

# 基于双端故障信息的高压电缆—架空线 混合线路故障测距方法

杨军<sup>1</sup>, 伍咏红<sup>2</sup>, 江文波<sup>3</sup>, 潘雪莉<sup>3</sup>, 田苗欣<sup>1</sup>, 辛振涛<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 湖南省电力公司, 湖南省 长沙市 410007;  
3. 武汉供电公司, 湖北省 武汉市 430013)

## A Fault Location Algorithm for Hybrid Transmission Line Composed by High Voltage Cable and Overhead Line Based on Two-Terminal Information

YANG Jun<sup>1</sup>, WU Yong-hong<sup>2</sup>, JIANG Wen-bo<sup>3</sup>, PAN Xue-li<sup>3</sup>, TIAN Miao-xin<sup>1</sup>, XIN Zhen-tao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, Hunan Province, China;

3. Wuhan Electric Power Supply Company, Wuhan 430013, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** A two-terminal fault information based fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line is proposed. In the proposed algorithm that decides fault position by searching the crossover point of voltage curves along the hybrid line from the beginning terminal and ending terminal respectively, the piecewise recursion of power frequency voltages at the beginning and ending terminals of the hybrid line as well as the power frequency current flowing along the hybrid line is used and the method to discriminate the false root is researched; and then according to various conditions, including asynchronous two-terminal data, different sampling frequency and different transition resistances, an overall simulated. Simulation results show that the proposed method is a practical fault location method that can offer fault location with high precision, and does not affected by the impedances at both terminals of the hybrid line and transition resistance.

**KEY WORDS:** hybrid transmission line; high voltage power cable; overhead line; fault location; false root

**摘要:** 提出了一种基于双端故障信息的高压混合线路测距算法, 利用输电线路首、末端电压、电流工频量分段递推, 通过搜索两端线路沿线电压曲线的交点来确定故障点位置, 并讨论了伪根的鉴别方法, 进而针对双端数据不同步、不同采样频率、不同过渡电阻等各种情况进行了全面的仿真计算。仿真结果表明, 该方法测距精度高, 且不要求线路两端数据同步, 不受线路两端系统阻抗和故障点过渡电阻的影响, 具备较高的实用价值。

**关键词:** 混合线路; 高压电缆; 架空线; 故障测距; 伪根

## 0 引言

由于土地资源紧张, 同时为了美化环境, 城市输电线路逐渐由以往占地多的明线架空方式改为埋地的电缆方式, 并进一步在原有电缆、架空输电线路的基础上发展了应用越来越广泛的电缆—架空线混合输电线路。相对于架空线, 电缆输电线路发生故障的概率大大降低, 可靠性明显提高, 但由于制造上的瑕疵或经过一段时间的使用, 电缆的绝缘水平会下降, 易引起接地故障, 同样, 架空线也会发生类似故障。高压电缆—架空线混合输电线路发生故障时, 准确的故障定位一方面能减轻巡线负担, 另一方面又能加快线路恢复供电, 减少因停电造成的经济损失。随着混合线路在城市里的广泛应用, 其故障的精确定位具有越来越重要的意义。

国内外对于单独的电缆和架空线故障定位方法研究很多, 已提出了多种故障定位原理和算法, 主要可分为阻抗法和行波法 2 大类, 但对 2 种线路的混合系统研究较少<sup>[1-4]</sup>。电缆—架空线混合线路的阻抗不连续, 对阻抗法来说不再是均匀传输线, 对行波法来说存在波阻抗差异较大导致的波速不一致等问题。文献 [5] 提出了一种基于分布参数模型的区段故障定位法, 该方法实现较为简单, 但没有考虑伪根问题, 只适用于结构相对简单的电缆—架空线混合线路输电系统, 对于更为复杂的多段电缆、架空线交替出现的输电线路在判定故障区段时判断依据较复杂, 导致误差会随着连接点的增多而增大, 使故障测距的精度降

低。文献[6-7]提出了基于波速度归一算法的双端行波测距法，在理论上排除了线路参数引起的波速度不单一的影响，拓宽了行波测距法的应用范围，但过渡电阻的大小会影响初始行波波头能量的大小，线路衰减严重或过渡阻抗过大时，需要测距装置有较好的灵敏度，并且实现起来较复杂。文献[8-9]提出了三相母线外加同一电压脉冲式单端行波测距法，该方法已在铁路信号的电源供电系统中得到应用，但仍存在不足，如何降低行波波头在传播过程中的衰减以及如何去除噪声的影响还有待进一步研究<sup>[10-14]</sup>。

