DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 4729.2016.01.015

基于小波理论的电力系统谐波检测方法

雷景生, 郝珈玮

(上海电力学院 计算机科学与技术学院, 上海 200090)

摘 要:提出了对电力系统中稳态谐波和暂态谐波的不同检测方法. 阐明了小波理论的基本原理,对复合信号进行了小波变换和小波包变换的仿真分析和比较. 仿真结果表明,对稳态谐波检测时适合采用小波变换,对暂态谐波检测时适合采用小波包变换.

关键词:小波变换; Mallat 算法; 小波包变换; 电力系统; 谐波检测

中图分类号:TM935;TM76 **文献标志码**:A **文章编号**: 1006 - 4729(2016)01 - 0066 - 07

Detection of Harmonic in Power System Based on Wavelet Theory

LEI Jingsheng, HAO Jiawei

(*School of Computer and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: In power systems, different detection methods in terms of stationary harmonic and the different duration are proposed. The principles of wavelet theory are presented. According to the simulation, stationary harmonics detected by wavelet transform are more applicable than wavelet packet transform, while the result of the detection on transient harmonics by wavelet packet transform is better than wavelet transform. Using wavelet transform for stationary harmonic detection and wavelet packet transform for transient harmonic detection is feasible.

Key words: wavelet transform; Mallat algorithm; wavelet packet transform; power system; harmonic detection

近年来,随着电力产业的不断发展壮大,电力系统中大功率电力电子器件以及非线性元件的应用也日益增多,导致系统中的谐波污染越来越严重,缩短了电网中元器件的使用寿命,造成继电保护装置的误动作,严重危害电网的安全运行[1-4]. 因此,对电网谐波的治理有着很明显的社会经济效益.

对谐波的检测是电网谐波治理的基础和前提. 传统的谐波检测方法有傅里叶变换和短时傅里叶变换两种[5-8]. 傅里叶变换的方法较为成熟,它利用离散傅里叶变换将离散的时间信号转换到频域中,其缺点是只适用于分析平稳信号,对非平稳信号分析效果欠佳;对信号的奇异性不敏感;对时域内无分辨能力[5-6]. 短时傅里叶变换通过添加一个窗口函数解决了傅里叶变换局部时间分析的不足,但仍然无法很好地分析非平稳信号[1-2].

小波理论是 20 世纪数学界调和分析领域最大的成就[7],它成功克服了傅里叶变换的不

收稿日期: 2015 - 04 - 28

通讯作者简介:郝珈玮(1990 -),男,在读硕士,山西吕梁人. 主要研究方向为电力监测无线传感器网络. E-mail: haojiaweiok@163.com.

足[9-12].基于小波理论的小波变换和小波包变换两种变换方法,很多文献中都不同程度地提到了其在电力系统谐波分析中的应用,但并没有将两者在分析稳态谐波和暂态谐波时的优劣作出明确的比较,文献[6]仅在前言部分略有提及.本文对同一个信号进行了两种变换,进一步分解到各层的波形,并进行分析和比较.考虑到各子带的小波系数仅是时间信号,不是频谱,并不能很好地体现出各子带的频率成分,于是将分解后各子带的时间信号均作了快速傅里叶变换.

1 基于离散小波变换的谐波检测法

1.1 离散小波变换

小波变换对瞬态信号比较敏感,可用于对电力系统中复杂信号的分析,在工程实际中用计算机进行信号处理时,常用到离散小波变换.通过将小波系数取级数的形式实现离散化,即:$a=a_0^j$,$b=ka_0^jb_0, k\in Z$.为了方便起见,假设 $a_0>1$,对应的离散小波为 $\psi_{j,k}(n)=a_0^{-\frac{j}{2}}\psi(a_0^{-j}n-kb_0)$,信号 $x(n)$ 的离散小波变换系数为:

$$C_{j,k}=\int_{-\infty}^{+\infty}x(n)\bar{\psi}_{j,k}(n)\mathrm{d}n$$

在电力系统谐波分析中,信号 $x(n)$ 是由采样得到的,也是以离散的形式出现的.通常令 $a_0=2$,$b_0=1$,对尺度和偏移进行二进离散,即 $a=2^j$,$b=2^jk, j,k\in Z$.从而得到如下二进小波[13]:

$$\psi_{j,k}(n)=2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^{-j}n-k)$$

