

引用格式:周军,曲振国,战紫昂.基于CPO-VMD的输电线路行波故障测距方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):30-41.

Citation: ZHOU Jun, QU Zhenguo, ZHAN Ziang. Traveling wave fault location method of transmission line based on CPO-VMD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 30-41.

基于 CPO-VMD 的输电线路行波故障测距方法

周 军, 曲振国, 战紫昂

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要:针对长距离输电线路故障行波波头检测精度较低,故障检测装置时钟不同步和行波波速不确定造成的测距偏差问题,提出一种改进变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)联合 Teager-Kaiser 能量算子(Teager-Kaiser energy operator, TKEO)来检测故障行波波头,结合不依赖对时和波速的双端行波测距公式的输电线路故障测距新方法。先利用冠豪猪优化算法(crested porcupine optimizer, CPO)优化 VMD 参数;然后,将故障行波的线模和零模分量经 VMD 分解后,通过 TKEO 能量算子检测各分量初始波头;最后,根据线模和零模分量初始波头到达测量点的时间差,列写故障距离与差值距离之间的比例关系,得到不依赖对时和波速的双端行波测距公式。利用 MATLAB/Simulink 搭建 220 kV 输电线路故障仿真模型,仿真结果表明该测距方法在噪声和不同接地电阻、故障类型下均具有良好的适用性,且测距结果精度较高。

关 键 词:变分模态分解;冠豪猪优化算法;Teager-Kaiser 能量算子;模量时间差值;故障测距

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.004 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2025)02-0030-12

Traveling wave fault location method of transmission line based on CPO-VMD

ZHOU Jun, QU Zhenguo, ZHAN Ziang

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: To address the low detection accuracy of traveling wave heads for long-distance transmission line faults as well as the location deviation caused by the clock asynchronization of fault detection devices and the uncertainty of traveling wave velocity, this paper proposes a new fault location method for transmission lines based on improved variational mode decomposition (VMD) combined with Teager-Kaiser energy operator (TKEO) to detect the fault traveling wave head and the double-ended traveling wave location formula independent of timing and wave velocity. Firstly, the crested porcupine optimizer (CPO) is used to optimize VMD parameters. Then the line mode and zero mode components of the fault traveling wave are decomposed by VMD, and the initial wave heads of the components are detected by TKEO. Finally, according to the difference in time to reach the measuring point between the initial wave heads of the line mode and zero mode components, the proportional relationship between the fault distance and the difference distance is written, and the double-ended traveling wave location formula independent of timing and wave velocity is obtained. A 220 kV transmission line fault simulation model is built using Matlab/Simulink. The simulation results show that the method has good applicability under noise, different ground resistances, and different fault types, and the accuracy of the location results is high.

Key words: variational mode decomposition; crested porcupine optimizer; Teager-Kaiser energy operator; modulus time difference; fault location

收稿日期: 2024-6-25; 修回日期: 2024-09-29

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20170204068GX); 国网吉林省电力公司科技项目(SGJLLY00YJJS2300282)

通信作者: 曲振国(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事输电线路故障诊断、故障定位方面的研究; E-mail: Q13613507015@163.com

中国大部分输电线路位于气候条件恶劣的山区、丘陵等地区,由于其独特的地理环境,相较于配电网线路,输电线路发生故障的概率更高^[1-2]。输电线路发生故障时,精确定故障点对事故线路的及时维修、系统的持续供电及经济运行均具有重要意义^[3]。目前,故障测距的主流方法包括阻抗法^[4-5]、行波法^[6-9]和人工智能法^[10-11]等。其中,阻抗法受电力系统拓扑结构、故障位置等因素影响,适用范围较窄且可靠性较低;人工智能算法对故障样本数据要求高,网络训练难度大,实际应用受限;而行波测距法因具有求解简单、受限条件少、测距精度高等优势,成为当前最常用的测距方法。

输电线路长度大多都在100 km以上,故障行波经折反射后衰减程度较大,故单端法测距结果可靠性低,双端法逐步成为主要测距手段,但双端法中行波波速的不确定性、两端通信装置时钟的同步性以及初始波头的检测精度均会对测距结果造成影响。因此,克服双端法存在的缺陷成为了当前研究的热点问题。对于故障行波信号初始波头检测方法,文献[12]利用小波变换模极大值检测故障电压行波线模分量波头,但其波头检测结果受小波基函数和分解尺度的影响;文献[13]利用经验模态分解结合 Teager 能量算子 (empirical mode decomposition-Teager energy operator, EMD-TEO) 检测故障电压行波线模分量波头,但 EMD 算法在分解信号过程中存在模态混叠、抗噪性差以及计算复杂度高缺点;文献[14]利用互补集合经验模态分解结合 Teager 能量算子 (complete ensemble empirical mode decomposition-TEO, CEEMD-TEO) 检测故障电流行波线模分量波头,虽克服了模态混叠问题,但对噪声的耐受性仍较差;文献[15]利用改进变分模态分解 TEO (variational mode decomposition, VMD-TEO) 算法检测故障电压行波线模分量波头,虽该算法自适应较强,但依靠经验设定动态参数会造成信号分解效果不佳。对于测距公式的改进,文献[16]通过研究故障电流行波线模分量的折反射过程,提出了不受波速影响的双端测距公式,但折反射过程会造成行波衰减,导致波头的二次检测较为困难;文献[17]通过在线路中间加装一台通信装置,根据故障点与测量点之间距离关于时间和速度的关系,提出了不受波速影响的三测点行波测距公式,但该方案投资成本大,且确保所有通信装置时钟完全同步有难度;文献[18]通过研究故障电压行波的零线模分量,提出了不依赖通信装置

同步对时的线零模时差双端测距公式,但其需要精准估算线零模的传播速度;文献[19]通过研究故障电压行波的线零模分量的折反射过程,提出了改进单端行波测距公式,但其测距结果精度仍受线零模分量传播速度的影响。

针对所提故障测距方法存在的问题,本文先利用冠豪猪优化算法 (crested porcupine optimizer, CPO) 优化 VMD 参数,信号经 VMD 分解后能够更好地反映原始信号特征,再通过 TKEO 能量算子精准检测行波波头。考虑波速和对时精度对测距结果的影响,根据故障电压行波线模和零模分量传输相同时间的距离差值与线路故障距离之间的比例关系,推导出了不依赖波速和对时的改进双端行波测距公式。将波头检测算法与改进双端行波测距公式相结合,完成输电线路故障测距,通过仿真验证了所提故障测距方法的有效性。

1 基于 CPO-VMD-TKEO 的行波波头检测

本文选用输电线路故障时幅值较大、受线路阻抗和电源稳定性影响较小的故障电压行波进行故障测距研究。其中,行波信号波头检测分为以下3个步骤:先利用 Karenbauer 变换对三相相互耦合的故障电压行波进行解耦;然后利用 CPO 优化后的 VMD 处理解耦后所得的线模和零模信号,获得一系列本征模态分量 (intrinsic mode functions, IMF);最后,利用 TKEO 能量算子标定各信号初始波头到达测量点的时刻。

