

DOI: 10.7667/PSPC180026

# 基于 FastICA 的输电线路行波故障测距方法

夏远洋<sup>1,2</sup>, 李啸骢<sup>3</sup>, 陈飞翔<sup>2</sup>, 何勇<sup>2</sup>, 尹永利<sup>2</sup>, 王东泽<sup>2</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司锦屏水力发电厂, 四川 西昌 615050; 3. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为了解决输电线路故障信号存在抵偿效应导致测距精度不足的问题, 建立线性瞬时混合的线路模型。采用快速独立成分分析法(FastICA)对采集的多通道线路故障原始数据(观测信号)进行相关分析, 将表征故障特征的分量逐一提取。以能量比函数对故障分量进行求解, 设定能量比阈值以定位故障时刻, 实现基于行波原理的线路精确测距。大干扰条件下故障特征受噪声信号干扰, 会对测距精度产生影响。对此, FastICA 算法能将噪声信号从故障原始数据中分离, 避免噪声对测距过程产生的影响, 进一步提高测距精度。仿真实验证明: 所提出的方法能有效避免噪声干扰的影响, 能适应大干扰条件下的故障测距, 具有较好的抗干扰性。

**关键词:** FastICA; 抵偿效应; 能量函数; 行波测距; 鲁棒性

## FastICA based traveling wave fault location algorithm for transmission lines

XIA Yuanyang<sup>1,2</sup>, LI Xiaocong<sup>3</sup>, CHEN Feixiang<sup>2</sup>, HE Yong<sup>2</sup>, YIN Yongli<sup>2</sup>, WANG Dongze<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Jinping Hydropower Plants, Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Xichang 615050, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To solve the problem of unsatisfactory accuracy of fault location caused by the offset effect of transmission line fault signals, a linear transient mixed line model is established. The fast independent component analysis (FastICA) is used to analyze the original data (observed signals) of the collected multi-channel faults and extract the components that characterize the fault features one by one. The energy ratio function is used to solve the fault component, and the energy ratio threshold is set to locate the fault moment to realize the line precise measurement based on the traveling wave principle. The influence of fault characteristics on the accuracy of fault location under the condition of large interference is disturbed by noise signals. In this regard, FastICA algorithm can separate the noise signal from the original data of the fault to avoid the influence of noise on fault location process and further improve the accuracy of fault location on transmission lines. The simulation results show that the proposed method can effectively avoid the influence of noise interference, adapt to fault location under large interference conditions and have good anti-interference ability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267001), Guangxi Natural Science Foundation (No. 2014GXNSFAA118338), Guangxi Scientific Research and Technical Development Project (No. 14122006-29) and Nanning Scientific Research and Technical Development Project (No. 20165186).

**Key words:** FastICA algorithm; compensation effect; energy function; traveling wave distance measurement; robustness

## 0 引言

高压输电线路跳闸时, 故障信号如电流等存在

多成分混合, 特性复杂, 由于各信号成分的方向不一, 方向相反的各成分之间存在互相抵偿的现象, 削弱了信号的故障特征, 称为抵偿效应。抵偿效应使得表征故障的信号特征提取变得困难, 也给线路故障测距带来了一定的障碍。同时由于继电器动作等情况, 线路跳闸时可能产生干扰信号, 对故障测距而言即为噪声。以上两方面原因是线路故障测距困难的重要因素。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51267001); 广西自然科学基金项目资助(2014GXNSFAA118338); 广西科学研究与技术开发计划项目资助(14122006-29); 南宁市科学研究与技术开发计划项目资助(20165186)

关于线路故障测距, 国内外学者做了广泛研究。文献[1]对线路测距各种方法进行梳理介绍。从原理上, 文献[2-4]采用小波变换法, 文献[5-8]则基于行波极性或相位等判据进行综合测距, 文献[9-10]是基于行波频率的方法。文献[11-12]基于时域对信号进行处理, 通过数值计算进行测距。文献[13]将行波测距装置记录的电流行波数据分段, 然后分别对两段数据进行正弦拟合计算, 之后根据其正弦拟合度以及幅值计算数据模态特征值, 并进行阈值判断以实现故障测距。文献[14]对测取的行波信号进行奇异值分解, 并用模极大值以检测奇异点, 进而实现测距。文献[15]提出了零模检测波速度与故障距离关系曲线的关系, 并用以实现的迭代算法。文献[16-17]将不同原理的方法进行融合实现测距。

