

DOI: 10.7667/PSPC160603

# 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究

李振兴, 吴李群, 田斌, 李振华

(三峡大学, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 为了降低当前行波故障测距方法存在的同步精度要求高、通信量大、无法确定实际波速等缺点, 并提高测距系统的容错率和可靠性, 提出一种不同步双端数据修正波速的单端行波定位方法。通过分析行波折射和反射的极性变化, 并引入零模、线模波速差原理辅助判据, 确立接收扰动下的单端入射波和对端反射波的时间差, 进一步根据双端的这个时间差修正波速, 最后利用修正波速和单端时间差可精确实现故障定位。本算法综合单端易于时间精确同步和双端修正波速的优点, 降低了双端行波故障测距方法对高精度双端时间同步要求, 同时双端仅交换单端时间差信息, 降低了通信的依赖性。仿真比较结果显示所提出的方法具有很高的定位精度, 受时间同步和波速的影响小。

**关键词:** 行波故障定位; 极性; 波头标定; 波速修正; 模量

## Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity

LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, LI Zhenhua

(China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to solve those problems, for example high precision synchronization requirements, heavy traffic, and uncertainty of wave velocity, and at the same time improve the tolerance rate and reliability of the location system, this paper presents a new method for single-terminal traveling wave location with amended wave velocity by two-terminal asynchronous data. By analyzing the changes of polarity of the wave after catadioptric and introducing zero-modulus and line modulus wave velocity contrast as auxiliary criterion, it counts the time-lag between initial wave and reflected wave from remote bus under receiving disturbance, then amends the value of wave velocity through this time-lag of two terminals, finally uses the amended velocity and time-lag of single terminal to locate the fault accurately. This algorithm integrates the advantages of single-terminal data easy to time synchronization and two-terminal data amending the wave velocity, reduces high precision time synchronization required by the two-terminal traveling wave fault location; and at the same time two terminals only exchange time-lag of single terminal, which will reduce the communication dependency. PSCAD/EMTDC simulation show that this method has high precision for fault location, and also decreases the negative influence made by wave velocity and time synchronization.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507091).

**Key words:** traveling wave fault location; polarity; wave-front calibration; velocity amend; modulus

## 0 引言

自上世纪 90 年代行波故障测距装置研究并商业化推广后, 现场结果证明行波定位具有广阔的应用前景。相比基于工频量的定位方法, 行波法因为速度快、精度高, 受故障电阻、线路参数、系统运行方式的影响小, 认为是当前最为准确的定位方法<sup>[1-2]</sup>,

非常适合事故多发的中国电网现状<sup>[3-4]</sup>。行波法可分为单端法和双端法, 其中双端法的定位可靠性要优于单端法。

传统的双端行波法(下文简称双端法)利用故障点产生的故障行波到达线路两端的时间差来定位, 需要两端检测装置实现高度时间同步和双端通信<sup>[5-6]</sup>, 对同步时钟有很大的依赖, 在经济上和安全上都带来不确定性。同时两端时钟对时也存在一定的误差, 因而降低时间同步误差成为双端法重要的研究课题

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507091)

之一<sup>[7]</sup>。

无论双端法还是单端行波法, 其基本原理都是找到精确的时间差和准确的波速度, 传统的行波定位中一般根据线路参数计算波速或使用文献提供的波速, 带有一定的主观性。不同频率的行波具有不同的衰减常数和传播速度, 并且线路结构和所处环境同样对波速产生影响<sup>[8]</sup>, 如对各种故障情形采用统一的波速进行测距必然增大定位误差。因此消除波速对行波定位的影响, 确定实时的传输速度也是行波法的重要研究方向之一。对于单端法测距, 多是利用故障点反射波与初始波头的时间差来实现定位, 不考虑非故障支路反射波, 这需要线路上安装阻波器, 但目前采用光纤差动的线路并没有阻波器, 一定程度上限制了此类方法的应用, 另外对端母线反射波对单端算法有很大影响, 并且单端法大多需要人工分析波形, 不利于故障的快速修复<sup>[9]</sup>。

