

多 N 值 db 小波多分辨分解的电压闪变检测

胡南

河海大学 电气工程学院, 南京 (210098)

Email: hu_nan123@sina.com

摘要: 与传统的傅里叶变换相比, 小波变换具有时频局域化特性, 时频窗口的宽度均可随信号的变化自动调节, 在检测突变信号和不平稳信号方面有非常明显的优势。本文提出一种小波多分辨分析提取电压闪变信号的方法, 并根据小波函数的特点和分析的要求, 比较选用多 N 值(消失矩阶数)的 Daubechies 小波对典型闪变信号进行特征提取和定位。根据调幅波的时频信息获得闪变信号的频率和幅值, 实现了对电压闪变发生、恢复时间的精确定位。仿真结果表明, 多种 N 值的 Daubechies 小波结合使用在电压闪变检测和分析中具有更好的效果。

关键词: 电压闪变; 同步; db 小波; 多分辨分析

0 引言

电压闪变是指频率在 0.5~30 Hz 时包络线内电压的有规则变动或者幅值通常不超出 0.9 p.u.至 1.1 p.u.的一系列电压随机变化。电压闪变为调幅波, 是一种低频时变的非平稳扰动信号, 其特征量主要通过闪变波动的幅值、频率以及闪变发生和结束的时间来表现。随着高新技术尤其是信息技术飞速发展, 基于计算机、微处理器控制的用电设备和电子设备在系统中大量投入使用, 它们对电压波动与闪变引起的系统干扰比机电设备更加敏感。另一方面, 电力系统负荷快速增长, 其中冲击性负荷(诸如电弧炉轧钢机、电焊机以及电力机车等)的广泛存在, 使得某些供电系统的电压波动达到了危险的程度。电压波动与闪变已成为电力工程师们关注的课题之一。

由于传统的傅里叶变换只揭示了时间函数与频谱函数之间的内在联系, 所提取的信号频谱反映的是信号在整个时间范围内的全部频谱成分, 而不能体现信号的突发性的局部化特征。因此, 傅里叶变换难以实现电压闪变信号的分析。^[1]本文采用小波多分辨分析提取电压闪变的特征量, 即闪变的频率、幅值以及闪变发生和结束的时间。根据解调信号的时频特性以及小波函数本身的特点, 选用不同 N 值的 Daubechies 小波对闪变信号进行多分辨分解, 以得到相关频带上的小波系数。为能更好地获取电压闪变的高频细节, 从而检测出电压闪变信号的突变时间, 采用了同步电压和小波分解法对电压波动与闪变信号进行检测。^[2]该方法还将小波多分辨率信号分解和子带滤波方法对检波得到的包络信号进一步分解, 检测出包络信号中的各个频率分量及其幅度。

1 小波分析

1.1 小波多分辨率信号分解理论与实现方法

与如果平方可积函数空间 $f(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间) 的一系列闭子空间 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 是它的一个多分辨率分析(或逼近), 若 $\phi(t) \in L^2(R)$ 为基本小波的函数, $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$ 为 j 尺度空间 V_j 的规范正交基, W_j 空间为 V_j 在 V_{j-1} 的正交补空间, 即 $V_{j-1} = V_j \oplus W_j$, 小波函数 $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)$ 为 j 尺度空间的规范正交基, 则这种子空间部分过程表示为:

$$V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 \dots \quad (1)$$

对任意信号 $x(t)$ ，都可采用多分辨率分解为

$$x(t) = \sum_k c_j(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

$$c_j(k) = \langle x(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \quad (3)$$

$$d_j(k) = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (4)$$

式(1-2)右边第一部分是 $x(t)$ 在尺度空间 $V_j (j=J)$ 的投影，它是 $x(t)$ 的平滑逼近，分解系数 $c_j(k)$ 称为离散平滑逼近；第二部分是 $x(t)$ 在小波空间 W_j 的投影，它反映了邻近尺度两个平滑逼近的细节差异，也就是对 $x(t)$ 所做的细节补充，分解系数 $d_j(k)$ 称为离散细节信号，也就是小波变换系数。^[3] 在实际信号分析中， J 以下各尺度为高频细节的提取， J 或 J 以上各尺度用于低频信号的近似。^[4]