1.2 Mallat 算法

Mallat 算法将多分辨分析引入了小波理论,该算法在小波分析中的作用相当于快速傅里叶变换在傅里叶分析中的作用[13].在用离散小波变换对谐波进行分析时,正是用到了 Mallat 算法的多分辨分析的特点.通过算子与谐波信号的卷积,实现了信号的分解与重构,从而达到检测的目的.

谐波分解算法为:

$$A_0[x(n)]=x(n)$$

$$A_j[x(n)]=\sum_k H(2n-k)A_{j-1}[x(n)]$$

$$D_j[x(n)]=\sum_k G(2n-k)A_{j-1}[x(n)]$$

式中:$x(n)$——待分析谐波,$n=1,2,3,\cdots,N$;

j——分解层数,$j=1,2,3,\cdots,J, J=\log_2 N$;

A_j——小波系数的近似部分,表示谐波信号的低频部分;

D_j——小波系数的细节部分,表示谐波信号的高频部分.

与分解对应的重构算法为[7]:

$$A_j[x(n)]=2\left\{\sum_k h(2n-k)A_{j+1}[x(n)]+\sum_k g(2n-k)D_{j+1}[x(n)]\right\}$$

式中:$j=J-1,J-2,J-3,\cdots,1,0$.

2 基于小波包变换的谐波检测法

小波变换分解算法对谐波信号的高频分析不够精确,而通过小波包变换正可以弥补这一缺陷.

对谐波信号的二进小波包分解可表示为:

$$p_0^1(n)=x(n)$$

$$p_j^{2i-1}=\sum_k H(k-2n)p_{j-1}^i(n)$$

$$p_j^{2i}=\sum_k G(k-2n)p_{j-1}^i(n)$$

式中:$p_j^i(n)$——第 j 层的第 i 个小波包,表示一个频率段中的谐波成分,$j=1,2,3,\cdots,J$;$i=2^0,2^1,2^2,\cdots,2^j$.

与分解对应的快速重构算法为[13]:

$$p_j^i(n)=2\left[\sum_k h(n-2k)p_{j+1}^{2i-1}(n)+\sum_k g(n-2k)p_{j+1}^{2i}(n)\right]$$

式中:$j=J-1,J-2,J-3,\cdots,1,0$;

$i=2^j,2^{j-1},2^{j-2},\cdots,2,1$.

3 仿真实验及分析

运用小波变换和小波包变换分别对掺杂了稳态谐波 f_a 和暂态谐波 f_b 的复合信号进行分析,[10-11]并对两种变换结果进行比较.

复合信号记做 F,且 $F=f_a+f_b$.其中,稳态谐波 f_a 由 5 个频率组成,即:

$$f_a=\frac{1}{2}\sin(2\pi f_1t)+\frac{2}{5}\sin(2\pi f_2t)+\sin(2\pi f_3t)+\frac{3}{10}\sin(2\pi f_4t)+\frac{1}{5}\sin(2\pi f_5t)$$

式中:f_3——基频分量;

f_1,f_2,f_4,f_5——间谐波.

在仿真实验中,以上 5 个频率的取值分别为

$f_1 = 15$ Hz, $f_2 = 30$ Hz, $f_3 = 60$ Hz, $f_4 = 80$ Hz, $f_5 = 120$ Hz.

暂态谐波 f_b 由 3 个频率组成,即:

$$f_b = \frac{3}{10}\sin(2\pi f_6 t) + \frac{3}{10}\sin(2\pi f_7 t) + \frac{1}{5}\sin(2\pi f_8 t)$$

实验中,3 个频率的取值分别为 $f_6 = 130$ Hz, $f_7 = 160$ Hz, $f_8 = 180$ Hz.

