

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181363

一种小电流接地系统故障行波精确定位方法

赵海龙^{1,2}, 陈钦柱^{1,2}, 梁亚峰², 庞松岭^{1,2}

(1. 海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海南 海口 570311;
2. 海南省电网理化分析重点实验室, 海南 海口 570311)

摘要: 针对小电流接地系统单相接地故障定位中行波波头难以检测的问题, 并且对于当前检测方法中希尔伯特黄检测方法中存在模态混叠、计算效率不高和小波检测方法中小波基选择困难和计算量大等问题, 提出一种基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)和 Teager 能量算子(Teager Energy Operator, TEO)的单端行波测距方法。该方法能够较好地检测行波波头, 并且能大大降低计算复杂度。通过设置对故障测距定位的影响因素, 在 ATP-EMTP 与 Matlab 综合仿真下验证了方法的可靠性。仿真研究表明此方法进行线路测距定位可靠性好、准确度高。

关键词: 配电线路; 单端行波测距; VMD; 行波检测; TEO

A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system

ZHAO Hailong^{1,2}, CHEN Qinzhu^{1,2}, LIANG Yafeng², PANG Songling^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Corporation, Haikou 570311, China;
2. Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis for Electric Power of Hainan Province, Haikou 570311, China)

Abstract: In view of the problem that it is difficult to detect traveling wave head in fault localization of single-phase grounding of small current grounding system, and for the current detection method of Hilbert yellow, there are some problems such as mode mixing, low computational efficiency, difficulty in selecting medium and small wave basis of wavelet detection method and large computational amount. Based on Variational Mode Decomposition (VMD) and Teager Energy Operator (TEO), a single-end traveling-wave ranging method is proposed. This method can detect the traveling wave head and reduce the computational complexity greatly. The reliability of the method is verified by the comprehensive simulation of ATP-EMTP and Matlab. The simulation results show that this method has good reliability and high accuracy.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2013BAA01B03) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 073000KK52180005).

Key words: distribution network; single-terminal traveling wave location method; VMD; traveling wave detection; TEO

0 引言

随着社会经济发展和电力市场的逐步放开, 建设“自愈、安全、经济、清洁”的坚强智能电网, 提供优质的电力与服务尤为重要。小电流接地系统线路结构复杂, 线路的管理维护工作量大, 查找故障费时费力, 因此对线路故障定位装置有迫切需求, 但现有的配网故障监测装置普遍存在接地故障判断

不可靠、不具备精确定位功能、供电不可靠, 尤其是线路下游负荷不足时无法工作的问题。为了配电自动化系统的需要和坚强智能电网加快建设, 需要在故障后, 迅速确定故障点位置, 恢复系统的稳定运行状态。

目前对于配电线路行波故障定位技术的研究大都处于理论研究方面, 而应用在配电网小电流接地系统的行波精确故障定位技术基本属于空白。对于单相接地故障的故障精确定位难度大, 对于线路较短、配网分支复杂、电缆与架空线路混合等情况难以准确定位^[1-3], 现有的行波装置信号获取困难,

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAA01B03); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(073000KK52180005)

故障数据不能批量上传,不同监测点信号不能精确同步,线路负荷不足时设备无法可靠工作正常检测等问题一直影响定位装置的发展。

行波故障定位由于自身结构和独特的运行特点,在配电网中研究较少,存在一些问题没有很好地解决,实际测距结果准确性不高。行波法故障定位技术^[4-6]的关键在于行波到达时刻的检测,因此行波波头能否准确检测将直接影响行波故障定位法的定位精度。而单端行波测距法有着成本低、实时性高等诸多优势,所以本文采取一种单端行波测距法^[7-9],在小电流接地系统上行波波头的检测方法进行了研究,以解决线路故障定位难度大的难题。

小波变换^[10-11]的行波检测方法,用于检测行波到达测量点的时刻具有很大优势,但是对小波基函数和分解尺度的选取有较高的要求,而且选择合适的小波基函数和分解尺度必须根据具体的信号来分析,否则,行波波头检测的效果不太理想;希尔伯特-黄变换^[12-15]行波检测方法,在实际应用中有一定的优势,但是其方法理论上存在一定的缺陷,存在着模态混叠现象、过包络和欠包络等问题,因此会在一定程度上影响测距定位的准确性。

变分模态分解^[16]是一种自适应信号处理新方法,具有很好的采样效应。Teager 能量算子^[17-18]是一种非线性差分算子,具有运算量小、对信号的瞬时变化具有良好自适应能力、时间分辨率高和算法效率高等优势。

