

# 提升小波在暂态电能质量扰动检测与定位中的应用

许童羽, 朴在林, 陈春玲

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 110866)

**摘要:** 针对电力系统暂态扰动信号具有非平稳、突发性的特点, 分析了提升小波适合检测暂态扰动信号突变点的特性, 提出了应用提升 db4 小波变换对暂态电能质量扰动信号进行检测与定位的方法。在 Matlab 仿真环境下运用该方法对电压骤升、电压骤降、电压中断、频率偏差、瞬态振荡、瞬时脉冲等多种暂态电能质量扰动信号进行检测与定位, 仿真结果表明, 该方法误差可达到毫秒级, 可以实现对扰动信号起止时刻更为精确的定位。

**关键词:** 电能质量, 暂态扰动, 提升小波, 检测与定位

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.050

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-05-0282-05

许童羽, 朴在林, 陈春玲. 提升小波在暂态电能质量扰动检测与定位中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 282-286.

Xu Tongyu, Piao Zailin, Chen Chunling. Application of lifting wavelet in transient power quality disturbance detection and location[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 282-286. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

随着各种电力污染的不断加剧, 暂态电能质量扰动问题受到人们日益重视, 如电压骤升(降)、瞬态振荡、电压波动等。造成这一情况的原因主要是由于电力系统中非线性、冲击性负荷的不断增加<sup>[1]</sup>。实现对这些暂态扰动信号实时、有效检测和定位, 是电能质量动态补偿的关键前提。

当前电能质量检测的难点是需要对突变的、暂态的、非平稳电能质量扰动的检测。目前典型的检测方法主要有时域检测法和频域检测法, 包括傅立叶变换法、小波变换法、基于瞬时无功功率理论的检测方法和有功无功(dq)变换法等。小波变换是近年来的新方法<sup>[2]</sup>。小波变换吸取了现代数学中的函数逼近理论、分形理论、傅里叶变换及数字信号处理等学科的精华, 在时域、频域同时具有良好的局部化特性, 对信号的奇异点非常敏感, 适用于时变的非平稳信号的检测与分析<sup>[3-6]</sup>。由于传统小波算法计算量大, 耗时长, Sweldens 和 Daubechies 提出了提升小波变换的方法, 它不依赖于傅立叶变换, 在时域直接实现小波的构造, 克服了小波变换的边界问题, 能包容传统小波, 即所有的传统小波都可以用提升方案构造出来。而且该方法具有实时性好, 算法简单, 计算速度快, 占用内存少等优点。第二代小波的优良性质使得其在电能质量检测领域得到了广泛的研究<sup>[7-12]</sup>。

本文就提升 db4 小波算法在暂态电能质量扰动检测中应用进行相应的研究, 设计仿真实验, 运用该算法对

电压骤升、电压骤降、瞬态振荡、瞬时脉冲等典型暂态电能质量扰动信号进行检测与定位, 分析检测精度, 探讨其应用的有效性。

## 1 提升小波变换原理

### 1.1 小波变换基本原理

小波变换克服了傅立叶变换在单分辨率上的缺陷, 具有多分辨率分析的特点, 在时域和频域都有表征信号局部信息的能力, 时间窗和频率窗都可以根据信号的具体形态动态调整, 特别适合于非平稳信号分析和探测正常信号中夹带的瞬态成分, 因此小波变换在暂态电能质量扰动检测具有无可比拟的优势。

小波变换是把一基本小波函数  $\psi(t)$  做位移  $\tau$  后, 再在不同尺度  $a$  下与待分析信号  $x(t)$  做内积

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad a > 0 \quad (1)$$

等效的频域表示是:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \psi^*(a\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

式中,  $X(\omega)$ ,  $\psi(\omega)$  分别是  $x(t)$  和  $\psi(t)$  的傅立叶变换。

小波分析的基也就是小波函数, 小波函数的选取要根据应用对象的侧重点。电能质量扰动信号的分析处理对小波基的选择, 目前还没有一个统一的模型使得暂态信号检测、定位效果最佳。因此小波基只能从实际经验中获取, 暂态电能质量检测小波基的选择主要从正交性、光滑性、对称性、消失矩、正则性以及是否具有频域和时域紧支撑方面来考虑。在众多的小波中, Daubechies (dbN) 小波具有正交、时频紧支撑、高正则性和具有 Mallat 快速算法等特点, 对于检测信号的奇异性具有很好的特点, Daubechies 小波是目前最常用的正交紧支小波<sup>[13-15]</sup>。

