

DOI: 10.7667/PSPC180071

不依赖时间同步的多支配网故障精确定位方案研究

张雪松¹, 徐琛¹, 马啸², 王子璇², 林达¹, 林湘宁², 李正天²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为在不借助时间同步的前提下实现多支配网故障精确定位的目标, 提出一种故障定段与行波测距相结合的方法。针对由线路参数频变特性引起的行波色散效应, 设计了一种有效的低通滤波器, 提取出零模、线模行波中以工频为主的、速度稳定的低频分量, 进而实现了基于单端量行波测距的故障精确定位。针对由离散采样机制引起的截断误差问题, 提出了一种改进修正算法, 在各种系统采样率下均可充分提高故障测距精度。通过PSCAD/EMTDC仿真平台, 计及线路参数的频变特性, 搭建典型10 kV多支配网模型, 验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词: 配网; 故障定位; 行波; 色散; 改进截断误差修正算法

Research on the precise fault location scheme for distribution network with multiple branches independent of time synchronization

ZHANG Xuesong¹, XU Chen¹, MA Xiao², WANG Zixuan², LIN Da¹, LIN Xiangning², LI Zhengtian²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To figure out the fault location precisely independent of time synchronization in the distribution network with multiple branches, a novel method combining fault section locator and traveling-wave based fault locator is presented in this paper. In view of the wave dispersion effect caused by the frequency variation of the line parameters, the low frequency component of ground mode and aerial mode traveling wave is extracted by low-pass filter, then the fault distance is calculated based on the stable velocity difference between the low frequency components. In addition, aiming at eliminating the truncation error caused by the discrete sampling mechanism, through the improved correction algorithm proposed, the fault location accuracy can be improved fully under various system sampling rates. Finally, a typical 10 kV distribution network model is built in the PSCAD/EMTDC simulation platform, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100).

Key words: distribution network; fault location; travelling waves; dispersion; improved truncation error correction algorithm

0 引言

近年来, 配电网故障定位研究受到越来越多的关注, 国内外学者就此提出了诸多方法, 主要包括

阻抗法、注入信号法以及行波法等^[1-2]。其中, 基于行波理论的故障定位方法, 可分为单端法与双端法两类, 由于其不受故障类型、过渡电阻以及中性点接地方式的影响^[3-5], 因而具有广阔的应用前景。

传统的双端行波测距方法对双端时间同步以及通信的要求较高, 不能较好地适应配电网多分支的特点^[6-7]。为此, 有学者提出将双端法扩展为多端法, 即在各分支线上均配置行波检测装置^[8-9]。然而,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903100); 国网浙江省电力公司科技项目(5211DS16001V); 东莞市引进创新科研团队计划资助(201536000200036)

此类方法仍然严重依赖于较高的时间同步精度, 而且应用成本也极为高昂。因此, 需要寻找更为经济有效的故障定位方法。

事实上, 现在配网多装有故障指示器, 可以通过故障指示器提供的信号, 借助先进信号处理工具, 实现故障的准确定段。在此基础上, 再辅以恰当的单端行波测距方法, 计算出故障点到测距装置所处的距离。结合两者提供的信息, 即可在多支配网中实现对故障点唯一且精确的辨识。

传统的单端行波测距方法一般通过检测初始波头和反射波头的到达时间差来实现故障定位的目标^[10-11]。此类方法原理简单, 可靠性高, 但对于多分支的复杂结构网络, 反射波头到达时刻的精确辨别非常困难。为克服传统单端测距方法的上述不足, 文献[12-13]提出利用零模和线模行波的传播时间差来计算故障点距离。此类方法在应用于长输电线时, 具有一定的可行性。

由于线路参数频变特性引起的故障行波色散效应^[14], 特别是零模行波不同频率分量的波速度存在较大的离散性, 当故障行波传播距离很长时, 零模行波中的高频分量将充分衰减, 残存下来的是波速度相对稳定的工频分量; 而对线模行波而言, 在较宽的频带内, 其传播速度均较为稳定, 且接近光速。因此, 当故障点距离测距装置所在处较远时, 直接基于零模和线模行波的传播时间差能较为准确地求出故障点距离。但是, 如果故障点距离测距装置所在处较近, 当行波到达测距装置时, 零模行波中仍存在一定比例的高频分量, 其传播速度与线模行波接近, 导致故障测距结果几乎不可用。试想设计一个合适的低通滤波器, 提取出零模、线模行波中有效的工频分量, 则上述方法仍不失为一种非常经济实用的单端测距方法。