在输电系统中,文献[19]利用 VMD 和 Teager 能量算子对输电线路的故障进行双端行波测距,查找故障点;文献[20]基于 VMD 和 Teager 能量算子对于输电线路雷击故障进行了双端测距研究,查找雷击点。而在配电网小电流接地系统中,由于配网线路复杂、故障多样,目前基于 VMD-TEO 的小电流接地系统单端行波测距方法还尚未在配网中得到应用。

本文根据 VMD 和 TEO 能量算子的优势特征和传统方法的问题,提出了一种基于 VMD 和 TEO 能量算子的单端行波测距定位方法。设置不同的故障影响因素,通过 ATP-EMTP 与 Matlab 综合仿真验证方法的准确性。大量仿真数据证明,基于 VMD-TEO 的检测方法测距准确度高、方法可靠性好。

1 单端行波检测方法

1.1 变分模态分解原理

通过变分模态分解^[17-21],将信号分解为 k 个模态函数 $u_k(t)$,对应的约束变分模型表达式为

$$\min_{\{u_k\},\{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

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

式中: $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_k\}$ 为分解得到的 k 个 IMF 分量; $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ 为各分量的中心频率。

引入 Lagrange 乘法算子 $\lambda(t)$ 和二次惩罚因子 α , 求取最优解。增广 Lagrange 函数表达式为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

运用交替方向乘子算法,求取增广 Lagrange 函数表达式的鞍点,即将原始信号 f 分解成 k 个 IMF 分量。

更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 和 λ^{n+1} 。 u_k^{n+1} 的取值可表述成式(3)所示。

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (3)$$

认为 $\omega_k^n = \omega_k^{n+1}$, 将式(3)转换到频域,如式(4)所示。

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| j\omega \left[(1 + \text{sgn}(\omega + \omega_k)) \hat{u}_k(\omega + \omega_k) \right] \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (4)$$

用 $\omega - \omega_k$ 代替式(4)中的第一项 ω , 则可得

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| j(\omega - \omega_k) \left[(1 + \text{sgn}(\omega)) \hat{u}_k(\omega) \right] \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (5)$$

式(6)为式(5)的非负频率区间积分。

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, u_k \in X} \left\{ \int_0^\infty 4\alpha(\omega - \omega_k)^2 |\hat{u}_k(\omega)|^2 + 2 \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 d\omega \right\} \quad (6)$$

二次优化的解为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{f(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (7)$$

重构信号的带宽表达项为

$$\omega_k^{n+1} = \arg \min_{\omega_k} \left\{ \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\} \quad (8)$$

优化可得

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \arg \min_{\omega_k} \left\{ \int_0^\infty (\omega - \omega_k)^2 |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega \right\} \quad (9)$$

求解, 可得

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (10)$$

1.2 VMD 算法步骤

(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(7)更新 \hat{u}_k :

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{f(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (11)$$

根据式(10)更新 ω_k :

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (12)$$

(4) $k=k+1$, 重复步骤(3), 直至 $k=K$ 结束;

(5) 根据式(11)更新 λ :

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{f}(\omega) - \sum_k u_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (13)$$

(6) 重复步骤(2)至步骤(5), 若满足:

$$\sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < \varepsilon \quad (14)$$

则迭代结束, 得到 K 个 IMF 分量。

1.3 Teager 能量算子

Teager 能量算子^[22-23]是一种信号分析算法。运算量小, 对信号的瞬时变化具有良好的自适应能力、时间分辨率高和算法效率高。

对于连续信号 $s(t)$, 其能量算子定义为

$$\psi[s(t)] = s'^2(t) - s(t)s''(t) \quad (15)$$

式中, $s'(t)$ 、 $s''(t)$ 为一阶、二阶导数。

对于离散信号 $s(n)$, 能量算子定义为

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (16)$$

1.4 VMD 和 TEO 相结合的波头检测方法

波头检测方法的主要步骤:

(1) 采集故障后的母线处 M 端 A、B、C 三相暂态电流行波信号;

(2) 凯伦贝尔相模变换, 得到电流行波线模分量;

(3) 利用 VMD 对电流行波线模分量进行分解, 分解成 K 个 IMF 分量;

(4) 选取 IMF 分量中的高频模态分量分析;

(5) 计算选取 IMF 分量的 Teager 能量值;