针对以上问题, 专家学者做了很多相关的研究。文献[10-12]采用双端甚至多端的同步数据降低同步时钟造成的测距误差, 但同时增加了测距成本和系统复杂性。文献[13-14]提出利用杆塔定位, 从而消除波速对测距结果的影响, 但要求高精度的同步时钟。文献[15-17]引入小波变换、文献[18-19]引入 S 变换和 Hilbert-Huang 变换提高行波波头识别能力, 文献[19-20]中的大量仿真证明线路所处的环境和线路结构对行波测距结果产生较大的影响。

本文从波的反射系数和折射系数定义出发, 分析了行波折反射的极性变化特征, 并将线模和零模波速差原理初步测距作为辅助判据, 从扰动后的电流行波中确立对端母线反射波和本端初始行波的时间差, 必要时可由无对时的两端数据计算出该故障条件下的行波传输速度, 对波速进行修正, 最后利用修正的波速和单端时间差值实现精确的故障位置计算, 定位更精确、可靠。

## 1 行波的极性对比

### 1.1 折反射系数

行波在输电线路上传播, 在波阻抗不连续的节点会发生折射和反射, 如图 1 所示。折射波与入射波的极性比较、反射波与入射波的极性比较都符合

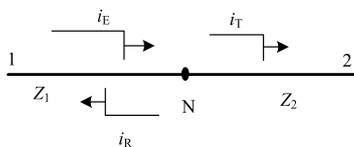


图 1 波的折射、反射示意图

Fig. 1 Sketch map for refraction and reflection

一定的规律。设入射电流波为  $i_E$ 、折射电流波为  $i_T$ 、反射电流波为  $i_R$ 。 $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为线路 1、2 的波阻抗。

由文献[14]可知折射电流波、反射电流波和入射电流波的关系为

$$\begin{cases} i_T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_E = K_{Ti} i_E \\ i_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} i_E = K_{Ri} i_E \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K_{Ti}$  为电流折射系数;  $K_{Ri}$  为电流反射系数。

$Z_1$ 、 $Z_2$  为正值, 由式(1)知  $K_{Ti}$  总为正数, 即电流波折射后极性与入射波极性相同。

对于故障点, 由于接地阻抗的原因, 当与线路阻抗并联后, 其波阻抗将小于线路的波阻抗, 由式(1)可知, 故障点电流反射系数为小于 1 的正数; 对于一个输电系统, 一条线路的背侧一般是多条线路或者负载的并联系统, 其等值阻抗的电抗变小, 电容变大, 其等值系统的波阻抗相应变小, 此时的电流的反射系数也为正数; 但对于一条背侧线路仅连接变压器或发电机, 其波阻抗明显大于线路波阻抗, 电流的反射系数将变为负数, 此时需要增加阻波器进行特殊处理。

综上所述, 除仅连接变压器或发电机线路外, 电流反射系数都为正数, 文献[15]中也提出了相同的结论。实际上仅连接变压器或发电机的线路较少, 以下讨论建立在默认线路反射系数为正数的基础上。

### 1.2 线路扰动后的波头极性分析

在线路出现扰动之后, 扰动点相当于一个附加电源, 向两端系统传播电流行波。设其中一端方向为正方向, 则另一端为反方向, 如图 2 所示。设 F 点发生接地故障,  $i_1$  和  $i_2$  为故障点 F 向两端传播的初始电流行波,  $i_3$  为故障点 F 的反射波,  $i_4$  为 M 点左侧系统的反射波,  $i_5$  为 M 对端母线 N 端反射波。现分析 M 端检测到的电流行波之间的极性关系。

由于故障点 F 的反射系数为正, 则波头  $i_1$  与  $i_3$  的极性相同, 并且在线路 MF 上多次反射也不会改变极性; 又  $i_1$  和  $i_2$  的极性相反, 而 N 端母线的反射系数为正, 则 N 端反射波  $i_5$  的极性与 M 端初始行波  $i_1$  的极性相反; 同样 M 左侧母线的反射波  $i_4$  的极性与初始行波  $i_1$  的极性是相同的。因此, 母线 M 检测到的最初多个波头中, 第一个与初始行波  $i_1$  的极性相反的波头只会是对端母线 N 的反射波头  $i_5$ 。对于 N 端的波头极性比较情况, 同样可以得出: 第一个与 N 端初始行波波头极性相反的波头将是对端(M 端)的反射波。

