

文章编号:1671-251X(2014)05-0037-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.05.010

董爱华,苏英.基于多小波的煤矿井下动力电缆故障定位研究[J].工矿自动化,2014,40(5):37-42.

基于多小波的煤矿井下动力电缆故障定位研究

董爱华, 苏英

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

摘要:针对基于传统小波变换的煤矿井下动力电缆故障定位方法由于小波函数不具有对称性而存在定位精度差的问题,提出了一种基于GHM多小波的煤矿井下动力电缆故障定位方法。分析了多小波理论的原理,详细介绍了GHM多小波在煤矿井下动力电缆故障定位中的应用。仿真结果表明,动力电缆故障电流信号经GHM多小波变换后各尺度的奇异点不会发生偏移,提高了故障定位精度。

关键词:矿井; 动力电缆; 故障定位; GHM多小波; 奇异点; 模极大值

中图分类号:TD608

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Research of fault location of underground power cable based on multi-wavelet

DONG Aihua, SU Ying

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454003, China)

Abstract:In view of problem of low location precision in fault location method of underground power cable based on traditional wavelet transform caused by asymmetry of wavelet function, the paper proposed a fault location method of underground power cable based on GHM multi-wavelet. It analyzed principle of multi-wavelet theory, and introduced application of the GHM multi-wavelet in fault location of underground power cable. The simulation result shows that singular points of each scale cannot occur migration after signal of fault current of power cable is transformed by the GHM multi-wavelet, which improves precision of fault location.

Key words: mine; power cable; fault location; GHM multi-wavelet; singular point; modulus maximum

0 引言

煤矿井下供电方式为中性点不接地或中性点经消弧线圈接地系统,发生单相接地故障时电流较小,非故障相对地电压升高,故障易扩大成2点或多点接地短路。并且煤矿井下电缆供电线路较多,容易引起弧光接地过电压,影响井下电器设备的安全运行及工作人员的人身安全。因此,需要及时找出故障线路并进行精确定位。

传统的单小波理论具有很强的局部时频分析能

力,可检测到信号的不连续点,但是单小波理论不能同时满足对称性和正交性。多小波理论则可克服这一缺陷,并且多小波理论已有成功用于输电线路故障定位的先例,在线路故障定位方面优于传统的单小波理论^[1-3]。矿井电缆线路与输电线路有很大的不同:电缆线路的3根导线之间距离小,分布电容较大;井下环境潮湿,电缆对地绝缘电阻的影响较大。鉴此,本文提出了一种基于多小波的煤矿井下动力电缆故障定位方法,以提高动力电缆故障的定位精度。

收稿日期:2013-08-28;修回日期:2014-03-12;责任编辑:王晖。

基金项目:义马煤业集团大型科研项目(128966)。

作者简介:董爱华(1955—),男,河南鹿邑人,教授,主要从事电工、电子技术和自动控制等方面的教学与科研工作,E-mail:dah@hpu.edu.cn。

1 多小波理论

1.1 多小波多分辨率分析

多小波基通过 $r(r \geq 2, r \in \mathbf{N})$ 个尺度函数 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_r$ 和 r 个小波函数 $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_r$ 的伸缩与平移而形成, 多小波函数伸缩与平移构成的空间为 $L^2(\mathbf{R})$ 。令 $\Phi(t) = (\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_r)^T, \Psi(t) = (\Psi_1 \ \Psi_2 \ \dots \ \Psi_r)^T$, 则

$$\Phi(t) = \sum_k H_k \Phi(2t - k) \quad (1)$$

$$\Psi(t) = \sum_k G_k \Psi(2t - k) \quad (2)$$

式中: k 为分辨级数, $k \in \mathbf{Z}; t \in \mathbf{R}; H_k, G_k$ 分别为 $r \times r$ 阶高通和低通滤波器矩阵。在多小波多分辨率分析中^[4], H_k, G_k 是与尺度函数和小波函数对应的矢量滤波器, 该滤波器是多通道滤波器, 因此, 一维信号要经过预处理形成多维矢量信号, 才能进行多小波处理。