多分辨率信号分解公式中尺度函数和小波函数都具有正交性。利用这些性质可得到：

$$c_{j+1}(k) = \sum h_0(m-2k) \cdot c_j(m) \quad (5)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum h_1^m(m-2k) \cdot c_j(m) \quad (6)$$

式中， $h_0(k)$ 和 $h_1(k)$ 分别为低通数字滤波器的单位取样响应和高通数字滤波器的单位取样响应。

若取 $h_1(k) = (-1)^k h_0(k)$ ，则高通滤波器频率响应 $H_1(e^{j\omega}) = H_0(e^{j(\omega-\pi)})$ ，它与低通滤波器幅频特性曲线 $|H_1(e^{j\omega})|$ 以 $\pi/2$ 为轴线左右对称，构成正交镜像对称滤波器组。小波分解系数 $c_{j+1}(k)$ 和 $d_{j+1}(k)$ 分别是信号序列 $c_j(k)$ 与滤波器单位取样响应 $h_0(-k)$ 和 $h_1(-k)$ 卷积后二抽取得到的信号序列，所以小波多分辨率信号分解可以用子带滤波器组来实现。^[5]

子带滤波器的最初输入 $c_0(k) (j=0)$ 直接采用 $x(t)$ 的抽样信号序列 $x(n)$ 。采样频率 $f=2.24\text{kHz}$ 时，从 1 到 5，低频段逐级细分。可将整个频带分成 $1.12\text{kHz} \sim 560\text{Hz}$ 、 $(560 \sim 280)\text{Hz}$ 、 $(280 \sim 140)\text{Hz}$ 、 $(140 \sim 70)\text{Hz}$ 、 $(70 \sim 35)\text{Hz}$ 、 $(35 \sim 0)\text{Hz}$ 等 6 个子频带。即用 6 个子带滤波器对输入信号序列 $x(n)$ 进行分解与滤波。得到 6 个子带滤波通道输出的信号序列(即小波分解系数) $d_1(k)$ 、 $d_2(k)$ 、 $d_3(k)$ 、 $d_4(k)$ 、 $d_5(k)$ 、 $a_5(k)$ 。这就是小波多分辨率信号分解与子带滤波的实现方法。^[6] 这里以三层多分辨率分解为例，小波分解树如图 1 所示。其中 S 表示信号，A 表示低频，D 表示高频。

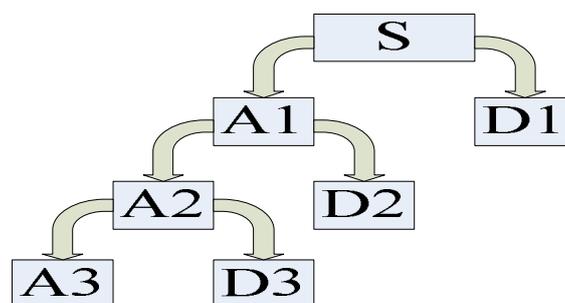


图 1 三层小波多分辨率分解树

多分辨分解具有如下关系： $S=A_3+D_3+D_2+D_1$ 。如果要进行下一步分解，则可以把低频部分 A_3 再分解成低频部分 A_4 和高频部分 D_4 ，以此类推，可以继续进行下一步的低频分解，以获得所需的低频分解信号。多分辨分析只对低频空间进行进一步的分解，使频率的分辨率变得越来越高。^[7]

