自动化, 因此在计算前需考虑目标传感器与参考传感器之间, 信号到达的先后关系, 在自动求取互相关曲线最大值点后, 按照式(6)进行转换, 从

而得到时延真实值。

$$\begin{cases} \Delta t = T - t_{\max} & (\text{参考传感器超前}) \\ \Delta t = -t_{\max} & (\text{参考传感器滞后}) \end{cases} \quad (6)$$

最小能量法实际上以曲线最小值点代替能量累计曲线中的能量拐点,极大地方便了算法的自动实现。

因此,为了实现时延的自动、稳定、准确分析,应重点考察不需要设定阈值参数,计算机易自主实现的最小能量法及相关分析法的可行性。

2 试验平台

2.1 加压与检测系统

为了详细研究套管典型缺陷局部放电特高频信号时延分析方法,根据试验原理见图1,搭建了套管局部放电的试验平台,见图2。

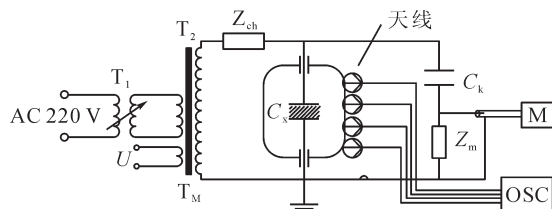


图1 套管局部放电试验原理图

Fig. 1 Experimental wiring diagram of PD location for bushing

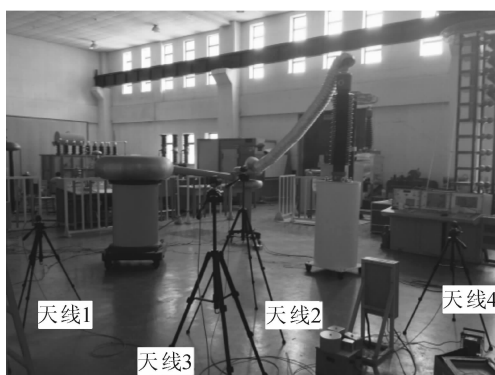


图2 套管局部放电试验装置与特高频定位天线布置

Fig. 2 Arrangement of bushing and UHF antennas in PD test and location

试验所用套管试品为的 BRDLW2-126/630-4 型 110 kV 油纸电容式变压器出线套管。为了模拟实际工况,套管下部浸入变压器油油箱,油箱直径 63 cm,高 135 cm,变压器油型号为昆仑 25 号。套管露出油箱部分高 210 cm,浸入油箱部分长 85 cm。

局部放电测量系统包括脉冲电流检测仪和特高频天线阵列检测系统。使用 DOBLE 公司的 LDS-6 型脉冲电流检测仪来监视不同模型的局部放电量。特高频测量系统包括 4 只等角螺旋天线、宽带放大

器和 Lecroy8640A 高速示波器,模拟带宽 6 GHz,采样率 20 GS/s,试验中有效检测频带为 1~3 GHz。

2.2 典型缺陷设置

根据国家电网公司对变压器事故套管的解体研究,套管顶部、末屏及下瓷套处是油纸电容式变压器出线套管经常出现故障的部位。因此试验共设计以下 3 种模型,分别代表了套管外部典型位置的缺陷情况^[18-19]。

1) 套管顶部接触不良放电模型。套管顶部因长期淋雨受潮,容易出现锈蚀,最终导致顶部金属部分连接处发生悬浮放电。将一段金属丝悬于套管顶部螺帽附近,与套管顶部金属不直接相连,二者保持约 1 mm 的空气绝缘距离,从而形成悬浮放电,见图 3(a)。

2) 末屏引线接触不良模型。现场预试和在线监测装置会对末屏进行改动,因此末屏处的接触不良放电是电容式套管最常见的故障;试验时通过改造末屏防护罩,设计防护罩中心顶丝旋出 0.5 圈,顶丝和接线柱分离,即形成末屏处虚接,见图 3(b)。