1.1 VMD 的基本原理

VMD 是一种完全非递归、高度自适应的信号分解处理算法,其主要通过多次迭代搜寻变分模型的最优解,进而确定每个模态分量的带宽以及中心频率^[20-21]。本文首先将故障电压行波经 Karenbauer 变换解耦后得到的线模和零模分量构建约束模型:

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

式中, $f(t)$ 为故障电压行波的线模或零模分量; $\{u_k\}$ 为分解后的第 k 个模态分量; $\{\omega_k\}$ 为分解后第 k 个模态分量的中心频率; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; $*$ 为卷积运算符。

其次,通过引入拉格朗日算子 λ 和二次惩罚因

子 α 得到式(1)的增广表达式,求解模型也由原来的约束模型变成了非约束模型,从而可求得方程的最优预测解,该模型为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_i \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \cdot e^{-j\omega_k t} \right\|^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

最后,利用乘法算子交替方向法进行二次优化,优化后得到的各模态分量、各模态分量的中心频率分别为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)| d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

VMD算法的实现步骤如下:

- 1) 初始化 u_k, ω_k, λ ,迭代次数 n 置为0;
- 2) $n=n+1$;
- 3) $k=k+1$,利用式(3)、(4)更新 u_k 和 ω_k ;
- 4) 利用公式 $\lambda^{n+1} = \lambda^n + \tau(f - \sum_k u_k^{n+1})$ 更新拉

格朗日乘数 λ ,其中 τ 为噪声容忍度;

5) 当满足 $\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|^2 / \|\hat{u}_k^n\|^2 \leq \zeta$ 时,停止迭代;否则转到步骤2),继续执行。其中, ζ 为精度收敛判据($\zeta > 0$)。

1.2 CPO的基本原理

CPO优化算法是一种基于自然启发的优化算法,其灵感来自冠豪猪独特的防御行为。Mohamed Abdel-Basset以CEC2017测试集为例,对该算法与一些经典的元启发式算法的性能进行测试,所得各算法平均标准差如图1所示。从图1中可看出,CPO优化算法的性能更优。

CPO优化算法最显著的特点是通过循环种群减少技术,以保持种群的多样性,同时加快收敛速度,其数学模型为

$$N = N_{\min} + (N' - N_{\min}) \cdot \left[1 - \left(\frac{t^{0\%} \frac{T_{\max}}{T}}{\frac{T_{\max}}{T}} \right) \right] \quad (5)$$

式中, N 为种群数量; T 为决定循环次数的变量; $T_{\max}$

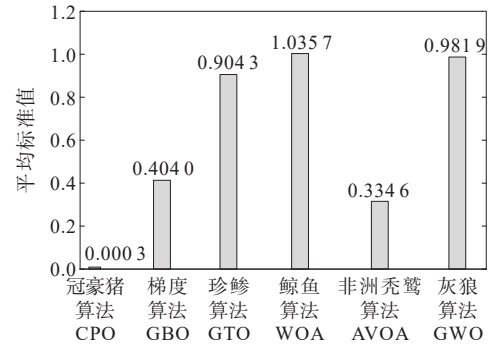


图1 CEC2017平均标准差

Figure 1 CEC2017 mean standard deviation

为函数求值的最大循环次数; $N_{\min}$ 为新生成种群中个体的最小数量; t 为当前函数求值。

冠豪猪与其他动物最大的区别是它们对抗捕食者独特的防御方法。因此,CPO算法是模拟冠豪猪在捕食者面前生存而采取的独特防御策略,其执行过程主要包括全局勘探和局部开发2个阶段。

1) 全局勘探阶段。该阶段冠豪猪距捕食者较远,采取视觉和声音两种防御策略来威胁捕食者。

第1防御策略:冠豪猪举起并扇动羽毛给捕食者以警告。数学模型为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \tau_1 \cdot |2 \times \tau_2 \cdot x_{CP}^t - y_i^t| \quad (6)$$

第2防御策略:冠豪猪制造噪声,并进一步威胁捕食者。数学模型为

$$x_i^{t+1} = (1 - U_1) \cdot x_i^t + U_1 \cdot (y + \tau_3 \cdot (x_{r_1}^t - x_{r_2}^t)) \quad (7)$$

式(6)、(7)中, x_i^t 为第 i 个个体迭代时的位置; x_i^{t+1} 为第 i 个个体下一次迭代时的位置; τ_1 为服从正态分布的随机数; τ_2, τ_3 为位于 $[0, 1]$ 之间的随机数; x_{CP}^t 为函数 t 的最优解; y_i^t 为在迭代 t 时捕食者的位置; U_1 为一个二元向量,由0和1构成; r_1, r_2 为 $[1, N]$ 之间的2个随机整数。

2) 局部开发阶段。此时捕食者已经距离冠豪猪较近,将采取气味和物理攻击来进攻捕食者。

第3防御策略:冠豪猪会分泌一种恶臭在周围区域传播,防止捕食者进一步接近。数学模型为

$$x_i^{t+1} = (I - U_1) \cdot x_i^t + U_1 \cdot (x_{r_1}^t + S_i^t \cdot (x_{r_2}^t - x_{r_3}^t) - \tau_3 \cdot \delta \cdot \gamma_t \cdot S_i^t) \quad (8)$$

第4防御策略:当之前所有策略都失效后,冠豪猪会对捕食者发起物理攻击。数学模型为

$$x_i^{t+1} = x_{CP}^t + (\alpha(1 - \tau_4) + \tau_4) \cdot (\delta \cdot x_{CP}^t - x_i^t) - \tau_5 \cdot \delta \cdot \gamma_t \cdot F_i^t \quad (9)$$

式(8)、(9)中, r_3 为 $[1, N]$ 之间的随机数; γ_t 为防御因子; S_i^t 为气味扩散因子; δ 为控制搜索方向的参

数; α 为收敛速度因子; τ_4, τ_5 为位于 $[0, 1]$ 之间的随机数; F'_i 为个体物理攻击捕食者时产生的非弹性碰撞力。

本文利用CPO优化VMD参数时,以最小包络熵作为适应度函数,其样本子集能够最好地覆盖数据集集中的不同类别或取值^[22],从而代表整个数据集的特征,包络熵定义式如下:

$$E(i) = -\sum_{i=1}^K p(i) \log_{10}(p(i)) \quad (10)$$

$$p(i) = a(i) / \sum_{i=1}^K a(i) \quad (11)$$

式(10)、(11)中, K 为采样点数; $E(i)$ 为包络熵; $a(i)$ 为包络信号; $p(i)$ 为 $a(i)$ 的标准化。

因此,以最小包络熵作为优化目标,得到故障电压行波线模和零模分量的最优模态分解个数 k 和惩罚因子 α ,解决了VMD分解过程中人为设定参数造成的信号分解不充分和分解效果不确定问题。

