电力系统故障时刻提取的小波分析

吴军基 ,吴秋伟 ,杨　伟

(南京理工大学动力工程学院 ,江苏　南京　210094)

摘要: 小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化特性 ,而且可以根据信号频率的变化自动调节时域-频域窗口 ,因此利用小波分析可以有效地检测出信号的奇异性。文章分析了电力系统故障暂态信号的奇异性 ,得出其奇异性的特殊性 ,从而提出利用小波变换进行故障暂态信号奇异性检测的算法 ,保证奇异点的准确检测 ,即故障时刻的准确提取。

关键词: 小波分析 ;　奇异性 ;　故障暂态信号 ;　故障时刻提取

中图分类号: TM711　　**文献标识码** :A　　**文章编号** :1003-4897(2000)12-0001-03

1　引言

Fourier 变换作为电力系统平稳信号的分析方法有着重要的应用 ,但其用于分析瞬态故障信号时 ,把瞬态奇异信号的频域信息分配给整个频域范围内的其他频率分量 ,即把反映故障信息的局部特征在整个频域内平均掉了 ,从而使分析结果产生较大误差。作为一种改进 ,加窗 Fourier 变换运用固定的时窗 ,通过沿时间轴的平移来完成对信号的分析 ,提取出信号的时间频率特征 ,但固定的刚性窗会造成在分析频变信号时仍有局限性。小波分析正是为克服这种不足 ,运用可调的柔性窗对高频、低频信号分别采取不同的尺度进行分析 ,因此它对奇异信号敏感 ,特别适合于分析奇异性强的故障信号。

在电力系统故障分析、故障诊断、故障测距和局部放电等研究领域中 ,运用小波变换进行故障信号的故障时刻检测、行波信号的奇异性检测等[5][6][7]。为了明确本文讨论的范围 ,按奇异度将信号分为剧变奇异信号和缓变奇异信号。电子系统故障暂态信号属于缓变奇异信号。本文根据研究的需要 ,根据信号的奇异性定义 ,对电力系统故障暂态信号奇异的特殊性进行分析研究 ,其特殊性表现在奇异时刻(奇异点)的奇异性具有不确定的奇异度 ,接着分析突变点位置(即故障时刻)和小波变换系数模极大值之间关系 ,从而得出故障时刻提取的方法。

2　电力系统奇异信号

2.1　奇异特征的基本定义[1]

为了明确信号的奇异程度 ,将信号分为缓变、剧变的奇异信号 ,本文引出以下定义 :

1) 设函数 $f:[a,b]\to R$, $x_0\in[a,b]$,令 $\alpha_0=\mathrm{SUP}\{\alpha, f$ 在 x_0 是 Lipschitz $\alpha\}$ 称 f 在 x_0 的 Lipschitz 奇异度为 α_0。

2) 设函数 $f:[a,b]\to R$ 在 $x_0\in[a,b]$,是奇异信号 ,如果 $\alpha_0<0$,称 f 在 x_0 是剧变奇异信号 ;如果 $\alpha_0>0$,称 f 在 x_0 是缓变信号。

由上式定义可得 :若函数 $f:[a,b]\to R$ 在 $x_0\in[a,b]$ 具有 n 阶导数 ,则此点的奇异度 $\alpha_0\geq n$;若 n 阶导数不存在 ,则此点的奇异度为 $\alpha_0<n$。

例 :$f(t)=(t-t_0)$ 在 t_0 的奇异度为 1 ,是缓变奇异信号 ;而 $f(t)=\delta(t-t_0)$ 在 t_0 的奇异度为 -1 ,为剧变奇异信号。

2.2　电力系统故障暂态信号的奇异性

当电力系统发生故障时 ,故障信号成分很复杂。在实际保护的故障信号分析中 ,所用信号的时间区段很短 ,一般由下式的故障信号模型来描述

$$f(t)=\begin{cases} a\sin(\omega t+\varphi) & t<0 \\ \sum_{i=1}^{N}A_i\sin(i\omega t+\varphi_i)+Ae^{-\lambda t} & t\geq 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中 ω 是电力系统的基频 ,$Ae^{-\lambda t}$ 是衰减直流分量 ,$\sum_{i=1}^{N}A_i\sin(i\omega t+\varphi_i)$ 是基频和高次谐波分量 ,由电路等效原理分析可知 ,电力系统故障暂态信号是连续性质的 ,故障信号模型在故障时刻(参考点) $t=0$ 是连续的 ,因而故障暂态信号是连续信号 ,如信号具有奇异性 ,则属缓变奇异信号。

考察故障暂态信号在 $t=0$ 点的导数 ,可以计算出信号的左导数 $f_-(0)=a\omega\cos\psi$,右导数为 $f_+(0)=\sum_{i=1}^{N}i\omega A_i\cos\varphi_i-A\lambda$。当左导数不等于右导数时 ,故障暂态信号在 $t=0$ 点是不可导 ,故障暂态信号具有奇异性 ,奇异度 $\alpha_0\leq 1$。当 $t=0$ 点 ,左导数等于右导数时 ,即 $a\omega\cos\varphi=\sum_{i=1}^{N}i\omega\cos\varphi_i-A\lambda$ 时 ,故障信号可