本文提出一种基于双端故障录波信息的高压混合线路测距算法，利用故障区域首、末端电压、电流工频量分段递推，算出沿线电气量分布，最终通过全局一维搜索找出故障点的准确位置。

### 1 基于双端信息的高压混合线路测距算法原理

图1为双端电源输电线路的故障示意图，在M端和N端得到的电气量如图中所示。设线路全长为*l*，依据长线波动方程，线路MN上任意一点*x*的电压，可分别由M端和N端的电气量推得

$$\begin{cases} \dot{U}_x = \dot{U}_M \cosh \gamma x - Z_c \dot{I}_M \sinh \gamma x \\ \dot{U}_x = \dot{U}_N \cosh \gamma(l-x) + Z_c \dot{I}_N \sinh \gamma(l-x) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $Z_c$  为线路波阻抗； $\gamma$  为线路传播常数； $\dot{U}_M$  为M端电压； $\dot{I}_M$  为M端电流； $\dot{U}_N$  为N端电压； $\dot{I}_N$  为N端电流。

假定MN两端之间的F处发生故障，则M和F之间的任意一点电压和电流可以用M端的电压、电流表示；同理，N和F之间的任意一点电压和电流也可以用N端的电压、电流表示，所以故障点处的电压可以用两端的电气量表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_F = \dot{U}_M \cosh \gamma x - Z_c \dot{I}_M \sinh \gamma x \\ \dot{U}_F = [\dot{U}_N \cosh \gamma(l-x) + Z_c \dot{I}_N \sinh \gamma(l-x)] e^{j\sigma_d} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\sigma_d$  为两端数据采样的不同步角度。

在理论上，不同步只影响正弦信号的相位，而不影响其幅值，因此，用两端数据测得的故障点F处的电压幅值应该相等，即

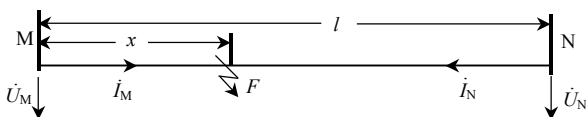


图1 双端电源故障线路示意图  
Fig. 1 Diagram of fault line

$$|\dot{U}_F| = |\dot{U}'_F| \quad (3)$$

由M端和N端线路分别向对侧推得沿线的正序、负序、零序电压如图2所示。图中虚线段表示由M端和N端沿线路推得对侧电压时，在越过故障点F后，得出来的并不是线路上的真实电压，但按旧长线方程推得的线路电压的变化趋势依旧不变(实际的电压变化曲线并非直线，文中只是为了便于说明进行简化)。

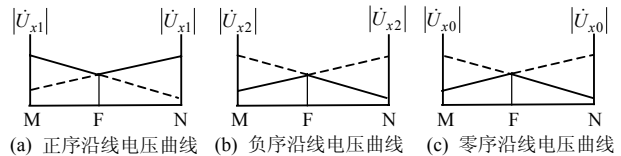


图2 正序、负序、零序网络的沿线推导电压幅值曲线  
Fig. 2 Positive, negative and zero sequence voltage amplitude along the line

从图2中可见，从M端和N端测得的沿线电压幅值曲线是单调的，它们的交点(即故障点)只有一个。虚线上的点是始、末端感受到的故障点之后那段距离上的电压幅值，因此，测距的关键就是找出该点。显然，在线路MN上沿线推导出来的正序电压幅值在故障点F处最小，负序和零序电压幅值在故障点F处最大。

混合线路不同电缆分段或架空线分段的电气参数是不同的，根据式(2)推导其电压分布所涉及的参数也会随着分段的不同而变化。为了解决这一问题，可以假定将线路从首端(或末端)开始在第一段内推导电气量分布，并将推导所得末端(或首端)电气量保存为下一段的首端(或末端)电气量；此时及时修改推导参数，在下一段内推导电气量分布，依次类推可得到全程的电气量分布结果。当然，在电缆和架空线的接头处，由于两者电气参数的不同，电压幅值曲线在接头处的斜率会发生变化。

因此，在已知线路两端电压、电流和线路参数的基础上，求解方程(3)或者找出图2中电压幅值曲线的交点就可以得到故障点位置。

### 2 测距算法的具体实现

本算法中采用的判据是电压幅值相等的原理，但它只适用于正弦模型，而故障后的电压、电流其频谱成分相当复杂，如果不能很好地滤除输入信号中含有的非周期分量和高次谐波，将会影响测距的精度，因此，需要使用合适的数字滤波算法。综合比较矩形窗、三角窗、汉明窗、汉宁窗以及布莱克曼窗仿真结果，采用加三角窗的全波傅氏算法效果

