

基于波前陡度的输电线路单端行波故障测距

朱柏寒, 陈羽, 马金杰

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省淄博市 255000)

摘要: 输电线路单端行波故障测距方法中故障点反射波头识别困难。故障初始行波的波前陡度与故障距离相关,文中分析了波前陡度与故障距离的关系,提出了波前陡度与小波波头识别相结合的单端行波定位方法。方法首先对线路故障后记录的单端行波波头波形求取小波变换模极大值,获取初始波头及各反射波头起始点,再通过首波头波前陡度计算初步故障距离,筛选最接近该距离的小波模极大值以确定故障点反射波头并进行精确测距。算例结果证明了该方法的有效性。

关键词: 行波故障测距; 单端法; 波前陡度; 小波变换

0 引言

输电线路准确的故障定位,有利于工作人员快速进行故障处理,从而减少停电时间、降低故障损失。现有的故障测距方法主要分为行波法和阻抗法,而行波法主要分单端法、双端法和多端法^[1-2]。单端法利用故障初始行波和故障点反射波到测量点的时间差测距;双端法通过检测故障行波到达线路两端波头的时间进行测距,实际输电线路行波故障测距系统一般以双端法为主,单端法为辅^[3-4]。当线路某一端行波装置未能捕捉到故障初始行波时,双端法就会失败,为避免该问题有文献研究了多端法。多端法利用故障初始行波透射到母线上其他线路时多点记录的行波信号进行测距^[5]。但对于一些末端线路,无法应用多端测距方法。对于末端线路,单端法如能自动准确测距,将有效提高测距系统的可靠性。

单端法受相邻线路和阻抗不匹配点折反射的影响,故障点反射波头识别困难^[6-11]。为解决该问题,文献[7-9]提出了工频测距和行波故障测距相结合的方法,先对单端采集的故障行波进行波头识别,得到几个可能的故障点反射波头对应的距离,再通过阻抗法计算故障距离,并对行波法得出的故障点反射波头进行筛选,最接近的故障距离作为测距结果,该方法需同时采集工频信号和行波信号,实现时一

般通过故障录波器与行波故障测距装置相配合。文献[10]推导出二次侧行波波头衰减振荡的数学表达式,并通过数值计算的方法给出衰减振荡频率与二次侧传输电缆长度的关系。行波线模和零模的关系也可以识别故障点反射波波头,文献[11]通过第2个到达的反向行波中零模与线模的极性来识别故障点反射波。文献[12]利用神经网络训练学习方法,估算出零模波速度,根据零模与线模波速差得出一个初步故障距离,该方法近端故障时容易受到干扰。

故障行波在线路上传播会发生畸变,故障行波波头的畸变程度与故障距离相关,行波波头畸变主要由色散引起,不同频率的行波分量衰减速度与传播速度不同,高频分量传播速度快,衰减速度也快,随着传播距离增大其波形畸变也越严重,其中零模分量特征较为明显^[13-14]。文献[15]考虑了输电线路的频变特性和行波的色散效应,计算了0~1 MHz频带内不同模量通道的传播系数。文献[16]定义了波头突变幅值与最高频率分量和最低频率分量到达时间差的比值为波头平均斜率,用其表征波头畸变。文献[17]提出了一种利用波前信息的直流输电线路行波保护原理,该方法基于故障零模电流行波波头畸变程度与故障距离相关原理,利用波形相关系数,实现了输电线路区内外故障判别。文献[18-19]在文献[15]的基础上,利用矢量拟合法对传播系数拟合,根据拟合结果,选取广义Logistic函数对行波波前拟合,用函数的陡度来表示波前畸变程度,考虑到平波电抗器对波前畸变的影响,对陡度进行整定,实现了区内外故障的判别。

基于故障初始行波的波前陡度与故障距离相关的特性,本文分析了影响波前畸变的因素,提出了波

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2020-12-16。

上网日期: 2021-02-04。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600);国家电网公司科技项目(52094017000W);山东省重点研发计划资助项目(2019GGX103019)。

前陡度与小波波头识别相结合的单端自动测距方法,并通过算例验证了方法的有效性。

1 行波畸变

1.1 故障行波在输电线路上的色散

输电线路发生故障时,将产生向线路两端传播的故障初始行波。故障初始行波可以视为一个全频

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} [R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}]}$$
 (2)

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} [\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}]}$$
 (3)

式中: α 为表示行波沿线衰减特性的衰减常数; β 为表示行波沿线相位变化特性的相位常数; ω 和 R_0 、 G_0 、 L_0 、 C_0 分别为角频率和单位线路长度电阻、电导、电感、电容。