此外, 必须指出任何行波测距原理的精度均受限于离散采样机制固有的截断效应。为此, 文献[15]对行波测距的截断误差进行了分析, 并提出一种波头校正算法。但是, 当系统采样率充分提高以后, 此时波头附近采样点导数值已十分接近, 该方法的修正作用有待进一步提高。

综上, 针对我国配网多分支的复杂结构, 本文提出一种故障定段与行波测距相结合的方法, 有效实现了配网故障精确定位的目标。首先, 根据全网电流高频分量的极性差异, 确定故障所在线路区段; 在此基础上, 对首端行波检测装置捕获的故障暂态行波信号进行相模变换, 再通过低通滤波提取出以工频为主的低频分量, 以削弱零模波速不稳定带来的不利影响; 进一步地, 基于本文所提改进型截断

误差修正算法, 充分减小行波波头的识别误差; 最后, 根据零模-线模波速差测距公式, 计算出故障点至首端的距离, 并结合前述故障定段结果, 即可得出故障点的具体位置。仿真结果表明, 本文所提方法可以有效提高故障定位的精度。

1 基于电流高频特征识别的故障定段算法

针对配网单相接地故障定段问题, 实际上已经有了比较好的解决方案。文献[16]提出了一种新型配电网故障区段定位搜索算法。该方案不依赖于各级馈线处零序电流的获取, 且无需额外硬件投资, 具有较强的可实施性。

假设在某一馈线上发生单相接地故障, 故障点上游、下游的零序等效网络如图 1 所示。

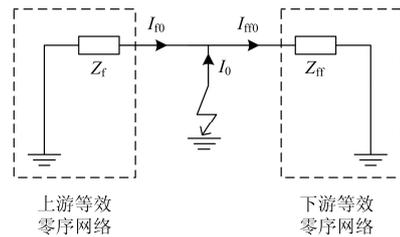


图 1 故障支路分析等效零序网络

Fig. 1 Equivalent zero-sequence network for the faulty feeder analysis

在图 1 所示零序电流正方向下, 故障点上游及下游的故障相电流分别为 I 、 I' , 即^[16]

$$\begin{cases} I = I_{\text{Load}} - (C_{f0} + 2)I_0 \\ I' = I_{\text{Load}} + C_{fr0}I_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{Load} 为负荷电流; C_{f0} 与 C_{fr0} 分别为故障点上游、下游的零序电流分配系数; I_0 为接地点的零序电流。

由式(1)可知, I 、 I' 的第一项分量表示正常运行时的负荷电流, 频率为工频 50 Hz; I 、 I' 的第二项分量则为以零序电流表示的故障分量, 在发生接地故障的初始阶段, 主要由暂态电容电流决定, 其频率一般在 300~1 500 Hz 之间。因此, 可认为 I 、 I' 的第二项分量即代表了单相接地故障发生后的暂态高频分量, 两者呈现出显著的极性差异, 从而可由全网分布的故障指示器加以提取, 实现故障区段的可靠识别, 基本步骤如下:

- 1) 单相接地故障发生后, 由低电压元件选出故障相。
- 2) 装设在母线(包括下级母线)出口处的各故障指示器对采样到的故障相电流进行小波分解, 获取对象尺度中的模极大值极性。
- 3) 对全网各故障指示器的极性识别结果进行

集中比较,若某条线路上主馈线(即第一级馈线)及其下级馈线的极性全部相同,则可判定为非故障线路;若出现下级线路的极性与主馈线不同的情况,则初步判断故障发生在此线路上,并以该条线路的主馈线模极大值极性为参考,比对下级各线路极性,直到出现与主馈线极性相反的第 X 级馈线为止,即说明故障发生在第 $X-1$ 级馈线上。