导,奇异度 $\alpha_0 \geq 1$。这时,$f(t)$ 的导函数为

$$f'(t) = \begin{cases} a\omega\cos(\omega t + \phi) & t < 0 \\ \sum_{i=1}^{N} i\omega A_i\cos(i\omega t + \phi_i) - A\lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

同理,对 $f(t)$ 作类似的左右导数计算后,可得故障暂态信号在 $t=0$ 的 $f''(t)$ 一般不成立,但在某种条件下也可能成立,不能完全排除。类似地继续考虑知,$f(t)$ 在点 $t=0$ 的 $2N+2$ 阶导数一般不存在,但仍然有存在的可能性。因而得到故障暂态信号在故障时刻的奇异度是不确定的,不同的故障暂态信号的奇异度是不同的。

综上所述,电力系统故障暂态信号属缓变奇异信号,其奇异度是不确定的[4]。

3 故障暂态信号的奇异性检测[4]

3.1 故障暂态信号的奇异性检测定义和原理

为了检测缓变奇异信号的奇异性,需选用具有紧支称和足够阶数的消失矩的小波函数,其定义给出如下。

小波 $\Psi(x)$ 称为具有阶消失矩,如对所有正整数 k,$0 \leq k \leq n$ 均有

$$\int_R x^k \Psi(x)\,\mathrm{d}x = 0 \quad (3)$$

由文献[1],有下述的 Lipxchitz 性质与小波变换的关系、定理。

如果小波具有紧支称和 n 阶消失矩,且 n 次连续可微,n 是一个正整数。设函数 $f \in l^2(R)$,$[a,b] \subset R$ 及 $a < n$,则 f 在 $[a,b]$ 上一致 Lipxchitz α 充要条件为:对任意 $\zeta > 0$ 存在 $A\zeta > 0$,使得对任意 $x \in [a+\zeta, b-\zeta]$ 和 $s > 0$,总有式

$$|W_f(x,s)| \leq A_\zeta s^\alpha \quad (4)$$

设小波 $\Psi(x)$ 具有紧支称和 n 阶消失矩,且 n 次连续可微,n 是一个正整数,且若 f 在 x_0 是 Lipxchitz α,则存在 $A > 0$,使得

$$|W_f(x,s)| \leq A(s^\alpha + |x - x_0|^\alpha) \quad (5)$$

存在 $B > 0$,使得

$$|W_f(x,s)| \leq B\left(s^\alpha + \frac{|x-x_0|}{|\log|x-x_0||}\right) \quad s > 0 \quad (6)$$

成立,则 f 在 x_0 是 Lipxchitz α 的。

由此,本文得出对缓变奇异信号的奇异点的判定方法如下。

设小波 $\Psi(x)$ 具有紧支称和 n 阶消失矩,且 n 次连续可微,其中 n 是一个正整数。如果函数 f 在 x_0 点的 Lipschitz 度为 $\alpha_0(\alpha_0 < 0)$ 而在点 x_0 附近 n 次连续可微,则 $|W_f(x,s)|$ 在 x_0 达到极大值。

由此命题可准确检测缓变奇异信号的奇异点的位置。

3.2 故障暂态信号的奇异性检测算法

对缓变奇异信号的奇异点位置的检测算法归纳如下:

1) 对 f 利用小波作离散小波变换,利用 Mallat 算法求出 $\{W(x_j, s, \Psi) \mid j = 1, 2, \cdots, N\}$

2) 对于数据 $\{W(x_j, s, \Psi) \mid j = 1, 2, \cdots, N\}$ 的极大值,并记录相应的极大值点,则极大值点就是所求的缓变奇异信号的奇异点。

算法中的小波变换由下式定义:对于任意函数 $f(t) \in l^2(R)$,其小波变换为

$$W_{\Psi,f}(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t)\,\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}\,\mathrm{d}t$$

$$a, b \in R, a \neq 0 \quad (7)$$

4 故障暂态信号故障时刻检测的仿真

仿真 1: 设故障信号模型为:

$$f(t) = \begin{cases} 50\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) & t < 0 \\ 25\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) + 10\sin 3\omega t + 10\sin 5\omega t + \\ 10\sin 7\omega t + 100e^{-50t} & t \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

可以验证,信号在点 $t=0$ 的导数不存在,奇异度小于 1,故选用文献[3]中的 4 阶传递函数所对应的消失矩为 1 的小波进行奇异性检测。检测故障发生时刻的步骤如下:

1) 由故障信号给出采样序列,按每周采样点数为 320,故障前后各取半周,即各 160 点;

2) 利用 FFT 对故障信号进行分析,得出分解序列;

3) 利用所选 4 阶传递函数所对应小波及尺度函数的二尺度序列 $\{g_n\}$,$\{h_n\}$,实施小波变换的 Mallat 算法,得到故障信号的分解序列;

