

# 基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究

马爱平, 刘 磊

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 输电线路发生故障后, 其行波信号是一个突变的、具有奇异性的信号<sup>[1]</sup>。小波分析具有很多有用的性质, 利用小波多分辨率的特性可将突变信号进行多尺度分解, 然后通过分解后的信号来确定突变信号的突变位置。Lipschitz 指数被用来定量描述函数的奇异性<sup>[2]</sup>。当小波变换尺度越来越精细时, 小波变换模的极大值信号的突变点位置越精确。其衰减速度取决于信号的突变点的 Lipschitz 指数。小波变换不仅可以确定突变点发生的时间, 而且可以进一步判断突变点的性质。通过检测小波变换模极大值来找到信号的奇异点, 从而确定信号发生突变的位置。

**关键词:** 小波分析; 信号突变性; Lipschitz 指数; 故障暂态信号; Daubechies 小波

**Abstract:** After the failures occurring in the transmission lines its traveling wave signal is a sudden-change signal with singularity. Wavelet analysis has many useful properties. Using the characteristics of wavelet multi-resolution, the multi-scale decomposition can be carried out for the sudden-change signal and the location of the sudden-change signal can be determined through the decomposed signal. Lipschitz index is used to quantitatively describe the function of the singularity. When the scale of wavelet transform is more and more fine, the location of the sudden-change point is more precise. The rate of decay depends on the Lipschitz index of the sudden-change signal. Wavelet transform not only can determine the time that the sudden-change point occurs, but can further determine the nature of sudden-change point. Through detecting the modulus maxima of wavelet transform, the singular point can be found, and the location of the sudden-change signal can be determined.

**Key words:** wavelet analysis; signal mutation; Lipschitz index; fault transient signal; Daubechies wavelet

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0016-03

## 0 引 言

长期以来, 傅里叶变换是研究信号奇异性的主要工具, 其方法是研究信号在傅里叶变换域的衰减以推断信号是否具有奇异性及奇异性大小。但傅里叶变换缺乏空间局部性, 它只能确定一个信号突变性的整体性质, 而难以确定突变点在空间的位置及分布情况<sup>[3]</sup>。由于小波具有空间局部性, 它能“聚焦”于信号的局部结构, 因此, 利用小波变换来确定信号的突变性位置更有效。

## 1 信号的突变性与小波变换

S Mallat 将函数 (信号) 的局部奇异性与小波变换后的模局部极大值联系起来。通过小波变换后的模极大值在不同尺度上的衰减速度来衡量信号的局部奇异性。

设小波  $\psi(t)$  是实函数且连续, 具有衰减性:  $|\psi(t)| \leq K(1+|t|)^{-2-\epsilon}$ , ( $\epsilon > 0$ ),  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  在区间  $I$  上是一致 Lipschitz 指数  $\alpha$  ( $-\epsilon < \alpha \leq 1$ ), 则存在常数  $c > 0$ , 使得对  $\forall a, b \in I$  其小波变换满足

$$|(Wf)(a, b)| \leq ca^{\alpha+1/2} \quad (1)$$

反之, 若对于某个  $\alpha$  ( $-\epsilon < \alpha \leq 1$ ),  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  的小波变换满足式 (1), 则  $f$  在  $I$  上具有一致 Lipschitz 指数  $\alpha$ 。

若  $t_0$  是  $f(t)$  的奇异点, 则  $|(Wf)(a, b)|$  在  $b=t_0$  处取得极大值, 即此时式 (1) 等号成立。

在二进制小波变换情况下, 式 (1) 变成

$$|(Wf)(2^j, b)| \leq c \times a^{j(\alpha+1/2)} \quad (2)$$

在信号处理中, 常采用卷积型小波变换。为此, 这里引入卷积型小波变换的概念。

设  $f(t), \psi_s(t) \in L^2(\mathbb{R})$ , 记

$$\psi_s(t) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{t}{s}\right), s > 0 \quad (3)$$

则称

$$(Wf)(s, b) = f \cdot \psi_s(b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{b-t}{s}\right) dt \quad (4)$$

为  $f(t)$  的卷积型小波变换, 也称为  $f(t)$  的小波变换。

在式 (1) 中, 如果将  $f(t)$  的小波变换理解成卷积型小波变换, 则式 (1) 和式 (2) 就变成

$$|(Wf)(s, b)| \leq cs^\alpha \quad (5)$$

及

$$|(Wf)(2^j, b)| \leq c2^{j\alpha} \quad (6)$$

式 (1) 或式 (2) 表明, 若  $\alpha > -\frac{1}{2}$ , 则小波变换模极大

值随着尺度  $j$  的增大而增大; 若  $\alpha < -\frac{1}{2}$ , 则小波变换模极大值随着尺度  $j$  的增大反而减小。这种情况说明, 该信号比不连续信号 (如阶跃信号,  $\alpha=0$ ) 更加奇异, 这正是噪声对应的情况, 可以利用小波变换模极大值随尺度变化的情况来推断信号的突变点类型<sup>[4]</sup>。

