

# 基于脉冲发射原理的配电网故障定位方法的研究

蔡秀雯<sup>1</sup>, 杨以涵<sup>1</sup>, 田洪迅<sup>2</sup>, 车颖<sup>2</sup>, 郭朝晖<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 黑龙江省齐齐哈尔电业局, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

**摘要:** 在小波理论的基础上, 提出了配电网行波故障定位方案。在故障相的线路首端发射脉冲信号, 采集线路首端的行波信号, 利用小波消噪原理对采集到的行波信号进行滤波, 比较线路正常时的行波信号和线路故障时的行波信号, 利用小波变换对信号奇异性的检测原理找出行波信号中的奇异点, 得到故障距离。对结构简单的线路, 在此基础上分析特征波即可准确定位; 对结构复杂的线路, 在确定故障距离的基础上, 根据电网拓扑划定故障可能的几个分支。然后在线路首端注入电流, 通过探测器检验几个分支上是否有电流流过, 检测到电流的即为故障点所在的分支。详细分析了该行波定位方案在两次现场试验的应用结果, 证明了该方案的可行性。

**关键词:** 行波; 定位; 配电网; 小波变换; 奇异点

## A new scheme of travelling wave fault location for distribution network based on wavelet transform

CAI Xiu-wen<sup>1</sup>, YANG Yi-han<sup>1</sup>, TIAN Hong-xun<sup>2</sup>, CHE Ying<sup>2</sup>, GUO Zhao-hui<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Qiqihar Electric Power Bureau, Qiqihar 161005, China)

**Abstract:** On the foundation of wavelet theory, this paper puts forward a new scheme of travelling wave fault location for distribution network. On the head of fault phase, it firstly projects the pulse signal, gathers the signal of travelling wave, eliminates the noise of travelling wave by using wavelet transform, compares the signal of travelling wave between the normal and the fault, and detects the singularity of travelling wave by wavelet transform. And then the fault distance can be obtained. For the simple lines, the fault point can be located accurately by analyzing feature wave on this foundation. For the complex lines, it delimits the possibility of fault branches according to the topology of electrical network, after determining the fault distance. After injecting current into the head of line, the detector can check whether these branches flow current, the fault branch is that the current has flowed. The applications of this scheme result in the lines on-the-spot is detailed, which proves the feasibility of this scheme.

**Key words:** travelling wave; fault location; distribution network; wavelet transform; singularity

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)02-0001-05

## 0 引言

随着配电网网架的加强, 线路增长, 分支线路也增多, 线路变得复杂, 用传统的巡线方法找出具体故障点的位置非常困难, 少则几小时, 甚至数十小时, 不仅耗费了大量人力物力, 而且延长了停电时间, 影响供电可靠性。尤其是在气候严寒的冬季或雨雪天气, 路况艰难, 现有找故障点的方法劳动强度非常大, 难以适应当前生产的需求。因此开展配电网故障定位技术的研究具有重大意义。

行波法测距的可靠性和精度在理论上不受线路类型、故障电阻及两侧系统的影响。20世纪90年代初, 我国提出利用故障暂态电流的输电线路行波故障测距技术, 从而推动了现代行波故障测距的发展, 并迅速商业化<sup>[1]</sup>。目前行波测距技术已经成功应用到输电线路, 但配电网的故障定位问题

尚是一个难题。

行波法利用暂态故障信号中的高频分量进行测距。而传统的 Fourier 分析法无法考察信号的时域局部特性; 而小波变换则可“聚焦”到信号的任意细节, 从而能分析某一局部时刻的奇异电气量以达到精确测距的目的<sup>[2,3]</sup>。此外, 运用小波进行信号消噪处理是小波理论的重要应用之一。

本文在小波理论的基础上, 提出了配电网行波故障定位方案。在故障相的线路首端发射脉冲信号, 采集线路首端的行波信号, 利用小波消噪原理对采集到的行波信号进行滤波, 比较线路正常时的行波信号和线路故障时的行波信号, 利用小波变换对信号奇异性的检测原理找出行波信号中的奇异点, 得到故障点与线路首端的距离。对结构简单的线路, 在此基础上分析特征波即可准确定位。对结构复杂的线路, 在确定故障距离的基础上, 根据电

