

# 一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法

李 勋, 黄荣辉, 姚森敬, 吕启深, 张 欣

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518048)

**摘要:** 基于时频复合分析的行波故障定位方法依赖于固有频率法的测距可靠性。为进一步提高该方法的测距精度及可靠性, 提出一种改进行波时频复合分析行波杆塔故障定位方法。首先分析两侧故障信号, 分别得到主固有频率, 采用改进的固有频率法初步得到故障点位置; 然后利用小波工具对信号进行时域分析, 根据固有频率法得到的故障位置推导故障点反射波头到达母线的时延; 最后由线路两端故障点反射波与初始行波的时间差之比进行杆塔故障定位。EMTP 联合 Matlab 仿真分析表明, 该方法提高了固有频率法测距稳定性, 有利于时域分析。同时, 对 400 km 线路的杆塔定位误差在 400 m 以内, 耐受过渡电阻达 350  $\Omega$ , 在线路长度变化 3 km 情况下不影响故障测距。

**关键词:** 固有频率; 行波; 时频特征; 杆塔故障定位; 鲁棒性; 小波分析

## A novel fault location method by tower based on traveling wave time-frequency analysis

LI Xun, HUANG Ronghui, YAO Senjing, LÜ Qishen, ZHANG Xin

(Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518048, China)

**Abstract:** Fault location based on time-frequency analysis highly relies on the reliability of natural frequency method. A novel traveling wave fault location by tower based on time-frequency analysis is proposed for improving the fault location reliability and accuracy. First, the fault signals on both sides are analyzed and the natural frequencies are got and the initial fault point is acquired by using improved natural frequencies method. Then, the signal is analyzed by wavelet tools in time-domain. The time of reflection traveling wave from fault point to bus is calculated using the initial fault location result. Finally, the fault is located by the ratio of time spacing between the initial and the reflection wave on both sides. Simulations in EMTP combined with MATLAB show that, the proposed method improves the stability of natural frequency method for time-domain analysis, the error of fault location by tower is less than 400 meters for 400 kilometers line, and it can tolerate transition resistance up to 350  $\Omega$ . At the same time, the fault location results will not change when the line length varies 3 kilometers.

**Key words:** natural frequency; traveling wave; time-frequency characteristics; fault location by tower; robustness; wavelet analysis

中图分类号: TM771

文章编号: 1674-3415(2015)20-0130-07

## 0 引言

随着我国电力事业的快速发展, 高压远距离输电线路大量建设, 伴随而来的各种短路故障对供电可靠性造成很大影响。快速准确地实现高压远距离输电线路精确故障定位能有效减少电力工作者巡线与停电的时间, 保障电网的安全可靠运行。

输电线路快速准确故障定位一直广受关注, 主要包括参数识别法<sup>[1-2]</sup>以及基于故障信号暂态特征

的行波法<sup>[3-7]</sup>与固有频率法<sup>[8-16]</sup>。参数识别法采用故障后系统变化的参数构成故障定位判据, 具有较强的耐过渡电阻能力, 但该算法本身不具备选相能力, 需结合故障选相结果确定故障点<sup>[2]</sup>。行波法主要有单端法<sup>[3,7]</sup>和双端法<sup>[4]</sup>, 其中双端法根据线路两端初始波头时间即可实现精确故障定位, 但依赖于两端精确同步, 因此需要专用的同步时钟单元, 常用的同步单元有 GPS 和北斗卫星定位系统; 单端法仅利用线路一端行波特征即可定位, 实现简单, 其难点

在于反射波头的性质识别受到过渡电阻的电弧特性、系统运行方式、负荷电流等的影响,其测距精度往往要低于双端行波法。固有频率法则是一种提取暂态信号特征频率成分的故障定位方法,该方法可靠性高,测距效果稳定,但在线路结构复杂的情况下可能会受到模混杂现象的影响,导致测距精确度下降<sup>[12]</sup>。