波速度、频率、相位常数的关系如式(4)所示,不同频率分量所对应的不同波速度是导致行波畸变的主要因素。

$$v = \frac{\omega}{\beta(\omega)}$$
 (4)

由于线模和零模通道的参数不同,对应的分量色散程度也不同,零模分量受大地频变特性与大地电阻率的影响,色散现象较为明显^[13-15]。

1.2 行波畸变影响因素分析

线路发生故障后,测量端采集到的故障初始行波零模分量的畸变程度与故障距离相关,研究并利用两者之间的关系,可弥补基于小波变换的单端行波故障测距方法中故障点反射波识别困难的不足。

故障行波零模分量的畸变受多种因素影响,其中故障初相角、过渡电阻主要影响行波幅值,对行波畸变影响较小;故障距离、大地电阻率对行波畸变影响较大^[6,13-15]。由于不同故障情况下,故障初始行波幅值不同,为统一比较,下文的波形曲线为归一化处理后的结果。

1.2.1 故障距离对行波畸变的影响

以220 kV架空输电线路为例,如附录A图A1所示。使用PSCAD建立了相应仿真模型,在M端采集的不同故障距离的初始行波如图1所示。由图1可知,随着故障距离的增大,故障初始行波的波前畸变越明显。

1.2.2 大地电阻率对行波畸变的影响

故障行波零模分量受大地电阻率 ρ 影响较大。输电线路跨域广泛、土壤性质多样且分布不均匀,例如:黏土、砂质黏土、黄土和沙土等电阻率各不相同。

带阶跃波。不同频率的故障分量衰减速度与传播速度不同,导致行波畸变,这种现象称为行波的色散。根据传播通道不同,分为线模分量和零模分量,可以通过凯伦贝尔变换获得。线模通道由线路导线构成,零模通道由线路导线与大地构成。行波在输电线路上的传播特性用传播系数 γ 表示,表达式如下:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$
 (1)

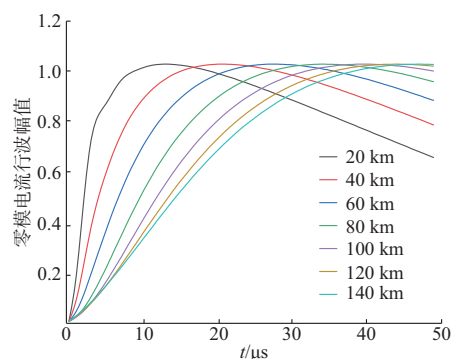


图1 不同故障距离下的初始零模电流行波波头
Fig. 1 Traveling wave heads of initial zero-mode current at different fault distances

2 波前畸变与故障距离

行波畸变主要与故障距离和大地电阻率相关。行波波前部分可使用广义Logistic函数进行拟合^[18],函数表达式为:

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-kx}} + b$$
 (5)

式中: L 、 k 、 b 为待求参数。函数中的 k 为函数的陡度,可用 k 表征波前的畸变程度,为方便理解以下称 k 为波前陡度。不同大地电阻率情况下,故障距离与故障初始行波波前陡度 k 的关系如图2所示。

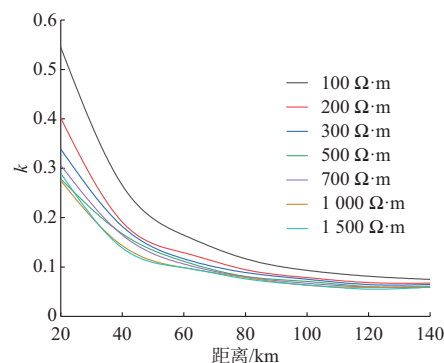


图2 不同大地电阻率情况下波前陡度与故障距离的关系
Fig. 2 Relationship between wavefront steepness and fault distance with different earth resistivities

3 基于波前陡度的单端行波故障测距原理

线路发生故障后,对记录的单端波形求取故障行波的小波模极大值,可以确认故障初始行波及各反射波的到达时间,但无法识别出故障点反射波,需要其他方法来辅助识别。根据故障初始行波波前陡度与故障距离的关系可求出一个初步故障距离,该距离由于受具体线路大地电阻率和计算误差影响,其测距精度不足,但可以给出大致距离,协助进行故障点反射波波头的识别,从而实现自动准确测距。