以 400 Hz 的采样频率,采集 2 048 个点,即稳态谐波信号 f_a 的维持时间为 $t \in [0 \sim 5.12\ \text{s}]$. 在第 101 个采样点到第 120 个采样点,加入暂态谐波信号,即 f_b 维持时间为 $t \in [0.25 \sim 0.3\ \text{s}]$.

在 Matlab 仿真平台上,选用 Daubechies45 (db45)小波对信号 F 进行 3 层小波分解和小波包分解(小波包分解时采用 shannon 熵). 对每层分解得到的小波系数做快速傅里叶变换[14],得到频谱图,以便于比较.

信号 F 的时域图像如图 1 所示.

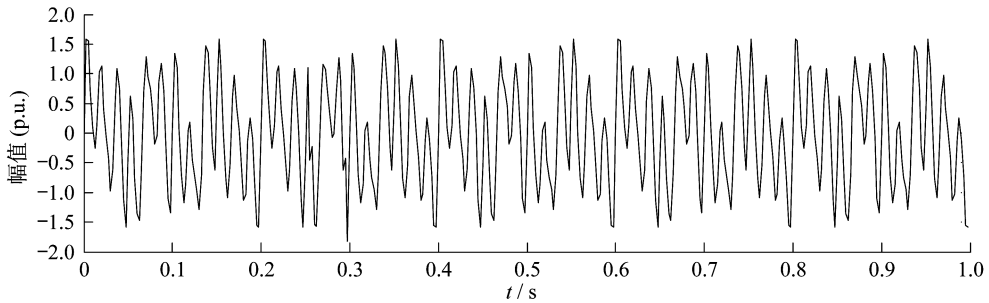


图 1 信号 F 的时域图像

由图 1 可以看出,信号 F 在 $t = 0.25$ s 时幅值达到负向最大.

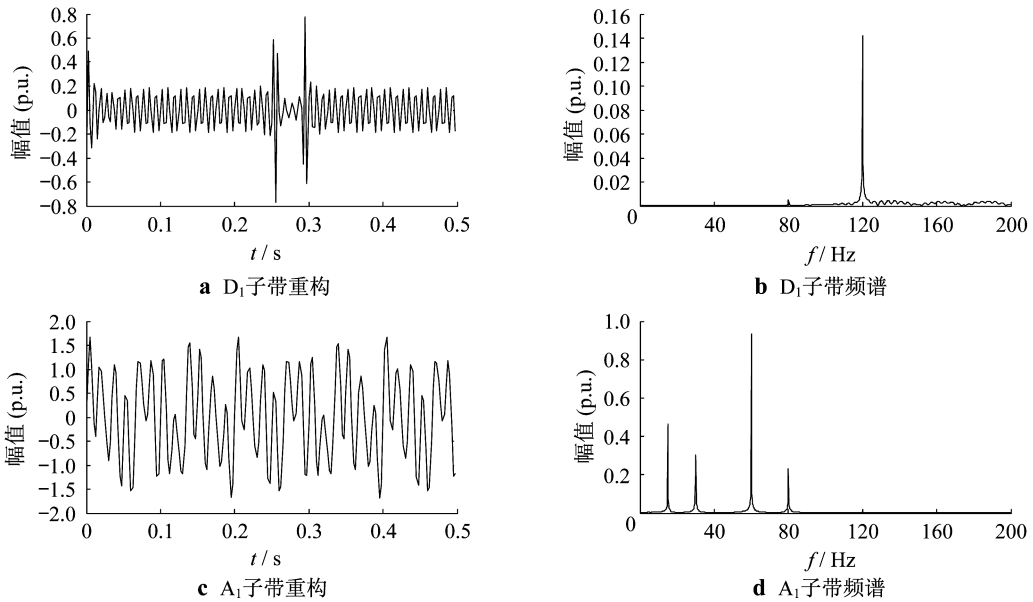
3.1 小波变换分解

根据对小波变换的理论分析,以 400 Hz 采样频率,分解 3 层,理论上可得到各子带的成分如表 1 所示.

