

基于提升小波的扰动起止时间对扰动识别的影响分析

张华赢

(深圳供电局有限公司)

阳子婧, 曹军威, 王淼

(清华大学信息技术研究院)

摘要: 电能质量是现代电力系统中的重要课题, 正受到越来越广泛的关注和重视。其中, 由扰动引起的短时电压改变是工程实际中经常出现的突出问题, 因此, 准确地识别扰动对于暂态电能质量问题的有效解决具有十分重要的意义。在本文中, 采用提升小波变换结合模极大值方法来实现对扰动的定位; 同时, 基于扰动起止时间在扰动检测中的重要性, 特别就扰动起止时间对扰动识别结果的影响进行了探讨性研究。通过电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型电能质量暂态事件的仿真实例分析, 验证了扰动起止时间能在一定程度上影响扰动定位的结果, 从而为扰动的准确识别提供了有益的理论依据。

关键词: 提升小波; 模极大值法; 扰动起止时间; 扰动识别

Influence Analysis on Start and End Time of Disturbance for Disturbance Identification Based on Lifting Wavelet

Huaying Zhang

Shenzhen Power Supply Ltd.

Zijing Yang, Junwei Cao, Miao Wang

Research Institute of Information Technology, Tsinghua University

Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology

Abstract: Power quality is an important issue in modern power system and getting more and more attention nowadays. In practice, short time voltage change caused by disturbance is a prominent problem, due to which accurate disturbance identification is of great significance to transient power quality problem solving. In this paper, the lifting wavelet transform is employed and combined with the modulus maxima method to implement disturbance location. What's more, based on the importance of start and end time of disturbance in disturbance detection, the impact of start and end time of disturbance on disturbance identification is especially investigated. With the simulation case study of three typical power quality transient events i.e. voltage swell, voltage sag and voltage interruption, it can be verified that the start and end time of disturbance will

impact disturbance location to some extent, through which theory support can be offered for precise disturbance identification.

Keywords: Lifting wavelet; Modulus maxima method; Start and end time of disturbance; Disturbance identification

1. 引言

在当代社会,随着社会和科技的不断进步,电力系统在人们生活中发挥的作用日益重要,稳定优质的电能质量已成为国民经济快速发展的基本保证。当供电受到扰动的干扰而无法被及时准确地检测出时,将严重影响人们的基本生活和企业的正常运营,给经济效益和社会效益造成巨大损失。

目前,如何对电能质量进行有效的实时监测以及在线/离线分析是一个亟待解决的重点问题,而其中的一项主要内容即为对各种暂态电能质量问题的分析。在工程实际中,短时电压改变是较为突出的暂态电能质量问题,给用户的稳定和合格供电带来了严峻的考验。为此,需要对暂态电能质量扰动进行准确的判别,从而保证对用户的优质供电。由于扰动在其发生时刻将引起信号的突变,因此如何对信号的局部突变点进行有效检测成为扰动识别的关键。小波分析因其多分辨分析特性和出色的时频分析能力可被用于信号的奇异性检测。针对这一课题,诸多科研人员已展开广泛研究。Mallat 等最早论述了小波变换与信号突变点之间的关系以及如何通过小波变换模极大值来估计信号的奇异性^[1]。杨福生探讨了小波变换极大值在多尺度上的表现与 Lipschitz 指数间的关系,并给出小波变换在边沿和瞬态检测中的应用实例^[2]。Gaouda 等提出一种在小波域对电力系统的不同扰动进行检测、分类和评估的系统化方法,并利用小波变换的局部化特性对噪声环境中的畸变时长进行测算^[3]。Gaouda 等提出一种在小波域对电力系统的不同扰动进行检测、分类和评估的系统化方法,并利用小波变换的局部化特性对噪声环境中的畸变时长进行测算^[4]。王晶等对小波理论在电力系统的暂态谐波分析、电能质量评估、奇异点检测与降噪、继电保护与故障定位、负荷预测等方面应用研究的主要成果进行了全面细致的总结^[5]。耿云玲对实数小波和复数小波在电能质量扰动信号检测和定位分析中的效果进行了探索,并提出基于离散小波变换的多尺度能量曲线方法以实现典型电能质量扰动信号的分类^[6]。王洪梅将小波变换模极大值方法用于信号的降噪和奇异点检测,并通过仿真分析验证了方法在应用中的有效性^[7]。为有效分析扰动,Wenzhong Gao 引入一种基于小波的方法,通过计算所得的最大小波系数来获取电压导数的频域特性^[8]。针对经典小波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^[9]。随后,他又提出基于懒小波变换、对偶提升和提升三步分解的提升小波变换,并给出了相应的快速算法^[10]。提升算法使得小波变换得以完全在时域进行,运算速度有了大幅提高,并且小波的构造更为灵活,因此得到诸多研究人员的密切关注,其在理论

