

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210421

基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电 线路故障测距

高淑萍¹, 徐振曦¹, 宋国兵², 邵明星¹, 姜元月¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710600; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对行波法测距精度受波速、行波波头标定的精度以及噪声的影响, 提出一种基于小波阈值去噪和 CEEMD-HT 结合的混合三端直流输电线路测距方法。首先利用小波阈值去噪对故障信号滤噪, 然后对滤噪后的信号使用互补集合经验模态分解和希尔伯特变换标定初始波头的到达时间。再根据故障行波到达测量端时间比值识别故障支路。最后考虑到行波波速难以精确确定, 基于已知线路长度和初始波头到达时间, 提出一种不受波速影响的测距方法。仿真结果表明, 所提方法能够有效标定波头, 且测距结果不受波速、故障距离、故障类型、过渡电阻及噪声的影响。与利用波速计算的双端法、HHT 及小波包测距算法相比, 该方法的测距误差更小。

关键词: 混合三端直流输电系统; 行波法; 时频图; 互补集合经验模态分解; 三端故障测距

Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD

GAO Shuping¹, XU Zhenxi¹, SONG Guobing², SHAO Mingxing¹, JIANG Yuanyue¹

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the influence of wave speed, precision of traveling wave head calibration and noise on the location accuracy of the traveling wave method, a hybrid three-terminal HVDC transmission line location method based on wavelet threshold denoising and CEEMD-HT is proposed. First, the fault signal is denoised by wavelet threshold denoising, and then the arrival time of the initial wave head is calibrated by combining complementary ensemble empirical mode decomposition and a Hilbert transform (CEEMD-HT). Then the fault branch is identified according to the ratio of the time of the fault traveling wave to the measuring end. Finally, considering that the traveling wave velocity is difficult to determine accurately, based on the known line length and the initial arrival time of the wave head, a new location method independent of the wave velocity is proposed. The simulation results show that the proposed method can calibrate the wave head effectively, and the location results are not affected by wave velocity, fault distance, fault type, transition resistance and noise. The error of this method is smaller than the double end method, and the HHT and wavelet packet ranging algorithm.

This work is supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51777166).

Key words: hybrid three-terminal DC transmission system; traveling wave method; time-frequency diagram; complementary ensemble empirical mode decomposition; three-terminal fault location

0 引言

近年来, 混合直流输电技术因既可以充分发挥

常规直流输电技术输送容量大、造价低、损耗小的优势, 又可以发挥柔性直流输电技术可控性高、占地面积小, 大规模高效接入及新能源并网的优势, 同时还保障了电网的安全稳定运行, 从而得到广泛关注^[1-3]。但混合直流输电线路一般较长, 所跨地形及自身结构又比较复杂, 使得直流输电线路故障率

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51777166); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目资助(U1766209)

增高,故障巡线、故障点检测难度增大^[4-6]。为保障电网运行稳定性、提高供电可靠性、及时消除故障,减轻巡线人员工作量、减少因故障带来的经济损失,在输电线路发生故障后快速且准确找到故障点十分必要^[7-10]。

常用的故障测距方法有故障分析法、固有频率法和行波法^[11-13]。故障分析法因具有良好的稳定性在电力系统故障分析中广泛应用,但却存在计算量大且测距精度不高的缺陷^[14]。与行波法相比,固有频率法不需识别行波波头,但易受干扰,并且存在测量死区,多与其他测距方法相结合^[15-16]。行波法因其几乎不受外界因素及自身结构的影响,在故障测距中广泛应用^[17-20]。

行波法测距存在两大关键问题,其一是能否准确识别行波波头。现阶段,行波波头的检测方法主要有相关函数法、求导法、小波变换、数学形态法以及希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)^[21]。相关函数法和求导法的原理简单,但行波所含信息较为复杂,两种方法易受外界干扰,难以应用于实际测距中;数学形态法虽对硬件要求低且对噪声不敏感,但其形态运算及结构元素的形状、大小难以选择^[22];小波变换在波头识别过程中有其独到之处,但小波基函数和分解尺度选择困难且不具有自适应性;HHT的提出虽解决了上述传统行波测距存在的弊端,但因经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法本身存在的缺陷使得其模态混叠及端点效应严重,在一定程度上影响测距精度^[23]。2009年,Wu和Huang提出的集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)使得模态混叠现象有所改善,但EEMD算法的前提是认为添加的多组高斯白噪声叠加几乎是为零的,在实际过程中如果处理次数不够多,白噪声便不能被忽略,即称为残余辅助噪声。而Yeh等人提出的互补集合经验模态分解(Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD)在进一步抑制模态混叠现象的同时,还通过添加成对的、互为相反数的白噪声序列消除了EEMD的残余辅助噪声^[24]。其二是能否精确确定行波波速,波速不仅随线路参数的频变特性与行波波头衰减改变,在实际工程中,还受周围环境及线路老化问题影响,所以很难做到精确确定^[25]。

本文提出一种先使用小波阈值去噪,再将信号进行CEEMD分解与希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)来获得故障行波到达4个测量端的时刻,推导出一种不受波速影响的混合三端故障测距算法。通过PSCAD搭建模型提取数据,在Matlab平台进行

数据处理,验证了此测距方法的正确性与适用性。并将结果与用小波包测距算法、HHT测距算法及含波速计算的双端法进行比较,体现了本文所提方法的优越性。

1 混合三端直流输电线路的行波测距原理

1.1 混合三端直流输电系统结构

混合三端直流输电系统结构如图1所示,其整流侧为LCC-HVDC(Line Commutated Converter based HVDC),两个逆变侧为MMC-HVDC(Modular Multilevel Converter based HVDC),送端容量为80万kW,两个受端容量都为40万kW。图1中,送端LCC采用定直流电流控制和最小触发角控制,两个受端MMC均采用定直流电压控制和定无功功率控制;直流输电线路采用频变参数线路模型。该系统结构不仅能弥补常规直流输电系统换相失败和柔性直流输电无法有效清除直流线路故障的缺陷,同时降低了工程投资以及运行费用,因而得到广泛应用。

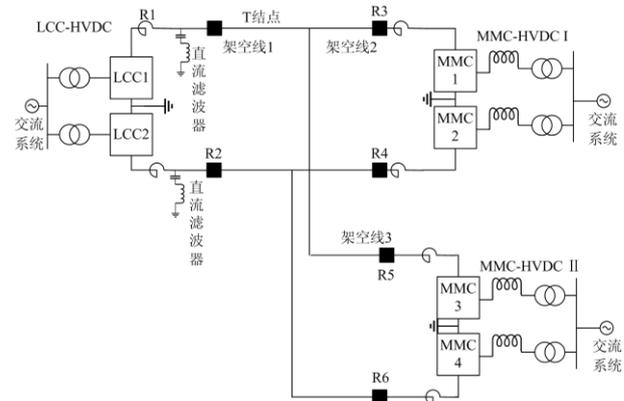


图1 混合三端直流输电系统结构

Fig. 1 Structure of a hybrid three-terminal DC transmission system

1.2 混合三端直流输电线路行波测距原理

传统输电线路行波故障定位依据所需检测端的数量分为单端行波法、双端行波法^[26]。单端行波法只需在线路一端设置测距装置且不需通信数据,设备投资成本低;双端行波法只需检测故障行波初始波头和准确记录故障行波到达各个测量点的时间,定位精度高,但受波速影响^[27-28]。此外,传统的行波法定位主要针对双端系统,目前还难以应用于LCC-MMC-MTDC(Multi Terminal Direct Current, MTDC)混合多端直流输电系统^[29]。基于此,本文提出一种适用于混合三端直流输电系统且不受波速影响的新型故障测距方法。