3.1 单端行波故障测距原理

单端行波故障测距利用线路故障时在测量端采集到的第1个行波浪涌与第2个行波浪涌之间的时间差计算测量端与故障点之间的距离。由于线模分量较为稳定,测距中一般采用线模分量。计算公式如式(6)所示。

$$d_{AF} = \frac{1}{2} v \Delta T \quad (6)$$

式中: A 为测量端; F 为故障点; d_{AF} 为故障点到测量端的距离; ΔT 为时间差。

3.2 波前陡度与故障距离的关系

波前陡度与故障距离的关系式难以直接获取,既然它们之间具有图2这样的对应关系,可以通过数据拟合得出表达式。本文选取含不同衰减速度分量的ExpDec2函数进行拟合。ExpDec2函数为:

$$y = y_0 + a_1 e^{-\frac{x}{r_1}} + a_2 e^{-\frac{x}{r_2}} \quad (7)$$

式中: y_0 、 a_1 、 a_2 、 r_1 、 r_2 为常数,其中 a_1 和 a_2 为比例系数, r_1 和 r_2 为衰减常数; x 、 y 分别为自变量和因变量。考虑到大地电阻率对波前陡度的影响,得出含大地电阻率的波前陡度与故障距离的关系表达式如下。

$$k = (1.25 - 0.00154\rho) e^{-\frac{d}{t}} + 0.136 e^{-\frac{d}{150}} \quad (8)$$

式中: d 为初步故障距离;大地电阻率 $\rho \in (100, 500)$,当 $\rho \geq 500$ 时,取 $\rho = 500$; $t = 22 - 0.028\rho$, $t \geq 16.4$ 。

3.3 故障点反射波头识别

3.3.1 获得多个测距结果

故障点反射波头的识别是单端测距的关键环节,当发生故障后,对采集到的故障波形进行凯伦贝尔变换,获得其线模分量与零模分量。求取线模分量小波模极大值,可得故障初始行波和其他反射波到达测量端的时间^[20]。由于无法确认故障点反射波头,使用单端测距式(6)将得到多个测距结果,需要对其进行筛选。

小波变换由如下所示的Mallat算法式(9)实现,

详细参数参考文献[21]。其中 $j \in [1, \infty]$; $S_{2^j} f(n)$ 为小波变换结果的逼近分量; $W_{2^j} f(n)$ 为变换结果的小波分量。

$$\begin{cases} S_{2^j} f(n) = \sum_q h_q S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1}k) \\ W_{2^j} f(n) = \sum_r g_r S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1}k) \end{cases} \quad (9)$$

3.3.2 测距结果筛选

首先对故障初始行波零模波前采样点进行归一化处理,设置一般线性约束条件 $k > 0$ 、 $L > 0$,为保证拟合精确度,使用Levenberg-Marquardt算法^[22]对归一化后的波前数据进行拟合,拟合函数如式(5)所示。对故障初始行波的零模分量波前拟合可得波前陡度 k ,将 k 代入式(8)可求得一个初步故障距离。

使用初步故障距离对测距结果进行筛选,确认故障点反射波头及其对应的测距结果,从而得到准确的故障距离。

3.4 大地电阻率的获取

大地电阻率对波前陡度存在一定的影响,为了减少其产生的误差,式(8)考虑了大地电阻率。但实际应用中,大地电阻率难以直接获取,可利用实际的故障数据对其进行修正,通过将实际故障距离与波前陡度代入式(8)估算出大地电阻率。

4 算法步骤

步骤1:线路发生故障后,对记录的波形进行凯伦贝尔变换,求取线模分量小波模极大值,获得故障初始行波波头及各反射波头到达测量端的时间;通过单端行波故障测距式(6)得出 n 个测量结果 d_i ,其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

步骤2:拟合故障初始行波零模分量波前部分,提取其陡度 k 。

步骤3: ρ 的初始值为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,将 k 代入式(8)计算得出初步故障距离 d 。

步骤4:用初步故障距离 d 对测距结果 d_i 进行筛选,最接近 d 的结果即为最终测距结果。

步骤5:根据实际故障距离和波前陡度 k ,决定是否需要对大地电阻率 ρ 进行修正,若需要修正则将修正后的 ρ 值替换步骤3中的 ρ 值。

5 仿真实验

本文以图3所示220 kV架空输电线路为例,在节点A处安装了行波故障测距装置。使用PSCAD建立仿真模型,在F点处设置故障。故障发生后,在A点采集故障行波,采样频率设置为1 MHz。

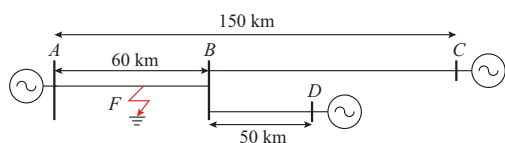


图3 仿真模型
Fig 3 Simulation model

5.1 不同故障距离的测距

以发生在AC线路上的单相接地故障为例,分别设置故障距离为60 km和90 km,行波到达时间如附录A表A1、表A2所示。以60 km为例,无法判断波头2、3哪一个为故障点反射波,使用单端测距公式得出60.0 km、90.1 km两个测距结果,通过波前陡度求得初步故障距离为59.0 km,所以波头2为故障点反射波,最终测距结果为60.0 km。