收稿日期: 2010-09-04 修订日期: 2010-11-17

基金项目: 辽宁省教育厅高校科研 A 类项目 (2008635)

作者简介: 许童羽 (1967-), 男, 辽宁省沈阳市, 副教授, 博士, 主要从事电力信息化研究。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110866。

Email: yatongmu@163.com

在对 db 系列小波进行比较分析后, N.S.D.Brito et 指出: db4 小波相对于其他 db 系列小波具有最短的时窗和最高的时间分辨率, 应用在非平稳信号的时间定位分析中可得到更佳的效果。而暂态电能质量问题就属于非平稳信号, 所以选用 db4 小波进行暂态电能质量扰动检测和定位是最合适。

### 1.2 提升小波原理

基于提升算法的小波变换被称为第二代小波变换。提升方案把第一代小波变换过程分为以下 3 个步骤: 分解 (split)、预测 (predict) 和更新 (update)。

1) 分解: 将输入信号序列  $s_i$  分解成奇数序列  $d_{i-1}$  和偶数序列  $s_{i-1}$  2 个子集, 即

$$F(s_i) = (s_{i-1}, d_{i-1}) \quad (3)$$

2) 预测: 预测的目的用偶数序列  $s_{i-1}$  去预测奇数序列  $d_{i-1}$ , 奇数信号的实际值与预测值相减得到残差信号来代替原来的  $d_{i-1}$ , 即

$$d_{i-1} = d_{i-1} - P(s_{i-1}) \quad (4)$$

3) 更新: 构造一个更新算子  $U$  对偶数序列  $s_{i-1}$  进行更新, 使其保持原信号集的某些全局特性, 定义为

$$s_{i-1} = s_{i-1} + U(d_{i-1}) \quad (5)$$

由上面的讨论可以看出, 用提升方案实现小波分解的最大优点是将小波变换分解成了 3 个简单的步骤, 且每个步骤的逆变换也很简单。重构过程就是分解的逆变换, 也是 3 个步骤, 即预测、更新和合并 (merge)。

## 2 电能质量扰动信号检测仿真结果

为验证本文提出的基于提升 db4 小波对各种暂态电能质量扰动信号进行检测和定位的正确性和可行性, 本节在 Matlab 环境下, 选用 db4 正交紧支实小波的提升算法对电压骤升、电压骤降、电压中断、暂态谐波、瞬时脉冲、频率扰动等暂态电能质量扰动信号进行检测仿真, 并通过计算进行信号扰动起止时刻定位。根据实际电网中的暂态扰动情况和仿真分析的需要, 选择典型暂态扰动信号模型, 并设定标准信号是幅值 1 V, 频率 50 Hz 的正弦波。

### 2.1 电压骤升暂态扰动信号的检测及定位

其数学表达式

$$u(t) = (1 + \alpha(\mu(t-t_1) - \mu(t-t_2)))\sin(\omega_0 t) \quad (6)$$

其中  $\mu(\tau) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$  为单位阶跃函数,  $\alpha=0.1 \sim 0.9$

为骤升幅度;  $0.5T < t_2 - t_1 < 30T$  为骤升持续时间;  $t_1$  为骤升的起始时刻,  $t_2$  为骤升的结束时刻。

在 Matlab 环境下, 得到电压骤升扰动波形,  $t_1=0.1$  s,  $t_2=0.2$  s, 仿真时间为 0.25 s。利用 db4 小波函数、提升 dB3 小波函数、提升 db4 小波函数分别进行 3 层和 4 层小波变换, 对电压骤升扰动信号进行检测和定位, 原始波形和小波变换仿真结果如图 1 所示。通过计算, 电压骤升扰动采用不同的小波函数变换的起止时刻的实际检测值和偏差如表 1 所示。

