

小波变换与傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法

薛蕙 罗红

(中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要 结合小波变换良好的时频局部化特性和傅里叶变换良好的频域分析特性,提出小波变换与傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法。利用傅里叶变换和静态小波变换得到被测信号频域特性和时域特性,再结合连续小波变换得到暂态谐波的时频特性。理论分析和仿真试验结果表明,利用本方法得到的暂态谐波幅值与理论值一致。本方法能够准确分析电网中的暂态谐波,可为电力系统暂态谐波的分析和治理提供依据。

关键词 暂态谐波;傅里叶变换;静态小波变换;连续小波变换

中图分类号 TM711

文章编号 1007-4333(2007)06-0089-04

文献标识码 A

Transient harmonic analysis algorithm using wavelet transform and Fourier transform

Xue Hui, Luo Hong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract This paper presents a novel algorithm to analyze transient harmonics. The algorithm combines the merits of wavelet transform and FFT transform. The frequency character of the sampled signal was obtained using FFT transform and the time domain character of the sampled signal was obtained using Stationary Wavelet Transform. Then the time-frequency character of transient harmonics was obtained using continuous wavelet transform. Theoretical analysis and simulation results validated that the algorithm presented in the paper could be used for precise transient harmonic analysis in power system.

Key words transient harmonic; Fourier transform; stationary wavelet transform (SWT); continuous wavelet transform (CWT)

随着电力系统非线性负荷的不断增多,电网中暂态谐波含量大大增加。这些暂态谐波已经对电网造成了不可忽视的危险。一般来说暂态谐波的能量都是有限的、非稳定的,分析和识别这类谐波信号时,需要该信号在时域和频域的局部信息,或了解该信号的时-频平面结构^[1-2]。基于傅里叶变换的谐波分析方法建立在信号平稳的假设基础之上,不适合分析暂态谐波。小波变换具有良好的时频局部化特性,理论上可以用来分析暂态谐波。目前国内外已经有一些文献在小波变换应用于谐波分析领域做了探索性研究和有益的尝试^[3-9],但是小波变换存在频

域混叠误差,导致谐波分析的精度不高^[3]。有些研究通过选用分频严格的小波函数来抑制小波变换的频域混叠误差,但是分频严格、能量集中的小波函数很难构造;有些研究利用连续小波变换和离散小波变换来分析谐波^[4-5],但就其本质而言,还是通过连续小波变换的尺度确定谐波频率,利用连续小波变换系数的幅值确定多分辨分析中一个子频带的谐波大小;还有些研究利用补偿插值来抑制小波变换的频域混叠误差^[6-7],但该方法计算量大、谐波次数检测精度低、谐波幅值检测受滤波器频率响应特性影响较大。文献[8]通过复小波变换相位信息实现谐

收稿日期:2007-03-23

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAJ04B06);中国农业大学科研启动基金项目(2006023)

作者简介:薛蕙,副教授,主要从事电力系统谐波、电能质量分析和检测和小波在电力系统中的应用研究,E-mail: xue.huicn@yahoo.com.cn

波检测,但是相位对于噪声非常敏感,而实际系统中不可避免存在一定噪声,因此该方法未得到广泛应用。

本研究结合小波变换良好的时频局部化特性和傅里叶变换良好的频域分析特性,提出小波变换与傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法,旨在为电网中暂态谐波的研究和治理提供依据。

1 小波变换和傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法

1.1 利用傅里叶变换得到信号的频域特性

傅里叶变换所得到的频谱是对信号在时间轴上做统计平均得到的结果,具有统计平均意义,不具备时间局部性,因此傅里叶变换只适用于确定的稳态谐波分析,对非平稳的暂态谐波信号难以充分描述。

例1 基波频率为50 Hz,每个基波周期采样64点,采样时间为9个基波周期,在采样的第4~6个周期出现幅值为基波幅值50%的3次谐波含量,在采样的第5~7个周期出现幅值为基波幅值30%的5次谐波含量。采样信号的时域波形见图1(a),其傅里叶变换谱图见图1(b)。可以看出,虽然信号的傅里叶变换谱图表明,信号含有3次和5次谐波分量,但是这些谐波分量的时域特性已经完全丢失;另外根据傅里叶变换结果得到的3次谐波的幅值是基波幅值的16.7%,5次谐波的幅值是基波幅值的

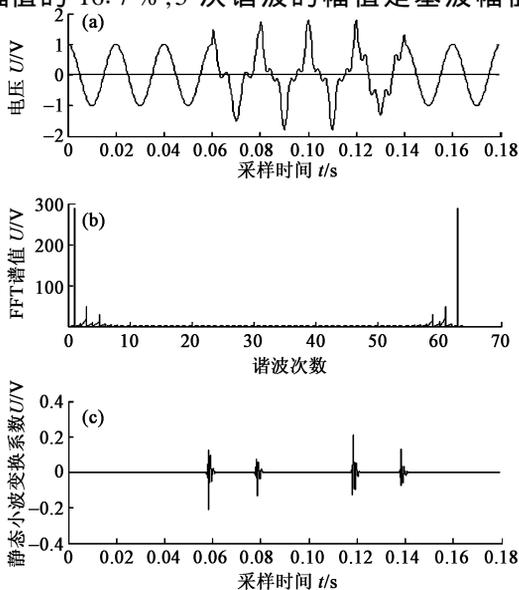


图1 采样信号波形(a)及其傅立叶变换结果(b)和静态小波变换结果(c)

