

# 小波变换在暂态电能质量检测 and 识别中的应用

潘从茂 李凤婷

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 间歇性能源的接入电网,使电力系统的运行特性和电能质量受到影响,特别是暂态电能质量。重点研究了暂态电能质量扰动的小波检测方法,详细介绍了暂态电能扰动小波检测的基本原理和实现方法,并进行了仿真研究,理论分析和仿真结果表明该方法能够实现对电压暂态电能质量扰动快速、准确的检测,并能够根据能量函数识别出扰动类型。研究思路可为检测识别含间歇性能源接入系统的电能质量提供一种有效、可行的方法。

**关键词:** 暂态电能质量; 小波变换; 多分辨分析; 能量函数

**Abstract:** With the intermittent energy connected to the grid, the operating characteristics of power system and the power quality are affected, especially the transient power quality. The focuses of the research are on the wavelet detection method of transient power quality disturbances, its basic principle and realization method are also introduced in detail, and the simulation is carried out. The theoretical analysis and the simulation results show that the proposed method can achieve a fast and accurate detection for transient power quality disturbances of voltage, and be able to identify the disturbance type according to the energy function. The research ideas can provide an effective and feasible method to detect and identify the power quality with the integration of intermittent energy.

**Key words:** transient power quality; wavelet transform; multiresolution analysis; energy function

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0040-03

究领域中成为了一种有力的工具<sup>[5-6]</sup>。

## 0 引言

由于常规能源蕴藏量的日益减少和生产过程中产生的污染,使多种间歇性能源(风能、太阳能、潮汐能等)的发展得到了各国政府的大力支持。然而由于这些能源存在很大的波动性、间歇性和随机性以及变流装置的广泛使用,大规模的并网,会对电力系统带来很多电能质量的问题,尤其是暂态电能质量问题<sup>[1-3]</sup>。

目前在电能质量分析领域中,傅里叶变换适用于分析平稳信号,而对多是非平稳的暂态电能质量扰动检测则无能为力。由于小波变换具有多分辨率分析的能力,可以对信号在不同尺度上进行分解,利用这一特性,小波变换能将采集到的含扰动的信号变换投影到不同的尺度上,提取出电力信号的各次谐波,根据各尺度上的小波系数,可以辨识出扰动发生时刻和扰动的类型,具有 Fourier 变换、STFT 所无法比拟的优点<sup>[4]</sup>,使小波变换在暂态电能质量的研

## 1 暂态电能质量小波检测的原理

### 1.1 小波变换

小波变换是一种分析信号时频特性的强有力的工具,其窗口大小可以根据信号的频率进行调整。小波变换的实质就是利用小波函数和小波变换系数来表达一个信号函数。设时域信号为  $f(t)$ ,  $f(t) \in L^2(R)$  的小波变换 WT(wavelet transformation) 定义为

$$f(x) = \sum a_{i,j} \psi_{i,j}(x) \quad (1)$$

其中  $i, j$  为整数,分别为伸缩因子、平移因子;  $a_{i,j}$  为离散小波变换系数;  $\psi_{i,j}(x)$  为小波函数。

离散小波变换系数可以通过式(2)得到

$$a_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{i,j}(x) dx \quad (2)$$

小波函数的  $\psi_{i,j}(x)$  可以通过小波母函数  $\psi(x)$  经过平移和伸缩变换得到

$$\psi_{i,j}(x) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}x - j) \quad (3)$$

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2012211A002)

### 1.2 小波变换的 Mallat 算法

小波变换能够在工程上得到很大的应用,应该要归功于小波变换多分辨分析的诞生。Mallat 算法的基本思想可以归纳如下:假设已经算出函数或是信号  $f(t) \in L^2(R)$  在分辨率  $2^{-j} (j \in Z)$  下的离散逼近  $A_j f(t)$ , 则  $f(t)$  在分辨率  $2^{-(j+1)}$  的离散逼近  $A_{j+1} f(t)$  可以通过离散低通滤波器对  $A_j f(t)$  得到<sup>[7]</sup>。

