

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.020

基于 VMD-WVD 相位法的长电缆局放双端定位

陈皇熹, 方春华, 普子恒, 吴田

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:快速准确定位电缆局放故障位置对电缆系统安全稳定运行具有重要意义。针对传统行波定位法在长电缆局放定位时反射信号难以识别以及存在时间同步误差的问题,提出一种基于变分模态分解-维格纳威尔分布(VMD-WVD)相位法的电缆局放双端定位方法,通过准确标记双端局放信号波头时刻实现双端局放信号的同步,利用相位定位实现长电缆局放入射信号的双端同步。文中建立了长线路 PSCAD 模型,分析故障位置、电缆长度和采样率对 VMD-WVD 相位法在长电缆定位的精度影响。结果表明,在上述 3 种因素影响下,VMD-WVD 相位法的平均定位精度分别为 0.54%,0.85%,0.69%,高于传统行波定位法。文中研究成果为长电缆局部放电精准定位提供一种全新思路。

关键词:长电缆;变分模态分解-维格纳威尔分布(VMD-WVD);局放信号;波头时刻;双端定位;定位精度

中图分类号:TM755

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0171-07

0 引言

局部放电(partial discharge, PD)监测是一种评估电缆绝缘状态的重要方法。该方法通过分析检测 PD 信号,对 PD 源位置进行快速准确定位,从而保障电力系统的稳定运行^[1-3]。

目前国内外针对电力电缆 PD 定位的研究较多,电力电缆故障检测手段以行波法为主。时域反射法(time domain reflectometry, TDR)是应用最为广泛的一种单端行波法,被应用于地质勘查、线路测距及 PD 定位等^[4-6]。运行中电缆系统一般长达数千千米甚至数十千米,而电缆中的反射信号最长传播距离为近 2 倍电缆长度。因此,信号易受到衰减和色散影响,导致反射信号畸变,影响 TDR 定位精度^[7-8]。为提高 TDR 定位精度,文献[6]提出一种利用局放信号小波变换各尺度中心频率对应的波速进行定位计算的算法。文献[9]提出一种基于行波法的振荡波电压下电缆局放自动定位算法,该算法自动从 PD 波形中分离脉冲信号段,提取每个脉冲信号段的特征,进行入射信号和反射信号的匹配。文献[10]基于经验模态分解与动态时间规整算法,对原始局放波形进行局放脉冲分割和入反射脉冲匹配,最后根据 TDR 原理计算局放源位置。文献[11]利用一种改进相位差法,计算最初 2 次局放信号波峰时刻和信号波速以定位局放故障。上述研究充分考虑反射信号识别困难,并在短距离电缆下验证了定位精度,然而在长电缆中反射信号畸变

严重,入、反射信号匹配难度大,定位精度还有待考证。针对长电缆中 TDR 入、反射信号匹配困难的问题,双端行波法被广泛用于故障定位^[12]。该方法只须采集首次到达两端的信号,易于检测且准确度较高,能有效避免长电缆中入、反射信号匹配困难的问题。然而,双端行波法需用到精度极高的同步时钟,在现有技术条件下即使采用全球定位系统(global positioning system, GPS)技术,时间测量也存在同步偏差^[8,13]。由于长电缆中信号传播时间更长,定位精度受时间影响更大,故准确同步两端故障信号波头时刻是双端行波定位法的关键所在^[14]。

为此,文中提出一种基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)-维格纳威尔分布(Wigner-Ville distribution, WVD)相位法的电缆局放双端定位。VMD 是一种非递归分解模型,能反映信号奇异性特征,具有稳定性好、运算效率高和良好鲁棒性等优点^[15-17]。WVD 有优良时频分辨率和数学特性,能较好描述信号的边缘特征、瞬时频率等,并确定信号突变发生时间、频率及能量等信息^[15,18]。将 VMD-WVD 相结合的相位双端定位只须在电缆两端安装传感器,采集局放入射信号,即可准确提取局放信号波头相位定位,从而使双端信号同步。该方法可有效解决传统行波定位法在长电缆局放定位中反射信号识别困难和时间同步误差的问题。

