

基于小波变换抗混叠谐波检测的一种新方法

陈长升, 黄险峰

(江门市五邑大学信息学院, 广东 江门 529020)

摘要: 通过分析小波混叠本质, 推导出基于小波变换的谐波检测算法, 该算法改善了谐波检测过程中的混叠现象。通过 Matlab 仿真实验表明本文方法有较好的抗混叠效果, 有利于进行电力系统谐波信号精确分析。该算法实现比较简单, 是一种新的快速抗混叠方法, 具有一定的实用价值。

关键词: 电力系统; 小波变换; 小波混叠; 谐波检测

A novel method for anti-aliasing harmonic detection based on wavelet transform

CHEN Chang-sheng, HUANG Xian-feng

(School of Information, Wuyi University, Jingmen 529020, China)

Abstract: The physical essence of aliasing phenomenon in wavelet transform is analysed, and harmonic detection algorithm based on wavelet transform is proposed. This algorithm can reduce aliasing phenomenon during harmonic detecting. Simulation result proves that this method can effectively prevent aliasing and can be used to accurately analyse harmonic for power system. It is useful and can be carried out expediently.

Key words: power system; wavelet transform; wavelet aliasing; harmonic detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)23-0023-04

0 引言

电力电子装置是一种非线性时变拓扑负荷, 由其造成的谐波污染对电力系统的安全、稳定、经济运行构成潜在的威胁, 对周围电气环境造成极大影响使得电力系统的谐波危害日益严重。因此, 谐波及其治理的研究已经成为摆在电力科技工作者面前的严峻课题^[1]。

谐波检测是治理谐波的关键, 要求精确实时地获得各次谐波信息。从国内外的现状来看, 主要的谐波测量及分析方法有四种: (1) 基于傅立叶变换的谐波检测方法; (2) 基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法; (3) 基于人工神经网络的谐波分析、检测方法; (4) 基于小波变换的谐波分析、检测方法。其中人工神经网络和小波工具应用于谐波问题的处理尚处在起步阶段^[2]。

小波多分辨分析方法是一种窗口面积固定但其形状可变, 时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法, 被誉为数学显微镜。正是这种特性, 使小波变换具有对信号的自适应性。小波变换克服了傅立叶变换在时域的完全无局部性而频域又全局

部化的特点。它是继傅立叶变换之后在信号分析领域中的又一强有力的工具。不仅适合于稳态信号的研究, 也适合于时变信号的研究^[3]。但目前几乎所有的小波函数在信号分析中都存在小波混叠和能量泄漏现象, 由此导致精度低、鲁棒性差、分辨率低等问题, 困扰着小波变换工程的实现和进一步发展。虽然很多文献都表示基于小波变换的谐波检测方法优于传统方法, 但由于没有采取混叠抑制措施, 得到的结果不能满足精度和鲁棒性要求。

现有的改进算法虽克服混叠效应, 但计算量较大, 为此以下从离散正交小波滤波器混叠的物理本质出发, 提出了一种新的混叠抑制方案。该方案能够取得与参考文献[4, 5]同样理想的抗混叠效果, 但计算量大大减少, 计算的实时性得以改进。

1 离散正交小波变换的混叠分析及抗混叠新方法

Mallat 算法在小波变换中的地位相当于快速傅立叶变换(FFT)在经典傅立叶分析中的地位, 它大大提高了小波分解与重构的计算速度, 从而使小波变换具有明显的工程实用价值。

图 1 是 Mallat 算法网络结构的典型环节。其中 $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ 分别为分解过程中的低通、高通滤波器； $g_0(n)$ 、 $g_1(n)$ 分别为重构过程中的低通、高通滤波器；符号 $\downarrow 2$ 表示以 2 为基数的下抽样(隔点抽样)；符号 $\uparrow 2$ 表示以 2 为基数的上抽样(隔点补零插值)； $x(n)$ 为原始信号； $y(n)$ 为重构综合信号； $a(k)$ 、 $d(k)$ 分别为小波分解的近似系数和细节系数； $y_L(n)$ 、 $y_H(n)$ 分别为小波重构的近似信号和细节信号； $A_1(z)$ 、 $A_2(z)$ 、 $D_1(z)$ 、 $D_2(z)$ 、 $Y_L(z)$ 、 $Y_H(z)$ 、 $Y(z)$ 、 $H_0(z)$ 、 $H_1(z)$ 、 $G_0(z)$ 、 $G_1(z)$ 。