设尺度函数为  $\varphi(t)$ , 对应的小波函数为  $\psi(t)$ , 由多分辨分析, 则有

$$f(t) = \sum_k c_k^j \varphi_{j,k}(t) = \sum_k c_k^{j-1} \varphi_{j-1,k}(t) + \sum_k d_k^{j-1} \psi_{j-1,k}(t) \quad (4)$$

两边同时对  $\varphi_{j,k}(t)$  做内积, 并利用  $\varphi, \psi$  及其二进伸缩和平移的正交特性, 可得到

$$c_k^j = \sum_n c_n^{j-1} \langle \varphi_{j,k}(t), \varphi_{j-1,n}(t) \rangle + \sum_n d_n^{j-1} \langle \psi_{j-1,n}(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \sum_n c_n^{j-1} h_{k-2n} + \sum_n d_n^{j-1} g_{k-2n} \quad (5)$$

式中  $\{h_k\}_{k \in Z}$  是正交尺度函数的两尺度方程所对应的滤波器系数序列, 可被看做是低通滤波器;  $\{g_k\}_{k \in Z}$  可看做是高通滤波器。由此可以得到, 一维情况下离散小波变换的 Mallat 算法。其卷积表达式形式为

$$\begin{cases} c^{j-1} = D(c^j * \overline{h^*}) \\ d^{j-1} = D(c^j * \overline{g^*}) \\ c^j = (Uc^{j-1}) * h + (Ud^{j-1}) * g \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\overline{h^*}$  为滤波器  $h$  的共轭反转;  $c^j * \overline{h^*}$  表示  $c^j$  与  $\overline{h^*}$  的卷积;  $D(c^j * \overline{h^*})$  表示对卷积  $c^j * \overline{h^*}$  的二元下取样;  $Uc^{j-1}$  表示对序列  $c^{j-1}$  的二元上取样;  $U, D$  为二元上、下取样算子。小波分解与重构的迭代过程如图 1 所示, 相应的二通道滤波组表示如图 2 所示。