3) 下瓷套沿面放电模型。实际变压器在运行中,下瓷套和套管互感器之间会因种种原因积累脏污,产生沿面放电。试验时用一根硬铝导线将下部均压环的高压引到接近地电位的法兰处,导线末端削尖且正对法兰下端,导线尖端距离法兰约 5 cm,由此形成导线末端的针尖与下瓷套表面的沿面放电,见图 3(c)。

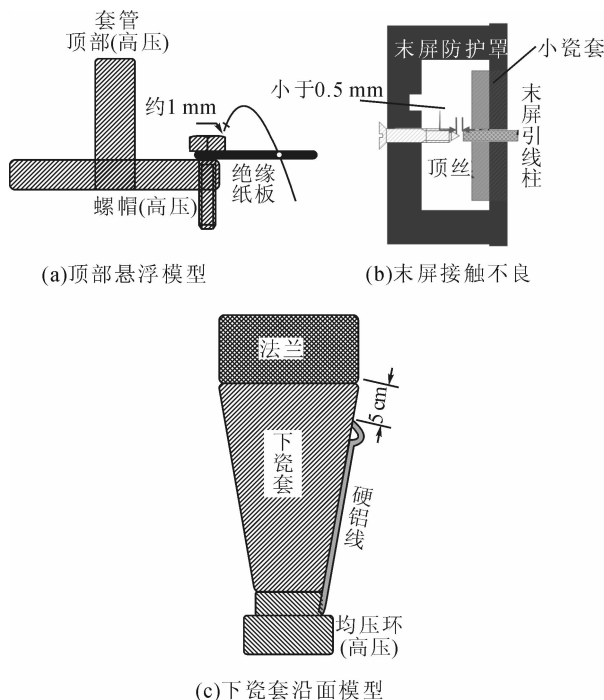


图3 套管典型缺陷设置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of typical defects of casing

2.3 试验方法

对套管施加工频电压,采用阶梯升压法:每次提

高电压 2 kV, 保持 5 min, 逐步提高施加电压直到脉冲电流局部放电仪能够检测到明显的局部放电。随后升压保持时间改为 20 min, 逐步提高施加电压直到局部放电量基本稳定, 此时用天线阵列开始测量局部放电特高频信号。

3 波形及时延分析

按照图 2 布置阵列分别展开 3 种缺陷局部放电试验, 4 个传感器距套管中心距离不同。以图 2 中天线 1 为参考传感器, 试验前已对检测系统进行了时延误差校验, 各通道误差均在 0.1 ns 内。

3.1 套管顶部悬浮模型

电压升至 26 kV 左右时, 视在放电量稳定在 800 pC 左右。此时 4 个传感器特高频信号见图 4。

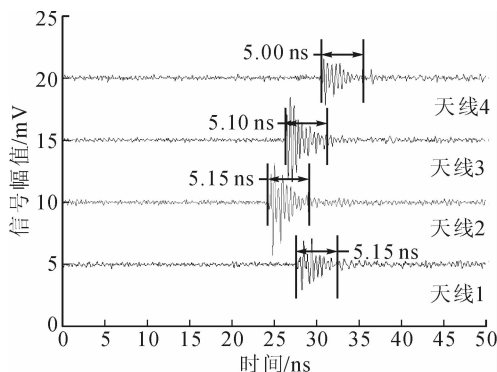


图 4 套管顶部悬浮放电特高频信号

Fig. 4 UHF signals of floating PD on the top of bushing

由图 4 中可以看出, 套管顶部悬浮模型的各通道时域波形, 呈三角形振荡衰减趋势; 持续时间短, 在 5 ns 左右, 相差也仅在 0.15 ns 之内。将波形展开, 人工读取多组时延, 求取均值得传感器 2-4 相对传感器 1 的时延为 -3.50、-1.55、2.60 ns。

参照式(2), 绘制 2-4 号传感器相对于参考传感器的互相关曲线, 见图 5, 考察相关分析法对该缺陷的有效性。

通道 4 信号在时间上滞后于通道 1 信号, 在计算互相关函数时以 1 为基准, 则最大值出现在以中轴为对称的镜像位置, 按照式(6)进行时延转换。图 5 中所绘信号间互相关曲线总体趋势平坦, 存在明显的峰值, 该峰值对应的时间延迟即为相关分析法所获取结果: -3.45、-1.60、2.50 ns, 时延误差控制在 0.10 ns 之内。