混合三端直流输电系统故障设置简化模型如图 2 所示, 在 LCC 端、MMC I 端、MMC II 端以及 T 结点处设置了 A、B、C、T 4 个测量点, F1、F2、F3 是故障位置。

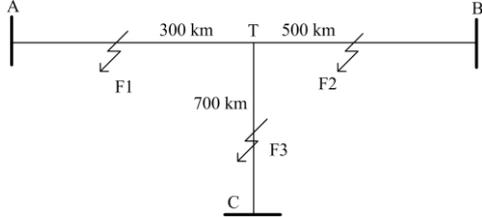


图 2 混合三端直流输电系统故障简化模型

Fig. 2 Simplified failure model of hybrid three-terminal DC transmission system

假设线路 AT 段发生故障, 即 F1, 由故障点产生的行波向测量端方向传播, 先后到达各测量点。设 t_A 、 t_B 、 t_C 和 t_T 是故障行波到达 4 个测量点的时间, v 是故障行波波速度, 对于 AB 段线路, 根据行波测距原理可得式(1)。

$$\begin{cases} x_{AF1} - x_{BF1} = v(t_A - t_B) \\ x_{BT} = v(t_B - t_T) \\ x_{AB} = x_{AF1} + x_{BF1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{AF1} 、 x_{BF1} 分别是测量点 A、B 与故障点 F1 之间的距离; x_{BT} 为支路 BT 的长度。

利用 AC 段线路, 根据行波测距原理可得故障测距公式如式(2)所示。

$$\begin{cases} x_{AF1} - x_{CF1} = v(t_A - t_C) \\ x_{CT} = v(t_C - t_T) \\ x_{AC} = x_{AF1} + x_{CF1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_{AF1} 、 x_{CF1} 分别是测量点 A、C 与故障点 F1 之间的距离; x_{CT} 为支路 CT 的长度。将式(1)和式(2)联立, 可得 x_{AF1} 的测距公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} x_{AF1} = \frac{x_{AT}}{2} \cdot \frac{t_A - t_B}{t_B - t_T} + \frac{x_{AB}}{2} \\ x_{AF1} = \frac{x_{CT}}{2} \cdot \frac{t_A - t_C}{t_C - t_T} + \frac{x_{AC}}{2} \\ x_{AF1} = \frac{1}{2}(x_{AF1} + x_{AF1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_{AF1} 、 x_{AF1} 分别是利用线路 AB、AC 长度计算出的故障距离。

同理, 若故障发生在 BT 段、CT 段, 可得故障点距 B、C 测量点的距离 x_{BF2} 、 x_{CF3} 的测距公式如式(4)和式(5)所示。

$$\begin{cases} x_{BF2,1} = \frac{x_{AT}}{2} \cdot \frac{t_B - t_A}{t_A - t_T} + \frac{x_{BA}}{2} \\ x_{BF2,2} = \frac{x_{CT}}{2} \cdot \frac{t_B - t_C}{t_C - t_T} + \frac{x_{BC}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{BF2} = \frac{1}{2}(x_{BF2,1} + x_{BF2,2}) \\ x_{CF3,1} = \frac{x_{AT}}{2} \cdot \frac{t_C - t_A}{t_A - t_T} + \frac{x_{CA}}{2} \\ x_{CF3,2} = \frac{x_{BT}}{2} \cdot \frac{t_C - t_B}{t_B - t_T} + \frac{x_{BC}}{2} \\ x_{CF3} = \frac{1}{2}(x_{CF3,1} + x_{CF3,2}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)一式(5)可知故障距离与行波速度无关, 只与行波到达 4 个测量点的时间以及线路的长度有关, 而线路的长度是已知的。式中 t_A 、 t_B 、 t_C 与 t_T 通过 CEEMD-HT 得到的时频图确定。

2 基于 CEEMD 分解与 HT 变换的故障行波初始波头标定

对于测量端初始波头的标定主要分为三部分: 首先故障行波线模电压信号进行小波阈值去噪处理, 然后对去噪后的信号进行 CEEMD 分解得到若干个由高频到低频依次排列的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 分量, 最后通过希尔伯特变换则可以得到每个 IMF 分量对应的瞬时频率谱。

2.1 测量点初始波头标定

当传输线路发生故障时, 故障点产生一个非线性且包含大量高频故障信息的暂态电压行波向各个测量端传输, 为减少暂态电压行波信号正负极间的电磁耦合对测距精度的影响, 对暂态电压行波进行凯伦贝尔变换。同时因暂态电压行波零模分量在传输过程中衰减速度快而线模分量衰减速度较慢, 所以本文选择线模电压作为研究对象。同时考虑到在实际工程中, 采集到的故障信号含有噪声, 为减少噪声对测距结果的影响, 本文采用小波阈值去噪的方法一定程度上滤除故障行波信号所含噪声。因本文所采集的线模电压是一维信号, 所以首先对线模电压使用一维去噪函数 wden 进行 db2 小波分解, 得到一系列小波系数, 然后利用 soft SURE 阈值原则处理所有小波系数得到降噪信号^[30]。

暂态电压行波信号的故障频谱由一系列谐波形式的频率成分组成, 降噪后的故障信号经过 CEEMD 分解后得到若干频率由高到低排列的 IMF 分量, 其中 IMF1 分量对应频率幅值最高, 所包含

的故障信息最为丰富, 基于此本文选择对 IMF1 进行希尔伯特变换得到其时频图。

把经过 CEEMD 分解的信号得到的 IMF1 分量 $C_i(t)$ 进行希尔伯特变换得到

$$\hat{C}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (6)$$

由 $C_i(t)$ 和 $\hat{C}_i(t)$ 构造新的时间序列 $Z_i(t)$, 如式(7)所示。

$$Z_i(t) = C_i(t) + j\hat{C}_i(t) = A_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} A_i(t) = \sqrt{C_i^2(t) + \hat{C}_i^2(t)} \\ \theta_i(t) = \arctan \frac{C_i(t)}{\hat{C}_i(t)} \\ f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_i(t)}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A_i(t)$ 、 $\theta_i(t)$ 和 $f_i(t)$ 分别为第 i 个 IMF 分量对应的瞬时幅值、瞬时相位和瞬时频率。由式(8)可以看出经过希尔伯特变换的瞬时频率含有时间的变量, 因此可以得到每个时刻的频率分布情况。而时频图中第一个突变点对应的时刻就是行波波头到达测量端的时刻。