和应用领域的研究纷纷展开。曾黎玉等提出将小波阈值降噪和小波模极大值相结合的方法,较好地抑制了噪声并检测出信号中的畸变点^[11]。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^[12]。许童羽等首先通过对信号进行希尔伯特移相处理获得含噪声扰动信号的包络,再结合小波降噪方法和扰动定位算法,实现了对扰动起止时刻的有效定位^[13]。

扰动的准确识别对于治理装置的准确动作以及暂态电能质量问题的有效解决具有十分重要的意义。因此,在前人已有的研究基础上,本文采用提升小波变换结合模极大值方法来实现对扰动的定位;同时,考虑到扰动起止时间在扰动检测中的重要性,特别针对扰动起止时间这一敏感因素对扰动识别结果的影响进行了探讨性研究。

2. 基于提升小波模极大值的扰动识别的基本原理

2.1 提升小波变换

1996年, Sweldens 博士在提升框架的基础上提出可完全在时域进行而不再依赖于傅立叶变换的提升小波变换,其分解过程分为以下三步^[14]:

(1) 剖分: 将初始信号 x 分为偶样本 x_{Even} 和奇样本 x_{Odd} :

$$x_{Even}(i) = \{x(2i), i \in Z\}, \quad x_{Odd}(i) = \{x(2i+1), i \in Z\} \quad (1)$$

(2) 预测: 以偶样本结合预测算子 P 来预测奇样本 x_{Odd} , 并取预测误差为细节信号 d :

$$d = x_{Odd} - P \cdot x_{Even} \quad (2)$$

(3) 更新: 应用更新算子 U 对 d 进行更新并取代偶样本 x_{Even} 得到逼近信号 a :

$$a = x_{Even} + U \cdot d \quad (3)$$

提升小波变换的逆变换重构的过程仍分为三个步骤,分别为恢复更新、恢复预测和合并,即将分解过程中的信号流方向反向并将原式中的运算符取反。

2.2 小波模极大值方法

Mallat 在其论著中曾给出了应用小波分析检测信号奇异性的理论依据^[1]: 对于满足一定条件的低通平滑函数 $\theta(x)$, 其一阶导数 $\theta^1(x)$ 和二阶导数 $\theta^2(x)$ 均为满足容许性条件的小波, 则 $L^2(\mathbf{R})$ 空间上的实函数 $f(x)$ 与 $\theta^1(x)$ 和 $\theta^2(x)$ 的小波变换 $W^1 f(s, x)$ 和 $W^2 f(s, x)$ 分别对应于函数 $f(x)$ 被 $\theta_s(x)$ 平滑后的一阶和二阶导数。对于尺度 s , $W^1 f(s, x)$ 的局部极

值对应于 $W^2 f(s, x)$ 的过零点，亦为 $f * \theta_s(x)$ 的拐点，而 $|W^1 f(s, x)|$ 的局部极大值点则对应于 $f * \theta_s(x)$ 的突变点。因此，可通过小波模极大值来对信号中的突变点进行定位。

