

DOI: 10.7667/PSPC151101

# 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法

高艳丰<sup>1,2</sup>, 朱永利<sup>1</sup>, 闫红艳<sup>2</sup>, 陈旭<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 河北工程大学水电学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 针对行波故障测距技术中行波检测准确性和行波波速对测距精度的影响, 提出一种新的双端行波故障定位方法。首先, 介绍了变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)和 Teager 能量算子(Teager Energy Operator, TEO)的特点, 并将 VMD 与 TEO 相结合应用于故障行波波头的检测。其次, 在双端行波故障测距原理的基础上, 根据故障行波的传播路径, 推导出一种不受行波波速和线路实际长度变化影响的行波故障测距新算法。该算法不需要检测行波反射波的波头, 测距原理简单。最后, 通过 EMTDC 仿真实验验证方法的正确性和准确性。大量的仿真结果表明该方法行波波头检测效果较好, 测距准确度较高。

**关键词:** 输电线路; 行波检测准确性; 行波波速; VMD; TEO; 双端行波测距法

## A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave

GAO Yanfeng<sup>1,2</sup>, ZHU Yongli<sup>1</sup>, YAN Hongyan<sup>2</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** For the influence of traveling-wave detection accuracy and wave velocity on the location accuracy in traveling wave fault location technology, a new double-terminal traveling wave fault location method is proposed. First, the characteristics of Variational Mode Decomposition (VMD) and Teager Energy Operator (TEO) is introduced and applied to traveling wave detection. Second, by analyzing the propagation path of fault traveling wave, a new fault location algorithm that avoiding traveling wave velocity influence is deduced based on the principle of double-terminal traveling wave fault location, the wave head of traveling wave reflection does not need to detect using this algorithm, and its fault location principle is simple. Finally, EMTDC simulations prove that the method is correct and accurate. A lot of simulations results show that this method has better effect on traveling wave detection, and location accuracy is higher.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014xs74).

**Key words:** transmission line; traveling wave detection accuracy; traveling wave velocity; VMD; TEO; double-terminal traveling wave location method

## 0 引言

输电线路故障测距技术是电力系统发展过程中的一个研究热点。线路故障后快速、准确的故障定位可以帮助工作人员分析故障原因, 及时排除故障恢复供电, 减少巡线所需花费的时间和精力, 降低停电造成的社会经济损失。近年来, 国内外专家学者提出了许多故障定位的原理和算法<sup>[1]</sup>, 有的已经

制成装置, 但测距精度仍有待进一步提高。因此, 研究输电线路故障测距具有重要的现实意义。

近年来, 行波法在输电线路故障测距中得到了广泛的应用。行波法根据信息来源可分为单端行波法<sup>[2-3]</sup>和双端行波法<sup>[4-5]</sup>。单端行波法在线路的一侧设置检测元件, 利用故障行波波头从测量点到故障点往返一次的时间差和行波波速计算故障位置。双端行波测距是利用故障初始行波到达线路两端检测点的时间差和波速计算故障位置。单端行波法需要考虑行波的折反射、母线端的出线数等因素, 故障行波的反射波由于衰减有时检测困难, 易导致

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2014xs74)

定位失败<sup>[6]</sup>。双端行波法仅使用故障初始行波, 易于检测, 准确度高, 但两端测量点需要配备通信通道, 且要求时钟高度同步。全球定位系统(Global Positioning System, GPS)技术及 GPS 时钟修正技术的发展, 使得时间同步精度已达到纳秒级<sup>[7]</sup>, 从故障测距的可靠性、准确性出发, 一般采用双端行波法。双端行波法的关键之一是准确记录电流或电压行波到达线路两端的时间。当前行波检测方法主要有小波变换 (Wavelet Transform, WT)<sup>[8-9]</sup>和希尔伯特-黄变换(Hilbert- Huang Transform, HHT)<sup>[10]</sup>两种。故障产生的行波是一种非平稳变化的高频信号, 文献[8-9]等利用小波模极大值理论对故障信号进行奇异性检测, 确定行波波头到达检测点的时间, 取得了一定成果。但是, 小波变换需要根据具体的信号选择合适的小波基和分解尺度, 否则难以达到满意的效果。希尔伯特-黄变换是一种自适应的信号时频分析方法, 其计算过程包括经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)两步。首先通过 EMD 分解将分析信号分解为一组平稳分量, 然后再利用 Hilbert 变换计算各分量的瞬时频谱。瞬时频谱上的首个突变点即故障初始行波到达检测点的时刻。HHT 方法与 WT 方法相比, 在实际应用中故障定位效果要好。然而, HHT 方法理论上存在过包络、欠包络及模态混叠现象等不足<sup>[11]</sup>, 这些会在一定程度上对准确检测行波波头到达时刻造成影响。文献[12-13]分别提出 EEMD 和 ELMD 方法来抑制模态混叠, 但并不能完全消除。