图 3 展示了在采样频率为 1 MHz, 采样数据为故障后 10 ms 内的直流输电线路电压经过降噪后的故障行波信号进行 CEEMD 分解后得到的 IMF1 分量, 通过 HT 变换后得到的时频图。由图 3 可知 IMF1 时频图首个突变点对应的时刻是 $t=0.001031$ s, CEEMD-HT 可以准确检测到故障暂态电压行波到达测量端的首波头时刻。

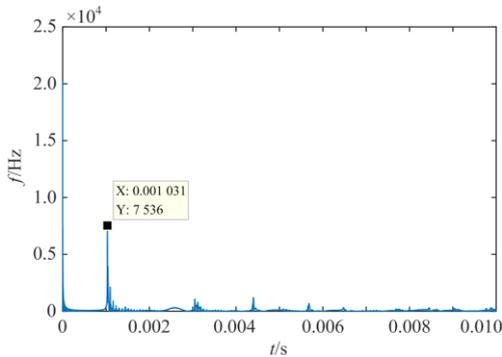


图 3 CEEMD-HT 首波头标定时频图

Fig. 3 Time-frequency diagram of CEEMD-HT head calibration

2.2 混合三端直流输电线路故障支路判断

若线路发生永久性故障时, 为最大可能地减少因线路故障带来的损失, 必须采用断路器将故障支路及时隔离。由图 2 可知故障可能发生在支路 AT、BT、CT 的任一支路, 故先识别故障支路。

根据行波测距原理, 假设行波速度是 v , 故障行波到达各个测量点的时间比就是故障点到各个测量点的距离比。据此提出如下故障支路识别方法:

当满足式(9)时, AT 支路发生故障。

$$\begin{cases} \frac{t_A}{t_B} < \frac{x_{AT}}{x_{BT}} \\ \frac{t_A}{t_C} < \frac{x_{AT}}{x_{CT}} \end{cases} \quad (9)$$

当满足式(10)时, BT 支路发生故障。

$$\begin{cases} \frac{t_B}{t_A} > \frac{x_{BT}}{x_{AT}} \\ \frac{t_B}{t_C} < \frac{x_{BT}}{x_{CT}} \end{cases} \quad (10)$$

当满足式(11)时, CT 支路发生故障。

$$\begin{cases} \frac{t_C}{t_A} > \frac{x_{CT}}{x_{AT}} \\ \frac{t_C}{t_B} > \frac{x_{CT}}{x_{BT}} \end{cases} \quad (11)$$

当满足式(12)时, T 结点发生故障。

$$\begin{cases} \frac{t_A}{t_B} = \frac{x_{AT}}{x_{BT}} \\ \frac{t_A}{t_C} = \frac{x_{AT}}{x_{CT}} \\ \frac{t_B}{t_C} = \frac{x_{BT}}{x_{CT}} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)是理想情况下的 T 结点故障判别公式, 但由于实际测距过程中的测量误差, 使得利用式(12)对 T 结点是否故障进行判断, 不再适用。本文对于 T 结点是否故障, 采用 2.3 节所述方案进行判别。

2.3 T 结点故障死区

经大量实验验证, 上述故障支路判别条件在故障点距离 T 结点 1 km 时, 仍可正确判别出故障支路, 但考虑到行波采集装置存在的测距死区, 实际运行中的误差及算法的故障测距精度, 在 T 结点附近发生的故障, 由判别条件所得出的故障点位置可能位于 T 结点或者位于非故障支路, 即随着故障点距 T 结点越来越近, 其故障支路的判别也越来越困难。因此, 本文以 T 结点为圆心, $2\delta + 2\lambda$ 为半径, 构建 T 结点故障区域, 其中 δ 为行波采样装置的测距死区, λ 为故障测距精度^[31]。本文采样频率为 1 MHz, 文献[32]提出, 采样频率为 1 MHz 的行波采集装置的测距死区约为 300 m, 即本文选取 $\delta = 300$ m; 当所得测距结果位于 T 结点故障区域内, 则以该测距结果为圆心, 向其两端 $600 + 2\lambda$ 进

行故障点搜寻, 可以利用由 2.2 节故障支路判别条件所判得的支路进行重点搜寻。

2.4 混合三端直流输电线路测距流程

首先, 利用 CEEMD-HT 准确求取故障行波到达各个测量点的时间, 再根据行波测距原理进行故障测距, 本文所提不受波速影响的混合三端故障测距方法步骤如下。

1) 故障发生后, 采集检测点 A、B、C 及 T 结点处的暂态电压行波信号, 为减少正负极间电磁耦合对测距精度的影响, 对故障后暂态电压行波信号做凯伦贝尔变换取其线模分量;

2) 对得到的线模分量进行小波阈值去噪预处理得到降噪信号;

3) 对去噪信号做 CEEMD-HT 得到 IMF1 分量的时频图, 根据时频图首个突变点确定故障行波从故障点达到 4 个测量端的时间 t_A 、 t_B 、 t_C 和 t_T ;

4) 利用故障支路识别方法, 判断故障支路为 AT 支路、BT 支路还是 CT 支路;

