

## 多小波理论在输电线故障定位中的应用

梁劲<sup>1</sup>, 周静<sup>2</sup>

(1. 北京电力公司海淀供电公司, 北京 100086; 2. 国网直流工程建设有限公司, 北京 100005)

**摘要:** 多小波分析是基于小波理论发展起来的新理论, 多小波保持了单小波所具有的良好时域与频域的局部化特性, 又克服了单小波的缺陷, 多小波可同时具有光滑性、对称性、正交性、短支撑性, 高阶消失矩等属性, 由于多小波具有对称性, 因此多小波变换具有线性相位, 同时多小波具有正交性, 因此多小波变换计算速度较快, 能够满足继电保护的速动性, 因此用多小波进行输电线的故障定位, 有利于提高故障定位的精度和速度, 本文进行了多小波定位的数字仿真实验, 验证了多小波定位结果不受故障类型, 故障点位置, 过渡电阻和故障合闸角的影响, 并和小波定位结果进行了对比, 验证了利用多小波进行故障定位, 定位精度要比用小波定位精度高。

**关键词:** 多小波; 小波; 故障定位; 输电线路

## Application of multiwaves theory for the fault location in transmission line

LIANG Jin<sup>1</sup>, ZHOU Jing<sup>2</sup>

(1. Beijing Haidian Electric Power Corp., Beijing 100086, China;

2. State Grid HVDC Project Construction Co., Ltd, Beijing 100005, China)

**Abstract:** Multiwavelets analysis is the new developed theory based on the wavelets, it has the good local characteristics of time and frequency field that the wavelet has. At one time, multiwavelets combine the smooth, the symmetry, the orthogonality, short support, and the high order vanish moments together, and overcome the shortcomings of the wavelets. Multiwavelets transform has line phase because of the symmetry and calculates very fast because of the orthogonality, so the multiwavelets transform can satisfy the quick motion of relay protection. so the multiwavelets transform can locate the fault location of the transmission line quickly and accuracy, this paper shows the multiwavelets fault location principle and the algorithm is tested by digital simulations on three real transmission lines. The results show that the fault location can't be affected by the type of fault, the position of fault, the fault resistance and fault close angle. Compared with the wavelets fault location, the accuracy of the multiwavelets fault location is higher.

**Key words:** multiwavelets; wavelet; fault location; transmission line

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0026-07

## 0 引言

小波分析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, 实系数小波固有的缺陷, 不能同时拥有正交性和对称性, 大多数单小波不具有对称性 (有的具有近似对称性, 但是小波的支撑长度太长), 样条小波虽说具有完全的线性相位, 但分解序列不是有限的序列, 在使用时必须截断。然而多小波同时具有正交性和对称性<sup>[1~25]</sup>, 使得输电线的精确故障定位有了更好的工具。本文通过故障后的电流波形进行多小波分析, 利用行波的原理对故障后的输电线路进行定位, 大量的仿真实验表明用多小波进行故障定位能够满足故障定位精度的要

求。

## 1 多小波理论

在多小波理论下,  $L^2(\mathbb{R})$  空间可以分解成多个函数的伸缩平移而形成的级数, 同时这些函数彼此正交, 即原来有单个尺度函数生成的多分辨空间, 现在有多个尺度函数生成, 即保持了单小波所具有的良好时域与频域的局部化特性, 又克服了单小波的缺陷, 将实际应用中十分重要的光滑性、紧支撑性, 对称性, 正交性完美的结合在一起。

**定义 1:** 多小波

若一个多分辨分析是由多个尺度函数生成, 相

应的由多个小波函数平移与伸缩构成  $L^2(R)$  空间的基, 那么这些小波函数被称作多小波。

定义 2: 多小波的多分辨率分析<sup>[1,2,4,16,23]</sup>

$$\text{令 } \Phi(x) = (\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{r-1}) \quad (1)$$

$\phi_l \in L^2(R), l \in N$  是多分辨率分析空间  $V_j (j \in z)$  的正交多尺度函数,  $V_j = \text{span}\{2^{-j/2}\phi_l, (2^{-j}-k), k \in z\}$  称  $\phi_l$  生成  $L^2(R)$  中的  $r$  重多分辨率分析, 若  $\{V_j\}$  满足以下性质:

- (1)  $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$ ;
- (2)  $\text{close}\left\{\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j\right\} = L^2(R), \bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = 0$ ;
- (3)  $\phi_l(t) \in V_j \Leftrightarrow \phi_l(2t) \in V_{j+1}$ ;
- (4)  $\phi_l(t) \in V_j \Leftrightarrow \phi_l(t-2^{-j}k) \in V_j, \forall k \in z$ ;
- (5)  $\phi_l(2^{-j}t-k), 0 \leq l \leq r-1, k \in z$

生成  $V_j$  的 Riesz 基;

与其对应的正交多小波函数:

$$\psi(t) = [\psi_0(t), \psi_1(t), \dots, \psi_{r-1}(t)]^T \quad (2)$$

$$\psi_l \in L^2(R), l = 0, 1, 2, \dots, r-1, r \in N$$

满足其平移和伸缩

$$\psi_{j,k} = \{\psi_0(2^{-j}t-k), \dots, \psi_{r-1}(2^{-j}t-k), (j,k) \in z\}$$

形成  $V_j$  的正交补子空间的正交基, 即  $V_j$  在  $V_{j+1}$  中的补子空间为  $W_j$ ,

$$W_j = \text{span}\left\{2^{j/2}\psi_i(2^j \cdot -k): 1 \leq i \leq r, k \in z\right\}$$

多小波函数  $\psi(t)$  和多尺度函数  $\Phi(t)$  满足如下两尺度矩阵方程:

$$\Phi(t) = \sum_{k=0}^{L-1} H_k \Phi(2t-k) \psi(t) = \sum_{k=0}^{M-1} G_k \psi(2t-k) \quad (3)$$

即

$$\begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \dots \\ \phi_r(x) \end{bmatrix} = \sum_{k \in z} \begin{bmatrix} H_k^{11} & H_k^{12} & \dots & H_k^{1r} \\ H_k^{21} & H_k^{22} & \dots & H_k^{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_k^{r1} & H_k^{r2} & \dots & H_k^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1(2x-k) \\ \phi_2(2x-k) \\ \dots \\ \phi_r(2x-k) \end{bmatrix}$$

其中:  $\{H_k\}, (k=0, 1, 2, \dots, L-1)$  是  $r \times r$  维矩阵,  $L$  为多尺度函数的滤波器长度,  $r$  为多小波的维数,

同理  $\{G_k\}, (k=0, 1, 2, \dots, M-1)$  是  $r \times r$  维矩阵,  $M$  为多小波的滤波器长度,  $r$  为多小波的维数, 两尺度矩阵方程的频域表示为:

$$\Psi(\omega) = G(\omega/2)\Psi(\omega/2) \quad (4)$$

$$\Phi(\omega) = H(\omega)\Phi(\omega/2) \quad (5)$$

其中:  $\Psi(\omega)$  表示多小波函数中对每个分量 Fourier 变换后的矩阵函数。  $\Phi(\omega)$  表示多尺度函数中对每个分量 Fourier 变换后的矩阵函数。  $H_k, G_k$  分别称为低通滤波器和高通滤波器,  $H(\omega), G(\omega)$  从信号处理的角度来看, 是与尺度函数和小波函数对应的矢量滤波器。该滤波器是多通道的滤波器, 因此对于一维信号, 要经过预滤波<sup>[10,11,17]</sup>形成多维矢量信号, 才能进行多小波处理。

## 2 多小波定位的原理

基于多小波故障定位的方法也是利用多小波变换的奇异性检测理论, 利用模极大值点找到相应的线路两端的奇异点 (时间轴上对应的为相对时间), 再利用双端法进行精确的故障定位。

### 2.1 奇异性信号的多小波变换特性<sup>[20]</sup>

对于 Lipchitz 指数为  $\alpha$  的奇异性信号, 它的多小波变换满足:

$$\left|w_{r,2^j} f(x)\right| \leq k(2^j)^\alpha \quad (6)$$

对上式两端取对数, 得:

$$\log_2 \left|w_{r,2^j} f(x)\right| \leq \log_2 k + \alpha j$$

式中:  $j$  为小波分解的层数。

由上式可知, 如果奇异性信号的 Lipchitz 指数  $\alpha > 0$ , 那么该奇异性信号的多小波变换系数将随着尺度的增大而增大, 反之,  $\alpha < 0$ , 多小波变换系数将随着尺度的增大而减小。因为暂态行波信号的 Lipchitz 指数  $\alpha > 0$ , 因此暂态行波信号的多小波变换的模极大值随着随着尺度的增大而增大。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。