网拓扑划定故障可能的几个分支。然后在线路首端注入电流,通过探测器检验几个分支上是否有电流流过,检测到电流的即为故障点所在的分支。详细分析了该行波定位方案在两次现场试验的应用结果。

## 1 行波在带分支线路上的传播特点

行波在线路上传播过程中在波阻抗不连续点会产生透射和反射过程,对于带分支的故障线路,波阻抗不连续点包括故障点、线路的终端、分支的节点和端点。图 1 是行波在带分支的线路上传播产生的透射和反射过程。

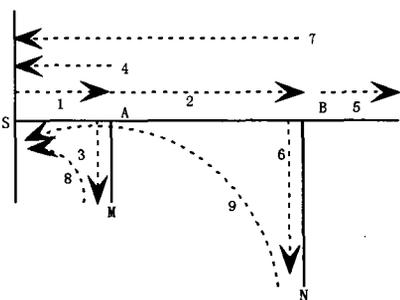


图 1 行波在带分支线路上的传播

Fig.1 Spread of traveling wave on lines with branches

在线路首端 S 点注入一个电压信号,该信号将沿着线路进行传播,即为行波 1。当遇到波阻抗不连续点 A 点时,一部分能量透过 A 点继续沿主干线传播,即为行波 2。行波 1 的另一部分能量沿分支 AM 传播,其余一部分能量反射回 S 点。行波 2 遇到波阻抗不连续点 B 点时,也将发生上述的透射和反射过程。本文将可以反应线路拓扑结构的波称为特征波,图 1 中,行波 4 为 A 点的特征波,行波 7 为 B 点的特征波,行波 8 为分支 AM 端点的特征波,行波 9 为分支 BM 的特征波。特征波可用来确定故障所在区段。如果能检测到某分支端点的特征波,就可以确定故障点在该分支点的下方区段。如果检测不到某分支端点的特征波,就可以确定故障点在该分支点的上方区段。检测到故障点的特征波,就可以确定故障距离。

## 2 小波变换

### 2.1 小波消噪原理

运用小波进行信号消噪处理是小波理论的重要应用之一。一维信号的小波消噪过程可分为三个步骤进行:

1) 一维信号的小波分解。选择一个小波函数并确定小波分解的层次  $N$ , 然后对原始信号进行  $N$  层小波分解。

2) 小波分解高频系数的阈值量化。对第 1 到第  $N$  层的每一层高频系数,选择一个阈值进行阈值量化处理。

3) 一维小波的重构。根据小波分解的第  $N$  层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第  $N$  层的高频系数,进行一维信号的小波重构。

其中,如何选取阈值和如何进行阈值的量化,直接关系到信号消噪的质量。给定一个阈值  $\delta$ , 所有绝对值小于某个阈值  $\delta$  的小波系数被看成“噪声”,它们的值用零代替;而超过阈值的小波系数的数值用阈值  $\delta$  缩减后再重新取值。根据信号小波分界的这个特点,对信号的小波系数设置一个阈值,大于它的认为属于第二类系数,可以简单保留或进行后续操作;而小于阈值的则去掉。这样达到了降低噪声的目的,同时保留了大部分信号的小波系数,因此可以较好的保持信号细节。目前常用的有软阈值化算法和硬阈值化算法<sup>[4,5]</sup>。

本文采用 db1 小波进行 9 层分解,并采用软阈值化算法进行行波信号的消噪处理。消噪效果详见后续部分。

### 2.2 小波在信号奇异性检测中的应用

信号的突变点通常含有很重要的信息。小波对剧烈变化的信号非常敏感,因此信号的突变点投影到小波域中将对应于小波变换系数模的极值点或过零点,而且信号奇异性的大小同小波变换系数极值随尺度的变化规律具有对应关系。所以,小波变换具有检测信号奇异性的功能。小波变换用于检测信号的奇异性是小波理论一个很重要的应用。

本文采用 db5 小波作一维离散小波变换,进行 6 尺度分解,在尺度 6 下实现行波的粗定位。接着在其领域范围内从第 5 尺度至第 1 尺度依次向上搜索高频系数部分中对应模极大值点。比较小波变换模极大值在不同尺度下的变化情况,当模极大值随尺度的增大而减小时,此极大值点对应的是白噪声和其它干扰信号的奇异点,即伪极大点;当模极大值随尺度增大而增大时,此极大值点对应的是初始电压行波的奇异点。图 2 为对某一消噪后的行波信号利用小波变换对信号奇异性的检测原理找出行波信号中的奇异点。

