

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230581

基于行波模态分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法

王洪彬^{1,2}, 周念成¹, 王伟², 王强钢¹, 于大川¹, 周丹莹¹, 吕元正¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 基于晶闸管换流器的特高压直流输电系统(ultra-high voltage direct current based on line commutated converter, LCC-UHVDC)的故障定位算法对智能电网的安全稳定运行起着重要作用。针对长距离特高压直流输电系统故障测距方法精准度低、快速性差的问题, 提出了一种基于变分模态分解法(variational mode decomposition, VMD)和Teager能量算子(Teager energy operator, TEO)的双端行波故障测距方法。首先, 研究了LCC-UHVDC线路故障电压行波的传播特性。利用零模电压随线路传播衰减明显的特征, 通过VMD算法提取采样点处零模电压行波的时频特性。针对VMD参数选择不当导致的模态混叠问题, 利用K-L散度(Kullback-Leibler divergence)对提取的模态指标进行优化。然后采用TEO对分解后信号进行瞬时能量谱提取, 精确标定波头到达时间, 最后采用双端迭代测距法迭代求解故障距离。在PSCAD/EMTDC搭建±800 kV LCC-UHVDC仿真模型进行验证。结果表明, 所提方法在不同故障位置、过渡电阻和故障类型下具有较强的鲁棒性。

关键词: 特高压直流输电; 变分模态分解; Teager能量算子; 故障测距; 电压行波

A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition

WANG Hongbin^{1,2}, ZHOU Niancheng¹, WANG Wei², WANG Qianggang¹, YU Dachuan¹, ZHOU Danying¹, LÜ Yuanzheng¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: The fault location algorithm of an ultra-high voltage direct current (LCC-UHVDC) transmission system based on a thyristor converter plays an important role in the safe and stable operation of the smart grid. There are shortcomings of low accuracy and poor speed of fault location methods for long distance UHVDC transmission systems. Thus a double terminal traveling wave fault location method based on variational mode decomposition (VMD) and Teager energy operator (TEO) is proposed. First, the propagation characteristics of a fault voltage traveling wave in LCC-UHVDC lines are studied. Based on the characteristic that zero-mode voltage attenuates markedly with line propagation, the time-frequency characteristics of a zero-mode voltage traveling wave at a sampling point are extracted by a VMD algorithm. To solve the mode aliasing problem caused by the improper selection of VMD parameters, Kullback-Leibler (K-L) divergence is used to optimize the extracted modal indices. Then, TEO is used to extract the instantaneous energy spectrum of the decomposed signal, and the arrival time of the wave head is calibrated accurately. Finally, the fault distance is solved iteratively by the two-terminal iterative fault location method. The ±800 kV LCC-UHVDC simulation model is established in PSCAD/EMTDC for verification. The results show that the proposed method has strong robustness with different fault locations, transition resistance and fault types.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B6006).

Key words: UHVDC; VMD; Teager energy operator; fault location; voltage traveling wave

0 引言

随着2020年9月国家双碳战略的提出, 我国对

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U22B6006); 国网重庆市电力公司科技项目资助(2022渝电科技10#)

清洁能源的需求与日俱增。然而由于能源资源和负荷需求逆向分布的问题, 采用特高压直流远距离输电进行电力供求均衡, 保障输电的经济性与可靠性成为“西电东送”和跨国互联的有效手段^[1-2]。基于晶闸管换流器的特高压直流输电线路(ultra-high voltage direct current based on line commutated converter,

LCC-UHVDC)以架空线路为主,受自然灾害及气候因素影响,输电线路故障率高。因此快速准确的故障测距方法对特高压直流输电系统安全稳定运行具有重要的意义。

依据故障测距原理,可将现有故障测距方法分为基于稳态信息特征的故障分析法、基于暂态信息特征的行波法以及基于暂态信息特征的固有频率法三类^[3]。其中应用范围较广的行波测距法不易受到复杂环境因素的制约,具有较高的测距精度^[4-6]。行波测距法的关键环节在于波头的识别,目前波头识别原理主要有小波变换法^[7-8]和希尔伯特-黄变换法(Hilbert-Huang transform, HHT)^[9-10]。小波变换法在选定合适的小波基及小波分解尺度后能够进行有效识别,但该方法在不同工况下适应性较差,难以推广应用^[11];HHT法的核心环节是采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),将故障行波信号分解为几个固定中心频率的本征模态分量(intrinsic mode function, IMF),再经过希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)得到IMF的瞬时幅值与瞬时频率,该方法解决了小波变换法非自适应的不足,但同时引入了模态混叠和边缘效应的问题,难以准确提取故障行波的波头,影响了波头到达时间的标定^[12-13]。

Teager 能量算子(Teager energy operator, TEO)是一种非线性微分算子,具有高度的瞬时自适应性和较低的计算复杂度,可以有效提取调频调幅信号的瞬时幅值和频率^[14]。与HT法相比,Teager能量算子运算更为快速、准确,在故障在线测距方面的时间性能更为优越。文献[15-16]提出的EMD-TEO故障测距法,用TEO代替HT,缩短了测距算法的耗时,但EMD本身存在的模态混叠问题仍没有得到解决。文献[17]提出了一种基于卷积神经网络-支持向量机的高压输电线路故障分段识别方法。文献[18-19]提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)与TEO或差分熵(difference entropy, DE)相结合的测距方法,EEMD通过添加白噪声遏制了EMD模态混叠程度,但白噪声参数的选取对系统影响较大,容易造成噪声分量冗余或混叠遏制不足。文献[20-21]提出的局部均值分解(local mean decomposition, LMD)可以将故障行波依频分解,采用局部均值包络避免了EMD/EEMD法的过包络、欠包络、边缘效应等问题,但LMD法求解需要大量迭代运算,耗时较长。文献[22]提出了互补集合模态分解法(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD),通过添加正负白噪声降低EEMD法存在的噪声分量冗余问题,但进行

EMD分解时产生的IMF个数仍存在差异,使得最后集合平均产生误差较大。变分模态分解法(variational mode decomposition, VMD)是一种非递归信号处理方法,通过构造求解变分问题,自适应地更新IMF的最优中心频率,具有良好的抗噪能力,克服了EMD法模态混叠的问题,在复杂信号处理方面具有优越的性能^[23]。文献[24]首先对含噪声的行波信号进行VMD分解,滤去噪声并获得最优模态分量,然后采用广义S变换生成高时间分辨率S矩阵,并选取S矩阵中的高频分量,从而获取故障初始行波到达时刻。文献[25]利用变分模态分解对故障电压进行有效分解,然后利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)标定行波波头。利用反射波头到达时间进行修正,进而给出一种减少线路参数影响的双端测距算法,该算法能够有效确定反射波头的查找区域,且不受两端装置时钟同步误差的影响。但是上述基于VMD的故障测距方法在对目标信号分解的过程中需要手工设定模态个数,模态个数的选择会对分解精度造成较大的影响,进而影响定位的准确性。