$$A_1(z) = X(z)H_0(z) \quad (1)$$

$$A(z) = \left[A_1(z^{\frac{1}{2}}) + A_1(-z^{\frac{1}{2}}) \right] / 2 = \frac{1}{2} \left[X(z^{\frac{1}{2}})H_0(z^{\frac{1}{2}}) + X(-z^{\frac{1}{2}})H_0(-z^{\frac{1}{2}}) \right] \quad (2)$$

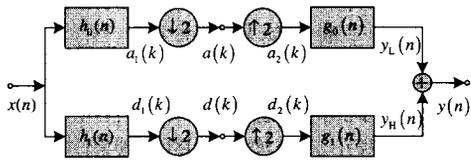


图 1 双通道正交小波滤波器基本环节

Fig.1 Two-channel orthogonal wavelet filter banks

先对近似部分进行 Z 变换分析：

$$A_2(z) = A(z^2) = \left[X(z)H_0(z) + X(-z)H_0(-z) \right] / 2 \quad (3)$$

$$Y_L(z) = A_2(z)G_0(z) = \frac{1}{2}H_0(z)G_0(z)X(z) + \frac{1}{2}H_0(-z)G_0(z)X(-z) \quad (4)$$

经过类似的推导，可以得出：

$$D(z) = X(z^{\frac{1}{2}})H_1(z^{\frac{1}{2}}) / 2 +$$

$$X(-z^{\frac{1}{2}})H_1(-z^{\frac{1}{2}}) / 2 \quad (5)$$

$$Y_H(z) = \frac{1}{2}H_1(z)G_1(z)X(z) + \frac{1}{2}H_1(-z)G_1(z)X(-z) \quad (6)$$

由式 (4) 和式 (6) 得：

$$Y(z) = Y_L(z) + Y_H(z) = \frac{1}{2} \left[H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) \right] X(z) + \frac{1}{2} \left[H_0(-z)G_0(z) + H_1(-z)G_1(z) \right] X(-z) \quad (7)$$

式 (7) 中的第一项为希望输出部分，第二项为混叠部分。因此，要想输出部分无混叠成分，只要令混叠部分为零即：

$$H_0(-z)G_0(z) + H_1(-z)G_1(z) = 0 \quad (8)$$

而要想希望输出部分能够准确重构，必须满足：

$$H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) = 2z^{-l} \quad (9)$$

其中：l 为一个正整数。

满足准确重构条件的常用的滤波器组有：

QMF：

$$\begin{cases} G_0(z) = H_1(-z), & \text{即 } g_0(n) = (-1)^n h_1(n) \\ G_1(z) = -H_0(-z), & \text{即 } g_1(n) = -(-1)^n h_0(n) \\ H_1(z) = H_0(-z), & \text{即 } h_1(n) = (-1)^n h_0(n) \end{cases} \quad (10)$$

CQF：

$$\begin{cases} G_0(z) = H_1(-z), & \text{即 } g_0(n) = (-1)^n h_1(n) \\ G_1(z) = -H_0(-z), & \text{即 } g_1(n) = -(-1)^n h_0(n) \\ H_1(z) = z^{-N} H_0(-z^{-1}), & \text{即 } h_1(n) = -(-1)^n h_0(N-n) \end{cases} \quad (11)$$