5) 根据所判断出的故障支路, 利用式(3)一式(5)计算出故障距离, 完成故障测距, 故障测距完整流程图如图 4 所示。

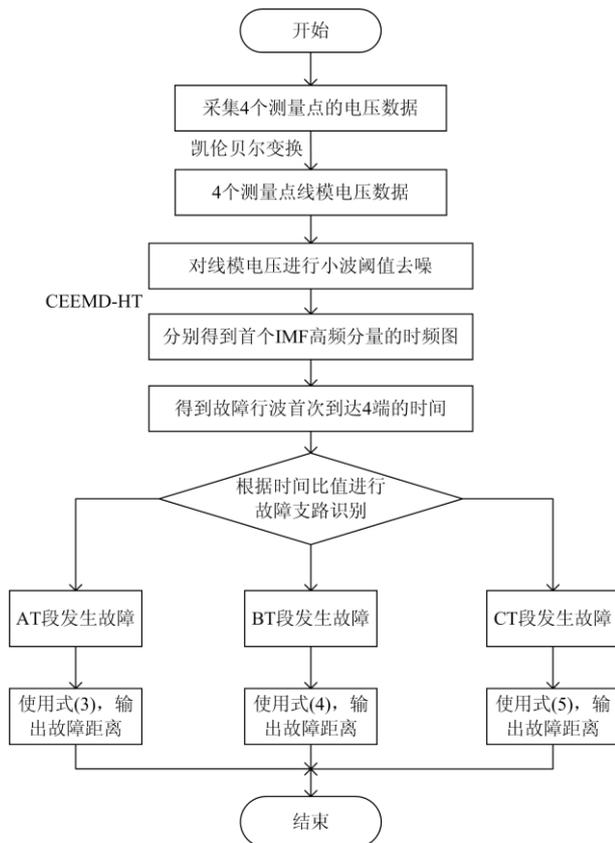


图 4 故障测距流程图

Fig. 4 Fault ranging flow chart

3 仿真分析

3.1 仿真系统及其参数

在 PSCAD 仿真软件中搭建 T 型混合三端高压直流输电系统模型, 如图 1 所示, 在该模型完成直流输电线路各种故障情况的模拟, 主要参数如下: 直流额定电压为 ± 400 kV, 架空线 1 长度为 300 km, 架空线 2 长度为 500 km, 架空线 3 长度为 700 km。据统计, 线路故障约占直流输电系统故障的 50%, 而线路故障中 90% 是短路故障^[33], 又因混合三端直流输电系统具有正负极完全对称的特点, 所以本文设置 0.3 s 发生故障, 以故障持续时间为 0.1 s 的负极金属性接地故障、输电线路正负极间短路故障及输电线路正负极间接地故障为研究对象, 设置不同故障距离, 进行仿真计算。该系统模型的仿真时间为 0.6 s, 采样频率为 1 MHz, 在 Matlab 环境下选取故障发生后 10 ms 内由 4 个检测点采集的暂态电压数据进行算法验证。

3.2 噪声对行波波头标定的影响

考虑在实际工程中, 采集到的故障行波信号基本都伴有噪声, 本文对采集的故障线模电压行波信号进行小波阈值预处理得到降噪信号。图 5 为在理想情况下, CT 段 450 km 处负极发生短路时, 加入 30 dB 噪声的故障信号, 与经过小波阈值降噪后的故障信号及未添加噪声的理想故障信号对比。由图 5 可以看出, 使用小波阈值去噪预处理可以很大程度上滤除噪声。

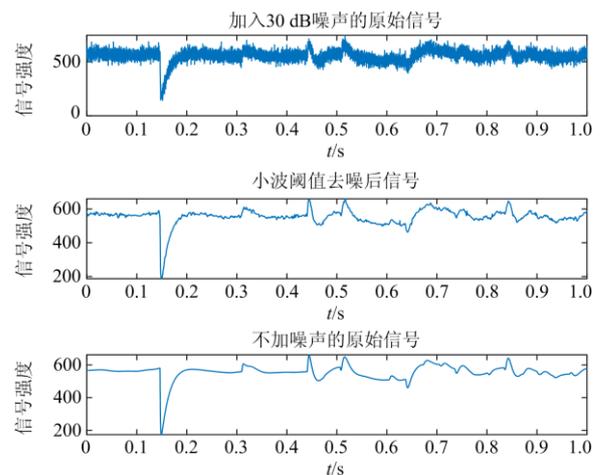


图 5 去噪前后故障信号对比

Fig. 5 Comparison of fault signals before and after denoising

为充分说明本文所提算法在噪声鲁棒性方面的优势, 在故障线模电压原始信号中添加 10 dB、

20 dB、30 dB、40 dB 的高斯白噪声，然后在未经小波阈值去噪的情况下，对其分别使用 HHT、小波包分解重构、CEEMD-HT 标定其行波波头到达测量端的时刻。其中，小波包分解重构是对线模电压故障行波信号 db4 小波进行三层小波包分解及重构。当故障行波到达各个测量点，小波包变换系数会发生明显模极大值变化，第一个模极大值出现位置即是行波到达各个测量点的时刻。其波头标定分别如图 6—图 8 所示。

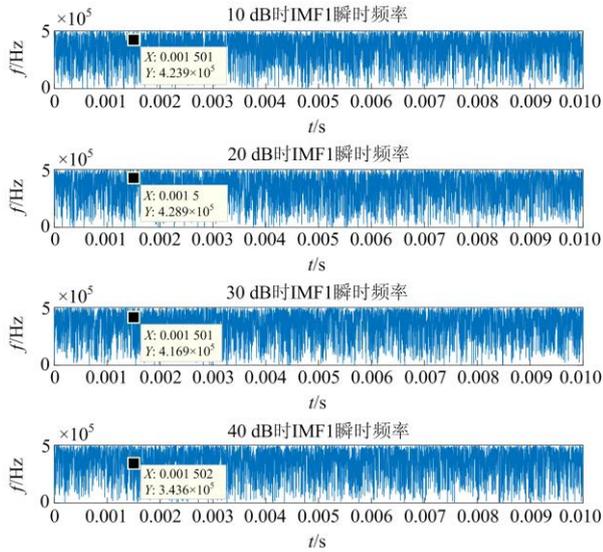


图 6 基于 HHT 的未经降噪的不同噪声下波头标定
Fig. 6 Wave head calibration under different noises without denoising based on HHT

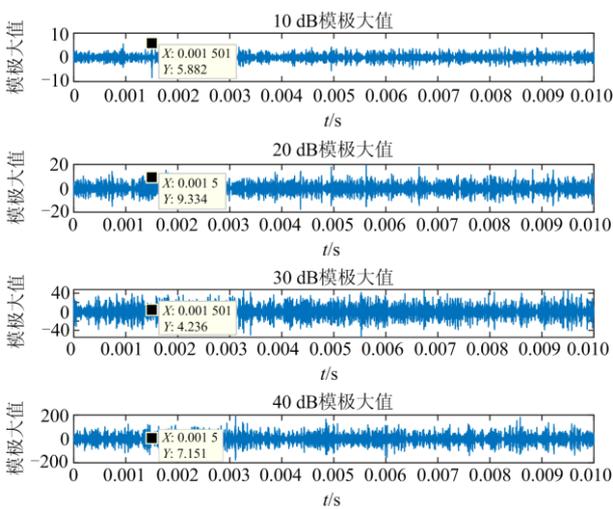


图 7 基于小波包的未经降噪的不同噪声下波头标定
Fig. 7 Wave head calibration under different noises without denoising based on wavelet packet

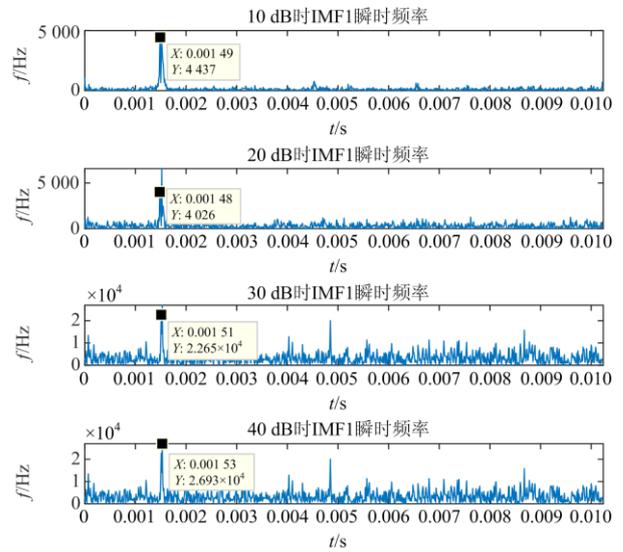


图 8 基于 CEEMD-HT 的未经降噪的不同噪声波头标定
Fig. 8 Wave head calibration under different noises without denoising based on CEEMD-HT