上述诸多方法通常因各种不足而应用有限, 行波法经过大发展后成为广泛使用的方法, 而行波法中小波变换方法目前使用最为普遍, 其对奇异信号检测上表现突出, 进而在故障测距中能实现很高的精度。然而, 该法对信号奇异性的灵敏性, 对行波测距的稳定性产生了影响。尽管高效的滤波器能够消除大部分类型的噪声, 但并不能完全消除噪声干扰对小波法的影响。

为了避免噪声的影响, 本文提出一种基于 FastICA 原理的测距方法。FastICA 方法的处理对象为时域测距信号, 对线路故障行波电流进行分解, 将故障稳态分量、暂态分量及噪声信号从观测信号中一一分离, 处理后线路故障分量特征明显, 以线路分离变量的能量比为判据, 可实现故障线路精确测距。由于噪声信号同时被分离, 该方法可靠, 不受干扰信号影响。

## 1 快速独立成分分析原理

### 1.1 FastICA 算法

FastICA 算法属于盲源分离的独立成分分析(ICA)算法的一种, 是加速收敛的 ICA 算法。与普通 ICA 算法相比, FastICA 算法具有收敛速度快、不需选择步长、对源信号约束条件相对较低、计算简单、所需内存空间小等特点。

FastICA 又称为固定点算法, 是进行 ICA 处理的一种快速算法。FastICA 是基于非高斯性的最大化原理, 使用固定点迭代理论寻找  $\mathbf{y}=\mathbf{W}^T\mathbf{x}$  的非高斯性最大值, 采用牛顿迭代算法进行迭代, 以最大化负熵函数为目标函数, 如式(1)。

$$J(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^p k_i \{E[G_i(\mathbf{y})] - E[G_i(\mathbf{v})]\}^2 \quad (1)$$

式中:  $k_i$  为一正常数;  $\mathbf{y}$  是具有零均值和单位方差的输出变量;  $\mathbf{v}$  为一具有零均值及单位方差的高斯随机变量;  $G$  为一非平方非线性函数。经牛顿法求解该目标函数的最优解即得迭代公式。

$$\mathbf{w}_{n+1} = E\{\mathbf{X}g(\mathbf{w}_n^T\mathbf{X})\} - E\{g'(\mathbf{w}_n^T\mathbf{X})\}\mathbf{w}_n \quad (2)$$

$$\mathbf{w}_{n+1}^* = \frac{\mathbf{w}_{n+1}}{\|\mathbf{w}_{n+1}\|} \quad (3)$$

式(2)中,  $g$  为  $G$  的导数; 式(3)是对  $\mathbf{w}_{n+1}$  的归一化处理, 即白化。根据式(2)重复进行迭代, 便可逐一分离出  $\mathbf{W}$  的各个分量。

FastICA 算法能在先验知识很少的情况下实现盲源分离, 同时算法所得估计信号  $\mathbf{Y}$  中的变量  $\mathbf{y}$  与源信号  $\mathbf{S}$  中的变量  $\mathbf{s}$  对应关系具有随机性。

### 1.2 约束条件

对于高压输电线路而言, 线路的参数分布均匀, 其数学模型为线性瞬时混合模型, 如图 1 所示。在源信号(观测信号的构成成分)和传输信道未知的条件下, 根据源信号的统计特性, 仅由观测信号来恢复或分离出源信号。

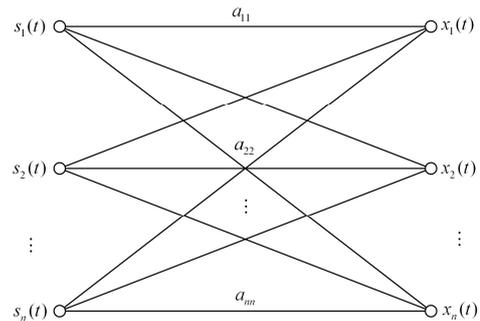


图 1 信号混合模型

Fig. 1 Model of mixed signals

FastICA 算法在信号分离方面表现出良好的特性, 展示出巨大的应用潜力。然而, 满足 FastICA 的约束条件, FastICA 算法才能适用。

输电线路发生的故障, 本质上是电力系统从一个稳态向故障后的稳态过渡的过程, 而过渡过程出现的暂态过程, 是系统原稳态无法维持而产生一系列电磁暂态过程的结果。故障过程中, 电力信号成分主要包含变化的稳态分量、故障暂态分量和噪声信号等。