2 基于零模-线模波速差的行波测距算法

2.1 线路频变参数对行波传播的影响

传统的基于零模-线模波速差的故障测距方法往往未能深入计及输电线路参数的频变特性,而事实上,文献[17]指出,由于导线和大地在交变电磁场下的趋肤效应,输电线路的电感将随电流频率而变化,输电线路的电容则不随频率变化。此外,随着频率的增大,正序电感仅略有减小,而零序电感则衰减明显。以我国 10 kV 配电网常见的杆塔模型为例(具体参数见图 2),其单位长度正序、零序电感随频率变化的曲线,如图 3 所示。

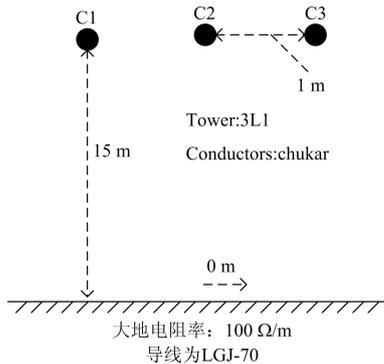


图 2 10 kV 配电网杆塔模型

Fig. 2 Tower model of transmission line in the 10 kV distribution network

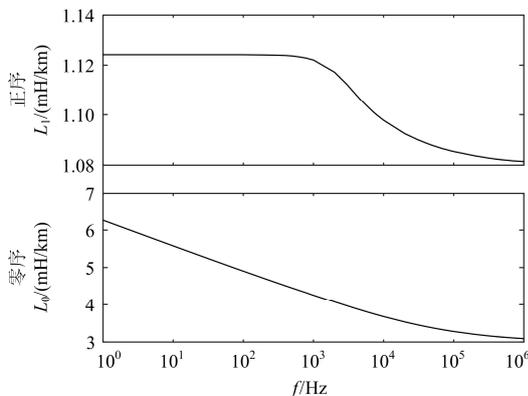


图 3 配网线路电感参数频变特性

Fig. 3 Frequency variation characteristics of the inductance parameters of the feeder line

计及线路参数的频变特性后,频域方程中的电感应表示为频率的函数,相应的波速度公式如式(2)所示。

$$v(\omega) = \frac{1}{\sqrt{L(\omega)C}} \quad (2)$$

由于线路的线模参数与正序参数相同,零模参数与零序参数相同^[18-19]。根据式(2),并结合图 3 所示馈线参数频变特性,则可得出线模、零模不同频率分量的波速度曲线,如图 4 所示。

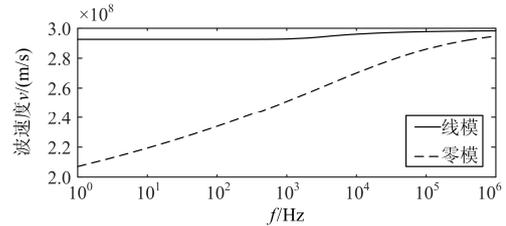


图 4 零模-线模波速度曲线

Fig. 4 Velocity of ground-mode component and aerial mode component

图 4 表明,对于线模、零模行波中的低频分量,两者波速度差异显著,以 50 Hz 为例,线模波速度为 2.926×10^8 m/s、零模波速度为 2.293×10^8 m/s;但是,随着频率的升高,两者波速度差异迅速减小,以 1 MHz 为例,线模波速度为 2.983×10^8 m/s、零模波速度为 2.947×10^8 m/s。由此可见,当故障行波中包含了较丰富的高频成分时,零模行波的波速度实际上与线模行波的波速度相差无几。因此,在应用基于零模-线模波速差的行波测距原理时,为避免线路参数频变特性的不利影响,需要对两种行波模量中的高频成分进行有效滤除。

2.2 前置低通滤波器的设计

为使基于零模-线模波速差的单端定位算法能在线路长度较短的配网中有效发挥作用,必须将信号中的中、高频成分有效滤除,从而彰显两者工频信号到达时刻的差异性。故障测距由于无需特别考虑响应速度,故可采用阶数较高但时窗较长的滤波器,以实现上述目的。常用的低通滤波器主要是无限长单位冲激响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器,主要包括 Butterworth 滤波器和 Chebyshev 滤波器两类^[20]。其中,Butterworth 滤波器具有系数相对简单、零点特性好、稳态检测精度高等优点,适合作为本文所需的前置滤波环节。

