

# 冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的应用研究

张华赢<sup>1</sup>, 阳子婧<sup>2</sup>, 曹军威<sup>2</sup>, 姚森敬<sup>1</sup>, 余鹏<sup>1</sup>

(1 深圳供电局有限公司, 深圳, 518000; 2 清华大学, 信息技术研究院, 北京, 100084)

## Research on the Application of Redundant Lifting Wavelet Transform in Power Quality Transient Events Analysis

ZHANG Hua-ying<sup>1</sup>, YANG Zi-jing<sup>2</sup>, CAO Jun-wei<sup>2</sup>, YAO Sen-jing<sup>1</sup>, YU Peng<sup>1</sup>

(1 Shenzhen Power Supply Co. Ltd, Shenzhen 518000, 2 Tsinghua University Research Institute of Information Technology, Beijing 100084)

**ABSTRACT:** At present, the power system is playing a more and more important role in peoples' life with the great development of society and economy, while the power quality will directly impact the overall benefit of national economy. However, due to the higher demands of users and the increasingly complexity of power supply circumstance, the power quality problem is becoming prominent and serious day by day. In order to realize efficient monitoring of power quality, the analysis on various transient events is made a quite important research subject. In this paper, the redundant lifting wavelet transform is employed to implement identification and estimation of disturbance that leads to transient events. By designing simulation signals of three main transient events i.e. voltage swell, voltage sag and short time voltage interruption, how the final analysis effects will be influenced by distinct decomposition scale as well as different start and end time of disturbance is well investigated. Simulation results verify that the disturbance in transient events can be accurately detected with the redundant lifting wavelet transform.

**KEY WORD:** Redundant lifting wavelet; Power quality; Transient events analysis

**摘要:** 在当今社会, 随着社会的不断进步和经济的快速发展, 电力系统对人们的生活产生越来越重要的影响, 电能质量的优劣将直接影响到国民经济的总体效益。然而, 用户要求的不断提高以及供电环境的日趋复杂, 使得电能质量问题逐渐突显并日益严重。要实现对电能质量的有效监测, 对各种暂态事件的分析是一项重要研究课题。本文采用冗余提升小波变换方法, 对暂态事件中扰动的起止时刻进行识别和判断。通过构造电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种主要暂态事件的仿真信号, 探讨了不同分解尺度和不同扰动起止时刻对分析效果的影响。仿真结果表明: 应用冗余提升小波变换可以准确检测出暂态事件中的扰动。

**关键词:** 冗余提升小波; 电能质量; 暂态事件分析

## 1 引言

电能作为一种实用、清洁且易于传输和控制的能源, 被广泛应用于国民经济生产的各个行业和领域。随着我国经济的快速发展和对电能需求量的飞速增加, 提供稳定、可靠和高质量的电能对于保障电网和电气设备安全经济地运行以及人民的日常生活具有十分重要的意义。然而, 由于各种电力电子装置的接入等原因, 电能质量正逐渐成为

一个日益突出的问题。

近年来,电能质量问题已引起电力行业工作者的密切关注。在电力系统中,电能质量问题主要分为两类:稳态和暂态。其中暂态电能质量问题主要包括短时电压改变以及各种暂态现象,而短时电压改变正成为工程实际中较常出现的典型问题。当电压事件发生时,其起止时刻的幅值将发生突变。小波分析具有出色的奇异性检测能力,因而可被用于对扰动的起止时刻进行识别和检测。目前,已有诸多研究人员就小波分析对暂态事件中的扰动检测这一问题展开研究。王晶等针对小波变换在电力系统中的应用作出了全面细致的总结<sup>[1]</sup>。邓宏伟给出了采用小波变换对信号突变点进行定位的详细步骤,并通过分析和仿真结果验证了小波变换对非稳态扰动检测的效果<sup>[2]</sup>。张明对电能质量扰动相关的问题进行了研究,提出基于相对小波对数能量熵和最小二乘支持向量机的电能质量扰动识别和分类方法<sup>[3]</sup>。针对经典小波在通常在频域构造并且其变换过程需要借助卷积运算来实现因而计算量较大的不足,1994年,Bell实验室的Sweldens博士提出一种提升算法,用以构造具有紧支撑的小波和对偶小波函数<sup>[4]</sup>。随后,提升小波的理论和应用研究得到了众多研究人员的广泛关注。Min Li等将Daubechies(9/7)提升小波用于电压暂降、瞬态扰动和谐波的检测,并应用仿真结果验证了该方法在时域和频域出色的检测能力<sup>[5]</sup>。周建萍等利用提升小波可在时域和频域表征信号局部特征的特点和其具有发现突变信号、处理非平稳时变信号的能力,采用提升小波有效地检测出脉冲暂态和振荡暂态电压扰动中的奇异点,并与傅里叶分析的结果进行了对比<sup>[6]</sup>。为保