由 QMF 和 CQF 滤波器组仅能满足输出部分不含有混叠成分，而无法使 $Y_L(z)$ 、 $Y_H(z)$ 中混叠成分消除，即式 (4)、式 (6) 中的混叠部分不为零。因此，必须通过添加辅助支路进行补偿或优化算法来降低或消除混叠成分。本文提出一种新的辅助支路进行补偿，其基本环节如图 2 所示。其中 $a_3(k)$ 、 $d_3(k)$ 、 $a_4(k)$ 、 $d_4(k)$ 对应的 Z 变换表达式为： $A_3(z)$ 、 $D_3(z)$ 、 $A_4(z)$ 、 $D_4(z)$ 。其它与典型环节中所述一样。Z 变换分析过程如下：

类似地，先对近似部分 Z 变换分析 $A_1(z)$ 、 $A(z)$ 、 $A_2(z)$ 、同式 (1)、式 (2)、式 (3)

$$a_3(n) = (-1)^n a_1(n) / 2 \quad (12)$$

$$A_3(z) = \sum_n a_3(n) z^{-n} = \sum_n \frac{1}{2} (-1)^n a_1(n) z^{-n} = \frac{1}{2} \sum_n a_1(n) (-z)^{-n} = \frac{1}{2} X(-z) H_0(-z) \quad (13)$$

$$A_4(z) = A_2(z) - A_3(z) = -X(-z) H_0(-z) / 2 + \frac{1}{2} [X(z) H_0(z) + X(-z) H_0(-z)] = \frac{1}{2} H_0(z) X(z) \quad (14)$$

$$Y_L(z) = A_4(z) G_0(z) = H_0(z) G_0(z) X(z) / 2 \quad (15)$$

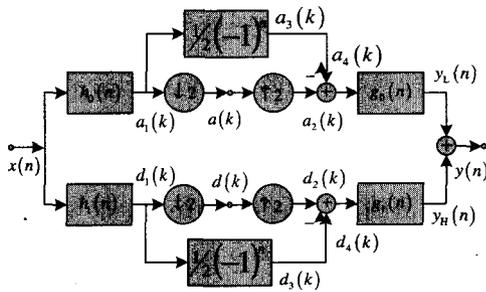


图2 新方法基本环节

Fig.2 Basic unit of new method

类似地, 可以得出 $D_3(z)$ 、 $D_4(z)$ 、 $Y_H(z)$

$$D_3(z) = X(-z) H_1(-z) / 2 \quad (16)$$

$$D_4(z) = H_1(z) X(z) / 2 \quad (17)$$

$$Y_H(z) = D_4(z) G_1(z) = H_1(z) G_1(z) X(z) / 2 \quad (18)$$

由式 (15) 和式 (18) 得:

$$Y(z) = Y_L(z) + Y_H(z) = \frac{1}{2} [H_0(z) G_0(z) + H_1(z) G_1(z)] X(z) \quad (19)$$

显然式 (19) 就是经典基本环节输出 (式 (7)) 的希望输出部分。因此本方法满足重构输出无混叠成分。而与以往的抗混叠方法相比具有算法简单, 运算量少等优点。

2 算法仿真实现

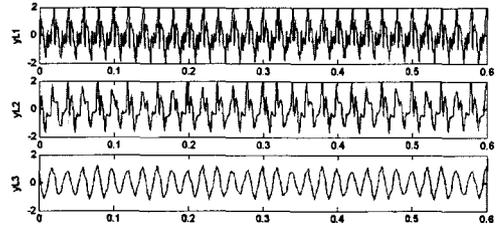
利用本文提出的抗混叠新方法对带三次、四次、五次、七次谐波的谐波信号进行谐波检测, 使用 Matlab6.5.1 软件的仿真, 取得了良好的结果。本文采用的采样信号为:

$$s = \cos(100\pi t) + 0.3\cos(400\pi t + 70^\circ) +$$

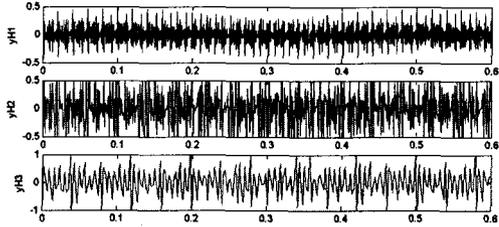
$$0.7\cos(300\pi t + 80^\circ) + 0.5\cos(500\pi t + 90^\circ) +$$

$$0.4\cos(700\pi t + 40^\circ); \text{采样间隔为 } \Delta t \approx 0.0006 \text{ s},$$