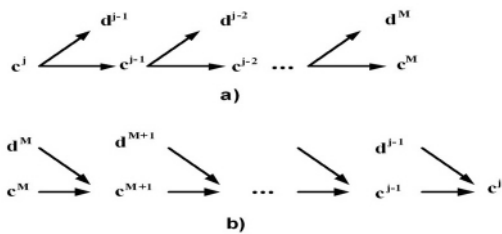


图 1 一维信号小波分解与重构的迭代过程示意图

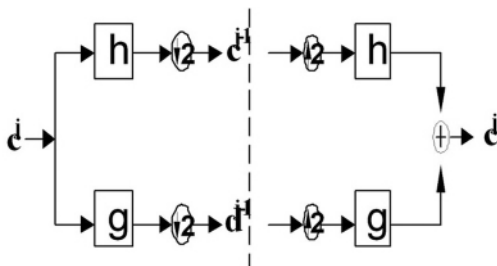


图 2 一维信号小波分解与重构的二通道滤波器组表示

## 2 基于小波变换暂态电能质量的检测和识别过程

暂态电能质量小波分析检测方法, 具体的步骤如图 3 所示。

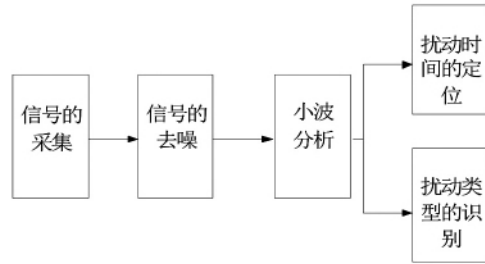


图 3 暂态电能质量小波分析过程

### 1) 信号的消噪

对信号去噪实质上就是抑制信号中无用的部分, 增强信号有用部分的过程。一维信号去噪过程可分为以下的 3 个过程。

步骤 1: 一维信号的小波分解。选择一个小波并确定分解的层次, 然后进行分解计算。

步骤 2: 小波分解高频系数的阈值量化。对各个分解尺度下的高频系数选择一个合适的阈值进行软阈值量化处理。

步骤 3: 一维小波重构。根据小波分解的最低层低频系数和各层高频系数进行一维重构。

这 3 个步骤中, 最关键的是如何选一个合适的阈值以及进行阈值量化。在某种程度上, 它影响到信号去噪的质量。

### 2) 扰动的时间定位

小波变换具有良好的局部化特征, 这使得小波变换在暂态电能质量的检测中有良好的理论基础。电压暂态变化的信号处除了扰动发生点和终止点各段时间信号都是连续的。因此, 在小波的高频尺度上, 只有在突变点才有信息。利用这一特性可以容易地识别出扰动的发生时间和终止时间。

### 3) 扰动类型的判断

通过对获得的暂态电能质量扰动信号进行小波变换多分辨分析, 得到的各个尺度的小波系数具有该扰动信号的有效特征, 因此对这些系数进行某种操作, 可以识别出该扰动。可以通过能量函数来表达扰动信号的每一种特征量<sup>[8-10]</sup>。

假设对获得电能质量扰动信号进行  $J$  层分解, 得到的小波变换的细节系数和逼近系数分别为  $d_j$

(n) 和  $a_j$  其中  $j=1, 2, \dots, J, n$  为采样点数。小波变换的能量分布如下。

$$Ed_j = \sum_n (d_j(n))^2$$

$$Da_j = \sum_n (a_j(n))^2 \quad (7)$$

其中  $j=1, 2, \dots, J$ 。这样经过  $J$  层小波分解,可以得到  $J+1$  个特征量,将各特征量构成一个向量,有

$$E_{sig} = [E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dJ}, E_{aJ}] \quad (8)$$

由于在计算的时候都取的是正值,所以,各种扰动的能量函数差距不是很大。取一个参考信号,该参考信号就是与获取的电能质量扰动信号同步且长度一致的理想信号,对该参考信号进行上述能量函数的计算。

$$E_{ref} = [E_{nd1}, E_{nd2}, \dots, E_{ndJ}, E_{naJ}] \quad (9)$$

然后将采集信号的能量的函数做差

$$\Delta E = E_{sig} - E_{ref} = [\Delta E_{d1}, \dots, \Delta E_{dJ}, \Delta E_{aJ}] \quad (10)$$

$\Delta E$  可以反映出各种暂态扰动的特性,可以识别出各种扰动。

### 3 算例仿真及其结果分析

为了验证:小波变换在暂态电能质量检测 and 识别中的应用,所采用的仿真软件为 Matlab,信号源采用文献[4]中所提供的几种信号,获得能量函数时采用 db4 小波对信号进行 12 层分解和重构,采用基波频率为 50 Hz,每一个周期采样 128 个点,一共取 1 200 个采样点。