证暂态信号分析微处理器实现的实时性,王坤等采用提升 Haar 小波来提取电压暂降信号的奇异点,并与传统 Haar 小波的分析效果进行了对比,验证了提升 Haar 小波在分析中的优越性<sup>[7]</sup>。本文提出将冗余提升小波应用于电能质量暂态事件的扰动识别和检测,以期获得较好的分析效果。

## 2 冗余提升小波分析

### 2.1 提升小波变换

1996年,Sweldens博士在提升算法的基础上,提出基于懒小波变换、对偶提升和提升三个步骤的提升小波变换,亦称为第二代小波变换。提升小波变换的整个过程得以完全在时域进行而不再依赖于傅立叶变换<sup>[8]</sup>,其正变换分解过程分为如下三步<sup>[9]</sup>:

(1) 剖分:即将初始信号  $x$  分为奇样本  $x_o$

和偶样本  $x_e$  两部分:

$$x_e(i) = \{x(2i), i \in Z\}, \quad x_o(i) = \{x(2i+1), i \in Z\}$$

(1)

(2) 预测:根据信号相邻样本之间的相关性,以偶样本结合预测算子  $P$  来预测奇样本,并定义预测误差为细节信号  $d$ :

$$d = x_o - P \cdot x_e \quad (2)$$

(3) 更新:应用更新算子  $U$  对  $d$  进行更新并取代  $x_e$  得到更为平滑的逼近信号  $a$ :

$$a = x_e + U \cdot d \quad (3)$$

由于提升小波变换完全在时域进行,因此其逆变换重构的过程十分简单,仍分为三个步骤分别为:恢复更新、恢复预测和合并,即将信号流的方向反向并将原式中的运算符取反。

### 2.2 冗余算法基本原理

提升小波变换中的第一步是剖分，而这实际上是一个隔二采样的降采样过程，得到的奇偶样本的长度均为原信号的一半。随着分解尺度的增加，样本的点数将越来越少，可提供的信息也将随之减少。同时，提升小波变换亦不具有平移不变性。这一系列问题，可通过引入 *à trous* 算法<sup>[10]</sup>即逐层对滤波器相邻系数之间进行插值补零来得到解决。对提升小波变换的多相矩阵表示形式作等效易位变换<sup>[11]</sup>，去掉隔二采样步骤并对细节信号作复移位运算，则可得冗余提升小波的变换矩阵<sup>[12]</sup>。据此可知冗余提升小波变换的正变换分解过程分为两步：

(1) 预测：

$$d = x - P \cdot x \quad (4)$$

(2) 更新：

$$a = x + U \cdot d \quad (5)$$

其逆变换重构过程仍分为三步：即恢复更新、恢复预测和合并。恢复更新和恢复预测的实现方法与提升算法的相同，但是合并过程变为：对恢复更新和恢复预测分别得到的样本取平均。由于冗余提升小波变换去掉

了剖分这一降采样步骤，因而分解得到的逼近信号和细节信号的样本长度与初始信号长度相同，可供分析的信息亦是冗余的。

### 3 仿真分析

为探讨冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的有效性，本节根据实际情况设计了电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种最典型暂态事件的仿真信号。同时，考虑小波分解尺度和扰动起止时刻两种因素，分别研究两者对分析效果的影响。

#### 3.1 分解尺度对分析效果的影响

本小节中分别采用第一尺度和第二尺度下的高频细节信号  $d_1$  和  $d_2$  进行对比分析，比较不同分解尺度对三种电能质量暂态事件仿真信号分析效果的影响。