参照式(5), 绘制各通道最小能量曲线, 见图 6, 考察最小能量法对该缺陷的有效性。

由图 6 中可以看出, 以最小能量曲线最小值点作为首波起始点, 各通道均出现滞后现象, 且各通道滞后延时不定, 延时相差最大可达 0.85 ns。这是

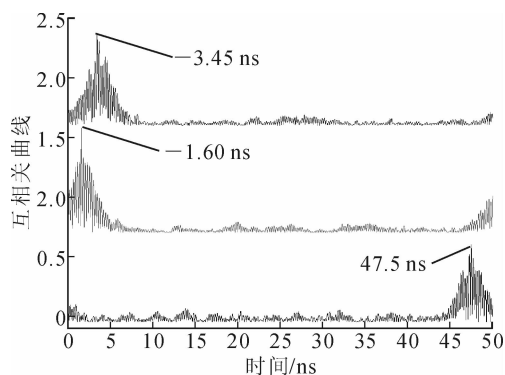


图 5 互相关曲线

Fig. 5 The cross correlation curve

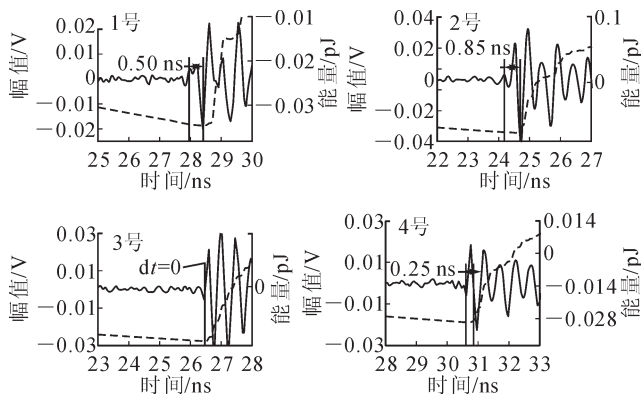


图 6 最小能量曲线

Fig. 6 The minimum energy curve

由于套管顶部悬浮模型的特高频信号波形呈三角衰减形态, 平均功率大, 能量主要集中在波形前部, 但首波能量却有可能没有超过平均能量; 何时出现能量拐点主要取决于能量曲线何时超过平均能量; 这种不确定性造成了最小能量曲线中的拐点相对于首波时延的不确定性, 因此无法针对最小能量法的计算误差进行修正。

3.2 末屏接触不良模型

电压升至 10 kV 左右时, 视在放电量约上万 pC。此时 4 个传感器特高频信号见图 7。分析方法参照套管顶部悬浮模型。

由图 7 中可以看出, 末屏接触不良缺陷的各通道时域波形, 也呈三角形振荡衰减趋势; 持续时间略长于顶部悬浮模型, 在 18 ns 左右, 相差也仅在 0.3 ns 之内。将波形展开, 人工读取多组时延, 求取均值得传感器 2-4 相对传感器 1 的时延为 -3.65、-1.85、3.75 ns。

图 8 中所绘信号间互相关曲线总体趋势平坦, 存在明显的峰值, 该峰值对应的时间延迟即为相关分析法所获取结果: -3.60、-1.80、3.80 ns, 时延误差控制在 0.05 ns 之内。

