

基于单节点重构改进小波包的电力系统谐波分析算法

尚秋峰, 康丹, 李青, 郭晓帅

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 在传统小波包算法中, 虽然提高了频率分辨率, 但是各子带存在产生虚假频率成分的情况, 应用于电力系统谐波分析将产生严重的频率混叠现象。应用单节点重构改进小波包快速算法, 利用快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)对各子带信号进行处理, 并调整滤波器组使子带频带顺序排列。通过仿真实例将改进算法的结果与传统算法进行对比, 结果证明, 改进算法能更有效地避免重构信号中的频谱混叠和交错现象。

关键词: 小波包变换; 谐波; 频率混叠; 交错; 单节点重构

Power system harmonic analysis algorithm based on wavelet packet improved by single-node reconstruction

SHANG Qiu-feng, KANG Dan, LI Qing, GUO Xiao-shuai
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Although traditional wavelet packet algorithm improves the frequency resolution ratio, the sub-band generates false frequency components. The application of traditional algorithm in power system harmonic analysis would result in severe frequency aliasing. Wavelet packet fast algorithm is improved by single-node reconstruction, Fast Fourier Transform (FFT) and Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) are applied to process sub-band signals and the filter unit is adjusted to make sub-band frequency band in order. Compared with the traditional algorithm by the simulation, the results show that the improved algorithm can effectively avoid the spectrum aliasing and interlacing phenomenon in the reconstruction of the signal.

Key words: wavelet package transform; harmonic; frequency aliasing; interlacing; single-node reconstruction

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0074-04

0 引言

随着科技的不断进步, 国内外电力电子技术迅速发展, 大量由电力电子开关构成的、具有非线性特性的用电设备广泛应用于工农业生产。由此产生的大量的工频整数倍及非整数次谐波, 使得电网的供电质量越来越差, 电力系统的发供用电设备出现许多异常现象和故障^[1-3]。谐波信号含量小、变化大, 对于不同用户和电网的不同运行方式呈现出不同的特征^[4]。因此, 对电力系统谐波进行治理有很大的实际意义。

电力系统中的谐波一般都具有非平稳性、非线性、随机性、分布性和影响因素复杂性等特性。小波变换谐波分析方法通过对小波基函数的伸缩和平移在时频相平面上产生可变的时频窗, 得到不同时间位置上的小波系数, 因此在时域和频域上都具有

良好的局部分析能力^[5-6]。小波包变换借助小波分解滤波器在各个尺度上对每个子带均进行再次降半划分, 从而得到比小波变换更精细的信号分解, 有利于谐波成分的确定和谐波参数的测量, 为电能质量分析提供了一种更为简便直观的分析方法。然而不容忽视的是小波包变换本质上仍是一种加窗变换, 但目前所有的小波函数在信号分析中都存在小波混叠和能量泄露现象, 由此导致精度低、鲁棒性差、分辨率低等问题^[7]。

本文运用单节点重构改进小波包变换算法, 对传统算法中产生的频率混叠和频带交错采取措施, 能够精确地检测出电力系统中的谐波和间谐波成分。

1 快速离散小波包变换

1.1 小波包快速算法

设 $f(n)$ 为一谐波信号, $p_j^i(n)$ 表示第 j 层上第 i 个小波包, 称为小波包系数, G 、 H 为小波分解滤波器。二进小波包分解的快速算法为:

基金项目: 河北省教育厅科技研究指导项目

$$\begin{cases} p_0^1(n) = f(n) \\ p_j^{2^{i-1}}(n) = \sum_k H(k-2n)p_{j-1}^i(n) \\ p_j^{2^i}(n) = \sum_k G(k-2n)p_{j-1}^i(n) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $J = \log_2^N$; $n = 1, 2, \dots, 2^{J-j}$; $i = 1, 2, \dots, 2^j$ 。

式(1)的含义是: 假定所检测的离散信号 $f(n)$ 为 $p_0^1(n)$, 信号在第 j 层上共有 2^j 个小波包, 第 $2i-1$ 个小波包是第 $j-1$ 层上第 i 个小波包与小波分解滤波器 H 卷积后再隔点采样的结果; 第 $2i$ 个小波包是第 $j-1$ 层上第 i 个小波包与小波分解滤波器 G 卷积后再隔点采样的结果。

