

电力系统故障诊断中的小波及多分辨分析理论的应用

冯雪¹, 张玉文², 周慧莹²

(1. 四川电力物流集团公司, 四川 成都 610061; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:介绍了小波分析的基本原理、自适应的时频窗和它的快速算法。用仿真试验说明了小波变换在信号奇异性检测和信号消噪过程中的应用, 将 Fourier 变换结果和小波变换结果作比较, 得出小波变换有着 Fourier 变换无可比拟的优越性。并结合这两个应用, 对电力系统中的故障检测进行了模拟仿真, 仿真结果表明小波变换能够很好地消除电力系统故障信号噪声, 并检测出故障点。

关键词:电力系统; 多分辨分析理论; 信号消噪; 故障诊断

Abstract: The basic principle of wavelet analysis and its fast algorithm are introduced. The simulation results show its application to signal singularity test and noise reduction. The comparisons between wavelet transform and Fourier transform have also been done to prove that the wavelet algorithm can successfully reduce the noise of fault signal and locate the fault point.

Key words: power system; multi-resolution analysis theory; signal noise reduction; fault diagnosis

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)03-0057-03

电力系统故障暂态信号中奇异点的出现往往代表着故障的产生, 奇异点检测的目的就是对故障进行定位, 抓住故障特征, 进而采取适当的故障保护或控制措施, 在供配电系统和用电设备运行失效之前, 及时捕获到早期的故障信息, 以避免毁灭性打击。因此, 准确提取故障暂态信号的时间特征成为提高电力系统暂态稳定预测实时性和准确性的首要问题, 包括暂态信号检测在内的电能质量检测已成为当今国际上的一个研究热点。

在实际的处理过程中, 由于采样误差、外界随机干扰、系统内部不稳定等因素, 使得采样的暂态信号中经常夹杂着噪声, 而随机噪声在信号中也体现为奇异点, 当噪声背景较强时, 将会给信号奇异点的检测带来误差。如何从随机噪声中提取暂态信息或者说如何区分信号奇异点和随机噪声奇异点成为电能质量暂态分析的一项重要任务。

传统处理电力系统故障暂态信号的方法是基于离散傅立叶变换的方法。这种方法的主要缺点是: 不能同时进行时间、频率分析和不能应用于非平稳信号的分析。为了克服以上缺陷, 人们从很多方面对傅里叶变换做了改进。其中最著名的就是窗口傅里叶变换。窗口傅里叶变换虽然在很多方面改变了傅里叶变换的缺陷, 但是它对于信号来说相当于一个带宽固定的带通滤波器, 不能根据不同的需要对信号做多尺度的分析, 因此这种固定的刚性窗会造成在分析频变信号时仍具有局限性。而小波变换正是克服了这种

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, 特别适用于分析奇异性强的故障信号。

1 小波变换的概念

定义 1 设 $f(t) \in L^2(R)$ (具有有限能量的函数)

$$W_{\Psi} f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$\text{记 } W_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

为 $f(t)$ 的小波变换, 而函数 $\Psi(t)$ 称为母小波。

它的基本特征为 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ 。另外, 还通常假设母小波满足如下标准化条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt = 1 \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} t |\Psi(t)|^2 dt = 0 \quad (4)$$

第一个条件说明 $\Psi(t)$ 是一个能量为 1 的函数, 这样可使 $f(t)$ 经小波变换后, 总体上保持能量不变; 第二个条件说明 $\Psi(t)$ 的能量集中在以原点为中心的一个区间内。从而 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的能量集中在以 b 为中心的一个区间内。当函数 $\Psi(t)$ 满足容许性条件 $C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty$ 时, 与小波变换式 (1) 相对应的还有如下逆小波变换公式

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a^{-2} W_f(a, b) \Psi_{a,b}(x) da db \quad (5)$$

当 a, b 在 R 上连续取值时, 式(1)称为连续小波变换。

窗口傅立叶变换(WFT)仅具有不变时频窗, 无论频率中心处于何处, 其时频窗形状不变, 其时频局部分析显得单一。与之相比, 小波变换的时频窗是灵活可调的, 是自适应的。多分辨率分析就是由不同的分辨率对信号进行逐级逼近, 用小波函数和尺度函数对信号进行不同尺度的分析, 可以了解不同尺度下的局部信号特征, 在信号分析中具有明显的优越性。Mallat 塔式算法在小波分析中的地位相当于快速傅立叶变换算法在经典傅立叶中的地位。它的分解目的是力求构造一个在频率上高度逼近 $L^2(R)$ 空间的正交小波基, 这些频率分辨率不同的正交小波基相当于带宽各异的带通滤波器。对于它的理解是以一个三层的分析进行说明, 其小波分析树如图1所示。