选用 Daubechies3 正交镜像滤波器组 (QMF) 作为分解重构滤波器, 对信号进行 3 次分解。



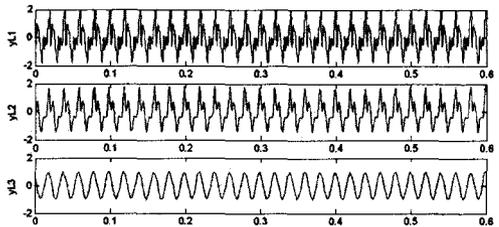
(a)



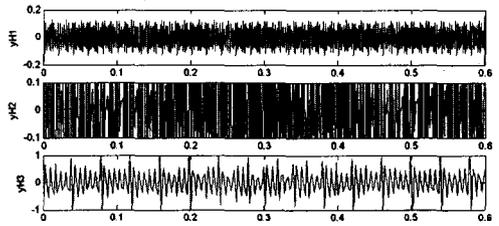
(b)

图3 未采取抗混叠措施的低频信号(a)和高频信号(b)

Fig.3 Transform result of wavelet



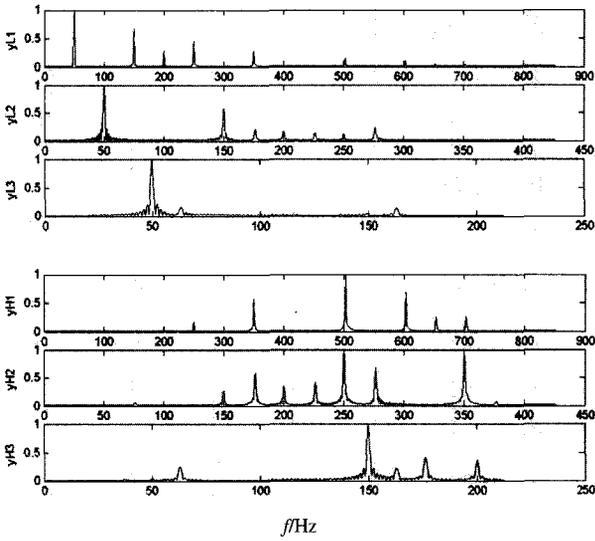
(a)



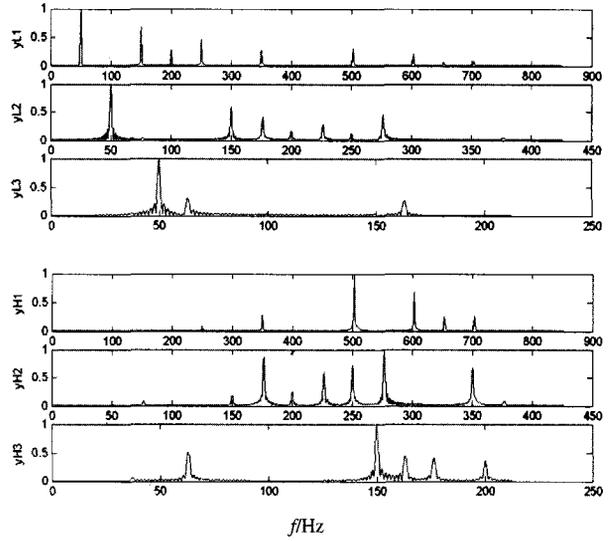
(b)

图4 采用本文提出的抗混叠方法的低频信号(a)和高频信号(b)