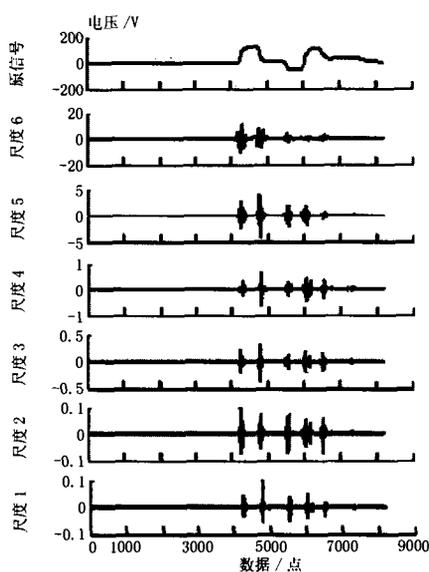


图2 利用小波变换找出行波中的奇异点  
Fig.2 Finding out the singularity in traveling wave using wavelet transform

### 3 基于小波理论的配电网行波故障定位方案

行波定位方法有两类：一类是利用故障产生的行波进行双端或单端故障定位；一类是人工向故障系统注入脉冲信号，捕捉由故障点反射回来的行波，找到故障点反射回来的行波，从而找到故障点。利用故障产生的行波进行单端故障定位的方法称为A型行波定位方法，利用故障产生的行波进行双端故障定位的方法称为B型行波定位方法，人工注入脉冲信号的方法称为C型行波定位方法。

C型行波测距属于单端行波测距，它利用在故障发生后在线路始端注入脉冲信号，根据脉冲信号由检测装置到故障点往返时间进行测距，如图3所示。由于配电线路有大量分支，而C型行波定位方法不受信号故障时刻行波信号强弱的影响，在进行故障测距时可以重复的判断。当某一次接收到的行波信号不能清楚分析出故障点位置，可以重新发一个行波信号再进行一次测距。该方法对配电线路定位较为适用。

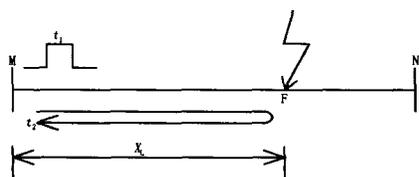


图3 C型行波测距示意图  
Fig.3 Schematic plan of C traveling wave fault location

由装设在M点的故障测距装置检测发射脉冲信号的时刻 $t_1$ 和来自故障点的反射波到达检测点的时刻 $t_2$ 。设故障点到信号检测点的距离为 $X_L$ ， $v$ 为波速，则故障距离 $X_L$ 为：

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

对于结构简单的配电线路，由于其分支较少，行波的透射和反射过程较为简单，可以在确定故障距离的基础上，通过分析特征波来准确定位故障所在位置。如果能检测到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的下方区段。如果检测不到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的上方区段。

对于结构复杂的配电线路，由于其分支很多，行波发生了多次透射和反射过程，透射波和反射波与原有信号叠加，此时通过分析特征波较难判断故障区段。文献[6]提出了“S注入法”，向接地线路接地相注入信号电流，探测到信号电流的分支即接地点所在分支。但该方法需要运行人员沿着线路的所有分支走一遍，自动化程度不高。而在利用行波法确定故障距离后，根据电网拓扑划定故障可能的几个分支，借鉴“S注入法”的思想，在这几个分支探测注入的信号电流，即可确定故障所在分支，加之已确定了故障距离，从而实现了准确定位。

综上所述，本文采用的配电网行波故障定位方案为：

1) 近似认为三相线路的参数相同。分别在三相的线路首端发射脉冲信号，并采集线路首端的行波信号。比较三个信号，与另两个信号不同的信号，即为故障相的信号。由此可区分出故障相和非故障相。

2) 在故障相的线路首端发射脉冲信号，采集线路首端的行波信号。

3) 利用小波消噪原理对采集到的行波信号进行滤波。

4) 由于三相线路参数近似相同，可将采集到非故障相的行波信号作为故障相在线路正常时的行波信号。比较故障相在线路正常时的行波信号和在线路故障时的行波信号，利用小波变换对信号奇异性的检测原理找出行波信号中的奇异点，此奇异点即为故障点对应的行波突变。