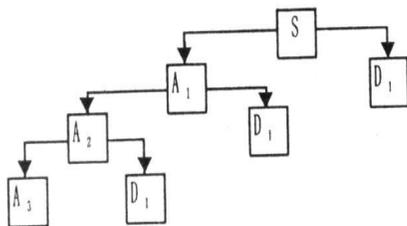


图1 三层多分辨率分析树型结构图

2 小波分析用于信号奇异点检测

称无限次可导的函数是光滑的或没有奇异性; 若函数在某处有间断或某阶导数不连续, 则称该函数在此处有奇异性。信号中的奇异点及不规则的突变部分经常带有比较重要的信息, 它是信号重要的特征之一。比如, 在电力系统故障中, 故障通常表现为电流电压信号发生突变, 因而对突变点的检测在电力系统故障分析中有重要意义。

长期以来, 傅立叶变换是研究函数奇异性的主要工具, 其方法是研究函数在傅立叶变换域的衰减以推断此函数是否具有奇异性及奇异性的大小。但傅立叶变换缺乏空间局部性, 它只能确定一个函数奇异性的整体性质, 而难以确定奇异点在空间的位置及分布情况。大家知道, 小波变换具有空间局部化性质, 因此, 利用小波变换来分析信号的奇异性及奇异性位置和奇异度的大小是比较有效的。

利用小波分析检测信号的突变点的一般方法是:

对信号进行多尺度分析, 在信号出现突变时, 其小波变换后的系数具有模极大值, 因而可以通过对模量极大值点的检测来确定故障发生的时间点。

下面用一个例子来说明小波在信号奇异点检测中的应用。这个例子中, 信号的不连续是由于低频特征的正弦信号($\sin t$)在后半部分突然有中高频特征的正弦信号($\sin 10t$)加入。用小波分析可以将中高频正弦信号加入的时间检测出来。

Matlab 仿真输出结果如图2所示。

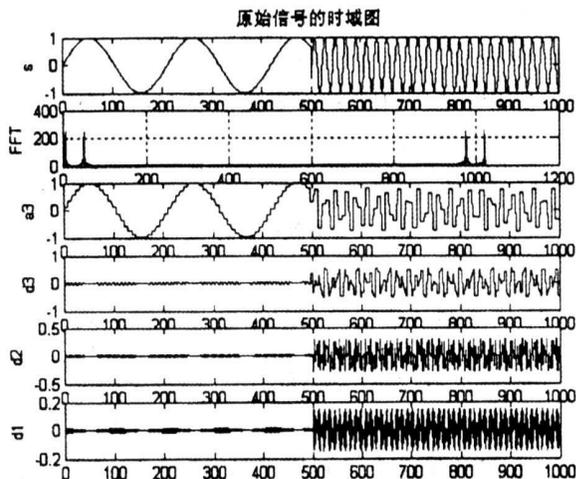


图2 小波与傅立叶变换对信号奇异点检测的
matlab 仿真结果

由图2中可以看出, 由于傅立叶变换将信号转换成频域中的信号, 使它不具有时间分辨率, 故信号的频率变换点根本无法检测出来。而经 db1 小波分解后的信号, 可以很明显地辨别出间断点($time \approx 500$)。

3 检测中的信号消噪

在实际的工程运用中, 所分析的信号可能包含许多尖峰或突变部分, 并且噪声也不是平稳的白噪声, 对这种信号进行分析, 首先需要作信号的预处理, 将信号的噪声部分去除, 提取有用信号。对这种信号的消噪, 传统的傅立叶变换分析显得无能为力, 因为傅立叶分析是将信号完全在频率域中进行分析的, 它不能给出信号在某个时间点上的信号变化情况, 使得信号在时间轴上的任何一个突变, 都会影响信号的整个谱图。而小波分析由于能同时在时、频域中对信号进行分析(并且在频域分辨率高时, 时间域内分辨率低; 在频率域内分辨率低时, 时间域内分辨率高, 有自动