故障定位的计算公式:

$$X = (v(t_m - t_n) + L) / 2 \quad (7)$$

式中:  $V$  为行波的波速;  $t_m$  为初始行波到达  $m$  端的时刻;  $t_n$  为初始行波到达  $n$  端的时刻;  $L$  为线路的总长度。

本章我们利用多小波确定  $t_m, t_n$ , 从而实现故障定位的目的。

### 3 数字仿真

#### 3.1 模型

仿真模型的是电压等级为 500 kV，线路全长为 300 km 的超高压、长距离输电线路，采样率为 1 MHz，以便能检测到高频的行波信号。

该模型可以等效为图 1。

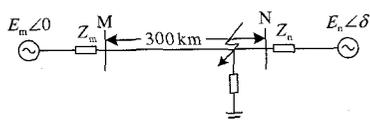


图 1 超高压长距离输电线路等效图

Fig.1 Equivalent circuit of ultra voltage long distance transmission line

#### 3.2 GHM 多小波的故障定位

GHM 多小波的两尺度函数  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  的支撑分别为 [0 1], [0 2], 两小波函数的支撑为 [0 2], GHM 多小波滤波器系数矩阵为:

$$\begin{aligned}
 H_0 &= \begin{bmatrix} 3/10 & 2\sqrt{2}/5 \\ -\sqrt{2}/40 & -3/20 \end{bmatrix} & H_1 &= \begin{bmatrix} 3/10 & 0 \\ 9\sqrt{2}/40 & 1/2 \end{bmatrix} \\
 H_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 9\sqrt{2}/40 & -3/20 \end{bmatrix} & H_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\sqrt{2}/40 & 0 \end{bmatrix} \\
 G_0 &= \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/40 & -3/20 \\ -1/20 & -3\sqrt{2}/20 \end{bmatrix} & G_1 &= \begin{bmatrix} 9\sqrt{2}/40 & -1/2 \\ 9/20 & 0 \end{bmatrix} \\
 G_2 &= \begin{bmatrix} 9\sqrt{2}/40 & -3/20 \\ -9/20 & 3\sqrt{2}/20 \end{bmatrix} & G_3 &= \begin{bmatrix} -\sqrt{2} & 0 \\ -1/20 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

由于 GHM 是二维多小波，所以分解后的高频系数分别为: d11,d12,d13,d14;d21,d22,d23,d24。高频系数重构后的信号为: d1,d2,d3,d4。

我们从重构后的信号中做出模极大值曲线图，然后判断故障发生的时刻。

#### 3.3 算例

在距离 M 侧 90 km 处发生短路故障，即在线路的 30% 处发生 A 相短路，过渡电阻为 15  $\Omega$ 。故障电流波形如图 2 所示，三相故障数据模变化后  $\alpha$  模电流的多小波变换的多小波系数示于图 3。

为了更清晰地显示出行波波头到达的时刻，我们放大图 4 模极大值曲线对应的点，从而很清楚的判断故障时刻发生在第 5300 点时，如图 4 所示。

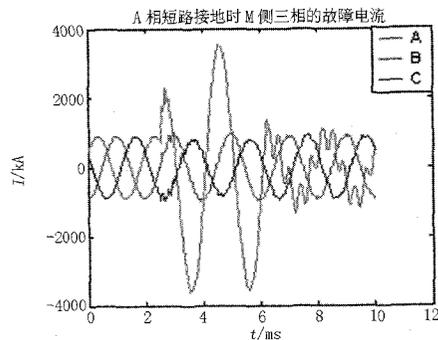


图 2 距 M 端 30% 处发生 A 相短路接地的 M 侧故障电流  
Fig.2 Fault current wave of the A phase-ground, the distance is 30% far from M