(6) 通过 Teager 能量谱, 可得到故障行波到达时刻。

2 行波单相接地测距仿真研究

2.1 仿真模型建立

模型采用 6 条架空出线的 10 kV 配电网馈线系统, 得到目标行波后使用 Matlab 对其进行数学变换, 分析变换后的波形。由于行波特征不受中性点接地方式的影响, 则本文仿真模型采用经消弧线圈接地系统, 即图 1 中开关 K 闭合时。在 ATP-EMTP 下进行 10 kV 配电网馈线系统的单相接地故障仿真模拟。

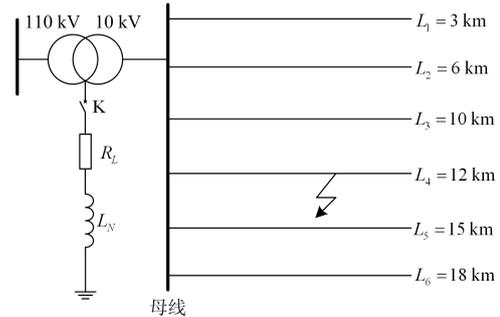


图 1 某 6 条出线的 10 kV 配电网馈线系统

Fig. 1 A 6 out of 10 kV distribution network feeder system

10 kV 配电网馈线系统仿真模型采用文献[24]提供的线路参数, 该系统的仿真模型如图 1 所示。

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

参数类型	$r/(\Omega/\text{km})$	$x/(\Omega/\text{km})$	$b/(\text{S}/\text{km})$
正序参数	0.17	0.38	3.045×10^{-6}
零序参数	0.23	1.72	1.884×10^{-6}

采样频率的高低影响着测距的准确度, 则在制作装置设备时应尽可能地提高采样率来减少测量误差^[21]。10 kV 系统仿真模型采用 10 MHz 的采样率, 采用稳定接地故障, 其接地电阻设为 2Ω , 故障时

刻在 0.02 s, 在第 4 条线路上设置单相接地故障。

由于线路三相之间存在耦合关系, Karenbauer 变换可以用于解除耦合关系。

根据 Karenbauer 变换, 暂态行波可以分解为零模分量和线模分量, 其表达式为

$$\begin{cases} I_0 = (I_A + I_B + I_C)/3 \\ I_\alpha = (I_A - I_B)/3 \\ I_\beta = (I_A - I_C)/3 \end{cases} \quad (17)$$

式中: I_α 、 I_β 为线模分量; I_0 为零模分量。

本文选用的是电流行波 α (线模) 分量。在母线 M 端处检测三相电流暂态行波, 根据 Karenbauer 变换将暂态行波分解为电流行波 α (线模) 分量。

2.2 VMD 参数设置

设定 VMD 参数: 惩罚因子 $\delta = 2000$, $\tau = 0$, 取模态个数 K 为 3, 图 2 为故障时接地电阻 2Ω 时系统 M 侧三相电流行波波形, 图 3 为电流行波线模分量, 图 4 为输入信号和输出信号频谱图, 图 5 为 VMD 的分解结果。