最小能量曲线见图 9。由图 9 中可以看出, 能量

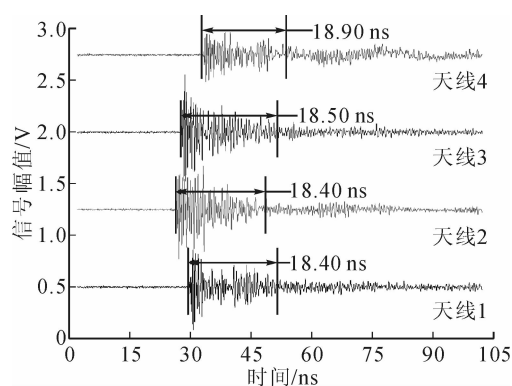


图7 末屏引线接触不良放电特高频信号

Fig. 7 UHF signals of end shield disconnecting discharge

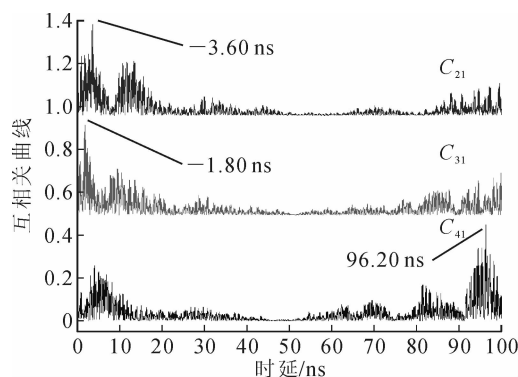


图8 互相关曲线

Fig. 8 The cross correlation curve

累积分法也存在的滞后现象,最大可达 1.05 ns。这同样是由于末屏接触不良缺陷的特高频信号波形呈三角衰减形态,平均功率大,能量主要集中在波形前部,相比于套管顶部悬浮模型,它有更长的持续时间,一般来说,能量曲线要累积到第 2、3 个甚至第 4 个峰值处才出现明显的拐点,因此同样无法针对最小能量法的计算误差进行有效的修正。

