

DOI: 10.7667/PSPC170163

同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究

闫红艳, 高艳丰, 王继选, 高旭东

(河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了提高同杆双回线路行波故障测距的准确度, 针对故障行波选取和行波检测, 提出了一种新的故障行波选取方法和行波检测方法。同杆双回线路各相线间耦合复杂, 经传统相模变换后的多模分量传播特性差异较大, 采用一种新的相模变换, 找出多模分量传播规律, 解决了故障行波选取困难的问题。当前行波检测方法存在一些技术缺陷, 将参数优化的变分模态分解和 Teager 能量算子相结合应用于行波检测, 实现了行波检测方法的自适应性, 具有较好的检测效果。采用双端行波测距算法计算故障位置, 大量的仿真结果验证了所提方法的可行性和测距结果的准确性。

关键词: 同杆双回线路; 行波测距; 相模变换; 变分模态分解; Teager 能量算子

Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower

YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, GAO Xudong

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of traveling wave fault location of double-circuit line on the same tower, a new selection of fault traveling wave and a detection method are proposed for fault traveling wave selection and traveling wave detection. The coupling between each phase and each line of double-circuit line on the same tower is complex and multimode propagation characteristics after traditional phase mode transformation are of big difference. A new kind of phase transformation is adopted, which concludes the law of multimode component propagation and solves the difficult problem of traveling wave fault selection. There are some technical defects existing in the current traveling wave detection method. The variational mode decomposition after parameter optimization and Teager energy operator are combined to apply to traveling wave detection, realizing the adaptability of the travelling wave detection method with a good detection effect. Double-terminal traveling wave fault location algorithm is used to calculate fault location. A large number of simulation results verify the feasibility of the method and the accuracy of location results.

This work is supported by Foundation of Hebei Education Department (No. ZD2014031), Science and Technology R & D Program of Handan (No. 1721203048-1), Innovation Fund Program of Hebei University of Engineering (No. 17129033052).

Key words: double-circuit line on the same tower; traveling wave location; phase mode transformation; variational mode decomposition; Teager energy operator

0 引言

伴随着社会经济发展对电能需求的增长, 电网规模不断扩大, 同杆并架输电技术有效缓解了输电线路走廊紧张的问题, 在现代电力系统中占有的比例越来越重, 比较典型的是同杆双回线路^[1-3]。

与单回输电线路相比, 同杆双回线路具有占地

面积小、建设速度快、工程投资成本少和单位输电走廊宽度的输电能力强等优点。同时, 同杆双回线路间距离较近, 各相线间耦合比较复杂, 存在跨线故障的可能性, 从而增大了故障测距的难度和计算工作量^[4]。同杆双回输电线路故障情况下, 故障电流在各相导线中的传播情况复杂, 当前故障测距方法大多采用故障分析法^[5-8], 受线路参数、系统运行方式和过渡电阻的影响较大, 测距精度较差。行波测距方法定位精度较高, 主要针对单回线路的故障测距^[9-15]。同杆双回线路行波故障测距分析时, 采用传统的相模变换时, 6 相故障电流经传统相模变

基金项目: 河北省教育厅基金资助项目 (ZD2014031); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (1721203048-1); 河北工程大学创新基金项目 (17129033052)

换后的 6 个模分量传输特性差异较大, 不同故障类型下需要选取不同的模分量来表征故障行波特征, 故障行波的选取相当复杂^[16]。因此, 如何选取同杆双回线路故障行波是进行行波测距的关键之一。文中通过引入一种新的相模变换矩阵, 找出 6 个模分量传播规律, 利用某一线模分量表征不同故障类型下的行波特征, 降低了故障行波选取的复杂性。

另外, 提高行波检测方法的准确度可以减少测距误差, 当前的行波检测方法主要有小波变换 (Wavelet Transform, WT)^[10-12]和希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)^[13]。小波变换需要选择合适的小波基函数和分解尺度, 否则难以达到满意检测效果^[17]; 希尔伯特-黄变换是一种自适应的信号分解方法, 行波检测效果相比小波变换要好^[18], 由于信号分解过程中存在过包络、欠包络和模态混叠等现象^[14], 在某些特殊情况下, 致使信号无法检测或者检测精确度不够。文中提出一种基于参数优化的变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 方法, 通过进行 VMD 分解, 利用 Teager 能量算子 (Teager Energy Operator, TEO) 提取故障特征, 仿真比较表明, 该方法行波检测效果比小波变换和希尔伯特-黄变换更佳。

文中针对同杆双回线路行波测距中的两个关键问题给出了有效的解决办法, 将上述方法与双端行波测距算法相结合应用于故障定位, 仿真结果证明了该方法的正确性和测距准确性。