文献[17-18]结合了现有行波法与固有频率法的特点,提出综合固有频率法和行波法的时频复合的单端故障测距新方法。该方法利用固有频率法的测距结果实现单端行波故障测距,可以准确识别行波波头的性质,兼备了行波法测距精度较高与固有频率法测距稳定的优点,但仍存在不足之处:该方法没有考虑行波速度和线路长度因弧垂和季节而变化对测距结果的影响;同时,固有频率法作为时频结合测距算法的基础,其测距精度有待提高。

为进一步提高时频结合故障定位方法的可靠性与准确性,提出一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法。首先根据线路两端固有频率特征分别计算故障距离,再优化确定故障点的大致位置,结合单端行波测距理论确定线路两端来自故障点反射波的到达时刻,最后根据线路两侧初始波头与故障点反射波头的时间差之比实现杆塔故障定位。仿真分析表明,本文方法优化了固有频率法的测距结果,杆塔定位可靠性更高,同时不受行波速度和线路长度变化的影响。

## 1 行波时频复合分析故障定位方法原理

### 1.1 固有频率法

输电线路发生短路故障时,故障行波在故障点与母线端构成的回路中来回反射,因延时效应在故障电流中产生一种稳定存在的频率成分,称之为固有频率成分<sup>[9]</sup>。各固有频率成分中幅值及能量最大而频率值最小的为主固有频率成分。故障行波中对固有频率成分特征的研究已见于交直流输电线路故障测距<sup>[13,15]</sup>、故障选相<sup>[19-20]</sup>等领域。

图1为一简单双端供电线路系统图, $Z_m$ 、 $Z_n$ 分别为系统两端母线处的系统阻抗,线路全长为 $L$ ,在离母线 $m$ 端 $d$ 处发生短路故障。文献[21]研究发现,当系统端处于理想开路或短路情况时,固有频率值与故障点到母线端距离呈线性关系,若考虑系统阻抗对行波折反射的影响,则故障距离 $d_m$ 与电源侧行波主固有频率 $f_m$ 的关系为<sup>[13]</sup>

$$d_m = \frac{(\theta_m + \pi)v_m}{4\pi f_m} \quad (1)$$

式中: $\theta_m$ 为行波在母线 $m$ 端的反射角; $f_m$ 为行波主固有频率; $v_m$ 为相应频率下的行波模波速。行波反射角和模波速的计算参考文献[9]。

由式(1)可见,分析故障后母线端测量信号的频谱,辨识得到固有频率主成分,即可计算出故障点位置。考虑到固有频率是一种稳定存在的频率成分,基于该特征量的故障测距算法的稳定性较高。

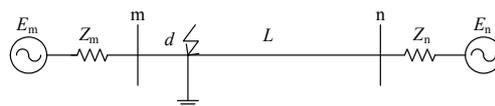


图1 双端供电系统简图

Fig. 1 A simple double-ended power supply system

### 1.2 基于固有频率法的反射行波时刻标定

图2为简化的故障行波传播路径,仅考虑行波在故障点与母线端的来回反射。故障点 $F$ 与母线 $m$ 端距离为 $d$ ,线路全长 $L$ ,以 $m$ 端为基准, $m$ 端故障行波初始波头时间为 $t_1$ ,初始行波经母线和故障点反射后,再次传到 $m$ 端母线的时间为 $t_3$ ;以 $n$ 端为基准, $n$ 端初始行波时间为 $t_2$ ,初始行波经 $n$ 端母线和故障点反射后,再次传到 $n$ 端母线的时间为 $t_4$ 。采用固有频率法计算得到的故障距离为 $d_m$ ,假设两种方法测距结果一致,则有