行波波速也是影响行波测距精度的关键之一。行波波速与输电线路参数、频率等关系密切, 不同故障条件下故障行波的中心频率有所不同, 再加上环境等外界因素的影响, 波速是一个不确定的量。在应用中采用光速或近似光速的值, 必然会造成定位误差。文献[14]利用故障初始行波和故障点反射波到达母线的的时间消除行波波速的影响; 文献[15-17]等利用故障初始行波、故障点反射波和对端母线反射波到达母线的的时间消除波速的影响。此类方法通过检测故障点反射波或对端母线反射波来进行故障测距, 当反射波衰减至无法测量或不存在反射波时, 定位失败。文献[18]提出从相邻线路上测量故障行波波速, 当故障线路与相邻线路的导线参数(如导线型号等)不相同, 两线路上的行波传播速度不同, 仍会产生定位误差。

针对上述问题, 本文提出一种新的行波波头检测方法: 基于 VMD 与 TEO 的故障行波波头检测方法。VMD 是 2014 年最新提出的一种信号分解方法,

分解模态稳定性好, 能够很好地反映信号的奇异性特征, 在行波信号检测中尚未见到相关报道。Teager 能量算子是一种非线性算子, 计算量很小, 能够快速准确地跟踪信号的变化, 适于信号的实时检测处理。另外, 在双端行波故障测距原理的基础上, 通过分析故障行波的实际传播路径, 推导出一种不受行波波速和线路长度变化影响的输电线路故障测距新算法, 算法不需要检测行波反射波, 原理简单。大量的 EMTDC 仿真验证表明, 文中所提方法正确, 测距准确度较高。

## 1 行波检测新方法

### 1.1 VMD 原理与算法<sup>[19-20]</sup>

变分模态分解(VMD)核心思想是变分问题, 其具有良好的采样效应。该方法在获取本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)时摆脱了 EMD 算法所使用的循环筛分剥离的信号处理方式, 而是通过迭代搜寻变分模型最优解来确定每个分量的频率中心及带宽, 从而能够自适应地实现信号的频域剖分及各分量的有效分离, 突出了数据的局部特征, 表现出更好的噪声鲁棒性。假定将故障行波分析信号分解为  $K$  个 IMF 分量, 则对应的约束变分模型表达式为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_K\}$  为分解得到的  $K$  个 IMF 分量;  $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$  为各分量的频率中心。

引入二次惩罚因子  $\alpha$  和 Lagrange 乘法算子  $\lambda(t)$ , 求取上述约束变分问题的最优解, 则约束性变分问题变换为非约束性变分问题, 增广 Lagrange 表达式为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

利用交替方向乘法算子通过交替更新  $u_k^{n+1}$ 、 $\omega_k^{n+1}$  和  $\lambda^{n+1}$  寻求增广 Lagrange 表达式的“鞍点”, 即约束变分模型的最优解。具体实现步骤如下:

- (1) 初始化  $\{u_k^1\}$ 、 $\{\omega_k^1\}$ 、 $\lambda^1$  和  $n=0$ ;
- (2)  $n=n+1$ , 执行循环;
- (3) 根据下式, 更新  $u_k$  和  $\omega_k$ 。

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k} L(\{u_{i < k}^{n+1}\}, \{u_{i \geq k}^n\}, \{\omega_i^n\}, \lambda^n)$$

$$\omega_k^{n+1} = \arg \min_{\omega_k} L(\{u_i^{n+1}\}, \{\omega_{i < k}^{n+1}\}, \{\omega_{i \geq k}^n\}, \lambda^n)$$

(4)  $k=k+1$ , 重复步骤(3), 直至  $k=K$ , 结束;

(5) 根据  $\lambda^{n+1} = \lambda^n + \tau(f - \sum u_k^{n+1})$  更新  $\lambda$ ;

(6) 重复步骤(2)~(5), 当满足迭代停止条件  $\sum_k \|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2 / \|u_k^n\|_2^2 < \varepsilon$ , 迭代结束, 得到  $K$  个 IMF 分量。