由图 6 和图 7 可以看出，基于 HHT 方法以及小波包分解重构方法进行的行波波头标定的噪声鲁棒性能较差，无法正确检测波头^[34]。而本文所使用 CEEMD-HT 方法受噪声干扰较小，基本可以正确标定行波波头，但其存在的大量模态混叠会导致测距精度降低。而将故障信号经过小波阈值去噪之后再行 HHT、小波包分解重构及 CEEMD-HT 方法标定行波波头，如图 9—图 11 所示。

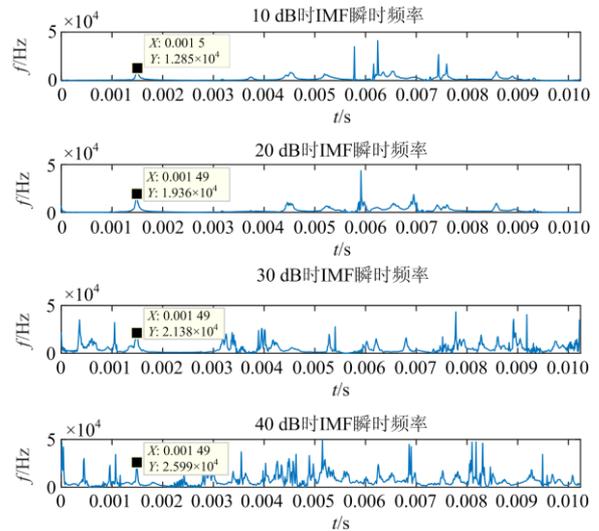


图 9 基于 HHT 降噪后不同噪声下的波头标定
Fig. 9 Wave head calibration under different noises with denoising based on HHT

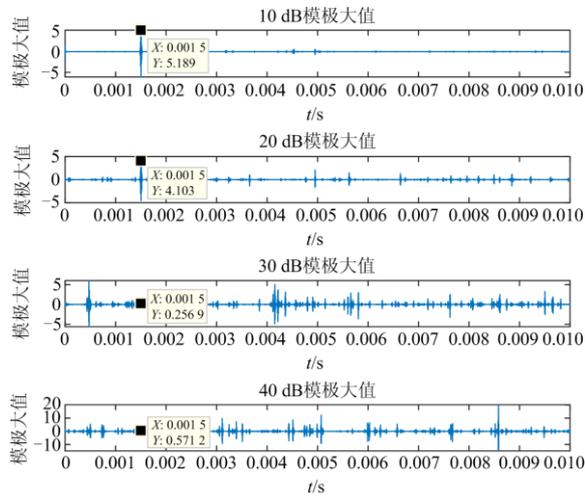


图 10 基于小波包降噪后不同噪声下的波头标定

Fig. 10 Wave head calibration under different noises with denoising based on wavelet packet

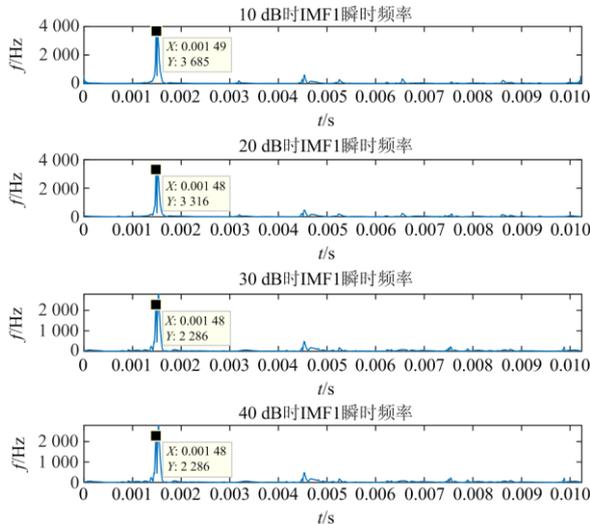


图 11 基于 CEEMD-HT 降噪后不同噪声下的波头标定

Fig. 11 Wave head calibration under different noises with denoising based on CEEMD-HT

经降噪处理后, HHT 的波头检测受噪声影响大有改善, 但仍存在少量模态混叠, 特别是在噪声为 30 dB 和 40 dB 时, 由于虚假分量和模态混叠已经无法正确标定行波初始波头; 同样由图 10 可以看出在 10 dB、20 dB 噪声干扰时, 小波包仍然可以通过模极大值正确检测波头, 但在噪声为 30 dB、40 dB 时, 已无法正确检测波头到达时间; 而由图 11 可以看出, 经由 CEEMD-HT 进行的波头标定无模态混叠的影响, 噪声鲁棒性强, 可以准确标定故障行波初始波头。

3.3 仿真结果及分析

仿真结果分析包括两个方面: 分别是故障支路

判别正确性分析和故障测距结果的正确性分析。

3.3.1 故障支路判别正确性分析

由 2.2 节可知, 故障发生在不同支路, 会满足不同的支路判别公式。为验证上述支路判别公式的正确性, 在不同故障支路的不同距离处设置单极接地故障, 获取故障行波分别到达测量端 A、B、C 的时间, 并将其代入对应的支路判别式(9)一式(11), 检验是否满足支路判别公式。不同故障距离下故障支路的判别方法相同, 为避免赘述, 仅详细给出不同区段的两个数据, 如表 1 所示。而 AT 支路、BT 支路、CT 支路的其余故障距离处的故障支路判别的正确性验证结果, 分别如图 12—图 14 所示。

表 1 故障支路判别结果分析

Table 1 Analysis of fault branch discriminant results

故障支路	故障距离/km	t_A/s	t_B/s	t_C/s	是否满足判据
AT	60	0.000 195	0.002 472	0.003 142	是
	250	0.000 831	0.001 835	0.002 506	是
BT	20	0.002 605	0.000 062	0.003 947	是
	450	0.001 166	0.001 500	0.002 506	是
CT	100	0.003 008	0.003 679	0.000 329	是
	690	0.001 031	0.001 701	0.002 305	是

由表 1 可知, 所列数据均满足故障支路判别公式。图 12—图 14 所示的不同故障支路下故障行波由故障点到达 A、B、C 3 个测量点的时间比值与对应线路长度比值的关系, 都满足上述故障支路判别式(9)一式(11)。由此可以看出, 在不同支路发生故障, 本文所提判别方法都可以正确判别故障位置所在支路。

3.3.2 故障测距结果正确性分析

在 3.1 节设置的多个故障距离, 其测距方法是相同的, 为避免赘述, 本文仅详细给出距逆变侧 MMC II 侧 C 端 450 km 发生金属性短路接地故障, 过