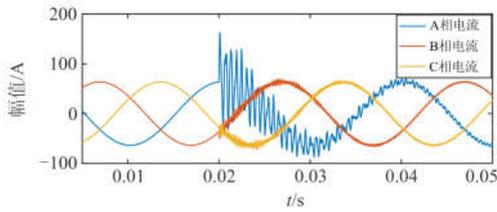


图 2 M 侧三相电流行波波形

Fig. 2 Three-phase current waveform on M side

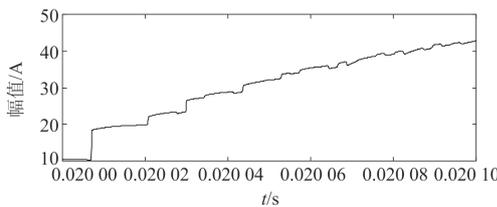


图 3 电流行波线模分量

Fig. 3 Current traveling wave module weight

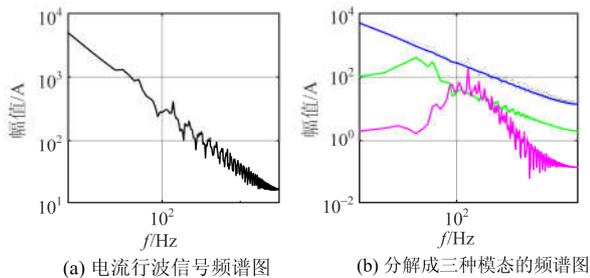


图 4 输入信号和输出信号频谱

Fig. 4 Input signal and output signal spectrum

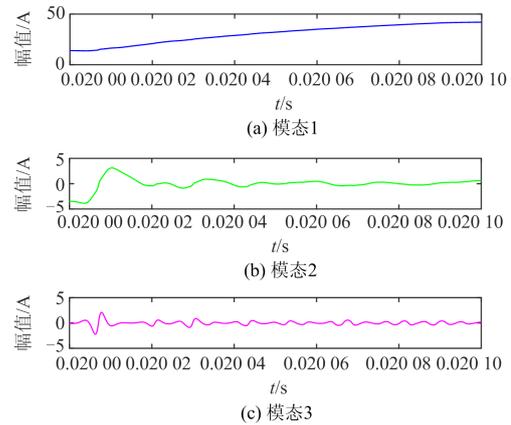


图 5 $K=3$ 时的 VMD 分解结果

Fig. 5 VMD decomposition results when $K = 3$

VMD 算法将信号分解成了 3 个不同的 IMF 分量, 执行效果较好, 中频信号和趋势项的模态混叠少, 每个模态围绕着其各自的中心频率。

2.3 故障特征提取

由于系统线路故障信息主要包含在高频分量中, 则本文采用 IMF3 来计算 Teager 能量值。

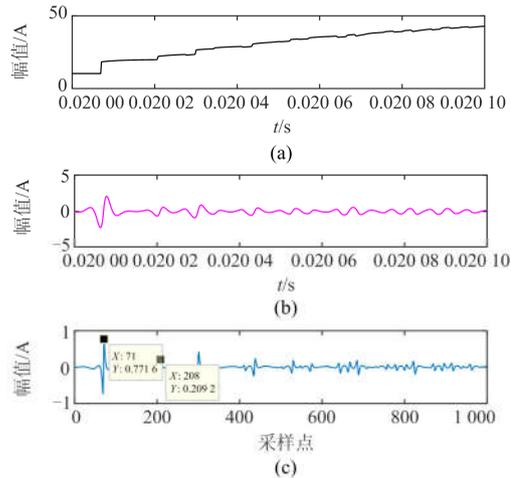


图 6 M 侧电流行波线模分量、IMF3 分量及 Teager 瞬时能量谱

Fig. 6 Modulus quantity α , IMF3 and its Teager energy curve

从图 6 中可看出, Teager 能量曲线上的波峰值与 IMF3 波形的奇异性是一一对应的, 则可以很好地检测出故障电流行波到达测量点的时刻, 对应时间分别为 71 和 209。根据单端行波测距法公式求得定位距离为 2.014 8 km, 误差为 14.8 m, 精确度较高。

3 仿真实例分析

为验证本文所提方法的正确性, 利用 ATP-EMTP 软件搭建小电流接地系统配网线路模型, 模拟不同接地故障类型进行仿真验证, 取故障波形进行数据

分析。

3.1 过渡电阻的影响

图 7 分别是接地电阻为 $2\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 、 $2\ 000\ \Omega$ 下的故障电流线模分量。

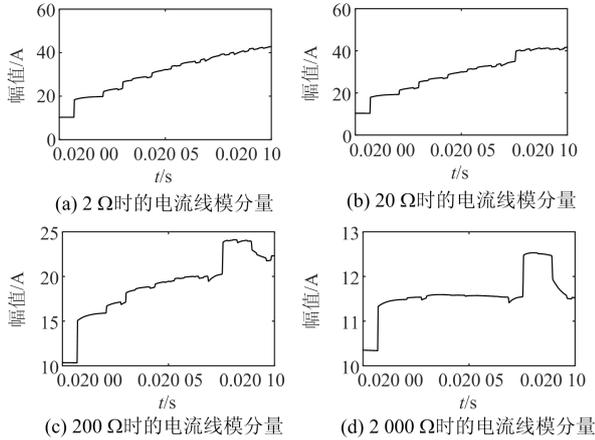


图 7 过渡电阻不同时的电流行波线模分量

Fig. 7 Current resistance of the parallel current traveling wave component

从图 7 的波形可以看出, 过渡电阻越大, 到达检测点的行波幅值衰减会越大, 波头幅值减小, 对波头的检测可能造成困难, 会对测距造成一定的影响。

针对上述问题, 分别对接地电阻为 $2\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 、 $2\ 000\ \Omega$ 的故障电流线模分量进行行波波头检测仿真, 研究不同的过渡电阻对行波测距的影响。

在故障 $2\ \text{km}$ 处, 故障过渡电阻 $200\ \Omega$ 时, 在此条件下电流行波线模分量、模态 3 和 Teager 瞬时能量谱如图 8 所示。