1.2 多小波分解与重构

定义 $c_{j-1,k} = (c_{j-1,k}^1, c_{j-1,k}^2, \dots, c_{j-1,k}^r)$ 和 $d_{j-1,k} = (d_{j-1,k}^1, d_{j-1,k}^2, \dots, d_{j-1,k}^r)$ (j 为多小波分解的层数) 分别为多小波的尺度系数(即近似部分)和小波系数(即细节部分)。离散多小波变换(即多小波分解)就是把 $\{c_{j,k}\}$ 转变为 $\{c_{j-1,k}\}, \{d_{j-1,k}\}$, 反过来就是离散多小波的逆变换(即重构)^[5]。根据式(1)和式(2)得

$$\begin{cases} c_{j-1,k} = \sqrt{2} \sum_n H_n c_{j,2k+n} \\ d_{j-1,k} = \sqrt{2} \sum_n G_n c_{j,2k+n} \end{cases} \quad (3)$$

$$c_{j,n} = \sqrt{2} \sum_n (H_k^* c_{j-1,2k+n} + G_k^* d_{j-1,2k+n}) \quad (4)$$

式中: $n \in \mathbf{Z}; *$ 表示共轭转置。

1.3 多小波基的选择

目前, 多小波理论的应用领域主要集中在信号处理方面, 根据实际应用构造出来的多小波基还非常少, 因此, 不同应用领域的多小波基的选择可以参照小波基的选取方法。对于故障定位来说, 一个好的小波基应该能够区分不同类型的暂态干扰^[6]; 能很好地提取暂态行波的特点; 小波变换后的特征点比较少; 尺度因子便于调节。

GHM 多小波是由 Geronimo J, Hardin D 和 Massopust P 运用分形插值的方法构造出来的, 是目前应用最为广泛的多小波^[7], 含有 2 个尺度函数 $\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$ 和 2 个小波函数 $\Psi_1(t)$ 和 $\Psi_2(t)$ 。具有以下特点: 不同的支撑区间 $[0, 1]$ 和 $[0, 2]$ 保证了 GHM 多小波具有很好的局部特性; 2 个尺度函

数 $\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$ 的对称、小波函数 $\Psi_1(t)$ 和 $\Psi_2(t)$ 的对称和反对称保证了多小波变换具有线性相位; GHM 多小波为正交多小波, 这保证了多小波系数之间有较小的冗余。因此, 本文利用 GHM 多小波来进行煤矿井下动力电缆的故障定位。

由式(1)、式(2)得到 GHM 多小波的尺度函数和小波函数的矩阵尺度方程^[8]为

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \Phi_1(t) \\ \Phi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^3 H_k \begin{pmatrix} \Phi_1(2t-k) \\ \Phi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\Psi(t) = \begin{pmatrix} \Psi_1(t) \\ \Psi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^3 G_k \begin{pmatrix} \Psi_1(2t-k) \\ \Psi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: H_k 和 G_k ($0 \leq k \leq 3$) 的具体选取值见参考文献^[9]。

2 GHM 多小波在煤矿井下动力电缆故障定位中的应用

基于 GHM 多小波的煤矿井下动力电缆故障定位方法相同于小波故障定位方法, 都是通过分析信号的奇异性, 利用模极大值点先找到 2 个相邻线模波头之间的时间差, 再根据单端法进行精确的故障定位。具体步骤如下:

(1) 提取故障电流信号。通过 Matlab/Simulink 仿真软件建立煤矿井下动力电缆发生单相接地故障的模拟系统, 用 Matlab 语言提取仿真得到的故障电流信号, 并利用多小波多分辨率分析提取故障电流信号的行波波头。

(2) 对故障电流信号进行预处理。GHM 多小波中的高通滤波器矩阵 H_k 和低通滤波器矩阵 G_k 每一行的 2 个元素都属于 2 个普通的滤波器, 每个滤波器都分别要对 1 个数据流进行滤波。因此, GHM 多小波要有 2 个数据流来满足滤波器的要求。而动力电缆行波信号只有一维的数据流, 因此, 要利用预处理方法将一维数据流转化为二维数据流。

采用多小波理论处理信号, 希望分解后的低频系数(尺度函数)集中信号的更大能量, 高频系数(小波函数)能够包含信号的细节信息, 为信号分解后进行去噪、数据压缩、信号提取等提供更好的前提条件^[10-11]。多小波低频系数能量集中率 P 的定义如式(7)所示。 P 值越大表示多小波分解系数能量更集中于低频部分, 更适合应用于信号处理。

$$P = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^r |c'_j(k)|^2}{\sum_{n=1}^M |f(n)|^2} \times 100\% \quad (7)$$