$$d_m = \frac{1}{2}v(t_3 - t_1) \quad (2)$$

式中, $v$ 为行波模波速。

可推导得到

$$t_3 = t_1 + \frac{2d_m}{v} \quad (3)$$

同理,对于 $n$ 端有

$$d_n = \frac{1}{2}v(t_4 - t_2) \quad (4)$$

$$t_4 = t_2 + \frac{2(L - d_m)}{v} \quad (5)$$

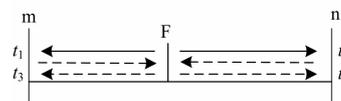


图2 简化故障行波路径图

Fig. 2 A simple path of the traveling wave

式(3)和式(5)给出了由固有频率法测距结果推导出的故障点反射波头时刻与初始波头时刻间的关系。采用小波分析法分析故障后线路两侧暂态行波,根据行波波头分布情况,在一定的误差范围内,找到与计算出的反射波头时间最为匹配的波头,即为故障点反射波,并可确定时域内的故障点反射波头

时间  $t_3$  和  $t_4$ , 从而由频域故障定位过渡到时域故障定位<sup>[17]</sup>。

## 2 改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法

### 2.1 改进固有频率法

固有频率法是时频复合分析故障定位方法的基础, 其准确性和可靠性将直接决定算法的可行性。文献[12]研究了单端固有频率法的测距误差与故障距离间的关系, 并得出测距误差随着故障距离增大而增大的结论, 可见, 固有频率法在近距离故障时精度更高。通过在线路两端分别采用单端固有频率法计算出故障点位置, 结合故障点位置与两端之间的距离关系, 对故障测距结果进行优化。当故障点位置距离某一端较近时, 即根据该端的计算结果确定故障点位置, 不考虑远端得到的测距结果; 若故障点位于线路中部, 则将两端计算结果取平均值, 再确定故障点大致位置。具体实现为

$$d_m = \begin{cases} d_m & d_m < 0.4L \\ L - d_n & d_n < 0.4L \\ 0.5(d_m + L - d_n) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d_m$ 、 $d_n$  分别表示在母线  $m$  处和  $n$  处采用单端固有频率法计算得到的故障距离;  $L$  为线路全长。

与以往的单端法相比, 改进后的固有频率法根据线路两端与故障点间距离关系进行优化, 充分利用固有频率法在近端故障时具有高测距精度的优点, 其测距结果可为暂态行波时域分析提供可靠保障。

### 2.2 行波杆塔定位方法

行波线模波速随频率变化较小, 且各行波波头之间的速度差更小, 因此, 可以忽略各行波波头传播速度之差, 近似认为其相等<sup>[22]</sup>。1.2 节介绍了由固有频率法测距结果寻找行波反射波头时间的方法, 根据小波分析法得到的行波波头时间, 由式(2)比式(4)可得

$$\frac{d_m}{d_n} = \frac{(t_3 - t_1)}{(t_4 - t_2)} \quad (7)$$

取  $T_1 = t_3 - t_1$ ,  $T_2 = t_4 - t_2$ , 进一步可求得故障点在线路中的位置为

$$\frac{d_m}{L} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \quad (8)$$

根据故障点与母线端距离与线路全长之比, 结合线路上杆塔的位置分布情况, 即可找出故障点相邻杆塔的位置, 利于故障位置查找<sup>[23-24]</sup>。

## 2.3 算法流程

故障定位方法流程如图 3 所示。由图可知, 本文方法根据线路两侧频域信息确定故障点位置, 再结合小波分析法辨识反射波头时间, 最后用杆塔定位方法精确寻找故障点位置, 双端数据不需同步, 杆塔故障定位过程中不需要计算行波波速。