1.3 TKEO能量算子

TKEO能量算子是对TEO的改进,通过引入乘积项的平方和来增强信号能量的估计。在检测信号突变点时,相较于TEO能量算子,其具有更强的抗噪性、更好的时域分辨率以及更准确的能量估计能力^[23]。对于离散信号 $s(n)$,TKEO定义式如下:

$$\begin{aligned} \psi[s(n)] = & [s(n)]^2 - s(n-1) \times s(n+1) \\ & + 0.5 \times [s^2(n-1) + s^2(n+1)] \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\psi[s(n)]$ 为能量算子,当故障电压行波线模和零模分量初始波头到达测量点时,电压的幅值和频率会出现较大波动^[24]。由于TKEO能量谱中能量突变点与信号奇异点一一对应。因此,通过标定能量幅值最大点所对应的时刻即可确定初始波头到达测量点的时刻。

2 不依赖对时和波速的双端行波测距公式

2.1 传统双端行波测距公式

输电线路发生故障后,线路上产生的突变电压、电流会出现电磁感应,从而产生故障行波,故障行波在线路上的传播路径如图2所示。

图2中, t_{L1}, t_{R1} 均为行波波头到达线路两端的初始时刻, t_{L3}, t_{R3} 均为行波经故障点反射后波头到达线路两端的时刻, t_{L2}, t_{R2} 均为行波经故障点折射后波头到达线路两端的时刻。

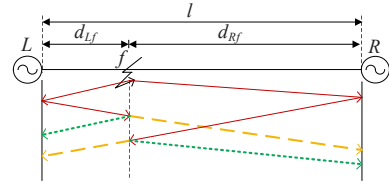


图2 故障行波传播路径

Figure 2 Fault traveling wave propagation path

传统双端行波测距公式是利用故障行波初始波头传输到两端测量点的时间差结合波速计算故障距离,故障点距线路首端长度可表示为

$$d_{Lf} = \frac{l + (t_{L1} - t_{R1})v}{2} \quad (13)$$

由式(13)可以看出,传统双端行波测距公式受以下3个参数影响。

1) 两端通信装置监测初始行波波头的精度(t_{L1}, t_{R1})。如目前常用的小波变换自适应性较差、EMD分解存在模态混叠、VMD动态参数设定困难等问题,这些均会影响波头的检测精度。

2) 行波波速 v 的不确定性。传统双端行波测距法一般利用故障行波线模分量的传播速度,将该波速视为定值,架空线路一般取 $2.9418 \times 10^8 \text{ m/s}$ ^[25]。然而,在实际工况中,不仅线路未知的参数会造成波速的不确定,故障位置、接地电阻和环境温度等也均会影响波速大小^[26]。例如,在不同故障位置和接地电阻下架空线路线模和零模分量波速如图3所示。

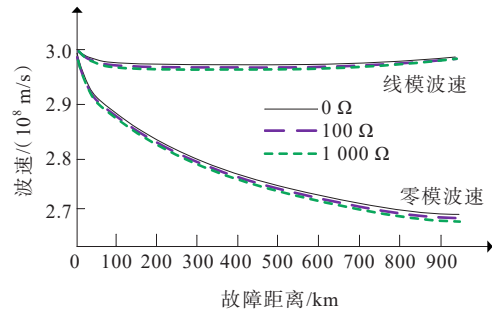


图3 不同故障位置和接地电阻下各模量波速

Figure 3 Wave velocity of each modulus under different fault locations and ground resistances

由图3可知,故障位置会影响线模和零模信号的波速,但线模信号波速受故障位置影响较小;而接地电阻的大小几乎不会影响线模和零模信号波速。

3) 线路两端通信装置时钟的不同步性。若线路两端通信装置时钟无法达到完全同步,测量点检测到的初始波头存在 Δt 的时间误差,实际测距结果则会存在 $\Delta t \times v/2$ 的误差。

2.2 基于线零模时间差的改进双端测距公式

文1所提CPO-VMD-TKEO算法克服了传统波头检测算法的缺点,能够准确检测行波波头。本节针对两端通信装置对时精度和行波波速对故障测距结果的影响,通过分析线模和零模分量初始波头到达测量点的时间差,分析故障距离与差值距离之间的比例关系,提出不依赖对时和波速的改进双端行波测距公式。线模和零模分量初始波头到达线路两端测量点的时间差和传播速度如下:

$$\begin{cases} \Delta t_L = t_{L0} - t_{L1} \\ \Delta t_R = t_{R0} - t_{R1} \\ v_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1} \\ v_0 = 1/\sqrt{L_0 C_0} \end{cases} \quad (14)$$

式中, t_{L1} 、 t_{R1} 分别为线模分量初始波头到达测量点 L 和 R 的时刻; t_{L0} 、 t_{R0} 分别为零模分量初始波头到达测量点 L 和 R 的时刻; L_1 、 L_0 分别为线路的正序电感和零序电感; C_1 、 C_0 分别为线路的正序电容和零序电容; v_1 、 v_0 分别为线模分量和零模分量的传播速度。

故障电压行波线模和零模分量在线路上的传输距离如图4所示。

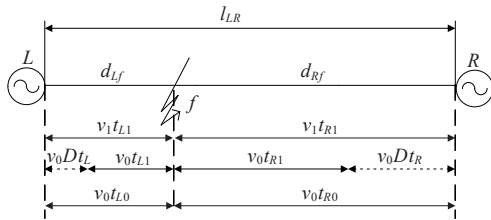


图4 线模和零模分量传输距离

Figure 4 Transmission distances of line mode and zero mode components

由图4中线路各段长度之间存在的比例关系,可得如下关系式:

$$\frac{d_{Lf}}{v_0 \Delta t_L} = \frac{d_{Rf}}{v_0 \Delta t_R} = \frac{l_{LR}}{v_0 (\Delta t_L + \Delta t_R)} \quad (15)$$

将式(15)化解后,得到的故障点距线路首端长度为

$$d_{Lf} = \frac{l_{LR} \cdot v_0 \Delta t_L}{v_0 (\Delta t_L + \Delta t_R)} = \frac{l_{LR} \cdot \Delta t_L}{\Delta t_L + \Delta t_R} \quad (16)$$

从式(16)可以看出,该测距公式只与线模和零模分量初始波头的检测结果有关,不受波速和两端通信装置时钟同步性的影响。同时,该测距公式依旧保留了传统双端测距,无须研究行波折返射过程、测距精度高的优点,能够很好应用于工程实践。

本文所提的基于CPO-VMD的输电线路故障

测距方案流程如图5所示。具体步骤如下:

- 1) 确定输电线路故障后,读取线路两端通信装置监测到的故障电压行波 U_L 、 U_R ;
- 2) 利用Karenbauer变换将三相相互耦合的故障电压行波进行解耦,得到故障电压行波的线模分量 U_a 和零模分量 U_0 ;
- 3) 利用CPO优化算法优化VMD动态参数,待确定最优 k 和 α 后,利用VMD分解 U_a 和 U_0 ;
- 4) 选取峭度值最大的模态分量,利用TKEO能量算子标定 U_a 和 U_0 初始波头到达线路两端测量点的时刻;
- 5) 将所标定的 U_a 和 U_0 初始波头到达线路两端测量点的时刻代入式(16),即可求得故障距离。