## 1.2 Teager 能量算子<sup>[21-22]</sup>

Teager 能量算子(TEO)是一种非线性算子, 能够有效提取信号的能量, 并能反映能量的瞬时变化。与 Hilbert 变换相比, 其计算量小, 且能快速准确地跟踪信号的变化, 适合于信号的实时检测处理。对于连续信号  $s(t)$ , 其 TEO 可定义为式(3)。

$$\psi[s(t)] = s'^2(t) - s(t)s''(t) \quad (3)$$

式中:  $s'(t)$  为  $s(t)$  的导数;  $\psi$  为能量算子。

对于离散信号, 式(3)可近似表示成式(4)。

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (4)$$

## 1.3 行波信号的采集与处理

输电线路发生故障后, 故障点产生的暂态行波信号中蕴含着丰富的故障信息<sup>[1]</sup>, 比如: 故障点产生的初始行波到达检测点标志着故障发生; 初始行波以及被故障点反射的行波到达检测点的时间差标志着故障距离; 线路两端初始行波的幅值和极性可以用于识别故障方向等等。由于暂态行波具有较宽的频带, 要求 CT、PT 具有良好的动态响应和频率特性。实践证明电流互感器的高频传变特性较好, 现已投入使用的行波故障测距装置也多采用电流行波信号分析。罗氏线圈与传统的电流互感器相比具有测量频带宽、测量范围广、结构轻巧、安装方便、不破坏导体、无磁饱和现象、线性度好、成本低廉等优点<sup>[23]</sup>, 宜采用罗氏线圈采集线路故障行波信号。

三相系统中, 行波在传播时, 三相导线之间存在着相互耦合, 为了便于分析行波信号, 通常需要对三相行波信号进行相模变换。适用于频域分析和暂态时域分析的相模变换方法有凯伦贝尔变换、克拉克变换。文中采用凯伦贝尔变换对电流行波信号进行解耦, 得到地模分量和线模分量, 由于地模分量衰减比较严重, 故取线模分量进行分析。运用基于 VMD 和 TEO 相结合的行波检测方法确定故障行波到达检测点的时刻。

## 2 双端行波故障测距新算法

双端行波测距法利用故障初始行波到达两端的

时间差和波速来计算故障点位置, 公式如式(5)。

$$\begin{cases} d_{Mf} = \frac{L + v(t_M - t_N)}{2} \\ d_{Nf} = \frac{L + v(t_N - t_M)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $L$  为线路的长度;  $t_M$ 、 $t_N$  为故障行波到达 M、N 两侧检测点的时刻;  $v$  是行波波速。

由式(5)可知, 输电线路故障测距结果的准确性与线路的实际长度、行波波速及行波波头的到达时刻密切相关。输电导线架设过程中, 每档导线的实际长度一般大于杆塔水平距离的 5% 以上<sup>[15]</sup>, 导线的实际长度随温度和气候环境变化。工程中给出的线路长度为每档线路水平距离之和, 直接应用此长度进行定位, 必然会造成定位误差。另外, 行波波速与输电线路参数、频率等关系密切, 受环境等外界条件的影响, 利用线路参数精确计算波速较为困难。实际应用中将波速取 0.936c(11 kV)到 0.987c(500 kV)<sup>[15]</sup>不等的定值具有主观性, 将会影响定位准确度,  $c$  为光速( $3 \times 10^8$  m/s)。鉴于以上分析, 本文从故障行波的传播实际路径出发, 推导行波故障测距算法。

线路在杆塔之间的水平距离长度与导线实际长度之间存在一个经验值, 且导线在相同季节的伸缩是均匀的, 所以故障点到导线一端的水平距离同杆塔档距长度的比例近似等于故障点到该端实际导线长度与导线实际全长的比值。假设输电线路水平距离为  $L$ , 故障发生时刻为  $t_0$ ,  $t_M$ 、 $t_N$  为故障行波初始波头到达 M、N 检测点的时刻, 行波在线路中传播的速度为  $v$ , 则行波传播的实际距离即为输电线路的实际长度  $L'$ 。

$$L' = v(t_M - t_0) + v(t_N - t_0) \quad (6)$$

故障点距离 M 点的实际长度为

$$d'_{Mf} = v(t_M - t_0) \quad (7)$$

故障在线路水平距离上位置为  $d_{Mf}$ , 则有

$$\frac{d'_{Mf}}{L'} = \frac{d_{Mf}}{L} \quad (8)$$

故障显示位置为

$$d_{Mf} = \frac{d'_{Mf}}{L'} L = \frac{v(t_M - t_0)}{v(t_M - t_0) + v(t_N - t_0)} L = \frac{t_M - t_0}{t_M - t_0 + t_N - t_0} L \quad (9)$$