对于线路故障, 各分量的激励机制完全不同, 从统计的意义上, 对应的各分量在统计上互相独立。由以上分析, 电力信号主要包括稳态分量、故障暂态分量和噪声, 可以设置三路观测通道, 即可满足要求。很显然, 稳态分量、故障暂态分量和噪声均不满足高斯分布。虽然这三种信号并不一定是零均值, 但是可通过白化处理使信号满足要求。因此根

据约束条件<sup>[18]</sup>, 满足 FastICA 算法的条件, 故 FastICA 算法适用于电力线路的故障测距。

## 2 基于 FastICA 的输电线路测距算法

### 2.1 电力线路故障信号中的抵偿效应

由于线路的故障是从一个稳态向另一个稳态变化的过程。根据楞次定律, 回路中总会感应出阻止系统状态变化的电动势, 并减缓状态变化过程, 但并不能完全抵消状态变化过程。

在这个过程中, 电力信号中必然存在着分量之间的抵偿效应。主要体现在: 电路状态之间的变换, 必然在回路感应出一个抑制变化趋势的感生分量, 而抑制的本质是感生出一个能够削弱或补偿这种变化趋势的变量, 即方向相反。

FastICA 算法能够将各分量从复杂信号中逐一分离, 还原信号的本质特征, 能够避免信号中抵偿效应。对于故障线路的测距而言, FastICA 算法能够避免由于信号成分的互相抵偿造成的故障特征弱化, 使故障信号的特征更加明显且易于检测, 从而提高线路故障测距的精度。

### 2.2 含噪信号的 FastICA 分离

线路发生短路时, 观测到的信号中通常包含稳态分量、暂态分量以及噪声等多种成分。选取工频正弦波、随机脉冲信号以及白噪声来模拟电力系统的故障信号, 研究 FastICA 算法在大干扰条件下故障信号的处理, 如图 2—图 4 所示。

由图 2—图 4 可知: 1) FastICA 能将源信号各分量逐一分离; 2) 分离信号的幅值、符号等具有不确定性; 3) 分离信号保留源信号的波形特征, 即波形仅发生伸缩、翻转等变换, 波形特征基本保持。

经过 FastICA 算法分离后的故障行波波形与实际波形存在幅值、符号等变化, 但波形所包含的故障特征信息却被很好地保存, 且分离波形故障特征明显, 验证了 FastICA 算法的性能。