1.2 小波基的选择

小波的选择标准主要有：紧支撑性，对称性，正交性，正则性，是否存在快速变换等。根据一般电压闪变波形的特点，需要采用时域和频域同时具有良好的局部性，且对不规则性较为敏感的小波。^[8]就电压闪变信号而言，运用小波或小波包变换进行时域分析时，要求能提取非平稳信号的瞬时、奇异与突变成分，即提取有限频带上的信息，也就是在特定尺度上进行小波变换。因此选择小波基时，考虑时频两域的紧支撑性尤为重要。^[9]

众多小波中 Haar 小波是紧支撑但不连续，shannon 小波很光滑但分布于整个实轴，且趋于无穷时衰减很慢，线性样条小波是连续的，但其正交尺度函数和相应的小波函数同 shannon 小波一样，具有无限支撑，但是它在趋近于无穷时衰减很快。Daubechies 小波具有正交，时域紧支撑，高正则性和具有 Mallat 快速算法的特点，对于检测信号的奇异性具有很好的特点。^[10]DbN 小波系是工程上应用较多的小波函数，这一小波的特点是随着序号 N 的增大，时域支集变长，时间局部性变差，同时正则性增加，频域局部性变好。由于闪变信号的调幅波的变化，采用不同 N 值的 Daubechies 小波，可以得到不同的处理效果。 N 越大，其滤波器的长度越长，滤波性能越好，但信号处理的时延也越长，即时域定位性变差。基于此特性，在对闪变信号进行特征提取时，所要分析的调幅波的频率和幅值，应选择幅频特性较好的小波，以消除频谱泄漏误差。^[2]而对于单一频率的调幅波，其时频特性没有多频率信号的闪变信号对频域局部性的要求高。电压波动和闪变信号的定位则要求能准确提取非平稳信号的瞬时突变成分，准确检测出信号的奇异位置。Daubechies - 4 小波相对于其他 Daubechies 小波，具有最短的时窗，因而具有比其他小波更好的时间分辨率，应用在信号的时间定位分析中可得到良好的效果。^[10]故在本文中，对单一频率的闪变信号采用 Daubechies- 4 小波进行分析，对于多频率的闪变信号则采用 Daubechies - 24 小波，均可以良好地提取其频带信号，检测出闪变的频率和幅值。^[11]

2 电压闪变的检测

2.1 电压闪变检测方法

目前国内外采用的电压闪变测试方法有三种,即半波有效值法、平方解调法和全波整流法。这三种测试方法都只适合检测平稳的时频闪变信号,不能有效的对突变的、非平稳的电压闪变包络信号进行检测与时频分析,会导致闪变评估的误差增大。^[6]

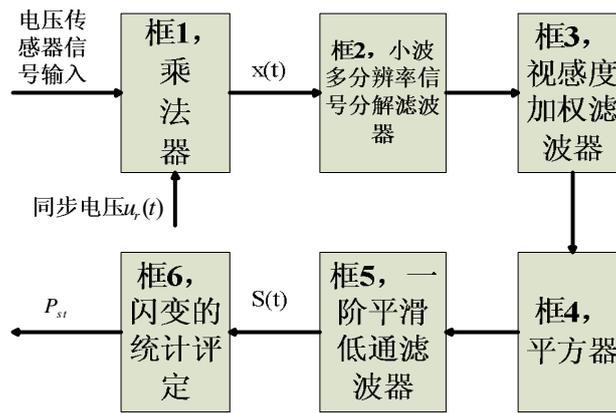


图2 闪变检测改进的方法原理框图

本文提出了一种采用小波多分辨率信号分解和同步检波的电压闪变信号检测的改进新方法。该方法用小波多分辨率信号分解滤波器取代传统同步检波器中的带通滤波器，如图2所示。并且针对不同频率闪变信号采用不同的 db 小波进行处理，这种新型同步检波器既可以精确地检出电压闪变的包络信号，又可以检测出电压闪变的高频细节，从而检测出电压闪变信号的突变时间。该方法还采用小波多分辨率信号分解和子带滤波方法对检波得到的包络信号进一步分解，能够精确的检测出包络信号中的各频率分量及其幅度。