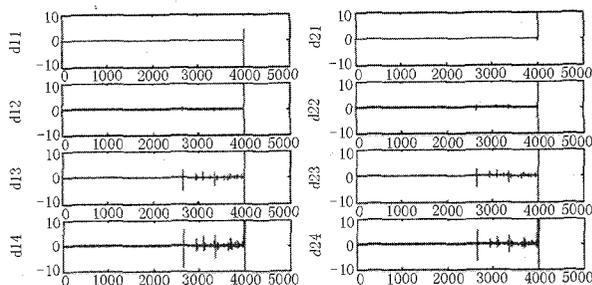


图 3 多小波变换后的各尺度的高频系数  
Fig.3 High frequency coefficients of each scale after multiwavelets transform

基于模极大值原理，我们从重构后的信号中做出各尺度下的模极大值曲线，如图 4 所示。

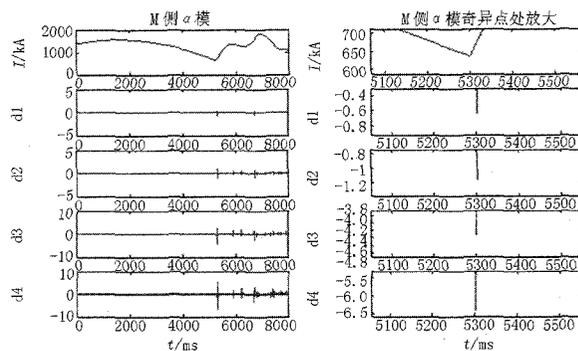


图 4 M 侧相模变换后  $\alpha$  模的多小波变换模极大值  
Fig.4 Modules maxima of multiwavelets transform for the  $\alpha$  modal after phase-modal transformation

对 N 侧三相故障数据模变化后的  $\alpha$  模电流进行 GHM 多小波分解，分解后的高频系数分别为: d11,d12,d13,d14;d21,d22,d23,d24，如图 5。

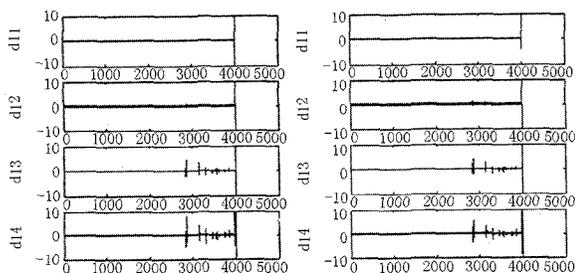


图 5 多小波变换后的各尺度的高频系数

Fig.5 High frequency coefficients of each scale after multiwavelets transform

高频系数重构后的信号为: d1,d2,d3,d4。从重构后的信号中寻找模极大值曲线, 为了更清晰的显示出行波波头到达的时刻, 我们放大图 6 中模极大值曲线对应的点, 在放大图形中, 各个尺度下, 奇异点的位置始终保持不变, 从而很清楚的判断故障时刻发生在第 5700 点时, 如图 6 所示。

利用行波定位公式:

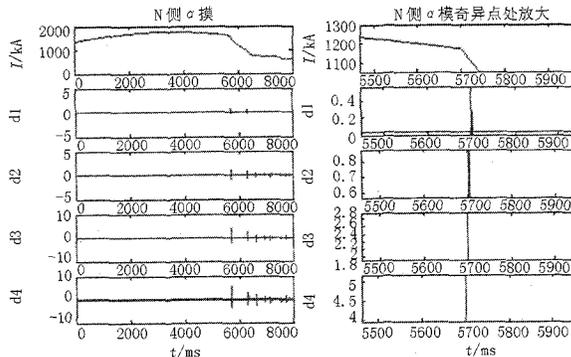


图 6 N 侧相模变换后  $\alpha$  模的多小波变换模极大值

Fig.6 Modules maxima of multiwavelets transform for the  $\alpha$  modal after phase-modal transformation

$$x = (300 + 2.999 \times 105 \times (5300 - 5700) \times 1 \times 10^{-6}) / 2 = 90.02 \text{ km}$$