1 同杆双回线路故障行波传播特性分析

1.1 相模变换

同杆双回线路结构紧凑, 各相导线间耦合情况复杂, 存在跨线故障的可能性, 故障类型多达 120 种, 在故障分类中单回线故障比例在 80% 以上。研究发现, 发生跨线故障时, 仅利用故障相的行波一般可以实现精确定位; 但在单回线路故障情况下, 采用故障相的行波进行定位误差较大^[19]。输电线路行波故障分析时, 采用传统相模变换矩阵不能使用单一模量表征所有故障类型下的故障行波特征, 故障行波需根据故障选线结果选取, 过程复杂。文献[20]针对单回输电线路, 利用均匀换位下相模变换矩阵的数学模型, 推导出一种新的相模变换矩阵, 采用该矩阵进行相模变换后的线模分量在所有故障类型下均为非 0 值, 即使用单一线模量可反映故障行波。文献[21]将上述理论推广应用到同杆双回线路, 得到一种新的相模变换矩阵, 如式(1)所示。

$$S^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, 由于 0 元素的存在, 可将同杆双回线路下的故障行波选取问题转换成单回线路下的故障行波选取问题, 从而可以降低故障行波选取的复杂程度。

1.2 多模分量传播特性分析

采用式(1)进行相模变换后, 同杆双回线路 6 相故障电流与 6 个模分量之间的关系如式(2)。

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{IA} + I_{IB} + I_{IC} + I_{IIA} + I_{IIB} + I_{IIC} \\ I_{IA} + I_{IB} + I_{IC} - I_{IIA} - I_{IIB} - I_{IIC} \\ I_{IA} + 2I_{IB} - 3I_{IC} + 0 + 0 + 0 \\ I_{IA} - 3I_{IB} + 2I_{IC} + 0 + 0 + 0 \\ 0 + 0 + 0 + I_{IIA} + 2I_{IIB} - 3I_{IIC} \\ 0 + 0 + 0 + I_{IIA} - 3I_{IIB} + 2I_{IIC} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $I_{IA} - I_{IIC}$ 为 6 相故障电流向量; $I_0 - I_5$ 为 6 个电流模分量。

由式(2)可知, 6 个模分量的传输特性如下: 电流 0 模、1 模分量在双回线路之间传播, 电流 2 模和 3 模分量、4 模和 5 模分量分别在两个单回线路的三相导线上传播。电流 2 模、3 模、4 模和 5 模分量可以反映跨线故障也能反映单回线路故障。I 回线发生单回线故障时, 电流 4 模和 5 模分量等于 0; II 回线发生单回线故障时, 电流 2 模和 3 模分量等于 0。发生跨线故障时, 电流 2 模、3 模、4 模和 5 模分量均不为 0。根据上述分析, 可以判断故障的类型: 跨线故障或单回线路故障, 进而选取一线模分量来表征故障特征行波。以 I 回线 A 相为基准的电流故障行波如表 1 所示。

表 1 结果表明, 在 I 回线发生单回线故障和跨线故障情况下, 电流 2 模和 3 模分量均不为 0, 选取两者中的任一模量均可作为故障特征行波。同理, II 回线路发生故障时, 可选用电流 4 模或 5 模分量作为故障特征行波。采用式(1)相模变换后, 模分量遵循一定的传播规律, 因此, 可选用某一分量表征故障特征行波, 解决了同杆双回线路行波测距的故障行波选取困难的问题。

表 1 不同故障类型下的电流故障行波

故障类型	边界条件	模 2	模 3
I Ag	$i_{fb}=i_{fc}=i_{fd}=i_{fn}=0$	i_{fa}	i_{fa}
I AB	$i_{fb}=-i_{fb}, i_{fc}=i_{fd}=i_{fn}=0$	i_{fb}	$4i_{fa}$
I ABg	$i_{fc}=i_{fd}=i_{fn}=0$	$i_{fb}+2i_{fb}$	$i_{fb}-3i_{fb}$
I ABC	$i_{fb}+i_{fb}+i_{fc}=0, i_{fd}=i_{fn}=0$	$i_{fb}+2i_{fb}-3i_{fc}$	$i_{fb}-3i_{fb}+2i_{fc}$
I A II A	$i_{fa}=-i_{fb}, i_{fb}=i_{fc}=i_{fn}=0$	i_{fa}	i_{fa}
I Ag II Ag	$i_{fb}=i_{fc}=i_{fn}=0$	i_{fa}	i_{fa}
I A II AB	$i_{fb}+i_{fd}+i_{fc}=0, i_{fb}=i_{fn}=0$	i_{fa}	i_{fa}
I A II ABC	$i_{fb}+i_{fd}+i_{fn}=0, i_{fb}=i_{fc}=0$	i_{fa}	i_{fa}
I AB II A	$i_{fb}+i_{fb}+i_{fd}=0, i_{fc}=i_{fn}=0$	$i_{fb}+2i_{fb}$	$i_{fb}-3i_{fb}$
I AB II AB	$i_{fb}+i_{fb}+i_{fd}+i_{fc}=0, i_{fn}=0$	$i_{fb}+2i_{fb}$	$i_{fb}-3i_{fb}$
I AB II ABC	$i_{fb}+i_{fb}+i_{fd}+i_{fn}=0, i_{fc}=0$	$i_{fb}+2i_{fb}$	$i_{fb}-3i_{fb}$