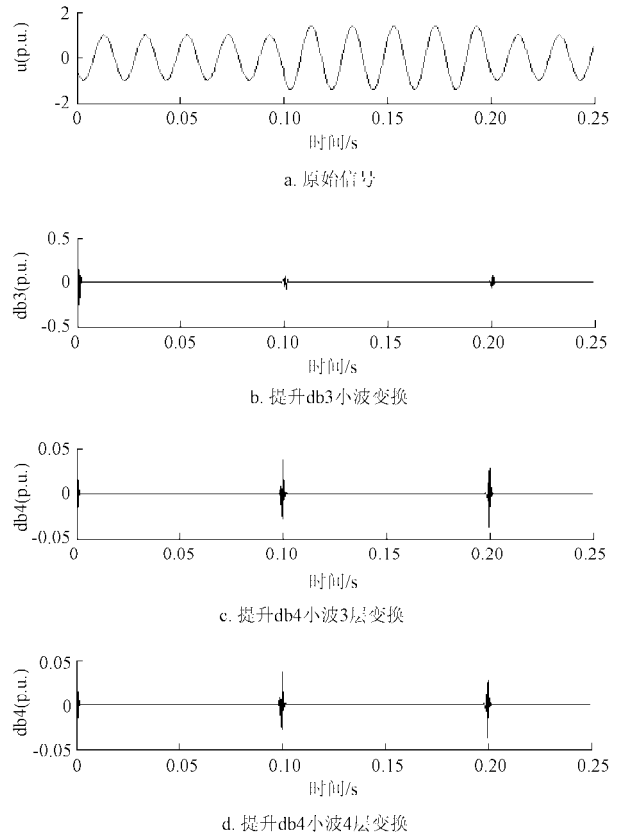


图 1 电压骤升扰动信号的小波变换

Fig.1 Wavelet transform of voltage swells disturbing signal

表 1 电压骤升扰动起止时刻的理论值和检测值

Table 1 Theoretical values and test values at the beginning and ending of voltage swells disturbance signal

小波函数	理论起止时刻/s	实际检测值/s	误差/s
db4 小波	$t_1=0.1$	$t_1=0.0996$	0.0004
	$t_2=0.2$	$t_2=0.1993$	0.0007
提升 dB3 小波	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.2013$	0.0013
提升 db4 小波 (3 层)	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.1998$	0.0002
提升 db4 小波 (4 层)	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.1998$	0.0002

采用不同的小波函数进行检测定位, 仿真结果表明:

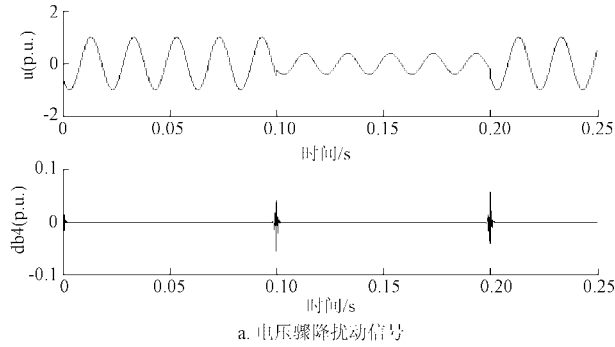
1) 比较 db4 小波和提升 db4 小波变换: 仿真图可以看出, 同样采用三层小波变换, 提升 db4 小波在时域上比 db4 小波更紧支撑; 从扰动起止时刻的定位来看, 提升 db4 小波比 db4 小波更精确, 误差更小。

2) 比较提升 db3 小波和提升 db4 小波变换: 同样使用提升小波三层变换, db4 小波比 db3 小波在时域上能量更集中, 突变点更突出, 时间定位精度因此得到了很大提高。

3) 比较提升 db4 小波 3 层变换和提升 db4 小波 4 层变换: 4 层小波变换仿真图在突变点以外的波形更光滑, 但时间定位精度一样, 因此没有必要再增加小波层数,

以免增加计算量。

通过以上分析，可以得出结论：提升 db4 小波 4 层变换可以对电能质量信号中的局部奇异性进行分析，并且实现对扰动的发生、结束时刻的精确定位。下面对其他各种暂态扰动信号检测和定位都将利用此方法。



