

# 基于行波波速在线测量的输电线路 故障测距算法研究

王晓萍

(昆明理工大学 科技处, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 基于行波的输电线路双端测距算法只用到到达故障线路两侧母线的第一个故障初始行波波头, 其可靠性较高. 但行波波速对其定位精度存在一定的影响. 实际的波速受到线路参数频变及地理位置、气候等诸多因素的影响. 本文提出一种在线测量行波波速的方法, 以此为基础提出一种新型双端测距算法. 大量仿真表明与常规双端行波测距算法相比较, 该算法测距精度更高.

**关键词:** 行波; 波速; 在线测量; 故障测距

中图分类号: TM 74 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2006)05-0034-04

## Study on Transmission Line Fault Location Based on Travelling Wave Speed On-Line Measurement

WANG Xiao-ping

(Department of Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** Based on the traveling wave double ended approach only deals with the first transient traveling wave reaching the two buses of the fault line. Although it has higher reliability, its location accuracy can also be affected by the wave speed which will be influenced by such factors as geographical position, climate, line parameter changes because of the frequency variation. An approach to measure traveling wave speed on-line is presented. Based on the approach, a new double ended fault location method is presented. Lots of tests show that the method is more accurate than the conventional one.

**Key words** traveling wave; wave speed; measure on line; fault location

### 0 引言

目前已投运的输电线路行波故障测距装置中, 无一例外地采用双端行波法作为主要的故障测距算法<sup>[1-4]</sup>. 双端行波法由于只用到到达故障线路两侧母线的第一个故障初始行波波头, 相对于单端行波法而言, 其可靠性较高. 但行波波速对其定位精度存在一定的影响. 这是因为波速的计算公式是基于无损线的<sup>[5]</sup>, 实际的波速受到线路参数频变及地理位置、气候等诸多因素的影响, 根据线路参数计算波速其结果不可避免存在一定误差. 而对于每条不同地理位置的线路进行实测波速也是不现实的. 鉴于此, 本文提出以在线测量行波波速的方法为基础的双端测距算法, 着眼于提高现有双端行波测距算法的精度.

### 1 利用线路参数计算行波波速的不足之处

在有关暂态行波的理论分析及实际应用中, 出于解耦的目的, 均采用相模变换技术将三相输电线路参数及各种电气量从相域变换至模域. 三相输电线路的相参数经过相模变换后可以变换为模参数, 包括串联模阻抗、并联模导纳, 通过模传播常数又可获得模衰减常数和模相位常数, 后者决定了模行波分量的传播

收稿日期: 2005-12-18

第一作者简介: 王晓萍 (1970~), 女, 工学学士, 助研. 主要研究方向: 电力自动化, 科技管理.

E-mail: jcyj34@kmust.edu.cn

速度. 对于某一模分量而言, 三者之间的关系由下式决定<sup>[6, 7]</sup>:

$$Y_m^{(k)}(\omega) = \sqrt{Z_m^k(\omega) Y_m^k(\omega)} = \sqrt{[R_m^k(\omega) + j\omega L_m^k(\omega)](G_m^k + j\omega C_m^k)} = \alpha_m^k(\omega) + \beta_m^k(\omega) \quad (1)$$

式(1)中,  $m$  代表模量,  $k$  为模分量序号,  $Y_m^{(k)}(\omega)$  称为线路的模量传播系数,  $Z_m^k(\omega)$  为线路的串联模阻抗,  $Y_m^k(\omega)$  为线路的并联模导纳.  $R_m^k(\omega)$ 、 $L_m^k(\omega)$ 、 $G_m^k$ 、 $C_m^k$  分别为线路的模电阻、模电感、模电导、模电容. 对于频率为  $\omega$  的模行波分量,  $\alpha_m^k(\omega)$  描述了行波在传播过程中的幅度衰减特性, 称为衰减常数;  $\beta_m^k(\omega)$  描述了行波在传播过程中的相位滞后性质, 称为相位常数. 对于任一频率分量, 无论是正向模行波分量, 还是反向模行波分量, 随着波的前进, 幅度将减小而相位将滞后. 且有下列关系成立:

$$\alpha_m^k(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{[R_m^{k2}(\omega) + \omega^2 L_m^{k2}(\omega)](G_m^{k2} + \omega^2 C_m^{k2})} + \frac{1}{2} [R_m^k(\omega)G_m^k - \omega^2 L_m^k(\omega)C_m^k]} \quad (2)$$

$$\beta_m^k(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{[R_m^{k2}(\omega) + \omega^2 L_m^{k2}(\omega)](G_m^{k2} + \omega^2 C_m^{k2})} - \frac{1}{2} [R_m^k(\omega)G_m^k - \omega^2 L_m^k(\omega)C_m^k]} \quad (3)$$