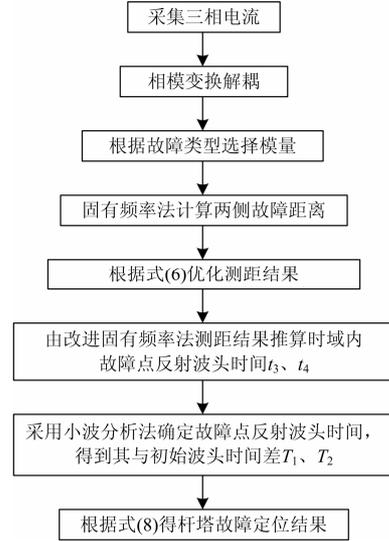


图 3 测距算法流程

Fig. 3 Flow chart of fault location algorithm

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型及参数

在 EMTP 中搭建如图 1 所示双端输电线路模型, 线路全长 400 km,  $m$  端电源等效参数为: 电源幅值 500 kV, 相角  $-3^\circ$ , 等效阻抗  $Z_m = 2.11 + j56.4 \Omega$ ;  $n$  端电源等效参数为: 电源幅值 505 kV, 相角  $1^\circ$ , 等效阻抗  $Z_n = 0.816 + j23.6 \Omega$ ; 输电线路单位长度线模参数为:  $L_m = 0.864$  mH,  $C_m = 0.01336$   $\mu$ F,  $R_m = 0.018 \Omega$ ; 输电线路单位长度零模参数为:  $L_n = 2.17$  mH,  $C_n = 0.01$   $\mu$ F,  $R_n = 0.161 \Omega$ <sup>[13]</sup>。系统采样频率为 1 MHz, 故障时刻为 0.025 s, 保留故障后两周期数据。

### 3.2 算法实现过程仿真分析

设置 BC 两相金属性接地短路故障, 故障点在离参考端 27% 线路全长位置, 仿真得到线路两侧故障信号, 滤波后的电流波形如图 4 所示。图 4(a) 表示  $m$  端信号, 图 4(b) 表示  $n$  端信号。采用离散傅里叶变换分析故障信号, 得到两侧电流主固有频谱如图 5 所示, 两端信号中的主固有频率值分别为  $f_m = 805$  Hz,  $f_n = 400$  Hz。根据单端固有频率法<sup>[9]</sup>可计算得  $d_m = 107.3$  km,  $d_n = 293.13$  km。按照 2.1 节提出的改进固有频率法优化故障测距结果, 得到故障距离为  $d_m = 107.3$  km。根据式(3)和式(5)可计算得到反射