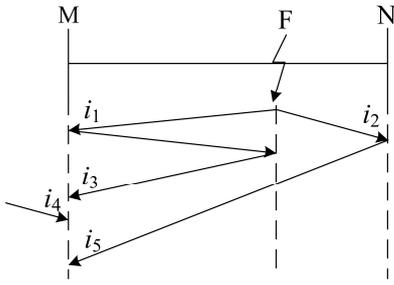


图 2 节点 M 的行波折、反射图

Fig. 2 Catadioptric traveling wave of point M

## 2 故障定位算法

### 2.1 故障定位步骤

把如图 2 所示 M 端接收  $i_1$ 、 $i_5$  波头的时刻设为  $t_{M1}$ 、 $t_{M2}$ ，类似地，把 N 端接收入射波和 M 端反射波的时刻定义为  $t_{N1}$ 、 $t_{N2}$ ，如图 3 所示。以 M 端为例，根据上一节对折/反射波极性的变化分析， $i_1$  与  $i_5$  的极性相反，首先在 M 端记录的波形上确认初始波头  $i_1$  到达时间  $t_{M1}$  及其极性，然后找到第一个与初始波头  $i_1$  的极性相反的波头，即是对端母线反射波  $i_5$ ，并确认  $i_5$  的到达时间  $t_{M2}$ ，根据极性特征在线路 M 端行波检测过程中找到这 2 个波头。对于 N 端，采用相同的方法确定初始波头到达时间  $t_{N1}$ ，及 M 端反射波到达时间  $t_{N2}$ 。设线路 MN 的长度为  $L_{MN}$ ，故障点到线路两端的长度分别为  $L_{MF}$ 、 $L_{NF}$ ， $v$  为波速度，则有：

$$\begin{cases} (t_{M2} - t_{M1})v = \Delta t_M v = 2L_{NF} \\ (t_{N2} - t_{N1})v = \Delta t_N v = 2L_{MF} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\Delta t_M$ 、 $\Delta t_N$  分别为 M 端和 N 端接收初始入射波与线路对端反射波的时间差。

基于  $\Delta t_M$ 、 $\Delta t_N$ ，线路任一端均可以得到故障点的距离，如式(3)。

$$\begin{cases} L_{MF} = L_{MN} - \Delta t_M \times v / 2 \\ L_{NF} = L_{MN} - \Delta t_N \times v / 2 \end{cases} \quad (3)$$

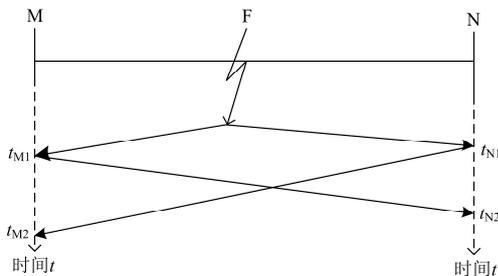


图 3 行波测距示意图

Fig. 3 Sketch map of traveling wave fault location

该方法仅使用单端测量信息，从实现方式上可归类为单端测距算法。在可使用线路保护纵联通信通道的条件下，交换双端测距结果，并无需严格的双端对时，实现测距结果的相互校验，弥补单端测距时近距离故障存在死区的缺陷，并能够提高测距可靠性。

### 2.2 波速的修正

式(3)定位计算中采用光速作为波速度进行计算，事实上行波在输电线路上的传输速度不仅与线路参数有关，同时受行波的频率和传播距离的影响。线路参数在不同地质、气候等环境下变化较大，而且不同故障产生的行波频率不同，如若按照统一的波速计算故障距离，会产生较大的测距误差。测量实时波速是提高行波故障测距精度的关键技术之一，在实际工程情况允许和需要的前提下，本文采用以下方法对波速进行修正。