2.2 电压闪变的数学模型

波动的供电电压可由一个稳定的工频电压作载波，其电压的均方根值或峰值受到以电压波动分量作为调幅波的调制。对于任何波形的调幅波均可看作是由包含单个或多个频率分量合成。电压的瞬时值为：

$$u(t) = \sqrt{2}U \left[1 + \sum_f m_f \cos(\Omega_f t) \right] \cos \omega t \quad (7)$$

式中：U 为电网电压额定值； ω —电网工频电压角频率； m_f —调幅波电压中频率为 f 分量的幅值调制系数； Ω_f —调幅波电压中频率为 f 分量的角频率。

2.3 电压闪变信号的检波原理

传统的同步检波器由电压跟踪装置、相乘器、采样器和滤波器组成。它的检波流程是：通过电压跟踪装置对待检信号进行跟踪，然后发出同相位波形，与待检信号一同送入相乘器相乘，再对其采样，用低通滤波器滤波分析。本文利用小波多分辨率信号分解滤波器取代传统同步检波器中的带通滤波器。来实现检波功能。检波流程如下：

- (1) 对待检信号 $u(t)$ 进行采样；
- (2) 利用两点法鉴别采样信号的初相角 θ ，获取同步电压 $u_r(t) = 2 \cos(\omega t + \theta)$ ；
- (3) 计算 $x(t) = u(t) \cdot u_r(t)$ ；
- (4) 经过小波多分辨分析解调出信号中的调幅波。

确定了待检信号 $u(t)$ 初相角，同步电压 $u_r(t)$ 就可以确定下来了。由于 $u(t)$ 含有闪变信号，所以用两点法测量的同步电压的初相位与 $u(t)$ 的工频初相位有一定的相角差 φ ， $u(t)$ 由式 (7) 定义，则同步电压为 $u_r(t) = 2 \cos(\omega t + \varphi)$ ，所以

$$\begin{aligned}
 x(t) &= u(t) \cdot u_r(t) \\
 &= \sqrt{2}U \left[1 + \sum_f m_f \cos(\Omega_f t) \right] \cos \omega t \cdot 2 \cos(\omega t + \varphi) \\
 &= \sqrt{2}U \left[1 + \sum_f m_f \cos(\Omega_f t) \right] \cdot [\cos \varphi \cdot \cos(2\omega t + \varphi)] \\
 &= \sqrt{2}U \cos \varphi + \sum_f \sqrt{2}U m_f \cos \varphi \cos(\Omega_f t) + \sqrt{2}U \cos(2\omega t + \varphi) + \\
 &\quad \sum_f \sqrt{2}U m_f \cos(2\omega t + \varphi) \cos(\Omega_f t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

由上式可知，x(t)经变换后变为四项。第一项为直流分量；第二项为闪变信号（幅值有变化）；后两项在100Hz频率附近。由于φ值很小，所以cos(φ)值非常近似等于1。

经过0.05Hz~35Hz的带通滤波器滤去直流分量和工频及以上的频率分量，便可以检测出调幅波，为了提高一阶高通滤波环节的收敛速度，信号在进入一阶高通滤波器之前应先滤去其中的直流分量，即将信号减去√2U其输出为：

$$\sqrt{2}U v(t) \approx \sqrt{2}U \sum_f m_f \cos(\Omega_f t) \tag{9}$$

3 仿真分析

3.1 单一频率调幅波检测

设电网电压信号为 $u(t) = A(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t$ ，在式中，载波电压幅值A=220V, $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s}$ ，调幅波调制系数m=0.1, $\Omega = 2\pi \cdot 6 \text{ rad/s}$ 。分别用Daubechies-4小波进行多分辨分解和原始的带通滤波方法仿真。载波电压，原始调幅波和两种方法分别解调出的调幅波信号如图3和图5所示。各图中a5表示低频层，d1-5表示所对应的高频层，图中T=1/2240s, V、u单位为伏特，t单位为秒。