3. 扰动起止时间对扰动识别的影响分析

本节采用提升小波变换结合模极大值法对电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型电能质量暂态事件的仿真信号进行分析，并重点探讨扰动起止时间对扰动识别结果的影响。

3.1. 实例分析一

为探讨扰动起止时间对定位结果的影响，考虑随机选取多个具有不同起止时间的扰动进行对比分析。同时，为加强分析结果的可比性，考虑对扰动的开始和结束时间两者其一取定值，而另一者逐渐变化以作对比分析。

本仿真实例中任取一组四个扰动令其开始时间取定值而结束时间逐渐变化，其开始时间均为 0.2581s 而结束时间分别为 0.3215s、0.3225s、0.3235s 和 0.3245s，得到三种暂态事件在该组扰动下的仿真信号如图 1 至图 3 所示：

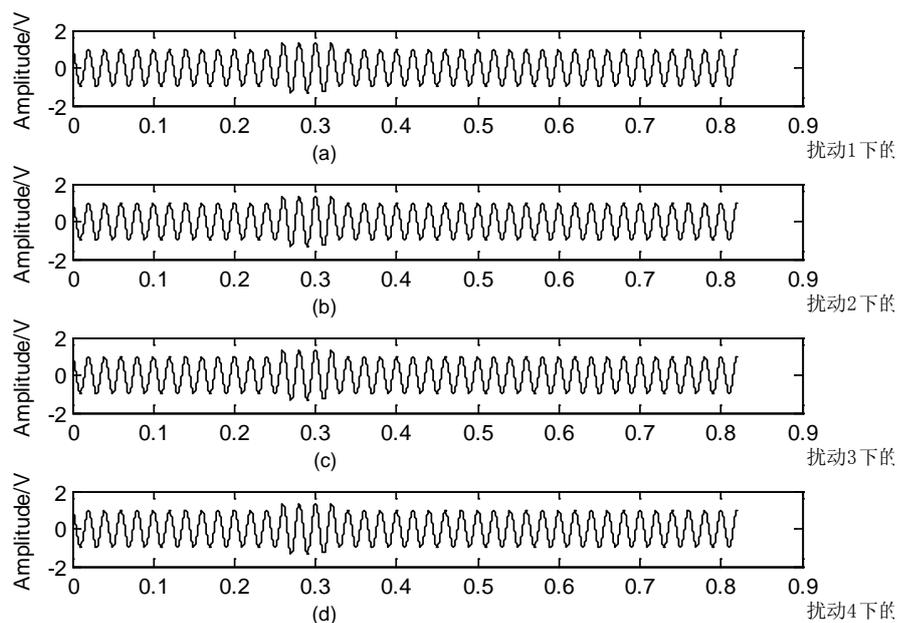


图 1 第一组扰动下的电压暂升仿真信号

Fig.1 Simulated signals of voltage swell for the first group of disturbance