## 2 信号的突变点检测原理

信号的突变性检测是先对原信号在不同尺度上进行“磨光”, 再对磨光后信号的一阶或二阶导数检测其极值点或过零点。对信号进行磨光处理, 主要是为去除噪声而不是边缘, 因此磨光函数应是局部化的。常用的磨光函数 (又称平滑函数)  $\theta(t)$  可选取 Gauss 函数或 B-样条函数。磨光函数满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1 \quad (7)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \theta(t) = 0 \quad (8)$$

式 (7) 表示  $\theta(0)=1$ , 即  $\theta(t)$  可理解为低通滤波器。

由定义及卷积的性质, 有

$$f \cdot \psi_s^{(1)}(t) = f \cdot \left(s \frac{d\theta_s}{dt}\right) = s \frac{d}{dt} (f \cdot \theta_s(t)) \quad (9)$$

$$f \cdot \psi_s^{(2)}(t) = f \cdot \left(s^2 \frac{d^2\theta_s}{dt^2}\right) = s^2 \frac{d^2}{dt^2} (f \cdot \theta_s(t)) \quad (10)$$

式 (9) 和式 (10) 中的卷积  $f \cdot \theta_s(t)$ , 也称为磨光 (或平滑) 算子, 表示  $f(t)$  经算子作用后的一个信号。直观的意思是  $f(t)$  的“角点”被磨成光滑弧, 从而使  $f(t)$  变成一个光滑函数  $f \cdot \theta_s(t)$ 。

式 (9) 和式 (10) 表示,  $f(t)$  的小波变换  $(Wf)(s, t) = f \cdot \psi_s^{(1)}(t)$  与  $f \cdot \theta_s(t)$  的一阶导数成正比。而  $(Wf)(s, t) = f \cdot \psi_s^{(2)}(t)$  与  $f \cdot \theta_s(t)$  的二阶导数成正比。这就可以说明小波变换用于突变点检测的基本

原理, 即选取光滑函数  $\theta(t)$  以后, 信号  $f(t)$  的突变点, 可以通过检测小波变换  $f \cdot \psi_s^{(1)}(t)$  和  $f \cdot \psi_s^{(2)}(t)$  的模极大值而得到<sup>[5]</sup>。

结合  $\theta(t)$  选取 Gauss 函数来说, 常用反对称小波  $\psi^{(1)}(t)$  检测阶跃突变点, 用对称小波  $\psi^{(2)}(t)$  检测局部极值点。在实际应用中, 仅在一个尺度下检测突变点常常还很难确定真正的突变点位置, 因此需要多尺度检测。只有在多尺度上都是极值点的位置才是真正的突变点所在位置。

## 3 电力系统输电线路故障暂态信号的奇异性<sup>[6-10]</sup>

当输电线路发生故障时, 故障信号成分非常复杂。在实际中一般按 (11) 式的故障暂态信号模型来描述。

$$f(t) = \begin{cases} A_m \sin(\omega t + \varphi), & t < t_b \\ \sum_{i=1}^N A_i \sin(i\omega t + \varphi_i) + Ae^{-\lambda t}, & t \geq t_b \end{cases} \quad (11)$$

输电线路负载大多数是感性的, 其电流信号在故障时刻  $t_b$  是连续的, 而其某阶导数是不连续的, 属于缓变奇异信号。

三相输电线路电压信号在故障时刻  $t_b$  发生跳变, 是不连续但有界的函数, 属于剧变奇异信号, 其 Lipschitz 指数为 0。

## 4 采用算法

(1) 选择小波  $\psi$ , 分解层次  $J$  和阈值  $T$

(2) 对  $\{f[n]\}$  进行二进制小波变换, 得到各层小波系数:  $\{(W_1 f)[k]\}$ ,  $\{(W_2 f)[k]\}$ ,  $\dots$ ,  $\{(W_J f)[k]\}$ ;

(3) 对  $\{(W_j f)[k]\}$ ,  $j=1, \dots, J$  进行阈值处理, 即若  $|\{(W_j f)[k]\}| < T$  则  $(W_j f)[k]=0$ ;

(4) 检测  $\{(W_j f)[k]\}$ ,  $j=1, \dots, J$  的模极大值点, 即如果  $k=m$  是极大值点, 则满足下列 3 个条件。

$$\textcircled{1} |(W_j f)[m]| \geq T$$

$$\textcircled{2} |(W_j f)[m]| \geq |(W_j f)[m-1]| \text{ 且 } |(W_j f)[m]| \geq |(W_j f)[m+1]|$$

$$\textcircled{3} |(W_j f)[m]| > |(W_j f)[m-1]| \text{ 或 } |(W_j f)[m]| > |(W_j f)[m+1]| \text{ 可得 } \{t[0], t[1], \dots, t[j]\}, j=1, 2, \dots, J$$