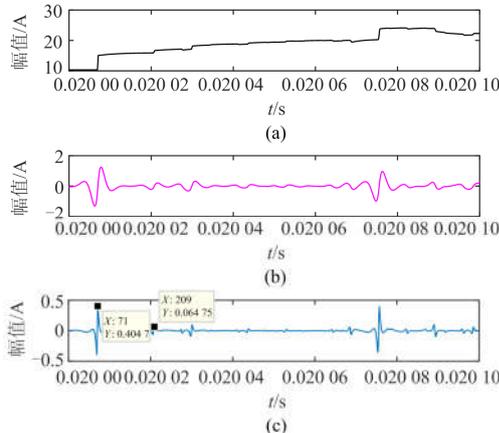


图 8 M 侧电流行波线模分量、IMF3 分量及 Teager 瞬时能量谱

Fig. 8 Modulus quantity α , IMF3 and its Teager energy curve

从图 8 的波形可以看到, 故障电流行波到达测量点时, 对应的采样点为 71 和 209, 依据行波测距算法可以计算出故障点在距离母线位置为 $2.014\ 8\ \text{km}$ 、误差为 $0.014\ 8\ \text{km}$ 时, 测距比较准确。

同理, 对不同的故障过渡电阻值进行仿真, 得到的结果如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻下的测距结果

Table 2 Distance measurement results under different transition resistors

过渡电阻/ Ω	初始行波时刻/ μs	反射行波时刻/ μs	测距/ km	误差/ $\%$	结果
2	71	209	2.014 8	0.74	成功
20	71	209	2.014 8	0.74	成功
200	71	209	2.014 8	0.74	成功
2 000	71	—	—	—	失败

注: “—”表示没有明显结果, 后文表格中同理。

通过上面分析可知, 当过渡电阻较大时, 模极大值的检测失效, 这是由于其中检测行波的反射分量在电阻较大时反射行波较弱。

因此, 上述表明线模分量的定位效果受到系统中过渡电阻大小的影响, 并且仿真表明, 系统中初始行波的到达时刻可以进行检测, 而反射行波受到故障电阻的影响, 在接地电阻为 $2\ 000\ \Omega$ 时检测波头失败。这时需要考虑与其他测距方法结合来进行测距分析。

从表 2 的数据结果分析可知, 行波测距结果在阻抗幅度较大范围内变化时, 测距结果可靠性好, 则可知此方法基本不受过渡电阻的影响。

3.2 初相角的影响

设置系统中的初相角分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 下发生单相接地故障进行仿真验证, 其对比图如图 9 所示。

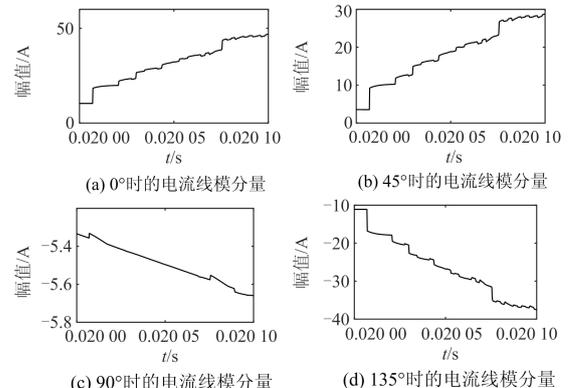


图 9 初相角不同时的电流行波线模分量

Fig. 9 Current of the current traveling wave component at the initial phase angle

从图 9 的波形可以看出, 不同的初相角导致行波数值大小变化。

故障初相角为 45° 时, 离故障 2 km 处, 在此条件下电流线模分量、模态 3 和 Teager 瞬时能量谱如图 10 所示。

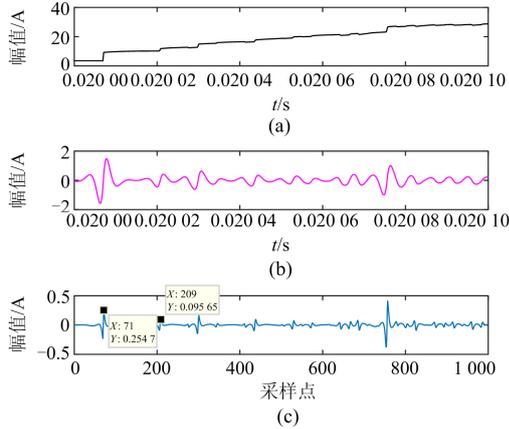


图 10 M 侧电流行波线模分量、IMF3 分量及 Teager 瞬时能量谱

Fig. 10 Modulus quantity α , IMF3 and its Teager energy curve

从图 10 的波形可以清楚看到, 故障行波到达测量点对应的采样点为 71 和 209, 可以计算出故障点距离母线位置为 2.014 8 km、误差为 0.014 8 km 时, 测距比较准确。