理想。同时为了使各非周期分量得到最大的衰减，使用故障后第 2 个周期的全波采样数据。

故障点定位最直接的方法便是解长线双曲函数方程式(3)，不过在已知沿线电压分布的情况下去解长线方程并不理想，根据测距算法基本原理，从首末两端推导所得的电压分布曲线会在故障点相交，故障点的定位实际上就可以描述为寻找搜索曲线的交点位置。搜索曲线交点的方案一般为二分法搜索或全局一维搜索。二分法搜索优势显而易见，其搜索速度很快，可以迅速得到搜索结果，但是针对于混合线路，其故障类型相对于单一线路形式要复杂一些，在保证测距准确的前提下，不同的相序门槛  $\varepsilon$  的具体取值无法确定；全局一维搜索尽管速度较慢，但可以通用，适合不同故障情况，易于程序实现，且计算机的运算水平已可以应付一维搜索所需的较长时间。只要两条分布曲线交叉，其相同点的差值就会发生符号反转。全局一维搜索就是利用这一特性来搜索电压分布曲线并记录下发生符号反转的位置，即故障点的位置。

故障测距算法所需要的数据为：线路的各段长度及传输介质、线路的波阻抗及传播系数、本侧及对侧故障后工频电压、电流相量。线路长度及类型是已知的，后两项可离线的计算出来预先存储在微型机里，需要传送的数据为线路两侧的三相工频电压、电流(两侧的  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 、 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ )共 12 个量。

混合线路故障测距的具体流程如下：当系统中发生故障时，将故障发生后线路两端第二周期的数据采样输入测距装置，若其中负序电气量小于一个预先设定的定值则认为系统发生对称故障，采取正序电压测距；若负序电气量较大则认为系统发生非对称故障，采取负序电压测距。测距装置据此计算出测距结果，并判断故障点位于线路上的具体位置及故障处的传输介质。

### 3 算法仿真分析

#### 3.1 仿真模型

该 220 kV 系统参数如图 3 所示，M 端系统阻抗为  $Z_{MS1} = (0.54 + j18.25)\Omega$ ， $Z_{MS0} = (1.85 + j54)\Omega$ ；N 端系统阻抗  $Z_{NS1} = j90\Omega$ ， $Z_{NS0} = j133\Omega$ 。电缆线路长度为 10 km，其单位长度正序阻抗  $Z_{11} = (0.0241463 + j0.1622)\Omega/\text{km}$ ，单位长度零序阻抗  $Z_{01} = (0.1964634 + j0.124878)\Omega/\text{km}$ ，单位长度对地电容  $C = 0.31707317\mu\text{F}/\text{km}$ ；架空线路长度

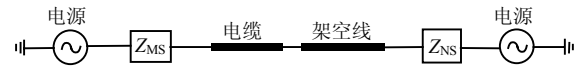


图 3 仿真系统接线图

Fig. 3 Power system grid for simulation

为 30 km，其单位长度正序阻抗  $Z_{12} = (0.08 + j0.41)\Omega/\text{km}$ ，单位长度零序阻抗  $Z_{02} = (0.333 + j1.315)\Omega/\text{km}$ ，单位长度对地正序电容  $C_1 = 0.00887\mu\text{F}/\text{km}$ ，单位长度对地零序电容  $C_0 = 0.00622\mu\text{F}/\text{km}$ 。采样频率为 1800 Hz，即一个周期采样 36 点。

#### 3.2 仿真结果

仿真结果如表 1~3 所示。仿真结果中相对误差为 0 的情况是由于实际故障距离与测距结果误差小于计算步长的一半而引起的。

表 1 单相接地故障的测距仿真结果

Tab. 1 Simulation results of single-phase grounding fault

实际故障距离/km	过渡电阻/ $\Omega$	测距结果/km	相对误差/%
4	50	4.00	0.000
	100	4.12	0.300
	200	4.21	0.525
10	50	10.01	0.025
	100	10.01	0.025
	200	10.01	0.025
16	50	16.01	0.025
	100	15.96	0.100
	200	15.90	0.250
37	50	37.01	0.025
	100	37.02	0.050
	200	37.03	0.075

表 2 两相故障的测距仿真结果(过渡电阻为 50  $\Omega$ )