由图 4 可知,为使零模、线模行波的波速度保持足够大的差距,低通滤波器的截止频率最好不超过 100 Hz。通过比较不同截止频率和阶数下滤波器的频域特性,综合稳定性、衰减增益等多重要求,

设计了一个 6 阶 Butterworth 滤波器, 相应的性能指标为: 通带边缘频率 $f_c = 60$ Hz, 阻带边缘频率 $f_{st} = 100$ Hz, 通带最大衰减为 1 dB, 阻带最小衰减为 20 dB。该滤波器的幅频响应曲线如图 5 所示。

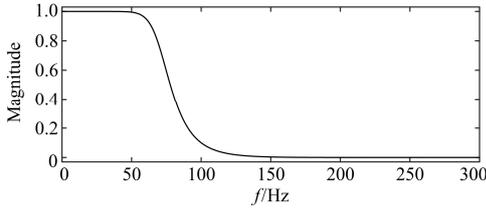


图 5 低通滤波器幅频响应特性

Fig. 5 Magnitude frequency response of low pass filter

2.3 基于波速差的行波测距原理及其改进

如图 6 所示, 在配网某条馈线 M 端装设有行波检测装置, 假设在该线路上 F 点发生一单相接地故障, 造成故障点电压突变, 并由此产生暂态行波, 在故障点与馈线两端之间传播。

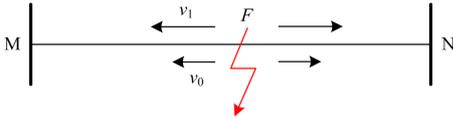


图 6 行波传播示意图

Fig. 6 Travelling wave propagation process

在经过低通滤波器有效滤波后, 通过比较零模和线模行波的初始波头到达检测点的时间差 Δt , 即可由式(3)计算得出故障距离 s 。

$$s = \frac{v_1 v_0}{v_1 - v_0} \Delta t \quad (3)$$

式中, v_1 、 v_0 分别为线模行波、零模行波的波速度。

由于故障点位置往往并不恰好等于采样间隔对应距离的整数倍, 无论采用何种初始波头识别算法, 离散采样机制所导致的截断误差总是难以避免。单个采样间隔的最大可能误差如式(4)所示。

$$e = \frac{v_1 v_0}{v_1 - v_0} T \quad (4)$$

式中, T 为单个采样间隔。

为削弱上述截断误差对故障定位的不利影响, 文献[15]提出一种修正算法, 可以在相对较低的采样率下使得行波测距精度得以较大改善。如图 7 所示, 以微分型波头识别算法为例, 该修正算法假定初始波头 P 真实到达时刻位于最大采样值 A 及其相邻次大采样值 B 对应的采样点 a 、 b 之间, 并认为修正波头导数值 S 与 a 、 b 采样点导数值 A 、 B 近似满足如式(5)所示的线性比例关系。

$$\frac{A}{B} = \frac{1 - \Delta x}{\Delta x} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x = \frac{B}{A + B} \\ S = A + B \end{cases} \quad (5)$$

式中, Δx 为修正波头位置与最大值对应采样点 a 之间的时间间隔。

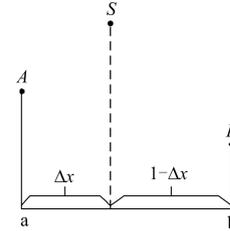


图 7 两点逼近法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of two-point approximation

式(5)所示的修正算法原理简单、计算方便, 在多数情况下可以较好地解决波头到达时刻非采样间隔整数倍引起的截断误差问题, 但是由于故障暂态波过程呈现出复杂的非线性特点, 以及 IED 定间隔采样的规律, 理论上不能排除真实波头 P 恰好出现在求导序列最大值 A 附近或恰为求导序列最大值 A 的可能性, 即 A 与 P 接近重合或完全重合, 如图 8 所示。一旦出现这种情况, 式(5)所示修正算法得出的修正间隔 Δx 反而会人为造成一定的误差。特别是当求导序列最大值 A 和次最大值 B 相近时, 误差甚至接近采样间隔的 1/2。实际上, 在这种情况下, 不修正即直接以最大采样值 A 对应的采样点 a 作为真实波头 P 到达时刻反而是更合适的, 这也是两点逼近法的固有缺陷。