针对上述问题,本文提出了一种基于改进VMD与TEO的故障测距算法。采用双端行波测距对特高压直流系统发生故障的距离进行测量,以解决特高压直流输电系统中传统故障测距方法难以满足较高的精确性和快速性需求的问题。本文的主要贡献有以下几点:

1) 针对VMD中参数选择不当造成的精度散失的问题,本文引入K-L散度对VMD参数进行自适应选择,以提高分解精度。

2) 针对传统提取调频调幅信号瞬时能量谱和频率谱方法计算原理复杂、计算时间长的问题,本文采用TEO方法替代传统方法,快速而准确地提取并标定调频调幅信号瞬时能量谱和频率谱。

1 基于VMD和Teager算子的行波测距方法

1.1 LCC-UHVDC故障特征分析

本文以双端LCC-UHVDC系统为研究对象,其中,LCC站由以下部分组成:晶闸管换流器、换向变压器、继电器、交流滤波器、直流滤波器和平滑电抗器(SRs),等效电路如图1所示。

由于SR特性造成的自然边界,入射电压行波和电流行波不能从直流线路通过SR穿透LCC换流站。因此,根据折反射参数定理,从保护装置得到的电压行波和电流行波如式(1)所示。

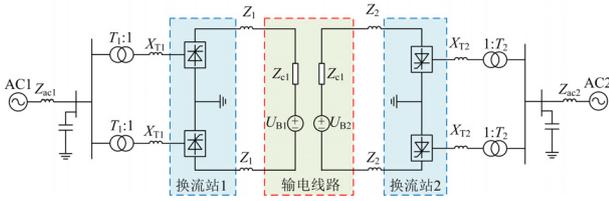


图1 双端 LCC-UHVDC 系统

Fig. 1 Two-terminal LCC-UHVDC system

$$\begin{cases} u = (1 + \lambda_u)u_f = \left(1 + \frac{Z_{SR} - Z_{TL}}{Z_{SR} + Z_{TL}}\right)u_f = \frac{2Z_{SR}}{Z_{SR} + Z_{TL}}u_f \\ i = -(1 - \lambda_i)i_f = -\left(1 - \frac{Z_{SR} - Z_{TL}}{Z_{SR} + Z_{TL}}\right)i_f = -\frac{2Z_{SR}}{Z_{SR} + Z_{TL}}i_f \end{cases} \quad (1)$$

式中： u 和 i 分别表示保护装置的电压行波和电流行波； u_f 和 i_f 分别表示故障电压行波和电流行波； λ_u 和 λ_i 分别表示电压和电流的反射参数； Z_{SR} 和 Z_{TL} 分别表示平滑电抗器波阻抗以及线路波阻抗。

在双极直流输电系统中，两条极线间在正常运行工况和故障工况下，均会存在一定的耦合效应，因此在对线路各参量的频率特性进行分析之前，应对双极电压行波进行相模解耦变换，本文采用凯伦贝尔(Karenbauer)变换。

设 \mathbf{S} 、 \mathbf{Q} 分别为电压、电流行波的极分量 u 、 i 的变换矩阵，则有

$$\begin{cases} u_m = \mathbf{S}^{-1}u \\ i_m = \mathbf{Q}^{-1}i \end{cases} \quad (2)$$

式中： u_m 为电压行波的模分量； i_m 为电流行波的模分量。其中变换矩阵 \mathbf{Q} 为

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

变换矩阵 \mathbf{S} 为凯伦贝尔变换矩阵，如式(4)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

设 LCC-UHVDC 系统中线路符合均匀无损长线的波动方程，则有

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{LCS} \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i_m}{\partial x^2} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{LCQ} \frac{\partial^2 i_m}{\partial t^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中， L 、 C 分别为线路单位长度等值电感和等值电容。

对 LCC-UHVDC 系统而言，有模分量与极分量的转换表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1}u = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_+ - u_- \\ u_+ + u_- \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1}i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_+ - i_- \\ i_+ + i_- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中：下标 1、0 分别表示电压电流行波的线模分量以及零模分量；下标 “+” “-” 分别表示电压电流行波的正极线量以及负极线量。

1.2 VMD-Teager 能量算子的分析

VMD 算法可以将原始输入信号分解为多个具有自身中心频率和有限长度带宽的固有模态函数 (intrinsic mode functions, IMFs)^[26]。每个分解的 IMF 可以被描述为频率调制 (frequency modulation, FM) 和幅度调制 (amplitude modulation, AM) 信号，如式(7)所示。

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (7)$$

式中， $A_k(t)$ 和 $\varphi_k(t)$ 分别为每个 IMF 的瞬时幅值和瞬时相位。每个 IMF 的瞬时频率可以表示为

$$\omega_k(t) = \frac{d\varphi_k(t)}{dt} \quad (\omega_k(t) \geq 0) \quad (8)$$

构建原始信号的 VMD 模型的主要过程如下。

1) 对每个分解的 IMF 进行单边希尔伯特(Hilbert)变换，得到其解析信号为

$$u_{IMF_H} = \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * u_k(t) \quad (9)$$

式中：“*” 表示卷积计算； $\delta(t)$ 是脉冲函数。

2) 对每个 IMF 的解析信号在傅里叶域中进行频谱修正，变换后的公式为

$$u_{IMF_H_{\text{modify}}} = \left\{ \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * u_k(t) \right\} e^{-j\omega_k t} \quad (10)$$

3) 利用修正后解析信号的高斯平滑来估计带宽范围并求解最终约束模型，如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min_{\{\omega_k, \delta(t)\}} \left\{ \sum_k \left\| \delta(t) \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K u_k = f \end{cases} \quad (11)$$

式中： f 为原始输入信号； $\{u_k\}$ 为分解后的 IMF 分量； $\{\omega_k\}$ 和 $\delta(t)$ 分别表示每个 IMF 对应的中心频率和梯度。

4) 通过 VMD 算法获得多个 IMF 分量。IMF 分量有些与传输线故障状态密切相关，另一些则与其

无关或为噪声干扰分量。因此，必须对 IMF 分量进行处理，提取出包含主要故障特征的分量，以提高定位估计的精度。通常使用交替方向乘子法 (ADMM) 来解决上述优化问题，该算法使用二次惩罚项 α 和拉格朗日乘子指数 λ 来更新 $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ ，如式(12)、式(13)所示。

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| \partial(t) [(\delta(t) + j/\pi t) \times u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) + \lambda(t)/2 \right\|_2^2 \right\} \quad (12)$$

$$\omega_k^{n+1} = \arg \min_{\omega_k \in X} \left\{ \left\| \partial(t) [(\delta(t) + j/\pi t) \times u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (13)$$

式中， X 表示原始信号分解出的所有 IMF 的集合。

在实际工程中，VMD 分解的精度通常受到模态分解数 k 的影响，需要在分解前确定二次惩罚项 α 。VMD 参数选择不当会导致模态混叠，影响信号分解效果，也可能遇到局部优化问题。