注: ABC 代表 I、II 回路的三相; g 表示接地

2 故障行波信号检测方法

2.1 VMD 原理与算法

变分模态分解(VMD)是一种新的信号处理方法,获取 IMF 分量时采用迭代搜寻变分模型最优解来确定每个分量的频率中心及带宽,避免了 EMD 和 LMD 等递归模式分解过程中的模态混叠、相近频率分量区分难和采样频率影响等缺点^[22-24],其分解过程涉及经典维纳滤波、希尔伯特变换和频率混合等,信号局部特征明显,噪声鲁棒性更好^[25-26]。

变分模态分解包括变分约束问题的构造和求解。若信号分解成 K 个 IMF 分量,则约束变分模型构造成式(3)。

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_k u_k = f$$

式中: $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$ 为分解的 K 个 IMF 分量; $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 为各分量的中心频率。

引入二次惩罚因子 α 和 Lagrange 乘法算子 $\lambda(t)$, 可将约束性变分问题转换成非约束性变分问题。非约束性变分问题的最优解计算步骤如下:

- (1) 初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$, $\{\omega_k^1\}$, $\{\hat{\lambda}^1\}$ 和 $n=0$;
- (2) $n=n+1$, 执行循环;
- (3) $k=1: K$, $\omega \geq 0$, 根据式(4)、式(5)分别更新 \hat{u}_k 和 ω_k 。

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) \leftarrow \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (4)$$

$$\omega_k^{n+1} \leftarrow \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

(4) 根据式(6)更新 $\hat{\lambda}$;

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{f}(\omega) - \sum \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (6)$$

(5) 重复步骤(3) — (5), 当满足条件 $\sum_k \|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2 / \|u_k^n\|_2^2 < \varepsilon$, 迭代结束, 得到 K 个 IMF 分量。

2.2 Teager 能量算子^[27-28]

Teager 能量算子(TEO)是美国科学家 H.M.Teager 在研究非线性语音建模时提出的一种信号分析算法,它是一种非线性算子,能够准确描述单分量信号幅值和频率的变化,在语音信号、图像处理等领域已有广泛应用。Teager 能量算子计算量小,可以很好地反映信号的奇异性特征,能实时跟踪被测信号的波形变化。

对于连续信号 $s(t)$, 其能量算子定义为

$$\psi[s(t)] = s'^2(t) - s(t)s''(t) \quad (7)$$

式中, $s'(t)$ 、 $s''(t)$ 为 $s(t)$ 的一阶、二阶导数。

对于离散信号, 能量算子定义为

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (8)$$

变分模态分解信号分解真实性好, Teager 能量算子对单分量信号实时跟踪效果明显, 利用二者的运算特点可用于故障行波的检测。

2.3 VMD 的参数优化设置

模态个数和惩罚因子是影响变分模态分解的两个重要参数。在进行信号变分模态分解前需要预先设置模态分量个数 K 和惩罚因子 α , K 值影响模态分量信号的波形, 惩罚因子 α 越小, 分解得到的模态分量的带宽越大, 反之, 带宽越小。为获取含有丰富特征信息的信号分量, 分别设置模态分量个数 K 和惩罚因子 α 的参数值, 以期达到信号 VMD 分解的最优效果。

输电线路发生单相接地短路时, 采样频率为 1 MHz, 取故障后 2 ms 的电流线模分量进行 VMD 分解, 模态个数和惩罚因子取不同值时的分解效果如图 1—图 4 所示。

从以上 VMD 分解结果看, VMD 去噪效果好, 能够提取出故障高频成分。图 1 中高频分量信号中故障信息表现的不够明显。图 2 中高频分量信号故障信息比较清晰, 能够较好地反映故障信号的变化。因此, 取 $K=4$ 比较合适。从图 2、图 3 和图 4 中发现, 惩罚因子取值不同, 模态信号的带宽和收敛速度不同, 模态信号在波形上存在较大的差别。

故障行波信号有用信息通常包含在高频模态分量内, 避免造成信号特征信息的丢失, 取惩罚因子值为 2000 较佳。因此, 通过 VMD 参数优化设置, 取 $K=4$, $\alpha=2000$ 信号分解效果最优。