波与初始波头的时间差, 约为  $t_3-t_1=729.1 \mu\text{s}$ ,  $t_4-t_2=1988.9 \mu\text{s}$ 。

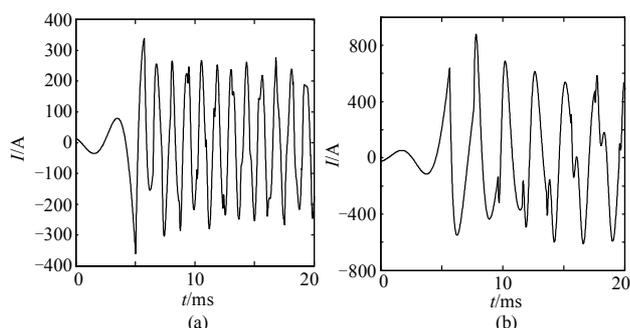


图 4 线路两侧故障电流波形

Fig. 4 Fault current of both sides

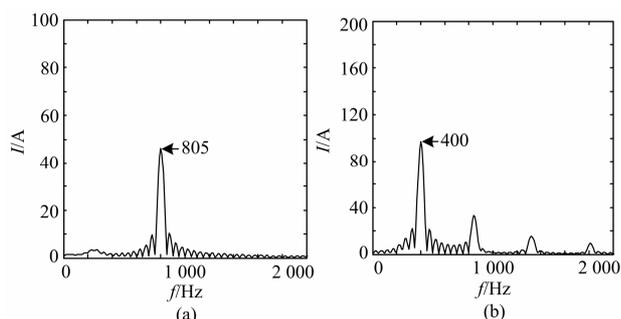


图 5 线路两侧故障电流频谱

Fig. 5 Spectrum of fault current of both sides

采用 Matlab 小波分析工具箱分析滤波前的故障电流信号, 得到行波波头分布及固有频率法推导反射波头时间如图 6 和图 7 所示。由图 6 可见, m 端行波初始波头时间为  $25371 \mu\text{s}$ , 由固有频率法计算出的故障点反射波时间为  $26100 \mu\text{s}$ , 如图中红色线条所示。在其前后各  $20 \mu\text{s}$  的时间范围内查找奇异点<sup>[18]</sup>, 发现仅有一个波头, 对应时间为  $26107 \mu\text{s}$ , 其与推算出的波头位置的间隔为  $7 \mu\text{s}$ , 可以确定其为反射波头; n 端反射波头的寻找方法与之类似, 最后确定的初始波头时间为  $25995 \mu\text{s}$ , 反射波头时间为  $27979 \mu\text{s}$ , 采用固有频率法确定的反射波头时间与实际时间仅差  $5 \mu\text{s}$ 。可见, 基于改进固有频率法的行波反射波头寻找方法准确可靠, 能够有效找到故障点反射波头时间。

根据式(8), 利用时域行波法计算得故障点位置为  $27.059\%$ , 不考虑弧垂等对线路长度的影响, 其对应测距误差仅有  $236 \text{ m}$ , 优于固有频率法。可见, 本文所提时频复合杆塔故障定位方法能准确确定故障点反射波头时间, 并具有较高的故障测距精度。

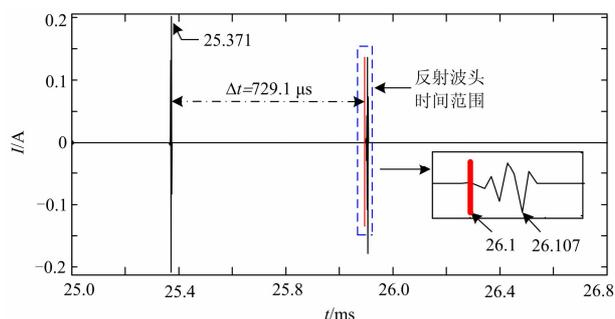


图 6 m 侧行波波头分布

Fig. 6 Traveling wave distributing of *m*-side

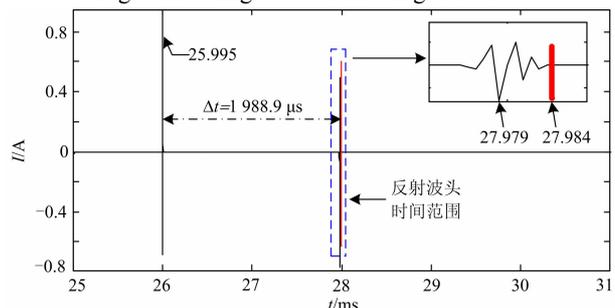


图 7 n 侧行波波头分布

Fig. 7 Traveling wave distributing of *n*-side

### 3.3 算法鲁棒性仿真研究

选取不同的故障类型和故障点位置, 分析本文所提算法的鲁棒性, 具体仿真结果如表 1 所示。

表 1 故障类型及故障位置变化仿真结果

Table 1 Simulation results of different fault types and different fault distance

故障类型	故障位置/%	$d_m/\text{km}$	$d_n/\text{km}$	改进固有频率法/ $\text{km}$	杆塔定位/%
AG	5	23.66	—	23.66	5.00
	25	103.47	290.5	103.47	25.02
	55	225	175.56	224.72	54.93
	75	291.2	102.6	102.6	74.93
AC	5	19.99	381.4	19.99	5.00
	25	99.52	302.15	99.52	25.02
	55	220.44	179.83	220.31	54.93
	75	297.18	101.02	101.02	74.98
ABG	5	19.99	381.44	19.99	5.00
	25	99.53	302.09	99.53	25.02
	55	218.94	179.77	219.59	54.93
	75	297.09	100.34	100.34	74.98
	95	376.2	20.02	20.02	95.00