1 VMD-WVD 相位法的电缆局放双端定位

1.1 理论基础

VMD 可将局放信号分解为一系列有限带宽固

收稿日期:2022-01-04;修回日期:2022-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807110)

有模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 分解后的 IMF 包含大量故障信息^[19]。VMD 核心是解决变分问题, 约束局放信号变分问题模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∂_t 为对时间 t 偏导; $\delta(t)$ 为冲激函数; u_k 为分解得到 k 个局放信号模态函数; K 为最大分解层数; ω_k 为各模态函数中心频率; $f(t)$ 为局放信号。

引入 Lagrange 乘数法和惩罚因子 α , 解决式(1)有约束最优化问题, 并通过交替方向算法迭代优化序列, 得到局放信号模态函数及中心频率表达式如式(2)和式(3)所示。

$$\hat{u}_{k,n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_{i,n}(\omega) + \frac{\hat{\lambda}_n}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_{k,n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (3)$$

利用式(4)对局放信号模态函数和中心频率进行更新。

$$\hat{\lambda}_{n+1} = \hat{\lambda}_n + \sigma \left(\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_{k,n+1} \right) \quad (4)$$

式中: λ 为 Lagrange 乘数因子; σ 为更新因子。迭代式(2)一式(4), 满足式(5)所示收敛条件时停止迭代。

$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_{k,n+1} - \hat{u}_{k,n}\|_2^2}{\|\hat{u}_{k,n}\|_2^2} < \varepsilon \quad (5)$$

式中: ε 为收敛标准容差。

由式(1)一式(5)可知, VMD 使用迭代搜索变分模型最优解, 确定局放信号模态函数及其中心频率, 最终局放信号自适应分解为 k 个 IMF。

WVD 定义为信号瞬态自相关函数的傅里叶变换^[20], 如式(6)所示。

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

式中: τ 为信号时延; f^* 为 f 的共轭。对式(6)两边分别进行 ω, t 积分可得:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, \omega) d\omega = |f(t)|^2 \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} W_x(t, \omega) dt = |f(\omega)|^2 \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知, 局放信号在 t 时刻的

WVD 瞬时能量分布等于沿 ω 轴积分; 局放信号在 ω 时刻的 WVD 瞬时能量分布等于沿 t 轴积分。

1.2 VMD-WVD 相位法双端定位

使用 VMD 算法对局放信号分解, 需预设 VMD 的分解层数 k , 其取值将影响分解结果。分解层数太少, 会导致信息缺失; 反之会出现频率混叠。文中采用基于能量差的自适应 VMD 算法确定 VMD 的分解层数^[21], VMD-WVD 波头时刻提取主要步骤如下。

(1) 初始化解层数 $k=2$, 设置 $K=10$;

(2) 对局放信号进行 k 层 VMD, 计算局放信号的能量及各层 IMF 的能量;

(3) 从 $k=2$ 开始逐层计算能量差参数 ρ 直至预设最大模态数;

(4) 定义能量差绝对变化率 β , 选取 β 出现最大值前对应的 k 作为最终分解层数, 选取 IMF1 作为局放信号特征分量;

(5) 使用 WVD 求出该 IMF 的 WVD 瞬时能量分布, WVD 瞬时能量分布幅值时刻即为局放信号波头时刻。

数字采样后的局放信号为离散信号, 设局放信号为 $f(n)$, 对 $f(n)$ 进行快速傅里叶变换如式(9)所示。

$$f_m(n) = \text{Re}(f_m(n)) + \text{Im}(f_m(n)) \quad (9)$$

式中: f_m 为 f 的快速傅里叶变换。求得相位响应如式(10)所示。

$$\varphi(n) = \arctan \frac{\text{Re}(f_m(n))}{\text{Im}(f_m(n))} \quad (10)$$

重复式(10)可得各个点的相位谱。考虑局放信号传播过程的相位衰减特性, 在电缆首、末端局放信号相位如式(11)和式(12)所示。

$$\varphi_1 = \varphi d \beta_1 \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \varphi(l - d) \beta_2 \quad (12)$$

式中: φ 为原始局放信号波头相位; φ_1, φ_2 分别为电缆首、末端局放信号波头相位; β_1, β_2 分别为首、末端局放信号相位常数; d 为电缆局放源位置; l 为电缆长度。