$$\text{相对误差 } \varepsilon = (90 - 90.02) / 90 = -0.02\%$$

$$\text{绝对误差 } e = 90 - 90.02 = -0.02 \text{ km}$$

表 1 各种故障类型下的故障定位结果

Tab.1 Fault location result for the each type of fault

故障类型	过渡电阻	短路点	定位结果	理论值	定位误差	短路点	定位结果	理论值	定位误差
A 相 短路接地	25	30%	90.02	90	0.02	40%	120.01	120	0.1
	50	35%	105.015	105	0.015	70%	209.98	210	-0.02
	25	25%	75.025	75	0.025	60%	179.99	180	-0.001
	50	35%	105.015	105	0.015	60%	179.99	180	-0.001
B 相 短路接地	10	30%	90.02	90	0.02	60%	179.99	180	-0.001
	30	50%	150	150	0	80%	239.97	240	-0.03
C 相 短路接地	10	30%	90.02	90	0.02	60%	179.99	180	-0.001
	30	50%	150	150	0	80%	239.97	240	-0.03
AB 相 短路接地	25	40%	120.01	120	0.1	70%	209.98	210	-0.02
	50	40%	120.01	120	0.1	70%	209.98	210	-0.02
AC 相 短路接地	60	30%	90.02	90	0.02	60%	179.99	180	-0.001
	100	50%	150	150	0	80%	239.97	240	-0.03
BC 相 短路接地	25	20%	60.03	60	0.03	80%	239.97	240	-0.03
	50	20%	60.03	60	0.03	80%	239.97	240	-0.03
ABC 相短路 接地	25	20%	60.03	60	0.03	80%	239.97	240	-0.03
	50	20%	60.03	60	0.03	80%	239.97	240	-0.03

上面的分析结果表明, 由于多小波的对称性, 多小波变换后, 奇异点的位置不会发生位移, 为了表明多小波变换在判断奇异点位置的精度方面高于小波变换, 我们对 M 端的数据进行了小波(db2)变换寻找奇异点的位置, 如图 7 所示, 在图 7 中, db2 小波变换后, 各个尺度上的奇异点的位置不同, 这

是因为小波变换后发生位移导致的, 原因主要是 db2 小波不具有对称性, 在图中我们也可以看出每一个尺度的位移程度是不同的, 到底选择哪个尺度下的奇异点的位置进行定位计算是我们面临的一个问题, 选择不同的尺度就会带来不同的故障定位误差。对于多小波变换就不会出现这种现象, 奇异点

的位置在每个尺度下都是相同的，因此应用多小波进行故障定位的方向是正确的。

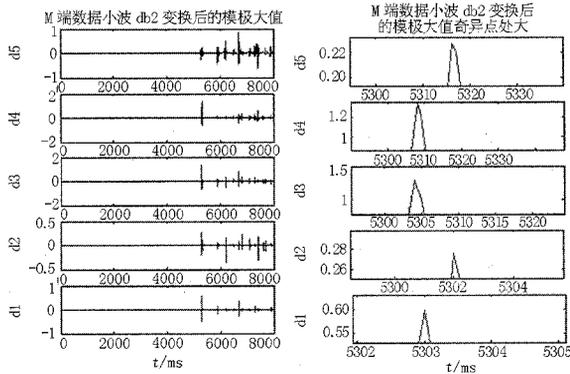


图 7 M 端数据小波 db2 后的模极大值

Fig.7 Modules maxima of db2 transform for the data of M

为了验证多小波进行故障定位的正确及适用性，我们做了大量的实验，结果如表 1 所示。

从上面的仿真结果，我们可以看出，用多小波进行输电线的故障定位，定位结果精度高，同时定位结果不受故障类型，过渡电阻，故障合闸角等因素的影响。

#### 4 动模试验

为了验证用多小波进行故障定位的实用性，我们利用武汉大学研制的 AFL2001 故障定位装置在 RTDS（实时数字仿真）上进行了动模试验。以此来验证用多小波进行故障定位的精确性和实用性。

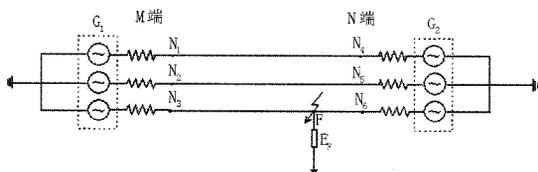


图 8 RTDS 中输电线的线路模型

Fig.8 RTDS model of the transmission line

故障定位装置采用双端法进行故障定位，即当线路发生故障时，采集线路两端的故障电流利用多小波原理进行分析，找出电流行波波头到达线路两端的故障时刻，从而可以判断线路故障位置。