由表 1 可知, 本文杆塔故障定位法的效果较为理想, 故障定位精度高, 且稳定可靠, 在不同故障位置 and 不同故障类型下定位结果均能基本保持一致。另外, 虽然单相接地故障情况下固有频率法的定位精度有所下降, 但是并未影响到行波法对故障点反射波头的准确提取。同时, 改进固有频率法能有效优化故障测距结果, 为行波故障定位提供可靠保障。

在离 m 端的线路 53% 位置处选取不同的过渡电阻值, 进一步分析本文算法的耐受过渡电阻能力。考虑到弧垂和季节变化等因素会导致输电线路实际长度不定<sup>[25]</sup>, 本次仿真过程中改变线路长度, 但保持故障位置在线路的占比不变, 以验证本文所提杆塔故障定位的效果, 具体仿真结果如表 2 所示。

表 2 过渡电阻及线路长度变化仿真结果

Table 2 Simulation results of different fault resistance and line length change

过渡电阻/ Ω	线路长度不变		线路长度+3 km		线路长度-3 km	
	改进固有频率法/km	杆塔定位/%	改进固有频率法/km	杆塔定位/%	改进固有频率法/km	杆塔定位/%
5	212.27	53.09	212.7	53.07	211.57	52.96
25	212.27	53.10	212.7	53.07	211.57	52.96
50	212.27	53.11	212.7	53.07	211.57	52.96
150	212.27	53.12	212.7	53.07	211.57	52.96
350	212.27	53.13	212.7	53.07	211.57	52.96

由表可见, 在同一线路长度情况下, 过渡电阻的变化未对故障定位结果造成影响, 表明固有频率法和本文方法的耐受过渡电阻能力均较强; 另外, 当改变线路长度时, 本文采用杆塔故障定位方法仍能准确确定故障点位置, 未受影响, 这一特征有利于实际现场对故障位置的查找。

在不同的故障点位置, 以固有频率法和改进固有频率法作为对比进行仿真分析, 得到三种方法的故障定位误差如图 8 所示。由图 8 可知, 单端固有频率法测距误差较大, 在故障点位置变化过程中鲁棒性较差, 测距性能较低, 其在远距离故障时定位精度明显下降; 改进固有频率法则很好地利用了单端固有频率法近端测距精度高的优点, 其在故障位置变化过程中表现稳定, 总体测距精度较高, 最大测距误差小于 1 km, 有利于行波法中反射波头的准确识别; 而基于改进固有频率法的行波杆塔故障定位方法则保持了较高的测距精度与稳定性, 其最大测距误差在 400 m 以下, 进一步提高了故障测距的精确度, 明显优于传统方法。综上可见, 本文所提

算法测距精度高, 效果好, 鲁棒性强。

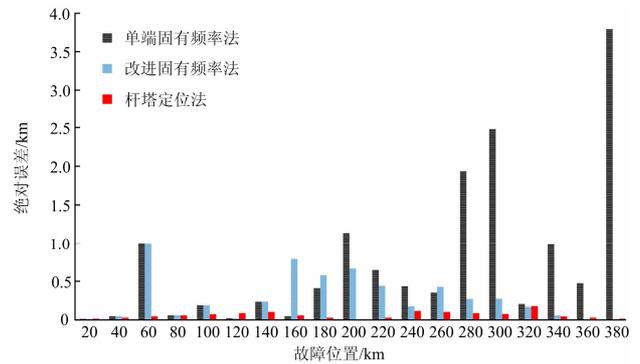


图 8 不同故障测距方法对比

Fig. 8 Comparison of different fault location methods

#### 4 结论

本文提出了一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法, 通过理论分析和仿真实验, 得到如下结论:

- 1) 改进固有频率法基于单端固有频率法近端测距精度高的优点, 能有效提高故障测距精度, 利于行波时域分析过程中反射波头的确定;
- 2) 本文所提杆塔故障定位方法测距精度高, 稳定性强, 大量仿真表明, 其测距误差在 400 m 以内, 同时耐受过渡电阻能力达 350 Ω;
- 3) 本文方法无需计算行波速度, 同时也不受线路长度变化的影响。

#### 参考文献

[1] 李勋, 石帅军, 龚庆武. 采用信赖域法和双端非同步数据的故障测距算法[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 396-400.  
LI Xun, SHI Shuaijun, GONG Qingwu. Transmission line fault location algorithm using trust-region method and two-terminal unsynchronized data[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 396-400.