故障初相角分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 时的仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同初相角下的测距结果

Table 3 Ranging results at different initial angles

初相角	初始行波时刻/ μs	反射行波时刻/ μs	测距/km	误差/%	结果
0°	71	209	2.014 8	0.74	成功
45°	71	209	2.014 8	0.74	成功
90°	71	—	—	—	成功
135°	71	209	2.014 8	0.74	失败
180°	71	209	2.014 8	0.74	成功

在电压过零时, 也就是初相角为 90° 时(电源采用余弦函数, 即电压为零时), 此时行波信号几乎检测不到, 导致测距失败, 但在电压过零或接近零时的故障为小概率事件, 不影响方法的正确性, 这时可采用其他方法联合测距。

从表 3 的数据结果分析可知, 行波测距结果在 $0\sim 180^\circ$ 内变化时, 测距结果可靠性好, 则可知此方法基本不受初相角的影响。

3.3 不同故障距离的影响

单端行波测距法的两个参数, 即时间参数和速

度参数, 影响着故障点距离测量点长度的准确度。为验证方法的正确性, 针对不同故障点位置进行仿真, 设置系统中的故障距离点分别为 2 km、4 km、6 km、8 km、10 km。

图 11 分别是故障接地距离为 2 km、4 km、6 km、8 km 的故障电流行波线模分量。

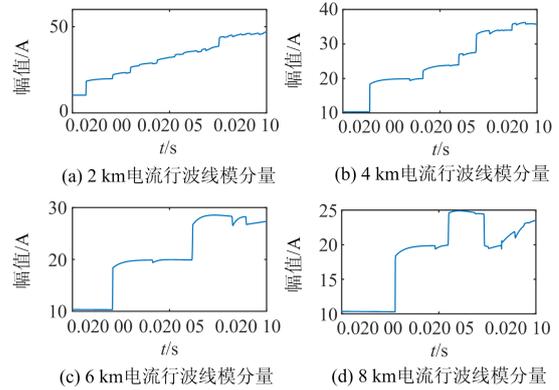


图 11 故障距离不同时的电流行波线模分量

Fig. 11 Current traveling wave component with different fault distance

以故障距离为 4 km 为例, 在此条件下, 故障行波电流线模分量、模态 3 分量和 Teager 瞬时能量谱如图 12 所示。

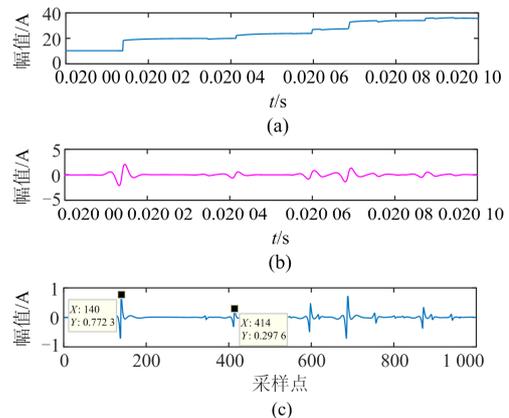


图 12 M 侧电流行波线模分量、IMF3 分量及 Teager 能量谱

从图 12 的波形可以看到, 故障电流行波到达测量点时, 对应的时刻为 140 和 414, 计算出故障点在线路距离上的位置为 4.000 4 km、误差为 0.000 4 km 时, 测距比较准确。

同理, 故障距离不同时仿真得到的结果如表 4 所示, 系统中的设置故障距离点分别为 2 km、4 km、6 km、8 km、10 km。

从表 4 中数据结果分析可知, 行波测距结果在故障点位置不同时, 测距结果误差均较小, 由此验

证了此方法基本不受故障点位置的影响, 定位准确度较高。

表 4 不同故障距离下的测距结果

不同距离/km	初始行波时刻/ μs	反射行波时刻/ μs	测距/km	误差/%	结果
2	71	209	2.014 8	0.74	成功
4	140	414	4.004	0	成功
6	208	620	6.015 2	0.25	成功
8	277	824	7.986 2	0.17	成功
10	345	1 031	10.015 6	0.16	成功

从 VMD-TEO 的行波测距方法可以看出, 故障时频率突变明显, 证明 VMD-TEO 方法能够很好地刻划相应时刻的频率, 可以很好地标定行波到达时刻, 可靠性好。

