

# 高压直流输电线路单端故障测距组合算法

李博雅<sup>1</sup>, 杨耀<sup>2</sup>, 杨立红<sup>3</sup>

(1. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 100136; 2. 河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000;  
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 行波波速的选取和反射波头的识别是影响单端行波测距精度和可靠性的主要因素。基于故障行波的时频域特征, 提出一种行波法和固有频率法相结合的单端故障测距算法。利用行波固有频率计算出故障点位置的粗略值, 确定故障反射波达到母线测点的时间范围。利用集成经验模态分解算法提取的行波高频分量, 对反射波头进行有效识别并获取测距所需的精确时间参数, 同时将该高频分量对应的行波波速利用到行波测距中, 解决了波速选取的难题。PSCAD 仿真结果表明, 该测距算法可有效识别行波波头, 且测距的精度得到明显提高。

**关键词:** 故障测距; 行波; 固有频率; 集成经验模态分解; 高压直流

## A combined method of single-ended fault location for HVDC transmission lines

LI Bo-ya<sup>1</sup>, YANG Yao<sup>2</sup>, YANG Li-hong<sup>3</sup>

(1. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 100136, China; 2. Sanmenxia Power Supply Company, Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** There are two main factors influencing the accuracy and reliability of single-ended traveling wave fault location, namely the determination of traveling wave velocity and the time when the reflected wave fronts arrives. A new fault location method based on the travelling wave's time- and frequency-characteristics combining with natural frequency is presented. It uses method based on natural frequency to calculate rough value of fault distance, and the time regions of reflected waves from fault point to detective bus are confirmed through the distance. Ensemble empirical mode decomposition is employed to extract the high-frequency component from traveling wave, recognize the reflected wave fronts and determine more accurate traveling wave time parameters. According to the propagation velocity of the frequency, the fault distance is calculated. The results of simulations by PSCAD show that the method proposed can effectively identify the initial traveling wave and improves the fault location accuracy obviously.

**Key words:** fault location; traveling wave; natural frequency; ensemble empirical mode decomposition; HVDC

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0116-06

## 0 引言

高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)具有输送容量大、送电距离远、电网互联方便、功率调节容易等诸多优点, 在我国具有广阔的应用前景。直流输电线路距离长, 要跨越不同地形和气候区域, 工作条件恶劣, 故障概率高, 巡线难度大, 因此, 发展精确可靠的故障测距技术, 对于保障电力系统的安全运行, 提高系统的经济性和可靠性具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

目前, 投入商业运行的故障测距技术主要是行波法。其中, 单端行波原理测距结果精确, 不需要GPS授时系统及两端数据通信, 测距成本低, 实时

性强, 因此, 针对单端测距原理的研究具有重要的实际意义<sup>[3-4]</sup>。

单端行波法需要对行波反射波头进行准确识别和标定, 从而降低了测距的可靠性<sup>[5-6]</sup>。而基于固有频率的测距算法不受行波波头识别的限制, 只需要故障后任一段暂态数据提取固有频率即可对故障距离进行估算。虽然该算法测距精度低于行波法, 但在原理上具有较高可靠性, 鲁棒性强, 可用来确定故障点的粗略范围。

本文利用行波法和固有频率法的测距优势互补性, 提出一种单端故障测距组合算法。该算法利用固有频率法得到故障距离的粗略值, 使得行波反射波头识别范围由整个时间轴变为可选择的局部范

围, 实现了被动识别到主动识别的转换, 大大提高了行波测距的可靠性。

最后, PSCAD 仿真结果表明, 该测距算法可以实现直流输电线路的准确、可靠故障测距。

## 1 单端行波测距法

### 1.1 测距原理

线路发生故障后, 故障点产生的初始行波沿线路向两端传播。标准模式的单端行波原理利用线路本端提取的第 1 个行波浪涌与其在故障点反射波之间的时间差计算本端测量点到故障点的距离, 计算公式为

$$l = \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中:  $l$  为本端母线测量处到故障点的距离;  $t_1$ 、 $t_2$  分别为故障初始行波第一次到达测量点和其从故障点反射回测量点的时间;  $v$  为行波波速。