Tab. 2 Simulation results of line to line fault (fault resistance is 50  $\Omega$ )

实际故障距离/km	过渡电阻/ $\Omega$	测距结果/km	相对误差/%
6	两相接地	5.92	0.200
10		9.87	0.325
28		27.98	0.050
6	两相相间	5.98	0.050
10		9.96	0.100
28		28.00	0.000

表 3 三相对称故障的测距仿真结果(过渡电阻为 50  $\Omega$ )

Tab. 3 Simulation results of three-phase fault (fault resistance is 50  $\Omega$ )

故障点/km	测距结果/km	相对误差/%
3	2.91	0.225
7	6.79	0.525
10	9.71	0.725
20	19.93	0.175
30	29.97	0.075

从以上仿真计算结果可以看出，无论故障是发生在电缆段、架空线段还是分段点上，算法均给出了较为精确的测距结果，相对误差控制在很小的范围，且结果基本不受过渡电阻的影响。

### 3.3 双端数据不同步的仿真结果

在仿真程序 ATP-EMTP 中,采样的数据是严格同步的,而在实际应用中,由于数据传输的不确定性,双端数据大部分情况下是不同步的。尽管测距原理中所使用的式(2)仅要求了双端数据的幅值,为了检测双端数据不同步对于测距算法的影响,人为设置双端的不同步角度来进行仿真。过渡电阻取  $50\Omega$ ,选择故障点为 20km,故障类型为单相接地,具体的仿真结果见表 4。

表 4 双端数据不同步的故障测距仿真结果

Tab. 4 Simulation results of two-terminal asynchronous data

相位差/(°)	测距结果/km	相对误差/%
10	20.01	0.025
30	20.02	0.050
60	20.03	0.075
90	20.02	0.050

由表 4 可知,在双端数据不同步时,测距算法不受影响,依然给出了正确的故障点定位,测距仍能达到较高的精度。值得注意的是,在双端不同步的情况下,沿线电压的分布曲线较之同步情况下更倾向于不严格单调递增或递减,这主要是由于推导过程采用的是电气量的幅值而不是相量值,每当向量值越过复平面横轴时就会产生单调性的变化。这一情况可能会导致测距伪根的出现。

### 3.4 不同采样频率下的仿真结果

不同的采样频率,对于测距算法的结果也会产生一定的影响。上文仿真中采样频率为 1 800 Hz,即一个周期采样 36 点,下面选取采样频率 3 600 Hz (一个周期采样 72 点)来观察不同采样频率对测距结果的影响。过渡电阻为  $50\Omega$ ,故障类型为单相接地,具体仿真结果见表 5。

表 5 周期采样 72 点故障测距仿真结果

Tab. 5 Simulation results of 72 points per sampling-period

故障点/km	测距结果/km	相对误差/%
4	4.00	0.000
6	5.99	0.025
10	9.99	0.025
19	19.00	0.000
31	31.00	0.000

根据表 5 的仿真结果,可以发现随着采样频率提高,故障测距的精度也随之提高,受其他因素的影响也越小。虽然采样频率的提高必然会使得测距结果的精度提高,但是这是在牺牲了一定计算时间的前提下得到的,如果测距的精度实际上已经可以满足设计要求,提高采样频率得到的较精确结果不足以抵消所损失的计算时间,提高频率就没有必要了。

### 3.5 多分段混合线路的仿真结果

前面所做仿真均是针对双分段的电缆-架空线混合线路,在实际的电力系统应用中,由于混合线路多在城市内输电线路使用,鉴于城市复杂的地理环境,混合线路可能由多段电缆、架空线组成。因此,有必要针对多分段混合线路的情况进行仿真分析。这一部分仿真设定电缆或架空线的不同段均采用相同的电缆参数或架空线参数,线路全长 40 km,距 M 端 20 km 处单相接地故障,过渡电阻为  $50\Omega$ 。鉴于篇幅这里最多只考虑了 4 分段的情况,更多的复杂分段混合线路的仿真结果与此类似,具体的仿真结果见表 6。

表 6 多分段故障测距仿真结果

Tab. 6 Simulation results of multi-sections transmission line

分段数	线路结构	长度比例	故障距离/km	测距结果/km	相对误差/%
3	电缆-架空线-电缆	4 : 32 : 4	20	20.00	0.000
4	电缆-架空线-电缆-架空线	3 : 17 : 3 : 17	20	20.01	0.025
4	架空线-电缆-架空线-电缆	15 : 3 : 20 : 2	20	20.04	0.100