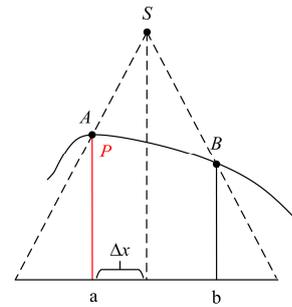
图 8 真实波头与求导序列最大值重合情况下
两点逼近法效果图

Fig. 8 Performance of two-point approximation under the coincidence of the real wave head and the maximum of the derivation sequence

为此, 本文以“三点逼近”代替文献[15]的“两点逼近”, 通过引入“第三点”信息, 即同时利用最大采样值 C 及其相邻次大采样值 A 、 B 对应的 3 个采

样点 c 、 a 、 b ，按照如图9(a)、图9(b)所示的线性比例关系，得出改进修正波头导数值 S' 及其相应的波头到达时刻修正间隔 $\Delta x'$ ，从而改善文献[15]所提修正算法存在的矫枉过正问题。

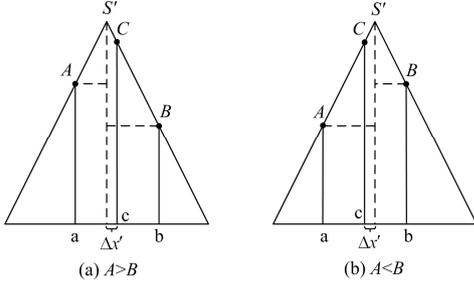


图 9 三点逼近法示意图

Fig. 9 Schematic diagram of three-point approximation

如图9所示，根据次最大采样值 A 、 B 之间的相对大小关系，可分为以下两种情况：

1) 当 $A > B$ 时，如图 9(a)所示，由几何关系可知，改进修正波头 S' 应位于 A 、 C 之间，即有

$$\begin{cases} A + K(1 - \Delta x') = C + K\Delta x' \\ K = C - B \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x' = \frac{A - B}{2(C - B)} \\ S' = C + \frac{A - B}{2} \end{cases} \quad (6)$$

2) 当 $A < B$ 时，如图 9(b)所示，由几何关系可知，改进修正波头 S' 应位于 B 、 C 之间，即有

$$\begin{cases} B + K(1 - \Delta x') = C + K\Delta x' \\ K = C - A \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta x' = \frac{B - A}{2(C - A)} \\ S' = C + \frac{B - A}{2} \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可知，对于真实行波初始波头 P 恰为最大采样值 C 或其附近这一特殊情形，与式(5)所示的修正算法相比，本文所提改进修正算法引入的人为误差将显著缩小。以式(6)所示 $A > B$ 的情况为例，在采样率达到一定程度后，采样值 A 、 B 、 C 的极性将保持一致，此时两种算法得出的修正间隔 Δx 、 $\Delta x'$ 存在以下关系：

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{A}{C + A} = \frac{\frac{C + A}{2} - \frac{C - A}{2}}{C + A} \\ \Delta x' = \frac{A - B}{2(C - B)} = \frac{(A - C) + (C - B)}{2(C - B)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C - A}{C + A} \right) > \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C - A}{C - B} \right) = \Delta x'$$

特别地，当 $A = B$ 时，如图10所示，根据本文所提改进修正算法，不难推知此时 $\Delta x' = 0$ ，改进修正

波头 S' 与最大采样值 C 重合，即直接以最大值对应采样点 c 作为初始波头 P 到达时刻，与真实情况一致。然而，根据文献[15]所提修正算法，由式(5)可知此时 Δx 仍大于0，特别是，当 A 、 B 、 C 三个数值较为接近时，误差将达到采样间隔的一半。

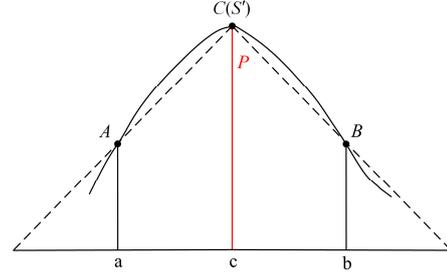


图 10 真实波头与求导序列最大值重合情况下三点逼近法效果图

Fig. 10 Performance of three-point approximation under the coincidence of the real wave head and the maximum of the derivation sequence