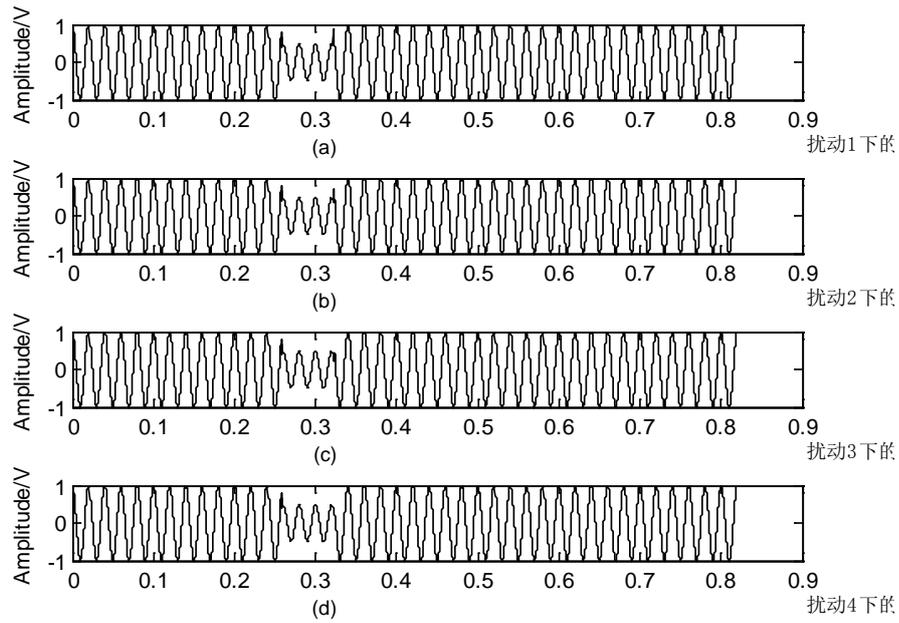


图2 第一组扰动下的电压暂降仿真信号

Fig.2 Simulated signals of voltage sag for the first group of disturbance

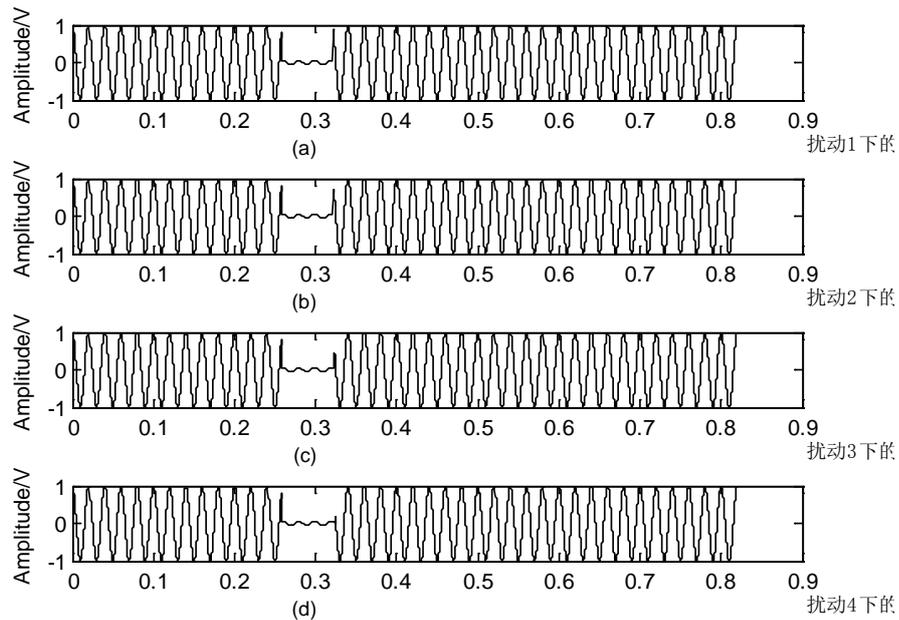


图3 第一组扰动下的短时电压中断仿真信号

Fig.3 Simulated signals of voltage interruption for the first group of disturbance

从图1至图3中可以看到：该组的四个扰动使电压发生了短时改变，依幅值变化的不同得到了电压暂升、电压暂降和短时电压中断的仿真信号，但从三个图中无法准确判别出扰动的发生和结束时间。应用提升小波对三种暂态事件的仿真信号进行多层分解，并取第一尺度下的细节信号进行模极大值分析来实现对扰动的定位，得到相应的分析结果如图4至图6

所示:

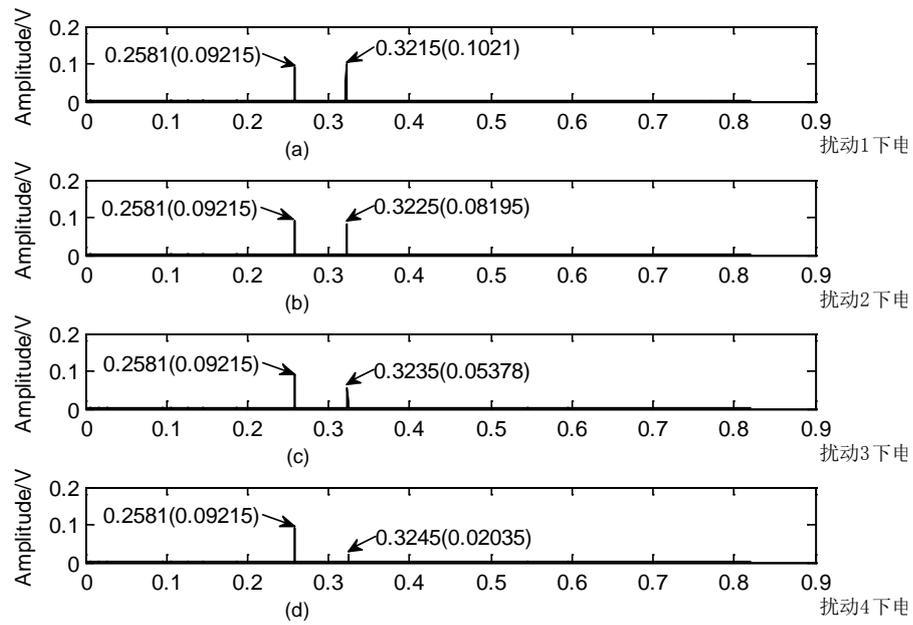


图4 电压暂升仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig.4 Analysis results of simulated signals of voltage swell for the first group of disturbance

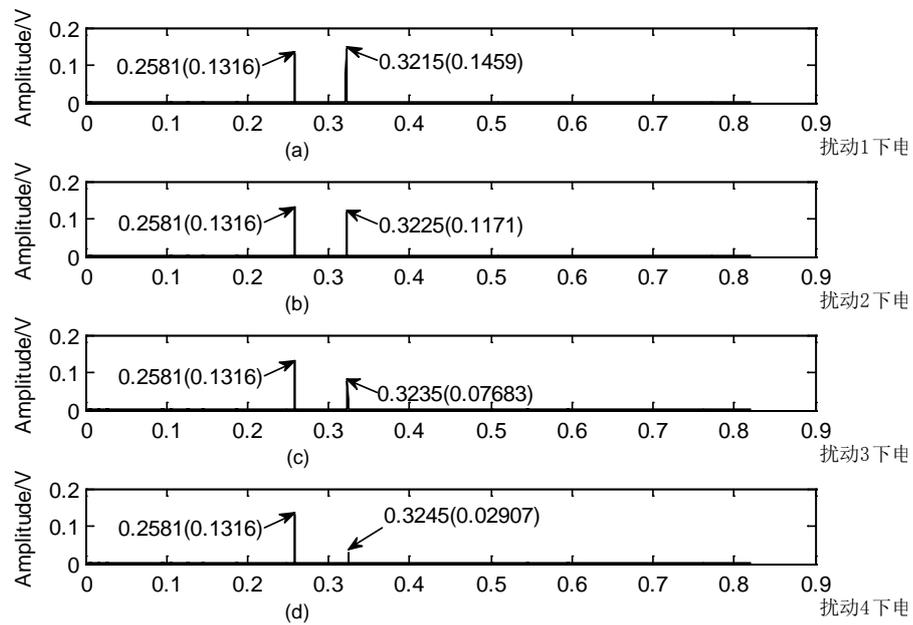


图5 电压暂降仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig.5 Analysis results of simulated signals of voltage sag for the first group of disturbance