由表 6 可知,该测距算法能够正确计算出多分段线路的故障测距结果,测距精度也是令人满意的。

## 4 伪根问题分析

在前文所述的测距基本原理中,很重要的一点就是认为依据长线方程推得沿线电压幅值是单调的,从而保证了两个电压曲线的交点只有一个,也即只有一个故障距离。那么确定推得的沿线电压幅值趋势线是否严格单调以及交点是否唯一,需要对长线方程式(2)进行再分析<sup>[15]</sup>。由于只对式(2)故障点 F 处电压幅值  $|\dot{U}_F|$  的单调性和变化趋势进行分析,因此,对式(2)进行如下变化推导。分析过程的各个相量如图 4 所示。

$$\begin{aligned} \dot{U}_F &= \dot{U}_M \cosh \gamma x - Z_c \dot{I}_M \sinh \gamma x = \\ &= \frac{1}{2}(\dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c) e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_M + \dot{I}_M Z_c) e^{-\gamma x} = \\ &= (\dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c) e^{\gamma x} + (\dot{U}_M + \dot{I}_M Z_c) e^{-\gamma x} = \\ &= (\dot{U}_M - \dot{I}_M Z_c) e^{2\gamma x} + (\dot{U}_M + \dot{I}_M Z_c) \end{aligned} \quad (4)$$

从图中可以看出,随着沿线路 X 点的不断前移,  $|\overline{OD}|$  的变化轨迹是沿圆弧 DEF 变化。可以看出在圆弧 DE 段时,幅值不断减小,在 E 点时,取得最小值,过了 E 点后,幅值又不断增大,从而可以看出  $|\dot{U}_F|$  的变化趋势并不是单调的。尽管在分析过程

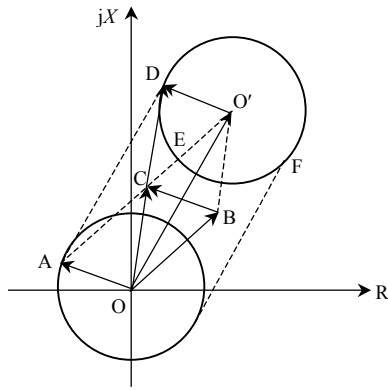


图4  $|U_F|$ 变化相量示意图  
Fig. 4 Phasor diagram of  $|U_F|$

中做了一些近似，而且沿线推导得到电压幅值的这种非单调变化情况随着线路故障类型和故障距离的不同，并不一定都能出现，但是在某些极端的情况下存在有伪根的可能性。经过详细仿真，发现使用正序电压推导时出现伪根的机率较大，因此在发生三相短路时必须考虑伪根问题。在图5所示某种情况下，沿线路M端向N端推导沿线电压幅值曲线时，当电压幅值到达O点时，由于电压幅值又开始增大，因此电压幅值曲线开始上扬，与由N端向M端推导的电压幅值曲线产生第二个交点。由前面的分析可以知道，故障点处的电压幅值应该是实际线路的最小值，因此，对于交点 $F_1$ 和 $F_2$ 相比，显然 $F_1$ 点处是最小值而 $F_2$ 点处不是最小值，为伪根。根据故障点处的电压幅值是最小值的原则就可以剔除伪根。

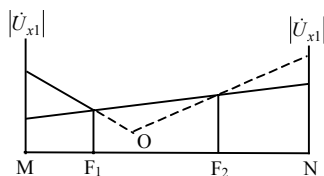


图5 电压幅值曲线  
Fig. 5 Voltage amplitude along the line

据此，可以对原有测距算法进行改进。当测距结果出现伪根时，就比较这些点的电压幅值，对称故障时选择其中电压幅值最小值(若是不对称故障则选择最大值)为测距算法的最终结果。下面是几个可能存在伪根时的测距仿真，设定线路类型为电缆-架空线，双端电源分别为 $220\angle 0^\circ$ 和 $220\angle 30^\circ$ ，其它参数与前文相同，仿真结果如表7所示。

表7 存在伪根的故障测距结果  
Tab. 7 Results including false roots

故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	实际故障距离/km	计算故障距离/km	伪根
A0(单相接地)	1	5	5.01	23.99
AB(两相相间短路)	1	15	14.96	无
ABC(三相短路)	1	20	19.94	14.47