对于导数序列最大值并未对应真实波头到达时刻的情况，两种算法均倾向于朝着最大值方向进行修正，两者的修正间隔存在一定差别，但无法从理论上证明，哪种算法更接近实际情况，鉴于行波波头的随机离散性，可以认为此时两种算法的修正效果是相当的。但是，对于导数序列最大值出现在真实波头到达时刻或其附近时，如前所述，本文所提算法将优于文献[15]所提算法，这也是本文工作的意义所在。

3 仿真算例

基于 PSCAD 仿真平台，搭建一个典型的 10 kV 多分支配网依频参数模型，如图 11 所示。其中，在节点 A 处配置有行波测距装置，在各线路首端配置有可识别电流高频特征的故障指示器。如前所述，在故障发生后，首先由各故障指示器集中判断确定故障所在线路，在此基础上结合行波测距结果，即可实现准确的故障定位。

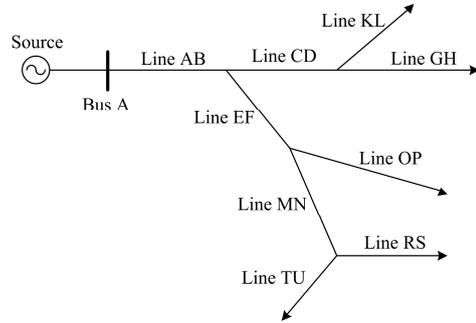


图 11 简化配电网仿真模型

Fig. 11 Simplified distribution network simulation model

各线路长度如表 1 所示。

表 1 各线路长度

Table 1 Length of each line

线路	长度/km	线路	长度/km
AB	30	MN	25
CD	25	OP	17
EF	26	RS	25
GH	28	TU	33
KL	28	—	—

3.1 故障定段算法验证

以线路 MN 中点处(距离首端 A 处 68.5 km)发生单相金属性接地故障为例, 采样频率设为 20 kHz, 经小波 5 层分解后, 选择 D5(312.5~625 Hz)频带作为对象尺度, 各条线路在特征频段内的模极大值如表 2 所示。

表 2 各线路特征频段内的模极大值

Table 2 Characteristic modulus maximum of each line

线路	模极大值	线路	模极大值
AB	-39.56	MN	-46.35
CD	12.73	OP	4.29
EF	-41.27	RS	4.12
GH	4.16	TU	4.33
KL	4.27	—	—

由表 2 数据可知, 线路 AB、EF、MN 极性为负, 其余均为正, 可判定线路 MN 处发生单相接地故障。因此, 文献[16]所提基于相电流高频特征识别的故障定段算法可准确找到故障所在线路区段。在此基础上, 可进一步结合行波测距结果, 最终确定故障位置。

3.2 行波测距算法验证

在 3.1 节相同的故障条件下, 已经确定故障发生在线路 MN 上。通过 A 处行波测距装置捕获到故障暂态行波信号(采样率为 500 kHz), 基于微分算法辨别线模、零模初始波头到达 A 处的时间差, 即可由式(3)计算得出故障点至 A 处的距离。图 12、图 13 分别为原始暂态行波信号和经低通滤波后的暂态行波信号。

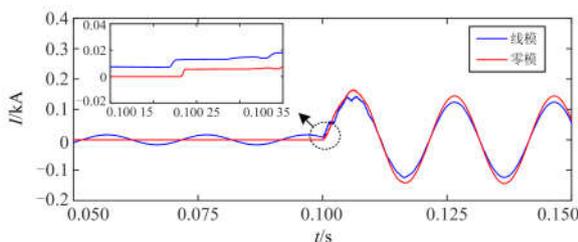


图 12 滤波前暂态电流行波信号

Fig. 12 Transient current traveling wave signal before filtering

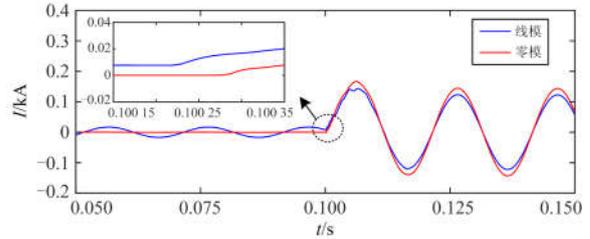


图 13 滤波后暂态电流行波信号

Fig. 13 Transient current traveling wave signal after filtering

由图 12、图 13 对比可知, 原始零模、线模行波信号, 如果不经低通滤波而直接对其求导, 两者差异微乎其微, 导致测距结果误差极大; 而经过低通滤波后, 两者的到达时刻显示出明显的差别。

