

基于 CWT 和 DWT 相结合的谐波检测

陈欢, 何怡刚, 肖建平, 刘茂旭, 王东楼

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 提出了一种基于连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)相结合的电力系统谐波检测方法。首先利用 CWT 系数的幅值来检测谐波频率, 该过程不用事先根据谐波次数确定分解层数, 而只是确定尺度范围及步长, 即可得出各次谐波频率。然后根据确定的谐波成分利用 DWT 来检测谐波幅值, 并通过 Matlab 软件进行了仿真分析。仿真结果表明该方法有效地解决了基于离散小波变换的谐波检测方法中谐波次数未知而无法确定分解层数的难题, 并能精确可靠检测各次谐波频率和相应的幅值。因此, CWT 和 DWT 相结合是一种有效的电力系统谐波检测方法。

关键词: 谐波检测; 小波变换; 连续小波变换; 离散小波变换

Harmonics detection based on a combination of continuous wavelet transform and discrete wavelet transform

CHEN Huan, HE Yigang, XIAO Jianping, LIU Maoxu, WANG Donglou

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A harmonic detection method based on a combination of continuous wavelet transform and discrete wavelet transform is proposed. Firstly, harmonic frequencies are detected by the magnitude of CWT coefficients with a determined scale range and step size, while need not determine the harmonic decomposition level according to the harmonic numbers in advance. And then the DWT method is used to detect harmonic amplitude according to identified harmonic components. Simulation results are completed by Matlab, which show the proposed method can solve the problem that a undetermined decomposition level according to unknown harmonic numbers effectively and can detect the harmonic frequencies and the corresponding amplitudes accurately and reliably. Therefore, this proposed method is a valid method to harmonic detection in power system.

This work is supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 50925727).

Key words: harmonic detection; wavelet transform; continuous wavelet transform (CWT); discrete wavelet transform (DWT)

中图分类号: TM714

文章编号: 1674-3415(2015)20-0071-05

0 引言

随着电力系统的不断发展, 尤其是电力电子设备在电力系统中的广泛应用, 带来的谐波污染问题也日益严重。谐波不仅会对用户端设备带来不良影响, 而且会增加输电线路的损耗以及干扰通信。因

此, 有效地抑制电力系统谐波具有显著的社会和经济效益^[1]。而精确可靠地检测出电力信号中的谐波含量, 是进行谐波抑制和补偿、改善电能质量的重要前提和基础。高精度快速谐波检测方法一直是国内外的研究热点问题^[2-3]。

目前, 已有不少的谐波检测方法^[4-6]。传统的基于快速傅里叶变换(FFT)的谐波检测方法是十分成熟并且应用最广的方法, 但是由于 FFT 在频域完全局部化而在时域完全无局部化, 而且存在频谱泄漏和栅栏效应等现象使检测精度降低^[6]。基于神经网络的谐波检测方法存在对训练样本依赖性强等难以

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50925727); 国防科技计划项目(C1120110004、9140A27020211DZ5102); 教育部科学技术研究重大项目(313018); 安徽省科技计划重点项目(1301022036)

克服的缺点^[7]。近些年来,小波变换由于其具有良好的时频局部化特性,在信号处理、图像压缩等众多领域取得广泛的应用,小波变换^[8]也为谐波检测提供了一种新的检测方法。

利用离散小波变换进行谐波分析时,在谐波成分未知的情况下,分解层数的选择对检测结果产生很大影响。一般分解层数的确定依靠不断尝试或经验公式获得,文献[9]依据经验公式确定分解层数,导致检测结果并不十分理想。文献[10]利用连续小波变换进行谐波分析,只检测出谐波频率,未检测谐波幅值。本文在文献[10]的基础上提出了一种将连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)相结合的谐波检测新方法,首先利用 CWT 检测信号中谐波频率,其最大的优势是不用事先根据谐波次数确定分解层数,而只是确定尺度范围及步长,然后在得到确定谐波成分的前提下,利用 DWT 检测各次谐波幅值,仿真结果证明了这种方法的准确性和可靠性。

1 基于CWT和DWT相结合的谐波检测原理

小波变换在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变但是其形状可变,同时时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其 Fourier 变换为 $\hat{\psi}(\omega)$, 当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件

$$C_{\psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(x)|^2}{|x|} dx < \infty \quad (1)$$

称为一个基本小波或母小波,将母函数 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后,可以得到一个小波序列。对于连续的情况,小波序列为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0) \quad (2)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

对于离散的情况,小波序列为

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (j, k \in \mathbb{Z}) \quad (4)$$

通常取 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$, 式(4)变为

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k) \quad (j, k \in \mathbb{Z}) \quad (5)$$