4 行波检测方法的比较

小波变换的行波检测方法对于行波信号的检测有很大优势, 但选择合适的小波基函数和分解尺度必须根据具体的信号来分析。

VMD 可以很好地反映信号的奇异性特征, TEO 可准确描述单分量信号幅值和频率的变化, 具有很小的运算量, 适用于信号的实时检测处理。表 5 为两种行波检测方法的对比。

表 5 两种行波检测方法的对比

检测方法	小波函数	VMD-TEO
变量	尺度, 小波的位置	时间, 瞬时频率
分析信息	时域窄(时域宽)的小波分解提供好的时间(频率)局部化性质	迭代确定每个 IMF 的中心频率及带宽
适应信号	非平稳信号	非平稳信号、平稳信号
基函数	小波基函数	无
分析函数	小波函数的伸缩改变其窗口大小	采用 VMD 分解, 从数据本身出发

图 13 和图 14 分别为电流行波线模分量进行 db4 小波变换和 db6 小波变换的分解结果。

对电流行波 α 模分量进行小波变换分解, 选用的小波基函数为 db4 和 db6, 并对小波变换尺度进行两层分解与重构。从分解结果看, 该方法可以很好地检测到故障行波的到达时刻。

从上述对比分析可知, 小波变换的行波检测方法在同一小波基不同分解尺度下的分解结果不一样。而 VMD-TEO 方法只需采用最高频模态记录行波到达测量点时刻, 克服了小波基和分解尺度选取的困难, 且计算量小对于行波检测具有很大的优势。

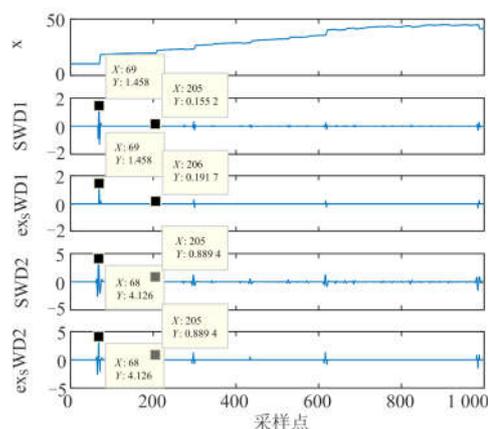


图 13 电流行波的 db4 小波分解结果

Fig. 13 db4 wavelet decomposition results of electric popular wave

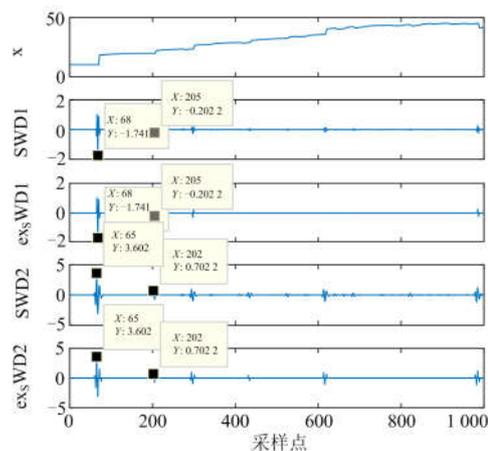


图 14 电流行波的 db6 小波分解结果

Fig. 14 db6 wavelet decomposition results of electric popular wave

对比 EMD 分解方法, 仿真结果得出 VMD 不论在频率检测、频率分离, 还是噪声的鲁棒性方面都有明显优势, 且克服了 EMD 分解方法中的模态混叠现象。TEO 适用于信号的实时检测处理, 能解决希尔伯特变换计算效率低的问题。

本文提出的 VMD-TEO 单端行波方法仅需采用 VMD 分解出的最高频模态, 记录行波到达时刻, 克服了小波理论中小波基函数和分解尺度选取困难的问题, 且计算量小, 对于希尔伯特-黄变换中存在模态混叠现象、过包络和欠包络等问题具有显著的克服, 可知, 此方法对于行波检测具有很大的优势。

VMD 算法通过模态分解在理论中可以识别检测到反射行波的到达时刻, 但是在实际运行系统中要考虑信号采样的误差或噪声等问题的影响, 这就需要在 Teager 能量值检测过程中对于数值较低的信

号进行过滤, 本文采用检测程序, 以初始行波为基础, 将小于第一个反射行波 10% 的 Teager 能量值过滤掉, 以保证系统正常的运作过程中可以实现行波时刻的检测。