本文选择 K-L 散度作为目标函数，构造一种改进的变分模态分解算法。K-L 散度被用来衡量两个信号的相似性，散度越小表明信号之间的相似性越高^[27]，反之亦然。K-L 散度原理简述如下。

$$\begin{cases} P(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \left[\frac{x_i - x}{h} \right], x \in \mathbf{R} \\ Q(y) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \left[\frac{y_i - y}{h} \right], y \in \mathbf{R} \\ k(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} D(P, Q) = \delta(P, Q) + \delta(Q, P) \\ \delta(P, Q) = \sum_{x, y \in \mathbf{N}} P(x) \ln \frac{P(x)}{Q(y)} \\ \delta(Q, P) = \sum_{x, y \in \mathbf{N}} Q(y) \ln \frac{Q(y)}{P(x)} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $P(x)$ 、 $Q(y)$ 、 $k(u)$ 分别表示信号 x 和 y 的核密度估计和核函数； h 为平滑参数，通常以正数表示； $D(P, Q)$ 表示由式(14)、式(15)计算的 K-L 散度； $\delta(P, Q)$ 和 $\delta(Q, P)$ 分别表示信号 x 与 y 之间的核密度函数的概率密度分布，两个概率密度分布间呈现出非对称性差异，当理论分解数据的概率分布跟真实故障信号一致时 K-L 散度趋近于 0；当数据相似度较差的时候 K-L 散度逐渐递增。直到分解出的信号最为接近原始有效故障信号时，K-L 散度不再梯度下降。

基于这一理论，本研究提出了一种基于 K-L 散度的自适应选择算法，用于选择分解层数和二次惩罚项的最优解，如算法 1 所示。

算法 1: K-L VMD 参数优化算法

- 1 数据： f 需要对原始信号进行分析；
- 结果： k -分解等级； α -第二惩罚因子；
- 2 设 k 的取值范围为(2, 10)；
- 3 设 α 的取值范围为(100, 3000)；
- 4 定义 $k = 2$ ；
- 5 定义 $\alpha = 100$ ；
- 6 定义 $D_k(y, u)_{\min} = 0$ ；
- 7 当 $D_k(y, u) > D_k(y, u)_{\min}$ 且 $k \leq 10$ 时
- 8 对 VMD 中心频率由低到高分解的 IMF 分量 $\{u_n\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, k$) 进行排序；
- 9 计算故障行波信号 f 与 IMF 各分量 $\{D_k(y, u)_n\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, k$) 之间的散度值。
- 10 保存最小 K-L 散度 $D_k(y, u)$ 使 $D_k(y, u) = D_k(y, u)_{\min}$ ；
- 11 $k = k + 1$ ；
- 结束
- 输出 Best_ $k = k$ ；
- 重置 $D_k(y, u)_{\min} = 0$ ；
- 16 当 $D_\alpha(y, u) > D_\alpha(y, u)_{\min}$ 且 $\alpha \leq 1500$ 时
- 17 以 Best_ k 作为分解等级，对 VMD 中心频率由低到高分解的 IMF 分量 $\{u_n\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, \text{Best}_k$) 进行排序；
- 计算故障行波信号 f 与 IMF 各分量 $\{D_\alpha(y, u)_n\}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, \text{Best}_k$) 之间的 K-L 散度值。
- 18 保存最小 K-L 散度 $D_\alpha(y, u)$ 使 $D_\alpha(y, u) = D_\alpha(y, u)_{\min}$ ；
- 20 $\alpha = \alpha + 50$ ；
- 21 结束；
- 输出 Best_ $\alpha = \alpha$ ；

同时，根据 Teager 能量算子在提取调频调幅信号瞬时能量谱和频谱方面的优势，采用该算子提取主要 IMF 的瞬时频率。Teager 能量算子是一种非线性微分算子，通过估计源信号^[24]的幅频来跟踪瞬时信号中的能谱。对于连续信号，Teager 能量算子可以表示为

$$\Psi_c[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t) = \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 - x(t) \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (16)$$

对于一个离散信号，仅 3 个采样点即可得到该离散信号在某一时刻对应的能量值。离散形式的 Teager 能量算子为

$$\Psi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (17)$$

由于电压行波的采样数据是离散信号，通过 Teager 分解得到信号的瞬时频率和幅值表达式为

$$\begin{cases} \omega_c = \frac{1}{2} \arccos \left[1 - \frac{\Psi_d[u_k(n+1) - u_k(n-1)]}{2\Psi_d[u_k(n)]} \right] \\ |A| = \frac{2\Psi_d[u_k(n)]}{\sqrt{\Psi_d[u_k(n+1) - u_k(n-1)]}} \end{cases} \quad (18)$$

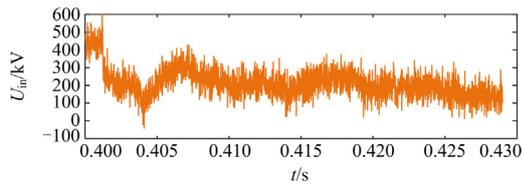
K-L VMD-Teager 算法与自适应维纳滤波器原理相似, 能有效抑制模态混叠现象, 抗干扰能力更强。设置传统 VMD、EMD 和 K-L VMD 算法作为故障信号分解的对比, 验证 K-L VMD 参数优化的性能, 并以均方根误差(root mean squared error, RMSE)作为评价指标, 评价重构信号的效果。通过 Teager 能量算子算法滤去 IMF 主要分量, 对比结果如表 1 所示。

表 1 不同信噪比下分解算法的重构性

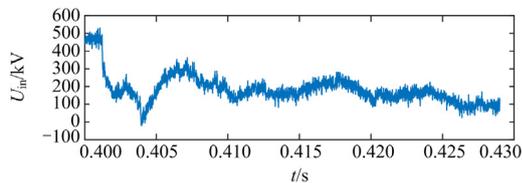
Table 1 Reconfigurability of decomposition algorithm under different SNR

算法	RMSE		
	20 dB	40 dB	60 dB
EMD	0.1207	0.0889	0.0631
VMD	0.0756	0.0453	0.0282
K-L VMD	0.0622	0.0321	0.0207

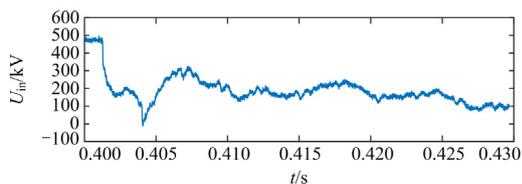
信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)反映了原始信号与噪声之间的关系。研究表明, 信噪比值与原始信号的重构性能呈正相关。同时, 均方根误差反映了重构信号与原始信号的相似度, 表现为负相关。从图 2 可以看出, 与 EMD 和 VMD 算法相比, 本文提出的 K-L VMD 算法在信号处理中具有更强的抗干扰能力和更高的精度。