(5) 对第 (4) 步得到的点逐一检查是否是各尺度

上的极值点,得到突变点。

### 5 Matlab仿真实验及结果

Daubechies 系列小波是工程上应用最广泛、最成熟的紧支集正交实小波函数族,简称 dbN 小波系(其中 N 为小波序号这一系列),小波共有 49 个(db1~db49);其特点是:支集长度  $L=2N$ ,消失矩阶数  $p=N$ ;随着序号 N 的增大,时间局部性变差,但频域局部性变好。其它类似的紧支集正交小波,例如 coif 小波, Sym 小波特性均不如 db 小波,因此,通过比较分析,选择 db4 小波作为故障信号分析的小波函数。db4 小波函数及其尺度函数图形如图 1 所示。

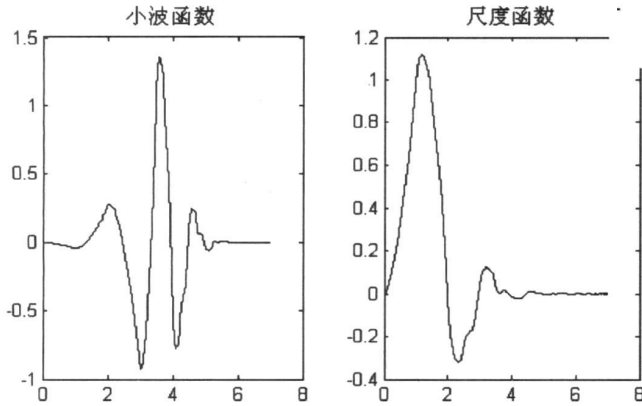


图 1 db4 小波函数及其尺度函数

设有如图 2 所示的 220 kV 电力系统输电线路,在距离 M 端 100 km 处发生 A 相短路故障,为了便于对故障点定位,需要得到故障发生的准确时刻。运用所提出的算法对 M 点检测到的 A 相短路故障电流信号进行小波分解,分析该奇异信号,得到输电线路故障发生的时刻。



图 2 220 kV 输电线路故障模型

本次实验采用 db4 小波对检测到 M 点的故障电流信号进行五层小波分解如图 3 所示;利用小波多尺度分析,故障电流信号 S 可分解成一尺度空间的低频概貌  $a_1$  和高频细节部分  $d_1$ ,然后将  $a_1$  分解成二尺度空间的低频概貌  $a_2$  和高频细节部分  $d_2$ ,逐次分解,最终得到第五层上信号的低频概貌和高频细节部分。

分解后细尺度的系数如图 4 所示,故障信号可表

示为  $s=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5+a_5$ ,其中  $a_5$  为第五层低频概貌,  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  分别为高频细节。