(1) 电压暂升：令扰动起止时刻分别为 0.1235s 和 0.243s，得到分析结果如图 1 所示：

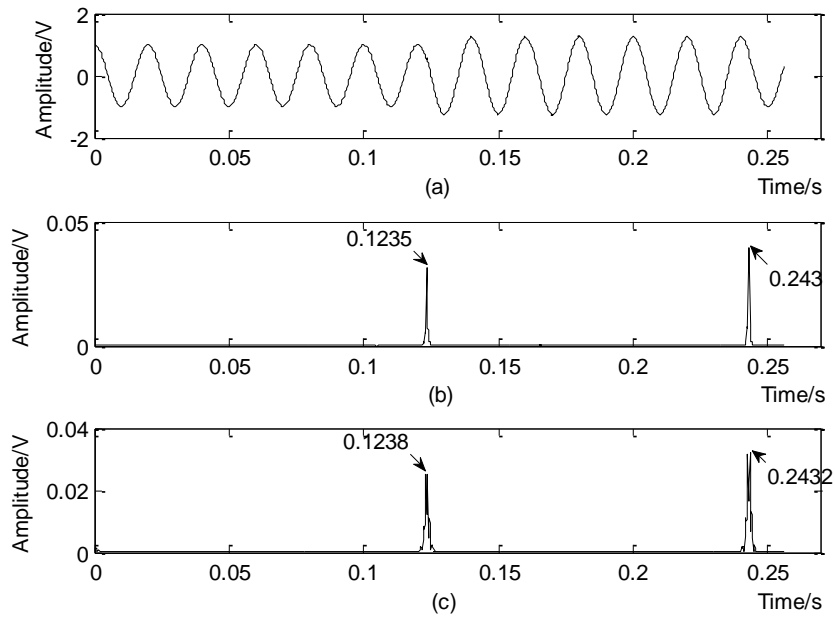


图 1 电压暂升事件分析: (a) 电压暂升仿真信号的时域图; (b)  $d_1$  的分析结果; (c)  $d_2$  的分析结果

Fig.1. Analysis of voltage swell event: (a) Time domain chart of voltage swell simulation signal; (b) Analysis result of  $d_1$ ; (c) Analysis result of  $d_2$

由图 1 可得  $d_1$ 、 $d_2$  分别对扰动的检测结果和与实际情况的相对误差, 见表 1:

表 1 不同分解尺度对电压暂升事件的分析结果

Tab.1 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage swell event

	开始时刻(s)	结束时刻(s)	持续时间(s)
实际情况	0.1235	0.243	0.1195
$d_1$	0.1235	0.243	0.1195
相对误差	0	0	0
$d_2$	0.1238	0.2432	0.1194
相对误差	0.2429%	0.0823%	0.0837%

从表 1 中可以看出: 采用不同分解尺度下的细节信号均能实现对电压暂升事件中扰动的检测。其中,  $d_1$  对扰动的检测结果与实际情况完全相符, 而  $d_2$  的分析结果与实际情况存在一定偏差, 因此  $d_1$  的分析效果要

好于  $d_2$  的分析效果。

(2) 电压暂降: 令扰动起止时刻分别为 0.05575s 和 0.1165s, 得到分析结果如图 2 所示:

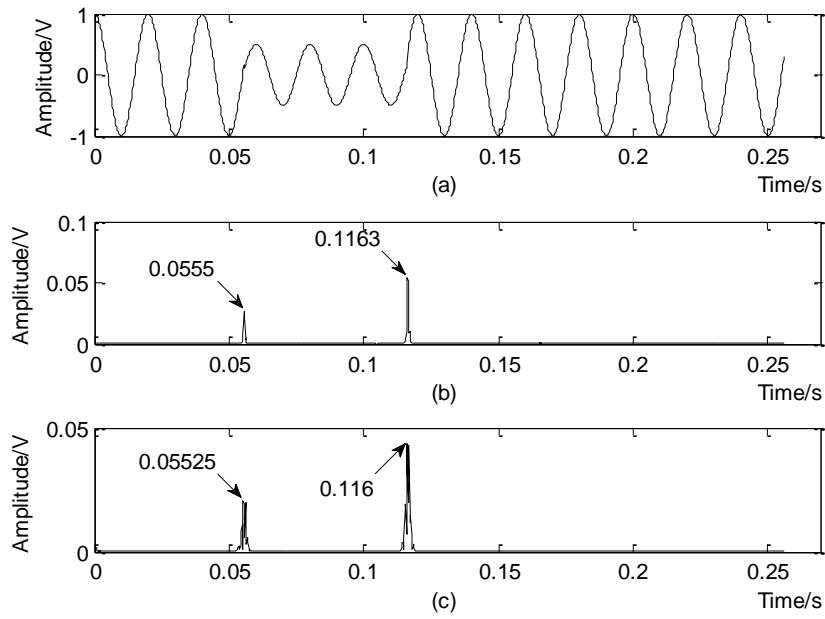


图2 电压暂降事件分析: (a) 电压暂降仿真信号的时域图; (b)  $d_1$  的分析结果; (c)  $d_2$  的分析结果

Fig.2. Analysis of voltage sag event: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal;