Mallat 算法将原始信号分解成一系列子带信号, 用 fs 表示小波包分解各节点的频带, 实际信号的频带划分规律如图 1 所示。

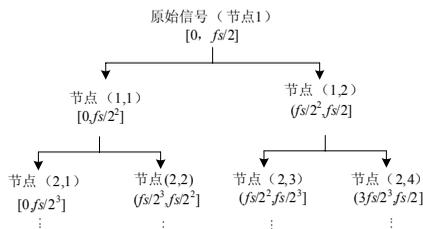


图 1 频带划分规律
Fig.1 Division law of the band

二进小波包重构的快速算法为:

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

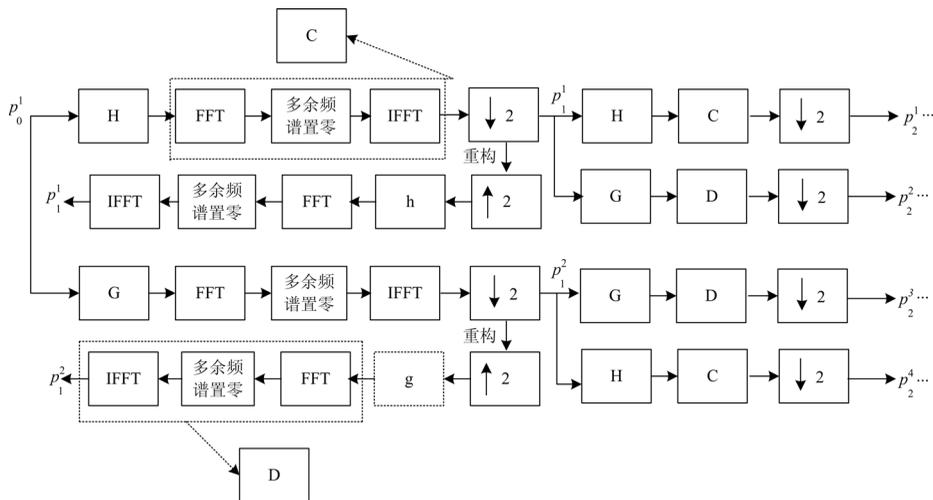


图 2 单节点重构改进的小波包算法
Fig.2 Wavelet packet algorithm improved by reconstruction of single-node

式中: $J = \log_2^N$, $j = J-1, J-2, \dots, 1, 0$; $i = 2^j, 2^{j-1}, \dots, 2, 1$; h, g 为小波重构滤波器。

式(2)的含义是: 第 j 层上的第 i 个小波包, 是两项之和, 第一项是第 $j+1$ 层上的第 $2i-1$ 个小波包隔点插零后再与小波重构滤波器 h 的卷积, 第二项是第 $j+1$ 层上的第 $2i$ 个小波包隔点插零后再与小波重构滤波器 g 的卷积结果。按照同样的方法, 一直进行到第 0 层即得到原始信号的重构信号^[8]。

1.2 单节点重构小波包改进算法

针对传统小波包算法所固有的频率混淆问题, 如果能设法去掉小波包分解的各子带中多余的频率成分, 就相当于使用了理想的小波滤波器。基于这一思想, 信号分解过程中, 再对经过小波分解滤波器之后的信号进行某些处理(即 C 或 D), 以达到滤除卷积后信号频谱交错的目的, 使之在隔点采样前排除高半频段频谱折叠到低半频段频率混叠情况的出现。单节点重构过程中, 再对经过小波重构滤波器之后的信号也做同样的处理。新增的处理过程是将经过小波滤波器卷积后的结果先进行快速傅立叶变换, 然后根据所卷积的小波滤波器的不同以及频带划分规律, 分别将傅立叶变换后的低半频段或高半频段谱值置零, 然后再进行傅立叶逆变换, 以快速傅里叶逆变换的结果代替与小波滤波器卷积的结果, 继续进行小波包分解与重构(如图 2)^[9]。图 2 中 G, H 代表小波分解滤波器, g, h 代表小波重构滤波器, $\downarrow 2$ 表示隔点采样, $\uparrow 2$ 表示隔点插零。

C 和 D 的表达式为:

$$C: \begin{cases} X(k) = \sum_{n=0}^{N_j-1} x(n)e^{-jk2\pi n/N_j}, & 0 \leq k \leq N_j \text{ and } \frac{N_j}{4} \leq k \leq N_j \\ X(k) = 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$D: \begin{cases} X(k) = \sum_{n=0}^{N_j-1} x(n)e^{-jk2\pi n/N_j}, & \frac{N_j}{4} \leq k \leq \frac{3N_j}{4} \\ X(k) = 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $x(n)$ 表示 2^j 尺度上小波系数; N_j 表示 2^j 尺度的数据长度; $k=0, 1, \dots, N_{j-1}, n=0, 1, \dots, N_{j-1}$ 。