令  $t_M - t_0 = t'_M$ ,  $t_N - t_0 = t'_N$ , 则有

$$d_{Mf} = \frac{t'_M}{t'_M + t'_N} L \quad (10)$$

式(10)说明, 测距结果与行波波速及导线实际长度无关, 从而避开了行波波速和线路长度变化的影响。与当前的不受行波波速影响的定位算法相比, 该算法不需要检测行波反射波, 定位更可靠。

### 3 仿真分析

为验证本文所提方法的正确性和有效性, 利用 PSCAD 软件搭建一 220 kV 输电线路模型, 模拟不同短路故障类型时, 输电线路的电磁暂态过程, 系统接线如图 1 所示。线路采用频率相关模型, 全长为 200 km, 线路参数如表 1 所示, 建模时考虑了母线避雷器、母线分布电容及杆塔结构的影响, 采样频率为 1 MHz。若故障点分别设在距离 M 端 30 km、50 km、80 km、100 km、130 km、160 km 和 180 km 处, 故障时的过渡电阻为 50  $\Omega$ 、100  $\Omega$ 、200  $\Omega$  三种情况, 0.1 s 时发生故障, 取故障后 2 ms 的数据分析。

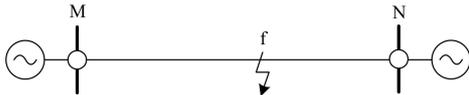


图 1 220kV 输电线路仿真模型

Fig. 1 Simulation model of 220kV transmission systems

表 1 输电线路的参数

Table 1 Parameters of transmission line

参数类型	$r/(\Omega/\text{km})$	$x/(\Omega/\text{km})$	$g/(\text{S}/\text{km})$	$b/(\text{S}/\text{km})$
正序参数	0.034 166	0.423 522	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.705\ 73 \times 10^{-6}$
零序参数	0.166 473	1.073 471	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.935\ 55 \times 10^{-6}$

假设距离 M 检测点为 80 km 处, 发生 A 相接地短路, 过渡电阻为 50  $\Omega$ , 两端检测点获得的故障前后 1 个周期的三相电流行波信号如图 2、图 3 所示。

首先, 取故障后 2 ms 的数据进行凯伦贝尔变换, 得到电流线模分量; 取  $\alpha$  模分量进行 VMD 分解, 设定分解所得 IMF 分量的个数  $K=3$ , 惩罚参数  $\alpha=2000$ ; 然后对分解得到的 IMF1 分量进行能量特征提取。输电线路 M、N 两侧检测点的电流线模 ( $\alpha$ ) 分量及其瞬时能量谱如图 4、图 5 所示。