表 1 小波分解各子带理论频率 Hz

层	a	b
1	15,30,60,80	120,130,160,180
2	15,30	60,80
3	15	30

实际分解结果如图 2,图 3,图 4 所示.



a D_1子带重构 **b** D_1子带频谱

c A_1子带重构 **d** A_1子带频谱

图 2 2^1 尺度子带重构及其频谱

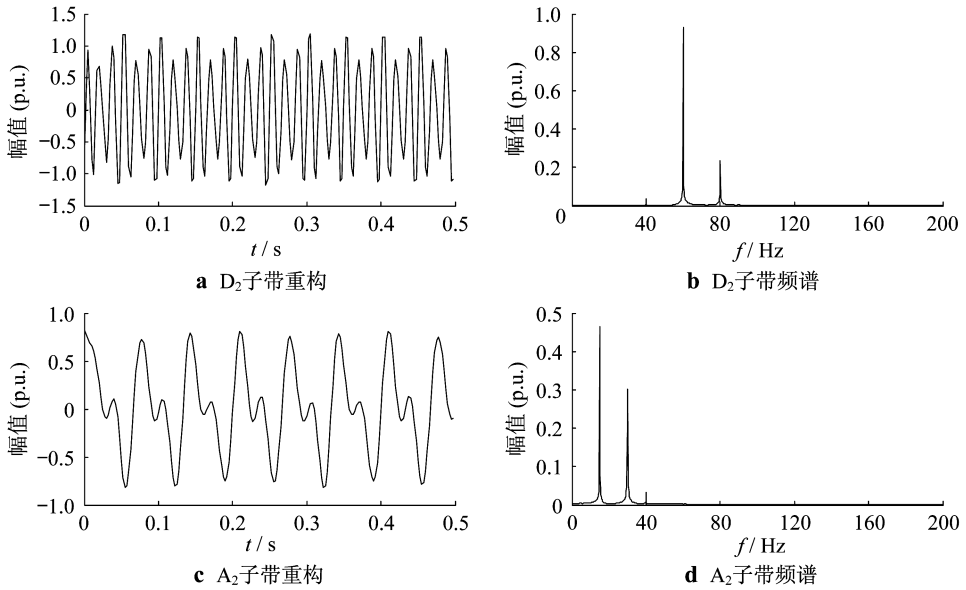


图 3 2^2 尺度子带重构及其频谱

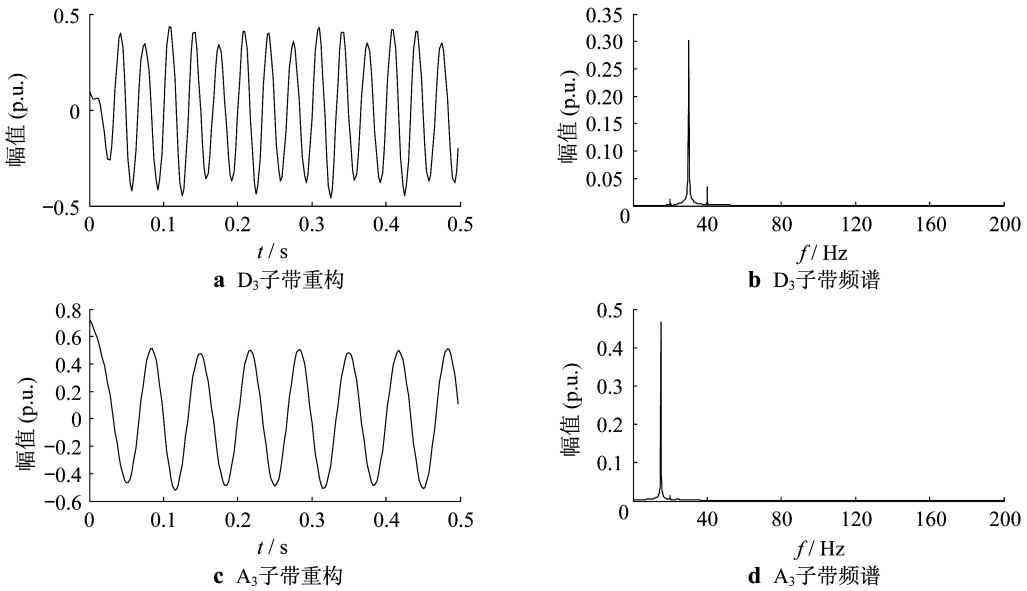


图 4 2^3 尺度子带重构及其频谱

综合图 2,图 3,图 4 可以看出,经过快速傅里叶变换后有 5 个频率存在,且均属于稳态谐波 f_a,除了图 2 的细节子带(D_1),其余信息都与表 1 中的理论分析吻合. 再仔细观察 D_1,从时域图像可以明显看出在 $t \in [0.25 \sim 0.3\ \text{s}]$期间,振幅波动很大,这是由于噪声的存在,即暂态谐波 f_b,但在相应的频谱图中却没有检测到. 