5) 根据式(1)准确得到故障点离线路首端的距离。

6)对于结构简单的线路在确定故障距离后,分析特征波即可准确定位;对于结构复杂的线路可在确定故障距离后,再根据电网拓扑划定故障可能的几个分支。然后在线路首端注入电流,通过探测器检验几个分支上是否有电流流过,检测到电流的即为故障点所在的分支。

该方法是一种离线测试方法,即在故障线路停运后进行故障测距。实际上,绝大部分线路故障是高阻故障,注入脉冲在故障点没有明显的反射,无法测出故障距离;如果注入高压脉冲信号使故障点击穿,由此产生的暂态信号波形很复杂,难以简单地判断出故障点距离。换言之,本文提出的方法,仅适用于低阻或断线故障。

## 4 现场试验结果分析

### 4.1 试验一简介

如图4,现场试验线路为一条35 kV线路,总长7.8 km,在7.5 km处有一个长为100 m的分支。

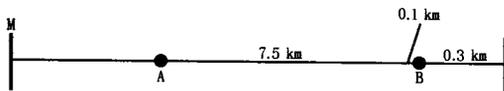


图4 试验一线路示意图

Fig.4 Schematic diagram of experiment one

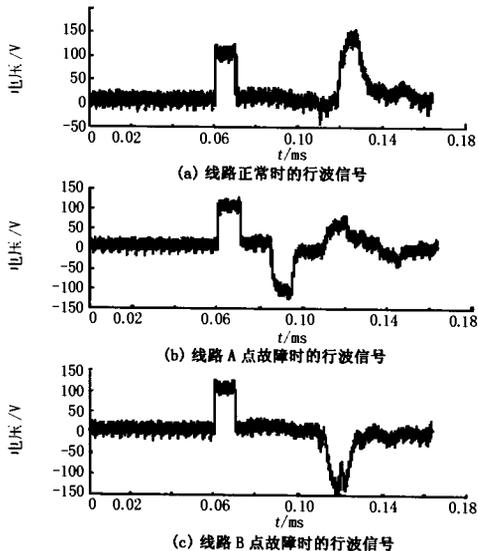


图5 试验一采集到的行波信号

Fig.5 Traveling wave signal of acquisition in experiment one

在M点采用高压信号发生器离线注入高压脉冲信号(注入脉冲幅值为10 kV,脉冲宽度为12 μs),并采用Tektronix公司的示波器TDS3014B进行数据采集。由于示波器的耐压问题,检测点所测信号

经过分压衰减80倍进入示波器。采样率为50 MHz。在M点分别采集线路正常时的行波信号、A点金属性单相接地故障的行波信号和B点金属性单相接地故障的行波信号,如图5所示。利用小波消噪原理对采集到的行波信号进行滤波,滤波效果如图6所示。

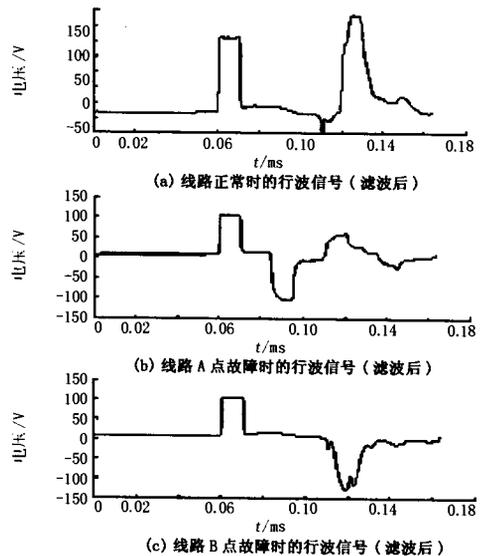


图6 对行波信号的滤波效果

Fig.6 De-noising effect of traveling wave signal

### 4.2 试验二简介

如图7,现场试验线路为10 kV变电站出线,在变电站内采用高压信号发生器向线路首端离线注入高压脉冲信号(注入脉冲幅值为10 kV,脉冲宽度为8 μs),并采用Tektronix公司的示波器TDS3014B进行数据采集。由于示波器的耐压问题,检测点所测信号经过分压衰减80倍进入示波器。