##### 4.1 算例

我们对比较复杂的三相短路接地故障进行分析，以线路在离 M 端的 40% 处发生 ABC 三相短路接地，过渡电阻为 50 Ω 为例，因为在线路的每一端采用三块采集卡进行数据的采集，三块板在硬件电路上多少都有些差别，所以每一块的 GPS 时间都不一样，虽然我们采用了积极有效的同一触发这一做法，但是两端各相的 GPS 时间还是有些微小的差

别，因此我们在进行相模变换时，要以某一相的 GPS 时间为基准进行校准，本文中 M、N 侧都以各端的 A 相的 GPS 时间为基准进行相模变换。三相短路接地时测量端的故障电流波形图如图 9、图 10 所示。

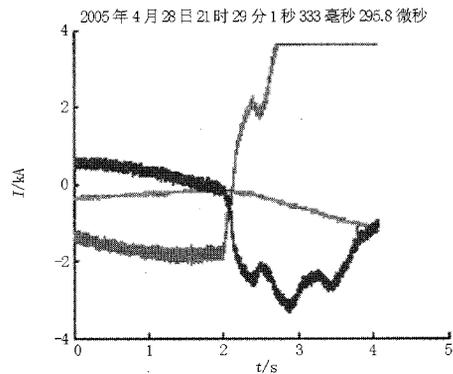


图 9 M 端三相故障电流

Fig.9 Three phase fault current of M

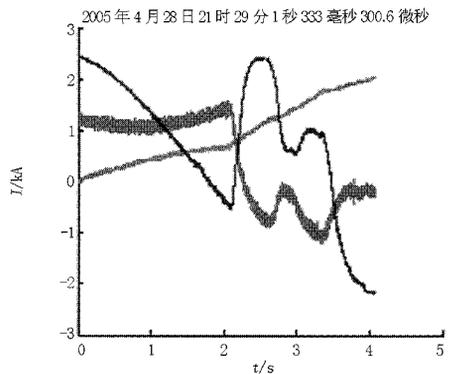


图 10 N 端三相故障电流

Fig.10 Three phase fault current of N

对采样信号进行去噪处理，然后进行多小波变换，两端的模极大值曲线图如图 11、图 12 所示。

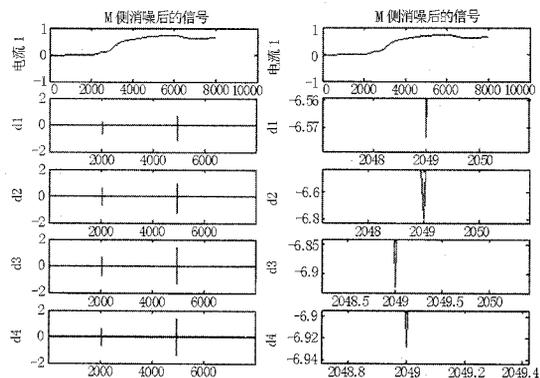


图 11 M 端多小波变换的模极大值曲线图

及奇异点的放大图

Fig.11 Modules maxima for the multiwavelets transform of M and the magnified figure of the singularity

为了便于分析，我们取故障前后的一段可以保

证奇异点在内的数据进行多小波变换, M 端的数据取点 18000~26000 进行多小波定位, 在图 11 的奇异点的放大图中, 每一尺度下的奇异点的位置相同, 在图 11 中奇异点的位置是第 2049 点, 那么在原采集数据序列中的位置是 20049 点。N 端的数据取点 20001~28000 进行多小波定位, 在图 12 的奇异点的放大图中, 每一尺度下的奇异点的位置相同, 在图 12 中奇异点的位置是第 1103 点, 那么在原采集数据序列中的位置是 21103 点。

多小波故障定位的结果:

$$\Delta T = (20049 - 21103) \times 0.2 + T_{nga} - T_{mga} = -206 \mu s$$

$$x = 119.409 \text{ km}$$

理论时间差应该是:

$$\Delta T = -200 \mu s$$

在多小波定位的分析中, 各尺度下的奇异点的位置没有发生位移, 这对我们进行精确故障定位带来了便利, 提高了故障定位的精度, 同时定位结果也比较满意, 因此多小波将为输电线路的精确故障定位带来广阔的前景。