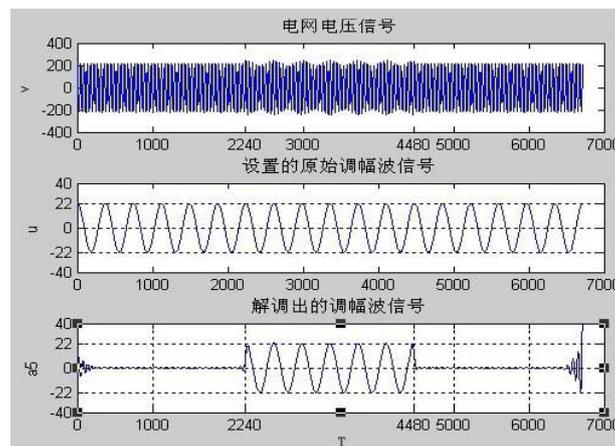


图3 电压信号，调幅波信号以及低频系数重构

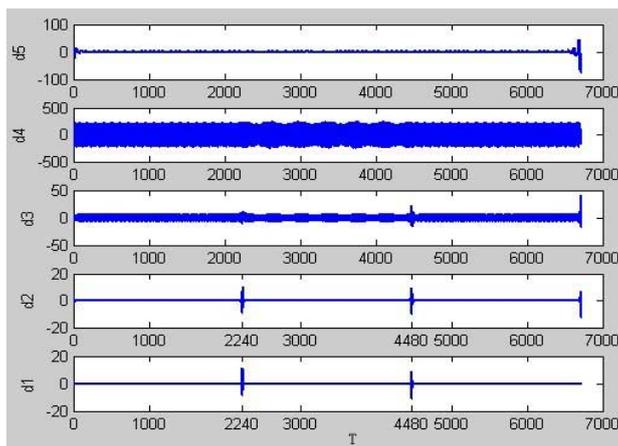


图 4 各层高频系数重构

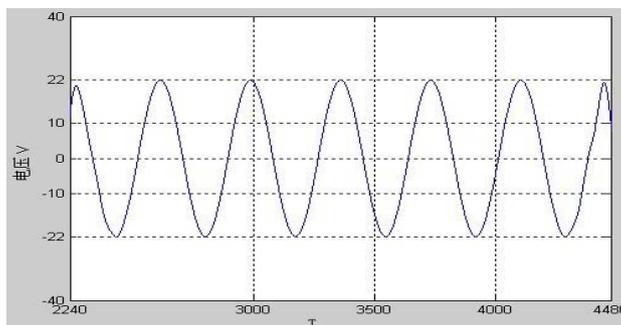


图 5 低频系数重构信号的放大

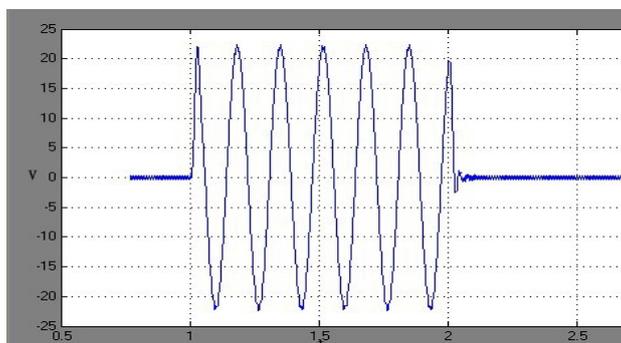


图 6 带通滤波后的调幅波信号

在图 4 中，由 d1 和 d2 两层高频系数重构的信号可以清楚看出，在 1 秒（采样点数 2240 处）发生电压闪变，在 2 秒（采样点数 4480 处）时闪变结束。图 5 是图 3 中通过小波多分辨率分解解调出的调幅波信号的放大，可以看出电压闪变的波动频率为 6Hz，幅值为 22V。图 6 是由原始的带通滤波器解调出的调幅波信号，也可以看出闪变的波动频率和幅值，但是不能清晰观察到闪变信号发生及结束的时间。从本例可以看出，利用小波多分辨率分析可以精确的无失真的地检测出电压闪变信号发生及结束的时间点，具有很明显的优越性。