这是由小波变换的原理决定的,Mallat 算法每次对信号进行分解后都会丢弃细节部分(如 D_1 子带),而继续分解近似部分(如 A_1 子带),从而造成了信息的丢失,这是小波变换的一个缺陷. 由此可见,小波变换对于稳态谐波的分解可以达到要求,但对于暂态谐波却效果欠佳.

3.2 小波包变换分解

小波分解仅仅分解信号的低频子带部分,而对高频子带不再进行分解. 小波包分解则是借助小波滤波器在各个尺度上对每个子带均进行再次降半划分,从而得到比小波分解更精细的结果[15-16]. 本文应用小波包分解可以对包括 D_1 子

带在内的各高频子带进行更细致的划分.

按照小波包分解理论,以 400 Hz 采样频率,分解 3 层,第 3 层各子带成分如表 2 所示.

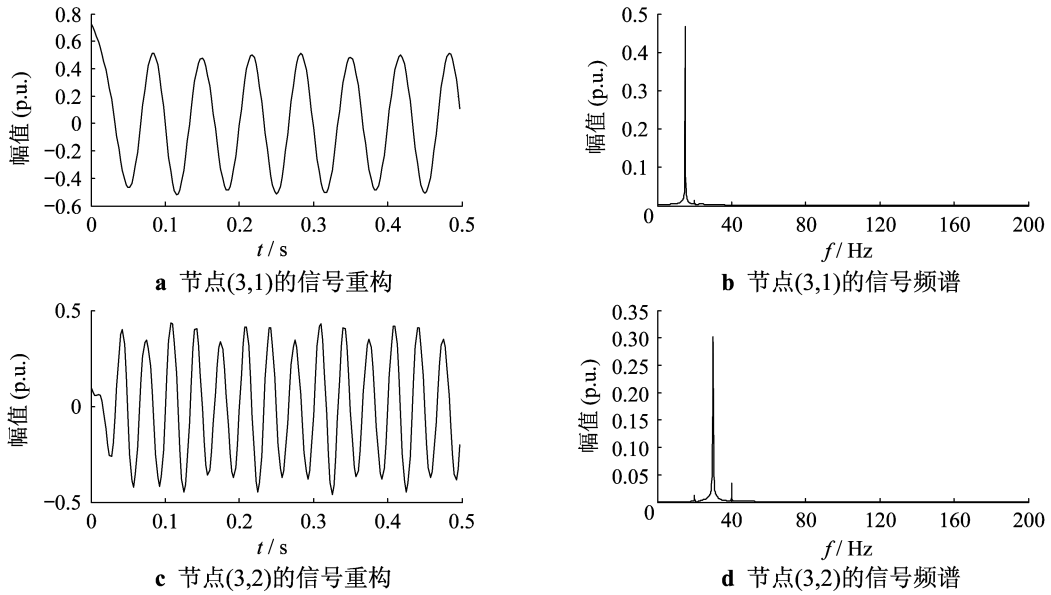
表 2 小波包分解各节点理论频率 Hz

理论节点	频率	理论节点	频率
(3,1)	15	(3,5)	120
(3,2)	30	(3,6)	130
(3,3)	60	(3,7)	160
(3,4)	80	(3,8)	180

实际分解结果如图 5 至图 8 所示.

通过对图 5 至图 8 的分析可以得出以下结论.