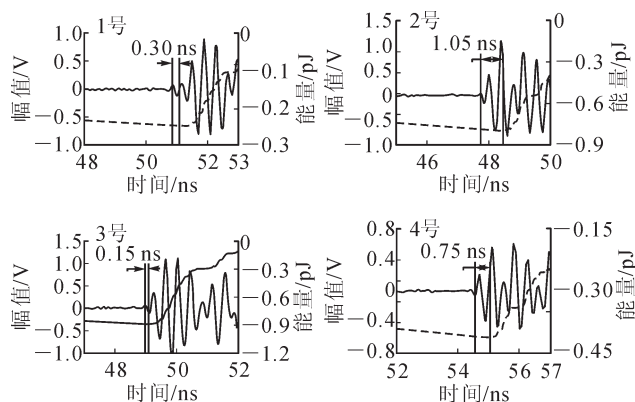


图9 最小能量曲线

Fig. 9 The minimum energy curve

3.2 套管下瓷套沿面模型

电压升至 35.8 kV 左右,视在放电量稳定在 800 pC,开始记录特高频信号。波形分析参照上文所述,分别绘制出图 10、11。

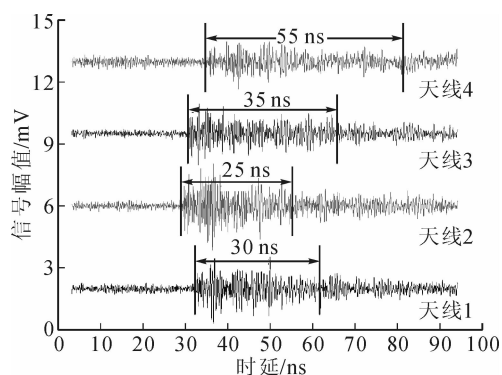


图10 套管下瓷套沿面放电特高频信号

Fig. 10 UHF signals of surface discharge on the lower sections of bushing

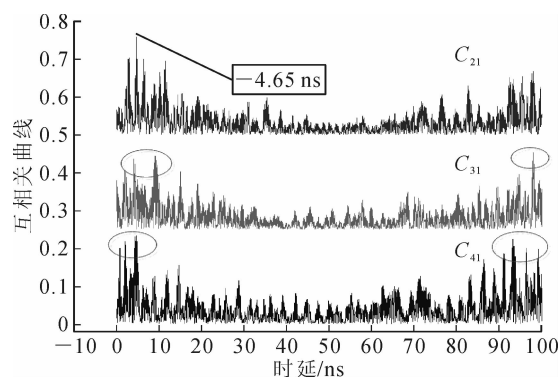


图11 互相关曲线

Fig. 11 The cross correlation curve

由图 10 可以看出,套管下瓷套沿面的各通道时域波形,呈振荡上升再衰减的纺锤形趋势;持续时间从 30 ns 到 55 ns 不等,跨度在 25 ns 以上;总体而言波形相似度不高。将波形展开,人工读取多组时延,求取均值得传感器 2-4 相对传感器 1 的时延为 -3.80、-2.05、3.25 ns。绘制 2-4 号传感器相对于参考传感器 1 的互相关曲线,见图 11。

3 组互相关曲线除曲线 C_{21} 有明显的峰值外,其余曲线均有多个峰值,此时最大值对应时延为 -4.65、-9.55、5.55 ns。这与人工读取时延相差甚远。这是因为 UHF 信号在油箱内部传播时,发生了多次折反射叠加,而且到达各传感器的路径不同;较长的持续时间也给相关分析最大值点的确定造成了干扰。可见互相关分析法处理套管下瓷套沿面这种持续时间长,波形振荡方式复杂,存在多次折反射的信号时,出现了较大的误差。

最小能量曲线见图 12。虽然能量曲线中最小值点仍有滞后于首波时刻的现象,但是各通道的滞后量均非常有限,均在 0.20 ns 之内,且某些通道甚至准确地表征了首波起始在能量曲线上的变化,滞后量为零。这是因为该缺陷信号波形形态呈纺锤形,平均能量比较分散,能量累计曲线比较平坦,较小

的首波幅值在能量累计中也能有明显的贡献,这种贡献以拐点形式在曲线中表征出来。

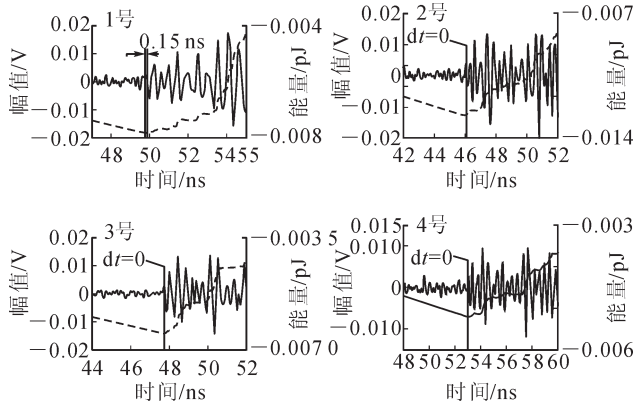


图 12 最小能量曲线

Fig. 12 The minimum energy curve

4 算法准确性验证

4.1 误差分析方法

为验证以上两种算法对各自适用情况的准确性、稳定性,文中不仅通过分析时延误差、方差来衡量,还按照图 1、2 建立天线阵列,利用定位结果来着重考察算法对实际运用的准确性。时延分析、定位计算过程均由计算机自动完成。

文中定位算是假设放电源的位置为 $P_0(x, y, z)$, 天线的位置为 $S_1(x_1, y_1, z_1), S_2(x_2, y_2, z_2), S_3(x_3, y_3, z_3), S_4(x_4, y_4, z_4)$, 根据电磁波的传播特点可以列出式(7)的方程组。

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = c \cdot t_{01} \\ L_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = c \cdot t_{02} = c \cdot (t_{01} + \tau_{12}) \\ L_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} = c \cdot t_{03} = c \cdot (t_{01} + \tau_{13}) \\ L_4 = \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} = c \cdot t_{04} = c \cdot (t_{01} + \tau_{14}) \end{cases} \quad (7)$$

依据最小二乘原理,此非线性方程组的求解可转化为求使各项残差向量的 2-范数达取极小值的解。令各项残差为 f_1, f_2, f_3, f_4 , 其表达式如下

$$f_i(x, y, z, T) = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 - [v(T+\tau_{i0})]^2 \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, 3, 4$ 。求取 (x^*, y^*, z^*, T^*) , 使得

$$\sum_{i=1}^4 \|f_i(x^*, y^*, z^*, T^*)\|^2 = \min \sum_{i=1}^4 \|f_i(x, y, z, T)\|^2 \quad (9)$$