### 1.2 优缺点分析

单端行波测距的优点是原理简单, 测距成本低且实时性强, 如果可以准确判断出反射波的性质, 测距精度能够满足电力系统对精确测距的要求。

但行波在输电线路上传播时产生色散现象会使波头发生衰减和畸变; 且行波在特征阻抗变化处的折反射情况较为复杂, 因此, 单端行波测距的缺点是测距可靠性较低, 一旦无法正确识别反射波, 测距失败。以某直流输电线路故障暂态行波为例进行说明, 其故障行波如图 1 所示。

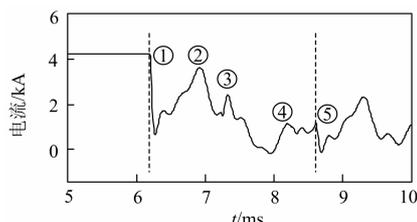


图 1 故障电流行波图

Fig. 1 Waveform of fault current traveling wave

由图 1 可知, 波头 1 为初始行波波头, 在其反射波头 5 到达之前, 本侧母线测量端会检测到三个同极性的行波波头, 仅通过行波波头的极性和幅值大小, 很难对所需行波波头进行有效标识, 这是迄今为止各种单端行波测距难以发挥作用的主要原因。因此, 针对提高行波波头识别可靠性的研究具有重要实际意义。

## 2 固有频率测距法

### 2.1 测距原理

故障暂态行波在频域上表现为一系列特定频率

的谐波形式, 称为固有频率, 该频率值与故障距离相关。文献[7]研究了故障行波的频谱、故障距离以及线路边界条件三者之间的数学关系。

$$l = \frac{(\theta_M + \theta_F + 2k\pi)v_k}{2\pi f_k}, k = 0, \pm 1, \dots \quad (2)$$

式中:  $\theta_M$  和  $\theta_F$  分别为行波在系统侧和故障点的反射角; 行波在金属性短路点的反射系数为 -1, 其反射角随过渡电阻的改变程度相当微弱, 实际故障测距中  $\theta_F$  取  $\pi$ ; 行波在开路点的反射系数为 1, 由于直流线路母线处装设有平波电抗器, 通常情况下, 行波暂态频率较高, 平波电抗器阻抗值较大, 可近似认为开路,  $\theta_M$  近似取值 0;  $f_k$  为第  $k$  次固有频率,  $v_{km}$  为频率  $f_k$  对应的电流模分量波速度。

$$v_{km} = c\omega_k / \sqrt{\omega_k^2 + [(R_m/L_m - G_m/C_m)/2]^2} \quad (3)$$

式中:  $R_m$ 、 $L_m$ 、 $G_m$ 、 $C_m$  分别为线路单位长度的  $m$  模( $m=0,1$ )电阻、电感、电导和电容;  $c$  为光速;  $\omega_k = 2\pi f_k$ 。故障行波呈谐波形式的频谱中, 第一个峰值对应的频率(即  $f_0$ )幅值最大, 称为主频, 提取主频进行故障测距最简单易行, 此时, 故障测距公式为

$$l = \frac{(0 + \pi)v_0}{2\pi f_0} = \frac{v_0}{2f_0} \quad (4)$$

### 2.2 优缺点分析

该方法从故障行波频域的角度进行测距, 避免了对反射波头的识别。采用后向预测 prony 算法提取图 1 中故障电流行波的固有频率<sup>[8]</sup>, 其中幅值最高的 6 个频率分量如图 2 所示。