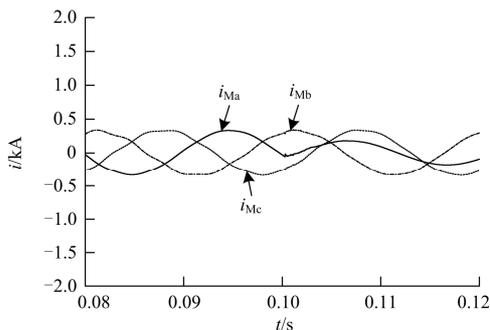


图 2 M 侧三相电流行波波形

Fig. 2 Three-phase current waveform on M side

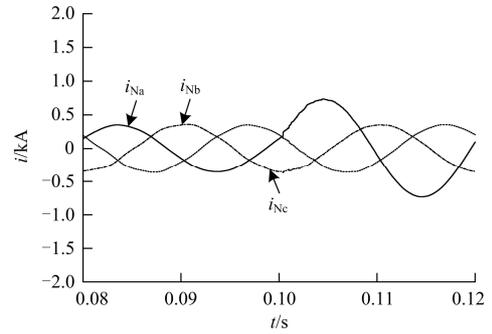


图 3 N 侧三相电流行波波形

Fig. 3 Three-phase current waveform on N side

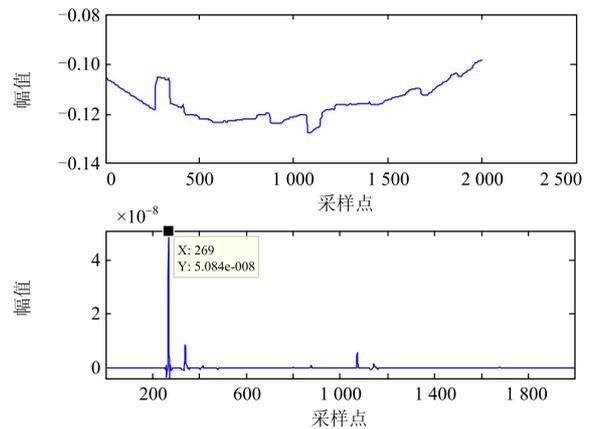


图 4 M 侧的电流线模分量及其瞬时能量谱

Fig. 4 Current  $\alpha$  mode component and its instantaneous energy spectrum on M side

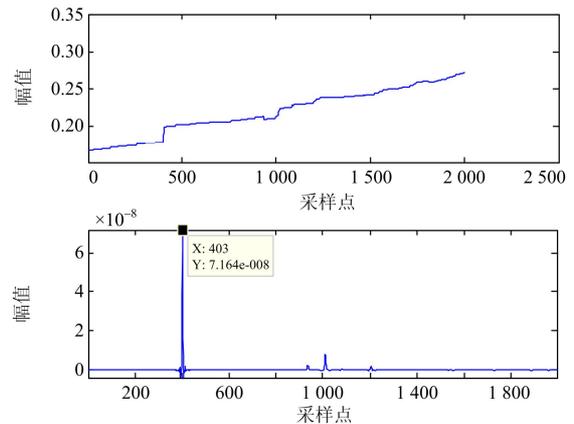


图 5 N 侧的电流线模分量及其瞬时能量谱

Fig. 5 Current  $\alpha$  mode component and its instantaneous energy spectrum on N side

从图 4、图 5 可以看出, 基于 VMD 与 TEO 的行波波头检测方法能够准确地检测出故障行波初始波头到达检测点的时刻, 故障行波到达 M、N 两侧检测点的时刻分别为  $t_M=269$ 、 $t_N=403$ , 代入式(10)

得出故障测距结果  $d_M=80.059$  km, 定位误差为 0.059 km, 测距结果比较理想。

同理, 在故障点位置不同、发生短路时的过渡电阻大小不同的情况下进行分析, 测距结果如表 2 所示。表中 Ag、AB、ABC 分别代表单相接地短路、两相短路和三相短路。

表 2 不同条件下的故障测距结果

Table 2 Fault location results under different conditions

故障距离/km	短路类型	过渡电阻/ $\Omega$	$t_M/\mu s$	$t_N/\mu s$	测距结果/km	误差/km
30	Ag	50	102	570	30.357	+0.357
	AB	100	102	570	30.357	+0.357
	ABC	200	102	570	30.357	+0.357
50	Ag	50	169	503	50.297	+0.297
	AB	100	169	503	50.297	+0.297
	ABC	200	169	503	50.297	+0.297
80	Ag	50	269	403	80.059	+0.059
	AB	100	269	403	80.059	+0.059
	ABC	200	269	403	80.059	+0.059
100	Ag	50	336	336	100	0
	AB	100	336	336	100	0
	ABC	200	336	336	100	0
130	Ag	50	437	235	130.059	+0.059
	AB	100	437	235	130.059	+0.059
	ABC	200	437	235	130.059	+0.059
160	Ag	50	537	135	159.821	-0.179
	AB	100	537	135	159.821	-0.179
	ABC	200	537	135	159.821	-0.179
180	Ag	50	604	68	179.762	-0.238
	AB	100	604	68	179.762	-0.238
	ABC	200	604	68	179.762	-0.238

表 2 数据表明, 该方法测距结果不受线路故障类型和过渡电阻大小的影响, 在不同的故障情况下, 均能精确地确定故障位置, 测距误差在工程允许的范围之内, 基本上在一个档距之内。另外, 故障点越靠近线路中间位置, 定位精度越高, 最小误差为 0; 随着故障点向线路两侧靠近, 误差会适当增大。随着采样频率的提高, 该方法的测距精度会更加理想。

## 4 结论

(1) 介绍了 VMD 和 TEO 算法的原理和特点, 提出一种基于 VMD 与 TEO 的行波检测方法。为行波测距技术的发展提供了一种新的检测手段。

(2) 在双端行波故障测距理论上, 从行波传播的实际途径出发, 推导出一种不受行波波速影响的故障测距新算法, 与当前方法相比不需要检测行波反射波, 算法原理简单。