首、末端相位常数可利用式(13)分别计算得到。

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}{2}} \quad (13)$$

式中: R_0, G_0, L_0, C_0 分别为单位长度电缆电阻、电导、电感、电容值; ω 在计算时为首、末端局放信号角频率分别取 ω_1, ω_2 。由于首、末端局放信号角频率有所差异, 故相位常数会有所不同, 将式(11)、式(12)

作比可得式(14)。

$$d(\omega) = \frac{\varphi_1 l}{\varphi_1 + \varphi_2 g(\omega)} \quad (14)$$

式中: $g(\omega) = \beta_1/\beta_2$,为首、末端局放信号相位常数比(以下简称为相位常数比),最终PD位置估计可从 $d(\omega)$ 平均值获得。

综上所述,VMD-WVD相位法的具体步骤为:

(1) 在电缆首、末两端安装传感器,采集信号并对信号进行去噪提取并分割出首、末端局放信号。

(2) 根据式(9)将局放信号变换成频域信号。

(3) 将频域信号代入式(10)依次计算出首、末端局放脉冲相位谱。

(4) 对局放信号进行VMD-WVD处理得到信号波头时刻。

(5) 在相位谱中提取波头时刻和幅值时刻相位,代入式(14)以计算故障位置,局放故障位置可从 $d(\omega)$ 平均值获得。

2 VMD-WVD波头相位提取

2.1 现场局放信号提取

为验证VMD-WVD在实际工程中波头相位提取的精度,文中依托某供电公司电缆带电检测服务现场采集的局放信号进行验证。局放带电检测现场电缆型号YJV22-64/110 kV,电缆总长2 km。使用高频电流传感器环接在电缆屏蔽层接地线采集局放信号,其检测带宽能达30 MHz,采集系统采样率设置为200 MHz。局放信号经高频电流传感器采集后经50 Ω 同轴电缆传输至采集系统,最后传输至电脑端进行处理。现场检测采集的2组信号如图1所示。