我们还做了各种故障类型和不同故障位置以及不同故障过渡电阻下的多小波故障定位试验, 每个故障定位结果都能满足故障定位精度的要求, 所以利用多小波故障定位能够取得较好实际应用效果。

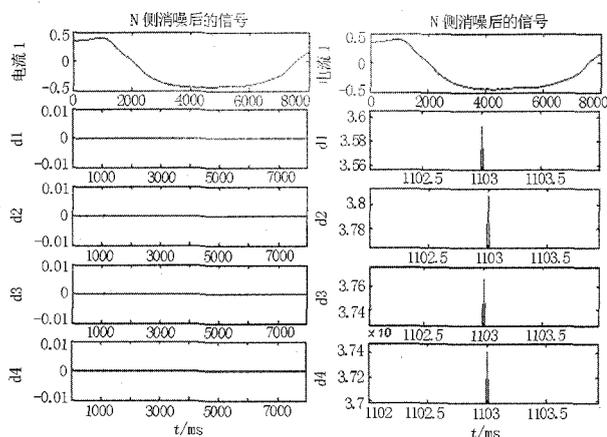


图 12 N 端多小波变换的模极大值曲线图及奇异点的放大图

Fig.12 Modules maxima for the multiwavelets transform of N and the magnified figure of the singularity

## 5 结论

本文对多小波在输电线故障定位中的应用进行了仿真实验, 仿真结果表明多小波在输电线故障定位中有很高的使用价值, 由于多小波具有对称性, 多小波变换后的各尺度的奇异点不会发生位移, 其

定位精度远远高于单小波定位的精度, 因此多小波将会成为输电线故障定位的新的有效手段。

## 参考文献

- [1] Strela V, Heller P N, Strang G, et al. The Application of Multiwavelets Filter Banks to Image Processing[J]. IEEE Trans on Image Process, 1999, 8: 548-563.
- [2] JIANG Qing-tang. Parameterization of M-channel Orthogonal Multi-filter Banks[J]. Adv comp Math, 2000, 2: 189-211.
- [3] JIANG Qing-tang. On the Design of Multifilter Banks and Orthonormal Multiwavelets Bases[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(12): 3292-3302, 1998.
- [4] WANG Hai-xiang, Johnson B R. The Discrete Wavelet Transform for a Symmetric-Antisymmetric Multiwavelet Family on the Interval[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52(9).
- [5] 刘志刚, 曾怡达, 钱清泉. 多小波在电力系统信号消噪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 30-34. LIU Zhi-gang, ZENG Yi-da, QIAN Qing-quan. Denoising of Electric Power System Signals Based on Direrent Multiwavelets[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 30-34.
- [6] 徐晶, 张传芳. 对称-反对称正交多小波的构造[J]. 黑龙江科技学院学报, 2004, (1): 70-71. XU Jing, ZHANG Chuan-fang. On Construction of Symmetric-antisymmetric Orthonormal Multiwavelets[J]. Journal of Heillongjiang Institute of Science & Technology, 2004, (1): 70-71.
- [7] Ashino R, Nagase M, Vaillancourt R. A Consruction of Multiwavelets[J]. Computers Math Applic, 1996, 32: 23-37.
- [8] JIANG Qing-tang. Orthogonal Multiwavelets with Optimum Time-Frequency Resolution[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(4): 830-844.
- [9] YANG Jian-wei, TANG Yuan-yi, CHENG Zheng-xing. Construction of Orthogonal Multiwavelets[A]. In: Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. Beijing: 2002.
- [10] XIA Xiang-gen, Geronimo J S. Design of Prefilter for Discrete Multiwavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(1).
- [11] XIA Xiang-gen, Geronimo J S. A New Prefilter Design for Discrete Multiwavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(1).
- [12] Lebrun J, Vetterli M. Balanced Multiwavelets Theory and Design[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(4).
- [13] Lebrun J, Vetterli M. High-order Balanced Multiwavelets: Theory, Factorization and Design[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(9).
- [14] Ivan W. Selesnick, Multiwavelet Bases with Extra Approximation Properties[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 47.
- [15] Selesnick I W. Interpolating Multiwavelet Bases and the Sampling Theorem[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999.