根据以上仿真结果可以看出，改进后的测距算法能够发现伪根的存在并准确剔除伪根，得到准确的测距结果。

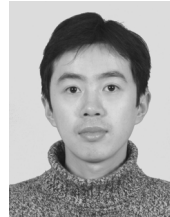
### 5 结论

本文提出了一种实用的基于分布参数的混合线路双端故障测距算法，仿真结果表明，该方法测距精度高，能够正确区分伪根，且不要求线路两端数据同步，不受线路两端系统阻抗和故障点过渡电阻的影响，技术上易于实现。

### 参考文献

- [1] 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): 62-66.  
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): 62-66(in Chinese).
- [2] 徐青山, 陈锦根, 唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.  
Xu Qingshan, Chen Jinggen, Tang Guoqing. Single ended fault location approach considering bus distributed capacitance effect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 70-73(in Chinese).
- [3] 李骏, 范春菊. 基于小波分析的电力电缆行波故障测距[J]. 继电器, 2005, 33(14): 15-18.  
Li Jun, Fan Chunju. Research of electric cable traveling wave fault location based on wavelet analysis[J]. Relay, 2005, 33(14): 15-18(in Chinese).
- [4] 于玉泽, 覃剑, 李功新, 等. 电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 64-69.  
Yu Yuze, Qin Jian, Li Gongxin, et al. A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 64-69(in Chinese).
- [5] 吴承恩, 邵能灵, 郁惟铺, 等. 超高压电缆-架空线混合线路故障测寻方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 26-30.  
Wu Chengen, Tai Nengling, Yu Weiyong, et al. New method of fault detection and location for EHV cables with transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 26-30(in Chinese).
- [6] Huang Yizhuang, Li Quanzhao, Xia Mingchao. A new fault location method [C]. International Conference on Power System Technology, Singapore, 2002.
- [7] 李骏, 范春菊. 基于小波分析的电缆-架空线混合输电线路行波故障测距方法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 92-97.  
Li Jun, Fan Chunju. Wavelet analysis based traveling wave fault location for hybrid transmission line consisting of power cable and overhead line[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 92-97(in Chinese).
- [8] 季英业, 和敬涵. 基于小波变换的铁路10 kV系统单相接地故障行波测距法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 13-15.  
Ji Yingye, He Jinghan. Application of travelling wave based fault location in 10 kV railway automatic blocking and continuous power transmission lines[J]. Power System Technology, 2003, 27(11):

- 13-15(in Chinese).
- [9] 何正友, 杨建维, 周超, 等. 绝热铁路自闭贯通线架空线-电缆混合线路行波测距[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(3): 46-50.  
He Zhengyou, Yang Jianwei, Zhou Chao, et al. Study on travelling wave fault location for overhead line combined with cable in railway automatic and continuous transmission line[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(3): 46-50(in Chinese).
- [10] 施世鸿, 何奔腾. 不受TA饱和影响的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 67-71.  
Shi Shihong, He Benteng. Fault location algorithm for HV transmission lines immune to saturation of current transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 67-71(in Chinese).
- [11] 刘千宽, 李永斌, 黄少锋. 基于双端电气量的同杆平行双回线单线故障测距[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 37-40.  
Liu Qiankuan, Li Yongbin, Huang Shaofeng. Single line fault location of parallel double transmission line on same tower based on two-terminal electrical quantities[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 37-40(in Chinese).
- [12] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 利用CVT二次信号的频域行波故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 73-78.  
Wu Linyong, He Zhengyou, Qian Qingquan. Frequency domain traveling wave fault location method using CVT's secondary signals [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 73-78(in Chinese).
- [13] 施世鸿, 何奔腾. 基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 84-88.  
Shi Shihong, He Benteng. A two-terminal fault location algorithm using asynchronous phasors based on distributed parameter model [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 84-88(in Chinese).
- [14] 李廷伟, 姬广展, 王鹰, 等. 一种改进的输电线路双端行波故障测距系统[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 90-92.  
Li Tingwei, Ji Guangzhan, Wang Ying, et al. An improved double terminal traveling wave fault locating system for transmission line [J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 90-92(in Chinese).
- [15] 辛振涛, 尚德基, 尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器, 2005, 33(6): 36-39.  
Xin Zhentao, Shang Deji, Yin Xianggen. False root and its improvement of a two terminal fault location algorithm on transmission line[J]. Relay, 2005, 33(6): 36-39(in Chinese).



杨军

收稿日期: 2009-01-20。

作者简介:

杨军(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护及电力系统运行与控制,

E-mail: yj5460@163.com;

伍咏红(1972—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

江文波(1968—), 男, 高级工程师, 从事电力调度运行管理工作。

(编辑 褚晓杰)