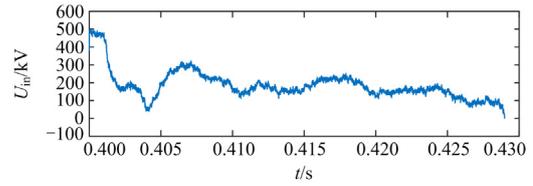
(a) 原始信号



(b) EMD



(c) VMD



(d) K-L VMD

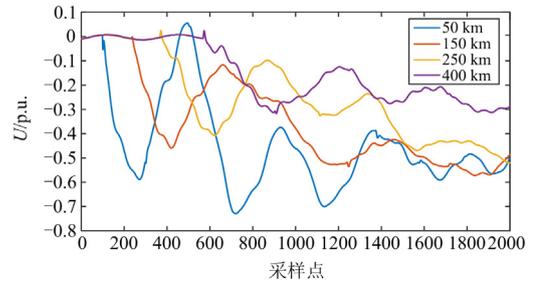
图 2 3 种算法进行信号重构的效果对比(SNR = 20 dB)

Fig. 2 Comparison of the effect of three algorithms on signal reconstruction (SNR = 20 dB)

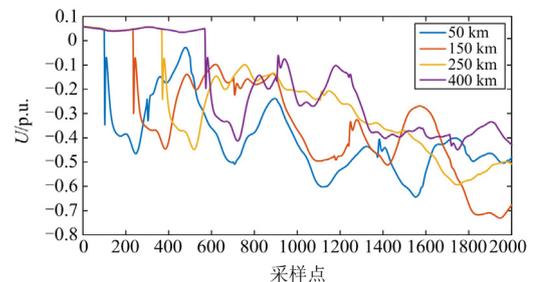
1.3 LCC-UHVDC 中 VTW 到达时间提取

对于双极直流输电系统, 正负线之间存在耦合现象。通过模态分解方法的解耦, 将正负电压和电流极分量分解为零模和线模分量, 可以消除两线之间的耦合。当 LCC-UHVDC 系统处于正常运行工况时, 不考虑参数不平衡所带来的误差, 线路中不存在电压电流行波的零模分量; 而当输电线路发生非对称故障时, 故障位置产生零模分量, 采用模态分解法可以得到电压电流的线模及零模分量。

通过理论分析发现, 当线路发生不对称故障时, 由于不对称分量的存在, 双极线路间存在较强的耦合关系, 故障信息共同作用于线模与零模分量中, 因此需要对线模与零模分量进行处理进而得到准确的故障信息以保证定位的精度。图 3 为发生正极接地故障时, 不同故障位置下零模分量和线模分量的变化情况。可以观察到, 随着故障距离的增加,



(a) 不同故障距离下电压行波的零模分量



(b) 不同故障距离下电压行波的线模分量

图 3 故障距离对行波电压模量的影响

Fig. 3 Influence of fault distance on modulus traveling wave voltage

零模分量的波头有明显的幅度衰减和陡度降低，而线模分量波头幅值的衰减以及陡度特征变化则不明显。这表明故障行波在传播的过程中，会产生较大的损耗，尤其是故障行波的零模分量，其衰减较为严重，因此以零模分量行波作为主分量进行分析，能更好地保留故障行波内含的位置信息。

但是，当线路发生对称故障时，由于不存在零模分量的原因，致使故障信息对称分布在故障极上，因对称性使得正负极上的故障信息耦合性较弱。不同故障下模态分解结果如图 4 所示。因此解耦后故障信息绝大部分蕴含在线模分量中，可以仅采用电压电流线模分量进行故障测距计算。

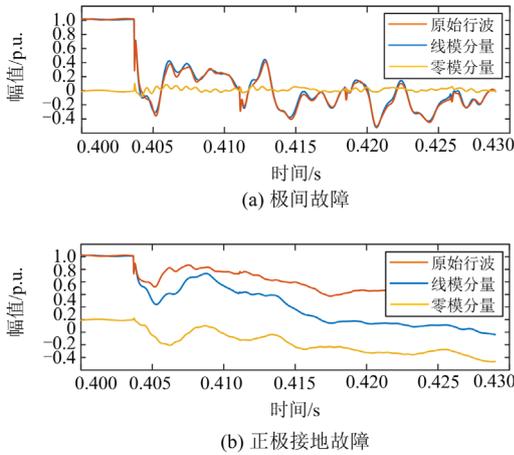


图 4 不同故障下模态分解结果

Fig. 4 Modal decomposition results under different faults

以单极接地故障为例，由于线路故障在传播过程中零模分量行波频率的衰减特性，零模分量在线路周围传播的波速将逐渐减小。利用 VMD-Teager 能量算子从多组故障模拟中提取瞬时频率，记录各故障位置零模分量的最高瞬时频率。通过频率-距离曲线可以得到故障行波零模分量的波速与故障距离的关系。根据零模故障行波波速与传播距离的关系，利用数学函数拟合上述关系，将其应用于后续的故障行波定位，提高了故障线路定位的精度。拟合图如图 5 所示。

不同拟合曲线函数形式所利用的零模行波波速与故障距离的拟合关系如式(19)所示。

$$\begin{cases} y_1 = -1.5 \times 10^4 x + 2.9153 \times 10^8 \\ y_2 = 6.3x^2 - 2.9 \times 10^4 x + 2.9532 \times 10^8 \\ y_3 = -3.9 \times 10^{-6} x^3 + 7.6x^2 - 3 \times 10^4 x + 2.9463 \times 10^8 \\ y_4 = 1.2 \times 10^{-6} x^4 - 5.8 \times 10^{-3} x^3 + 15x^2 - 3.4 \times 10^4 x + 2.9637 \times 10^8 \end{cases} \quad (19)$$

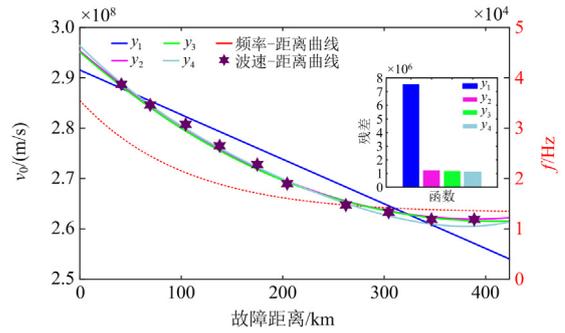


图 5 零模分量行波与故障距离的高频和速度关系

Fig. 5 Relationship of high frequency and velocity between zero-mode component traveling wave and fault distance