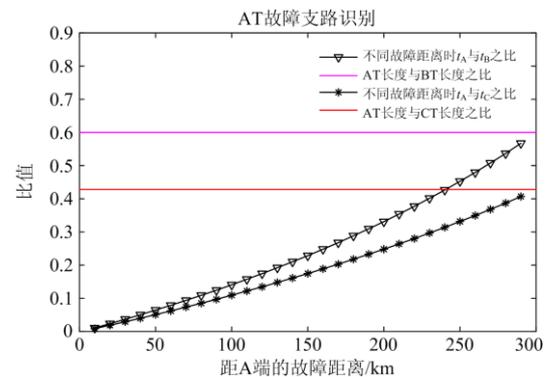


图 12 AT 支路故障识别

Fig. 12 Fault identification in AT branch

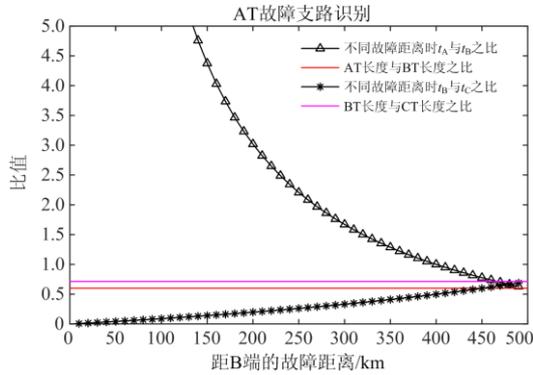


图 13 BT 支路故障识别

Fig. 13 Fault identification in BT branch

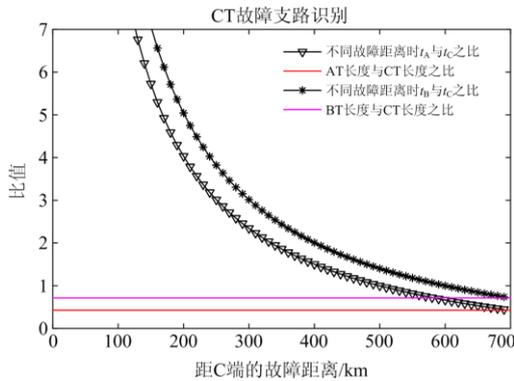


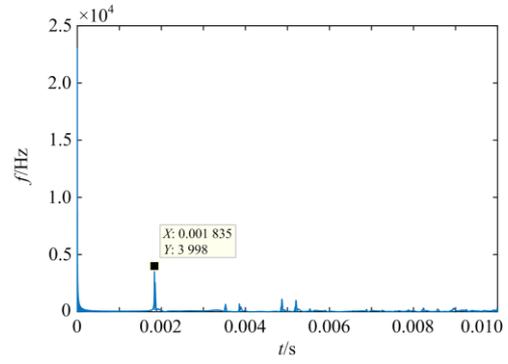
图 14 CT 支路故障识别

Fig. 14 Fault identification in CT branch

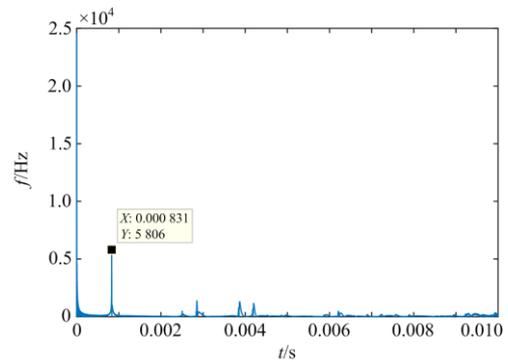
渡电阻为 0Ω 时, 暂态电压行波信号经过 CEEMD-HT 变换得到时频图以及故障距离计算过程。图 15 是整流侧 A、逆变侧 B、逆变侧 C 以及 T 节点处采集的故障后 10 ms 内暂态电压行波信号经过 CEEMD-HT 后得到的 IMF1 的时频图。

由图 15 可以得到混合三端直流输电线路在 CT 支路距 MMC II 侧 C 端 450 km 处发生故障时, 故障行波的波头首次到达 4 个检测点的时间, 分别为: 整流侧 A 端 $t_A=0.001835$ s, T 结点处 $t_T=0.000831$ s, 整流侧 B 端 $t_B=0.002506$ s, 整流侧 C 端 $t_C=0.0015$ s, 将其代入式(5)可得故障距离为

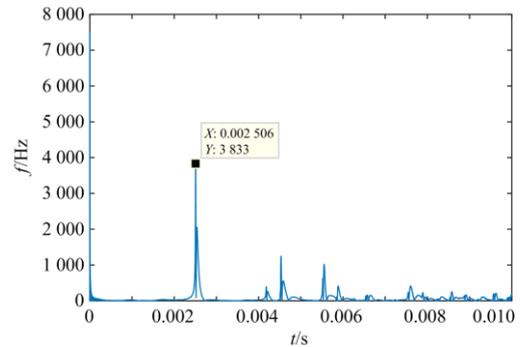
$$\begin{cases} x_{CF_1} = \frac{300}{2} \times \frac{0.0015 - 0.001835}{0.001835 - 0.000831} + \frac{1000}{2} = 44.950 \text{ km} \\ x_{CF_2} = \frac{500}{2} \times \frac{0.0015 - 0.002506}{0.002506 - 0.000831} + \frac{1200}{2} = 449.851 \text{ km} \\ x_{CF_3} = \frac{1}{2} \times (44.950 + 449.851) = 449.901 \text{ km} \end{cases}$$



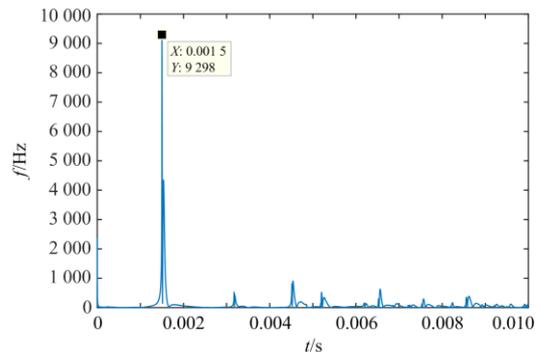
(a) 整流侧A的IMF1时频图



(b) T结点IMF1的时频图



(c) 逆变侧B的IMF1时频图



(d) 逆变侧C的IMF1时频图

图 15 各测量端 IMF1 的时频图

Fig. 15 Time-frequency diagram of IMF1 at each measuring end

混合三端直流输电线路在过渡电阻为 0Ω , 故障距离距 MMCII 侧 C 端 450 km 的条件下, 利用测距公式得到的故障距离的相对误差为 0.0141%, 绝对误差为 0.099 km, 测距精度较高。当直流输电线路在不同过渡电阻下发生故障时, 此方法仍然可以准确测距。表 2—表 4 是在不同距离及不同过渡电阻发生金属性接地故障时, 利用本文所提不受波速影响的混合三端直流输电线路测距方法进行故障测距的定位结果。

3.4 故障类型对测距结果的影响

为验证本文所提方法在不同故障类型下都适用, 本文在不同支路的不同距离处另设正负极间短路故障及正负极间金属性接地故障, 定位结果如表 5 所示。

表 2 AT 支路不同故障距离及不同过渡电阻定位结果

Table 2 Location results of different fault distances and different transition resistances in AT branch