从信号处理的角度理解,小波变换相当于信号通过有限长度的带通滤波器,不同尺度的小波变换相当于不同通频带的带通滤波器,如果使不同频率的谐波位于不同的频带中,就能达到谐波检测的目的。

本文首先利用 CWT 检测谐波频率,采用 CWT 对电力信号进行处理,得到一系列的小波系数,对于频域内任一点 ω , 不同的小波系数对应不同的尺度,最大的小波系数对应的尺度称为特征尺度,此时的 ω 最接近特征尺度的中心频率,而中心频率就可以认为是待检测的谐波频率。因此找到尺度区间内小波系数的极大值,就能确定谐波成分。中心频率与尺度大小成反比,即尺度越大,对应的中心频率越小。

在确定信号所含的谐波成分后,利用 DWT 将信号分解成不同频段,根据频段的频率范围确定所含谐波成分,能比较直接地得到各次谐波幅值。若采样频率是 f_s , 则第一层分解后得到近似部分 a_1 : $0 \sim f_s/4$ 和细节部分 d_1 : $f_s/4 \sim f_s/2$; 接着将 a_1 进行第二层分解得到近似部分 a_2 : $0 \sim f_s/8$ 和细节部分 d_2 : $f_s/8 \sim f_s/4$; 接着将 a_2 进行第三层分解……若分解层数为 N , 则最后得到近似部分 a_N 和细节部分 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_N$, 即信号 $s = a_N + d_N + \dots + d_2 + d_1$ 。

2 仿真验证

2.1 整数次谐波检测

选取的仿真信号为

$$s = \sin(2\pi \times 50t) + 0.5 \times \sin(3 \times 2\pi \times 50t) + 0.4 \times \sin(5 \times 2\pi \times 50t) + 0.3 \times \sin(9 \times 2\pi \times 50t)$$

基频为 50 Hz, 由于一般电力信号中谐波的幅值随次数的增大而逐渐减小,所以本文选取常见的 3 次、5 次和 9 次谐波叠加在基频信号上作为仿真信号。初始信号的波形如图 1 所示,其中横坐标是采样时刻,纵坐标是幅值。

(1) 第一步:利用 CWT 检测谐波频率

选取的尺度范围为 1~32,步长为 0.1,即[1:0.1:32],采样时间为 0.02 s,采样频率为 3 200 Hz,采样点数为 64,因此采样间隔 $\Delta = 0.02/(64-1) = 0.00032$ 。对于选定的尺度和采样间隔,可以利用 scal2frq 函数得到不同尺度所对应的频率。尺度-频率曲线如图 2 所示,横坐标表示分解的尺度,纵坐标表示每个尺度所对应的频率。

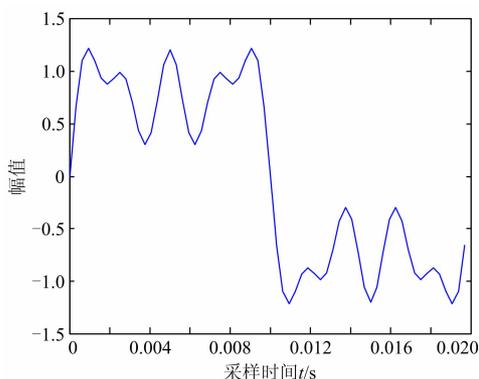


图 1 仿真信号 s 的时域波形

Fig. 1 Time-domain waveform of signal s

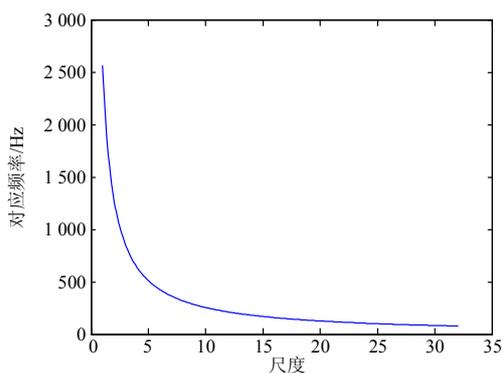


图 2 尺度-频率对应曲线

Fig. 2 Scales-frequency waveform

本文选用频域能量比较集中、通频带较窄、频率混叠影响较小、同时具有时域对称和线性相位的 Morlet 小波作为小波基, 以最大限度保证变换不失真, 利用 Matlab 里的小波分析工具箱, 对信号 s 进行连续小波变换, 分析结果如图 3 所示, 得到 311×64 的小波系数。找出每一行小波系数里的最大值 X_{\max} , 画出曲线如图 4 所示, 横坐标为 311 行, 对