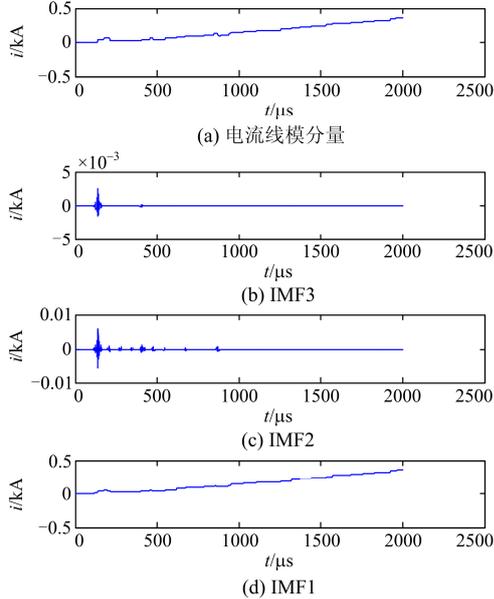


图 1 $K=3$, $\alpha=2000$ 时的 VMD 分解结果

Fig. 1 Decomposition results of VMD when $K=3$ and $\alpha=2000$

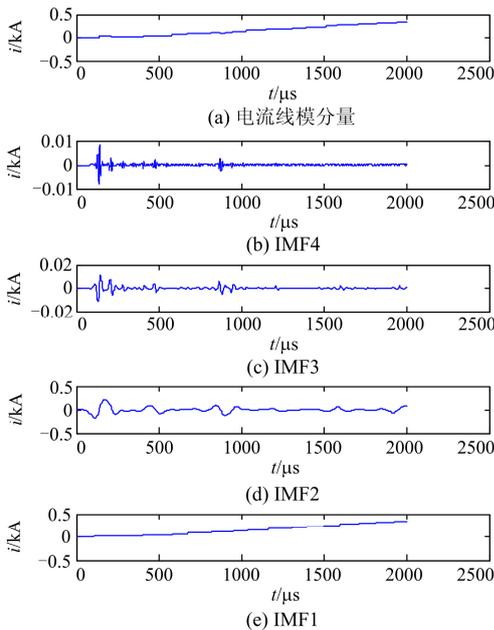


图 2 $K=4$, $\alpha=2000$ 时的 VMD 分解结果

Fig. 2 Decomposition results of VMD when $K=4$ and $\alpha=2000$

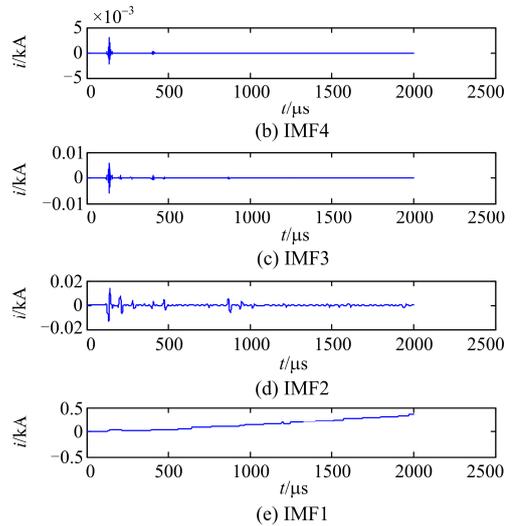
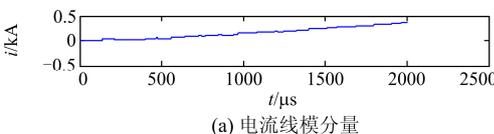


图 3 $K=4$, $\alpha=1000$ 时的 VMD 分解结果

Fig. 3 Decomposition results of VMD when $K=4$ and $\alpha=1000$

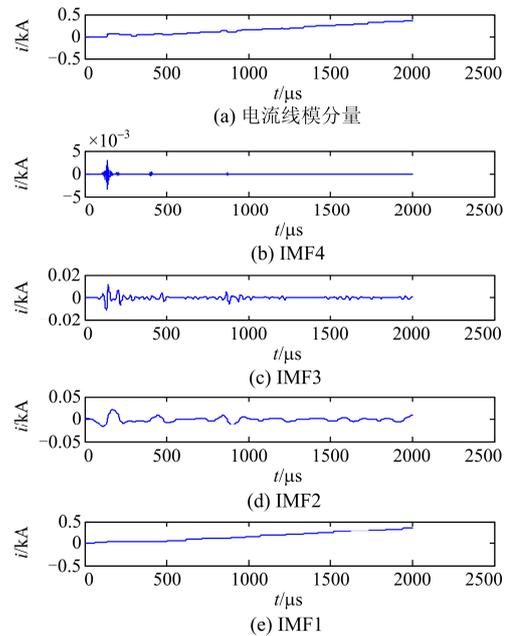


图 4 $K=4$, $\alpha=3000$ 时的 VMD 分解结果

Fig. 4 Decomposition results of VMD when $K=4$ and $\alpha=3000$

2.4 不同检测方法的检测效果对比

分别采用小波变换、Hilbert-Huang 变换方法和 VMD-TEO 方法检测上述故障行波信号, 比较检测效果。采用小波变换模极大值方法的检测结果如图 5 所示; 采用 Hilbert-Huang 变换方法检测结果如图 6 所示。设 $K=4$, $\alpha=2000$, 采用基于 VMD-TEO 的行波检测方法, 计算 IMF4 分量的 Teager 能量值, 检测结果如图 7 所示。