式中， y_1 、 y_2 、 y_3 及 y_4 分别表示采用不同的多项式函数进行拟合得到的曲线，下标 1~4 表示拟合曲线次数。

由图 5 可知，除线性函数外，二次函数、三次函数和四次函数的拟合误差均在可接受范围内。然而，计算过程证明随着函数阶数的增加，计算难度会增加数倍。本文选择二次函数作为拟合形式，对零模态故障行波分量随故障距离的变化趋势曲线进行拟合，如式(20)所示。

$$v_0 = A l_{\text{fault}}^2 + B l_{\text{fault}} + C \quad (20)$$

式中： A 、 B 、 C 表示由特定直线决定的二次函数系数； l_{fault} 表示故障距离； v_0 表示零模行波波速。

为了避免实际系统中不确定因素带来的误差，通过重合闸操作修改拟合参数，获得具体的测量数据。通常采用 3 组实测数据可以使拟合方程更接近实际波速。

1.4 K-L VMD-TEO 双端法故障测距原理

K-L VMD-TEO 双端法故障测距流程如下：

- 1) 采集双端双极直流侧故障行波电压监测数据；
- 2) 依据判断后的故障类型，对故障电压行波进行相模解耦，提取线模分量与零模分量；
- 3) 采用改进的 K-L VMD 参数优化算法对零模(线模)分量进行分解，得到 IMF 分量；
- 4) 选取 IMF1 分量，采用 TEO 进行解调获得能量谱；
- 5) 标定能量谱最大突变点出现时所对应的时刻，此时刻即为故障行波零模(线模)分量波头到达测量点的时刻；
- 6) 依据谱拟合行波波速得到初始零模波速，采用迭代法求解故障发生距离。

图 6 所示为整个故障定位方法流程图。基于 K-L VMD-TEO 能量算子解调的新型故障定位方法分为两个阶段：1) 故障数据提取；2) 故障定位。

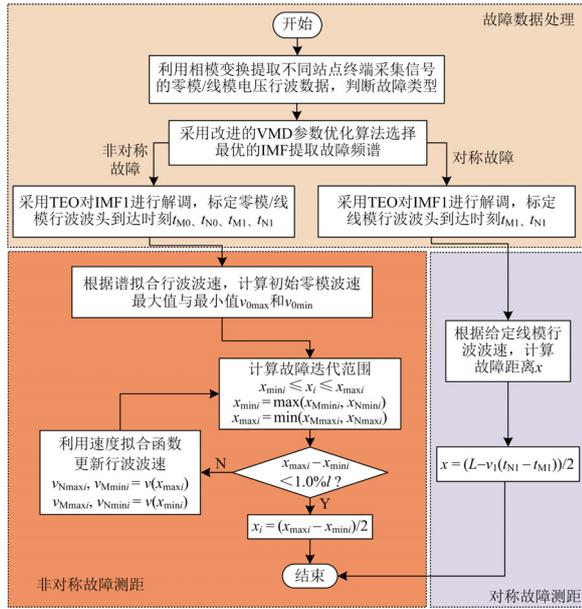


图 6 基于 K-L VMD-TEO 能量算子的电压行波故障定位方法流程图

Fig. 6 Flowchart of voltage traveling wave fault location method based on K-L VMD-TEO energy operator

根据标定得到的零模、线模分量波头到达 M、N 两端的时刻, 可以迭代计算故障点到一端的距离, 如图 7 所示。

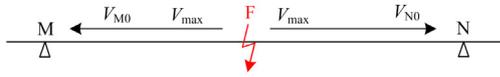


图 7 双端行波故障测距原理

Fig. 7 Principle of fault location with double terminal traveling wave

以 M 端测量点为基准, 在已知波速数据的基础上, 只要知道线路的长度参数 L , 就可以对故障位置进行迭代法测距, 原理如式(21)所示。

$$\begin{cases} x_M = v_{M0}(t_{M0} - t_{\text{fault}}) \\ x_M = v_1(t_{M1} - t_{\text{fault}}) \\ L - x_M = v_N(t_{N0} - t_{\text{fault}}) \\ L - x_M = v_1(t_{N1} - t_{\text{fault}}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: x_M 为故障点到 M 端距离; v_1 为线模波速; v_{M0} 为 M 端求得的零模波速; t_{M0} 为零模分量波头到达 M 端时刻; t_{M1} 为线模分量波头到达 M 端时刻; t_{fault} 为故障发生时刻; v_N 为 N 端求得的零模波速; t_{N0} 为零模分量波头到达 N 端时刻; t_{N1} 为线模分量波头到达 N 端时刻。

因故障发生时刻无法准确得知, 整理后可消去故障发生时刻 t_{fault} , 得到式(22)。

$$x_M = \frac{v_1 v_M (t_{M0} - t_{M1})}{v_1 - v_M} \quad (22)$$

同理, 对于 N 端有

$$L - x_M = \frac{v_1 v_N (t_{N0} - t_{N1})}{v_1 - v_N} \quad (23)$$

双端数据经式(22)与式(23)迭代求解至故障距离满足给定的收敛限值, 依据所测得波速即可得到故障位置距 M 端距离。迭代公式如式(24)所示。

$$\begin{cases} x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i} \\ x_{\min i} = \max(x_{M \min i}, x_{N \min i}) \\ x_{\max i} = \min(x_{M \max i}, x_{N \max i}) \\ x_i = \frac{(x_{\max i} - x_{\min i})}{2} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $x_{M \min i}$ 、 $x_{N \min i}$ 为两端计算得到的迭代距离最小值; $x_{M \max i}$ 、 $x_{N \max i}$ 为两端计算得到的迭代距离最大值; $x_{\min i}$ 、 $x_{\max i}$ 为迭代计算得到的故障距离范围的最小值和最大值; x_i 为每次迭代计算得到的故障距离。当发生极间故障时, 因线路不存在零模分量, 由 1.3 节分析, 可将式(21)化为式(25)。

$$x_M = \frac{L - v_1(t_{N1} - t_{M1})}{2} \quad (25)$$

2 LCC-UHVDC 系统双端行波测距仿真分析

2.1 仿真模型搭建及波速曲线绘制

在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型, 其中线路采用频率相关模型, 输电线路参数如表 2 所示。哈郑直流输电系统结构模型如图 8 所示, 输电线路全长 2190 km。

故障电压行波的零模分量在传播过程中具有衰减特征, 其频率也会随着行波衰减而逐渐降低。故障电压行波零模分量波速与其自身频率有关, 因此零模分量不能假设为恒定速度传播, 零模分量波速与频率的关系如图 9 所示。

表 2 输电线路参数

Table 2 Transmission line parameters

参数名称	数值
输电线距地面高度/m	34
输电线间距/m	22
地线距输电线高度/m	15
地线间距/m	15
输电导线分裂数	6
分裂导线外径/m	0.021 35
分裂导线间距/m	0.45
输电线直流电阻/(Ω/km)	0.028 62
地线外径/m	0.005 52
地线直流电阻/(Ω/km)	2.8645