在现有的滤波器组结构下,小波包分解得到的频带不是按照频率大小的顺序连续排列,而是无明显规律排列。为解决这一问题,本文采用改进的滤波器组结构,其结构与原来分解树的结构相同,都是二叉树的结构,只是低通和高通滤波器的排列不同(如图3),在每一级滤波器组中的第一个滤波器是 LP,第二个滤波器是 HP,然后从第二个滤波器开始,从上到下每两个滤波器类型变换一次。利用这样的滤波器组结构得到的频带划分是按顺序连续分布的均匀频带^[10]。

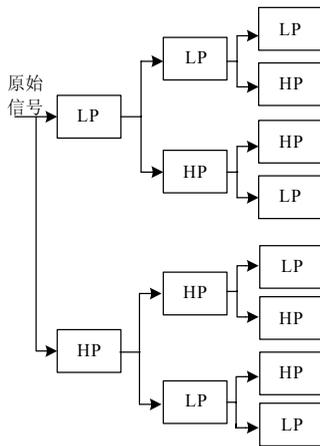


图3 调整的滤波器组
Fig.3 Adjusted filter

2 仿真验证

(1) 选定电力信号模型

考虑到实际电力信号中不仅含有奇次、偶次等整数次谐波,还含有大量非整数倍谐波,为证明算法的通用性故选用以下模型:

$$x = \sin(100\pi t) + \sin(200\pi t) + \sin(300\pi t) + \sin(400\pi t) + \sin(700\pi t) + \sin(820\pi t) + \sin(900\pi t)$$

(2) 本文分别运用传统的小波包变换和单节点重构改进小波包变换,利用 Matlab 小波工具箱的

函数对上述信号进行仿真分析。以 950 Hz 采样频率,采样点数为 2 048 个,选用 db40,这是具有唯一不对称的 Daubechies 小波,具备刻画信号的全局和局部奇异性变化的特点^[11]。将信号 x 分解至第 3 层并重构,各节点重构信号及其频谱如图 4 和图 5 所示。各节点的频率成分如表 1 所示。

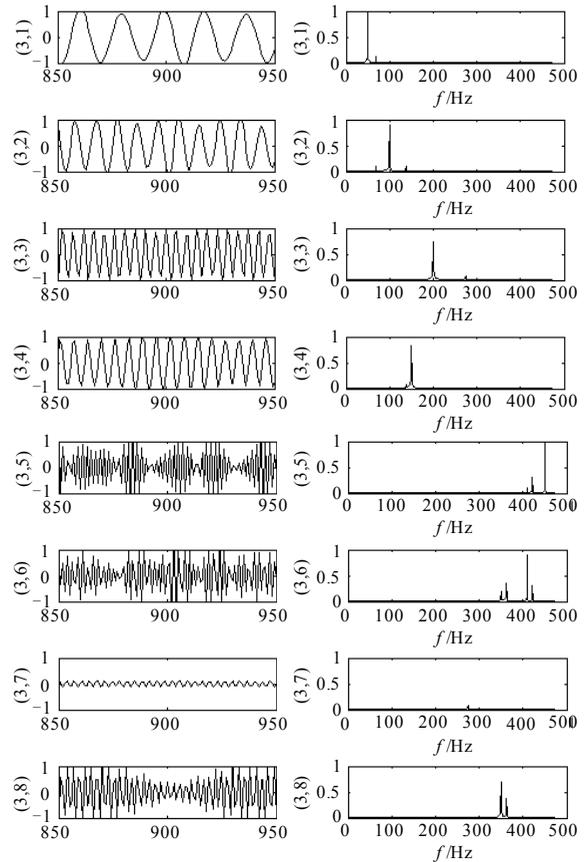
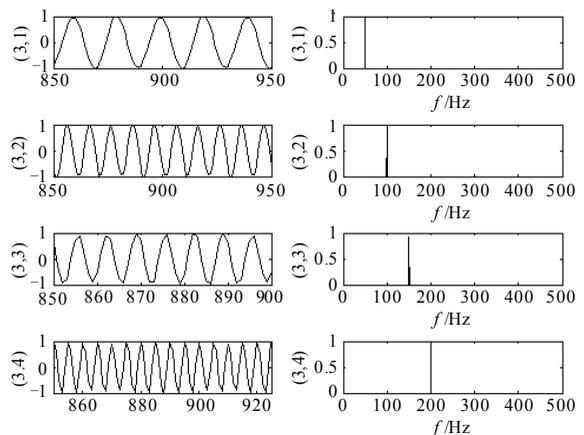