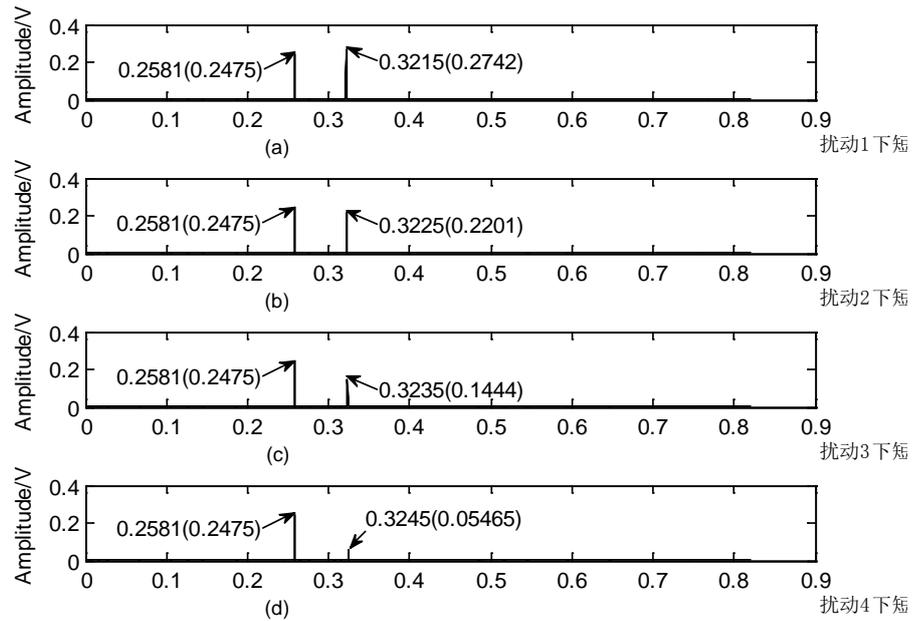


图6 短时电压中断仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig.6 Analysis results of simulated signals of voltage interruption for the first group of disturbance

由图4至图6可知:通过提升小波结合模极大值法可准确检测出扰动的发生和结束时间。对于电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种电能质量暂态事件,在扰动的定位上,三者的分析结果一致:开始时间均为0.2581s,结束时间均依次为0.3215s、0.3225s、0.3235s、0.3245s;在对开始和结束时间的定位点幅值上,三者有所差别:对于同一扰动下得到的定位点幅值,短时电压中断事件的最大,电压暂降事件的次之,电压暂升事件的最小。进一步讨论扰动起止时间对分析结果的影响,对于该组的四个扰动,三种暂态事件的定位点幅值呈现出一致的变化趋势,即随着扰动结束时间的向后推移,三者对结束时间0.3215s、0.3225s、0.3235s、0.3245s的定位点幅值均逐渐减小。

通过对上述仿真实例的详细分析,结合其他类似仿真实验的结果可以发现:

- (1) 电能质量暂态事件的类型对最终的扰动定位精度没有影响,而仅对定位点的小波模极大值的幅值大小有影响。
- (2) 扰动起止时间的变化可使定位点的幅值随之呈现出一定的变化趋势。结合理想电网中的电源电压一般为标准的工频正弦信号这一特点,可总结得到结论为:定位点的小波模极大值可随着扰动起止时间的变化而呈现出规律性的变化,即当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小;而当扰动时间由正弦波的过零点向峰值点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变大。导致这一规律性变化的原因为:发生在正弦波峰值点的扰动其突变强度最大,随着扰动发生时间越来越偏离峰值点,其突变强度将随之减小,直至扰动发生在正弦波过零点时其突变强度最小;反之亦然。

3.2 实例分析二

接下来,考虑到更复杂的情形,选取另一组扰动下的复合暂态事件的仿真信号进行分析,并对上述结论进行验证。

所选仿真信号由电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型的电能质量暂态事件复合组成。同时,为验证上述结论,并结合理想电网中电源电压一般为标准工频正弦信号因而具有波形对称性的特点,令仿真信号由以下四个暂态事件叠加组成:

- ① 电压暂升信号: 开始时间: 0.0592s, 结束时间: 0.1202s;
- ② 电压暂降信号 1: 开始时间: 0.2015s, 结束时间: 0.3121s;
- ③ 电压暂降信号 2: 开始时间: 0.4327s, 结束时间: 0.5639s;
- ④ 短时电压中断信号: 开始时间: 0.6187s, 结束时间: 0.8009s;