(3) 大量的仿真结果表明文中所提方法正确, 行波波头检测效果好, 故障测距准确度高, 方法受故

障类型及过渡电阻大小的影响小, 定位可靠。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 黄子俊, 陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-13. HUANG Zijun, CHEN Yunping. Non-communication fault locating of transmission line based on wavelet modulus maxima[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-13.
- [3] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59. MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [4] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10. QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [5] 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.
- [6] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95. QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Study on single terminal method and double method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [7] 李泽文, 曾祥君, 黄智伟, 等. 基于高精度晶振的 GPS 秒时钟误差在线修正方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 55-58. LI Zewen, ZENG Xiangjun, HUANG Zhiwei, et al. Method for correcting errors of the GPS-clock based on the high precision crystal oscillator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 55-58.
- [8] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 输电线路暂态电流行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 1999, 14(1): 59-62. DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Fault characteristics of transient current traveling waves and its analysis with wavelets transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(1): 59-62.
- [9] 董新洲, 刘建政, 余学文. 输电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 57-61. DONG Xinzhou, LIU Jianzheng, YU Xuewen. Fault characteristics and wavelets analysis of the transient

- voltage traveling waves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(3): 57-61.
- [10] 徐俊明, 汪芳宗, 尹星, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的行波法高压输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 88-92, 105.  
XU Junming, WANG Fangzong, YIN Xing, et al. A traveling wave fault location method for high voltage power transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 88-92, 105.
- [11] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.  
ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [12] 张玲玲, 廖红云, 曹亚娟, 等. 基于 EEMD 和模糊 C 均值聚类算法诊断发动机曲轴轴承故障[J]. 内燃机学报, 2011, 29(4): 332-336.  
ZHANG Lingling, LIAO Hongyun, CAO Yajuan, et al. Diagnosis on crankshaft bearing fault based on EEMD and fuzzy C mean clustering arithmetic[J]. Transactions on CSICE, 2011, 29(4): 332-336.
- [13] 康守强, 王玉静, 杨广学, 等. 基于经验模态分解和超球多类支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 96-102.  
KANG Shouqiang, WANG Yujing, YANG Guangxue, et al. Rolling bearing fault diagnosis method using empirical mode decomposition and hypersphere multiclass support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 96-102.
- [14] 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.
- [15] 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): 29-32.  
JIANG Tao, LU Yuping. Study of fault location based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 29-32.
- [16] 束洪春, 李义, 宣映霞, 等. 对不受波速影响的输电线路单端行波故障测距的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(8): 1-6, 12.  
SHU Hongchun, LI Yi, XUAN Yingxia, et al. Discussion on the single ended approach based on travelling wave to fault location that can avoid the effect of wave speed[J]. Relay, 2006, 34(8): 1-6, 12.
- [17] 李泽文, 曾祥君, 姚建刚, 等. 不受波速影响的输电线路双端行波故障测距算法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, 3(4): 1-6, 12.  
LI Zewen, ZENG Xiangjun, YAO Jiangang, et al. New fault location algorithm based on double terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 3(4): 1-6, 12.
- [18] 张峰, 梁军, 张利, 等. 基于三端行波测量数据的输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 69-72.  
ZHANG Feng, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Novel method about traveling wave fault location based on treble terminal measurement data for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 69-72.
- [19] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [20] 唐贵基, 王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 1-9.  
TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter optimized variational mode decomposition method with application to incipient fault diagnosis of rolling bearing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 1-9.
- [21] TEAGER H M. Some observations on oral air flow during phonation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980, 28(5): 599-601.
- [22] MARAGOS P, KAISER J F, QUATIERI T F. Energy separation in signal modulations with applications to speech analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10): 3024-3051.
- [23] 王鸿杰, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 采用罗柯夫斯基线圈和 ARM+CPLD 总线复用系统的输电线路故障暂态电流采集方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 130-135.  
WANG Hongjie, SHENG Gehao, LIU Yadong, et al. A method of sampling the transient fault current of the transmission line based on Rogowskicoil and bus multiplexing system with ARM and CPLD[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 130-135.

收稿日期: 2015-06-30; 修回日期: 2015-08-11

作者简介:

高艳丰(1979-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为输电线路故障定位和电力系统运行、分析与控制;  
E-mail: gaoyanfeng01@126.com

朱永利(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为输变电设备状态在线监测、智能分析和智能电网研究;

闫红艳(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制。

(编辑 魏小丽)