#### 3.1 扰动时刻定位的仿真

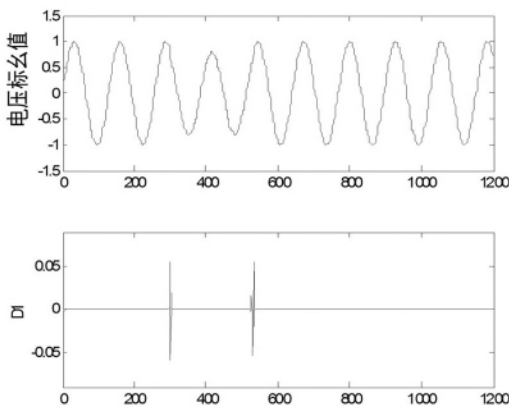


图4 电压暂降情况下扰动时刻定位

其中 D1 是小波重构后最高频率小波的系数,数值大小反映了在该时刻高频含量的大小。从图 4~7 中 D1 的仿真图形可以看出,小波检测方法可以

准确检测出各种暂态信号扰动的发生时刻。

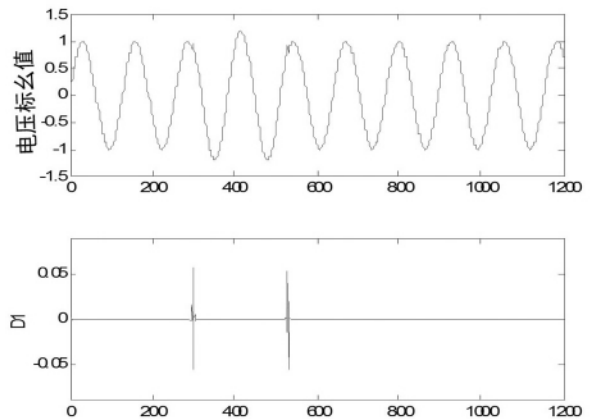


图5 电压暂升情况下扰动时刻定位

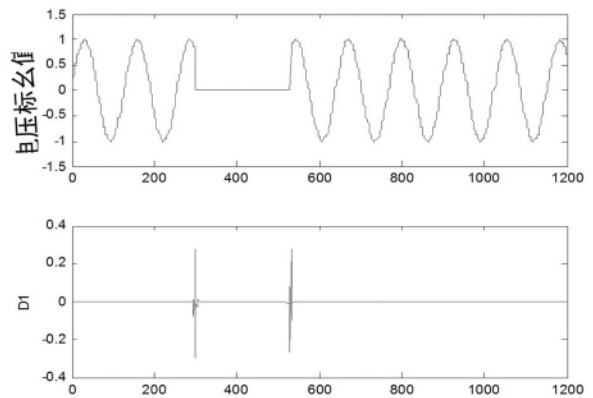


图6 电压中断情况下扰动时刻定位

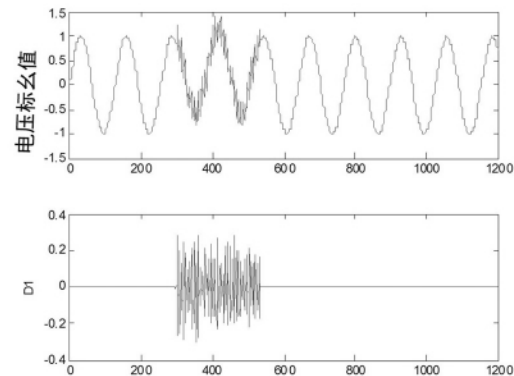


图7 电压畸变情况下扰动时刻定位

#### 3.2 扰动类型识别的仿真

在信号扰动的辨识领域中,很多文献采用式(8)中的能量函数  $E$  来分辨扰动的类型,能量函数  $E$  仿真结果见图 8。

从图 8 的仿真结果可以看出,各种扰动信号能量函数  $E$  的形状是相似的,区别只是数值大小不一样。由于在计算的时候取的都是正值,所以导致它们的特征差异很小,造成扰动分类困难。

在信号扰动分类上,采用能量差函数式(10)。仿真结果见图 9。

(下转第 83 页)

收塔密度高造成脱硫超标排放6次,脱硫被迫停运5次,吸收塔密度最高达到 $1\ 350\text{ kg/m}^3$ 。通过一系列的改进、控制措施后,未发生因吸收塔密度高原因停运脱硫系统的情况,吸收塔浆液密度控制在 $1\ 200\text{ kg/m}^3$ 以下,脱硫系统投运率由之前的82.5%提高至98.48%,取得良好的效果。虽然通过改进控制