(b) Analysis result of  $d_1$ ; (c) Analysis result of  $d_2$

由图 2 可得  $d_1$ 、 $d_2$  分别对扰动的检测 结果和与实际情况的相对误差, 见表 2:

表 2 不同分解尺度对电压暂降事件的分析结果

Tab.2 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage sag event

	开始时刻(s)	结束时刻(s)	持续时间(s)
实际情况	0.05575	0.1165	0.06075
$d_1$	0.0555	0.1163	0.0608
相对误差	0.4484%	0.1717%	0.0823%
$d_2$	0.05525	0.116	0.06075
相对误差	0.8969%	0.4292%	0

由表 2 可知: 采用不同分解尺度下的细节信号均能实现对电压暂降事件中扰动的检测。其中, 对于扰动起止时刻的检测,  $d_1$  的精度要高于  $d_2$ ; 而对于扰动持续时间的

分析,  $d_2$  的效果要好于  $d_1$ 。

(3) 短时电压中断: 令扰动起止时刻分别为 0.0845s 和 0.12625s, 得到分析结果如图 3 所示:

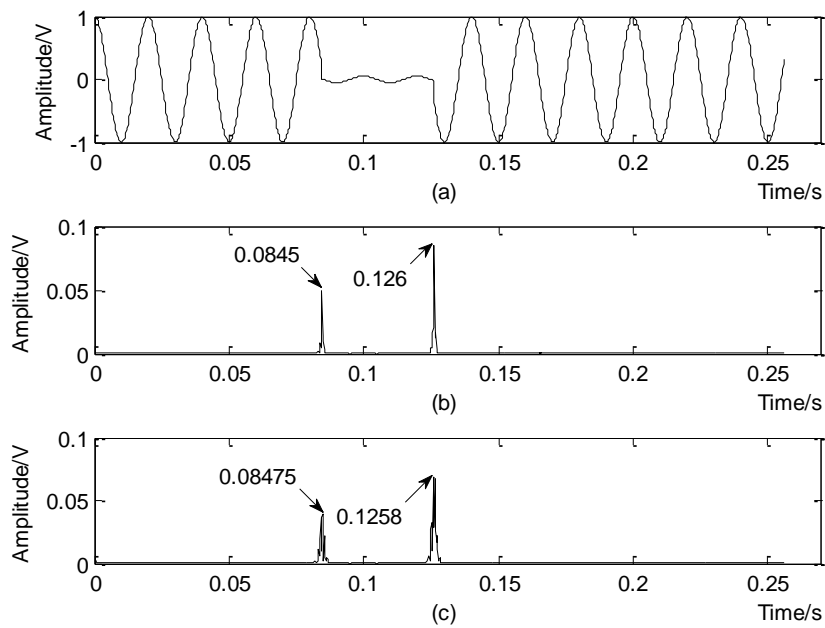


图3 短时电压中断事件分析: (a) 短时电压中断仿真信号的时域图; (b)  $d_1$  的分析结果; (c)  $d_2$  的分析结果

Fig.3. Analysis of voltage interruption event: (a) Time domain chart of voltage interruption simulation signal;

(b) Analysis result of  $d_1$ ; (c) Analysis result of  $d_2$

由图 3 可得  $d_1$ 、 $d_2$  分别对扰动的检测 结果和与实际情况的相对误差，见表 3:

表 3 不同分解尺度对短时电压中断事件的分析结果

Tab.3 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage interruption event

	开始时刻(s)	结束时刻(s)	持续时间(s)
实际情况	0.0845	0.12625	0.04175
$d_1$	0.0845	0.126	0.0415
相对误差	0	0.198%	0.5988%
$d_2$	0.08475	0.1258	0.04105
相对误差	0.2959%	0.3564%	1.6766%

由表 3 可知: 采用不同分解尺度下的细节信号均能实现对短时电压中断事件中扰动的检测。其中, 对于短时电压中断事件,  $d_1$ 、 $d_2$  在扰动的检测上都与实际情况存在一定偏差; 但无论是对扰动起止时刻还是扰动持续时间的分析,  $d_1$  的效果都要明显好于