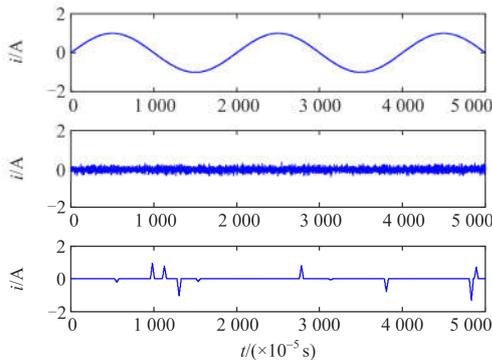


图 2 原始信号

Fig. 2 Original signals

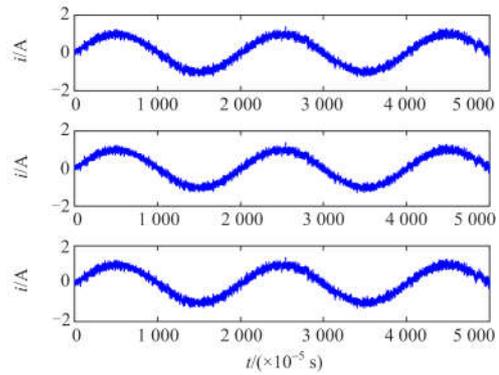


图 3 混合信号

Fig. 3 Mixed signals

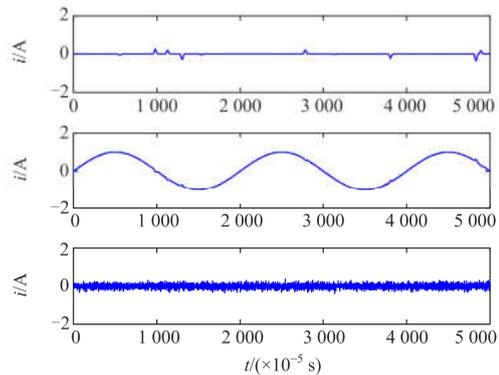


图 4 FastICA 算法分离后的信号

Fig. 4 Separated signals by FastICA algorithm

### 2.3 能量比函数

对于 FastICA 算法分离出的故障信号, 能量比函数能够高效地分离信号的故障特征<sup>[19]</sup>。设信号  $x(t)$  在时间段  $[0, T]$  上的有效值  $x_R$  的定义为

$$x_R = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (4)$$

能量比法以固定时窗内的信号两部分能量的有效值之比来确定目标信号的突变, 其时窗大小固定, 计算时可根据采样的频率换算为采样的点数。能量比函数的计算公式为

$$P = \left[ \sum_{t=T_0+T/2}^{T_0+T} x^2(t) \right]^{1/2} / \left[ \sum_{t=T_0}^{T_0+T/2} x^2(t) \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中:  $T$  为时窗总长度;  $P$  为时窗内后半部分与前半部分的能量比;  $T_0$  为时窗的起点。从  $T_0$  开始, 逐点移动时窗, 直至信号的终点, 信号能量比的变换完成。时窗宽度的选择, 既要能真实反映信号奇异性的存在, 又要具备足够的准确性, 因而, 需综合考虑两方面因素, 来保证测距的精度。

### 2.4 基于 FastICA 的输电线路测距方法

行波测距分为单端法和双端法。采用单端法测

距, 由于故障行波的反射, 反射波给行波波头的识别带来困难, 可能造成测距不准确。在进行输电线路测距时, 选取 D 型行波双端测距法。其测距公式如式(6)、式(7)所示。

$$d_M = \frac{l + (t_{1M} - t_{1N})v}{2} \quad (6)$$

$$d_N = \frac{l + (t_{1N} - t_{1M})v}{2} \quad (7)$$

式中:  $t_{1M}$ 、 $t_{1N}$  分别为 M、N 端首波头对应时刻;  $l$ 、 $v$  分别为线路全长和波速。

借助 FastICA 算法, 能将故障信号中的稳态分量、故障暂态分量、噪声分离, 避免了故障信号各成分能量的抵消和耗散, 使输电线路的故障特征更加明显。

由此, 基于 FastICA 的输电线路行波测距方法具体步骤表述如下, 如图 5 所示。

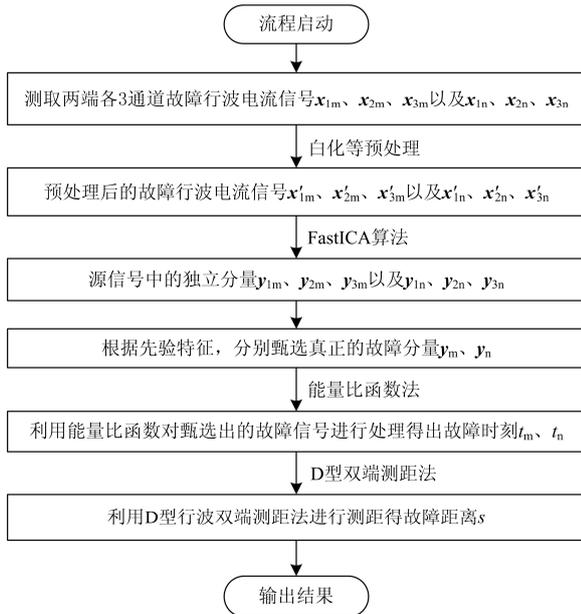


图 5 基于 FastICA 的输电线路行波测距流程图

Fig. 5 Flow chart of traveling wave fault location for transmission lines based on FastICA algorithm