对于滤波后的行波信号, 其求导后的波形如图 14 所示。图形直观表明, 线模行波波头到达时刻对应于故障后第 114 个采样点, 而零模行波波头到达时刻对应于故障后第 145 个采样点。代入式(3)可算得故障点至测距装置的距离为 65.715 km, 误差为 2.785 km。诚然, 这种误差还不太令人满意, 需要对测距结果进行进一步的修正。

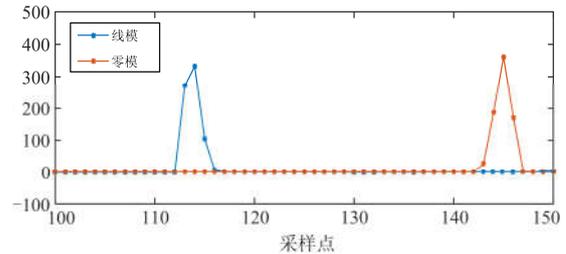


图 14 滤波后暂态电流行波求导

Fig. 14 Derivatives of the current travelling wave after filtering

为此, 进一步应用如式(5)~式(8)所示的改进截断误差修正算法对上述测距结果进行修正。结果为 68.235 km, 误差为 0.265 km。显然, 测距精度有了非常显著的提高。

3.3 截断误差修正算法验证

为充分验证所提修正算法的优越性, 通过在不同线路上设置单相接地故障, 对比未修正截断误差以及分别采用本文所提改进修正算法、文献[15]所提修正算法的故障测距结果, 如表 3 所示。

由表 3 数据可知, 在某些故障场景下, 出现了未修正定位结果精度更高的现象。以 100 kHz 采样率下 RS 故障场景(实际故障距离为 101 km)为例, 未修正定位结果为 100.83 km(相对误差为 0.168%), 文献[15]修正定位结果为 100.71 km(相对误差为 0.287%), 本文修正定位结果为 99.323 km(相对误差为 1.66%)。就这一特定故障场景而言, 经过截断误差

表 3 不同采样率下的故障定位结果

Table 3 Fault location results under different sampling rates

采样率/kHz	故障线路	故障位置/km	实际故障距离/km	计算结果		
				未修正算法/km	修正算法/km	改进的修正算法/km
100	AB	10	10	13.443	9.990	10.307
	CD	12	42	47.052	44.168	41.584
	EF	15	45	47.052	42.907	44.973
	GH	15	70	73.939	68.247	69.132
	KL	10	65	67.217	67.040	65.979
	MN	15	71	67.217	72.316	70.068
	RS	20	101	100.83	100.71	99.323
	TU	11	92	87.383	93.188	90.811
200	AB	10	10	10.083	10.003	10.262
	CD	12	42	43.691	40.994	41.649
	EF	15	45	47.052	44.184	44.815
	GH	15	70	70.578	67.983	69.168
	KL	10	65	63.857	63.956	64.394
	MN	15	71	70.578	70.603	70.684
	RS	20	101	100.83	100.76	100.43
	TU	11	92	90.744	93.522	91.919
500	AB	10	10	9.4104	10.001	9.8173
	CD	12	42	41.675	42.526	41.971
	EF	15	45	44.364	44.657	44.983
	GH	15	70	69.906	69.998	70.068
	KL	10	65	64.529	65.542	64.962
	MN	15	71	71.250	71.188	71.109
	RS	20	101	100.83	100.85	100.97
	TU	11	92	92.760	91.566	92.107
1 000	AB	10	10	10.083	10.005	10.002
	CD	12	42	41.675	42.263	41.963
	EF	15	45	45.036	44.570	44.900
	GH	15	70	69.685	69.871	69.895
	KL	10	65	64.529	65.133	64.957
	MN	15	71	70.578	71.186	70.988
	RS	20	101	100.83	100.84	100.91
	TU	11	92	92.088	92.069	91.987