3.2 多频时变非平稳调幅波检测

设电网电压信号 $u(t) = A(1 + \sum m_f \cos \Omega_f t) \cos \omega t$ ，设定整个信号时间长度为 4 秒，设定信号只在 1 秒到 3 秒之间发生闪变（其中 1~2 秒发生闪变的调幅波频率 $f_1 = 5\text{Hz}$ ，调制系数 $m_1 = 0.1$ ；2~3 秒时在原先发生闪变的成分上又叠加一闪变调幅波，其频率 $f_2 = 10\text{Hz}$ ，调制系数 $m_2 = 0.05$ ）。采用 Daubechies - 24 小波进行多分辨率分析的仿真结果如图 7 和图 8 所示。

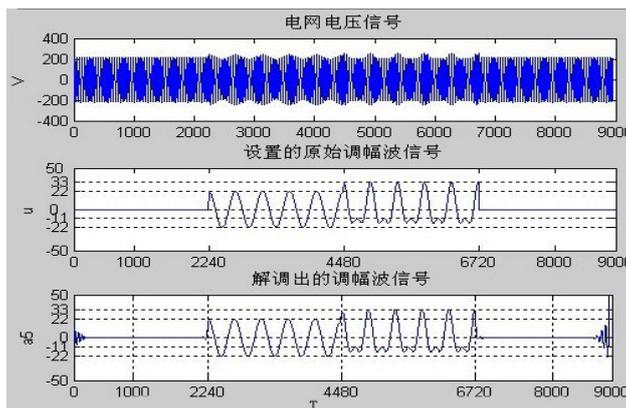


图 7 电压信号，调幅波信号和低频系数重构

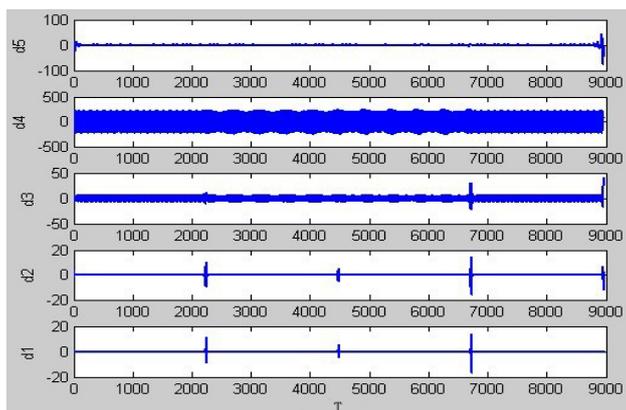


图 8 各层高频细节系数重构示意图

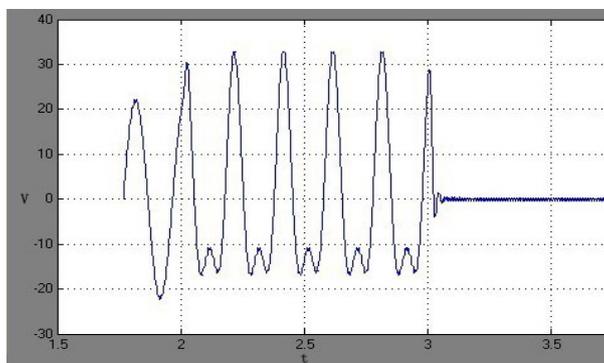


图 9 带通滤波后的调幅波信号

图 8 中 d1~d5、图 7 中 a5 表示由小波系数重构的相应频带的信号。由图 7 重构的信号可以准确地检测出时变不平稳调幅波的包络信号。图 9 则不能清晰看到闪变发生和结束的时间，而由 d1 和 d2 高频系数重构的信号可以清楚的判断电压闪变信号发生，突变及结束时刻。可以明显看出小波多分辨率带通滤波的优越的闪变时间定位性。