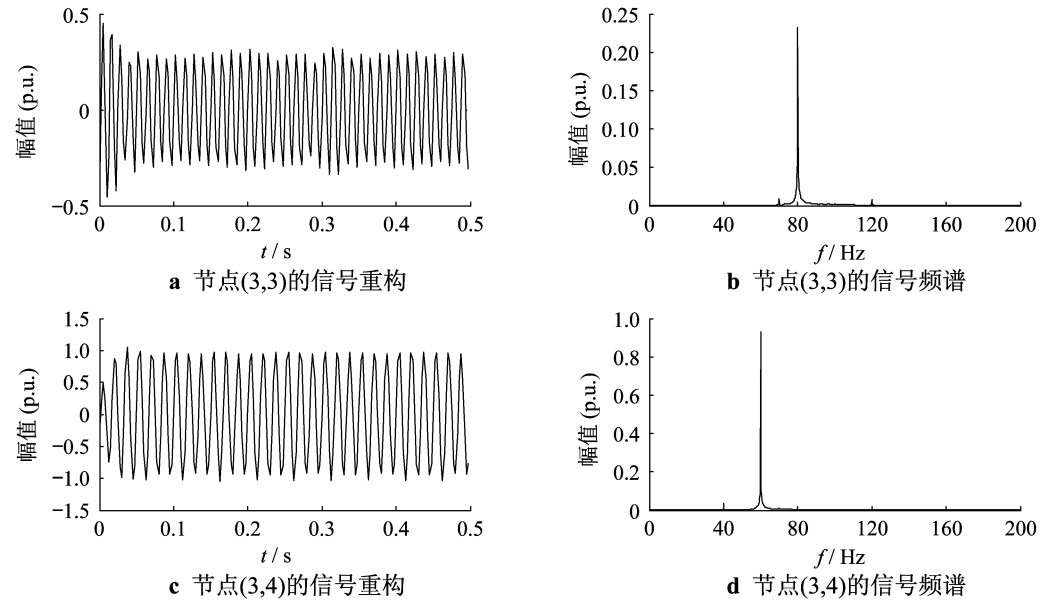
(1) 除了图 5 外,图 6 至图 8 中都出现了频带的交错,各节点处的频率并不是按照表 2 中分布的. 这不是一个偶然现象,而是由算法本身所决定的,其根本原因是隔点插零与各点采样[15-16]. 重构后虽然有频带交错,个别图像有频率的混淆,但各频带的频率成分还是正确的.