5.2 不同故障情况下的测距

大地电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 情况下,不同故障类型、过渡电阻和故障初相角的测距结果分别如附录A表A3至表A5所示。

5.3 大地电阻率未知情况下的测距

现场应用时,大地电阻率一般是未知的,这样会使测距误差增大,在极端情况下还会导致测距失败。例如,实际大地电阻率为 $300 \Omega \cdot m$,以 $100 \Omega \cdot m$ 为计算值,测距结果如表1所示。因此,需要根据实际故障数据对大地电阻率进行修正,将测得的波前陡度及实际的故障距离代入式(8)计算得大地电阻率为 $280 \Omega \cdot m$,并使用修正后的值进行测距,测距结果如表1所示。

表1 大地电阻率对故障测距的影响

Table 1 Influence of earth resistivity on fault location

大地电阻率	故障距离/km	初步故障距离/km	最终结果/km
修正前	60	80.7	90.1
	90	115.6	90.1
修正后	60	59.6	60.0
	100	96.0	100.1

仿真结果表明,此方法可通过初步故障距离识别出故障点反射波,受故障类型、过渡电阻、故障初相角影响较小。在大地电阻率未知的情况下,可通过实际故障数据对大地电阻率进行修正,使得误差减小,具有较好的适应性。

6 结语

1)输电线路单端行波故障测距方法中的故障点反射波头识别困难。本文基于故障初始波头波前陡度与故障距离的关系可协助实现故障点反射波头的识别。基于零模分量可进行故障的初步测距,结合

故障波形小波变换模极大值可准确确认故障点反射波头,实现单端测距的自动化。

2)本文方法在不同故障类型、不同故障初相角、不同故障过渡电阻和不同大地电阻率等场景下均具有较好的适应性,下一步还需要将其应用于实际设备,以进一步优化。本文采用零模分量波前陡度与小波波头识别相结合的方法解决了接地故障的测距,对于相间故障,由于没有零模分量^[23],还需要进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 范春菊,姜军,郭煜华,等.输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4):129-134.
FAN Chunju, JIANG Jun, GUO Yuhua, et al. Development and application of wave fault location technology for transmission lines [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(4): 129-134.
- [2] 李斌,毛琦扬,何佳伟,等.基于重合直流断路器残余电流开关的柔性直流电网故障测距[J/OL].电力系统自动化[2020-12-16].<http://www.aeps-info.com/aeps/article/html/20200804003>.
LI Bin, MAO Qiyang, HE Jiawei, et al. Flexible DC grid fault location based on residual current switch of coincidence DC circuit breaker [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2020-12-16]. <http://www.aeps-info.com/aeps/article/html/20200804003>.
- [3] 邓丰,李鹏,曾祥君,等.基于D-PMU的配电网故障选线和定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(19):160-171.
DENG Feng, LI Peng, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method for distribution network based on D-PMU [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 160-171.
- [4] 蒲婷婷,李京.基于优化小波神经网络的输电线路行波故障测距[J/OL].电力系统及其自动化学报[2020-12-16].<http://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000494>.
PU Tingting, LI Jing. Fault location of transmission lines based on optimized wavelet neural network [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA [2020-12-16]. <http://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000494>.
- [5] 范新桥,朱永利.基于双端行波原理的多端输电线路故障定位新方法[J].电网技术,2013,37(1):261-269.
FAN Xinqiao, ZHU Yongli. New method for fault location of multi-terminal transmission line based on double-terminal traveling wave principle [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 261-269.
- [6] 覃剑,葛维春,邱金辉,等.影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J].电网技术,2007,31(2):28-35.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis of main factors affecting the fault ranging accuracy of traveling wave in transmission lines [J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.