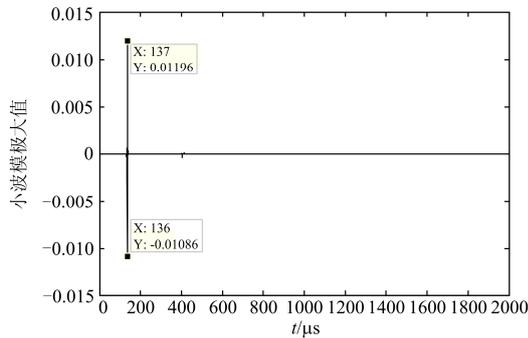


图 5 小波变换模极大值

Fig. 5 Modulus maxima of wavelet transform

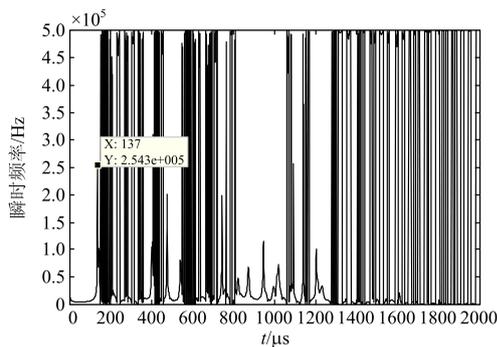


图 6 希尔伯特-黄变换检测结果

Fig. 6 Detection results of Hilbert-Huang transform

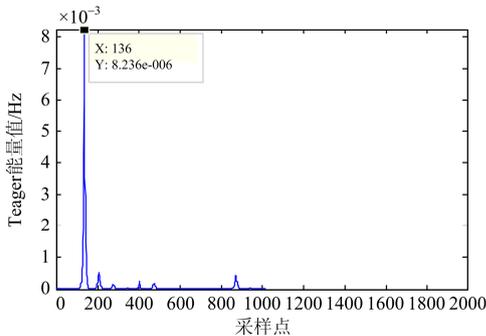


图 7 VMD-TEO 的检测结果

Fig. 7 Detection results of VMD-TEO

采用小波变换模极大值进行信号奇异性检测时,图 5 中出现 2 个检测结果: $t=136 \mu\text{s}$ 或 $t=137 \mu\text{s}$, 在取值时,需要对故障行浪涌进行辨识,取值不当必然会人为增大定位误差。

Hilbert-Huang 变换方法分解过程存在技术缺陷,当分解信号不是单分量信号时,其时-频图上存在无法检测到故障行浪涌的可能性,在图 6 中,初始行浪涌到达时刻分辨比较困难,检查精度无法保证。

图 7 中 Teager 能量曲线上的波峰值与 IMF4 波形的奇异性是一一对应的,最先到达测量点的行波

浪涌幅值最大,即故障初始行波浪涌到达测量点的时刻,对应时间 $t=136 \mu\text{s}$,图中清晰可见。随着行波在线路中的反射、折射,将会出现波形的畸变,并伴随着能量衰减,后续的行波浪涌的能量值相对值明显变小。

通过比较可知,基于 VMD 和 TEO 的行波检测方法相对其他两种方法行波浪涌时间分辨率高,检测效果较好。在仿真分析中,进一步对该行波检测方法的进行验证。

3 同塔双回线路行波测距流程

故障发生后,首先提取故障信号,经相模变换后确定故障行波,然后采取参数优化的变分模态分解进行信号处理,计算高频分量信号的 Teager 能量值,即可标定出故障初始行波到达检测点的时刻。最后采用双端行波测距方法进行故障定位计算。输电线路双端行波测距公式如下。

$$\begin{cases} d_{Mf} = \frac{L + v(t_M - t_N)}{2} \\ d_{Nf} = \frac{L + v(t_N - t_M)}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_{Mf} 、 d_{Nf} 为故障点到母线 M、N 两侧的距离; L 为线路全长; v 为波速,取光速; t_M 和 t_N 为故障初始行波浪涌到达线路两侧测量点的时间。

采用基于 VMD-TEO 行波检测的故障测距方法流程图如图 8 所示。

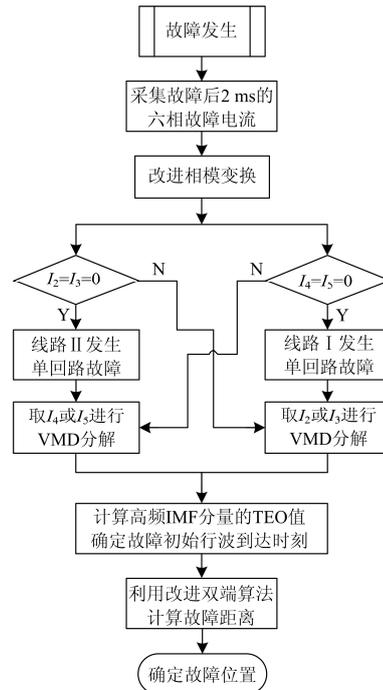


图 8 定位流程图

Fig. 8 Fault location diagram

4 仿真分析

以政平—宜兴的 500 kV 同塔紧凑型双回线路为例, 采用 PSCAD/EMTDC 搭建输电线路模型, 同杆双回线路仿真模型如图 9 所示, 线路采用分布参数模型, 全长 88 km, 双端电源供电。