分析上述复合暂态事件的仿真信号可知其特点如下:

- (1) 对于信号①和信号④, 其扰动的开始时间相较结束时间均更远离于正弦波的峰值点;
- (2) 对于信号②和信号③, 两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 呈现出由正弦波的峰值点向过零点逐渐变化的特点;
- (3) 对于信号①、②、③和④, 其相对正弦波峰值点的距离由近及远依次为: ①>④>②>③。

应用提升小波结合模极大值法对该复合仿真信号进行分析, 得到相应分析结果如图 7 所示(其中四次暂态事件如图 7(a)中红圈中的波形所示):

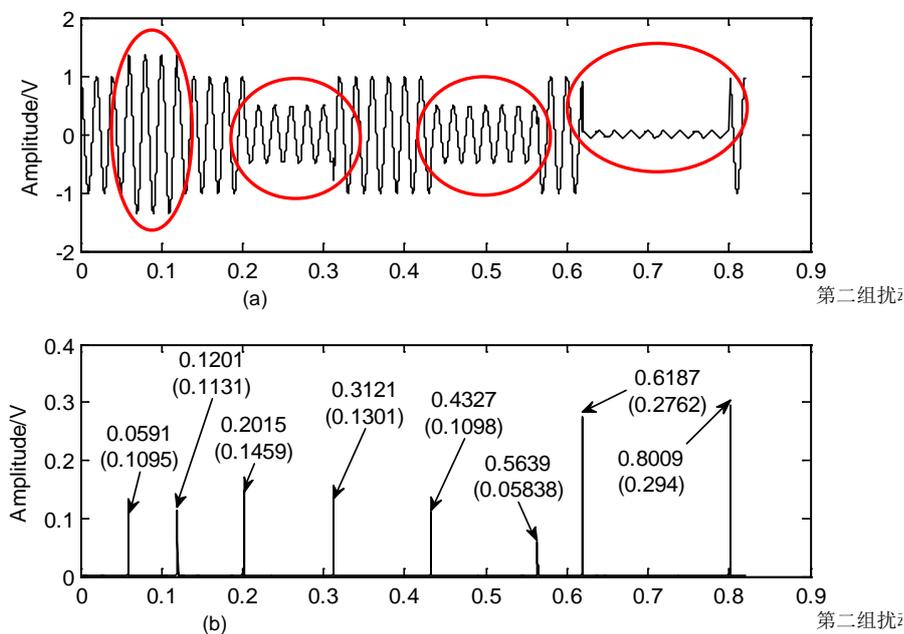


图 7 复合暂态事件仿真信号的扰动识别结果

Fig.7 Analysis results of simulated signals of compound transient events

对上图 7 中的分析结果进行整理, 得到详细数据对比分析如下表 1 所示:

表 1 复合暂态事件仿真信号的分析结果数据对比

Table 1 Data comparison for Analysis results of simulated signals of compound transient events

仿真信号	电压暂升		电压暂降 1		电压暂降 2		短时电压中断	
	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)
	0.0592	0.1202	0.2015	0.3121	0.4327	0.5639	0.6187	0.8009
定位点	0.0591	0.1201	0.2015	0.3121	0.4327	0.5639	0.6187	0.8009
幅值	0.1095	0.1131	0.1459	0.1301	0.1098	0.05838	0.2762	0.294

对图 7 以及表 1 中的结果进行分析可知:应用提升小波和模极大值法可以有效实现对复合暂态事件的扰动识别。另外,结合该复合仿真信号的三点特点,可得相关结论如下:

(1) 对于信号①和信号④,其开始时间的定位幅值均小于结束时间的定位点幅值,即 $0.1095 < 0.1131$; $0.2762 < 0.294$ 。考虑到两者的扰动开始时间相较结束时间均更远离于正弦波峰值点的特点,可验证实例分析一中“当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小”的结论。