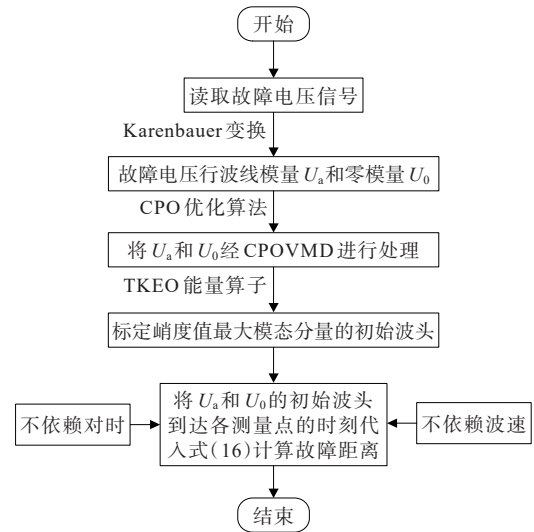


图5 故障测距流程

Figure 5 Fault location flow chart

3 算例

3.1 仿真分析

在MATLAB/Simulink仿真平台上模拟220 kV输电线路故障模型,如图6所示。线路长度为200 km,参数如表1所示。该模型采用频率相关模型,图中TP为线路保护装置, S_1 、 S_2 为避雷器,设定仿真开始时间为0 s,0.05 s时输电线路发生故障,0.12 s时故障结束,仿真持续时间为0.15 s,采样频率为1 MHz。

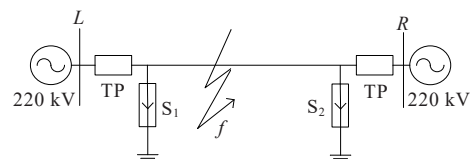


图6 220 kV 输电线路故障模型

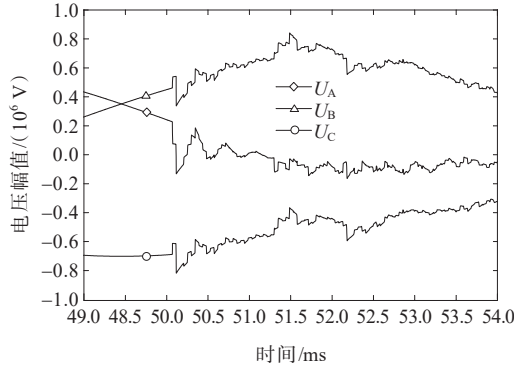
Figure 6 220 kV transmission line fault model

表1 线路参数

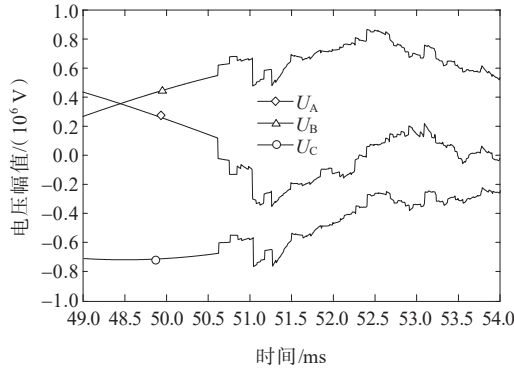
Table 1 Line parameters

相序	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$)
正序	0.17	1.209	9.693
零序	0.23	5.475	5.997

本文仿真过程仅展示距线路首端20 km处发生接地电阻为100 Ω 的单相接地故障情况,对故障前后共2.5个周期,即49~54 ms内两端测量点处的故障电压行波进行分析,该时间段内线路两端测量点L、R处的故障电压行波如图7所示。



(a) 测量点L处的故障电压行波



(b) 测量点R处的故障电压行波

图7 两端测量点处的故障电压行波

Figure 7 Fault voltage traveling wave at both measuring points

两端测量点处的故障电压行波经Karenbauer变换得到 U_a 和 U_0 ,Karenbauer变换公式如下:

$$\begin{cases} U_0 = \frac{(U_A + U_B + U_C)}{3} \\ U_a = \frac{(U_A - U_B)}{3} \\ U_\beta = \frac{(U_A - U_C)}{3} \end{cases} \quad (17)$$

测量点L和R处的 U_a 、 U_0 如图8所示。因行波法进行故障定位所需采样频率较高,所以本文所截

取的5 ms时间段内存在5 000个数据点,因此数据量庞大,数据处理过程缓慢。通过观察两端测量点处 U_a 和 U_0 的首个突变点大致对应的时刻,发现仅需故障后1个周期的数据即可精准标定初始波头,缩短了数据处理时间。

先利用CPO优化算法对VMD的动态参数 k 和 α 进行寻优。设定冠豪猪种群数量为10,迭代次数为20, k 的取值范围为[2,12], α 的取值范围为[10,3 000],参数优化过程中线路两端测量点处 U_a 和 U_0 最小包络熵随迭代次数变化曲线如图9所示。同时,在上述参数设定不变的情况下,利用CPO、GBO和GWO这3种算法得到的 U_{La} 最小包络熵随迭代次数变化曲线如图10所示。

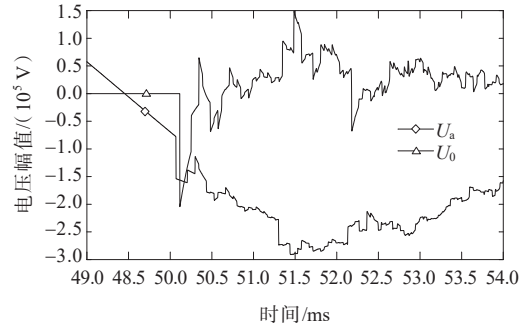
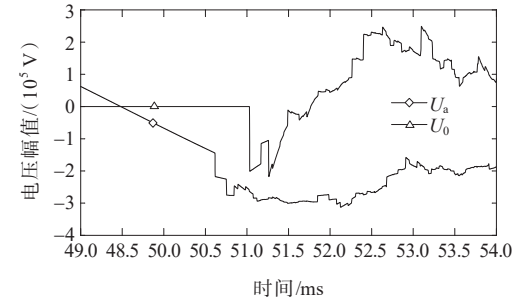
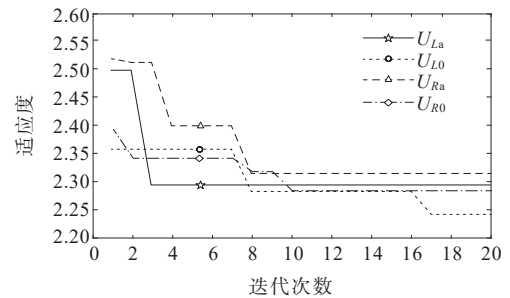
(a) 测量点L处的 U_a 和 U_0 (b) 测量点R处的 U_a 和 U_0 图8 两端测量点处的 U_a 和 U_0 Figure 8 U_a and U_0 at both measuring points