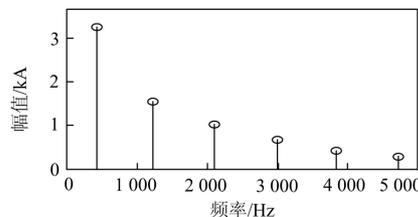


图 2 故障电流行波频率-幅值图

Fig. 2 Frequency spectrum of fault current

由图 2 可知, 即使行波波头形状平缓、细节信息难以提取、在时域范围内对波头的标定变得困难, 通过时频域转换, 依然可以计算出有效的固有频率值。基于固有频率的测距受高频噪声干扰较小、抗高阻能力强、原理上稳定、可靠性高, 具有一定的实用价值。

由上可知, 故障距离可以分别从故障行波的时

域和频域角度进行计算,且两种测距原理在测距可靠性和精确度两个方面具有很强的优势互补性:行波法测距结果精确,固有频率法测距可靠性高。鉴于此,本文提出一种行波法和固有频率法相结合的单端故障测距组合法。

实际故障测距中,除需要精确可靠的故障测距原理,还需要研究先进的信号处理方法。

### 3 EEMD 算法

暂态行波是一种突变的、具有奇异性的信号,不少学者采用小波变换、数学形态学和经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)等算法来标定故障行波波头,以提高故障行波波头到达时刻的辨识精度。但小波分析结果受小波基的种类、采样率及分解尺度等因素的影响;数学形态学法需要选择合适的形态滤波器,滤波效果容易受到滤波器及其结构元素的影响;EMD 作为一种自适应的信号分解算法,克服了小波变换存在的需要选择基函数和分解尺度的缺陷<sup>[9]</sup>。但在实际工程应用中发现,EMD 分解存在模态混叠问题,即单一的固有模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF)中包含了频率截然不同的信号成分或同一频率成分被分解到不同的 IMF 中。

为解决此问题, Wu 和 Huang 在对白噪声进行 EMD 分解深入研究的基础上,提出一种基于噪声辅助的数据分析方法-集成经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)<sup>[10]</sup>:每次分解给信号加入有限幅值的高斯白噪声,利用白噪声频谱的均匀分布使不同时间尺度的信号自动分布到合适的参考尺度上,同时运用白噪声的零均值特性,经过多次平均使噪声相互抵消甚至完全消除噪声的影响。EEMD 算法步骤归纳如下:

(1) 通过给分析信号  $x(t)$  加上一组白噪声  $N(t)$  来获得一个总体  $X(t)$ , 即

$$X(t) = x(t) + N(t) \quad (5)$$

(2) 应用 EMD 对信号  $X(t)$  进行分解,得到一组 IMF 分量, 即

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (6)$$

(3) 给分析信号  $x(t)$  加上不同的白噪声  $N_i(t)$ ,  $i=1 \sim k$ , 重复以上两步,共进行  $k$  次, 即

$$\begin{cases} X_i(t) = x(t) + N_i(t) \\ X_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij}(t) + r_{in}(t) \end{cases} \quad (7)$$

(4) 将相应的  $k$  组 IMF 的均值作为最终的 EEMD 分解结果 IMF, 即

$$c_j(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k c_{ij}(t) \quad (8)$$

EEMD 依据信号本身的特征进行自适应分解,即分解过程依赖于信号本身所包含的变化信息,因此, EEMD 在行波波头到达时刻精确标定方面具有明显优势。

### 4 单端故障测距组合法

综上所述,故障行波信号的时域和频域特征与故障距离是相互联系,密不可分的,基于此,本文将故障频域特征引入行波测距原理中。新算法保留了行波测距的精确性,且在波头识别方面,也具有较高的可靠性。该测距方法包含以下三个步骤。

#### (1) 固有频率法初测

初测就是利用固有频率法初步测量得到故障距离为  $x$ 。大量仿真表明:在任何故障情况下,固有频率法的最大测距误差在其测距结果的 10% 以内<sup>[4]</sup>,则实际的故障距离一定在  $(0.9 \times x, 1.1 \times x)$  范围内,由式 (1) 可知,故障点反射波到达 M 端母线的时刻  $t_2$  在  $(t_1 + 1.8 \times x/v, t_1 + 2.2 \times x/v)$  范围内。