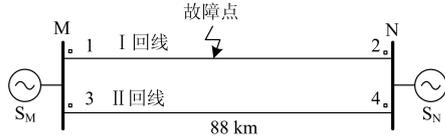


图 9 同塔双回线路仿真模型

Fig. 9 Simulation model of double circuit line on same tower

两侧系统参数: $Z_{m1}=j60.00 \Omega$, $Z_{m0}=j46.80 \Omega$; $Z_{n1}=j45.20 \Omega$, $Z_{n0}=j22.01 \Omega$ 。同塔双回线路布置如图 10 所示, 每回线路三相导线呈倒三角排列, 相导线间距为 6.7 m, 每相采用 6 根 LGJ-240/30 等六边形排列, 六边形的边长为 375 mm。线路的正序参数如下: $R_1=0.022 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.201 \Omega/\text{km}$, $C_1=17.7 \text{ nF}/\text{km}^{[3,28]}$; 零序参数: $R_0=0.2189 \Omega/\text{km}$, $L_0=0.635 38 \Omega/\text{km}$, $C_0=1.3178 \text{ nF}/\text{km}$ 。

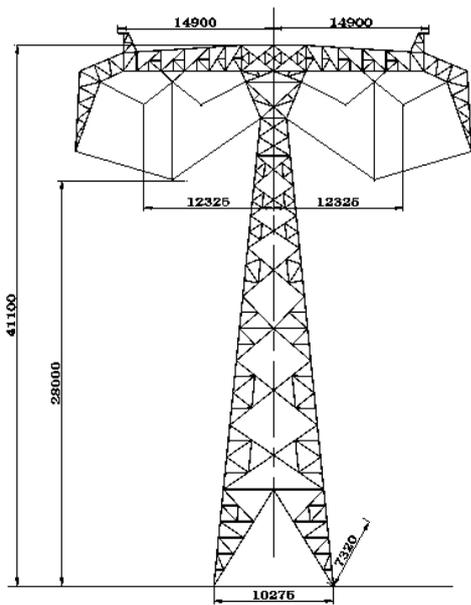


图 10 500 kV 同塔双回线路布置图

Fig. 10 Layout of 500 kV double circuit line on same tower

在不同的故障类型、故障位置、过渡电阻等条件采用 PSCAD 仿真, 采样频率 2 MHz, 对采集到的数据进行 Matlab 编程处理。距 M 侧 30 km 处 I 回线路 A 相接地短路时的测量点故障前后 1 个周期的电流波形如图 11 所示。

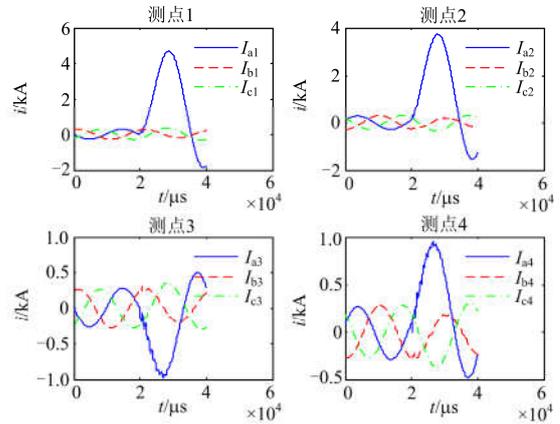


图 11 I 回线路 A 相接地短路时的电流波形

Fig. 11 Current waveform of A-phase short circuit occurring on I transmission line

四个不同测点处的电流波形如图中所示, 当 I 回线路发生 A 相接地短路时, 该回线路两侧得到的故障相电流明显变大, 由于线路间互感的作用, I 回线路中非故障相和 II 回线路中三相都会产生波动, 其中 II 线路中 A 相电流变化明显。取两侧 6 相电流进行去工频处理, 经相模变换, 选取故障特征行波: 电流 2 模分量, 故障电流行波及其 Teager 能量曲线如图 12、图 13 所示。文中所给的故障距离均以 M 侧为起点, 故障数据窗长度取 2 ms。

在图 12、图 13 中 Teager 能量曲线上可以清楚地标识故障初始行波到达 M、N 侧的时刻, 分别对应采样点: 203 和 389。依据双端行波故障测距算法可以计算出故障位置 30.05 km, 误差为 0.05 km, 误差在一个档距内, 测距结果比较理想。不同过渡电阻值和故障点位置时的计算结果如表 2 所示。