考虑到实际输电线路电导非常小, 可忽略不计, 上两式简化为:

$$\alpha_m^k(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \omega C_m^k \sqrt{[R_m^{k2}(\omega) + \omega^2 L_m^{k2}(\omega)]} - \frac{1}{2} \omega^2 L_m^k(\omega)C_m^k} \quad (4)$$

$$\beta_m^k(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \omega C_m^k \sqrt{[R_m^{k2}(\omega) + \omega^2 L_m^{k2}(\omega)]} + \frac{1}{2} \omega^2 L_m^k(\omega)C_m^k} \quad (5)$$

模量波速定义为:

$$v_m^k(\omega) = \frac{\omega}{\beta_m^k(\omega)} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2} \omega C_m^k \sqrt{[R_m^{k2}(\omega) + \omega^2 L_m^{k2}(\omega)]} + \frac{1}{2} \omega^2 L_m^k(\omega)C_m^k}} \quad (6)$$

一般将行波传播速度和和衰减常数随频率变化的现象称为频散<sup>[6]</sup>. 分析表明, 0 模分量在传播过程中的频散现象比 1 模和 2 模分量严重得多. 因而现有的故障测距装置无一例外地采用线模分量来构造测距算法. 而由式(6)可以看出, 利用线路参数计算行波波速时, 既要求线路参数准确, 又要求确定行波的中心频率, 否则将导致行波波速误差的出现. 但实际输电线路的参数即使是实测值也存在误差, 有些参数的准确测量也存在困难. 此外, 线路参数也受季节影响. 因此根据线路参数计算线路行波波速可能存在较大误差, 从而影响到测距精度.

## 2 行波波速的在线测量方法

为提高行波测距装置的测距精度, 文献[8-9]提出了消除波速的测距方法, 但是这些方法均存在多种不足之处, 难以付诸实践. 本文利用波速在线测量方法来获取暂态行波的传播波速. 当输电线路发生区外故障时, 线路两端的行波测距系统应该能够灵敏地启动, 记录电压、电流的行波数据, 可以不给出行波测距结果, 但可以用于测量输电线路上行波的实际波速. 输电线路发生区外故障时, 故障点产生的行波将穿越本线路的全长. 假设线路的全长为  $l$ , 故障初始行波到达本端和对端母线的时刻分别为  $t_1$ 、 $t_2$ , 则行波实际波速为:

$$v = \frac{l}{|t_1 - t_2|} \quad (7)$$

当区外故障的距离比较远, 或者由于行波衰减畸变导致检测到的到达两侧的时间不准确甚至存在较大的误差时, 计算的行波波速将存在较大误差, 因此在运行时将波速整定为根据线路参数计算得到的波速, 区外故障时将计算得到的行波波速与原有的波速进行比较, 在误差允许范围内时可采用在线测量到的波速, 或者将在线测量的波速与原有波速作加权平均后作为新的行波波速. 如误差超出允许的范围则丢弃本次计算的行波波速, 不修改原有的波速, 这样既实现了波速的在线调整又保证了行波波速的正确性, 不需要其它的测量设备, 有利于提高测距精度<sup>[10]</sup>.

### 3 基于波速在线测量的新型双端测距方法

假设内部故障时行波到达线路本端及对端母线的的时间分别为  $t_1$  和  $t_2$ , 根据常规双端行波定位的测距公式得到故障点距本侧的距离为:

$$l_f = [l + (t_1 - t_2)v] / 2 \tag{8}$$

将式 (7) 代入式 (8) 可得:

$$l_f = \frac{l}{2} \left[ 1 + \frac{t_1 - t_2}{|t_1 - t_2|} \right] \tag{9}$$

式 (9) 即为本文所提出的新型双端测距方法.

### 4 新型双端测距算法的数字仿真

所采用的仿真图如图 1 所示, 线路结构参数为:  $R_0 = 0.204688 \Omega / \text{km}$ ,  $R_1 = 0.0295519 \Omega / \text{km}$ ;  $L_0 = 0.0020830 \text{ H} / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.0008854 \text{ H} / \text{km}$ ;  $C_0 = 0.009081663 \mu\text{F} / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.01319818 \mu\text{F} / \text{km}$ . 各线路长度  $PS$  为 100 km,  $SM$  为 50 km,  $MQ$  为 40 km,  $MN$  为 115 km,  $NQ$  为 160 km,  $TN$  为 180 km,  $NR$  为 120 km,  $QR$  为 110 km.