a 节点(3,1)的信号重构 **b** 节点(3,1)的信号频谱

c 节点(3,2)的信号重构 **d** 节点(3,2)的信号频谱

图 5 节点(3,1)和节点(3,2)的信号重构及其频谱



a 节点(3,3)的信号重构 **b** 节点(3,3)的信号频谱

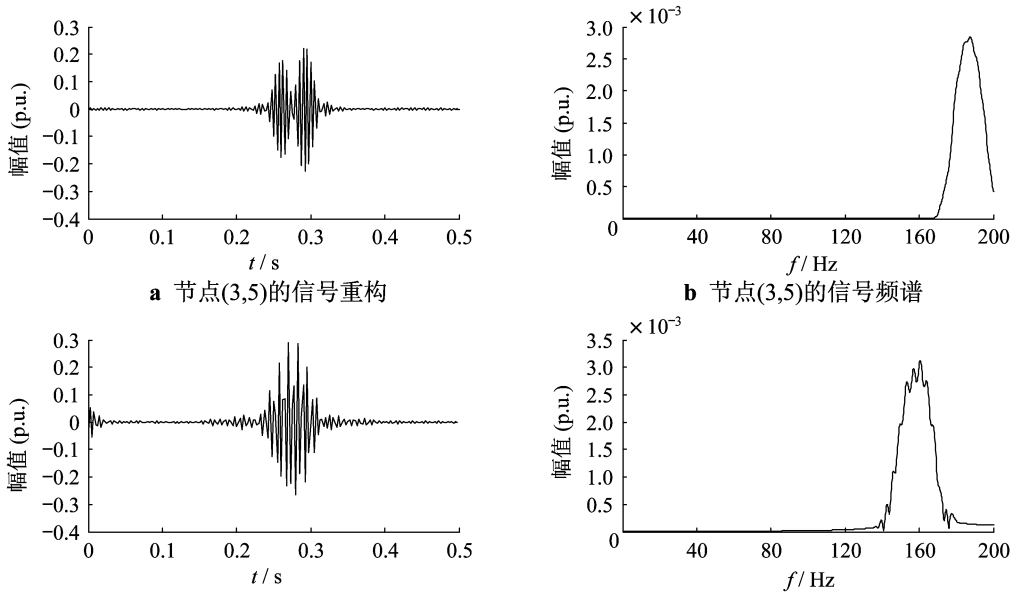
c 节点(3,4)的信号重构 **d** 节点(3,4)的信号频谱

图 6 节点(3,3)和节点(3,4)的信号重构及其频谱

(2) 图5和图6中的4个节点处信号均属于稳态谐波 f_a,频谱分析频率成分也与图2至图4相一致. 图7中,从节点(3,5)和节点(3,6)的时域信号可以看出,在 $t\in[0.25\sim0.3\ \mathrm{s}]$ 内,振幅波动较大,其余时间段振幅基本为零,这符合暂态谐波 f_b 的存在时间. 从频谱图中可以看到节点(3,5)处的频率为180 Hz,节点(3,6)处的频率为160 Hz,检测出了暂态谐波中的这两个频率.

(3) 图8中,节点(3,7)处成分为120 Hz,属于稳态谐波 f_a. 对于节点(3,8),时域图像虽然在 $t\in[0.25\sim0.3\ \mathrm{s}]$ 内振幅较大,但在其余时间的振幅较图7中略大一些. 这个现象在节点(3,8)的频谱图中也有所体现,即除一个明显的尖峰外还有许多小的"毛刺". 图像显示尖峰的频率为130 Hz,属于暂态谐波 f_b. 可见,小波包变换不仅可以分析出稳态谐波中的频率成分,也可以检测到暂态谐波中的成分.

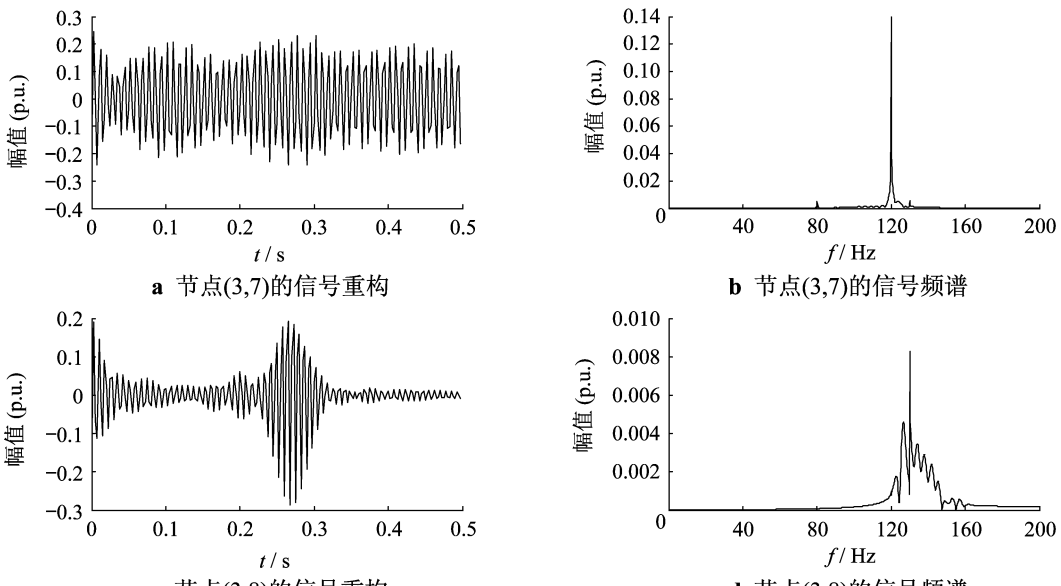
通过仿真可以得知,对于稳态谐波,两种方法都可以很好地检测出各频率成分;对于暂态谐波,小波包分解效果更好.