那么, (x^*, y^*, z^*, T^*) 就是方程组(7)的解。

4.2 套管顶部悬浮模型

对试验中接收到的 500 组信号波形利用相关分析法读取时间差。套管顶部悬浮模型时延分析及定位结果见表 1、2。在表 1 中, 时间差方差不大于 0.2 ns, 分散性小。定位结果的平均值与实际放电源的距离小, 3 个方向上的定位误差不超过 0.14 m, 定位结果的方差最大为 0.35 m。可以说, 对于套管顶

部的局部放电, 时间差测量误差小, 定位准确。

表 1 套管顶部悬浮模型时延分析

Table 1 Time delay analysis of top suspension

时延分析	τ_{12}/ns	τ_{13}/ns	τ_{14}/ns
时间差平均值	-3.53	-1.60	2.79
时间差方差	0.19	0.20	0.18

表 2 套管顶部悬浮模型定位结果

Table 2 Location results of top suspension model of casing

定位结果	x/m	y/m	z/m
放电源位置	2.42	2.70	2.90
定位结果平均	2.44	2.62	2.76
平均误差	0.02	-0.08	-0.14
定位结果方差	0.07	0.29	0.35

4.3 末屏接触不良模型

对试验中接收到的 500 组信号波形利用相关分析法读取时间差。时间差和定位结果统计结果见表 3、4。时间差方差不大于 0.2 ns, 分散性小。定位结果的平均值与末屏的距离较小, 3 个方向上的最大定位误差为 0.29 m, 定位结果的方差最大为 0.28 m, 在 x 轴和 y 轴上定位结果比较准确。

表 3 末屏接触不良模型时延分析

Table 3 Time delay analysis of terminal screen contact

时延分析	τ_{12}/ns	τ_{13}/ns	τ_{14}/ns
时间差平均值	-4.69	-4.99	1.63
时间差方差	0.12	0.13	0.11

表 4 末屏接触不良模型定位结果

Table 4 Location results of terminal screen contact

定位结果	x/m	y/m	z/m
末屏位置	3.35	2.50	1.40
定位结果平均	3.21	2.32	1.69
平均误差	-0.14	-0.18	-0.29
定位结果方差	0.10	0.22	0.28

4.4 套管下瓷套沿面模型

对试验中接收到的 500 组信号波形利用最小能量法进行计算, 其中时延分析部分用时 2.88 s。由于放电源处于油箱内部, 折反射现象造成信号传播路径不确定, 无法确定一个具体的放电源位置, 因此对于此模型仅用时延分析及定位结果的方差来衡量稳定性。统计结果见表 5、6。时间差方差平均在 0.35 ns 左右, 定位结果在 z 方向也有较大的分散性, 平均结果在 1.67 m 处, 大致位置见图 13, 位于套管上瓷套根部。这个定位说明了油箱中的局部放电电磁波信号从油箱中无法直接泄漏出来, 而是通过套管下端瓷套进入套管最外侧油道, 从套管上瓷