将式(3)中两式相加，取  $L_{MF} + L_{NF} = L_{MN}$ ，可以得出一种计算波速的方法：

$$v' = \frac{2(L_{MF} + L_{NF})}{(t_{M2} - t_{M1}) + (t_{N2} - t_{N1})} = \frac{2L_{MN}}{\Delta t_M + \Delta t_N} \quad (4)$$

代入到式(3)，可得修正波速后的故障距离：

$$\begin{cases} L_{MF} = L_{MN} - \Delta t_M \times v' / 2 \\ L_{NF} = L_{MN} - \Delta t_N \times v' / 2 \end{cases} \quad (5)$$

该方法利用了线路两端的装置记录信息计算本次扰动下的实时速度，由式(4)可知，修正波速仅使用两端接收信息的时间差，两端并无严格的时间同步要求。

### 2.3 零模和线模波速差原理辅助判据

考虑到线路网络结构的复杂化、扩大化趋势，同时考虑故障位置的不确定性，对于部分特殊情况，如远距离故障时，出现多个反极性反射波，可能得出错误的测距结果，因此在实际工程允许条件下，本文引入辅助判据，对极性原理寻找对端母线反射波的方法进一步补充。

依据相模变换原理，行波可分解为线模分量和零模分量。零模分量具有较强的依频特性，随着传播距离的增加，波速单调非线性地衰减，而线模波速比较稳定，通过零模和线模分量中的初始波头到达检测点的时间差，初步估算故障距离，如式(6)所示。

$$L_X = \frac{v_1 v_0 \Delta t_{01}}{v_1 - v_0} \quad (6)$$

式中： $v_0$ 、 $v_1$  分别为初始波头的零模和线模的波速度； $\Delta t_{01}$  为零模和线模分量到达检测点的时间差。

因此可以估算图 3 中波头  $t_{M2}$  所代表的距离为

$$t_{M2} \cdot v_1 = 2(L_{MN} - L_{MF}) = 2(L_{MN} - L_{MX}) \quad (7)$$

式中,  $L_{MX}$  为根据 M 端初始波头的零模、线模波速差估算的故障距离。

因此能够得出对端母线反射波与初始行波到达检测点的时间差为

$$\Delta t_M = t_{M2} - t_{M1} = \frac{2(L_{MN} - L_{MX})}{v_1} \quad (8)$$

这里使用的为初始波头的零模分量, 波速衰减相对反射波较小, 但由于波速衰减呈非线性, 所以实际测距中式(8)存在一定的误差。文献[21]提出使用神经网络算法进行训练学习得到较准确的零模波速。

同理, 对于 N 端有

$$\Delta t_N = t_{N2} - t_{N1} = \frac{2(L_{MN} - L_{NX})}{v_1} \quad (9)$$

以 M 端为例, 设初始波头到达时间为  $t_0$ , 在 M 端记录的波形中, 标定  $(t_0 + \Delta t_M)$  时间点前后一定范围内的波头, 结合上文所述的极性判据, 即对端母线反射波与本端检测到的初始波头的极性相反, 依次对比这若干个波头与初始波头的极性, 第一个与初始波头极性相反的波头即为对端母线反射波, 再根据式(5)精确地计算故障位置。N 端采用同样的方式确定对端母线反射波之后进行故障定位。

不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法的实现流程如图 4 所示, 是以线路 MN 的一端 M 端为例进行说明的。

### 3 算例仿真与分析

为了验证本文提出的故障测距方法的精度, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 5 所示的 500 kV 电网系统进行仿真验证。仿真系统参数: 系统 G1 正序阻抗  $1.2857+j55.637 \Omega$ ; 零序阻抗  $2.8764+j37.1267 \Omega$ ; 系统 G2 正序阻抗  $1.6714+j35.539 \Omega$ ; 零序阻抗  $4.7+j37.9784 \Omega$ ; 线路单位正序阻抗  $0.01808+j0.27747 \Omega/\text{km}$ ; 零序阻抗  $0.23084+j0.9728 \Omega/\text{km}$ ; 单位零序电容  $0.012917 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 线路长度如图 5 所示。