Fig. 1 Sampled signal (a) and its FFT results (b) and Swt results (c)

10.0%,与实际的谐波幅值相差很大。因此利用傅里叶变换得到的暂态谐波的幅值是错误的。

1.2 利用静态小波变换得到信号的时域特性^[10]

为了准确定位暂态谐波并得到准确的谐波幅值,本文中选用具有时移不变性特点的静态小波变换定位暂态谐波。由于对静态小波变换后的近似系数和细节系数并没有进行向下采样,所以不会造成奇异点小波系数的丢失,因而能够准确定位电能质量扰动。以本文例1中的被测信号为例做静态小波变换,结果见图1(c)。可以看出,信号分别在0.06、0.08、0.12、0.14 s左右有突变,但这些突变点与暂态谐波的对关系还不明确,因此必须借助基于连续小波变换的谱图进一步研究突变点和暂态谐波的对关系。

1.3 利用连续小波变换分析暂态谐波的时频特性

为了明确突变点和暂态谐波的对关系,选用连续小波变换提取信号的时频特性。

将信号 $x(t)$ 的连续小波变换定义为

$$c_a(b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi((t-b)/a)} dt \quad (1)$$

式中: $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的共轭; a 和 b 分别为尺度因子和位移因子。由式(1)可以看出, $c_a(b)$ 等于信号 $x(t)$ 与小波函数 $\psi_a(t)$ 的卷积。位移因子 b 可以等效为时间参数 t , 因此得到

$$c_a(t) = x(t) * \psi(t/a) \quad (2)$$

时域的卷积对应频域的乘积关系, 因此得到

$$C_a(\omega) = X(\omega) \times \Psi(\omega/a) \quad (3)$$

式中: $C_a(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 、 $\Psi(\omega/a)$ 分别是 $c_a(t)$ 、 $x(t)$ 、 $\psi(t/a)$ 的傅里叶变换。

由式(2)和(3)可以看出,信号的连续小波变换相当于对信号做了时域和频域的滑动加窗处理,或者可以认为是通过了一个传递函数为 $\Psi(\omega/a)$ 的带通滤波器。选择不同的尺度因子 a , 相当于信号通过了不同的带通滤波器,这样就可以把不同频带的谐波信号分离开来。

对本文例1中的试验波形(图1)做连续小波变换得到的谱图见图2,可以大致看出信号中含有2个谐波分量,但是由于连续小波变换存在频域混叠和边界误差,只能大致确定暂态谐波的起止时刻及频域特性;因此必须结合静态小波变换和傅里叶变换来确定暂态谐波的时频特性;结合傅里叶变换可知这2个谐波分别是3次谐波和5次谐波;结合静态小波变换结果可知3次谐波的起止时刻约在第

0.06 和 0.12 s, 5 次谐波的起止时刻约在第 0.08 和 0.14 s, 明确了暂态谐波的起止时刻。暂态谐波的幅值由

$$A = A (t_{DW}/t_{DT}) \tag{4}$$

得到。式中: A 和 A 分别为暂态谐波的实际幅值和通过傅里叶变换得到的暂态谐波幅值, V ; t_{DW} 和 t_{DT} 分别是采样时间长度和暂态谐波实际长度, s。

通过式(4)得到的例 1 中信号的 3 次谐波的幅值是 50%, 5 次谐波的幅值是 30%, 与理论值一致。

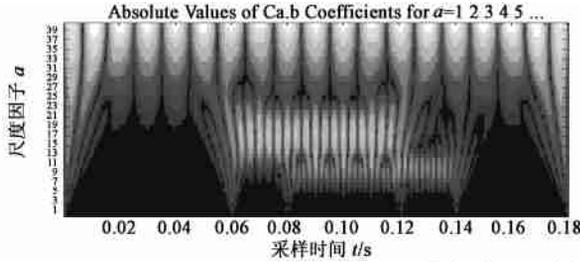


图 2 连续小波变换得到的谱图

Fig. 2 Continuous wavelet transform results

2 仿真试验

例 2 基波频率为 50 Hz, 每个基波周期采样 64 点, 采样时间为 9 个基波周期, 在采样的第 2~5 个周期出现幅值为基波幅值 50% 的 3 次谐波, 在采样的第 4~8 个周期出现幅值为基波幅值 30% 的 5 次谐波。仿真试验结果见图 3。