套向外部空间辐射。这一结果符合电磁波传播规律。

表5 套管下瓷套沿面模型时延分析

Table 5 Time delay analysis of the porcelain bushing under the casing

时延分析	τ_{12}/ns	τ_{13}/ns	τ_{14}/ns
时间差平均值	-3.66	-2.06	3.30
时间差方差	0.19	0.10	0.05

表6 套管下瓷套沿面模型定位结果

Table 6 Location results of the porcelain bushing under the casing

定位结果	x/m	y/m	z/m
定位结果平均	2.52	2.59	1.67
定位结果方差	0.10	0.27	0.42

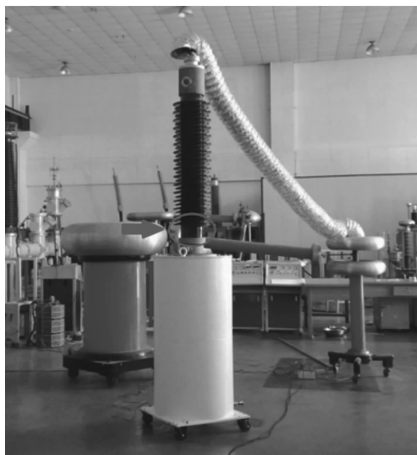


图13 套管下瓷套沿面放电定位结果实际位置

Fig. 13 Location result of surface discharge on the lower sections of bushing

5 结论

套管不同部位的局放,特高频信号因传播路径不同,其波形有不同的形态特征,单一的时延分析方法容易造成较大误差。为此文中以便于自动读取、准确、鲁棒性强为原则,针对3种套管典型位置缺陷提出了相应的时延分析方法。研究结果表明:

1)对于套管顶部悬浮及末屏引线接触不良这类传播路径单一,波形持续时间短,呈三角振荡衰减形态的信号,其相关性强,互相关曲线有很高的辨识度,时延分析准确;

2)对于套管下瓷套沿面这类位于油箱内部,信号传播路径复杂,波形持续时间长,呈纺锤形振荡上升再衰减的信号,最小能量法的拐点滞后现象不显著,最小能量法有较高的精度和稳定性。

参考文献:

[1] 林 赫,王元峰. 变压器高压套管故障原因分析[J]. 电网

技术,2008(s2):253-255.

LIN He, WANG Yuanfeng. Analysis on the reason of transformer thimble fault[J]. Power System Technology, 2008 (s2):253-255.

[2] 孙 勇,朱建新. 换流变压器套管爆炸事故原因分析[J]. 南方电网技术,2008,2(5):82-83.

SUN Yong, ZHU Jianxin. Cause analysis of an explosive accident of converter transformer bushing[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(5):82-83.

[3] 赵 璐,项旭杨,姚红伟. 常接地结构的高压套管末屏接地故障原因分析[J]. 华东电力,2014,42(8):1586-1588.

ZHAO Lu, XIANG Xuyang, YAO Hongwei. Cause analysis for the HV transformer bushing tap grounding fault[J]. East China Electric Power, 2014, 42(8):1586-1588.

[4] 陈丽娟,胡小正. 2009年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2010,43(5):1-6.

CHEN Lijuan, HU Xiaozheng. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2009[J]. Electric Power, 2010, 43(5):1-6.

[5] 陈丽娟,胡小正. 2010年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2011,44(6):71-77.

CHEN Lijuan, HU Xiaozheng. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2010[J]. Electric Power, 2011, 44(6):71-77.

[6] 陈丽娟,李 霞. 2011年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力,2012,45(7):89-93.

CHEN Lijuan, LI Xia. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2011[J]. Electric Power, 2012, 45(7):89-93.

[7] 肖天为,张 强,黄炎光,等. 特高频方法用于套管局部放电检测的可行性研究[J]. 电网技术,2015,39(6):1719-1724.

XIAO Tianwei, ZHANG Qiang, HUANG Yanguang, et al. Experimental research on partial discharge location for bushings using UHF method[J]. Power System Technology, 2015, 39(6):1719-1724.

[8] YANG L, JUDD M D, BENNOCH C J. Time delay estimation for UHF signals in PD location of transformers[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]:IEEE, 2004:414-17.

[9] YANG Jinggang, LI Dajian, LI Junhao, et al. Study of time delay of UHF signal arrival in location partial discharge[C]// Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.[S.l.]: IEEE, 2007:1088-1092.