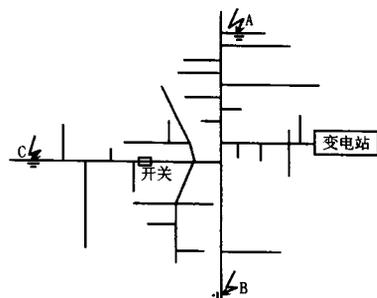


图7 试验二线路示意图

Fig.7 Schematic plan of experiment two

采样率为50 MHz。在变电站内分别采集线路正常、A点金属性单相接地故障、B点金属性单相接地故障、C点金属性单相接地故障的行波信号,如图8

所示。

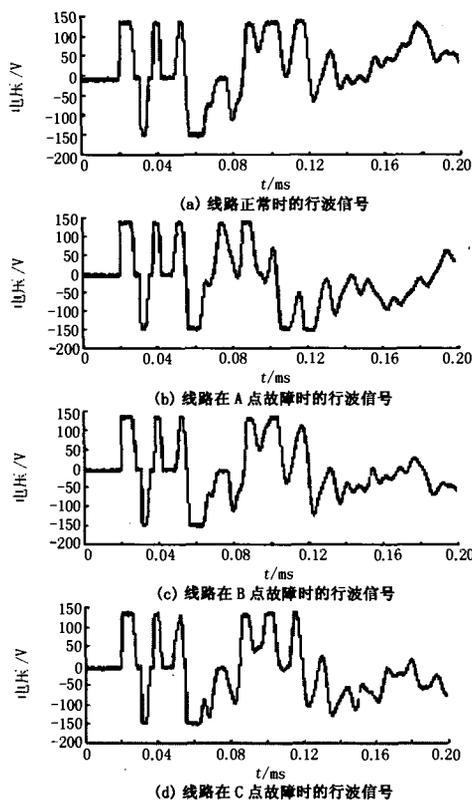


图 8 试验二采集到的行波信号

Fig.8 Traveling wave signal of acquisition experiment two

### 4.3 试验结果分析

根据上述故障定位方案, 对试验一和试验二分别进行分析。

#### 4.3.1 试验一分析

对试验一, 由于线路结构简单, 能准确判断故障点所在位置, 定位结果见表 1。

表 1 试验一故障定位结果

Tab.1 Fault location result of experiment one

设置故障点位置	实际距离 /m	测距结果 /m	测距误差 /m	相对误差 / (%)
A 点	3550	3618	68	1.915
B 点	7530	7620	90	1.195

从图 6 (a) 中可见, 第一个上升波头为所发高压脉冲, 第一个下降波头为分支点的特征波, 第二个上升波头为线路末端端点的特征波。在图 6 (b) 中, 第一个下降波头比 (a) 中靠前很多, 而且幅值更大。很明显这就是故障点的特征波, 并且可以判断故障在分支点前的主干线路上。在图 6 (c) 中, 在第一个下降波头后又有一个更大的下降波头, 而且幅值很大。很明显这个大的下降就是故障点的特

征波, 并且可以判断故障在分支点后的主干线路上。

#### 4.3.2 试验二分析

对试验二, 线路结构复杂, 分支点较多, 发生了多次的行波折发射过程, 虽无法确定故障所在分支, 但能确定故障距离, 定位结果见表 2。

表 2 试验二故障定位结果

Tab.2 Fault location result of experiment two

设置故障点位置	实际距离 /m	测距结果 /m	测距误差 /m	相对误差 / (%)
A 点金属接地	6480	6510	30	0.463
B 点金属接地	7560	7705	145	1.918
C 点金属接地	7740	7789	49	0.633

虽难以将行波特征与线路的网络拓扑对应上, 但可以根据故障距离划定出故障点可能在的几个分支。然后在线路首端注入电流, 通过探测器检验几个分支上是否有电流流过, 检测到电流的即为故障点所在的分支。

## 5 结论

通过对本文提出的基于小波理论的配电网行波故障定位方案在两次现场试验的应用结果的分析, 明显看出该方案对于消除行波信号的噪声干扰效果良好, 可以通过小波的模极大值找到行波信号的奇异点, 从而得到较为准确的故障距离。对简单线路, 在此基础上分析特征波, 即可确定故障所在位置。对结构复杂的线路, 可根据故障距离划定出故障点可能在的几个分支。然后在线路首端注入电流, 通过探测器检验几个分支上是否有电流流过, 检测到电流的即为故障点所在的分支。证明了该方案的可行性。

## 参考文献

- [1] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003,27(12):81-85.  
CHEN Ping, NIU Yan-xiong, XU Bing-yin, et al. Development of Modern Traveling Wave Based Fault Locating System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(12):81-85.
- [2] 王学峰, 周俊宇. 用小波变换技术定位输电线路故障[J]. 高电压技术, 2006,32(1):84-87.  
WANG Xue-feng, ZHOU Jun-yu. Research on Fault Location Based on Wavelet Technology in Transmission Line[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(1):84-87.