图9 最小包络熵随迭代次数变化曲线

Figure 9 Minimum envelope entropy changes with the number of iterations

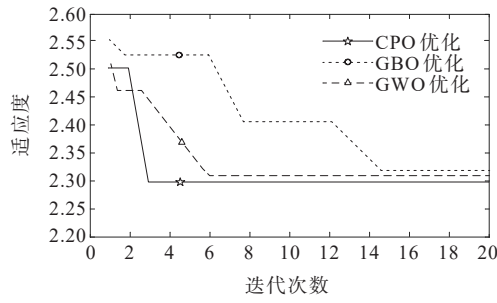


图 10 不同算法下 U_{La} 最小包络熵随迭代次数变化曲线

Figure 10 Variation curve of U_{La} minimum envelope entropy with the number of iterations under different optimization algorithms

从图 9、10 中可以看出, CPO 算法能够在有限的迭代次数内收敛到全局最优解或接近最优解, 且相较于 GWO 和 GBO 算法, CPO 算法收敛速度更快、收敛效果更好。

本文 VMD 参数首先经 CPO 优化后, 得到各模分量信号分解时的最优动态参数。 $U_{La}: k=10, \alpha=508$, $U_{Lo}: k=10, \alpha=519$, $U_{Ra}: k=10, \alpha=765$, $U_{Ro}: k=9, \alpha=545$ 。

然后, 将两端测量点处的 U_a 和 U_0 在相应最优动态参数下进行 VMD 分解, 并计算分解后得到的各 IMF 的峭度值, 即

$$K_f = \frac{E(s - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (18)$$

式中, K_f 为峭度值; s 为各 IMF 分量信号; μ 为信号均值; σ 为信号的标准差; E 为数学期望。

经式 (18) 可知: U_{La} 的 IMF1 峭度值最大, 值为 1 184; U_{Lo} 的 IMF1 峭度值最大, 值为 525.1; U_{Ra} 的 IMF1 峭度值最大, 值为 1 000; U_{Ro} 的 IMF1 峭度值最大, 值为 214.2。

最后, 利用 TKEO 能量算子标定峭度值最大 IMF 的初始波头到达测量点的时刻。两端测量点处的 U_a 和 U_0 经 VMD 分解后峭度值最大的 IMF 和经 TKEO 能量算子波头检测结果如图 11 所示。

从图 10 中可以看出, U_{La} 、 U_{Lo} 的初始波头到达线路首端的时刻分别为 50.070 和 50.116 ms, U_{Ra} 、 U_{Ro} 的初始波头到达线路末端的时刻分别为 50.617 和 51.031 ms, 利用式 (16) 不依赖对时和波速的改进双端行波测距公式求得故障点距线路首端长度为

$$d_{lf} = \frac{l_{LR} \times \Delta t_L}{\Delta t_L + \Delta t_R} = \frac{(50.116 - 50.07) \times 100}{(50.116 - 50.07) + (51.031 - 50.617)} = 20 \quad (19)$$

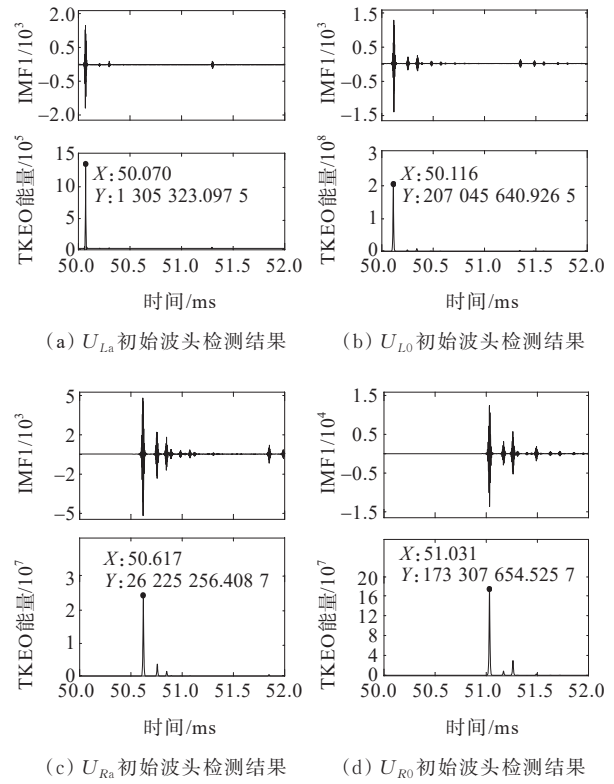


图 11 两端测量点处的 U_a 和 U_0 初始波头检测结果

Figure 11 Initial wave head detection results for U_a and U_0 at both measuring points

该测距结果验证了本文所提方法的有效性, 且该方法测距结果精度高。

3.2 波头检测算法对比

为突出所提 CPO-VMD-TKEO 算法相较于其他波头检测算法的优势。在文 3.1 的故障条件下利用文献 [12] 中的小波变换模极大值检测 U_{La} 和 U_{Lo} 的初始波头, 在不同小波基下初始波头的检测结果不同。例如, 当分解尺度为 7 时, 在不同小波基下 U_{La} 和 U_{Lo} 的初始波头检测结果如图 12 所示。因此, 利用小波变换处理信号时, 如何设定最优小波基和分解尺度成为一大难题。

利用文献 [13] 中的 EMD-TEO 算法检测 U_{La} 和 U_{Lo} 的初始波头, 若采样频率较低, 即在故障后的 1 个周期采样 200 个点, 易导致局部极值点不明显, 出现模态混叠现象。利用文献 [15] 中的 VMD-TEO 算法检测 U_{La} 和 U_{Lo} 的初始波头, 动态参数 k 和 α 的设定会影响初始波头的检测结果, 例如, 在惩罚因子 α 为 2 000, 分解模态数 k 不同时, U_{La} 和 U_{Lo} 的初始波头检测结果如图 13 所示。因此, 根据经验设定动态参数 k 和 α , 有时难以达到理想的分解效果。