[2] 索南加乐, 王增超, 钟应, 等. 基于参数识别的长输电线路接地距离保护算法[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2814-2821.  
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHONG Ying, et al. Grounding distance protection algorithm for long transmission line based on parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2814-2821.

[3] 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.
- [4] 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 Qian, 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.
- [5] 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 traveling-wave[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2706-2713.
- [6] 周濂, 卢毅, 李剑, 等. 小波包提取算法和相关分析用于电缆双端行波测距[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1695-1699.  
ZHOU Quan, LU Yi, LI Jian, et al. Wavelet packet extraction algorithm and correlation analysis for double terminal traveling wave fault location of cable[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1695-1699.
- [7] 李博雅, 杨耀, 杨立红. 高压直流输电线路单端故障测距组合法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 116-121.  
LI Boya, YANG Yao, YANG Lihong. A combined method of single-ended fault location for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 116-121.
- [8] 林圣, 何正友, 李小鹏, 等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 243-248.  
LIN Sheng, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 243-248.
- [9] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 69-75.  
WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-75.
- [10] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 99-104.  
WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 99-104.
- [11] 夏璐璐, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 67-73.  
XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [12] 邬林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [13] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 133-138.  
XU Gao, GONG Qingwu, LI Xun, et al. Single terminal fault location method based on atomic decomposition and traveling wave natural frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 133-138.
- [14] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 一种利用行波自然频率的杆塔故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 78-82.  
XU Gao, GONG Qingwu, LI Xun, et al. A novel method of tower fault location using natural frequencies of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 78-82.
- [15] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路故障定位的单端电压自然频率方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 104-111.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Fault location for  $\pm 800$  kV HVDC transmission lines using natural frequency of single terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 104-111.
- [16] STYVAKTAKIS E, BOLLEN M H J, GU L Y H. A fault location technique using high frequency fault clearing transients[J]. IEEE Engineering Review, 1999, 9(5): 58-60.
- [17] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网

- 故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 130-136.
- LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of traveling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [18] 李博雅, 杨耀, 杨立红. 高压直流输电线路单端故障测距组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 116-121.
- LI Boya, YANG Yao, YANG Lihong. A combined method of single-ended fault location for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 116-121.
- [19] 王兴国, 黄少锋. 基于固有频率的超高压线路选相新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1502-1508.
- WANG Xingguo, HUANG Shaofeng. New method of phase selection of EHV lines based on natural frequency[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1502-1508.
- [20] 徐高, 龚庆武, 关钦月, 等. 利用行波固有频率和原子能量熵的故障选相方法[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1688-1693.
- XU Gao, GONG Qingwu, GUAN Qinyue, et al. A fault-phase selection method based on natural frequency of traveling wave and atomic energy entropy[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1688-1693.
- [21] SWIFT G W. The spectra of fault-induced transients[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(3): 940-947.
- [22] LIN S, HE Z Y, LI X P. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines[J]. IET Gener, Transm, and Distrib, 2012, 6(8): 764-772.
- [23] 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 wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [24] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 65-70.
- SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Time domain fault location method based on transmission line parameter identification using two terminal data[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 65-70.
- [25] 陈玥云, 覃剑, 刘巍, 等. 影响输电线路长度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 41-44.
- CHEN Yunyue, QIN Jian, LIU Wei, et al. Analysis on main factors impacting length of transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 41-44.

---

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-03-22

作者简介:

李 勋(1983-), 男, 通信作者, 工学博士, 工程师, 主要从事主网技术监督与电力新技术研究工作。E-mail: leesci@yeah.net

(编辑 魏小丽)