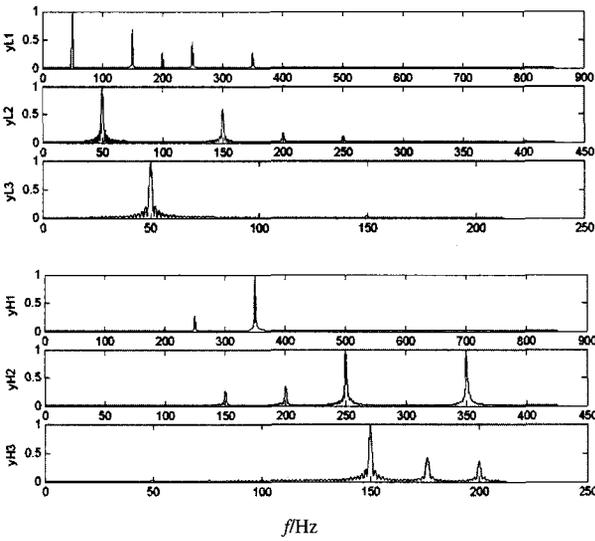
Fig.4 Analysis results with new method anti-aliasing wavelet transform



(a) 未采取抗混叠措施的信号频谱图



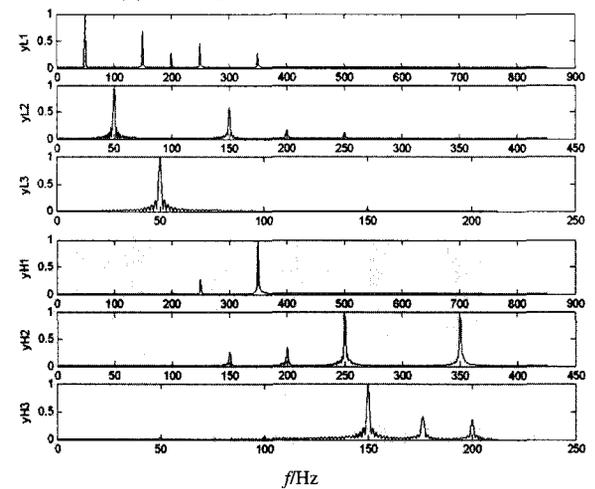
(d) 采用参考文献[5]得出的信号频谱图



(b) 本文提出方法得出的信号频谱图

图5 未采取抗混叠措施的信号频谱图(a)、本文提出方法得出的信号频谱图(b)、采用参考文献[4]得出的信号频谱图(c)、采用参考文献[5]得出的信号频谱图(d)

Fig.5 Spectrum of signal by 4 detection algorithm



(c) 采用参考文献[4]得出的信号频谱图

图3是经典离散小波变换检测的结果。从图3(a)中我们看出 $y_L(3)$ 即第三层小波分析中明显不能精确检测出基波信号。与图3相比，图4是采用本文提出谐波检测的方法所得出的结果。很显然 $y(3)$ 是一条光滑的基波信号。图5是从频谱分析上比较经典算法、本文提出算法、文献[4]、文献[5]的检测结果。由图5(a)可以看出：经典算法不仅存在混叠，而且小波调制现象也比较严重。由图5(b)与(c)可以看出两种方法检测出来结果非常相似，而与图5(d)相比图5(b)的信号频率更纯，效果更好，是一种较好的小波抗混叠方法。

仿真过程中，要注意对分析信号进行周期延拓后，再进行卷积，卷积结果取中间部分。对滤波器的选取也是很重要的。

3 结论

针对现有的离散小波变换抗混叠算法计算量大的缺点，提出了一种新的混叠抑制算法，该算法直接通过对滤波后的信号奇数坐标位置相应的数组元素取负号，再乘以二分之一，然后与下抽样信号的偶数坐标位置相应的数组元素进行插值后的结果对应相加。仿真结果证明该算法是一种较好的小波抗混叠方法，具有较高的实用价值。

(下转第 31 页 continued on page 31)

为一点(圆心), 那么 SVM HCC 根据(8)式选择 U_k 的第一条需要满足的条件 ($|u^* - U_k|$ 最小) 就没有意义了, 也就是 U_k 的选择和本文的方法此时相同。为了说明这一点, 仿真运行条件改变为: 直流侧电压 180 V。