### 2.2 其他暂态扰动信号的检测及定位

利用提升 db4 小波，分别对电压骤降、电压中断、频率偏差、暂态振荡和瞬时脉冲扰动信号进行检测与定位，原始波形和小波变换仿真结果如图 2a~e 所示，起止时刻定位如表 2 所示。

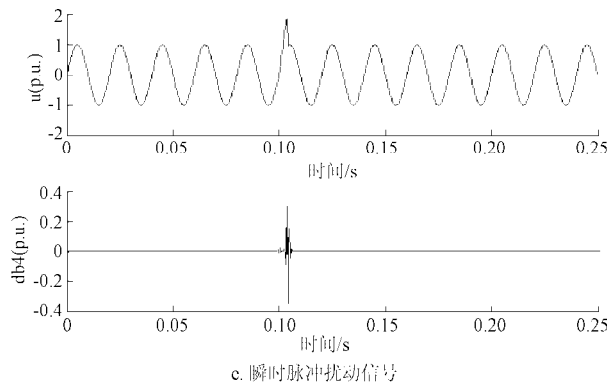
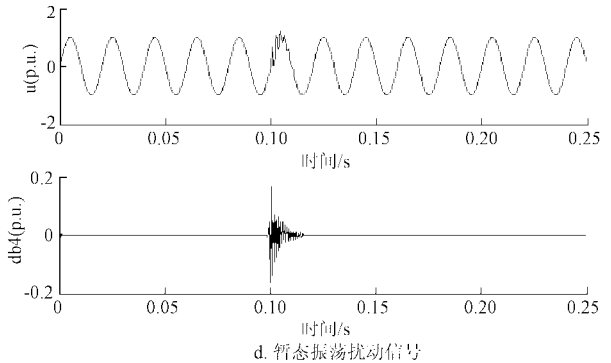
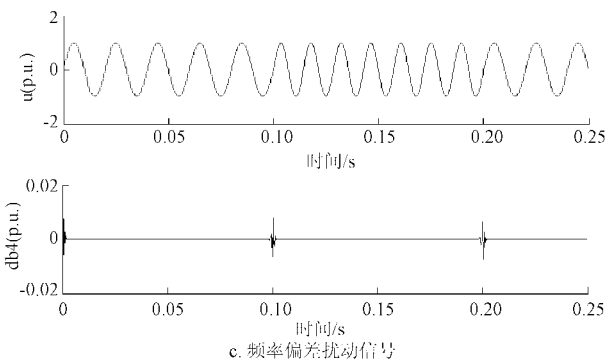
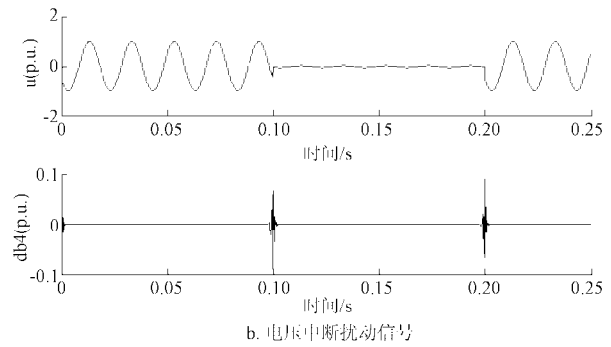


图 2 暂态扰动信号的提升 db4 小波变换

Fig.2 db4 lifting wavelet transform of disturbing signals

表 2 扰动信号起止时刻的理论值和检测值

Table 2 Theoretical and test values at the beginning and ending of disturbance signals

扰动类型	理论起止时刻/s	实际检测值/s	误差/s
电压骤降	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.1998$	0.0002
电压中断	$t_1=0.1$	$t_1=0.0996$	0.0004
	$t_2=0.2$	$t_2=0.2004$	0.0004
频率偏差	$t_1=0.1$	$t_1=0.1002$	0.0002
	$t_2=0.2$	$t_2=0.2004$	0.0004
暂态振荡	$t_1=0.100$	$t_1=0.0989$	0.0011
	$t_2=0.115$	$t_2=0.1155$	0.0005
瞬时脉冲	$t_1=0.100$	$t_1=0.1002$	0.0002
	$t_2=0.103$	$t_2=0.1039$	0.0009