式中: K 为在 j 层上多小波分解的尺度系数的个数; M 为信号的采样点数; c_j^i 为多小波分解后的尺度系数; $f(n)$ 为原始信号。

由参考文献[11]可知,GHM多小波采用GHM.init预处理方法时,多小波低频系数能量集中率为96.20%。因此,本文采用GHM.init预处理方法。

(3)对故障电流信号进行多小波去噪。首先采用GHM.init预处理方法获得多小波的高频系数;然后利用软阈值 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg M}$ (σ 为噪声估计方差)来处理高频系数;最后利用多小波重构算法重构信号。根据故障电流信号和噪声的多小波系数的幅值随尺度变化的不同趋势来去除噪声,保留所需的故障电流信号系数,最后重建故障电流信号。

(4)求取故障电流信号的模极大值。对于Lipschitz的指数为 α 的奇异性信号,它的多小波变换满足式(8):当 $\alpha > 0$ 时,模极大值随尺度增大而增大;当 $\alpha < 0$ 时,模极大值随尺度增大而减小。因为暂态行波信号中 $\alpha > 0$,因此,可以利用多小波的奇异性检测理论进行行波的故障定位。

$$\log_2 |wf(s, x)| \leq \log_2 k + \alpha j \quad (8)$$

式中: $wf(s, x)$ 是任意信号 $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ 的多小波变换。

(5)故障初始行波和故障点二次反射波分别到达检测点的时间差 Δt 的确定。当电缆发生故障时,线路上产生的暂态电流行波和电压行波将向线路两侧传播,只要准确地检测出故障初始行波和故障点二次反射波分别到达检测点的时间,就可以测出故障点的位置。本文根据多小波变换的模极大值点来确定 Δt ,即找到相邻2个线模波头之间的时间差。故障定位计算公式为

$$X = \frac{v \Delta t}{2} \quad (9)$$

式中: X 为故障距离; v 为行波的波速; $\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 为故障初始行波到达测量端的时间, t_2 为故障点二次反射波到达测量端的时间。

3 仿真分析

采用Matlab/Simulink仿真软件建立煤矿井下动力电缆发生单相接地故障的仿真模型,如图1所示。线路参数:正序电阻 $r_1 = 0.12 \Omega/\text{km}$;零序电阻 $r_0 = 0.45 \Omega/\text{km}$;正序阻抗 $L_1 = 0.9337 \text{ mH/km}$;零序阻抗 $L_0 = 4.1264 \text{ mH/km}$;正序容抗 $C_1 = 0.66 \mu\text{F/km}$;零序容抗 $C_0 = 0.0478 \mu\text{F/km}$ 。线路负荷Load1, Load2, Load3的有功功率分别为1, 0.2, 2 MW。

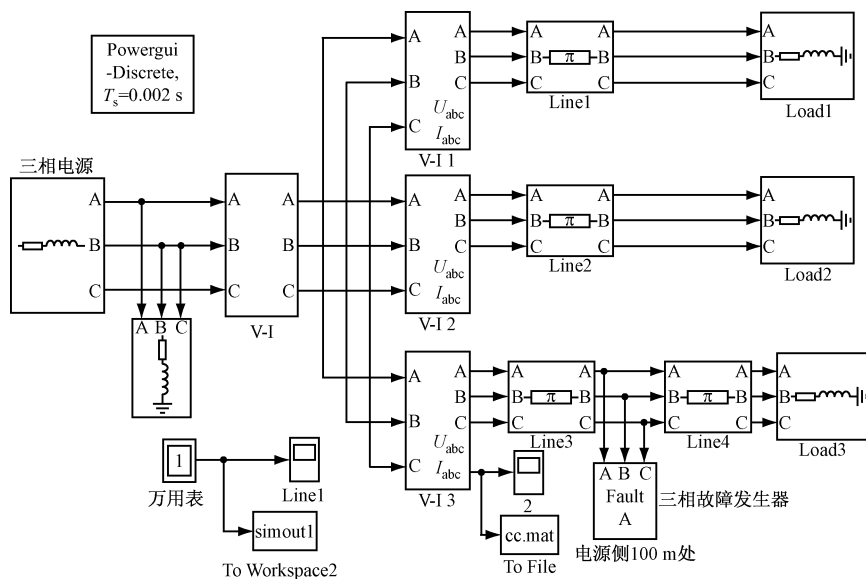


图1 煤矿井下动力电缆发生单相接地故障的仿真模型

图1中,三相电源电压为6 kV,其母线出线数为3条,Line3在距离电源侧100 m处发生A相接地短路故障,故障点的过渡电阻为 50Ω 。在没加入分布电容和接地绝缘电阻时,即在理想状态下,故障电流 i_a, i_b, i_c 波形如图2所示(故障发生在0.04~