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	定位结果/km	相对误差/%	绝对误差/km
10	0	10.417	0.139	0.417
	200	9.463	0.179	0.537
25	0	24.947	0.018	0.053
	200	24.572	0.143	0.248
50	0	50.467	0.156	0.467
	200	50.256	0.085	0.256
100	0	99.384	0.206	0.617
	200	99.533	0.156	0.467
200	0	199.876	0.041	0.124
	200	200.508	0.196	0.508
295	0	295.148	0.049	0.148
	200	295.585	0.195	0.585

表 3 BT 支路不同故障距离及不同过渡电阻定位结果

Table 3 Location results of different fault distances and different transition resistances in BT branch

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	定位结果/km	相对误差/%	绝对误差/km
30	0	29.887	0.023	0.113
	200	29.886	0.023	0.114
100	0	100.106	0.021	0.106
	200	99.787	0.043	0.213
250	0	250	0	0
	200	250	0	0
350	0	350.424	0.085	0.424
	200	350.638	0.128	0.638
400	0	399.808	0.038	0.192
	200	400.213	0.043	0.213
480	0	479.173	0.165	0.827
	200	479.920	0.016	0.080

表 4 CT 支路不同故障距离及不同过渡电阻定位结果

Table 4 Location results of different fault distances and different transition resistances in CT branch

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	定位结果/km	相对误差/%	绝对误差/km
50	0	50.388	0.055	0.388
	200	49.703	0.042	0.297
150	0	150.196	0.028	0.196
	200	149.306	0.099	0.694
300	0	299.304	0.099	0.696
	200	299.455	0.078	0.545
450	0	449.901	0.014	0.099
	200	450.296	0.042	0.296
550	0	550.159	0.023	0.159
	200	549.207	0.113	0.793
670	0	670.211	0.030	0.211
	200	669.624	0.054	0.376

表 5 不同故障类型定位结果

Table 5 Location results of different fault types

故障支路	故障距离/km	定位结果		相对误差/%	
		双极短接/km	双极金属性接地/km	双极短接	双极金属性接地
AT	80	80.030	80.030	0.010	0.010
	200	200.467	200.360	0.156	0.120
BT	90	89.376	90.864	0.125	0.173
	280	279.745	279.682	0.051	0.064
CT	230	229.584	230.178	0.059	0.076
	630	629.485	630.881	0.070	0.126

由表 2—表 5 可知, 本文所提的测距方法在不同故障距离、不同故障类型及不同过渡电阻下都能精确定位, 误差一般控制在 0.2% 以内, 且受过渡电阻的影响较小。只有故障点与测量端相距较近时, 故障行波波头首次到达测量端的时刻读取不方便, 使其误差范围会增大, 但经大量实验验证, 误差最大也不超过 0.3%, 因此本文所提测距方法仍具有很高的工程应用价值。

3.5 数据不同步对测距结果的影响

目前, 电力系统所使用的 GPS 定时系统的精度较高, 两端采集装置间的同步时间误差 $|\tau|$ 一般取 $0 \sim 2 \mu\text{s}$ ^[30]。为验证数据不同步最大误差下对测距结果的影响, 本文取 $\tau = \pm 2 \mu\text{s}$, 以 CT 段测距公式为例, T 节点的时间为基准, A 端较 T 延时 $-\tau$, B、C 较 T 节点延时 τ , 式(13)为 CT 段数据不同步时的测距公式。

$$\begin{cases} x'_{CF_31} = \frac{x_{AT}}{2} \cdot \frac{(t_C - \tau) - (t_A + \tau)}{(t_A + \tau) - t_T} + \frac{x_{CA}}{2} \\ x'_{CF_32} = \frac{x_{BT}}{2} \cdot \frac{(t_C - \tau) - (t_B + \tau)}{(t_B + \tau) - t_T} + \frac{x_{BC}}{2} \\ x'_{CF_3} = \frac{1}{2}(x'_{CF_31} + x'_{CF_32}) \end{cases} \quad (13)$$

为验证本文所提方法在数据不同步时，仍可以满足精度要求，本文在不同支路设置故障，得到数据不同步时的测距结果如表 6 所示。由表 6 可知，当数据不同步时，其测量误差仍小于 0.2%，具有较高精度，满足测距误差要求。

表 6 数据不同步时的定位结果

Table 6 Location results when data is out of sync

故障区段	故障距/km	定位结果		相对误差/%	
		$\tau=2 \mu\text{s}$	$\tau=-2 \mu\text{s}$	$\tau=2 \mu\text{s}$	$\tau=-2 \mu\text{s}$
AT	10	10.215	10.526	0.072	0.175
	200	199.527	200.226	0.158	0.075
BT	150	150.014	150.327	0.003	0.065
	400	399.297	400.321	0.141	0.064
CT	250	250.040	250.319	0.006	0.046
	450	449.443	450.359	0.080	0.051

3.6 不同测距方法对比

为充分说明本文所提不受波速影响的混合三端故障定位方法的优越性，在故障信号不受噪声干扰的情况下，将本文测距算法与使用波速计算的双端行波测距方法、基于小波包分解的测距算法及 HHT 的测距算法所得结果进行对比。

针对双端行波测距方法中行波波速度的选取，本文在故障定位之前，通过在混合三端直流输电线路 A 端首端设置一短路故障，然后通过 CEEMD-HHT 标定故障行波到达测量端 B、C 的时间并根据已知线路长度，计算得到行波传播速度为 $2.9747 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。以 CT 段故障，过渡电阻为 0Ω 为例，使用双端行波法测距公式计算得到的故障距离为

$$\begin{cases} x_{CF_1} = \frac{x_{AC}}{2} + v \cdot \frac{t_C - t_A}{2} \\ x_{CF_2} = \frac{x_{BC}}{2} + v \cdot \frac{t_C - t_B}{2} \\ x_{CF} = \frac{1}{2}(x_{CF_1} + x_{CF_2}) \end{cases} \quad (14)$$

而小波包变换及 HHT 标定故障行波的初始波头后，使用本文所提不含波速的测距公式(式(3)一式(5))计算故障距离。4 种方法的定位误差如图 16 所示。由图 16 可以看出，在不含噪声的理想情况下，含波速的双端法测距误差最大；小波包变换和 HHT

测距算法的误差曲线有相交叉部分。而本文所用测距算法，在不同故障位置时的测距误差在这四种测距算法的测距误差都是最小，其定位精度最高。

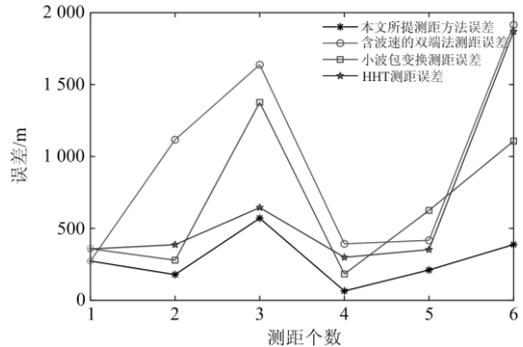


图 16 不同方法测距误差对比图

Fig. 16 Comparison of ranging errors by different methods

4 结论

针对传统行波法测距精度受波速影响以及传统经验模态分解受端点效应、模态混叠及噪声干扰使得测距误差过大的问题，本文提出了一种基于小波阈值去噪和 CEEMD-HHT 结合不受波速影响的混合三端直流输电线路故障测距新方法，并利用 PSCAD 与 Matlab 软件进行了大量仿真验证，得出如下结论：