仿真过程中, 设置不同故障位置(距离 M 端 5 km 的  $F_1$ 、距离 M 端 40 km 的  $F_2$ 、距离 M 端 90 km 的  $F_3$ )和不同故障类型( $AG(R_g=0 \Omega)$ 、 $AG(R_g=300 \Omega)$ 、AB、ABG、ABC)分别比较故障测距结果。

#### 1) 极性比较及对端反射波的标定仿真

设置  $F_2$  点 0.2 s 时刻发生单相接地故障, 线路两端均安装行波测距装置, 对电流行波波头进行检

测。计算各波头的时间代表的距离, 推算波头来源, 同时根据零模和线模波速差原理估算对端反射波在波形上的位置, 对比图 2 线路 MN 在出现扰动后两端检测的波头极性, 如图 6 所示。

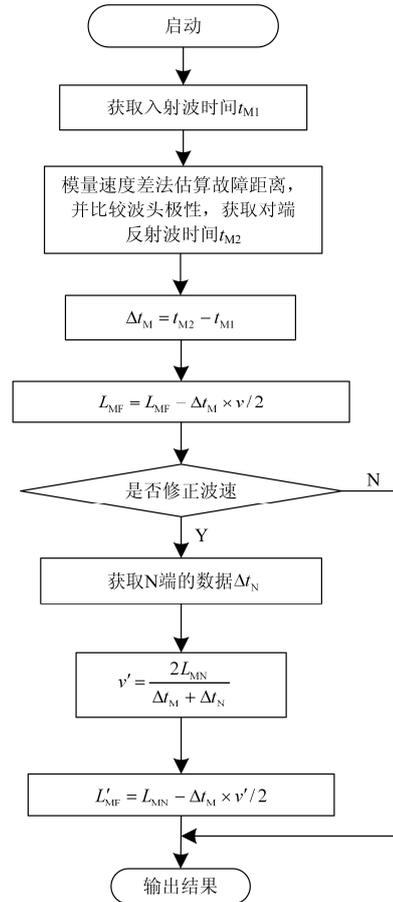


图 4 算法流程图(以 M 端为例)

Fig. 4 Flow chart of algorithm (taking terminal M for example)

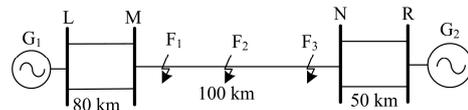


图 5 仿真系统图

Fig. 5 Simulated power system

M 端线模和零模分量的初始波头到达检测点的时间差为  $1.07 \mu\text{s}$ , 经训练好的神经网络估算出零模的波速度为  $29.76191 \times 10^4 \text{ km/s}$ , 代入式(6)估算出故障距离为 39.77 km, 代入式(8)可以计算出 N 端母线反射波与 M 端初始波头的时间差为  $410.19 \mu\text{s}$ , 在线模分量波形图中距离初始波头  $300 \sim 500 \mu\text{s}$  范围内, 只有一个波头并且极性同初始波头相反, 即为 N 端反射波, 如图 6 所示, 同理可以找到 M 端反射