从上面七种暂态电能质量扰动检测仿真来看，基于提升 db4 小波可以实现对多种扰动信号的检测，并且实现了精确的扰动时间定位，误差在 0.0001~0.0011 s 之间，非常小。

### 2.3 对含噪骤升暂态扰动信号的检测及定位

在实际电力系统中的电压信号总是受到不同程度噪声影响，因此在电压骤升扰动信号模型中叠加信噪比 SNR 为 50 和 40 dB 的高斯随机白噪声，对未进行去噪处理的扰动信号进行检测与定位，原始波形和小波变换仿真结果如图 3a、3b 所示，起止时刻定位如表 3 所示。

结果表明在噪声 SNR=50 dB 情况下，检测精度并未受到影响，在 SNR=40 dB 情况，检测波形受到噪声影响，但误差仍可以接受。足以验证提升 db4 小波算法的鲁棒性。

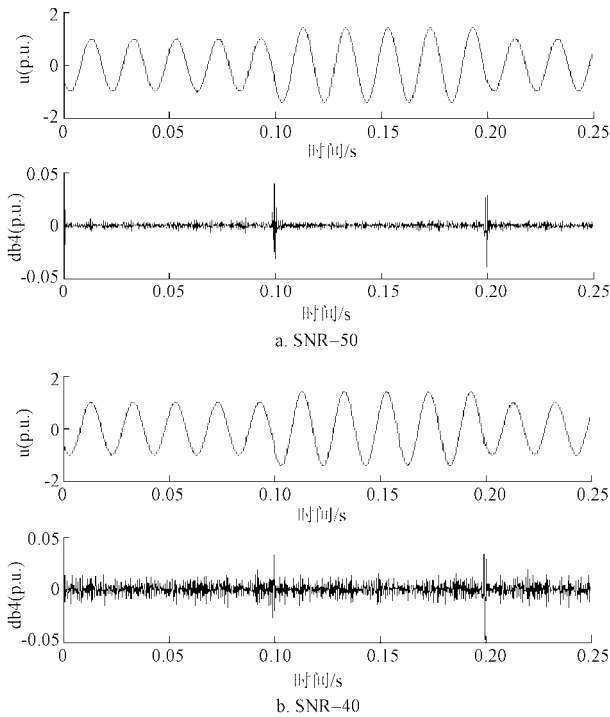


图 3 含噪声电压骤升暂态扰动信号的提升 db4 小波变换  
Fig.3 db4 lifting wavelet transform of voltage swells disturbing signals including noise

表 3 含噪电压骤升扰动信号起止时刻的检测

Table 3 Detecting time at the beginning and ending of voltage swell disturbing signals including noise

信噪比 SNR	理论起止时刻	实际检测值	误差
SNR=50	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.1998$	0.0002
SNR = 40	$t_1=0.1$	$t_1=0.0999$	0.0001
	$t_2=0.2$	$t_2=0.2004$	0.0004

### 3 结 论

暂态电能质量扰动起止时刻、持续时间是描述扰动的重要属性，对暂态电能质量扰动进行有效地检测，有助于电能质量综合评估，对于电能质量的综合治理和提高具有重要意义。本文基于提升 db4 小波变换对暂态电能质量扰动进行检测，仿真结果表明在分解尺度上可以实现准确的检测。但是该方法在噪声较大的情况下会产生许多伪极值点，造成检测困难，还需结合去噪方法进一步研究在噪声比较严重环境下的高精度检测。

#### [参 考 文 献]

[1] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
[2] 吕广强, 赵剑锋, 程明, 等. 配电网动态电能质量问题及其解决方案[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 53-56.  
Lü Guangqiang, Zhao Jianfeng, Cheng Ming, et al. Dynamic quality of power supply and its solution for distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 53-56. (in Chinese with English abstract)