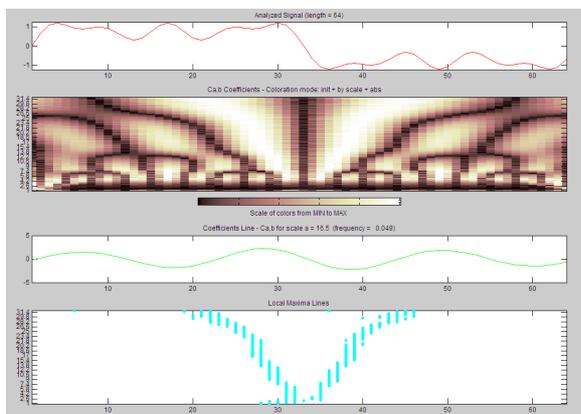


图 3 CWT 分析结果

Fig. 3 Results of continuous wavelet transform

应 311 个不同尺度, 纵坐标为每个尺度下的小波系数最大值。

从图 4 可以清楚看出曲线具有 3 个极大值点, 分别对应不同频率的谐波。检测结果如表 1 所示, 检测误差均小于 0.5%。

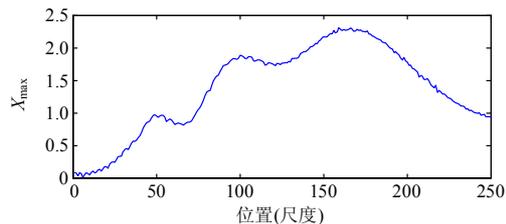


图 4 尺度-小波系数最大值 X_{\max} 对应曲线

Fig. 4 Corresponding curve of the scale and the maximum of wavelet coefficients X_{\max}

表 1 整数次谐波检测结果

Table 1 Results of integer harmonic detection

谐波次数	实际值	位置	尺度	测得值	误差
3	150	161	17.0	150.7	-0.46%
5	250	94	10.3	248.8	0.48%
9	450	48	5.7	449.6	0.08%

(2) 第二步: 利用 DWT 检测谐波幅值

由上述部分可以看出利用 CWT 可以比较精确地检测出谐波频率, 但是无法得出谐波幅值, 而谐波幅值也是需要检测出的重要的谐波参数。本文在确定谐波频率后, 利用 DWT 可以比较直接地检测出谐波幅值。

选取 db43 小波作为小波基, 设定采样频率为 3 200 Hz, 根据第一步确定的谐波成分选定分解层数为 $N=4$, 得到如表 2 所示的分解结果。DWT 分析结果如图 5 所示。从表 2 可以看出, 3 次、5 次和 9 次谐波分别位于 d_4 、 d_3 和 d_2 之中。从图 6 中可

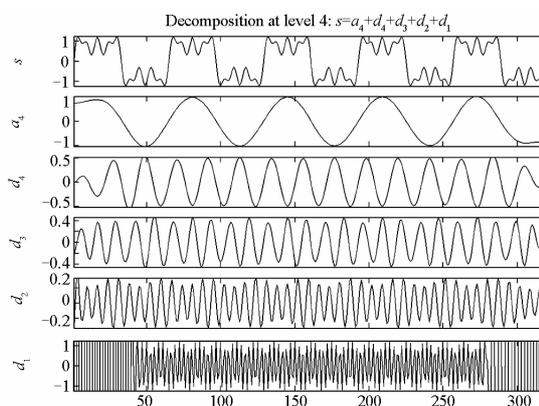


图 5 DWT 分解结果

Fig. 5 Results of discrete wavelet transform

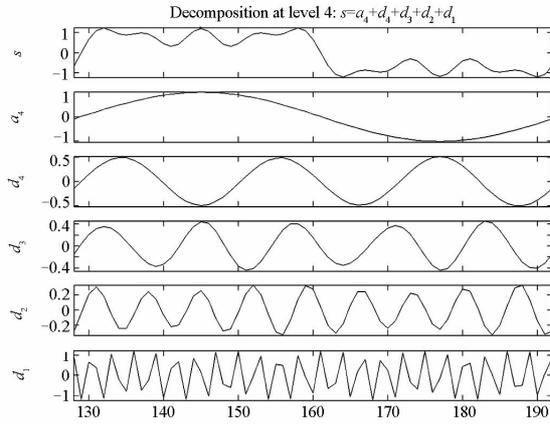


图 6 图 5 局部放大示意图

Fig. 6 Enlarged schematic of Figure 5

表 2 DWT 分解结果

Table 2 Decomposition results of discrete wavelet transform

分解层次	频带/Hz
d_1	800~1 600
d_2	400~800
d_3	200~400
d_4	100~200
a_4	0~100

以看出 3 次和 5 次谐波的幅值分别为 0.5 和 0.4, 与实际的结果相符, 由于频率混叠等原因 9 次谐波幅值与实际幅值略有偏差, 也在可接受范围内。

2.2 间谐波检测

选取的仿真信号为

$$s_2 = \sin(2\pi \times 50t) + 0.5 \times \sin(2.2 \times 2\pi \times 50t) + 0.4 \times \sin(5.3 \times 2\pi \times 50t) + 0.3 \times \sin(9.7 \times 2\pi \times 50t)$$