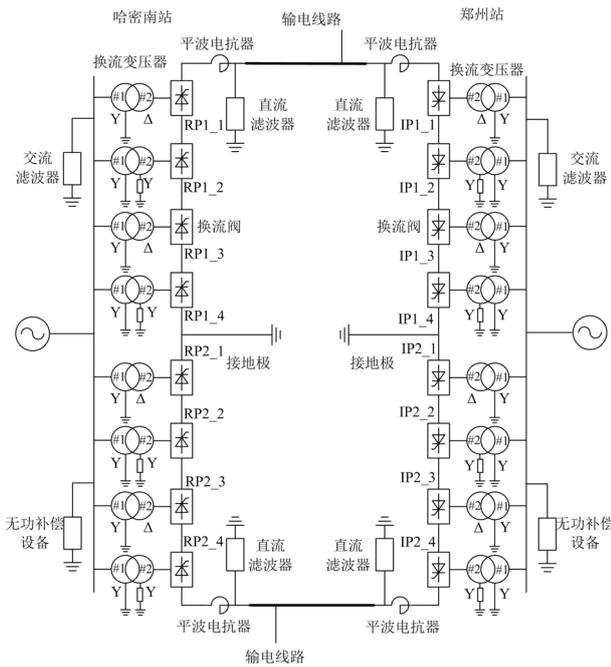


图 8 哈郑特高压直流系统结构模型

Fig. 8 Ha-Zheng UHVDC system architecture model

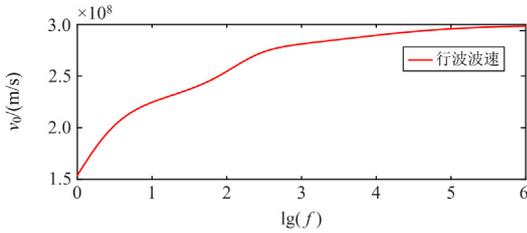


图 9 零模分量与频率变化关系图

Fig. 9 Variation diagram of zero-mode component and frequency

采用 VMD-TEO 法，可以对故障电压行波零模分量的瞬时频率进行提取，最高频率即为到达监测点时零模分量所处的频率状态，如图 10 所示。

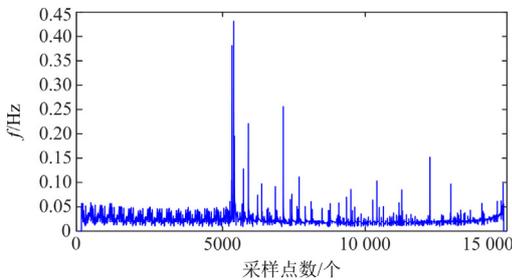


图 10 零模分量波头瞬时频率提取

Fig. 10 Extraction of instantaneous frequency of zero-mode component wave head

设置多组故障位置进行仿真，提取零模分量波头频率与故障距离之间的关系如图 11 所示。

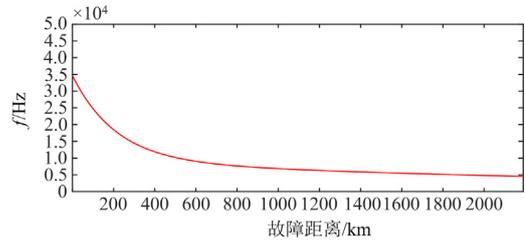


图 11 零模分量波头瞬时频率提取

Fig. 11 Extraction of instantaneous frequency of zero-mode component wave head

将图 6—图 9 依次映射得到零模分量波头波速与故障距离曲线关系，选取四次多项式函数进行波速曲线拟合，如图 12 所示。

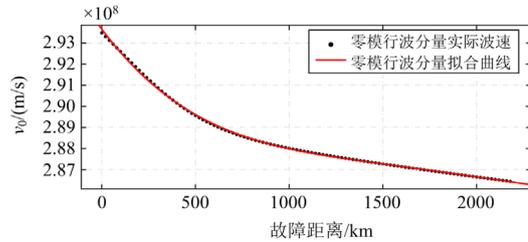


图 12 零模波头波速与故障距离关系图

Fig. 12 Relation diagram between wave speed of zero-mode wave head and fault distance

2.2 接地故障测距分析

设置仿真总时长为 0.6 s，故障发生时刻为 0.4 s，系统采样频率为 100 kHz，设置系统在 1895 km 处发生正极接地故障。对两端数据进行相模解耦，得到各自的线模分量与零模分量，分解后 M 侧的零模与线模分量如图 13 所示。

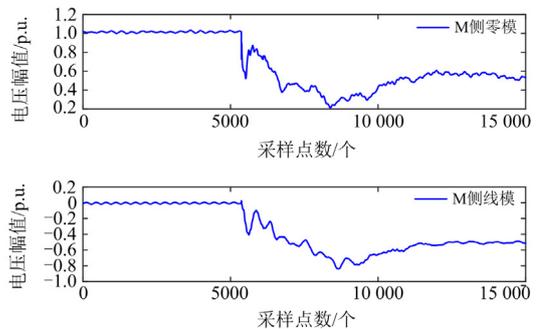


图 13 M 侧的零模与线模分量图

Fig. 13 Zero-mode and linear mode component diagram on M-side

选取模态分解数目 $K = 3$ ，将线模、零模分量进行 VMD 分解，分解后 M 侧 3 个模态分量如图 14 所示。

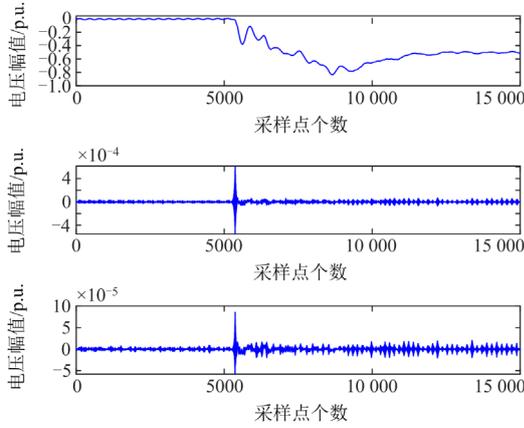


图 14 M 侧的模态分解结果

Fig. 14 Modal decomposition results on M-side

对主模态分量 IMF1 进行 TEO 解调后可以得到 M 侧零模分量波头到达测量点的时间，同理，对 M 侧线模分量、N 侧零模分量以及线模分量均采用 VMD-TEO 解调方法，最终标定得到 4 个波头到达时刻，M 侧 TEO 能量谱如图 15 所示。

能量谱的突变点分别出现在采样点 5660、5099、5634、5095 处，计算可得线模分量与零模分量到达两端测量点时间差为 $\Delta t_M = 0.26 \text{ ms}$ 、 $\Delta t_N = 0.04 \text{ ms}$ 。取线模波速为 298.2 km/ms ，设置测距精度为线路全长的 0.2%，迭代求解故障距离为 1895.814 km ，误差仅有 0.814 km ，因此可以验证 VMD-TEO 双端行波测距法具有较高的测距精度。