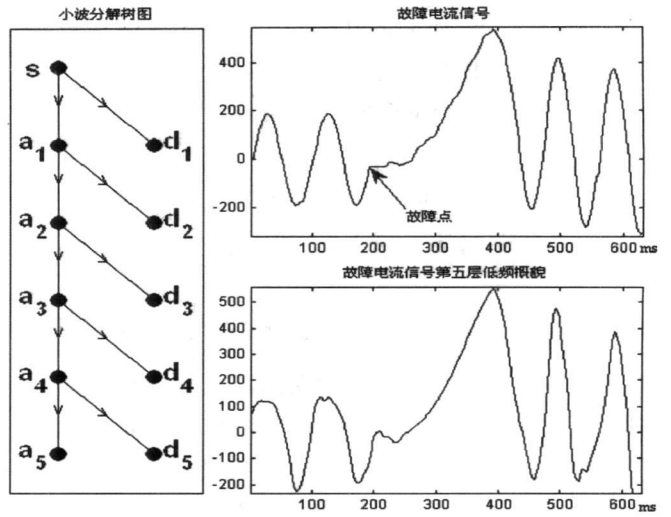


图 3 故障电流小波分解树图及第五层低频概貌

通过对图 4M 点 A 相故障电流 1~5 层细尺度小波变换的波形进行分析,可得故障初始行波到达 M 端的时刻为  $t=t_0$ 。

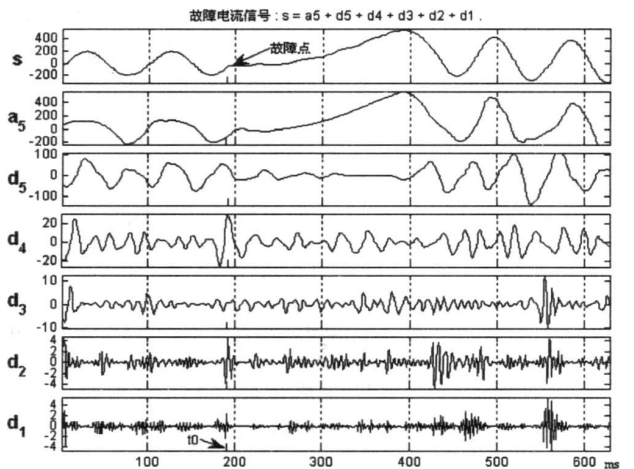


图 4 M 点 A 相故障电流的五层小波分解

### 6 结 语

提出了一种以 Mallat 算法为基础,利用小波多分辨率的特性,将突变信号进行多尺度分解,然后根据各细尺度系数模的极大值,判断信号发生突变的时刻。根据实验结果分析,本算法能有效、及时地确定故障信号发生畸变的时刻,形象地阐述了小波变换在时域和频域上都具有表征信号局部特性的能力。

(下转第 43 页)

值与无功补偿容量采取量化、负荷重的无功功率跟随修正量化等值不同,产生的误差也不相同,需要优化考虑,考虑到实际电网中无功补偿容量是已知部分,故采用先将无功补偿容量进行量化等值之后,在进行负荷的无功功率负荷进行跟随修正等值,方法简单可行,同时误差较小。采用此种方法等值之后,潮流计算及稳定计算的误差大大减少。

## 6 结 论

综述了网络等值方法,并将其应用到实际的系统中,针对新疆电网的实际情况,进一步优化了工程等值方法,并在应用中对对比了等值前后的计算结果,并对误差进行了分析,并提出以下结论和建议。

1)进行电网稳定计算分析前,对电网进行等值时,应事先分析,综合考虑等值部分的情况,而采用不同的等值方法,以满足工程要求,不能一概而论,应将动态等值、静态等值综合考虑,将同调等值法和模态等值法,估计等值法有效结合,以不偏离电网动态等值为要求,必要时可不简化等值,但要试研究目的进行综合分析,避免局部特性过大或者过小。

2)在对系统电源进行等值时,需对要等值的小电源进行分类、研究、分析、细化等值方案,分类等值。

3)等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程,但是等值造成了初始潮流有了偏差,并且这种偏差主要是由于对无功的等值误差造成的。

4)对于负荷无功功率等值、低压无功补偿设备的等值需要认真分析,认真考虑,双变量的动态等值,不但关系到静态潮流、同时也关系到负荷的动态特

性。

5)对中性点接地变电站的等值需考虑零序回路的等值,以减少稳定计算时不对称故障的稳定特性的误差。

## 参考文献

- [1] Tinney W F, Powell W L. The REI Approach to Power Network Equivalents. Proc of PICA Conference. 1977.
- [2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [3] 李健,李栋. 静态等值方法的综合分析与评价 [M]. 电气应用, 2006, 25(9): 97-101.
- [4] 吴际舜. 电力系统安全分析 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1985.
- [5] 刘绪斌,王良,闫有朋. 电力系统静态等值改进算法的研究 [J]. 华北电力计算, 2010(3): 1-5.
- [6] 张海波,张伯明,王俏文,等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果的试验研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1-6.
- [7] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [8] MA J, VALLE R J. Identification of Dynamic Equivalents Preserving the Internal Modes Ramirez. IEEE Power Tech Conference Proceedings. BER IN; Bologna. 2003: 415-419.

### 作者简介:

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 研究方向: 电网稳定与控制;

周悦 (1985), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电网电压稳定和电网规划。

(收稿日期: 2010-06-08)

(上接第 18 页)

## 参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 魏明果. 实用小波分析 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [3] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia: Philadelphia City Press. 1992.
- [4] 潘泉. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] 谭剑, 黄震, 等. 基于小波变换的同杆并架双回路双端行波故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51-55.

- [6] 舒乃秋, 胡芳, 周静. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测 [J]. 电网技术, 2004, 10(28): 59-62.
- [7] 吕艳萍, 陈允平, 刘珠明. 基于小波分析的超高压输电线路故障定位的研究 [J]. 中国电力, 2003, 36(2): 32-36.
- [8] 吴军基, 吴秋伟. 电力系统故障时刻提取的小波分析 [J]. 继电器, 2000, 28(12): 1-3.
- [9] 覃剑, 陈祥训. 基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统 [J]. 电网技术, 2003, 5(20): 45-47.
- [10] 王先明, 陶时伟, 陶冶, 蔡德礼. 小波变换奇异性在电力系统行波故障测距中的应用 [J]. 贵州工业大学学报, 2001, 3(30): 50-85.

(收稿日期: 2010-05-31)