仿真信号包含 2.2 次、5.3 次和 9.7 次间谐波, 初始信号的波形如图 7 所示, 其中横坐标是采样时刻, 纵坐标是幅值。间谐波的检测方法和步骤与整数次谐波相同, 在此不再赘述, 图 8 所示为间谐波

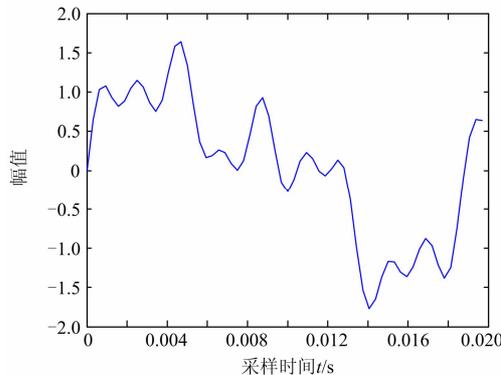


图 7 仿真信号 s_2 的时域波形

Fig. 7 Time-domain waveform of signal s_2

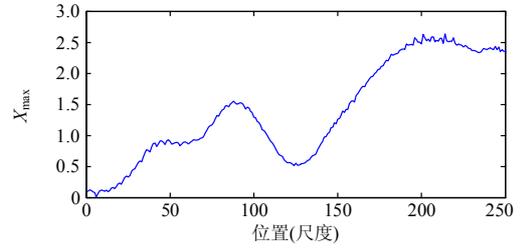


图 8 尺度-小波系数最大值 X_{\max} 对应曲线

Fig. 8 Corresponding curve of the scale and the maximum of wavelet coefficients X_{\max}

检测时尺度与小波系数最大值 X_{\max} 的对应曲线。间谐波检测结果如表 3 所示。检测误差均小于 0.5%。间谐波幅值检测结果与整数次相同。由此可见, 本文中的方法不仅适用于整数次谐波检测, 对间谐波检测也具有较高的精度。

表 3 间谐波检测结果

Table 3 Results of inter-harmonic detection

谐波次数	实际值	位置	尺度	测得值	误差
2.2	110	223	23.2	110.5	-0.36%
5.3	265	88	9.7	264.2	0.30%
9.7	485	44	5.3	483.6	0.29%

3 结论

本文将连续小波变换与离散小波变换相结合, 提出了一种新的谐波检测方法。首先利用连续小波变换系数的幅值检测出信号的谐波频率, 然后根据确定的谐波成分, 利用离散小波变换将信号分解成不同频段, 并比较直接地检测出各次谐波幅值。仿真结果证明了基于 CWT 和 DWT 相结合的谐波检测方法, 能有效检测出整数次谐波和间谐波频率以及幅值。本文提出的方法用于谐波检测, 尤其是对于间谐波检测, 具有较高的准确性和可靠性, 有一定的实用价值。

参考文献

[1] 林海雪, 肖湘宁. 电力系统电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[2] 向东阳, 王公宝. 基于 FFT 和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 35-39.

XIANG Dongyang, WANG Gongbao. A new method for non-integer harmonics measurement based on FFT algorithm and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 35-39.

- [3] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 1-8.
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(13): 1-8.
- [4] 王凯亮, 曾江, 王克英. 一种基于BP神经网络的谐波检测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 44-48.
WANG Kailiang, ZENG Jiang, WANG Keying. A harmonic detecting scheme based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 44-48.
- [5] LIU Z D, HIMMEL J, BONFIG K W. Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2370-2380.
- [6] 肖雁鸿, 毛筱, 周靖林, 等. 电力系统谐波测量方法综述[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 61-64.
XIAO Yanhong, MAO You, ZHOU Jinglin, et al. Review on measuring method for harmonics in power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 61-64.
- [7] 汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 90-94.
TANG Shengqing, CHENG Xiaohua. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 90-94.
- [8] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] 赵闻蕾, 孔莉, 王娟娟, 等. 基于MATLAB和小波变换的电力机车谐波电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 103-106.
ZHAO Wenlei, KONG Li, WANG Juanjuan, et al. Harmonic analysis based on MATLAB and wavelet transform for electrical locomotive[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 103-106.
- [10] GONG Jing. A new scale-frequency method for inter-harmonic detection based on continuous wavelet transform[C] // 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010: 137-139.

收稿日期: 2015-01-16; 修回日期: 2015-03-09

作者简介:

陈欢(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、电力系统谐波分析; E-mail: 278240874@qq.com

何怡刚(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂电网状态监测与健康、电力市场及其技术支持系统等;

肖建平(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、电力系统谐波分析。

(编辑 周金梅)