- 1) 设置 3 个观测通道, 测取故障行波测值  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ , 对数据进行预处理, 然后进行 FastICA 分解, 得出各分量  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ ;
- 2) 根据故障信号的先验特征, 对分解出的分量进行辨识, 在分解信号中甄选出真正的故障信号  $y$ ;
- 3) 设置时窗宽度、阈值等参数, 利用式(5)对甄选出故障信号进行处理, 得出线路故障发生的时刻  $t$ ;
- 4) 按照式(6)和式(7), 对输电线路故障位置进行计算, 实现输电线路的故障测距。

### 3 基于 FastICA 的测距算法仿真验证

#### 3.1 仿真模型

为验证基于 FastICA 的信号能量比函数算法的有效性, 建立输电线路 ATP-EMTP 仿真模型。仿真采用包含 200 km 输电线路的 500 kV 系统, 接地电阻为 10  $\Omega$ 。M 端的系统阻抗为:  $Z_{M1} = 6.139 + j529.8 \Omega$ ,  $Z_{M0} = j130.6 \Omega$ ; N 端的系统阻抗为:  $Z_{N1} = 17.56 + j46.11 \Omega$ ,  $Z_{N0} = 1.6 + j65.13 \Omega$ ; 电力线路的参数为:  $r_1 = 0.0279 \Omega/\text{km}$ ,  $r_0 = 0.253 \Omega/\text{km}$ ,  $l_1 = 0.882 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $l_0 = 2.33 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.01306 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $c_0 = 0.0085 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

仿真时间设置为 0.05 s, 接地故障时刻设置为 0.03 s, 采样频率设置为 1 MHz。考虑到电力系统中存在各种噪声的影响, 在系统中注入白噪声。在线路首末端分别设置 3 个观测通道, 测取线路故障行波电流进行验证。

#### 3.2 仿真结果

建立输电线路 ATP-EMTP 仿真模型, 在大干扰条件下对不同接地方式下输电线路行波故障测距进行仿真试验。仿真分别对本文所提 FastICA 方法和小波变换方法在大干扰条件下进行测试, 仿真测试的结果如表 1、表 2 所示。

表 1 大干扰条件下 FastICA 算法的故障测距结果  
Table 1 Results of fault location by FastICA algorithm under large interference

故障点/km	AG	BC	BCG	ABCG
5	5.125 9	5.125 9	5.125 9	5.125 9
20	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
40	40.188 1	40.188 1	40.188 1	40.188 1
60	60.223 6	60.223 6	60.223 6	60.223 6
80	80.259 1	80.259 1	80.259 1	80.259 1
100	99.852 7	100.294 6	100.147 3	100.294 6
120	119.888 2	119.740 9	119.888 2	119.888 2
140	139.776 4	139.776 4	139.776 4	139.776 4
160	159.811 9	159.811 9	159.811 9	159.811 9
180	179.847 4	179.847 4	179.847 4	179.994 8
195	194.874 1	194.874 1	194.874 1	194.874 1

仿真结果表明, 在大干扰条件下, 本文所提方法能够实现输电线路发生的各种故障的准确测距, 测距误差均在 500 m 以内。经过大量仿真测试: 在小干扰条件下, FastICA 算法与小波变换法均能实现较精确测距; 在大干扰条件下, 相较于后者, FastICA 算法的测距结果更稳定。

表 2 大干扰条件下小波变换法的故障测距结果  
Table 2 Results of fault location by wavelet transform algorithm under large interference

故障点/km	AG	BC	BCG	ABCG
5	1.442 9	4.978 6	5.715 2	4.831 3
20	22.951 6	20.005 2	23.099 0	257.485 1
40	21.331 1	40.040 8	46.080 9	39.893 4
60	69.210 1	60.076 3	69.210 1	59.929 0
80	92.339 4	80.111 8	92.339 4	79.964 5
100	100.000 0	99.852 7	100.000 0	100.000 0
120	126.223 0	119.888 2	120.035 5	120.035 5
140	152.445 9	139.923 7	140.071 0	140.071 0
160	178.668 9	159.959 2	159.959 2	160.106 6
180	204.891 8	179.994 8	179.994 8	180.142 1
195	224.485 4	195.021 4	198.456 8	195.021 4