4 结论

本文提出了小波多分辨率分析电压闪变检测方法，以 Daubechies 小波函数作为函数展开的基底，在时域和频域同时具有良好的局部化特性，适用于时变的非平稳的电压闪变信号的检测和时频分析，并根据分析针对不同类型的闪变采用 Daubechies 函数对信号进行处理。在实际工程中，输入信号中可能会含有丰富的频率成分。由于无法确定闪变信号的频率，因

此需要选用不同的 N 值进行多分辨分析, 并对比闪变前后的信号信息, 判断系统是否发生了闪变, 采用小波分析法实现闪变信号的检测。所提出的特征提取方法不仅能提取出电压闪变的调幅波信号, 而且还能提取调幅波信号的突变时间、频率成分和幅值。仿真结果表明, 该方法用于电压闪变这种低频非平稳信号分析是非常有效的。

参考文献

- [1] 崔锦泰(CUI Jintai).小波分析导论(An Introduction to Wavelets) [M]. 程正兴, 译 (CHENG Zhengxing,Trans).西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press), 1997.
- [2] 郭晓丽,刘建兰,吴晓,堵俊,邵振国. 电压波动信号检测方法的仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006,(02) .
- [3] 胡昌华, 张军波, 等(HU Chang hua, ZHANG Junbo, etal).基于 MATLAB 的系统分析与设计 2 ——小波分析(System Design and Analysis Based on MATLAB—Wavelet Analysis)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社 (Xi'an: Xi'an Electronic Technology University Press), 2001.
- [4] 郭晓丽,刘建兰.电压波动信号检测方法的仿真研究[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):41-44.
- [5] 赵松年, 熊小云(ZHAO Songnian, XIONG Xiaoyun).子波变换与子波分析(Wavelet Transform and Wavelet Analysis)[M].北京:电子工业出版社(Beijing:Publishing House of Electronics Industry), 1997
- [6] 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,(11)
- [7]R. Quiñero, O. A. Rosso, E. Başar, M. Schürmann. Wavelet entropy in event-related potentials: a new method shows ordering of EEG oscillations[J]. Biological Cybernetics, 2001,84(4) .
- [8]Dugan R C, Megranhan M F, Bently H W. Electrical Power System Quality [M]. New York: McGraw-Hill, 1996
- [9] Ghouti L, Bouridane A. Digital image watermarking using balanced multiwavelets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (4) :1519-1536
- [10] Brito N S P, Souza B A, Pires F A C. Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power[A]. The 1998 International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athen(Greece) :1998.511-515
- [11] Santoso S, Grady W M, Edward J, et al. Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms. IEEE Transactions on Power Delivery. 2000, 15(1) :247-254 .

The Detection of Voltage Flicker on Different Value Daubechies Wavelet Multiresolution Decomposition

Hu Nan, Le Xiufan

Electric Engineering College, Hohai University, Nanjing (210098)

Abstract

Compared to the traditional Fourier transform, the time-frequency localization features of wavelet transform, the width of the window time-frequency signal may adjust automatically changed with signal. which have very obvious advantages in the detection of mutations in the signal and non-stationary signals. This paper proposes a method which uses multiresolution analysis to extract voltage flicker signal, and according to the characteristics of wavelet function and the purpose of analyzing, comparison with different N values (number of vanishing moments) of the Daubechies wavelet to extract and locate flicker signal feature. According to the information of time-frequency amplitude modulation wave, we get the frequency and amplitude of flicker signal, and the precise positioning time of voltage flicker on the occurrence and recovery. The simulation results show that a combination of different N value Daubechies wavelet in the analysis of voltage flicker can get better results..

Key words: Voltage flicker; Synchronous; Daubechies wavelet; Multiresolution analysis

作者简介:

胡南 (1985 -), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 从事电压闪变检测方面的研究 (E-mail: hu_nan123@sina.com) ;