图4 传统小波包算法各节点重构结果及其频谱
Fig.4 The traditional wavelet packet algorithm for reconstruction of the results of each node and its spectrum



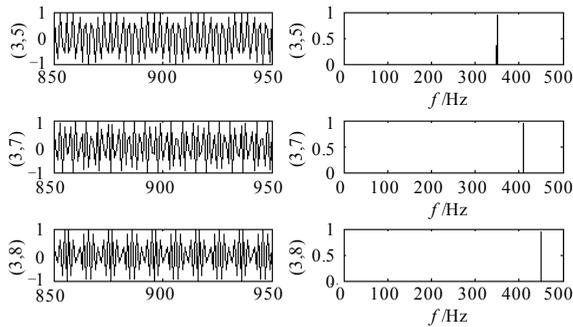


图5 改进的小波包算法各节点重构结果及其频谱

Fig.5 Improved wavelet packet algorithm for reconstruction of the results of each node and its spectrum

将图4和图5分别和表1对比可以发现,传统的小波包算法存在着严重的频率混叠和频带交错现象。而改进的小波包算法可以准确地重构出各次谐波及间谐波信号,并且各节点按频带划分的高低顺序排列,便于直接观察。

表1 各节点频率成分

Tab.1 Frequency components of each node

理论节点	理论频率	传统算法	改进算法
节点(3,1)	50	50, 69	50
节点(3,2)	100	69, 100, 137	100
节点(3,3)	150	200, 275	150
节点(3,4)	200	100, 140, 150	200
节点(3,5)	350	410, 420, 450	350
节点(3,6)		350, 360, 410, 420	
节点(3,7)	410	275	410
节点(3,8)	470	350, 360	470

3 结语

本文应用单节点重构改进小波包算法进行谐波分析,利用傅里叶变换和傅里叶逆变换来去掉各子带中多余的频率成分,调整的滤波器组避免频带交错,有效地抑制了小波包变换在电力系统谐波检测过程中所产生的频率混叠现象。仿真结果表明了该方法的有效性,将具有较广阔的应用前景。

参考文献

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
 [2] 栗时平, 郑小平, 金维宇. 电力系统谐波检测方法及其实现技术的发展[J]. 电气开关, 2004, 42(1): 33-38.
 SU Shi-ping, ZHENG Xiao-ping, JIN Wei-yu. Development of measuring methods and their implementing technologies for harmonic of power

systems[J]. Electrical Switch, 2004, 42(1): 33-38.
 [3] 黄攀, 姚建刚, 鲁栗. 电能质量在线监测装置设计[J]. 中国仪器仪表, 2005(2): 86-88.
 HUANG Pan, YAO Jian-gang, LU Li. The design of power quality online monitoring equipment[J]. China Instrumentation, 2005(2): 86-88.
 [4] 郝丽丽, 徐群. 剔除奇异点的电网谐波分析方法研究[J]. 继电器, 2005, 33(6): 1-5.
 HAO Li-li, XU Qun. Study of detecting power harmonic by eliminating singular point[J]. Relay, 2005, 33(6): 1-5.
 [5] 梁玉娟, 李群湛, 赵丽平. 基于小波分析的电力系统谐波分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(2): 67-70.
 LIANG YU-juan, LI Qun-zhan, ZHAO Li-ping. The electric power system harmonic analysis based on wavelet analysis method[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2003, 15(2): 67-70.
 [6] 蒋剑波, 刘贤兴, 王德明. FFT和小波变换在电力系统谐波测量中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 85-87.
 JIANG Jian-bo, LIU Xian-xing, WANG De-ming. Application of FFT and wavelet transform to measurement of harmonics in power system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 85-87.
 [7] 陈长升, 黄险峰. 基于小波变换抗混叠谐波检测的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 23-26.
 CHEN Chang-sheng, HUANG Xian-feng. A novel method for anti-aliasing harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 23-26.
 [8] 李辉, 丁桦. 一种抗混叠和失真的小波包信号分解与重构算法[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(20): 5580-5590.
 LI Hui, DING Hua. Anti-aliasing and anti-distortion algorithm for signal decomposition and reconstruction based on wavelet package analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(20): 5580-5590.
 [9] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
 [10] 薛蕙, 杨仁刚, 罗红. 利用小波包变换实现电力系统谐波分析[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 41-45.
 XUE Hui, YANG Ren-gang, LUO Hong. Power system harmonic analysis using wavelet packet[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 41-45.
 [11] 储珺, 马建伟. 基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 34-36.
 CHU Jun, MA Jian-wei. Detection of power quality disturbed signals based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 34-36.