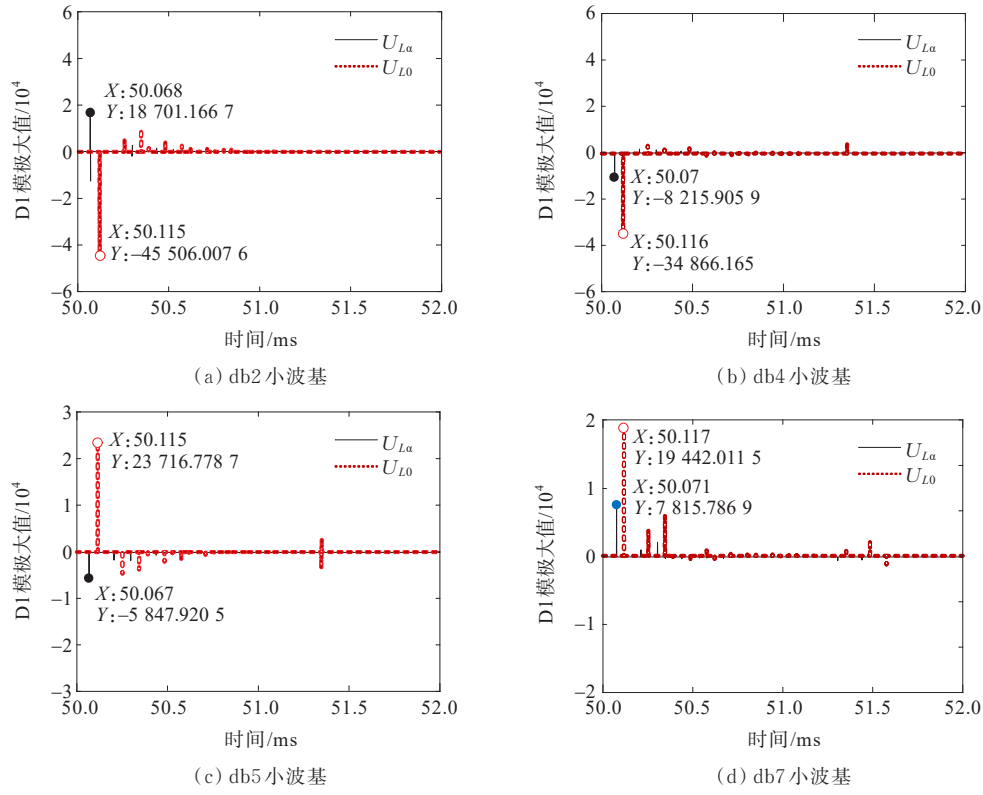


图12 不同小波基下初始波头检测结果

Figure 12 Initial wave head detection results under different wavelet bases

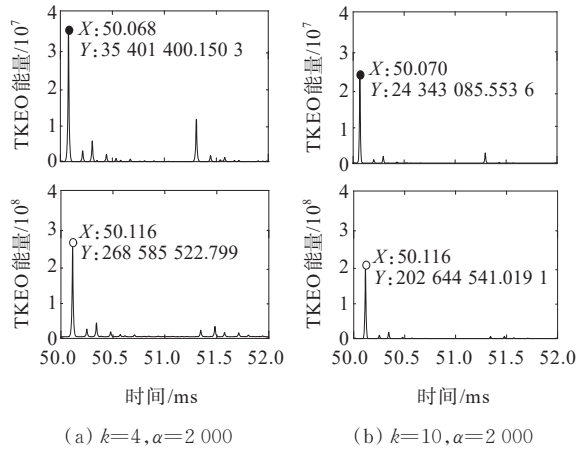


图13 不同分解模态数下初始波头检测结果

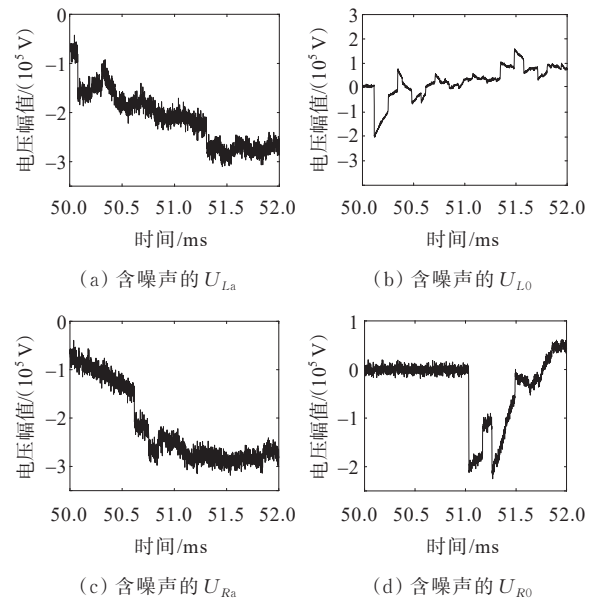
Figure 13 Initial wave head detection results under different decomposition mode numbers

3.3 噪声对波头检测结果的影响

为验证所提CPO-VMD-TKEO算法在噪声背景下的适用性,以文3.1为例,进行以下仿真分析。在两端测量点处的 U_a 和 U_0 中均加入信噪比为25 dB的高斯白噪声^[14],此时两端测量点处的 U_a 和 U_0 如图14所示。

同理,VMD参数经CPO优化后, U_{La} 含噪信号经VMD分解时的 $k=10, \alpha=519, U_{L0}$ 含噪信号的

$k=3, \alpha=691, U_{Ra}$ 含噪信号的 $k=10, \alpha=2973, U_{R0}$ 含噪信号的 $k=3, \alpha=1194$ 。根据经验设定的动态参数 $k=4, \alpha=2000$,在不同动态参数下线路两端测量点处含噪 U_a 和 U_0 经VMD分解后峭度值最大的IMF如图15所示。

图14 两端测量点处的含噪 U_a 和 U_0 Figure 14 Noisy U_a and U_0 at both measuring points

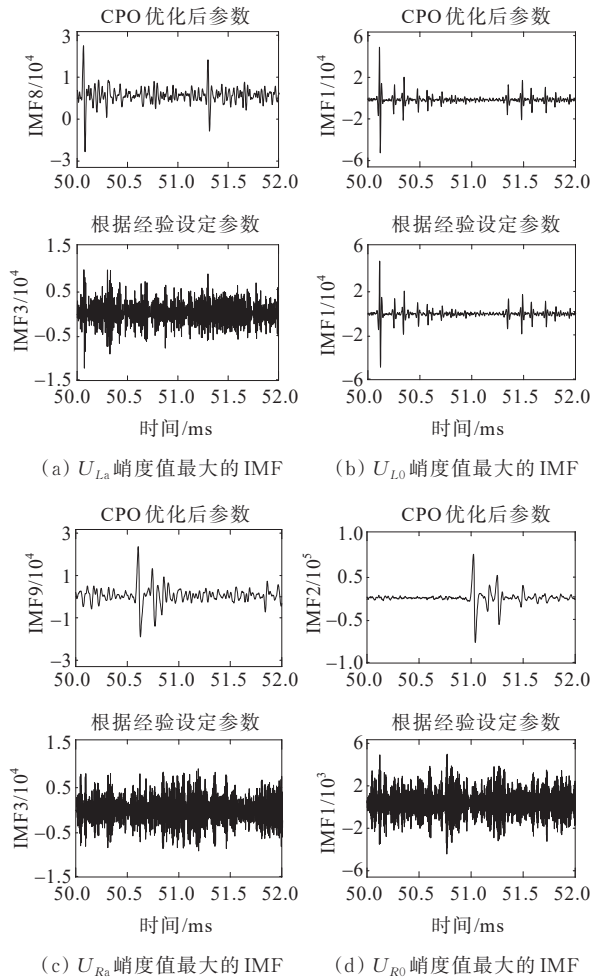


图 15 含噪 U_a 和 U_0 经 VMD 分解后峭度值最大 IMF
Figure 15 IMF with the highest kurtosis for noisy U_a and U_0 after VMD