0.06 s)。

3.1 多小波变换结果

线路发生故障时,三相电流行波之间是耦合的,所以要对三相电流行波信号进行模量变换,将其分解为零模和线模分量,用零模分量的GHM多小波

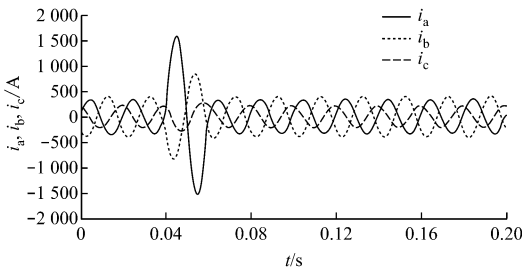


图 2 理想状态下故障电流波形

变换系数来判别故障的大致位置;用线模分量的 GHM 多小波变换系数来确定电流行波到达线路始端的时间。采用线模分量进行 GHM 多小波变换求取模极大值的结果如图 3 所示,图中线模分量的高频分量 d 从 $d=1$ 到 $d=5$ 都明显检测出突变点的位置。

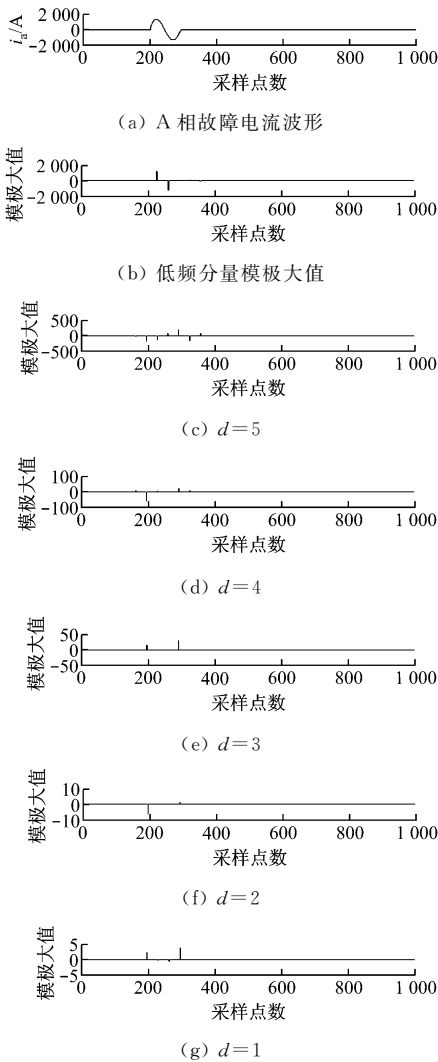


图 3 理想状态下基于 GHM 多小波变换后的模极大值

图 4 为过渡电阻分别为 $20\ \Omega$ 和 $50\ \Omega$ 时放大的模极大值,即故障电流的突变点。从图中可看出,故障点初始行波到达母线检测点为第 184 点,故障点

二次反射波到达母线检测点为第 214 点,即在利用多小波的模极大值检测中过渡电阻的改变不影响其定位结果。

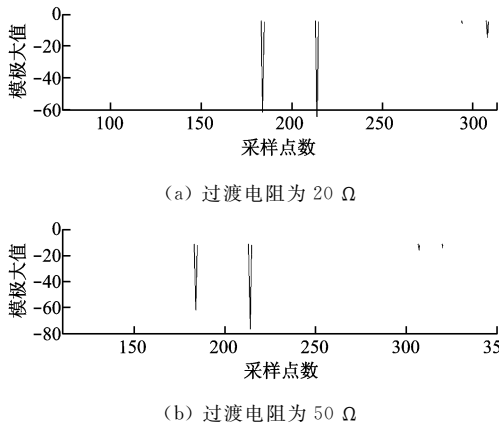


图 4 过渡电阻分别为 $20\ \Omega$ 和 $50\ \Omega$ 时放大的模极大值

由参考文献[12]可知,单端行波故障检测法在检测到来自故障点的初始行波、故障点二次反射波及对母线的反射波后,可通过式(9)计算得到故障点的位置,且不受波速和线路弧垂的影响。本文取行波的波速 $v=2.999\times 10^5\text{ km/s}$,故障定位结果见表 1。