#### (2) 识别波头和确定波速

故障行波在线路阻抗不连续处会发生频率突变,这种剧烈变化在频谱上表现为高频分量,高频分量对应的时刻即可看作行波的到达时刻。采用 EEMD 对故障电流行波进行自适应分解,取得一系列频率从高到低的 IMF 分量,其中,突变点处的高频分量首先被分解出来,因此,采用高频段 IMF 分量蕴含的故障暂态信息和反射波头在时间轴上的所在范围,可对行波波头进行准确识别和标定,同时获取测距所需的时间参数。

故障行波频率不同,传播速度不同,频率越高的分量传播速度越快。由文献[11]可知,频率越高的行波分量衰减越快,而且其反射系数越小,因此,第二次到达测点的行波频率低于首次到达测点的行波频率。在行波测距基本原理“时间乘以速度等于距离”中,速度被当作恒速来处理,并没有考虑行波传播速度和行波频率存在相互配合的问题,使得测距方法存在误差。

由于 EEMD 分解所起的作用如同以时间特征尺度为特征的时空尺度滤波器, EEMD 首先分解出的 IMF 分量即为行波波头最先到达母线测点的高频分量,计算该高频分量对应的行波波速并利用其进行故障测距,理论上讲应当得到更为精确的测距

结果。

### (3) 单端行波原理测距

对初始行波和其反射波头进行有效标识并计算出波头高频分量对应的波速度后, 采用单端行波原理进行故障测距。

初始行波波头在时刻  $t_1$  到达测点, 波头高频分量频率为  $f_{m1}$ , 对应的波速度为  $v_{m1}$ ; 其反射波头在时刻  $t_2$  到达测点, 波头高频分量频率为  $f_{m2}$ , 对应的波速度为  $v_{m2}$ 。利用行波传输路程和时间的对应关系, 可得最终测距公式为

$$l = \frac{v_{m1}v_{m2}}{3v_{m1} - v_{m2}}(t_2 - t_1) \quad (9)$$

## 5 仿真分析

仿真采用在 PSCAD 上搭建的 HVDC 输电系统模型, 模型简图如图 3 所示。

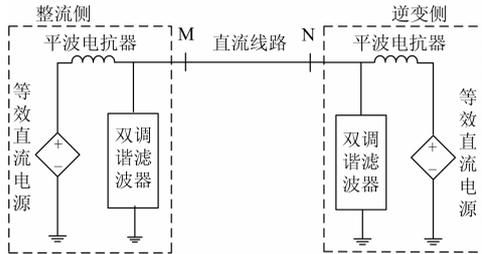


图 3 直流输电系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of HVDC transmission system

仿真模型参数设置如下: 输电线路全长 500 km, 额定电压为  $\pm 500$  kV, 额定电流为 3 kA, 平波电抗器为 0.3 H, 滤波器采用双调谐滤波器; 输电线路采用频率相关模型, 为双六分裂导线—双避雷线形式; 导线和避雷线的直流电阻分别为  $0.0463 \Omega/\text{km}$  和  $0.7098 \Omega/\text{km}$ , 半径分别为 0.02034 m 和 0.00552 m; 输电线路结构如图 4 所示。

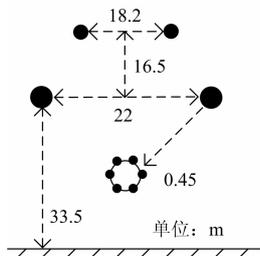


图 4 输电线路结构图

Fig. 4 Configure of transmission lines

设距离 M 侧 350 km 处线路发生极间短路故障, 故障波形如图 1 所示。采用后向预测 prony 算法计算故障行波的固有频率, 结果如图 2 所示: 主频  $f_0=426$  Hz, 可根据此频率下线路的  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $G_1$ 、