从图 15 中可以看出,两端测量点处的含噪 U_a 和 U_0 经根据经验设定的 VMD 参数分解后,峭度值最大的 IMF 分量与噪声存在混叠现象,初始波头检测困难;而经 VMD 参数 CPO 优化后,两端测量点处的含噪 U_a 和 U_0 分解效果较好,噪声均匀分布在每个 IMF 分量中,峭度值最大的 IMF 分量突变点显著,初始波头能够更为准确、快速的检测出来。

3.4 故障条件对波头检测结果的影响

为进一步验证所提 CPO-VMD-TKEO 算法在不同故障类型和接地电阻下检测波头的适用性,进行以下仿真分析。

1) 故障类型对波头检测结果的影响。

设定距线路首端 20 km 处发生单相接地(AG)、两相接地(ABG)、相间短路(AB)、三相短路(ABC)故障时,其中 AG 和 ABG 故障时的接地电阻为 100 Ω ,不同故障类型下两端测量点处 U_a 和 U_0 的初始波头检测结果如表 2 所示。

表 2 不同故障类型下初始波头检测结果

Table 2 Initial wave head detection results under different fault types

故障类型	$t_{La}/$ ms	$t_{L0}/$ ms	$t_{Ra}/$ ms	$t_{R0}/$ ms	测距结果/km
AG	50.07	50.116	50.031	50.617	20
ABG	50.07	50.116	50.031	50.617	20
AB	50.07	50.116	50.031	50.617	20
ABC	50.07	50.116	50.031	50.617	20

2) 接地电阻对波头检测结果的影响。

设定距线路首端 20 km 处发生接地电阻为 0、100、500、1 000 Ω 的单相接地故障时,两端测量点处 U_a 和 U_0 的初始波头检测结果如表 3 所示。

表 3 不同接地电阻下初始波头检测结果

Table 3 Initial wave head detection results under different ground resistances

接地电阻/ Ω	$t_{La}/$ ms	$t_{L0}/$ ms	$t_{Ra}/$ ms	$t_{R0}/$ ms	测距结果/km
0	50.07	50.116	50.031	50.617	20
100	50.07	50.116	50.031	50.617	20
500	50.07	50.116	50.031	50.617	20
1 000	50.07	50.116	50.031	50.617	20

由表 2、3 中两端测量点处的 U_a 和 U_0 初始波头检测结果可得,本文所提行波波头检测算法不受接地电阻和故障类型影响,适用性较强。

3.5 不同方法测距结果对比

上文已验证所提出的 CPO-VMD-TKEO 算法在行波波头检测中的可靠性,并验证其相较于其他算法的优越性。为进一步验证该算法结合所提不依赖对时和波速的改进双端行波测距公式相较于传统经验波速法的测距精度提升效果,本研究设置线路不同位置发生接地电阻为 200 Ω 的单相接地故障工况,分别采用以下 4 种方法进行测距:本文所提 CPO-VMD-TKEO 结合改进双端行波测距公式;小波模极大值结合传统双端行波测距公式;EMD-TEO 结合传统双端行波测距公式;VMD-TEO 结合传统双端行波测距公式进行故障测距。4 种不同方法在不同故障位置下的测距结果如表 4 所示。为描述不同方法测距结果的偏差,引入相对误差 e 来衡量测量值 x^* 与实际值 x 之间的差异,相对误差计算公式如下:

$$e = \frac{|x - x^*|}{L} \times 100\% \quad (20)$$

表4 不同方法测距结果

Table 4 Location results of different methods

测距方法	故障距离/km	测距结果/km	相对误差/%
小波模极大值 结合传统双端 行波测距公式	20	19.688 86	0.155 570
	40	39.693 10	0.153 430
	60	59.697 34	0.151 330
	90	89.850 79	0.074 605
	150	150.598 96	0.299 480
EMD-TEO结合 传统双端行波 测距公式	170	170.603 20	0.301 600
	20	19.394 68	0.302 660
	40	39.840 19	0.079 905
	60	59.697 34	0.151 330
	90	89.850 79	0.074 605
VMD-TEO结合 传统双端行波 测距公式	150	150.204 78	0.102 390
	170	170.456 11	0.228 060
	20	19.394 68	0.302 660
	40	39.840 19	0.079 905
	60	59.697 64	0.151 330
CPO-VMD-TKEO 结合改进双端 行波测距公式	90	89.850 79	0.074 605
	150	150.598 96	0.299 480
	170	170.309 02	0.154 510
	20	20.000 00	0.000 000
	40	39.960 78	0.019 610
	60	60.173 16	0.086 580
	90	90.043 30	0.021 650
	150	149.892 93	0.053 530
	170	170.135 26	0.067 630

将表4中4种方法测距结果的相对误差呈现在图16中。

从图16中可以清晰看出,相较于小波模极大值、EMD-TEO、VMD-TEO结合传统双端行波测距公式,本文所提VMD-CPO-TKEO结合不依赖对时

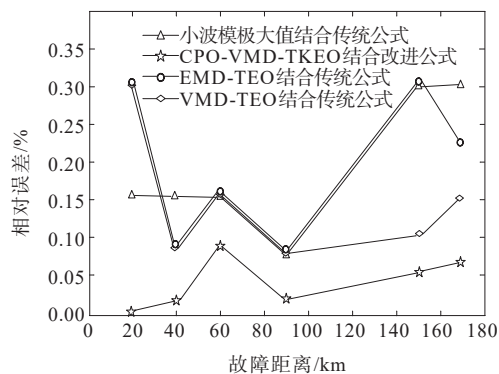


图16 4种方法测距结果相对误差对比

Figure 16 Comparison of relative error of location results obtained by four methods

和波速的改进双端行波测距公式的测距结果精度更高,且相对误差维持在0.2%内,能够很好地应用于工程实践。

4 结语

1) 提出一种基于冠豪猪防御的VMD算法。该算法以最小包络熵作为适应度函数,提高了算法提取故障特征的能力,且其受噪声干扰较小,有利于后续通过TKEO能量算子检测行波波头。

2) 针对传统双端行波测距公式受波速和两端通信装置时钟同步性的影响,提出一种基于线零模分量时间差的改进双端行波测距公式。该测距公式不涉及波速与对时精度,只需检测线零模分量传输到两端测量点的初始时刻,即可获得故障距离,具有原理简单、准确度高的特点。

3) 仿真测试结果表明,本文所提行波波头检测算法具有较强的自适应性和良好的抗噪能力,且不受接地电阻和故障类型的影响。相比于常见的波头检测算法结合传统双端行波测距公式的输电线路故障测距结果精度,所提CPO-VMD-TKEO结合改进双端行波测距公式测距结果精度更高,相对误差能够维持在0.2%以内。

参考文献:

- [1] 孙文成,李健,彭宇辉,等.基于样本不均衡和特征优选多源融合的输电线路故障类型辨识[J].电测与仪表,2024,61(12): 79-89.
SUN Wencheng, LI Jian, PENG Yuhui, et al. Transmission line fault type identification based on the sample imbalance and feature preferred multi-source fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 79-89.
- [2] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2): 179-185.
LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 179-185.
- [3] 王春明,李杰,徐正清,等.基于暂态信息融合的输电线路单端故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(2): 62-71.
WANG Chunming, LI Jie, XU Zhengqing, et al. Research on single-ended fault location of transmission line based on transient information fusion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 62-71.