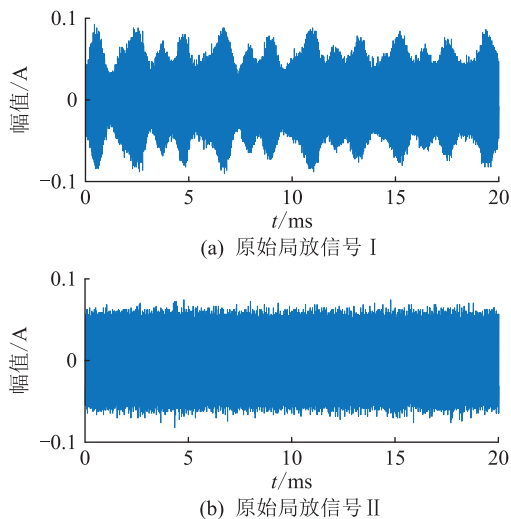


图1 现场采集的原始局放信号

Fig.1 Original partial discharge signals collected on site

由图1可知受现场环境影响,局放信号埋在大量噪声中。小波变换是最常用的信号去噪方法^[22],对图1的2组信号进行去噪分割局放脉冲后,局放信号分别如图2所示。

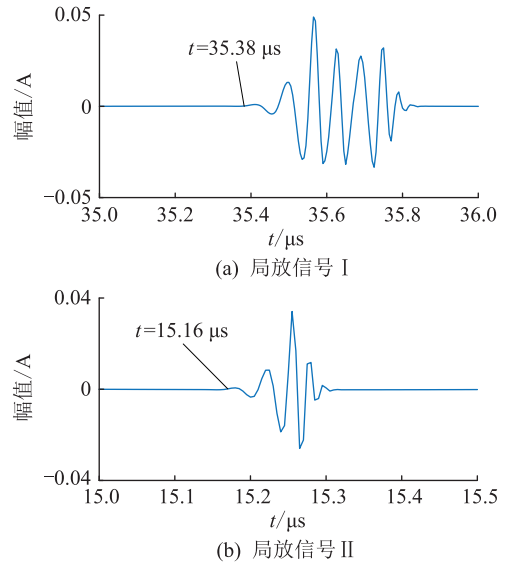


图2 局放信号波形

Fig.2 Waveforms of partial discharge signals

2.2 现场局放信号波头相位分析

由于配网结构复杂,且受现场环境噪声等影响较大,局放信号波头检测较为困难^[12]。由第1章分析可知,VMD-WVD能自适应地把局放信号分解成具有大量故障特征信息的IMF,可准确描述信号随时间的能量变化。通过检测局放信号突变点以确定局放信号波头时刻,使双端信号同步。对图2的2个局放信号进行VMD分解层数确定,具体结果如表1所示。

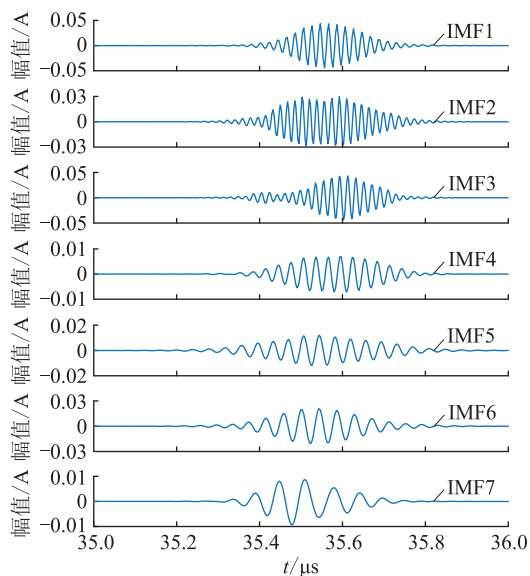
表1 能量差绝对变化率

Table 1 Absolute change rate of energy difference

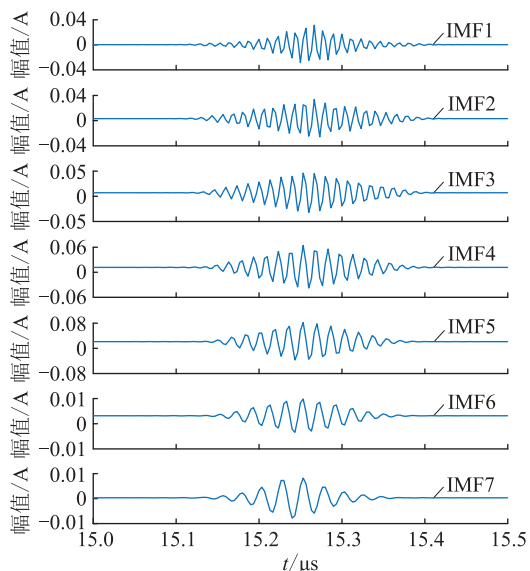
k	绝对变化率 β_a	绝对变化率 β_b
3	0.069 2	0.117 0
4	0.086 5	0.217 0
5	0.143 3	0.358 6
6	0.359 5	0.710 9
7	0.832 0	0.971 5
8	6.455 2	1.718 0
9	0.518 2	0.675 9
10	0.299 3	0.352 5