$C_1$  求得此频率下线模分量行波波速为  $v_0=2.875 \times 10^5$  km/s, 由式(4)可得固有频率法初测结果为

$$l' = \frac{2.875 \times 10^5}{2 \times 426} = 337.44 \text{ km}$$

由此可判断, 故障点真实距离所在范围为 (303.70 km, 371.18 km)。

其次, 采用 EEMD 对故障电流行波线模分量进行分解, 分解结果的前两个 IMF 分量以及局部放大图如图 5 所示。

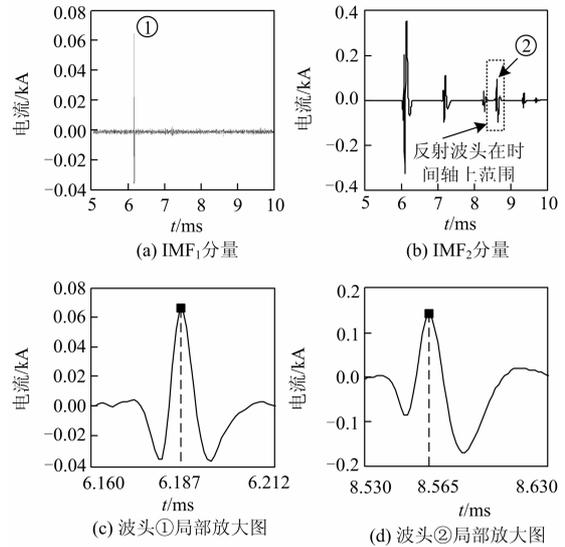


图 5 电流线模分量 EEMD 结果

Fig. 5 EEMD results of line mode current traveling waves

由图 5 可知, 初始行波波头 1 在 IMF<sub>1</sub> 和 IMF<sub>2</sub> 都有很好的表现, IMF<sub>1</sub> 包含了波头的最高频率段, 因此由 IMF<sub>1</sub> 可以得到最精确的初始波头位置辨识。其他行波波头由于受线路损耗以及线路参数频变等因素的影响, 幅值衰减严重, 高频成分减弱, 被自适应地分解在第二模态 IMF<sub>2</sub> 中。

定义高频分量前半周期的峰值时刻为行波的到来时刻: 将峰值时刻作为行波的到来时间, 特征明显, 便于标定。由图 5(c)可知, 初始行波到达母线测点的时刻为  $t_1=6.187$  ms, 结合固有频率法初测结果可得, 反射行波波头在时间轴的范围为  $(t_1+1.8 \times l'/v_0, t_1+2.2 \times l'/v_0)$ , 代入参数后为 (8.299 ms, 8.769 ms), 基于此, 可准确识别出波头 2 为初始行波反射波头 (识别过程见图 5(b)), 同时由其局部放大图可知, 反射波头到达 M 端的时间为  $t_2=8.565$  ms。至此, 波头的识别和标定过程结束。

IMF<sub>1</sub> 和 IMF<sub>2</sub> 分别包含了初始行波和其反射波头的最高频率分量, 采用后向预测 prony 算法分别提取初始行波和其反射波头的最高频率成分:

$f_{m1}=23.67$  kHz,  $f_{m2}=8.19$  kHz, 由式(3)可得该频率对应的波速  $v_{m1}=2.981 \times 10^5$  km/s,  $v_{m2}=2.963 \times 10^5$  km/s, 由式(9)可得最终测距结果为

$$l = \frac{2.981 \times 10^5 \times 2.963 \times 10^5}{3 \times 2.981 \times 10^5 - 2.963 \times 10^5} \times \frac{8.565 - 6.187}{1000} = 351.24 \text{ km}$$