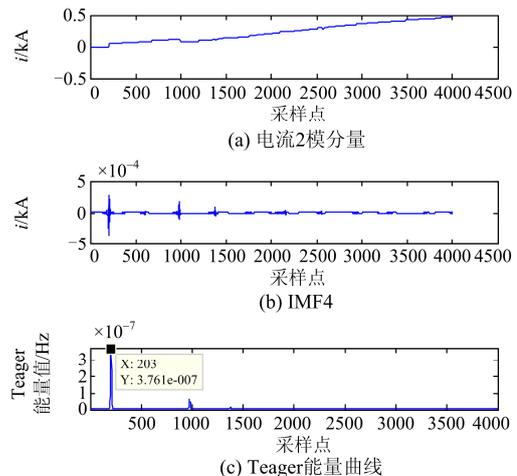


图 12 M 侧电流故障特征波形及其 Teager 能量曲线

Fig. 12 Current fault feature waveform and its Teager energy curve of M side

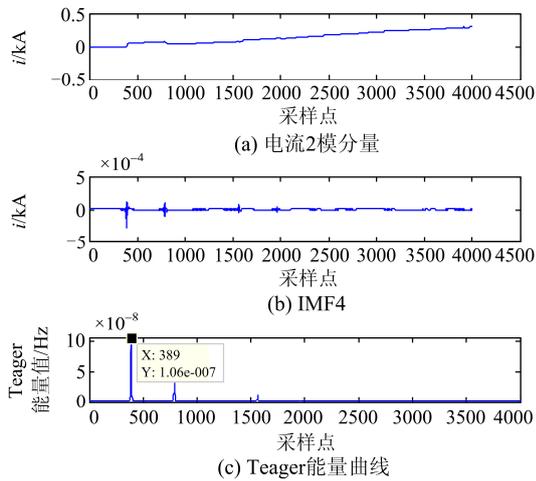


图 13 N 侧电流故障特征波形及其 Teager 能量曲线
Fig. 13 Current fault feature waveform and its Teager energy curve of N side

由表 2 中数据可知，同杆双回线路进行行波故障测距时，行波波头检测结果不受故障时过渡电阻大小的影响。采用新的相模变换和行波检测方法能够准确标定出故障初始行波波头到达线路两侧检测点的时刻，故障测距结果最大误差为 0.125 km，测距结果比较准确。

表 2 I 回线路 A 相接地短路故障时的测距结果
Table 2 Location results of A short circuit occurring on I transmission line

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	t_M	t_N	测距结果/km	误差/km
30	50	203	389	30.05	0.05
	100	203	389	30.05	0.05
	200	203	389	30.05	0.05
45	50	304	290	45.05	0.05
	100	304	290	45.05	0.05
	200	304	290	45.05	0.05
60	50	405	190	60.125	0.125
	100	405	190	60.125	0.125
	200	405	190	60.125	0.125

同理，为了验证方法的可行性和测距准确性，分别在上述三个故障点位置，针对不同故障类型进行仿真计算，测距结果如表 3 所示。

表 3 中数据表明，测距结果不受故障类型的影响，误差相对较小，误差均在一个档距之内，符合工程实际需要。仿真结果表明，文中所提的行波故障测距方法具有可行性，定位结果准确性较高。

表 3 故障类型不同时的测距结果

Table 3 Location results of different fault types

故障位置/km	故障类型	t_M	t_N	测距结果/km	误差/km
30	I AB	202	389	29.975	-0.025
	I ABg	202	389	29.975	-0.025
	I ABCg	202	389	29.975	-0.025
	I A II A	203	388	30.125	0.125
	I A II AB	202	389	29.975	-0.025
	I A II BC	202	389	29.975	-0.025
45	I AB II C	202	389	29.975	-0.025
	I AB	302	289	44.975	-0.025
	I ABg	302	289	44.975	-0.025
	I ABCg	302	289	44.975	-0.025
	I A II A	304	290	45.050	0.050
	I A II AB	302	289	44.975	-0.025
60	I A II BC	302	289	44.975	-0.025
	I AB II C	302	289	44.975	-0.025
	I AB	402	189	59.975	-0.025
	I ABg	402	189	59.975	-0.025
	I ABCg	402	189	59.975	-0.025
	I A II A	405	190	60.125	0.125
60	I A II AB	402	189	59.975	-0.025
	I A II BC	402	189	59.975	-0.025
	I AB II C	402	189	59.975	-0.025

5 结论

(1) 同杆双回线路 6 相故障电流采用传统相模变换后的 6 个模分量传播特性差异较大，通过引入一种新的相模变换矩阵，能够找出多模分量的传播规律，解决了故障行波选取的问题，降低了行波测距的难度。

(2) 通过优化变分模态分解的参数值可以得到较好的分解效果，将变分模态分解和 Teager 能量算子相结合应用于故障行波检测。仿真比较，该检测方法相比小波方法、希尔伯特变换方法时间分辨率高，行波检测效果更好。

(3) 大量的仿真结果表明，解决同杆双回线路故障行波的选取问题和采用新的行波检测方法，可以简化行波测距的计算过程，提高故障定位精度，具有较好的实用价值。下一步研究行波测距的优化算法来减少定位误差。

参考文献

[1] 潘靖, 易辉, 陈柏超. 中国紧凑型与同塔双回输电现状与展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 25-27.