措施达到了预期的效果,但目前仍存在废水系统旋流子堵塞频繁、脱水机滤布冲洗水质差、双机运行脱水机无备用等影响脱硫系统正常运行的因素,有待今后做进一步改进,以确保脱硫系统安全稳定运行和达标排放。

(收稿日期:2012-12-22)

(上接第42页)

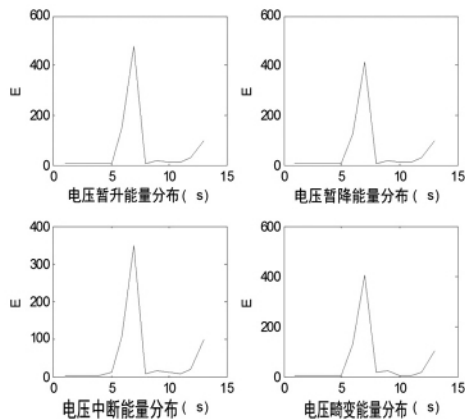


图8 暂态电能扰动信号能量E分布

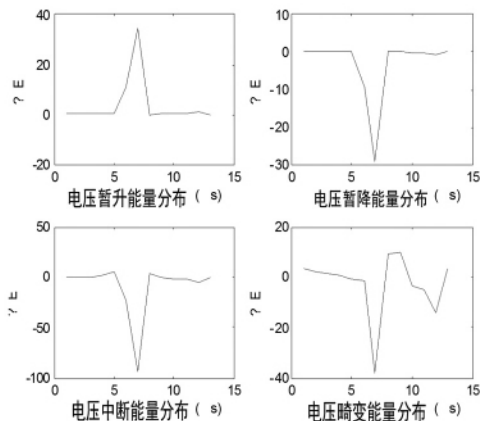


图9 暂态扰动信号能量差分布

从图中可以明显看出,在暂态电能质量扰动辨识中采用能量差 $\Delta E$ 函数,可以明显地识别出各种暂态扰动。通过图8和图9的仿真结果对比,可以看出,在扰动识别分类中,采用能量差函数 $\Delta E$ 可以快速有效地分辨出暂态扰动的类型。

## 4 结 语

分析了间歇性能源接入系统后,容易引起的几种暂态电能质量问题,重点研究了基于小波变换的暂态电能质量分析。首先详细介绍了暂态电能质量扰动小波检测的基本原理,然后给出能够识别暂态扰动的能量函数,并给出仿真算例验证理论的正确

性。理论分析和仿真结果表明,该方法在暂态电能质量扰动的分析上具有很好效果,能够实现对暂态电能质量扰动快速、准确的检测,为研究间歇性能源接入系统暂态电能质量扰动问题提供了有效、可行的检测方法。

## 参考文献

- [1] 李渝,范高锋,李庆,等.达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J].电网技术,2007,31(6):88-92.
- [2] 迟永宁,刘燕华,工伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007(3):77-81.
- [3] 席晶,李海燕,孔庆东.风电场投切对地区电网电压的影响[J].电网技术,2008(10):58-62.
- [4] HE Haibo, STARZYK J A. A Self-organizing Learning Array System for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1):286-295.
- [5] 赵凤展,杨仁刚.基于时域、小波变换和FFT的电能质量扰动识别[J].继电器,2006,34(8):50-55.
- [6] 储珺,马建伟.基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J].电力系统保护与控制,2009,37(5):34-37.
- [7] 刘桂英,粟时平.风电接入系统暂态电能质量扰动小波检测方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(1):22-27.
- [8] 秦英林,田立军,常学飞.基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J].电力自动化设备,2009,29(7):64-66.
- [9] 周龙华,付青,余世杰,等.基于小波变换的谐波检测技术[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(1):80-85.
- [10] 林涛,樊正伟.利用小波变换及神经网络识别电能扰动[J].高电压技术,2007,33(7):151-153.

作者简介:

潘从茂(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源发电及其并网技术;

李凤婷(1965),女,教授,工学博士,硕士生导师,研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012-12-15)