表 1 故障定位结果

过渡电阻/ Ω	实际距离/m	测量距离/m	定位误差/m
50	45	44.985	0.015
20	45	44.985	0.015
50	100	100.167	0.167
20	100	99.830	0.170

从表 1 可看出,对故障电流信号进行 GHM 多小波变换后,故障定位结果不受过渡电阻的影响。通过大量的仿真实验可知,GHM 多小波能够有效消除噪声信号的干扰,精确地捕捉行波波头,从而实现动力电缆故障的精确定位,且故障定位结果不受过渡电阻的影响。因此,利用多小波理论进行动力电缆故障定位能够满足定位精度的要求。

3.2 传统小波变换结果

为了证明多小波变换的定位精度优于传统小波变换,采用小波函数 db3 对故障电流信号进行模极大值分析,结果如图 5 所示。

从图 5 可看出,采用传统的小波变换进行动力电缆故障定位时,由于小波函数不具有对称性,其各个尺度上的奇异点的偏移程度不同,这为选择哪个尺度上的奇异点进行故障定位带来了难题^[13-15]。

从以上分析可看出,在理想状态下利用多小波理论进行故障定位精度较高。但在实际应用中,煤

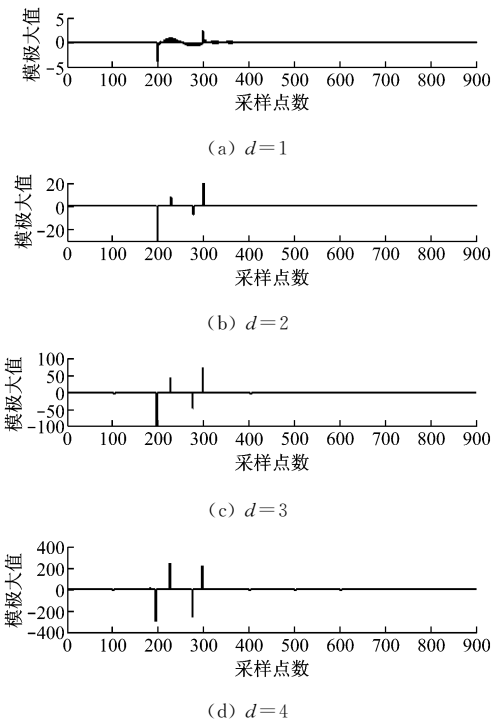


图5 采用db3小波变换后的故障电流模极大值

矿井下高温、空气潮湿、煤尘和负荷变化都会使动力电缆的绝缘电阻及对地的分布电容发生变化,最终使漏电流变大。所以本文在仿真线路中加入了一定的分布电容和对地绝缘电阻,使仿真模型处于非理想状态下,以此来验证利用多小波变换模极大值理论进行故障定位的实用性。

电缆的绝缘电阻值与电缆的种类、电压等级、电缆绝缘的温度、空气湿度、环境粉尘的性质以及电缆的使用年限有关。本文根据电压等级选择绝缘电阻的大小,在支路Line1—Line3上加入 $0.6\mu\text{F}$ 的电容和 $35\text{ k}\Omega$ 的电阻,分别用以表示分布电容和对地绝缘电阻。以Line3距离电源侧100 m处发生A相接地短路故障,过渡电阻为 $50\text{ }\Omega$ 为例,通过仿真得到距电源侧的故障电流波形和故障电流经GHM多小波变换后的模极大值分别如图6、图7所示。