[10] SACHA M, THOMAS S, CHRISTOPH H, et al. Enhanced signal processing for conventional and unconventional PD measuring methods: Wavelet de-noising, automatic detection algorithms and averaging for arrival time-based PD location in transformers and power cables[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and

- Diagnosis.Beijing, China:IEEE,2008:1115-1118.
- [11] PETER K,MARTIN J,JOHN P,et al. Experimental investigation of positional accuracy for UHF partial discharge location[C]//Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.Beijing, China: IEEE,2008:1070-1073.
- [12] TANG Z G,LI C R,CHENG X,et al. A statistical method of improving the resolution of time-delay of UHF signals for PD location in transformers[C]//2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]: IEEE,2005:401-404.
- [13] 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.
- [14] 唐 炬,王存超,陈 娇,等. 变压器局部放电的泰勒—遗传综合定位法[J]. 电工技术学报,2010,25(7):165-171.
- TANG Ju,WANG Cunchao,CHEN Jiao,et al. Taylor-genetic algorithm using for PD location in power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):165-171.
- [15] 常文治,唐志国,李成榕,等. 变压器局部放电超宽带射频定位技术的试验分析[J]. 高电压技术,2010,36(8):1981-1988.
- CHANG Wenzhi,TANG Zhiguo,LI Chengrong,et al. Experimental analysis on partial discharge location in power transformers using UWB RF method[J]. High Voltage Engineering,2010,36(8):1981-1988.
- [16] SINAGA H H,PHUNG B T,BLACKBURN T R. UHF sensor array for partial discharge location in transformers[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.[S.l.]:IEEE,2012:23-27.
- [17] 江天炎,李 剑,杜 林,等. 粒子群优化小波自适应阈值法用于局部放电去噪[J]. 电工技术学报,2012(5):77-83.
- JIANG Tianyan,LI Jian,DU Lin,et al. De-noising for partial discharge signals using PSO adaptive wavelet threshold estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012(5):77-83.
- [18] 国家电网公司运维检修部. 变压器类设备典型故障案例汇编(2006-2010年)[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [19] 任晓红,王 伟,郑健康,等. 500 kV 变压器套管典型故障及分析[J]. 高电压技术,2008,34(11):2513-2516.
- REN Xiaohong,WANG Wei,ZHENG Jiankang,et al. Typical fault analysis of 500 kV transformer bushings[J]. High Voltage Engineering,2008,34(11):2513-2516.
- 印海洋(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电气设备局放检测及定位。
-
- (上接第 179 页)
- requirements for synthetic making test and making capability of high-voltage circuit-breaker[J]. Power System Technology,2006,30(10):81-85.
- [12] 范兴明,邹积岩,董恩源. 全电压关合试验的控制策略及其实现[J]. 电网技术,2005,29(17):8-13.
- FAN Xingming,ZOU Jiyan,DONG Enyuan. Control strategy of synthetic making test for high voltage circuit breakers at full voltage and realization[J]. Power System Technology,2005,29(17):8-13.
- [13] SMEETS R P P,LINDEN W A. Verification of the short-circuit current making capability of high-voltage switching devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(4):611-618.
- [14] CIGRE WG 13.04. Requirement for testing making performance of high-voltage circuit breakers at reduced applied voltage[J]. Electra,1979,163(6):27-33.
- [15] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.
- WANG Xifan. Electric power engineering foundation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,1998
- [16] 陈慈萱,马志瀛. 高压电器[M]. 北京:水利水电出版社,1987.
- [17] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- XU Guozheng,ZHANG Jierong,QIAN Jiali,et al. The principle and application of high-voltage circuit-breaker[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2000.
- [18] 金立军,刘卫东,钱家骊. 高压开关设备智能化发展综述[J]. 电网技术,2002,26(1):55-58.
- JIN Lijun,LIU Weidong,QIAN Jiali. A summary of development of intelligent control of high voltage electrical apparatus[J]. Power System Technology,2002,26(1):55-58.
- [19] 李 刚,孙 梅. 一种新的型合成试验回路[J]. 高压电器,2009,45(6):136-139.
- LI Gang,SUN Mei. A new synthetic test circuit[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(6):136-139.
- [20] 艾 芊. 电力系统稳态分析[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- AI Qian. Power system steady state analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2014.
- 孙 梅(1983—),女,2006年本科毕业于西安交通大学电气工程学院,现为西安交通大学电气工程学院电器专业工程硕士在读,研究方向为高压电器大容量试验。