由表1可知,当 $k=8$ 时, β_a , β_b 分别出现最大值,故选取 $k=7$ 作为最终分解层数,VMD-WVD分解结果如图3所示。

图3将2组现场局放信号分解成不同频带的IMF,其中IMF1为高频分量。若直接使用IMF1来



(a) 局放信号 I 的 VMD

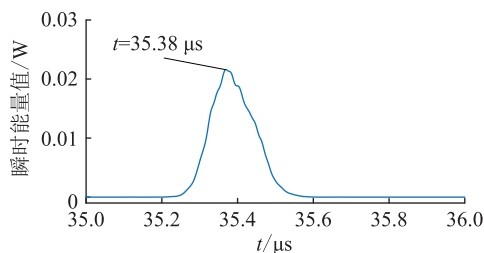


(b) 局放信号 II 的 VMD

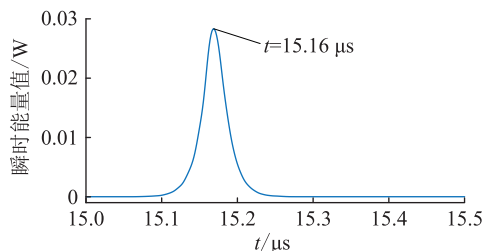
图 3 局放信号的 VMD 结果

Fig.3 VMD results of the partial discharge signals

计算局放波头时刻较为困难^[23],通过对 IMF1 进行 WVD,可得到局放信号的 WVD 瞬时能量分布,如图 4 所示。当电缆线路发生局放后,电缆局放瞬时能量可分为线路基频瞬时能量和局放后暂态瞬时能量^[18]。其中基频瞬时能量相对平稳,暂态瞬时能量主要由分布式电缆模型中电感和电容放电产生,电感和电容放电是一个单调递减过程,因此局放信号波头时刻即为 WVD 瞬时能量分布幅值时刻。由图 4 可知,当电缆发生局放故障,最先到达两端的信号为局放入射信号,在局放信号到达前瞬时能量较为平稳;当局放信号到达后,在到达时刻附近产生一个尖峰,峰值时刻即为局放信号波头时刻。对比图 2 与图 4 可知,VMD-WVD 能准确提取局放信号波头时刻。



(a) 局放信号 I 的瞬时能量分布



(b) 局放信号 II 的瞬时能量分布

图 4 局放信号的 WVD 瞬时能量分布

Fig.4 WVD instantaneous energy distribution of the partial discharge signals

3 VMD-WVD 相位法影响因素分析

局放故障定位受故障位置、电缆长度及采样率等因素影响。如图 5 所示在 PSCAD 中搭建长电缆线路模型,进一步分析各因素对 VMD-WVD 相位法定位精度的影响。

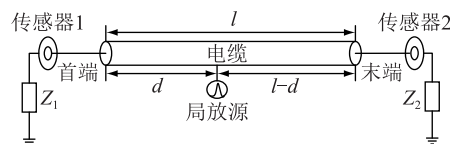


图 5 仿真模型

Fig.5 Simulation model

文献[24]的研究内容以及图 2 的现场局放信号测量结果都表明,双指数振荡衰减脉冲能够很好地模拟实际局放信号,因此以式(15)对局放信号进行模拟。

$$S(t) = A \left(e^{-\frac{1.3t}{\tau}} - e^{-\frac{2.2t}{\tau}} \right) \sin(2\pi f_c t) \quad (15)$$

式中:A 为脉冲幅值常数,设为 5 mA; τ 为衰减常数,设为 100 ns; f_c 为振荡频率,设为 5 MHz。取 f_s 为采样率,设为 200 MHz。

文中采用交联聚乙烯电缆作为 PSCAD 电缆模型,电缆模型的结构示意如图 6 所示。该电缆相关参数为:交联聚乙烯电缆导体的半径 R_1 为 10.85 mm;交联聚乙烯电缆绝缘层的半径 R_2 为 17.15 mm;金属屏蔽层的半径 R_3 为 18.70 mm;外护套的半径 R_4 为 21 mm;主绝缘的介电常数为 2.30;外绝缘的介电常数为 5;缆芯和金属屏蔽层的电阻率皆为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