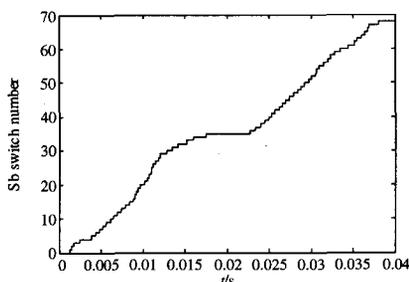


图9 直流侧电压升高后的开关次数

Fig.9 Switch times of direct voltage rising

直流电压升高后本文方法中的开关次数降到70次以下, 基本上和图7的开关次数相当。

4 结论

文章论证了减少开关频率的因素, 提出了不需要检测参考电压而直接选择电压空间矢量的新方法。该方法在直流侧电压升高时可以达到与 SVM HCC 方法一样的缩减开关次数目标。但同时要求变流器直流侧器件的耐压程度相对升高。

(上接第26页 continued from page 26)

参考文献

- [1] 毛樟梅, 陈明军. 小波变换在电网谐波分析中的应用[J]. 机电工程, 2007, 24(1): 7-9.
MAO Zhang-mei, CHEN Ming-jun. Application of Transform in Power System Harmonic Analysis[J]. Mechanical & Electrical Engineer Magazine, 2007, 20(1): 7-9.
- [2] 夏雪, 周林, 万蕴杰, 等. 小波变换在谐波检测中的应用[J]. 电测与仪表, 2006, 43(483): 13-19.
XIA Xue, ZHOU Lin, WAN Yun-jie, et al. Wavelet Transform for Harmonic Measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(483): 13-19.
- [3] 武小红. 基于小波变换的农村电网谐波检测[J]. 中国农村水利水电, 2007, (2): 99-101.
WU Xiao-hong. The Detecting for Harmonic in Power System of Rural Based on Wavelet Transform[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, (2): 99-101.
- [4] 何磊, 王泽忠. 间谐波检测中小波混叠抑制的一种新算法[J]. 河北电力技术, 2007, 26(2): 9-11.
HE Lei, WANG Ze-zhong. A Novel Method for Power System Inter-harmonics Detection with Anti-aliasing Wavelet Transform[J]. Hebei Electric Power, 2007, 26(2):

参考文献

- [1] Kaura V, Blasko V. Operation of a Voltage Source Converter at Increased Utility Voltage[J]. IEEE Trans on Power Elect, 1997, 31(2): 132-137.
- [2] Heinz Vanderock, Hans Christoph, Skudelny. Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors[J]. IEEE Trans on Ind App, 1988, 24(1): 142-147.
- [3] Vladimir Blasko. Analysis of a Hybrid PWM Based on Modified Space-Vector and Triangle-Comparison Methods[J]. IEEE Trans on Ind App, 1997, 33(3): 756-764.
- [4] Pan Ching-Tsai, Chang Ting-Yu. An Improved Hysteresis Current Controller for Reducing Switching Frequency[J]. IEEE Trans on Power Elect, 1994, 9(1): 97-105.
- [5] Kwon Bong-Hwan, Kim Tae-Woo, Youm Jang-Hyoun. A Novel SVM-Based Hysteresis Current Controller[J]. IEEE Trans on Power Elect, 1998, 13(2): 297-305.

收稿日期: 2007-11-14; 修回日期: 2008-06-11

作者简介:

黎建华(1980-), 男, 助教, 主要研究方向为嵌入式系统、信号处理;

徐海利(1981-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: xuhaili33@126.com

唐志琼(1982-), 女, 研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

9-11.

- [5] 杜天军, 陈光躅, 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, (3): 54-59, 134.
DU Tian-jun, CHEN Guang-ju, LEI Yong. A Novel Method for Power System Harmonic Detection Based on Wavelet Transform with Aliasing Compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 54-59, 134.
- [6] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与MATLAB7实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
The Feicit Research Center of Science and Technology products. Wavelet Analysis Theory and MATLAB7 Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

收稿日期: 2008-01-19; 修回日期: 2008-04-19

作者简介:

陈长升(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波检测; E-mail: chenchsheng@163.com

黄险峰(1964-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为模式识别与智能控制, 小波分析在电力系统中的应用。