- [4] 齐郑,黄朝晖,陈艳波.基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J].电力系统保护与控制,2023,51(6): 54-62.
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [5] 顾大德,肖健,韦梦立,等.含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究[J].电测与仪表,2023,60(11): 53-59.
GU Dade, XIAO Jian, WEI Mengli, et al. Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 53-59.
- [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 Zhaoyu, 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] 郭王勇,王毅松,黄捍志,等.中压电缆瞬时电弧击穿故障行波测距研究[J].电网与清洁能源,2024,40(11): 31-38.
GUO Wangyong, WANG Yisong, HUANG Chizhi, et al. Research on traveling wave ranging of transient arc breakdown faults in medium voltage cables[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(11): 31-38.
- [8] 王洪彬,周念成,王伟,等.基于行波模式分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(1): 109-120.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.
- [9] 王凯亮,曾远方,李家淇,等.基于希尔伯特-黄变换的新型配电系统行波故障定位仿真研究[J].供用电,2023,40(9): 43-49.
WANG Kailiang, ZENG Yuanfang, LI Jiaqi, et al. Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 43-49.
- [10] 黄悦华,陈照源,陈庆,等.基于边缘计算和改进YOLOv5s算法的输电线路故障实时检测方法[J].电力建设,2023,44(1): 91-99.
HUANG Yuehua, CHEN Zhaoyuan, CHEN Qing, et al. Real-time detection method for transmission line faults applying edge computing and improved YOLOv5s algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 91-99.
- [11] 夏向阳,刘奕炫,刘雄,等.基于S变换模能量分析的直流电缆故障测距[J].高压电器,2024,60(7): 201-209.
XIA Xiangyang, LIU Yixuan, LIU Xiong, et al. Fault location of DC cable based on S-transform mode energy analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 201-209.
- [12] 杨焘红,朱子叶,黄文焘,等.基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J].电力系统保护与控制,2022,50(16): 66-75.
YANG Huanhong, ZHU Ziye, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 66-75.
- [13] 刘森.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.
- [14] 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.
- [15] 张文坚,申岩,于文斌.基于VMD-TEO的输电线路故障定位方法[J].广东电力,2021,34(3): 85-91.
ZHANG Wenjian, SHEN Yan, YU Wenbin. Fault location method for transmission line based on VMD-TEO[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 85-91.
- [16] 胡文斌,廖玄,康毅,等.一种不受波速影响的双端行波故障定位方法[J].陕西电力,2016,44(2): 39-42+47.
HU Wenbin, LIAO Xuan, KANG Yi, et al. Double terminal traveling wave fault location method without influence of wave velocity[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(2): 39-42+47.
- [17] 熊列彬,吴高华,王志洋.基于IHHT的多测点行波法故障测距在全并联AT牵引网中的研究[J].电工技术学报,2019,34(15): 3244-3252.
XIONG Liebin, WU Gaohua, WANG Zhiyang. Study on fault location of multi measuring points traveling wave method based on IHHT in all parallel AT traction network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3244-3252.
- [18] 胡冰颖,李梅.基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J].电力工程技术,2021,40(2): 114-120.
HU Bingying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time

- difference of zero-mode and line-mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 114-120.
- [19] 邓志祥, 张帆, 潘建兵, 等. 基于零模-线模波速差的配电网单端测距新方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 78-84.
- DENG Zhixiang, ZHANG Fan, PAN Jianbing, et al. A new method of traveling wave ranging in distribution networks based on the difference between zero-and aerial-mode velocities[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 78-84.
- [20] 张帝, 宋兴荣, 唐海国, 等. 基于自适应VMD和WVD的配电网故障行波检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 80-90.
- ZHANG Di, SONG Xingrong, TANG Haiguo, et al. Fault traveling wave detection method of distribution network based on adaptive VMD and WVD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 80-90.
- [21] 池梓斌, 夏成军, 杨明嘉. 基于参数优化VMD和TET的柔直线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 1-11.
- CHI Zibin, XIA Chengjun, YANG Mingjia. Single-end fault location method for MMC-HVDC transmission lines based on parameter-optimized VMD and TET[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 1-11.
- [22] 姜飞, 林政阳, 王文烨, 等. 考虑最小平均包络熵负荷分解的最优Bagging集成超短期多元负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1777-1789.
- JIANG Fei, LIN Zhengyang, WANG Wenye, et al. Optimal bagging ensemble ultra short term multi-energy load forecasting considering least average envelope entropy load decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1777-1789.
- [23] 陈志刚, 姜云龙, 王莹莹, 等. TKEO和SET在轴承故障诊断中的应用[J]. 电子测量技术, 2022, 45(10): 155-160.
- CHEN Zhigang, JIANG Yunlong, WANG Yingying, et al. Application of TKEO and SET in bearing fault diagnosis[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(10): 155-160.
- [24] 马晓锋, 安军, 高志强, 等. 基于CEEMDAN和TEO的配电网行波故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 87-95.
- MA Xiaofeng, AN Jun, GAO Zhiqiang, et al. A traveling-wave fault location method based on CEEMDAN and NTEO for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 87-95.
- [25] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
- TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.
- [26] 梁睿, 王全金, 孔令昌, 等. 考虑行波波速衰减及波头时间误差的复杂输电网故障精准定位[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4512-4524.
- LIANG Rui, WANG Quanjin, KONG Lingchang, et al. Precise location of complex power grid faults considering velocity attenuation and time error of traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4512-4524.
- (上接第20页 Continued from page 20)
- [38] GONG X, WANG X Z, JOOS G. An online data-driven method for microgrid secondary voltage and frequency control with ensemble koopman modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 68-81.
- [39] YANG D Y, GAO H, CAI G W, et al. Synchronized ambient data-based extraction of interarea modes using Hankel block-enhanced DMD[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128: 106687.
- [40] 赵兵, 徐式蕴, 兰天楷, 等. 新型电力系统标准算例(三): 电压稳定 CSEE-VS[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8353-8364.
- ZHAO Bing, XU Shiyun, LAN Tiankai, et al. Benchmark for AC-DC hybrid system with high penetration of renewables (III): voltage stability benchmark CSEE-VS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8353-8364.
- [41] WANG L X, YANG D Y, CAI G W, et al. Synchronized-ambient-data-driven participation-factor-based generation rescheduling strategy for enhancing the damping level of interconnected power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146: 108740.