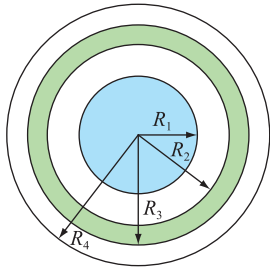


图6 电缆模型

Fig.6 Cable model

图7为 $d=1\ 700\text{ m}$ 时电缆首、末端采集的局放信号及其相位谱与WVD瞬时能量分布。

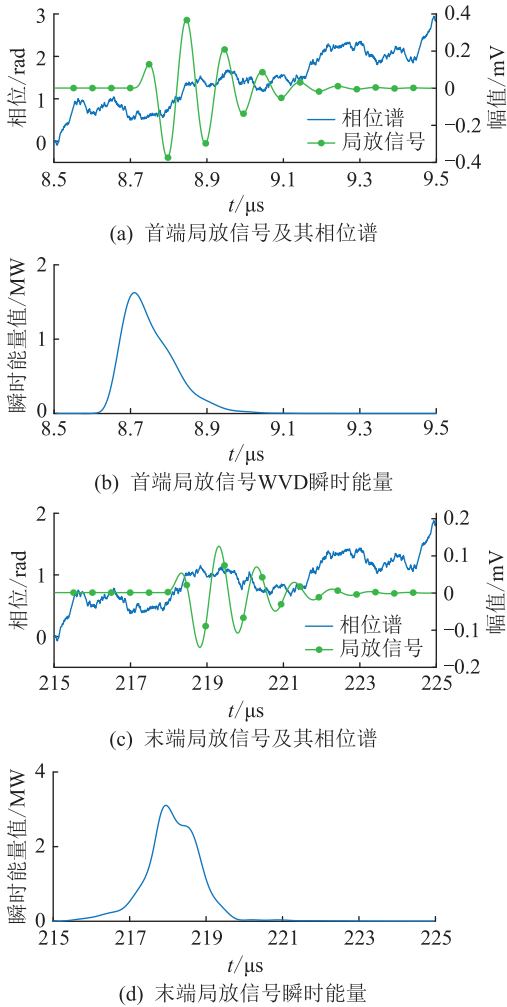


图7 首、末端局放信号和相位谱及WVD瞬时能量

Fig.7 Partial discharge signals of the first-end terminal-end, phase spectrums and instantaneous energy of WVD

为验证波速,以 100 m 为步长,设置电缆长度 l 为 $1\ 500\sim 3\ 000\text{ m}$,记录不同长度下脉冲从末端到达首端的时刻,最终取平均值作为波速,经计算波速 $v=1.978\ 2\times 10^8\text{ m/s}$ 。参照文献[24]计算 R_0, L_0, G_0, C_0 ,局放位置对定位精度影响如图8所示。

保持电缆长度不变,局放位置的改变对3种定

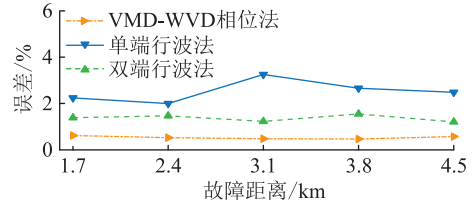


图8 不同局放位置的定位误差

Fig.8 Positioning error of different fault distances

位方法误差影响较小,VMD-WVD 相位法误差分别为 $0.62\%, 0.53\%, 0.48\%, 0.47\%, 0.58\%$,平均误差为 0.54% ,定位精度优于单端行波法和双端行波法。

改变电缆长度,保持 $d=\frac{3l}{5}$,电缆长度对定位精度定位结果如图9所示。

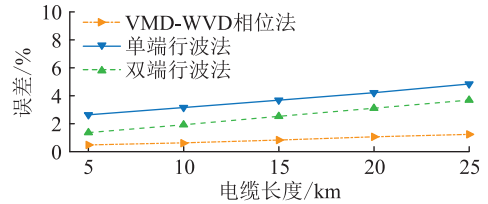


图9 不同电缆长度的定位误差

Fig.9 Positioning error of different cable lengths

随着电缆长度增加,3种方法的定位误差呈增大趋势。VMD-WVD 相位法平均定位误差为 0.85% ,长距离传播中波形色散影响导致相位误差,但平均误差小于 1% ,能够满足实际需求。

为了研究采样率对定位精度影响,改变采样率,设置 $l=5\text{ km}, d=l/2$,定位误差如图10所示。

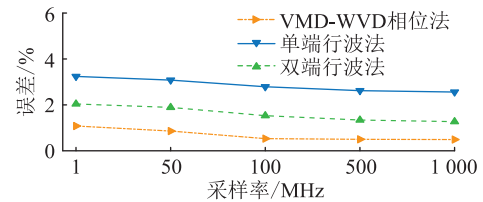


图10 不同采样率的定位误差

Fig.10 Positioning error of different sampling rates

VMD-WVD 相位法平均定位误差 0.69% ,在 1 MHz 采样率时定位误差达 1.08% ,但在 100 MHz 及以上时,误差保持 0.5% 左右。采样率降低,采样间隔增大,造成两端信号波头实际时刻与采样时刻的误差。故使用VMD-WVD 相位法时,须采用高采样率。