- PAN Jing, YI Hui, CHEN Baichao. Current situation and prospect of compact line and double circuit on same tower in china[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 25-27.
- [2] 康小宁, 梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述[J]. 继电器, 2004, 32(23): 72-76.
- KANG Xiaoning, LIANG Zhenfeng. Survey on the protective relaying and autoreclosure for double-circuit lines on the same pole[J]. Relay, 2004, 32(23): 72-76.
- [3] 索南加乐, 宋国兵, 许庆强, 等. 利用两端非同步电流的同杆双回线故障定位研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 99-106.
- SUONAN Jiale, SONG Guobing, XU Qingqiang, et al. Fault location algorithms for parallel transmission lines using two terminals nonsynchronized current data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 99-106.
- [4] 邹浩, 于仲安, 吴彪, 等. 同塔四回输电线路双端故障测距实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 111-116.
- ZOU Hao, YU Zhongan, WU Biao, et al. A new method of fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 111-116.
- [5] SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2396-2406.
- [6] LI Shengfang, FAN Chunju, YU Weiyong, et al. A new phase measurement unit (PMU) based on fault location algorithm for double circuit lines[C] //2004 8th Developments in Power System Protection, IEE International Conference, April 5-8, 2004, Amsterdam, Holland: 188-191.
- [7] MAZON A J, MINAMBRES J F, ZORROZUA M A, et al. New method of fault location on double-circuit two-terminal transmission lines[J]. Electric Power System Research, 1995, 35(3): 213-219.
- [8] 杨博, 卫志农, 王华芳, 等. 基于不对称分布参数的同杆双回线双端故障测距算法[J]. 继电器, 2005, 33(5): 8-11.
- YANG Bo, WEI Zhinong, WANG Fanghua, et al. Two-terminal fault locating algorithm for double-circuit lines on same tower based on distributed parameter model using asymmetrical parameter[J]. Relay, 2005, 33(5): 8-11.
- [9] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [10] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
- QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [11] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
- ZHENG Zhou, LÜ Yanping, WANG Jie, et al. A new two terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [12] 黄子俊, 陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-13.
- HUANG Zijun, CHEN Yunping. Non-communication fault locating of transmission line based on wavelet modulus maxima[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-13.
- [13] 徐俊明, 汪芳宗, 尹星, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的行波法高压输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 88-93.
- XU Junming, WANG Fangzong, YIN Xing, et al. A traveling wave fault location method for high voltage power transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 88-93.
- [14] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
- ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [15] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.
- YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [16] 肖文龙, 王维博, 刘勇, 等. 基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 90-96.
- XIAO Wenlong, WANG Weibo, LIU Yong, et al.

- Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 90-96.
- [17] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
- LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [18] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-68.
- ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [19] 覃剑, 黄震, 邱宇峰, 等. 基于小波变换的同杆双回线路双端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51-55.
- QIN Jian, HUANG Zhen, QIU Yufeng, et al. Wavelet transform based double terminal method of traveling wave fault location in double-circuit parallel transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 51-55.
- [20] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.
- SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60.
- [21] 束洪春, 刘振松, 彭仕欣. 耦合双回线路电弧故障测距的新相模变换方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 480-486.
- SHU Hongchun, LIU Zhensong, PENG Shixin. Locating arc faults on coupling two parallel transmission lines using the novel phase-model transformation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 480-486.
- [22] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault location of High-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [23] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [24] DRAGOMIRETSKIY K, ZOZZO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [25] ANEESH C, KUMAR S, HISHAM P M, et al. Performance comparison of variational mode decomposition over empirical wavelet transform for the classification of power quality disturbances using support vector machine[J]. Procedia Computer Science, 2015, 46: 372-380.
- [26] TEAGER H M. Some observations on oral air flow during phonation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1980, 28(5): 599-601.
- [27] MARAGOS P, KAISER J F, QUATIERI T F. Energy separation in signal modulations with applications to speech analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10): 3024-3051.
- [28] 舒印彪, 赵丞华. 研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 49-51, 74.
- SHU Yinbiao, ZHAO Chenghua. Study and implementation of 500 kV compact power transmission line with double circuits on a same tower in China[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 49-51, 74.

收稿日期: 2017-02-11; 修回日期: 2017-04-10

作者简介:

闫红艳(1980—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断; E-mail: yhyan118@126.com

高艳丰(1979—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、电力系统运行分析和控制。E-mail: gaoyanfeng01@126.com

(编辑 张爱琴)