由图 3(b) 可以看出, 信号含有 3 次和 5 次谐波分量, 但是这些谐波分量的时域特性已经完全丢失; 根据傅里叶变换结果得到的 3 次谐波的幅值是 16.7%, 5 次谐波的幅值是 13.3%。结合图 3(c) 和 (d) 得到 3 次谐波的起止时刻分别是第 0.04 和 0.10 s, 5 次谐波的起止时刻分别是第 0.08 和 0.16 s。暂态谐波的幅值由式(4) 计算得到, 3 次和 5 次谐波的幅值分别是 50% 和 30%, 与理论值一致。

3 结 论

本文中针对暂态谐波的分析问题, 结合小波变换良好的时频局部化特性和傅里叶变换良好的频域分析特性, 提出小波变换与傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法。首先利用傅里叶变换和静态小波变换得到被测信号的频域特性和时域特性, 再结合连续小波变换得到暂态谐波的时频特性。理论分析和仿真试验结果表明, 本文中提出的小波变换与傅里叶变换相结合的暂态谐波分析方法能够准确分析

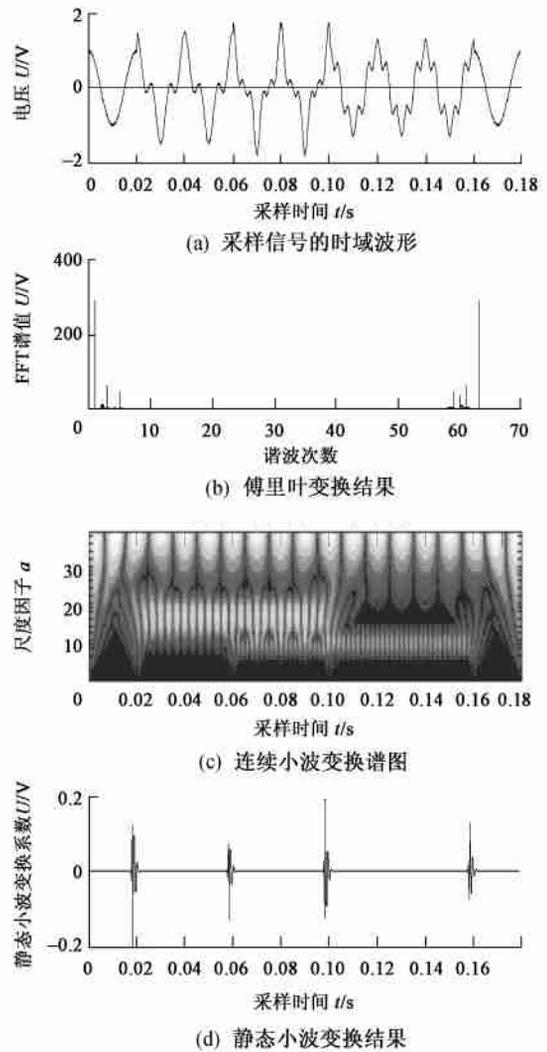


图 3 仿真试验结果

Fig. 3 Results of simulation: (a) sampled signal, (b) FFT results, (c) CWT spectrum, (d) SWT results

电网中的暂态谐波, 从而为电网中暂态谐波的研究和治理提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 林海雪. 公用电网谐波国标中的几个问题[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 65-70
- [2] Lazenby W H, Zivanovic R. Some observations on time varying harmonics and inter harmonic [C]. Africon 1999 IEEE, Cape Town, South Africa: IEEE. 1999, 2(2): 849-852
- [3] 王建曈, 冉启文, 纪延超. 谐波检测中小波变换频域特性分析. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 40-43
- [4] Pham V L, Wong K P. Wavelet-transform based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms [J]. IEE

- Proceedings. On Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 249-254
- [5] Pham V L, Wong K P. Antidistortion method for wavelet transform filter banks and non stationary power system waveform harmonic analysis [J]. IEE Proceedings. On Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 177-122
- [6] 杜天军, 陈光, 雷勇. 基于混叠补偿小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 54-59, 134
- [7] 杜天军, 陈光, 谢永乐, 等. 基于频域内插抗混叠 Shannon 小波包变换的谐波检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 14-19
- [8] 赵成勇, 何明锋. 基于复小波变换相位信息的谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 38-42
- [9] 周林, 夏雪, 万蕴杰, 等. 基于小波变换的谐波测量方法综述[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 67-74
- [10] 孟晋丽, 潘泉, 张洪才. 基于静态小波变换的提升框架分解. 计算机工程与应用, 2005, 41(6): 11-13

(上接 74 页)

- [5] Hall H E, Raper R L. Development and concept evaluation of an on-the-go soil strength measurement system [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(2): 469-477
- [6] Sun Yurui, Ma Daokun, Schulze Lammers, et al. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86: 209-217
- [7] Viscarra Rossel, Thylen L, Gilbertsson M, et al. Development of an on-the-go soil sensing system for determinations of soil pH and lime requirement [C]. The 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management. Minneapolis, Minnesota, USA, 2004 (July): 25-28
- [8] 马道坤. 车载式农田土壤水分、电导率、坚实度符合测量方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006