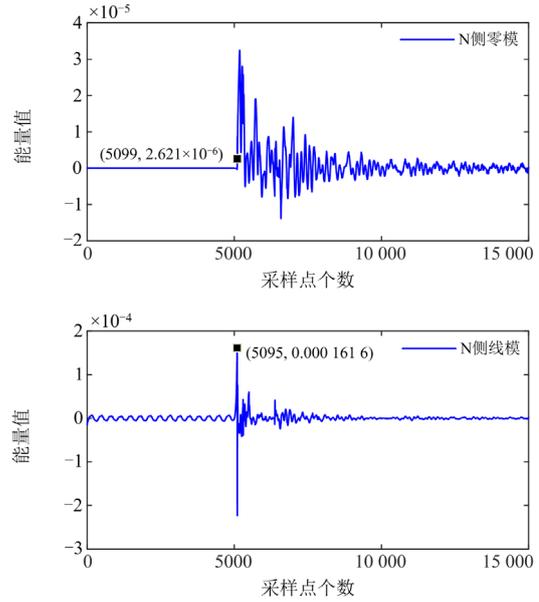
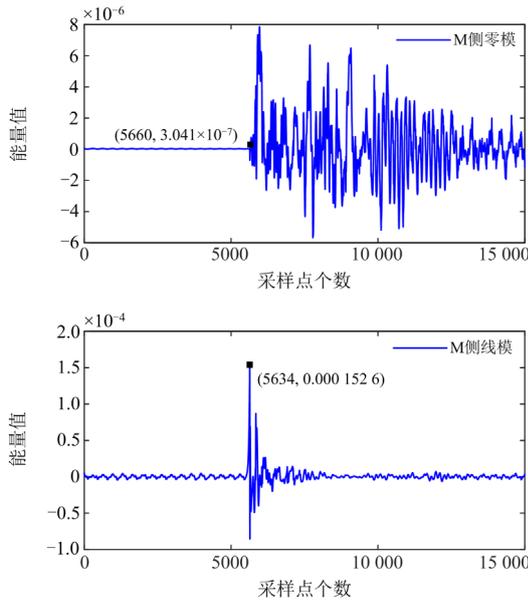


图 15 TEO 能量谱

Fig. 15 TEO energy spectrum

3 不同故障场景下的仿真研究

3.1 不同采样频率下的仿真验证

依据 VMD 原理可知，在固定的时间窗内，故障信息随采样率的增加而逐渐丰富，因此采样率的选择对所提方法的测距精度具有较大的影响。但一般来说，IEC-61869-9 测量标准用于直流变电站内的保护和控制方案，其允许的最大采样频率为 96 kHz ^[28]，基于行波保护通常需要较高的采样频率 ($500 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$)，往往不符合 IEC-61869-9 测量标准的要求。为了验证所提方法对采样频率的适应性，在其他条件不变的基础上，分别调整采样率为 10 kHz 、 50 kHz 、 200 kHz 以及 500 kHz ，重新进行仿真测距，得到数据如表 3 所示。

表 3 不同采样率下测距结果

Table 3 Fault location results under different sampling rates

采样率/kHz	测距结果/km	误差值/km
10	1892.386	2.614
50	1896.117	1.117
100	1895.814	0.814
200	1894.584	0.416
500	1895.402	0.402

表 3 结果显示，随着采样频率升高，采用 K-L VMD-TEO 算法的故障测距误差逐渐减小。当采样率大于 200 kHz 时，因采样得到的离散点已足够用于支撑算法进行高精度求解，误差值逐渐收敛至稳定值；当采样率小于 100 kHz 时，采样得到的点不足以反映出完整的故障信息，测距误差逐渐增大。

因此为了保证算法的测距精度，且符合工程实际采样率的需求，本文使用的采样率为 100 kHz，在基本满足测量标准的情况下保证测距精度。

3.2 不同故障距离下的仿真验证

不同的故障距离会对测距结果造成不同的影响，设置故障距离为 295 km、695 km、1095 km、1495 km、1895 km，在过渡电阻为 10 Ω、故障类型为正极接地的情况下进行仿真验证，仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同故障距离下测距结果

故障距离/km	测距结果/km	误差值/km
295	295.976	0.976
695	696.498	1.498
1095	1095.832	0.832
1495	1496.137	1.137
1895	1895.814	0.814

结果显示，不同故障距离下该方法测距误差均在 0.2%以内，基本不受故障距离因素的影响，在不同故障距离下具有较高的测距精度。

3.3 不同过渡电阻下的仿真验证

在高过渡电阻的场景下，故障行波在传播过程中具有更快的衰减速率，会导致故障行波特征不明显，进而难以测量故障距离，设置过渡电阻为 10 Ω、100 Ω 以及 300 Ω，在故障类型为正极接地、故障位置为 1095 km 处进行仿真验证，仿真结果如表 5 所示。

表 5 不同过渡电阻下测距结果

过渡电阻/Ω	测距结果/km	误差值/km
10	1095.832	0.832
100	1095.413	0.413
300	1092.933	2.067

结果显示，过渡电阻大小对故障测距结果影响不大，在高阻接地故障下测距误差有些许上升，但仍在 0.2%测距精度范围内，误差仍可以接受，可以认为基本不受过渡电阻影响。

3.4 不同故障类型下的仿真验证

在特高压直流输电系统中，直流输电线路可能会发生单极接地和极间短路两种类型故障，本文在不同故障类型下设置多组故障距离，设置过渡电阻为 10 Ω，仿真结果如图 16 所示。其中 PTG 表示正极接地故障，NTG 表示负极接地故障，PTN 表示双极短路故障。

结果显示，不同故障类型下故障测距误差均在

0.2%以内，可以认为该方法测距精度基本不受故障类型影响。

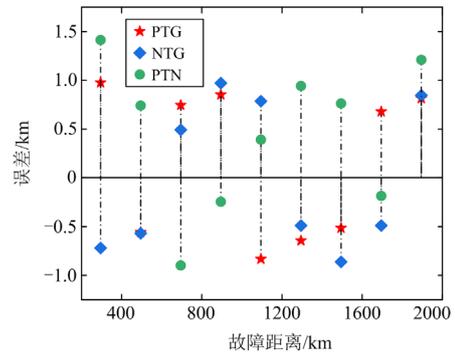


图 16 不同故障类型下测距结果

Fig. 16 Fault location results under different fault types

3.5 与其他方法对比

将基于希尔伯特-黄变换(HHT)的故障定位方法与本文方法进行对比试验，验证本文所提方法在测距精度上的优势。表 6 为 VMD-TEO 法与 HHT 法测距精度对比。

表 6 传统 HHT 法测距精度比较

故障距离/km	过渡电阻/Ω	测距结果/km		误差值/km	
		本文方法	HHT	本文方法	HHT
295	10	295.976	297.814	0.976	2.814
	100	295.822	297.147	0.822	2.147
	300	293.674	291.756	1.326	3.244
695	10	696.498	696.946	1.498	1.946
	100	695.965	697.512	0.965	2.512
	300	692.831	691.876	2.169	3.124
1095	10	1095.832	1096.679	0.832	1.679
	100	1095.413	1097.147	0.413	2.147
	300	1092.933	1092.104	2.067	2.896
1495	10	1496.137	1496.946	1.137	1.946
	100	1495.315	1496.781	0.315	1.781
	300	1493.266	1492.561	1.734	2.439
1895	10	1895.814	1896.251	0.814	1.251
	100	1895.741	1896.876	0.741	1.876
	300	1893.866	1892.417	1.134	2.583

结果显示，传统 HHT 法由于模态混叠和端点效应，在故障行波波头到达时刻标定方面存在较大误差，而本文提出的 VMD-TEO 法不存在上述不足，故障测距精准度较高。