变焦的功能),所以它能有效的区分信号中的突变部分和噪声,从而实现信号的消噪。

一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下形式:

$$s(i) = f(i) + \varphi_e(i), i=0, \dots, n-1 \quad (10)$$

其中, $f(i)$ 为真实信号, $e(i)$ 为噪声, $s(i)$ 为含噪声的信号。

在实际的工程中,有用信号通常表现为低频部分或是一些比较平稳的信号,而噪声信号通常表现为高频的信号,所以噪声可按如下方法处理:首先对信号进行小波分解(如进行图1的三层分解),则噪声部分通常包含在 D_1, D_2, D_3 中,因而,可以以门限阈值等形式对小波系数进行处理,然后对信号进行重构即可达到消噪的目的。

下面对上一个例子中的信号加入一个白噪声,含噪信号如图3所示,分别用小波分析和傅立叶变换进行信号噪声消除。

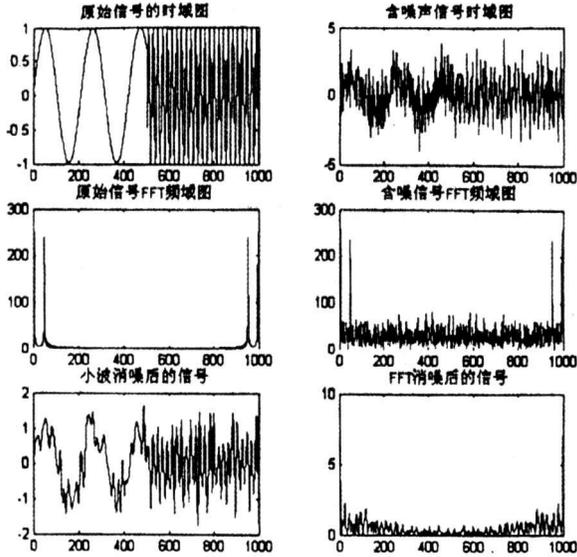


图3 小波变换和FFT变换对信号消噪的matlab仿真结果

从图3可以看出,用小波进行信号消噪可以很好地保存有用信号中的尖峰和突变部分。而用傅立叶分析进行滤波时,由于信号集中在低频部分,噪声分布在高频部分,所以可用低通滤波器进行滤波。但是,它不能将有用信号的高频部分和噪声引起的高频干扰加以区分。若低通滤波器太窄,则在滤波后,信号中仍存在大量的噪声;若低通滤波器太宽,则将一部分有用信号当作噪声而滤掉了。

4 电力系统故障信号的仿真检测

电力设备发生故障时,其电流、电压等电气量将发生剧烈的变化,其奇异性是很明显的。在信号突然变化的情况下,小波分析可以迅速有效地捕捉到瞬时、突变的故障信号;通过对电流、电压采样信号的小波变换进行多尺度分析,可以快速、准确地获取故障信息。因此,采用小波分析方法能有效地监视电力设备运行状态。在电力系统中影响的主要有以下4种情况。

(1) 电压突降:电压突降指的是系统电压下降了10%~90%,并且持续时间为0.15个周期到1min。这一现象有可能是由故障电流,重负载或是大电动机的接通所引起的,当电压下降了30%或更多时就认为情况很严重。

(2) 电压突升:电压突升指的是系统的电压短暂的上升,它有可能给连接其上的设备造成永久性的损伤。这一现象经常出现在三相电路中单相短路时的正常相上。

(3) 瞬间间断:瞬间间断是指供电系统上电压的瞬间丢失,当系统电压下降率为90%~100%,并且持续时间为0.15个周期到1min时,就认为系统处于瞬间间断状态。

(4) 瞬间振荡:这些现象都表现为电压信号的突变,所以可通过小波分析对信号的奇异性检测来找出故障或扰动信号发生的起始点和终止点。又由于实际检测到的电压信号是原始电压信号和噪声的线性组合,而小波变换是线性变换,因此信号的小波变换也是由原始信号的小波变换和噪声的小波变换叠加组成。当背景噪声较强时,利用连续小波变换检测到的奇异点有可能是噪声引起的。因此,奇异点的检测往往是和信号消噪联系在一起的,一般是先对电压信号进行消噪预处理,排除噪声干扰后,再进行奇异点检测,最终得到电力系统中的故障扰动信息。

5 仿真结果

下面将3和4的仿真结合起来模拟电力系统中的故障或扰动检测,即在信号 $f(t) = \sin(t) + \sin(10t)$ (可用来模拟电力系统中的瞬间振荡或电力系统故障后的暂态信号)的基础上加入一个 (下转第81页)