a 节点(3,5)的信号重构 **b** 节点(3,5)的信号频谱

c 节点(3,6)的信号重构 **d** 节点(3,6)的信号频谱

图7 节点(3,5)和节点(3,6)的信号重构及其频谱



a 节点(3,7)的信号重构 **b** 节点(3,7)的信号频谱

c 节点(3,8)的信号重构 **d** 节点(3,8)的信号频谱

图8 节点(3,7)和节点(3,8)的信号重构及其频谱

4 结 语

本文采用小波变换和小波包变换,对含有稳态谐波和暂态谐波的复合信号进行了仿真分解.仿真实验发现,小波包变换的过程较小波变换更复杂,计算实现方面也更繁琐.两种方法都可用于稳态信号的分析,但对于暂态谐波来说,小波变换很有可能捕捉不到其全部信息.因此,稳态谐波可用于对小波变换的分析,而对于暂态谐波则采用小波包变换效果更好.本文的仿真结果很好地证明了这些结论,对工程实际中的谐波检测有一定的指导作用.

参考文献:

[1] 何智龙,苏娟,覃芳. db20 和 db3 小波变换的电力系统谐波联合分析[J]. 智能电网,2015(2):129-132.

[2] 陈吉,商红桃. 小波包变换及其在电力系统谐波电流检测中的应用[J]. 现代电子技术,2015(5):62-63.

[3] 陈方超,汝晓鹏,申江江. 小波分析在电力系统谐波处理中的应用[J]. 电子设计工程,2015(3):100-103.

[4] 曾瑞江,杨震斌,柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012(15):35-39.

[5] 胡敏,张海燕,奚思建. 两种典型的谐波检测方法的比较[J]. 中国科技信息,2015(2):160-161.

[6] 刘蓉晖. 基于小波包变换的电力系统谐波检测[J]. 上海电力学院学报,2011(4):337-340.

[7] 许珉,程兴民. 基于单子带重构改进小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力自动化设备,2008(9):10-14.

[8] 朱翔,解大,高强,等. 基于 FFT 和 db20 小波变换的电力系统谐波联合分析策略[J]. 电力系统保护与控制,2012(12):62-65.

[9] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平,杨万年,译. 北京:国防工业出版社,2004:9-14.

[10] 何湘黔,陈华浦. 电力系统电能质量检测研究综述[J]. 电气制造,2013(12):50-52.

[11] 熊杰锋,李群,袁晓冬,等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化,2013(11):125-133.

[12] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:26-64.

[13] 房国志,杨超,赵洪. 基于 FFT 和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2012(5):75-79.

[14] KEAOCHANTRANOND T, BOONSENG C. Harmonies and inter-harmonics estimation using wavelet transform[C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002. Aisa Pacific, IEEE/PES. Japan: Yokohama, 2002: 775-779.

[15] 许飞鸿,苏深坚,李平. 消除小波分析中频率混叠现象的改进算法的 Matlab 实现[C]//中国机械工程学会设备与维修工程分会. 第八届全国设备与维修工程学术会议、第十三届全国设备监测与诊断学术会议论文集,2008:7.

[16] 郭超峰,李梅莲. Mallat 算法频率混叠原因及其改进模型[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版,2007(4):511-514.

(编辑 白林雪)

(上接第 55 页)

[J]. 物流技术,2010(21):114-116.

[5] 王建军. 煤炭企业供应链风险管理初探[J]. 煤炭经济研究,2013(1):73-76.

[6] 王冬冬. 煤炭供应链风险分析与管控研究[J]. 煤炭技术,2013(2):270-272.

[7] 王博,游大海,尹项根,等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评估体系[J]. 电网技术,2011(1):40-45.

[8] 王博. 复杂电力系统安全风险及脆弱性评估方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[9] 金菊良,魏一鸣,付强,等. 层次分析法在水环境系统工程中的应用[J]. 水科学进展,2002(4):467-472.

(编辑 白林雪)