- [16] Miller J T, LI Ching-chung. Adaptive Multiwavelet Initialization[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998,46(12).
- [17] Attakimongcol K, Hardin D P. Multiwavelet Prefilters. II. Optimal Orthogonal Prefilters[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001,10(10).
- [18] LIAN Jian-ao, Chui C K. Balanced Multiwavelets with Short Filters[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004,11(2).
- [19] Controinei M, Montefusco L B, Puccio B U. Multiwavelet Analysis and Signal Processing[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1998,45(8).
- [20] 谢荣生,李汉杰,孙枫,等. 基于多小波噪声方差阈值的信号滤波方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002,23(2): 54-57.  
XIE Rong-sheng, LI Han-jie, SUN Feng, et al. Filtering Algorithm Based on Multiwavelet Noise Variance Threshold[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002,23(2):54-57.
- [21] Tham Jo Yew, SHEN Li-xin, Lee Seng Luan, et al. A General Approach for Analysis and Application of Discrete Multiwavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000,48(2).
- [22] Geronimo J, Hardin D P, et al. Functions and Wavelet Expansion Based on Several Scaling Functions[J]. Ppox Theory, 1994,78:373-401.
- [23] 王玲. 多小波二阶平衡的预滤波处理[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002,(6):107-111.  
WANG Ling. Prefiltering of Multiwavelet with 2-order Banlancing[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2002,(6):107-111.
- [24] 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): 94-100.  
LIU Zhi-gang, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Review of the Multiwavelet Development and its Applications in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(11):94-100.
- [25] 刘志刚, 曾怡达, 钱清泉. 多小波的多分辨率分析在电力信号处理中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2004,39(3):53-58.  
LIU Zhi-gang, ZENG Yi-da, QIAN Qing-quan. Application of Multiwavelet Multiresolution Analysis in Signal Processing of Power System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004,39(3):53-58.

收稿日期: 2007-10-25; 修回日期: 2008-03-17

作者简介:

梁劲(1969-)男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力市场和电力系统自动化;

周静(1975-), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为直流输电系统的控制保护和输电线路的故障定位。

E-mail: zhou-jing@sgcc.com.cn

(上接第4页 continued from page 4)

#### 参考文献

- [1] Г И Атабеков. Релейная Защита Высоковольтных Сетей [B] 1949
- [2] А И Федосеев. Релейная Защита Электрических Систем[B]. 1952.
- [3] 王梅义, 蒙定中, 郑奎璋, 等. 高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [5] 戚卫国. 电流互感器的电磁动态过程及其模拟计算[J]. 电力系统自动化, 1985,9(4).  
QI Wei-guo. Transient Process of the Current Transformer and Its Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1985,9(4).
- [6] Lucas J R, McLaren P G, Keerthipala W W L, et al. Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Study [J]. IEEE Trans.
- [7] 阮树骅, 周步祥. 电流互感器暂态仿真研究[J]. 继电器, 1997,25(3):2-7,9.  
RUAN Shu-hua, ZHOU Bu-xiang. The Simulation Study of the Current Transformer Transient Process[J]. Relay, 1997,25(3):2-7,9.
- [8] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器; 2002,30(2): 3-7.  
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The Transient Saturation Calculation of the Current Transformer[J]. Relay, 2002,30(2):3-7.
- [9] 袁季修, 卓乐友, 盛和乐, 等. 保护用电流互感器应用的若干问题——《电流互感器和电压互感器选择和计算导则》简介[J]. 电力自动化设备, 2003,23(8).  
YUAN Ji-xiu, ZHUO Le-you, SHENG He-le, et al. Some Issue in the Application of the current Transformer Used in the Protection[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2003,23(8).
- [10] 李艳鹏, 侯启方, 刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备, 2006,26(8).  
LI Yan-peng, HOU Qi-fang, LIU Cheng-zhi. The Affect of the Non-periodic Component on the Transient Saturation of the Current Transformer[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2006,26(8).

收稿日期: 2008-05-21

作者简介:

陈德树(1930-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统微机保护、综合自动化、电力系统模拟与安全稳定等领域的工作; E-mail: dschen@21cn.com

尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统微机保护、综合自动化、电力电子在电力系统中的应用等领域的研究和教学工作;

张哲(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、故障滤波等领域的教学、研究工作。