(2) 对于信号②和信号③,两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 的定位点幅值依次为 0.1459, 0.1301, 0.1098, 0.05838, 呈现出逐渐减小的特点。考虑到两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 呈现出由正弦波的峰值点向过零点逐渐变化的特点,亦可验证实例分析一中“当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小”的结论;

(3) 对于信号①、②、③和④,四者扰动时间的定位点幅值无规律性变化。虽然四者的扰动时间相对正弦波峰值点的距离由近及远依次为:①>④>②>③,但其定位点幅值并无该趋势变化,这主要是由四者对应的暂态事件的类型不同所致,由此可验证实例分析一中“电能质量暂态事件的类型对定位点的小波模极大值的幅值大小有影响”的结论。

4. 结论

在本文中,采用提升小波结合模极大值的方法来对电能质量暂态事件中的扰动识别问题进行分析。同时,基于扰动起止时间在扰动检测中的重要性,特别针对扰动起止时间这一敏感因素对扰动识别结果的影响进行了探讨性研究。通过本文中的仿真实例以及其他大量类似的仿真实验,可得到两点初步结论:结论一为电能质量暂态事件的类型对扰动定位的精度没有影响,而仅对定位点的小波模极大值的幅值大小有影响;结论二为扰动起止时间的变化可使定位点的小波模极大值呈现出规律性的变化,即当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小;当扰动时间由正弦波过零点向峰值点变化时,被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变大。由结论二可知,发生时刻越接近正弦波过零点的扰动其小波模极大值将越小,因而相比发生时刻接近于正弦波峰值点的扰动更难以识别。

致谢

国家 973 基础研究计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61233016); 中国南方电网 2012 年科技项目(K-SZ2012-026)。

参考文献:

- [1] Stephane Mallat, Wen Liang Hwang. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Transactions on Information Theory. 1992. 38 (2): 617-643.
- [2] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] A. M. Gaouda, S. H. Kanoun, M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani. Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution. 2002, 149(3): 310-318, May.
- [4] G. Brodzinski, R. J. Rak, A. Majkowski. Classification of disturbances in power systems based on wavelet decomposition and SVM neural network.[J] Przegląd elektrotechniczny. 2009, 85(2): 165-170.
- [4] 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.
- [6] 耿云玲. 电能质量扰动分析中小波变换应用研究[D]. 湖南大学. 2006.
- [7] 王洪梅. 基于小波变换模极大值的电能质量信号检测研究[D]. 浙江大学. 2006.
- [8] W. Z. Gao, J. X. Ning. Wavelet-based disturbance analysis for power system wide-area monitoring[J]. IEEE Trans. on Smart Grid. 2011, 1: 121-130.
- [9] W. Sweldens. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelet[J]. Appl.and Comput Harmonic Analysis. 1996, 3(2): 186-200.
- [10] W. Sweldens. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet constructions[J]. SIAM J. Math. Anal. 1997, 29(2): 511-546.
- [11] 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. 2007, 4(4): 56-59.
- [12] 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.
- [13] 许童羽, 朴在林, 陈春玲. 希尔伯特变换与小波去噪提高暂态电能质量扰动检测与定位精度[J]. 农业工程学报. 2012, 28(19): 150-155.
- [14] Daubechies, I.; Sweldens, W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. J. Fourier. Anal.Appl. 1998, 4, 247-269.

张华赢(1981), 男, 黑龙江大庆人, 硕士, 主要从事电能质量技术研究和管理工作的。(Tel):

0755-88933173。(e-mail): zhyszpower@163.com。

阳子婧 (1984), 女, 湖南湘潭人, 博士后, 主要从事信号处理、数据挖掘技术及其在电力系统中的应用研究。(Tel): 010-62797752。(e-mail): zijing396@sina.com。

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

王淼 (1977), 男, 山西侯马人, 硕士, 工程师, 主要从事软件工程、智能电网和电能质量研究。