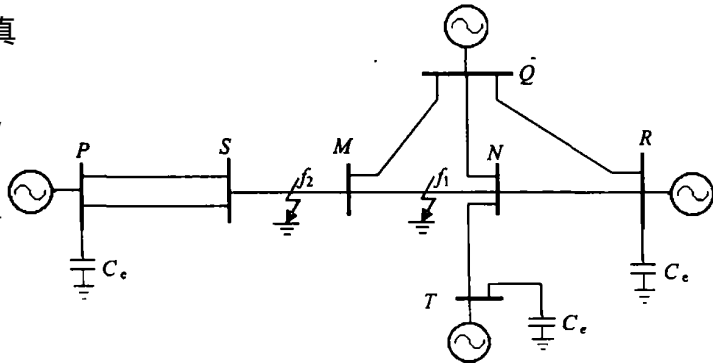


图1 仿真系统图  
Fig.1 Simulated power system

令故障点发生在  $MN$  段距  $M$  端 60 km 的  $f_1$  点处, 分别考察母线  $M$  及  $S$  处的初始电流波形及其小波变换 (如图 2 所示). 由小波变换结果可知, 暂态电流行波到达母线  $M$  及  $S$  的时间分别为:  $t_5 = 0.001206 \text{ s}$ ,  $t_6 = 0.001377 \text{ s}$ . 由式 (7) 可得线路上的实际波速为

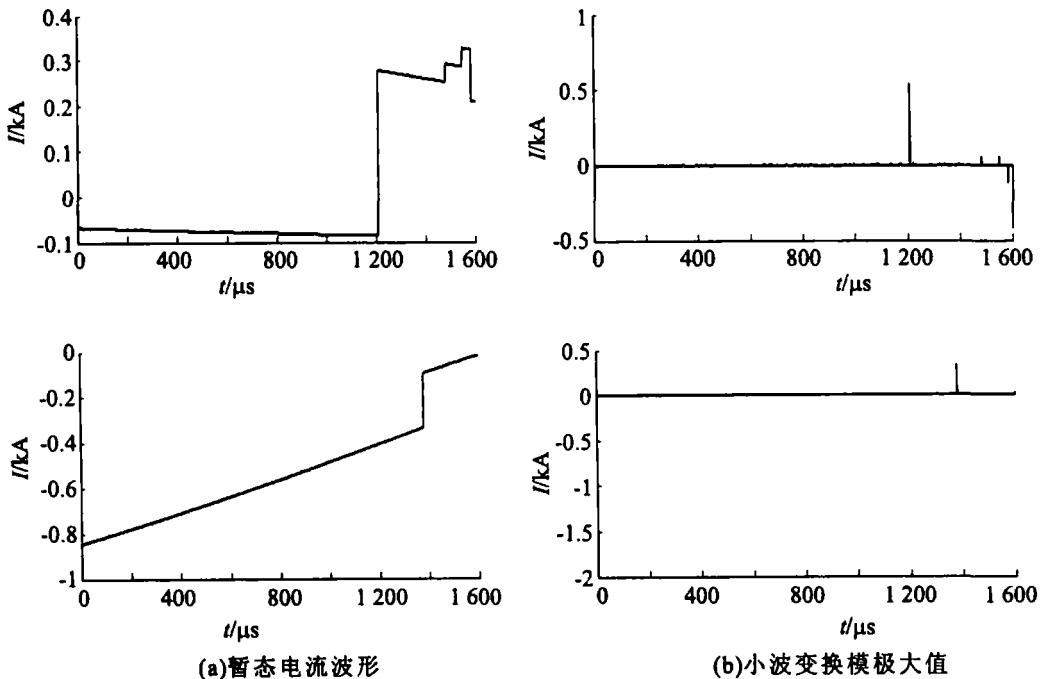


图2  $f_1$  点故障时的暂态电流及其小波变换结果  
Fig.2 Transient current and wavelet transforms when fault location is  $f_1$

$$v = 2.923977 \times 10^5 \text{ km/s}$$

又令线路 SM 段上距母线 S 处 20 km 的  $f_2$  点处发生故障, 母线 S 及 M 处的暂态波形及小波变换结果如图 3 所示。

由小波变换结果可知, 暂态电流行波到达母线 M 及 S 的时间分别为:  $t_5 = 0.001069 \text{ s}$ ,  $t_6 = 0.001104 \text{ s}$ 。由式 (9) 可得故障距离为 20.03 km。可见新方法较为准确地指示出了故障位置。