- 28-35.
- [7] 卢继平,黎颖,李健,等.行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J].电力系统自动化,2007,31(23):65-69.
LU Jiping, LI Ying, LI Jian, et al. A new integrated single-terminal fault location method combining travelling wave method and impedance method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69.
- [8] 许飞,董新洲,王宾,等.新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J].电力自动化设备,2014,34(4):37-42.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Fault location method and experimental study of new transmission line single terminal combination of electric capacity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 37-42.
- [9] 陈铮,董新洲,罗承沐.单端高频电气量故障测距算法的鲁棒性[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(3):310-313.
CHEN Zheng, DONG Xinzhou, LUO Chengmu. Robustness of fault location algorithm for single-terminal power-frequency power flow [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2003, 43(3): 310-313.
- [10] 许飞,董新洲,王宾,等.考虑二次回路暂态转变特性的单端组合测距算法及其应用[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5210-5219.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Single-terminal combination ranging algorithm considering transient transition characteristics of secondary loop and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5210-5219.
- [11] 施慎行,董新洲,周双喜.单相接地故障下第2个反向行波识别的新方法[J].电力系统自动化,2006,30(1):41-44.
SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. A new method for the second reverse traveling wave identification in single-phase ground fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 41-44.
- [12] 梁睿,孙式想.单端行波故障测距的组合方法研究[J].电网技术,2013,37(3):699-706.
LIANG Rui, SUN Shixiang. Research on the combined method of single-end traveling wave fault location [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.
- [13] 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):28-31.
TAN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Dispersion study of traveling wave propagation on transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 28-31.
- [14] 韩昆仑,蔡泽祥,贺智,等.高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):20-25.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Travelling wave propagation characteristics of HVDC transmission line faults and its influence on travelling wave protection [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [15] 李明舒.基于行波色散效应的行波故障测距方法[D].北京:华北电力大学,2016.
LI Mingshu. Fault location method of traveling wave based on traveling wave dispersion effect [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [16] 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. Fault location and protection of line grounding based on modulus travelling wave transmission time difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [17] 宋国兵,张晨浩,杨黎明,等.利用波前信息的直流输电线路超高速保护原理[J].电网技术,2019,43(2):576-581.
SONG Guobing, ZHANG Chenhao, YANG Liming, et al. Principle of ultra-high-speed protection of direct current transmission lines using wavefront information [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 576-581.
- [18] 张晨浩,宋国兵,董新洲,等.利用波前广义Logistic函数拟合的直流输电线路快速保护原理[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3168-3176.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Principle of fast protection of DC transmission lines using wavefront generalized Logistic function [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3168-3176.
- [19] 张晨浩,宋国兵,董新洲.利用故障电流首行波拟合的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J/OL].中国电机工程学报[2020-07-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191748.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. Single-ended traveling wave protection principle of flexible DC transmission line using first traveling wave fitting of fault current [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2020-07-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191748.
- [20] 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.
GE Yazhong. Principle and technology of new relay protection and fault location [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [21] DONG Xinzhou, CHEN Zheng, HE Xuanzhou. Optimizing solution of fault location [C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 21-25, 2002, Chicago, USA: 1113-1117.
- [22] 陈震,刘奇龙.应用改进的Levenberg-Marquardt方法求解一类多线性系统[J].四川师范大学学报(自然科学版),2020,43(1):39-44.
CHEN Zhen, LIU Qilong. Applying the improved Levenberg-Marquardt method to solve a class of multi-linear systems [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 43(1): 39-44.
- [23] 束洪春.行波暂态量分析与故障测距[M].北京:科学出版社,2016.
SHU Hongchun. Transient analysis of traveling wave and fault location [M]. Beijing: Science Press, 2016.

朱柏寒(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:行波故障测距。E-mail:1009291546@qq.com

陈羽(1974—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:配电网自动化和智能电网。E-mail:chenyukh@163.com

马金杰(1993—),男,硕士,主要研究方向:行波故障测距。E-mail:1125060097@qq.com

(编辑 章黎)

Wavefront Steepness Based Single-ended Traveling Wave Fault Location for Transmission Lines

ZHU Baihan, CHEN Yu, MA Jinjie

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: It is difficult to identify the wave head reflected by the fault point in the single-ended traveling wave fault location method for the transmission lines. The wavefront steepness of the initial traveling wave of the fault is related to the distance to the fault. This paper analyzes the relationship between the wavefront steepness and the distance to the fault, and proposes a single-ended traveling wave location method combining the wavefront steepness and wavelet head identification. The method first calculates the wavelet transform modulus maximum value of the waveform of single-ended traveling wave and obtains the starting point of initial wave head and each reflected wave head. The preliminary fault distance is calculated by the wavefront steepness of the first wave head, and the maximum value of the wavelet modulus closest to this distance is selected to determine the reflected wave head of the fault point, so as to obtain the accurate fault location results. The case study results prove the effectiveness of the method.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900600), State Grid Corporation of China (No. 52094017000W) and Shandong Provincial Key R&D Program of China (No. 2019GGX103019).

Key words: traveling wave fault location; single-ended method; wavefront steepness; wavelet transform