- 1)在 ASP.NET 应用程序中引用 AjaxPro.dll;
- 2)在 Web.config 文件的 <system.web>配置节中加入相关的设置语句;
- 3)进行使用 Ajax 模式的类的注册;
- 4)编写服务器端的代码;
- 5)客户端使用 javascript 进行与服务器之间的数据通信。

6 结论

通过使用 SVG 对单位 10 kV 配网线路开关模拟的设计以及实现,发现 SVG 的强大特性完全可以满足要求,解决现有配网开关模拟的已有问题。与此同时,这种基于 SVG 的方式对于电信、自来水等行业的连接状态图的设计都有极大的参考价值。SVG 作为

一种开放的国际化标准,正逐步的被使用到各个应用领域,发挥着越来越重要的作用。作为一种图形的使用工具,这个设计还不够完整,诸如图形放大,缩小,定位等功能还需要进一步去完善。

参考文献

- [1] Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification [R]. W3C Working Draft, 2003.
- [2] Christophe Jolif, Software Architect, Comparison between XML to SVG Transformation Mechanisms— The GraphML use case, SVG Open 2003 Conference, 2003—7.
- [3] 张瑞江,齐华,韩卫杰,王行祥.基于 J2ME/Mobile SVG 移动 GIS 设计与实现[J].微计算机信息,2006,3:164—166.
- [4] 吴斌.SVG:未来的 Web 图形标准[S]. PC World China, 2000 No. 49.

(收稿日期:2008—03—10)

(上接第 59 页) 噪声信号,如图 3 所示。用小波变换对故障信号的分析方法是:先对它进行 4 中的消噪处理,再用 3 中方法检测奇异点。对消噪后的信号奇异点检测结果如图 4。

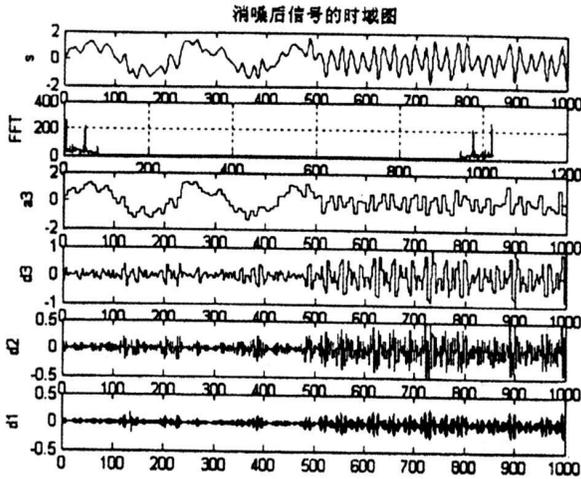


图 4 对消噪后信号的奇异点检测仿真结果

从图 4 中可以看出,信号的奇异点在 500 点附近处,所以通过仿真,可以看到信号扰动发生的时刻。前面做的仅是一个仿真说明小波变换在电力系统故障信号的检测中有着非常重要的应用,实际检测中,信号的消噪预处理非常重要,所以对消噪小波基和阈值的量化处理都要有非常慎重的选择。

6 结论

结合小波变换的一些基础知识,对小波变换在电

力系统扰动检测中的应用进行了一个初步的仿真试验和分析。得出了如下的结论:

通过应用小波变换和多分辨分析的 Mallat 塔式算法进行的仿真试验的结果可以看到在利用小波变换时高频部分能够清晰地反映信号的故障点。并且小波变换能够很好地克服采用传统的傅立叶分析不能进行局部化分析和快速傅立叶分析方法只能进行单一分辨分析的缺点,小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,能对不同的频率成分采用逐步精细的采样步长,聚焦到信号的任意细节。这对于检测高频和低频信号以及信号的任意细节均有效,特别适应于分析奇异信号,并能分辨出信号奇异性的 大小,因此,作为一种信号分析的新型工具,小波分析在电力设备状态检测、故障诊断、谐波分析等诸多方面均有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 胡晓光,戴景明.基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J].中国机电工程学报,2001.5.
- [2] 林京,屈梁生.基于连续小波变换的奇异性检测与故障诊断[J].振动工程学报,2000.4.
- [3] 王楠,律方面.基于小波奇异性检测的在线监测数据处理[J].电工技术学报,2003.14.
- [4] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].科学出版社,2000.
- [5] 任伟建,康朝海,于镛,张正辉.小波变换在信号奇异性检测中的应用[J].自动化技术与应用,2005.1.

(收稿日期:2008—02—27)