4 结论

文中阐述了VMD-WVD的基本原理,在此基础上针对传统行波定位法在长电缆局放定位中时间同步和反射信号难识别的问题,提出一种基于

VMD-WVD 相位法的电缆局放故障双端定位,最终得出以下结论:

(1) 文中提出的 VMD-WVD 相位法不仅保留传统双端定位法只须采集入射局放信号的优点,且用相位代替波速,不必对波速进行验证。

(2) 经验证 VMD-WVD 相位法能准确提取局放入射信号波头时刻与相位,实现长电缆入射局放信号双端同步的优点,能够有效减小长电缆定位中时间难同步和反射局放信号难识别带来的影响。

(3) 文中所提的 VMD-WVD 相位法在故障位置、电缆长度、采样率 3 种影响因素下平均定位精度分别为 0.54%,0.85%,0.69%,定位精度高于传统定位方法,采用 100 MHz 及以上采样率能获得更高的定位精度。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.
TIAN Yan,WANG Yong,YANG Sen,et al. UHF partial discharge location method based on time delay estimation of linear prediction analysis[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(12):181-186.

[3] 刘哲,苏菲,王兴振,等. 基于分布式无线 TEV 传感器的电缆终端局部放电监测系统[J]. 电测与仪表,2019,56(17):102-108.
LIU Zhe,SU Fei,WANG Xingzhen,et al. Partial discharge monitoring system based on cable terminal with distributed wireless TEV sensors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(17):102-108.

[4] WADI A L,AL-MASRI W,SIYAM W,et al. Accurate estimation of partial discharge location using maximum likelihood[J]. IEEE Sensors Letters,2018,2(4):1-4.

[5] SHAFIQ M,KIITAM I,TAKLAJA P,et al. Identification and location of PD defects in medium voltage underground power cables using high frequency current transformer[J]. IEEE Access,2019,7:103608-103618.

[6] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术,2016,40(7):2244-2250.
GAO Shuguo,LIU Hechen,FAN Hui,et al. PD location method of power cable based on wavelet transform modulus maxima considering wave characteristics[J]. Power System Technology, 2016,40(7):2244-2250.

[7] YII C C,ROHANI M N K H,ISA M,et al. Multi-end PD loca-

tion algorithm using segmented correlation and trimmed mean data filtering techniques for MV underground cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):92-98.

[8] 周凯,汪先进,赵世林,等. 非接触式中继装置用于长电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术,2020,44(1):369-376.
ZHOU Kai,WANG Xianjin,ZHAO Shilin,et al. Research on partial discharge positioning of long cable based on non-contact relay device[J]. Power System Technology,2020,44(1):369-376.

[9] 张若兵,陈子豪,杜钢. 基于行波法的振荡波电压下电缆局部放电自动定位算法[J]. 高电压技术,2019,45(4):1289-1296.
ZHANG Ruobing,CHEN Zihao,DU Gang. Partial discharge automatic locating algorithm for cable under oscillatory wave voltage conditions based on traveling wave method[J]. High Voltage Engineering,2019,45(4):1289-1296.

[10] 张若兵,金森,杜钢. 基于 EMD 与 DTW 算法的振荡波下电缆局部放电定位方法[J]. 高电压技术,2020,46(1):273-281.
ZHANG Ruobing,JIN Sen,DU Gang. Method of partial discharge localization for cable under oscillatory wave voltage conditions based on EMD and DTW algorithm[J]. High Voltage Engineering,2020,46(1):273-281.

[11] LAN S,HU Y Q,KUO C C. Partial discharge location of power cables based on an improved phase difference method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019,26(5):1612-1619.

[12] 张悻宁. 架空-电缆混合输电线路故障定位方法综述[J]. 电力工程技术,2020,39(6):44-51.
ZHANG Yining. A review of fault location methods for hybrid overhead and cable transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(6):44-51.

[13] 柴鹏,周灏,张煜,等. 基于双端行波法的电缆线路短路故障定位改进[J]. 中国电力,2020,53(11):168-174.
CHAI Peng,ZHOU Hao,ZHANG Yu,et al. Short-circuit fault location for power cables based on improved two-terminal traveling wave method[J]. Electric Power,2020,53(11):168-174.