- [2] Chaari O, Meunier M, Brouay E F. Wavelet, a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying[J]. IEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [3] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14):1-5.  
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Faults in Neutral Point Non-effectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [4] 张山, 杨玉昆, 潘华东, 等. KD-XH型智能化快速消弧系统应用效果分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(4):77-78.  
ZHANG Shan, YANG Yu-kun, PAN Hua-dong, et al. Analysis of Application of KD-XH Intelligent Arc Suppressing Coil[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):77-78.
- [5] Xiao J, Pan Z C, Cong W, et al. The Study on Selective Grounding Fault Protection of Networks on Floating Neutral Based on Fuzzy Principle[A]. In: IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology Proceeding[C]. Kunming: 2002.
- [6] Thomas B, Frank R, Lynn S. Fault Locating in Ungrounded and High-resistance Grounded[J]. IEEE PCIC, 2000, 25: 245-251.
- [7] Shalin A I, Politov E N. Ground Fault Protection for 6-10 kV Distribution System[J]. Power and Electrophysics, 2002:430-433.

收稿日期: 2006-07-24; 修回日期: 2006-11-07

作者简介:

邹浩斌 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配网规划、电力系统自动装置、电力系统分析、运行与控制等; E-mail: zouhaobin@sina.com.cn

胡少强 (1955-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动装置、电力系统安全监控与故障检测、电力变压器和高压电器的自动测试、配网规划、电力系统分析、运行与控制等;

刘利平 (1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、电力系统分析、运行与控制等。

(上接第5页 continued from page 5)

- [3] 高如新, 王福忠, 余琼芳. 小波信号奇异性分析在配电网线路故障检测中的应用[J]. 电力科学与工程, 2003, (4):5-8.  
GAO Ru-xin, WANG Fu-zhong, YU Qiong-fang. Application of Wavelet Transform Singularity Analysis to Fault Detecting on Power Distribution Lines[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, (4):5-8.
- [4] 张全明, 刘会金, 周新启. 电能质量信号的小波软阈值去噪方法[J]. 高电压技术, 2006, 32(1):99-101.  
ZHANG Quan-ming, LIU Hui-jin, ZHOU Xin-qi. Wavelet Soft-threshold Denoising Method of Power Quality Signal[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):99-101.
- [5] 周静, 陈允平, 周策. 小波系数软硬阈值折中方法在故障定位消噪中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1):65-68.  
ZHOU Jing, CHEN Yun-ping, ZHOU Ce. The Application of De-noise Based on Compromise Algorithm Between Soft-thresholding and Hard-thresholding of Wavelet Coefficient for Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1):65-68.
- [6] 王慧, 范正林, 桑在中. “S注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 13(3):18-20.  
WANG Hui, FAN Zheng-lin, SANG Zai-zhong. The “Signal Injection Method” and Its Application in Single Phase-to-Earth Fault Line Identification and Fault Point Location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 13(3):18-20.
- [7] 蔡玉梅, 何正友, 王志兵, 等. 行波法在10kV铁路自闭/贯通线故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(1):15-19.  
CAI Yu-mei, HE Zheng-you, WANG Zhi-bing, et al. Application of Traveling Wave Based Fault Location in 10kV Railway Automatic Blocking and Continuous Power Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2005, 29(1):15-19.
- [8] 和敬涵, 季英业. 小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究[J]. 华北电力技术, 2004, (1):1-3.  
HE Jing-han, JI Ying-ye. Research of Fault Distance Measure Algorithm for Non-direct-ground Neutral System[J]. North China Electric Power, 2004, (1):1-3.

收稿日期: 2006-08-20; 修回日期: 2006-11-30

作者简介:

蔡秀雯 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 配电网行波测距; E-mail: caixiuwen102206@126.com

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 数字电力系统等;

田洪迅 (1970-), 男, 工程师, 研究方向为变电设备运行、检修。