至 N 端的波头。

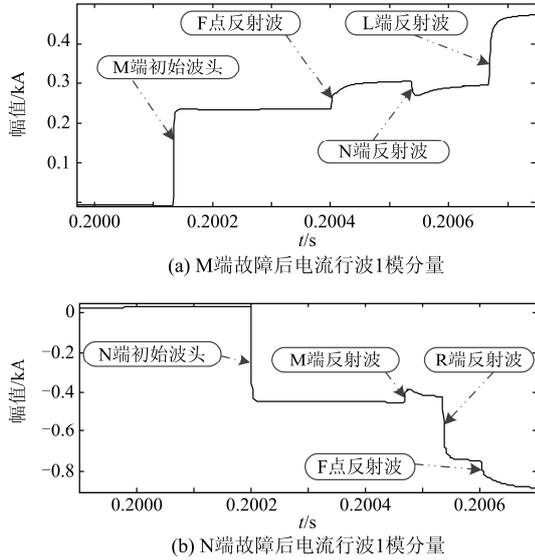


图 6 故障电流波头极性比较

Fig. 6 Polarity comparison of fault current

结合图 6 和图 2 分析可知, M 端初始波头  $i_1$  与 N 端初始波头  $i_2$  极性相反, 同时  $i_1$  与故障点的反射波  $i_3$  极性相同, M 端初始波头  $i_1$  与背侧系统的反射波  $i_4$  极性相同, M 端初始波头  $i_1$  与 N 端的反射波  $i_5$  极性相反。

### 2) 实测波速仿真

输电线路所处的地形环境复杂, 随着环境的变化, 线路参数相应地会有变化, 大地渗透率反映了土壤的物理特性, 影响着线路的参数, 砂石地、沼泽地、山区丘陵地带具有不同的渗透率, 设置不同渗透率改变线路参数, 在  $F_2$  点发生单相接地故障, 对比波速并分析其对测距的影响。

由表 1 结果可知, 线路参数对波速有影响, 进而对故障测距结果产生较大的影响。

表 1 不同渗透率下的波速比较

Table 1 Wave velocity under different permeability

相对渗透率	修正波速	光速	修正波速与光速的差值
1.00	2990.030	2997.925	7.895
1.02	2968.730	2997.925	29.195
1.05	2923.940	2997.925	73.985

注: 表 1 中速度单位为  $10^5$  m/s

### 3) 不同故障位置的定位

分别设置  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  发生单相接地故障, 利用式(4)修正实时波速, 基于 M 端的测距结果进行对比分析, 结果如表 2 所示。其中本文提出的方法分

为不经过波速修正和经过波速修正两种, 同时对比文献[2]提到的测距方法。

表 2 不同故障点的测距误差

Table 2 Location error of different fault position

故障点	本文方法误差/km		文献方法误差/km	
	无波速修正	修正波速	双端法	单端法
$F_1$	-0.113	-0.023	0.033	-1.13
$F_2$	0.226	0.024	0.180	0.570
$F_3$	-0.094	-0.095	0.206	0.216

由表 2 结果可知, 不经波速修正测距存在较大误差, 修正波速后提高了测距精度。对比文献[2]中单端法和双端法, 本文提出的经修正波速后测距方法精度较高。

### 4) 不同故障类型故障测距

分别设置  $F_2$  点发生单相接地故障、相间故障、相间接地故障和三相对称故障, 同时考虑单相接地故障下的不同接地电阻。基于 M 端的测距结果对比 4 种测距方法, 如表 3 所示。

由表 3 结果可知, 本文提出的修正波速故障测距方法不受故障类型的影响, 不受过渡电阻的影响(仅影响行波的能量值, 不影响极性); 对比文献方法, 测距精度较高。

表 3 不同故障类型的测距误差

Table 3 Location error of different fault types

故障类型	本文方法误差/km		文献方法误差/km	
	无波速修正	修正波速	双端法	单端法
AG( $R_g=0\Omega$ )	0.226	0.024	0.180	0.570
AG( $R_g=300\Omega$ )	0.215	0.032	0.159	0.490
AB	0.030	0.050	0.818	0.238
ABG	0.065	0.176	0.080	0.214
ABC	0.057	0.275	0.403	0.047
ABCG	0.360	0.037	0.037	0.223

综上仿真结果, 通过与传统的单端测距法和时间同步型双端法测距结果进行对比, 本文算法在不经过波速修正情况下, 仅依据单端信息测距的误差不大, 但能够在不依赖双端对时的基础上修正波速度, 使得测距精度更高。