VMD-TEO 算法收敛性能好，相较于 HHT 法，VMD-TEO 算法通过人工调整二次惩罚项 α 、拉格朗日乘子 λ 以及模态分解数 K ，减少 VMD 法分解

信号的运算时间,有效降低了故障测距时耗,在本机实验环境下与 HHT 算法时间对比如表 7 所示。

表 7 与传统 HHT 法测距时间比较

Table 7 Comparison of ranging accuracy with traditional HHT method

步骤	步骤耗时/s	
	VMD-TEO	HHT
模态分解	0.000 03	0.000 03
主频提取	2.061	2.442
波头标定	0.056	0.061
测距	0.005	0.005

4 结论

1) 针对特高压直流输电系统中 HHT 及其改进方法存在模态混叠、端点效应、计算量大等不足,本文提出了一种基于 VMD 和 TEO 的双端行波故障测距方法。

2) 在 PSCAD/EMTDC 搭建哈郑直流仿真模型,并在 Matlab 中进行 VMD-TEO 法故障测距,对故障行波双端数据进行解耦变换,并采用 VMD-TEO 标定波头到达时间,迭代测距结果具有较高的测距精度。

3) 针对不同故障位置、不同过渡电阻以及不同故障类型进行了仿真,结果显示本文提出的 VMD-TEO 法测距精度几乎不受上述因素的制约;同时与传统 HHT 方法进行测距精度和运算时间性能上的对比,结果显示在测距精度和运算性能上 VMD-TEO 法均存在优势。

参考文献

- [1] 刘勇,张郭艳.我国高压直流输电与特高压交流输电的应用前景试分析[C]//转型与重构——2011 中国城市规划年会论文集,2011,南京,中国:9539-9543.
LIU Yong, ZHANG Guoyan. An analysis on prospects of application of HVDC and UHVDC power transmission in our country[C]// Transformation and Reconstruction - Proceedings of the 2011 China Urban Planning Annual Conference, 2011, Nanjing, China: 9539-9543.
- [2] 冯媛硕.高压直流输电系统行波保护的研究[D].淄博:山东理工大学,2015.
FENG Yuanshuo. The study of traveling wave protection of HVDC system[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [3] 杨林,王宾,董新洲.高压直流输电线路故障测距研究综述[J].电力系统自动化,2018,42(8):185-191.
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Overview of fault location methods in high voltage direct current transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [4] 葛猛. LCC-UHVDC 输电线路行波故障定位研究[D].济南:山东大学,2020.
GE Meng. Study on traveling wave fault location of LCC-UHVDC transmission line[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [5] 郭海清.基于行波法的铁路 10 kV 自闭贯通线路故障定位研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.
GUO Haiqing. Study on fault locating of 10 kV automatic blocking and continuous transmission lines of railway based on traveling wave method[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [6] 雷朝煜,郝良收,戴甲水,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,2022,50(11):178-187.
LEI Chaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [7] 于帆,张硕.一种基于小波基函数的电网故障测距方法研究[J].计算机与数字工程,2012,40(8):15-17.
YU Fan, ZHANG Shuo. A power network fault location methods based on the wavelet function[J]. Computer & Digital Engineering, 2012, 40(8): 15-17.
- [8] 李艳丽.基于小波变换的输电线路故障测距研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012.
LI Yanli. Study on the fault location in transmission lines based on wavelet transform[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [9] 李强.基于希尔伯特-黄变换的高压输电线路行波故障测距研究[D].南昌:华东交通大学,2009.
LI Qiang. Study on fault location of high voltage transmission line based on Hilbert-Huang transform[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009.
- [10] 刘晓燕.改进的 Hilbert-Huang 变换在电缆故障检测中的应用[D].西安:西安科技大学,2018.
LIU Xiaoyan. The application of improved Hilbert-Huang transform in cable detection[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [11] 吴承阳,王玲桃.基于平稳小波变换的输电线路故障测距[J].电气自动化,2022,44(3):100-102.
WU Chengyang, WANG Lingtao. Transmission line fault location based on stationary wavelet transform[J]. Electrical Automation, 2022, 44(3): 100-102.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J].

Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.

[13] 杜雪. 基于经验小波变换的混合线路故障定位研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
DU Xue. Research on fault location of hybrid line based on empirical wavelet transform[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[14] MARAGOS P, KAISER J F, QUATIERI T F. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10): 3024-3051.

[15] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.

[16] 刘淼. 基于 EMD 和 TEO 的线缆混合型配电线路故障定位的研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.
LIU Miao. Research on fault location of cable hybrid distribution line based on EMD and TEO[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2021.

[17] 田鹏飞, 于游, 董明, 等. 基于 CNN-SVM 的高压输电线路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 119-125.
TIAN Pengfei, YU You, DONG Ming, et al. A CNN-SVM-based fault identification method for high-voltage transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 119-125.

[18] 李玥桦. 基于 EEMD 与 Teager 能量算子的输电线路行波故障测距研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
LI Yuehua. Fault location of transmission line through traveling wave based on EEMD and Teager energy operator[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.

[19] 张成, 王昕, 郑益慧, 等. 基于聚类经验模态分解和差分熵的输电线路故障测距研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 86-92.
ZHANG Cheng, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Study on fault location for transmission lines based on EEMD and DE[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 86-92.

[20] 刘伟鑫, 周松斌, 刘忆森, 等. 基于局部均值分解的行波故障测距方法[J]. 中国测试, 2017, 43(9): 42-46.
LIU Weixin, ZHOU Songbin, LIU Yisen, et al. Traveling wave fault location measurement method based on LMD[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(9): 42-46.

[21] 李春辉. 基于局域均值分解的配电线路行波故障测距[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
LI Chunhui. Fault distance detection of distribution line based on traveling wave and local mean decomposition[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.

[22] 邹红波, 伏春林, 高沈清. 基于互补经验模态分解法的高压直流输电线路故障测距[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 93-99.
ZOU Hongbo, FU Chunlin, GAO Shenqing. Fault location for high voltage direct current transmission lines based on complementary ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(2): 93-99.

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

[24] 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.

[25] 杨冬锋, 王鹤, 刘晓军, 等. 基于 VMD-SVD 的多端柔直电网故障测距方案[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3084-3095.
YANG Dongfeng, WANG He, LIU Xiaojun, et al. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on VMD-SVD[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3084-3095.

[26] REZA M S, HOSSAIN M M, CIOBOTARU M. Teager energy operator for fast estimation of three-phase grid frequency[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.

[27] MAKALIC E, SCHMIDT D F. Fast computation of the Kullback-Leibler divergence and exact fisher information for the first-order moving average model[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(4): 391-393.

[28] EN IEC. Instrument transformers—part 9: digital interface for instrument transformers: 61869-9[S]. Geneva, Switzerland: CLC/TC, 2019.

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-07-09

作者简介:

王洪彬(1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为直流电网保护与控制; E-mail: whbleehomwhb@163.com

周念成(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、微电网运行与控制。E-mail: cee_nczhou@cqu.edu.cn

(编辑 魏小丽)