[3] 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): 34-36.  
Chu Jun, Ma Jianwei. Detection of power quality disturbed signals based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 34-36. (in Chinese with English abstract)  
[4] 耿云玲, 何怡刚, 王群, 等. 采用小波变换检测和定位电能质量扰动[J]. 继电器, 2005, 33(8): 38-40  
Geng Yunling, He Yigang, Wang Qun, et al. Detection and location of power quality disturbances by wavelet transform[J]. Relay, 2005, 33(8), 38-40. (in Chinese with English abstract)  
[5] 张晓冰, 崔家瑞, 梁原华. 小波变换在电能质量扰动检测与定位中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(6): 118-121  
Zhang Xiaobing, Cui Jiarui, Liang Yuanhua. The application of wavelet transform in power quality disturbance detection and location[J]. Journal of Harbin university of science and technology, 2006, 11(6), 118-121. (in Chinese with English abstract)  
[6] 堵俊, 郭晓丽, 张新松等. 一种新的电压暂态信号检测方法 [J]. 电测与仪表, 2008, 45(511): 1-3.  
Du Jun, Guo Xiaoli, Zhang Xinsong, et al. A new method of voltage sag signal detection[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2008, 45(511):1-3. (in Chinese with English abstract)  
[7] A Serdar Yilmaz, Abdulhamit Subasi, Mehmet Bayrak, et al. Application of lifting based wavelet transforms to characterize power quality events[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48 (1): 112-23.  
[8] 刘慧, 刘国海, 沈跃. 采用提升小波包和相关向量机的电能质量扰动分类[J]. 高电压技术, 2010, 33(3): 782-788.  
Liu Hui, Liu Guohai, Shen Yue. Classification method of power quality disturbances using lifting wavelet packet and relevance vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2010, 33(3):782-788. (in Chinese with English abstract)  
[9] 曾黎玉, 王英健, 郑理科. 基于快速提升小波变换的电能畸变信号模极大值检测方法[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2007, 4(4): 56-59.  
Zeng Liyu, Wang Yingjian, Zheng Like. A Method based on fast lifting wavelet transform and modulus maximum for detecting power system singular signals[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 4(4): 56-59. (in Chinese with English abstract)  
[10] 王若愚, 郭经红. 基于提升小波变换的电力系统谐波分析[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊): 5-10.  
Wang Ruoyu, Guo Jinghong. Harmonics detection in power systems using wavelet transform based on lifting scheme[J]. Power System Technology, 2008, 32(Supp): 5-10. (in Chinese with English abstract)  
[11] 任先文, 余志飞, 孙功伟, 等. 基于提升小波的电能质量分析仪研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 34-36.  
Ren Xianwen, Yu Zhifei, Sun Gongwei, et al. Study of power quality analyzer based on lifting wavelet[J]. Power Electronics,

- 2009, 43(10): 34—36. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王继东. 基于二进制小波变换的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 100—103.  
Wang Jidong. Detection of Power Quality Disturbance Based on Binary Wavelet Transform[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 19(1): 100-103. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张卓, 何东健. 基于 db 小波的暂态电能质量分析方法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(4): 221—223.  
Zhang Zhuo, He Dongjian. Study on power quality transit signal analysis based on db wavelet[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(4): 221—223. (in Chinese with English abstract)
- [14] 居滋培, 凌亦枫, 董大伟等. 在暂态电能质量检测中的小波性能比较[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(6): 608—612.  
Ju Zipei, Ling Yifeng, Dong Dawei, et al. Performance comparison of wavelet functions in the detection of transient power quality, 2008, 30(6): 608—612. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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—36.  
Chu Jun, Ma Jianwei. Detection of power quality disturbed signals based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 34—36. (in Chinese with English abstract)

## Application of lifting wavelet in transient power quality disturbance detection and location

Xu Tongyu, Piao Zailin, Chen Chunling

(School of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Liaoning 110866, China)

**Abstract:** According to non-stationary and burst capability of the transient power system disturbing signals, this paper analyzed the characteristics of Lifting Scheme Wavelet in detecting transient disturbing signals, proposed a method to detect and locate the transient power quality disturbances by db4 lifting wavelet transform. This method is used for detection and location in the MATLAB environment on the voltage swells, voltage sags, voltage interruption, frequency deviation, transient oscillation, transient pulse and other transient power quality disturbing signals, simulation results indicated that the method had a millisecond level accuracy and can be implemented precisely positioning on starting and ending time of the disturbance signals.

**Key words:** power quality, transient disturbance, lifting wavelet, detection and location