修正后的定位结果精度反而降低。究其原因，是因为故障暂态波过程呈现出复杂非线性特点，对于某一次特定的单相接地故障而言，截断误差修正算法所基于的线性比例关系可能未能较好地契合真实行波波形变化规律，因此不能保证在任一故障情形下，经过修正的结果一定比未经修正的结果更加精确。但是，从统计意义而言，波头落于单位采样间隔内的概率往往不低，截断误差修正的必要性不容忽视。综合考虑100 kHz 采样率下各种故障情形，对于截断误差未经修正的算法，其故障定位相对误差平均值为8.82%；对于文献[15]所提修正算法，其

故障定位相对误差平均值为2.37%；对于本文所提改进修正算法，其故障定位相对误差平均值为1.39%，最坏情况下的最大绝对误差在1.68 km 之内。以上对比说明，对截断误差进行修正可以极大改善故障测距的精度，并且与文献[15]所提修正算法相比，本文所提改进修正算法的精度更高。

此外，随着采样率的提高，各算法精度均有一定程度的改善。其中，文献[15]所提修正算法在1 000 kHz 下的故障定位相对误差平均值为0.32%，与100 kHz 相比精度提高7倍；本文所提改进修正算法在1 000 kHz 下的故障定位相对误差平均值为0.08%，与100 kHz 相比精度提高17倍。由此可见，在高采样率下，与文献[15]所提修正算法相比，本文所提改进修正算法的优势将更为明显。

4 结论

本文提出了一种故障定段与行波测距相结合的配电网单端测距方案，较好地实现了多分支配网故障定位目标。针对线模-零模波速差测距方案在配电网中难以直接应用的难题，对零模行波的色散现象进行了研究，提出了基于低通滤波器还原两者波速度差的方法。针对离散采样引起的截断误差问题，本文提出一种改进修正算法，使得故障测距误差远小于单一间隔最大可能误差，并且采样率越高，该方法的优势越明显。仿真结果验证了本文所提方案的可行性和优越性。在实际工程采样率有限的条件下，本文所提方法可以进一步改善故障定位精度，具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.
CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.
- [2] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 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, et al. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [3] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 130-136.
LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [4] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混

- 合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.
- LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [5] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.
- TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 杨萃源, 舒勤. 基于线模行波突变的配电网全架空线路单相接地的多端检测定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 22-28.
- YANG Luoyuan, SHU Qin. A new multiterminal detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 22-28.
- [9] ROBSON S, HADDAD A, GRIFFITHS H. Fault location on branched networks using a multi-ended approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1955-1963.
- [10] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.
- GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.
- [11] SPOOR D, ZHU J G. Improved single-ended traveling-wave fault-location algorithm based on experience with conventional substation transducers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1714-1720.
- [12] 张帆, 潘贞存, 马琳琳, 等. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 78-83.
- ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Linlin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [13] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
- TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [14] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-30.
- QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Study on dispersion of travelling wave in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.
- [15] LIN X, ZHAO F, WU G, et al. Universal wavefront positioning correction method on traveling-wave-based fault-location algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1601-1610.
- [16] 童宁, 余梦琪, 林湘宁, 等. 基于相电流高频特征识别的配电网故障指示器原理[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 465-471.
- TONG Ning, YU Mengqi, LIN Xiangning, et al. Study for fault indicator based on the faulty phase current feature recognition for the distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 465-471.
- [17] DOMMEL H W. Overhead line parameters from handbook formulas and computer programs[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1985, PAS-104(2): 366-372.
- [18] 张志文, 梁英, 李勇, 等. 新型 SVC 中无功功率检测及滤波器的优化设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 51-55.
- ZHANG Zhiwen, LIANG Ying, LI Yong, et al. Detection of reactive power and design of filter for new type SVC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 51-55.
- [19] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.
- LI Zhenxing, WU Liquan, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.
- [20] 汤兰西, 董新洲. 半波长交流输电线路行波差动电流特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2261-2269.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. Study on the characteristic of travelling wave differential current on half-wave-length AC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2261-2269.

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-07-20

作者简介:

张雪松(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为分布式电源和微电网控制与保护; E-mail: ee_zxs@163.com

王子璇(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: Wzx_Hust@163.com

(编辑 张爱琴)