Teager 能量曲线上的波峰值与 IMF3 波形的奇异性是一一对应的, 互感器及数据中心对采样数据产生的误差会使定位产生一定的误差。在制作装置设备时应尽可能地提高采样率, 避免互感器及数据中心对采样产生的误差, 则本文所用的方法可以很好地检测出故障电流行波到达测量点的时刻, 定位可靠。

5 结论

(1) 对于当前检测方法中希尔伯特黄检测方法存在模态混叠、计算效率不高和小波检测方法中小波基选择困难和计算量大等问题。提出了一种基于变分模态分解和 Teager 能量算子的配电网小电流接地系统单端行波测距定位方法。并介绍了 VMD 算法和 Teager 能量算子的特点。

(2) 本文利用 ATP-EMTP 仿真模拟了 10 kV 小电流接地系统的单相接地故障短路类型, 并利用 Matlab 进行了算法编程研究, 通过 VMD 和 Teager 能量算子的单端行波测距方法确定故障线路发生故障的准确时刻, 并进行故障定位, 数据结果证明了此方法可靠性好。

(3) 对不同过渡电阻、故障初相角及故障位置等故障情况进行大量数据仿真研究, 表明了本文的方法进行线路测距准确度高、可靠性好。

参考文献

- [1] 宋金钊, 李永丽, 石峥, 等. 一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 9-15.
SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, et al. A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 9-15.
- [2] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [3] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [4] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 121-127.
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127.
- [5] 张峰, 梁军, 李建超, 等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 108-113.
ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113.
- [6] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [7] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [8] XI C, CHEN Q, WANG L. A single-terminal traveling wave fault location method for VSC-HVDC transmission lines based on S-transform[C] // Power and Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 1-6.
- [9] 何晓, 雷勇, 周聪聪, 等. 消除零模波速影响的配电网单端行波故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 39-45.
HE Xiao, LEI Yong, ZHOU Congcong, et al. A single-terminal fault location algorithm in distribution network for eliminating the effect of the velocity of zero-mode traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 39-45.
- [10] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yaonan, HUO Bailin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.

- [11] 方必武, 刘涤尘, 王波, 等. 基于小波变换和改进萤火虫算法优化 LSSVM 的短期风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 37-43.
FANG Biwu, LIU Dichen, WANG Bo, et al. Short-term wind speed forecasting based on WD-CFA-LSSVM model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 37-43.
- [12] 张小丽. 基于希尔伯特-黄变换的输电线路故障行波定位与保护方法[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
ZHANG Xiaoli. Fault location and protection methods using Hilbert-Huang transform of traveling waves for transmission lines[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.
- [13] 艾颖梅, 陈剑云, 何军娜, 等. 基于三端法的 HHT 行波故障测距研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(21): 11-16.
AI Yingmei, CHEN Jianyun, HE Junna, et al. HHT traveling wave fault location method based on the study of the three and method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(21): 11-16.
- [14] 卜伶俐, 郭建英, 蒋凤林. 小波分析与 Hilbert 分析在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008, 13(2): 82-85.
BU Lingli, GUO Jianying, JIANG Fenglin. Application of wavelet analysis and Hilbert analysis to rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Harbin University of Science & Technology, 2008, 13(2): 82-85.
- [15] 鞠默欣. 基于 HHT 小电流接地故障选线与在线故障测距方法[D]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
JU Moxin. An HHT based method of fault line selection and online fault location in neutral point ineffectively grounded power system[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2015.
- [16] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [17] 马增强, 李亚超, 刘政, 等. 基于变分模态分解和 Teager 能量算子的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 134-139.
MA Zengqiang, LI Yachao, LIU Zheng, et al. Rolling bearings fault feature extraction based on variational mode decomposition and Teager energy operator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 134-139.
- [18] 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[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [19] 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 locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [20] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [21] WANG Y, MARKERT R, XIANG J, et al. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 60-61: 243-251.
- [22] SUN G, CHEN T, WEI Z, et al. A carbon price forecasting model based on variational mode decomposition and spiking neural networks[J]. Energies, 2016, 9(1): 54.
- [23] 王天金, 冯志鹏, 郝如江, 等. 基于 Teager 能量算子的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 1-5.
WANG Tianjin, FENG Zhipeng, HAO Rujiang, et al. fault diagnosis of rolling element bearings based on Teager energy operator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 1-5.
- [24] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

收稿日期: 2018-11-02; 修回日期: 2019-01-16

作者简介:

赵海龙(1988—), 男, 工程师, 工学硕士, 助理技术专家, 研究方向为输电线路故障研判、防雷技术。

(编辑 许威)