传统行波测距系统中, 波速度取某一定值, 如  $2.98 \times 10^5$  km/s, 利用传统行波测距方法计算出的故障距离为

$$l'' = 2.98 \times 10^5 \times \frac{8.565 - 6.187}{2 \times 1000} = 354.32 \text{ km}$$

比较  $l$  与  $l'$ 、 $l''$  可知, 组合测距方法较传统测距方法除在识别波头方面具有较高可靠性, 测距精度也有较明显的提高。

与此类似, 在不同故障位置和不同接地电阻情况下进行仿真实验, 利用新算法和常规算法分别进行故障测距, 结果如表 1 所示。

表 1 不同故障点和过渡电阻时的测距结果

Table 1 Fault locating results corresponding to different fault distance and transition resistance

故障距 离/km	过渡电 阻/ $\Omega$	行波法测距		组合法测距	
		$l'$ /km	$\varepsilon$ /%	$l'$ /km	$\varepsilon$ /%
51	0/100/200	51.31	0.60	51.09	0.18
101	0/100/200	101.45	0.45	101.08	0.08
151	0/100/200	150.19	-0.54	151.16	0.10
201	0/100/200	199.73	-0.42	201.28	0.14
251	0/100/200	252.82	0.72	252.07	0.28
301	0/100/200	299.78	-0.41	300.41	-0.20
351	0/100/200	352.82	0.52	351.33	0.09
401	0/100/200	403.70	0.51	401.72	0.18
451	0/100/200	449.21	-0.40	450.26	-0.16

注:  $l'$ 、 $\varepsilon$  分别为测距结果和相对误差。

由表 1 可知, 新型测距算法的计算结果与常规算法结果相比, 测距的精度得到明显提高且测距结果受过渡电阻影响较小, 测距鲁棒性较高。若同时考虑其在识别波头方面的优越性, 则本文所提算法具有较高的实用价值。

## 6 结论

本文综合考虑直流输电线路单端故障测距的可靠性和精确性, 提出一种行波法和固有频率法相结合的单端故障测距组合算法。该算法中固有频率法提高了波头识别的可靠性, 行波法保证了测距的精度, 两者具有较强的优势互补性, 测距鲁棒性强,

实用价值较高。

当前行波波速的选取方法仍存在不足, 本文测距考虑了行波波速和行波频率的配合问题。利用 EEMD 优良的自适应分解特性, 从  $IMF_1$  和  $IMF_2$  分量中分别提取出初始行波和其反射波头处最高频率成分, 计算出对应的行波波速, 将其利用到行波测距中, 理论上具有较高的测距精度, 仿真结果验证了其有效性。

## 参考文献

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.  
CHEN Xia, LIN Wei-xing, SUN Hai-shun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.
- [3] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137, 147.  
SONG Guo-bing, CAI Xin-lei, GAO Shu-ping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137, 147.
- [4] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.  
CHEN Xia, LIN Wei-xing, SUN Hai-shun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.
- [5] 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): 259-265.  
XU Min, CAI Ze-xiang, LIU Yong-hao, 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): 259-265.
- [6] 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 Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. 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.
- [7] 武骁, 何正友, 彭少博, 等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 67-73.
- WU Xiao, HE Zheng-you, PENG Shao-bo, et al. A UHVDC transmission line pilot protection method based on natural frequencies of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 67-73.
- [8] 杨明玉, 杨玉坤. 基于后向预测 Prony 算法的超高压输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 94-99.
- YANG Ming-yu, YANG Yu-kun. EHV transmission line faulty phase selection scheme based on backward Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 94-99.
- [9] Huang N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [11] 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 Zheng-you, 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.
- 
- 收稿日期: 2013-09-26; 修回日期: 2013-11-18
- 作者简介:
- 李博雅 (1991-), 男, 本科生, 主要研究方向为电力系统保护与安全控制;
- 杨耀 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统保护与安全控制;
- 杨立红 (1987-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与安全控制。E-mail: ncepu\_ylh@163.com