1) 本文所提测距方法先由小波阈值去噪进行滤波，然后在通过 CEEMD-HHT 确定故障行波到达 4 个测量点的时间，克服了传统波头提取存在模态混叠及端点效应及受噪声干扰较大的问题；同时合理利用四端故障信息，列出相应方程组，消除波速对故障测距的影响，提高了测距精度。

2) 通过大量实验验证，本文所提测距方法，在不同故障距离，不同过渡电阻及数据不同步时，其定位误差均控制在 0.3% 以内，可见其定位精度较高。同时，为充分说明本文所提测距方法的优越性，在不同故障距离下，将本文所提测距方法与使用波速计算的双端法、HHT 测距方法及小波包测距方法进行对比，经验证，本文所提方法定位结果更精确。

参考文献

[1] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于 VMD 与广义 S 变换的 HVDC 线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 125-133.
FU Hua, WU Sai, XU Yaosong, et al. HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 125-133.

[2] 张艳霞, 王海东, 李婷, 等. LCC-VSC 混合直流输电线路的组合型单端故障定位方法[J]. 电力系统自动化,

- 2019, 43(21): 187-194.
- ZHANG Yanxia, WANG Haidong, LI Ting, et al. Combined single end fault location method for LCC-VSC Hybrid HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 187-194.
- [3] 王思华, 赵磊, 王军军, 等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 9-17.
- WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 9-17.
- [4] ABDELHAMID B, ABDELMALEK K, SAAD M. Transmission line fault location by solving line differential equations[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192.
- [5] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137, 147.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. A review on fault location of HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137, 147.
- [6] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
- CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [7] 王浩, 杨东升, 周博文, 等. 基于并联卷积神经网络的多端直流输电线路故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 84-92.
- WANG Hao, YANG Dongsheng, ZHOU Bowen, et al. Fault diagnosis of multi-terminal HVDC transmission line based on parallel convolutional neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 84-92.
- [8] SU W, GONG Y, LI Y. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multi-terminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 27(4): 2286-2294.
- [9] HUAI Qing, LIU Kaipei, HOOSHYAR A, et al. Single-ended line fault location method for multi-terminal HVDC system based on optimized variational mode decomposition[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194.
- [10] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-25.
- WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [11] NANAYAKKARA O M K K, RAJAPAKSE A D, WACHAL R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2286-2294.
- [12] 李斌, 毛琦扬, 何佳伟, 等. 基于重合直流断路器残余电流开关的柔性直流电网故障测距[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 140-148.
- LI Bin, MAO Qiyang, HE Jiawei, et al. Fault location for flexible DC grid based on reclosing residual current breaker of DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 140-148.
- [13] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32, 53.
- LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.
- [14] 陈旭, 张鑫瑞, 伍祥, 等. 以杆塔直线距离为基准的双端输电线路非同步故障测距算法[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1581-1587.
- CHEN Xu, ZHANG Xinrui, WU Xiang, et al. A fault location algorithm using asynchronous data for two-terminal transmission line based on straight line distance of the tower[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1581-1587.
- [15] 李博雅, 杨耀, 杨立红. 高压直流输电线路单端故障测距组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 116-121.
- LI Boya, YANG Yao, YANG Lihong. Single-ended fault location combination algorithm for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 116-121.
- [16] 郝勇奇, 王倩, 宋文峰, 等. 固有频率与行波时域定位结合的多端直流混合输电线路故障定位方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 104-110.
- HAO Yongqi, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Fault location scheme of multi terminal DC hybrid transmission line combined with natural frequency and traveling wave time-domain positioning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 104-110.
- [17] 李德坤, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 输电线路单端行波自动化故障定位方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1128-1133.
- LI Dekun, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. Study on automatic fault location for VSC-HVDC transmission lines based on one-terminal traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1128-1133.
- [18] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A fault location method for HVDC transmission lines based on distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [19] WANG Dong, HOU Mengqian. Travelling wave fault location algorithm for LCC-MMC-MTDC hybrid transmission system based on Hilbert-Huang transform[J].

- Electrical Power and Energy Systems, 2020, 121.
- [20] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan, et al. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210.
- [21] 张琰骏. 基于零序电流积分和改进 HHT 变换故障定位方法的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- ZHANG Yanjun. Research on fault location method based on zero sequence current integration and improved HHT transform[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [22] 刘梦丹. 基于数学形态学的直流输电线路故障测距研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- LIU Mengdan. Fault location on DC transmission line based on mathematical morphology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [23] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
- DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [24] 郭蒙蒙, 周怀来, 林萍, 等. 改进的完备经验模态分解和广义 S 变换相结合的地震信号衰减分析[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 2001-2008.
- WU Mengmeng, ZHOU Huailai, LIN Ping, et al. Seismic signal attenuation analysis based on improved complete empirical mode decomposition and generalized S transform[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 2001-2008.
- [25] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
- XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband traveling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [26] 盛远. 混合输电线路行波故障测距分析与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- SHENG Yuan. Analysis and application of traveling wave fault location for hybrid transmission lines[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [27] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
- CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A new method of fault location based on neural network for UHVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [28] 孙广, 王阳, 薛枫, 等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 113-120.
- SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 113-120.
- [29] 王栋, 侯梦倩, 刘喜梅, 等. 基于 HHT 的混合多端直流输电线路行波测距方法: 中国, 110954786[P]. 2020-04-03.
- WANG Dong, HOU Mengqian, LIU Ximei, et al. A traveling wave ranging method for hybrid multiterminal DC transmission line based on HHT: China, 110954786[P]. 2020-04-03.
- [30] 宁毅, 魏志刚, 周建雄. 基于改进 EMD 和小波阈值的混合机低速重载轴承故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(6): 134-139.
- NING Yi, WEI Zhigang, ZHOU Jianxiong. Fault diagnosis of low-speed heavy-duty bearings of mixers based on improved EMD and wavelet threshold[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(6): 134-139.
- [31] 张永健, 胥杰, 孙嘉. 基于静态小波变换的 T 型输电线路行波测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 84-88.
- ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling wave fault location for three-terminal transmission line based on static wavelet transform[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 84-88.
- [32] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.
- TAN Jian. Fault location of single terminal traveling wave in transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 65-70.
- [33] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
- LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [34] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7326-7338.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7326-7338.

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-07-22

作者简介:

高淑萍(1970—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电继电保护、输电线路故障定位及新能源并网; E-mail: gao.sp2003@163.com

徐振曦(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电线路故障定位。E-mail: 1623588177@qq.com

(编辑 周金梅)