$d_2$ 。

综合上述对三种典型电能质量暂态事件仿真信号的分析结果可知: 采用冗余提升小波分析方法, 可以有效识别和检测出暂态事件中的扰动; 另外, 小尺度下的细节信号具有比大尺度下的细节信号更好的分析效果。

### 3.2 扰动起止时刻对分析效果的影响

本小节中探讨不同扰动起止时刻对于最终分析效果的影响。针对三种典型暂态事

件，随机选取具有不同起止时刻和持续时间的两组扰动如表 4 所示：

表 4 两组不同扰动的选取

Tab.4 Selection of two distinct disturbances

	开始时刻(s)	结束时刻(s)	持续时间(s)
扰动 1	0.137	0.177	0.04
扰动 2	0.091	0.2245	0.1335

同时，根据 3.1 小节中的分析结论：小尺度下的细节信号具有比大尺度下的细节信号更好的分析效果，本小节中采用第一尺

度下的高频细节信号  $d_1$  来对两组不同的扰动进行识别和检测。分析结果如图 4—图 7 所示：

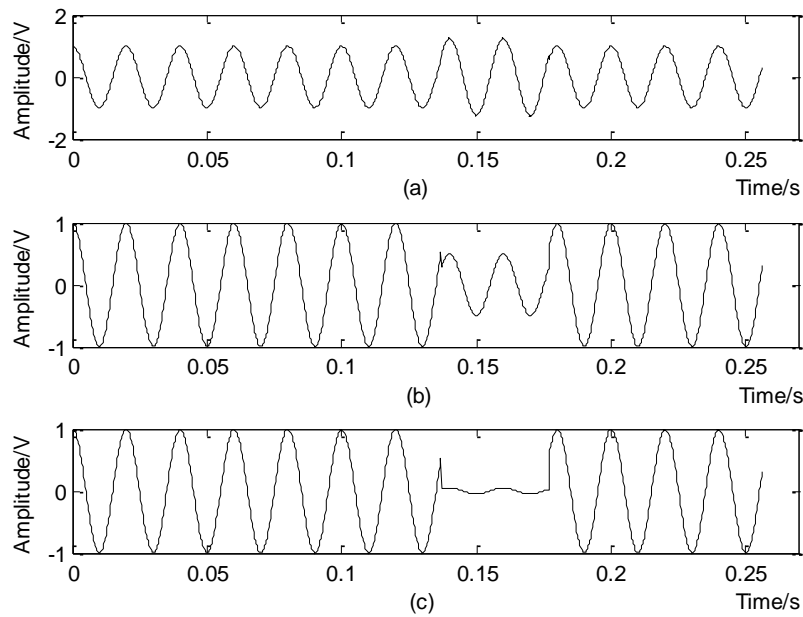


图 4 扰动 1 下三种电能质量暂态事件仿真信号的时域图：

(a) 电压暂升；(b) 电压暂降；(c) 短时电压中断

Fig.4. Time domain chart of simulation signals of power quality transient events with disturbance 1:

(a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

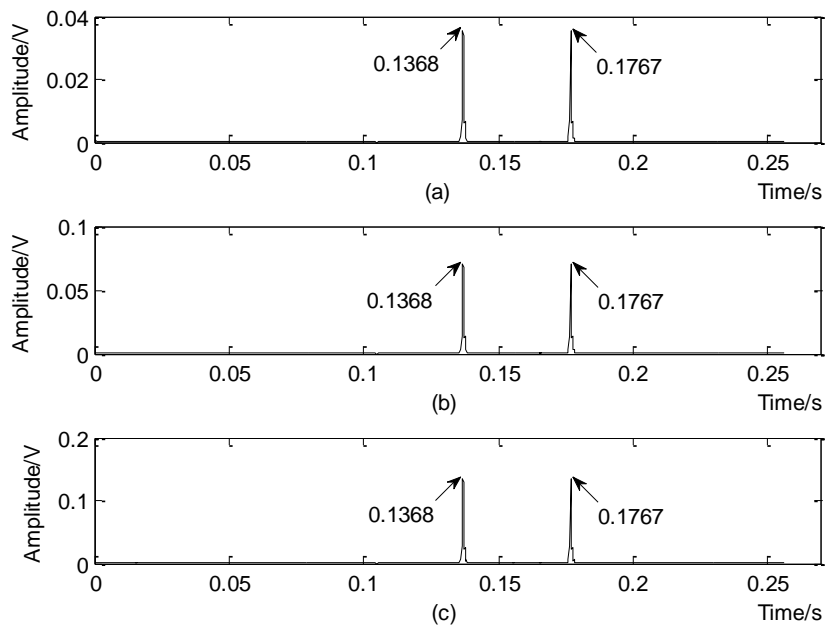


图5 扰动1下三种电能质量暂态事件仿真信号的冗余提升小波分析图：  
 (a) 电压暂升；(b) 电压暂降；(c) 短时电压中断

Fig.5. Analysis chart based on redundant lifting wavelet for simulation signals of power quality transient events with disturbance 1: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

从图5中可以看出：对于三种暂态事件中起止时刻分别为0.137s和0.177s的扰动1，应用冗余提升小波变换得到的 $d_1$ 检测出的扰动起止时刻均为0.1368s和0.1767s，并且对应于开始时刻和结束时刻的幅值十分接近，易于识别。

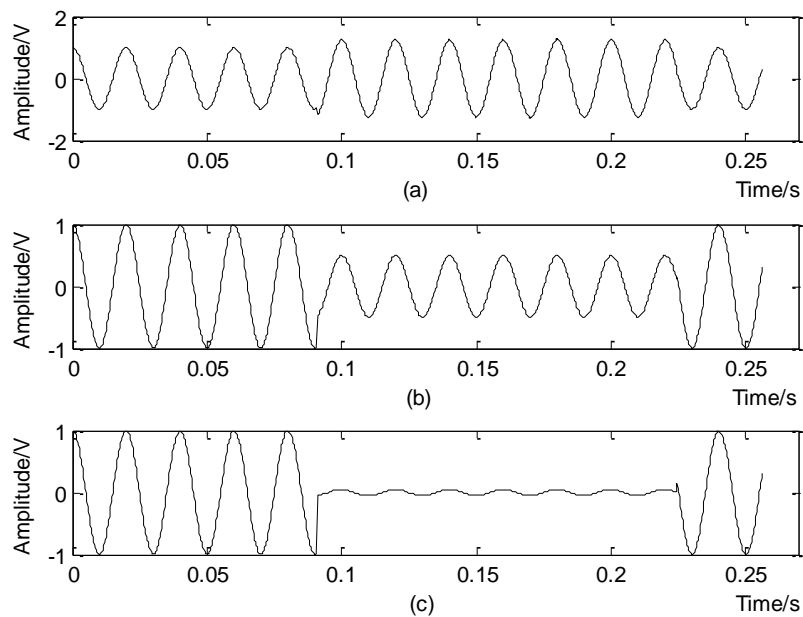




图 6 扰动 2 下三种电能质量暂态事件仿真信号的时域图:

(a) 电压暂升; (b) 电压暂降; (c) 短时电压中断

Fig.6. Time domain chart of simulation signals of power quality transient events with disturbance 2:

(a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

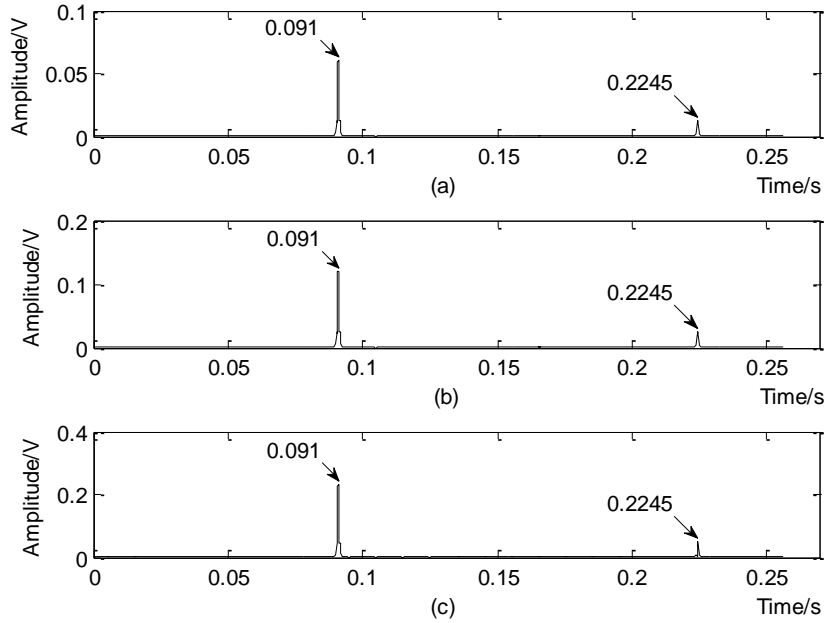


图 7 扰动 2 下三种电能质量暂态事件仿真信号的冗余提升小波分析图:

(a) 电压暂升; (b) 电压暂降; (c) 短时电压中断

Fig.7. Analysis chart based on redundant lifting wavelet for simulation signals of power quality transient events with disturbance 2: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

由图 7 中可知: 对于三种暂态事件中起止时刻分别为 0.091s 和 0.2245s 的扰动 2, 应用冗余提升小波变换得到的  $d_1$  检测出的扰动起止时刻均为 0.091s 和 0.2245s; 但是对应于开始时刻的幅值和对应于结束时刻的幅值存在很大差距, 前者较大易于识别, 而后者相对较小, 不如前者易于识别。

综合上述分析结果可以推断: 扰动的起止时刻对于应用冗余提升小波分析对扰动的准确识别和检测具有一定的影响。

#### 4 结论

暂态事件分析对于解决电能质量问题具有十分重要的意义。本文提出将冗余提升

小波分析应用于暂态事件中扰动的检测和识别, 并通过仿真分析结果验证了这一方法的有效性。同时, 对分析过程中提升小波的分解尺度和扰动的起止时刻这两种因素对结果的影响进行了探讨, 仿真结果表明: 两种因素均能影响最终的分析效果, 其中较小分解尺度下的细节信号具有比较大分解尺度下的细节信号更好的分析效果; 而扰动的起止时刻对于扰动识别的难易程度将产生一定的影响。

致谢

国家 973 基础研究计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61233016); 南方电网公司

科技项目 (K-SZ-2012-026)。

## 参 考 文 献:

- [1] 王 晶, 束洪春, 陈学允. 小波变换电力系统工学应用综述[J]. 电网技术. 2003, 27(6): 52-63.
- [2] 邓宏伟. 基于小波变换的电能质量分析与应用研究[D]. 武汉大学. 2004.
- [3] 张明. 电能质量扰动相关问题研究[D]. 华中科技大学. 2010.
- [4] W. Sweldens. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelet[J]. Appl. and Comput Harmonic Analysis. 1996, 3(2): 186-200.
- [5] Min Li, Guang-pu He, Xiao-ying Zhang, Xiao-hong Wu. Power Quality Detecting Based on Fast Lifting Wavelet Transform[C]. Control and Decision Conference, 2008, 536-540.
- [6] 周建萍, 郑应平. 基于提升小波的电压暂态奇异点检测[J]. 上海电力学院学报. 2010, 26(6): 564-566+576.
- [7] 王坤, 余志飞, 林美玲, 王伟. 高效提升小波的电能质量暂态信号分析[J]. 电网与清洁能源. 2011, 27(8): 23-26.
- [8] W. Sweldens. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet constructions[J]. SIAM J. Math. Anal. 1997, 29(2): 511-546.
- [9] Daubechies, I.; Sweldens, W. Factoring wavelet transforms

into lifting steps[J]. J. Fourier. Anal. Appl. 1998, 4, 247-269.

- [10] Holschneider, M., Kronland-Martinet R., Morlet J., Tchamitchian Ph. A Real-Time Algorithm for Signal Analysis with the Help of the Wavelet Transform. Wavelets, Time-Frequency Methods and Phase Space, Proceedings of the International Conference, Marseille, France, December 14-18, 1987.
- [11] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] 段晨东. 基于第二代小波变换的故障诊断技术研究[D]. 西安交通大学. 2005.

收稿日期: 2013年8月12日

### 作者简介:

张华赢 (1981-), 男, 籍贯黑龙江大庆, 硕士研究生, 工程师, 从事电能质量监测、治理及管理相关工作。

阳子婧 (1984-), 女, 湖南湘潭人, 博士后, 从事信号处理、数据挖掘技术及其在电力系统中的应用研究

姚森敬 (1969-), 男, 广东潮州人, 高级工程师, 硕士, 从事电能质量管理和高电压技术研究。

曹军威 (1973-), 男, 河北乐亭人, 博士, 研究员, 从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究。

余鹏 (1981-), 男, 湖北咸宁人, 工程师, 硕士, 从事电能质量检测治理和管理技术研究。