4) 观察故障信号采样序列的分解信息序列。判断有无极大值,即确定有无故障,从而确定故障点的位置。

5) 根据计算数据画出故障信号检测图形,如图 1 所示。

显然,信号在 $t=0$(160 点)处有奇异性(因为进行小波变换时采取了二抽取,所以在图 1 中为 80 点),按上述方法,奇异点被检测,而利用 FFT 则不能提取出故障时刻。要注意所得的奇异点与真正的奇

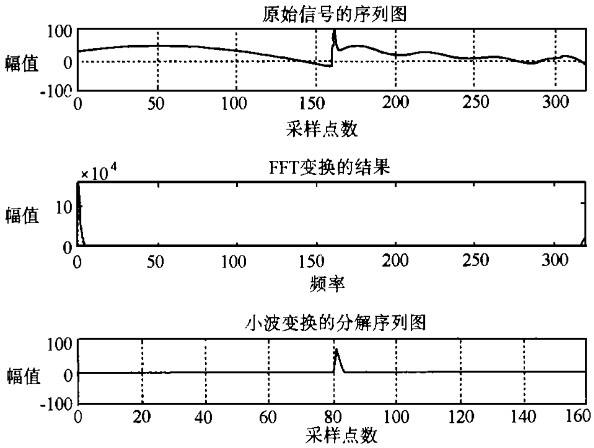

图1 故障暂态信号的FFT变换和小波变换

异点固定滞后一个采样间隔。

仿真2:设故障模型如仿真1,对故障信号进行多尺度分解,分析步骤如下:

1) 由故障信号给出采样序列,按每周采样点数为320,故障前后各取半周,即各160点;

2) 利用DB6小波对故障信号进行5尺度分解,得到故障信号的分解序列;

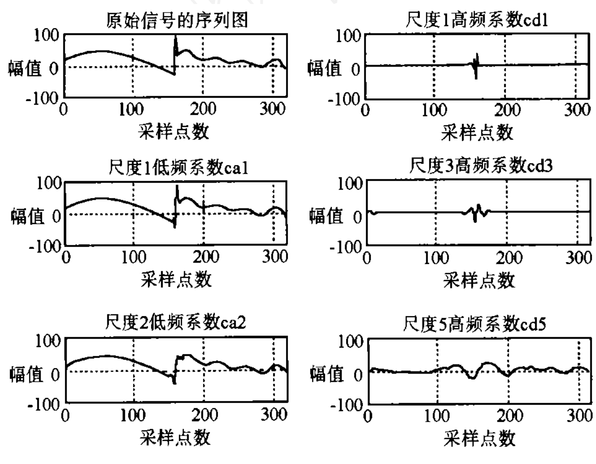

图2 故障信号的多尺度分析

3) 对分解序列进行单尺度重构,得出在尺度1、2上的低频系数和尺度1、3、5上的高频系数;

4) 根据得到的数据画出故障信号分析图形,如图2所示。然后分析分解尺度对故障时刻提取的影响。

显然,分解尺度选择不正确不能正确提取故障时刻。

5 结论

1) 对电力系统故障暂态信号进行了奇异性特殊性分析,指出其在故障时刻具有不确定的奇异度。

2) 通过分析故障暂态信号奇异点和小波变换系数极值之间的关系,我们可以知道小波变换系数极值对应于故障暂态信号奇异点。

3) 与FFT相比较,小波分析可以正确地提取出故障时刻,而且边缘效应要小得多。

4) 通过对故障暂态信号的多尺度分析和在各个尺度上重构信号,我们可以看出,如果分解尺度选择不正确,则不能正确提取出故障时刻。因此,我们在对故障信号进行小波分析时,一定要根据故障信号特征正确选择分解尺度,否则就不能得到预期的分析效果。

参考文献:

[1] Mallat S and Hang WL. Singularity Detection and Processing with Wavelets, IEEE Trans Information Theory, 1992(2): 38-40.

[2] Mallat S and Zhong S. Characterization of Signals from multiscales edges, IEEE Chs Trans Petenand Machine Intelligence, 1992(7): 14-18.

[3] 张兆宁. 电力系统故障暂态信号分析中的新数学方法研究. 天津大学博士论文, 1998, 11.

[4] 张兆宁, 毛鹏, 孙雅明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测. 继电器, 2000, (4): 24-27.

[5] 董新洲, 耿中行, 葛耀中. 小波变换应用与电力系统故障信号分析初探. 中国电机工程学报, 1997, (6): 17-20.

[6] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用. 继电器, 1998, (5): 20-22.

[7] 任震, 黄雯莹, 石志强. 小波变换及其在电力系统中的应用. 电力系统自动化, 1997, (3): 9-12.

收稿日期: 2000-06-21

作者简介: 吴军基(1955-), 男, 教授, 硕士, 从事电力系统自动化研究; 吴秋伟(1977-), 男, 硕士, 从事电力系统自动化研究; 杨伟(1965-), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化研究。

Wavelet analysis of the extraction at fault time in power system

WU Jun-ji, WU Qiu-wei, YANG Wei

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

(下转第12页)