[14] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(8):8-13.
GAO Yanfeng,ZHU Yongli,YAN Hongyan,et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016,44(8):8-13.

[15] DRAGOMIRETSKIY K,ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3):531-544.

[16] 高佳程,朱永利,郑艳艳,等. 基于 VMD-WVD 分布与堆栈稀疏自编码网络的局放类型识别[J]. 中国电机工程学报,2019,39(14):4118-4129.

- GAO Jiacheng, ZHU Yongli, ZHENG Yanyan, et al. Pattern recognition of partial discharge based on VMD-WVD and SSAE [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14):4118-4129.
- [17] WANGX J, XUE Y J, ZHOU W, et al. Spectral decomposition of seismic data with variational mode decomposition-based Wigner-Ville distribution[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(11):4672-4683.
- [18] 胡开庚. 基于Wigner Ville分布的故障行波信号分析方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
- HU Kaigeng. Research on fault traveling wave signal analysis method based on Wigner Ville distribution [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [19] 王桥梅, 吴浩, 胡潇涛, 等. 基于VMD多尺度模糊熵的HVDC输电线路故障识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5):134-144.
- WANG Qiaomei, WU Hao, HU Xiaotao, et al. Fault recognition method for HVDC transmission line based on VMD multi-scale fuzzy entropy [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5):134-144.
- [20] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4086-4093.
- LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4086-4093.
- [21] 卿宗胜, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于自适应VMD和改进功率谱估计的球磨机负荷特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5):234-241.
- QING Zongsheng, GAO Yunpeng, WU Cong, et al. Feature ex-
- traction method of ball mill load based on the adaptive variational mode decomposition and the improved power spectrum analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5):234-241.
- [22] 余浩, 庄池杰, 曾嵘, 等. 提高暂态电压测量精度的自适应小波去噪方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6):2139-2147.
- YU Hao, ZHUANG Chijie, ZENG Rong, et al. Adaptive wavelet de-noising method for improving the accuracy of transient over-voltage measurement [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2139-2147.
- [23] 李波. 基于变分模态分解及魏格纳威尔分布的电缆故障定位方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- LI Bo. Research of cable fault location based on variational mode decomposition and Wigner-Ville distribution [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [24] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11):3402-3409.
- XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Partial discharge location for power cable based on the time reversal technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11):3402-3409.

作者简介:



陈皇熹

陈皇熹(1997),男,硕士在读,研究方向为电力设备故障检测(E-mail: 1273364282@qq.com);

方春华(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力设备故障检测;

普子恒(1987),男,博士,副教授,研究方向为高压电气设备故障检测。

Double-ended positioning of partial discharge for long cable based on VMD-WVD phase method

CHEN Huangxi, FANG Chunhua, PU Ziheng, WU Tian

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Obtaining the cable partial discharge fault location quickly and accurately is of great significance to the safe and stable operation of the cable system. In order to resolve the problem of the traditional traveling wave positioning method on time synchronization, a double-ended positioning of partial discharge for cable based on variational mode decomposition-Wigner Ville distribution (VMD-WVD) phase method is proposed to reduce the influence of reflected waves identification in long-cable. It is marked the wave head of the double-ended partial discharge signal accurately to achieve the synchronization of the double-ended partial discharge signal by the proposed method. Through phase positioning, the advantages that synchronizing the incident signal of double-ended partial discharge in the long cable are realized. It is built a PSCAD model of a long line to analyze the positioning accuracy of the VMD-WVD phase method under the influence of fault location, cable length and sampling rate in long cables. The results show that the average positioning accuracy by the VMD-WVD phase method for the above three influencing factors is 0.54%, 0.85% and 0.69% respectively, which is higher than the value by the traditional traveling wave positioning method. The research results provide a new idea for the precise positioning of partial discharge in long cables.

Keywords: long cable; variational mode decomposition-Wigner Ville distribution (VMD-WVD); partial discharge signal; wave head moment; double-ended positioning; positioning accuracy

(编辑 李栋)