### 3.3 算法的鲁棒性研究

通过调节干扰信号的增益系数  $k$ 、接地电阻  $R_g$  来模拟不同噪声强度、不同接地工况对测距结果的影响<sup>[20]</sup>。仿真系统参数如前所述，以线路 20 km 处发生接地故障为例，在不同噪声强度和不同接地电阻工况下模拟线路单相接地故障跳闸，对本文所提方法进行仿真研究，仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同噪声强度下 FastICA 算法的故障测距结果  
Table 3 Results of fault location by FastICA algorithm under different noise intensities

噪声强度	接地电阻 $R/\Omega$	不同故障类型的测距结果			
		AG	BC	BCG	ABCG
$k=0.5$	10	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	100	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	1 000	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	10 000	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
$k=5.0$	10	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	100	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	1 000	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6
	10 000	20.152 6	20.152 6	20.152 6	20.152 6

由于 FastICA 算法能将噪声等干扰信号从复杂观测信号中分离，从原理上避免噪声等干扰信号的影响。仿真结果表明，本文所提方法测距过程不受干扰信号影响，抗干扰能力很强；同时，对于不同接地电阻的工况，该方法均能得到准确的测距结果。

以上结论同时验证了：基于 FastICA 的信号能量方法可将信号中各成分分量进行一一分离，消除或减少各成分之间的相互抵消和补偿效应，使得故障特征明显；从原理上将噪声等干扰信号分离，抗干扰能力强；在大干扰情况下，该方法依然能实现精确测距，为线路故障行波测距提供了新的思路。

## 4 结论

本文探讨了 FastICA 算法应用于输电线路故障测距的可行性，并通过 ATP-EMTP 仿真进行验证。大量仿真结果表明，基于 FastICA 的行波测距方法具有以下特点：

1) 基于 FastICA 的测距算法对线路故障行波电流分解，避免各成分之间的抵消或补偿，使得线路故障特征明显，故障特征易于获取；

2) 基于 FastICA 的测距算法能将干扰信号从故障信号中分离，从原理上避免了噪声等干扰信号的影响，抗干扰能力强；

3) 在大干扰条件下，本文所提方法相较于小波法更加稳定，因此具有更强的普适性。

### 参考文献

- [1] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-154.  
HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-154.
- [2] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 62-65.  
QIN Jian, PENG Liping, WANG Hechun. Single terminal methods of traveling wave fault location in transmission line using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65.
- [3] 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.
- [4] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.  
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [5] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.  
QIN Jian. Study on single terminal travelling wave fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 65-70.
- [6] 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.
- [7] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 76-81.  
WEI Shaokang, CHEN Ping, JIANG Yinghui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 76-81.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 7-13.  
LIANG Rui, JIN Zheng, LIU Jianhua. A new single-ended traveling waves fault location method based on characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 7-13.
- [11] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147.  
WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [12] 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.
- [13] 张可, 张凌, 胡燕玲, 等. 输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 58-64.  
ZHANG Ke, ZHANG Ling, HU Yanling, et al. Transmission line traveling wave data automatically screening method based on sine fitting[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 58-64.
- [14] 向强铭, 王茜, 陈靖秋, 等. 基于奇异值分解理论的双端行波故障测距的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 14-18.  
XIANG Qiangming, WANG Xi, CHEN Jingqiu, et al. Study of two-terminal traveling wave fault location based on SVD theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 14-18.
- [15] 刘朕志, 舒勤, 韩晓言, 等. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 88-93.  
LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 88-93.
- [16] 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. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69.
- [17] 王奎鑫, 祝成, 孙佳佳, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-86.  
WANG Kuixin, ZHU Cheng, SUN Jiajia, et al. Research of combined traveling wave's fault location method on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82-86.
- [18] 余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] 商立群, 夏远洋. 基于能量比函数的串补线路行波故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5228-5234.  
SHANG Liqun, XIA Yuanyang. Energy ratio function-based traveling wave fault location for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5228-5234.
- [20] 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 on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.

收稿日期: 2018-01-06; 修回日期: 2018-02-11

作者简介:

夏远洋(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 电力线路继电保护技术; E-mail: xiayuanyang1@163.com

李啸聪(1959—), 男, 通信作者, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计, 电力系统动态仿真及计算机实时控制, 电力系统分析与控制, 电力系统非线性控制; E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn

陈飞翔(1973—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为水电站自动化. E-mail: chenfeixiang@ylhdc.com.cn

(编辑 魏小丽)