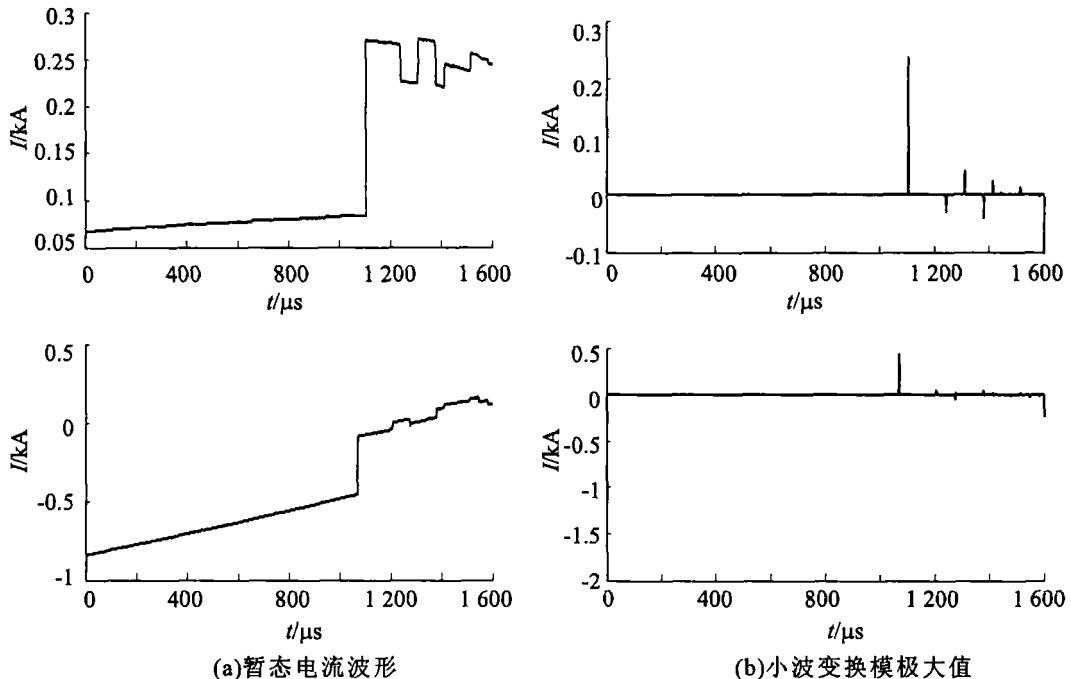


图3  $f_2$ 点故障时的暂态电流及其小波变换结果

Fig.3 Transient current and wavelet transforms when fault location is  $f_2$

但是在不知线路参数的情况下, 根据经验值指定波速, 可能会给测距结果带来一定误差, 如波速为  $2.9975 \times 10^5 \text{ km/s}$  此时计算出故障距离为 19.9 km。测距误差明显高于本方法。

## 5 结论

1) 输电线路参数受多种因素影响而具有不确定性, 根据基计算线路暂态行波波速不准确, 从而给基于暂态行波的测距方法带来测距误差。

2) 基于波速在线测量的方法较为准确地计算出了线路暂态行波的波速, 以此为基础进行故障测距较为准确地指示出了故障距离。

## 参考文献:

- [1] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 36-39
- [2] 覃剑, 陈祥训. 基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统 [J]. 国际电力, 2001, 5(4): 31-35.
- [3] 束洪春, 司大军, 陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 22(4): 72-76
- [4] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究: 博士学位论文 [D]. 西安交通大学, 1996: 31-89
- [5] 吴维韩, 张芳榴, 等. 电力系统过电压数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 26-70
- [6] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 不同故障类型情况下行波传播特点的研究 [J]. 电网技术, 1999, 23(1): 48-54
- [7] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究: 博士学位论文 [D]. 西安交通大学, 2003
- [8] 邓军波, 施围. 输电线路接地故障行波测距新方法 [J]. 继电器, 2000, 28(8): 16-18
- [9] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-33
- [10] 黄雄, 王志华, 尹项根. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34-37.