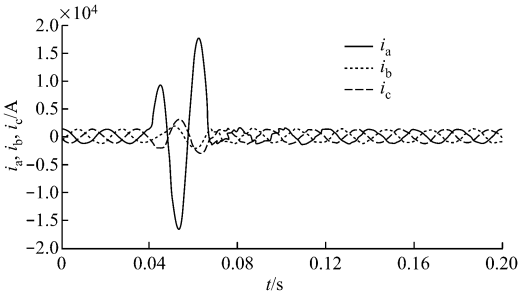


图6 非理想状态下故障电流波形

由图7可知,每一尺度下的奇异点位置相同,且故障点初始行波、故障点二次反射波到达电源侧的

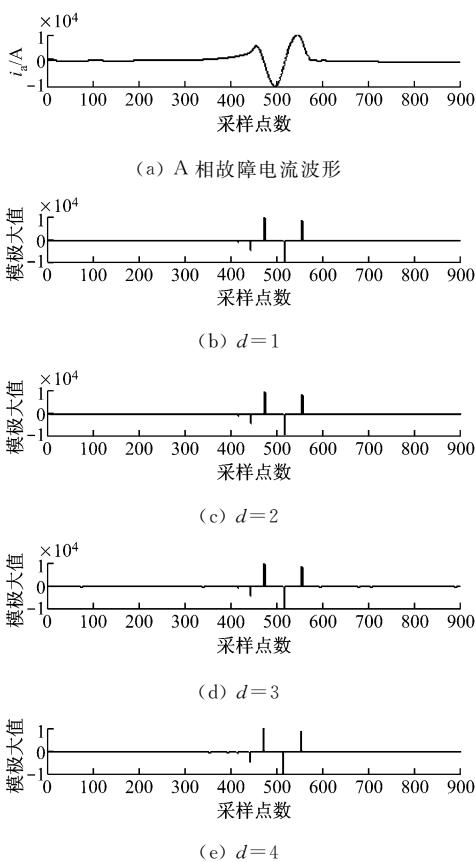


图7 非理想状态下基于GHM多小波变换后的模极大值点分别为第443点、第511点。则多小波故障定位的结果为 $X=101.966\text{ m}$,仿真误差为 1.966 m 。

通过与表1定位结果的比较可知,在理想状态下利用多小波进行故障定位的精度高于非理想状态下,但误差范围不是很大,而且在多小波定位的分析中,各个尺度下的奇异点位置没有发生改变,这为故障定位带来了便利。

4 结语

利用多小波理论对煤矿井下动力电缆故障定位进行了研究。仿真结果表明,由于多小波理论结合了光滑性、对称性、正交性、短支撑性、高阶消失矩等特点,使得故障电流信号经多小波变换后各尺度的奇异点不会发生偏移,能够克服小波理论在故障定位中的缺陷,并提高故障定位的精度。多小波理论将会成为电缆故障定位中新的有效方法。

参考文献:

[1] 梁劲,周静.多小波理论在输电线故障定位中的应用[J].电力系统保护与控制,2008,36(13):26-32.

[2] 刘志刚,何正友,钱清泉.多小波的研究进展及其在电力系统中应用的展望[J].电力系统自动化,2004,28(11):90-96.

[3] 程正兴,杨守志,冯晓霞.小波分析的理论算法进展和应用[M].北京:国防工业出版社,2007:172-205.

[4] WANG Haixiang, JOHNSON B R. The discrete wavelet transform for a symmetric-antisymmetric multiwavelet family on the interval [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52 (9): 2528-2539.

[5] MILLER J T, LI Chingchung. Adaptive multiwavelet initialization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(12):3282-3291.

[6] 黄斌,万黎,王晶,等.超高压线路单端行波故障定位系统的研究[J].高压电器,2004,40(6):442-445.

[7] 吴方劼,张承学,方力谦.基于多小波理论的配电线路故障定位方法的研究[C]//中国国际供电会议,北京,2006.

[8] CHUI C K, LIAN Jianao. A study of orthonormal multiwavelet [J]. Applied Numerical Mathematics, 1996, 20(3):273-298.

[9] 张蕊,王学伟,王琳.基于 GHM 多小波的电力系统故障录波数据压缩算法[J].电测与仪表,2008,45(10):46-50.

[10] 程正兴,张玲玲.多小波分析与应用[J].工程数学学报,2001,18(1):99-106.

[11] 刘志刚.多小波理论及其在电力系统故障信号处理中的应用研究[D].重庆:西南交通大学,2003.

[12] 徐丙垠,李京,陈平,等.现代行波测距技术及其应用[J].电力系统自动化,2001,25(23):62-65.

[13] 陈克祥.多小波理论在输电线故障定位中的应用研究[D].合肥:安徽大学,2012.

[14] 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.

[15] 许彬,郑链,王克勇,等.基于多小波的信号奇异性分析方法[J].系统仿真学报,2006,18(11):3217-3219.