(下转第94页 continued on page 94)

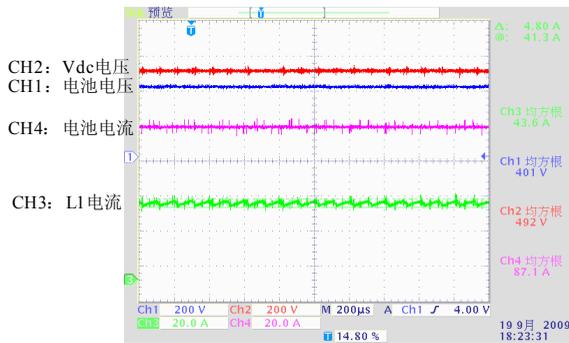


图 12 恒流放电波形

Fig.12 Waveforms of constant-current discharging

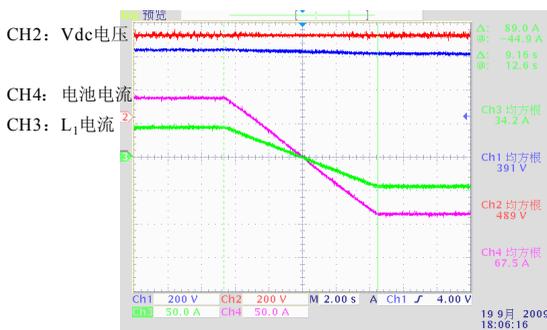


图 13 放电与充电之间转换波形

Fig.13 Waveforms for discharge to charge

4 结论

本文对多电池组储能系统电池充放电变换器拓扑和原理进行了介绍,对 DC-DC 变换器的控制器设计进行了分析,并给出了双向 DC-DC 变换器的仿真结果和在锂电池组上的实验波形,仿真和实验结果表明,本文研制的双向 DC-DC 变换器,具有电池充电、电池放电、孤岛运行和电池互充放电等多种功能,而且充电电流纹波电流小于 0.5%,波形平滑,可适用于多组,宽范围电池的充放电要求,为多电池组储能系统电池充放电提供了一个很好的解决方案。

参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.
 WANG Wen-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43- 48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

[3] 陈明,汪光森,马伟明,等. 多重化双向 DC-DC 变换器电流纹波分析[J]. 继电器, 2007, 35(4): 53-57.
 CHEN Ming, WANG Guang-sen, MA Wei-ming, et al. Analysis of the inductor current ripple in interleaved lo-directional DC-DC power converters[J]. Relay, 2007, 35(4): 53-57.

[4] Profumo F, 等. 发电用燃料电池特性及其电力电子调节系统的专用解决方案[J]. 变流技术及电力牵引, 2007, 2: 52-57.
 Profumo F, et al. Fuel cell for electric power generation: peculiarities and dedicated solutions for power electronic conditioning systems[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007, 2: 52-57.

[5] 张仕彬,林仲帆,杜贵平,等. 基于双向交流技术的蓄电池充放电装置[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 77-79.
 ZHANG Shi-bin, LIN Zhong-fan, DU Gui-ping, et al. Charging-discharging equipment for accumulator based on bidirectional inverting and commuting technology[J]. 2008, 42(5): 77-79.

收稿日期: 2010-02-27; 修回日期: 2010-06-03

作者简介:

李立(1961-),女,硕士,副教授,研究方向为电力电子技术与交直流传动,计算机测控技术与 DSP 应用;

刘刚(1973-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力电子变流技术。E-mail: gangl@xjgc.com

(上接第 77 页 continued from page 77)

收稿日期: 2010-02-13; 修回日期: 2010-04-22

作者简介:

尚秋峰(1968-),女,教授,主要研究方向为信号与信

息处理;

康丹(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理; E-mail:icanfly930@sohu.com

李青(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。