## 4 结语

本文提出一种基于行波极性原理修正波速的单端行波测距算法。

1) 由波头折反射系数出发, 从波头信息中找到对端母线反射波与初始行波到达时间差值, 从而构

成测距算法, 对比依靠扰动点反射波构成测距算法的单端测距有较高精度。

2) 利用无严格对时要求的双端数据计算修正波速, 减小测距中波速的影响, 同时不依赖时间同步, 消除双端对时可能造成的误差, 效果良好。

3) 利用零模和线模的波速估算故障位置, 并结合极性原理查找对端母线发射波, 定位更加可靠、精确。

## 参考文献

- [1] 韩平, 徐岩. 电力系统广域后备保护综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 53-57.  
HAN Ping, XU Yan. Overview of wide-area backup protection algorithm in power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 53-57.
- [2] 刘慧海, 张晓莉, 姜博, 等. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 145-149.  
LIU Huihai, ZHANG Xiaoli, JIANG Bo, et al. Testing and evaluation method of fault location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [3] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.  
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [5] 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.
- [6] 毛王清, 杨琦, 杨明玉. 故障极识别与故障测距一体化的智能算法[J]. 陕西电力, 2015, 43(6): 43-46.  
MAO Wangqing, YANG Qi, YANG Mingyu. Intelligent algorithm integrating fault pole identification and fault location[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6): 43-46.
- [7] 牛睿, 梁军, 张峰, 等. 基于可变行波辨识时窗的单端故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 56-64.  
NIU Rui, LIANG Jun, ZHANG Feng. Single-ended fault location method based on variable time windows for traveling wave identification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 56-64.
- [8] 徐铭铭, 肖立业, 林良真, 等. 基于零模行波衰减特性的配电线路单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 397-404.  
XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 397-404.
- [9] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 260-265.  
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 260-265.
- [10] 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.
- [11] 范国琛, 朱永利, 史金茂, 等. 基于 Kaiser 自卷积窗的相位比较式输电线路故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 143-148.  
FAN Guochen, ZHU Yongli, SHI Jinmao, et al. Fault location scheme for transmission lines using Kaiser self-convolution windowed FFT phase comparison[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 143-148.
- [12] 胡汉梅, 黄景光, 刘会家. 基于小波分析的行波相位比较法接地故障选线[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 168-172.  
HU Hanmei, HUANG Jingguang, LIU Huijia. Grounding failure detection by comparing phases of traveling wave wavelets coefficients[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 168-172.
- [13] ROBSON S, HADDAD A, GRIFFITHS H. Fault location on branched networks using a multi-ended approach[J]. IEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1955-1961.
- [14] 宋国兵, 靳东晖, 靳幸福, 等. CSC-HVDC 输电线路单端行波自动故障定位方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 588-596.  
SONG Guobing, JIN Donghui, JIN Xingfu, et al.

- Automatic fault location method for traveling wave on HVDC transmission line using single-terminal data[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 588-596.
- [15] 董杏丽, 董新洲, 张言苍, 等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 34(11): 11-16.
- DONG Xingli, DONG Xinzhou, ZHANG Yancang, et al. Directional protective relaying based on polarity comparison of travelling wave by using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 34(11): 11-16.
- [16] 张峰, 梁军, 张利, 等. 奇异值分解理论和小波变换结合的行波信号奇异点检测[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 57-60.
- ZHANG Feng, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Traveling wave signal processing method for singularity detection based on singularity value decomposition and wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 57-60.
- [17] 林圣, 何正友, 陈鉴, 等. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 258-264.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, CHEN Jian, et al. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of traveling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 258-264.
- [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] 彭向阳, 毛先胤, 李鑫, 等. 架空输电线路故障分布式行波定位误差分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2706-2713.
- PENG Xiangyang, MAO Xianyin, LI Xin, et al. Errors analysis of overhead transmission line fault location based on distributed travelling-wave[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2706-2713.
- [20] 束洪春, 曹璞璘, 董俊. 考虑线路参数依频特性的特高压半波长交流输电线路行波传播分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 716-723.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, DONG Jun. Analysis of traveling wave in UHV half-wavelength transmission lines considering frequency dependent characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 716-723.
- [21] 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. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-07-04

作者简介:

李振兴(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: lzx2007001@163.com

吴李群(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: wuliqunde@126.com

(编辑 葛艳娜)