

8-5-2020

Application of Wavelet Packet Improved Reconstruction Algorithm to Energy Measurement of Non-linear Loads

Hualong Cai

1. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; ;2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd. , Chengdu 610051, China;

Kun Xiao

2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd. , Chengdu 610051, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Wavelet Packet Improved Reconstruction Algorithm to Energy Measurement of Non-linear Loads

Abstract

Abstract: In order to realize high-accuracy measurement of nonlinear loads, an improved algorithm of harmonic energy measurement based on discrete wavelet packet decomposition and reconstruction was proposed. *Frequency band and the corresponding number of decomposition layer were given according to the sampling number, window width and sampling frequency. To improve the non-ideal cut-off characteristic of wavelet filter and eliminate the frequency aliasing, the discrete Fourier and the inverse transformation were used to remove the extra frequency components.* The calculation expression of harmonic power and the principle of harmonic energy measurement were listed. The simulation analysis of harmonic energy measurement using db40 wavelet function indicated that the improved algorithm presented restrained frequency aliasing to a certain extent, and it could provide an effective method for accurately detecting harmonic, inter-harmonic and time-varying harmonic of electrical power system.

Keywords

non-linear loads, harmonic energy measurement, discrete wavelet packet transforms, single-band reconstruction, frequency aliasing

Recommended Citation

Cai Hualong, Xiao Kun. Application of Wavelet Packet Improved Reconstruction Algorithm to Energy Measurement of Non-linear Loads[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2822-2828.

小波包改进重构算法在非线性负荷电能计量中的应用

蔡华龙^{1,2}, 肖坤²

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 为对非线性负荷电能的准确计量, 提出基于离散小波包分解与重构算法的谐波电能计量改进方法。通过采样点数、窗口宽度及频率, 确定频带宽度和离散小波包分解层数; 为改进小波滤波器的非理想截止特性, 消除其频率混叠问题, 利用离散 Fourier 变换及其逆变换去掉各子带中多余频率成分, 对单带重构算法进行改进; 给出谐波功率计算式与谐波电能计量原理。利用 db40 小波函数进行谐波电能计量数值仿真, 克服离散小波包变换中存在频率混叠现象的固有缺陷, 验证了该算法的有效性与计量精度, 为电力系统谐波、间谐波和时变谐波分量的精确检测提供一种有效手段。

关键词: 非线性负荷; 谐波电能计量; 离散小波包变换; 单带重构; 频率混叠

中图分类号: TM993

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 11-2822-07

Application of Wavelet Packet Improved Reconstruction Algorithm to Energy Measurement of Non-linear Loads

Cai Hualong^{1,2}, Xiao Kun²

(1.State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: In order to realize high-accuracy measurement of nonlinear loads, an improved algorithm of harmonic energy measurement based on discrete wavelet packet decomposition and reconstruction was proposed. Frequency band and the corresponding number of decomposition layer were given according to the sampling number, window width and sampling frequency. To improve the non-ideal cut-off characteristic of wavelet filter and eliminate the frequency aliasing, the discrete Fourier and the inverse transformation were used to remove the extra frequency components. The calculation expression of harmonic power and the principle of harmonic energy measurement were listed. The simulation analysis of harmonic energy measurement using db40 wavelet function indicated that the improved algorithm presented restrained frequency aliasing to a certain extent, and it could provide an effective method for accurately detecting harmonic, inter-harmonic and time-varying harmonic of electrical power system.

Keywords: non-linear loads; harmonic energy measurement; discrete wavelet packet transforms; single-band reconstruction; frequency aliasing

引言

近年来, 随着非线性负荷容量及用户数量的增

加, 越来越多的谐波成分被注入电网, 其中包括整数次谐波、间谐波和次谐波等。非线性负荷将基波有功电能转化为高次谐波电能和负序电能, 引起电网基波频率的波动并造成供电系统谐波失真度不断提高; 其所产生的负序电流严重地影响电力企业发电机组及电力系统的稳定。目前常用的谐波电能测量方法是利用快速 Fourier 变换(FFT, Fast



收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-03-29;
基金项目: 国家自然科学基金(61370073);
作者简介: 蔡华龙(1977-), 男, 湖南常德, 回族, 博士生, 研究方向为水利、电能测量及信息化; 肖坤(1987-), 男, 湖南常德, 硕士生, 研究方向为电力生产及运营。

<http://www.china-simulation.com>

• 2822 •

Fourier Transform)进行各次谐波分析, 计算各次谐波功率^[1], 之后利用加窗插值算法消除 FFT 的频谱泄漏和栅栏现象^[2]。然而, 若谐波信号中同时存在多个频率相近的整数次和非整数次分量, FFT 将无法保证信号测量的准确性。因此, 对谐波存在情况下的高精度电能计量算法研究具有实际的工程意义。

目前, 小波变换作为一种时频分析技术, 因其具有可调的时频窗, 可同时提取信号的时频特性, 并对信号进行多分辨率分解与重构的特点而被广泛应用于信号分析等领域^[3]。国内外的一些学者已经利用小波理论开展了电能计量的研究, 并取得了各自的成果。如文献[4]分析了简谐波对电能计量的影响, 并基于小波理论给出了改进算法; 文献[5]针对电力系统谐波污染, 从理论上分析了谐波对电能计量装置准确性和合理性的影响, 提出了基于小波变换理论的谐波电能计量方法。此外, 为克服小波分解在高频段的频率分辨率差, 在低频段的时间分辨率差的缺点, 人们在小波分解的基础上提出了小波包变换^[6]。两者实际上都是将信号通过一系列的带通滤波器进行处理, 但不同之处在于小波变换滤波器组是对低频带不断进行二进划分, 而小波包变换则对高频带和低频带均做二进划分。当前用于电能计量领域的主要小波理论包括: 连续小波变换(CWT, Continuous Wavelet Transform)^[7]、离散小波变换(DWT, Discrete Wavelet Transform)^[8-9]、离散小波包变换 9DWPT, Discrete Wavelet Packet Transform)^[10]以及稳态小波变换等。基于 DWT 的方法可以测量电压信号或电流信号的总有效值 RMS, 但因提供了对数化的不均匀频率分辨率而不能测量各次谐波的有效值。Walid 与 Hawary^[8-9]提出了一种基于 DWT 的用来计算标准 IEEE 1459-2000 所定义各物理量的算法, 并指出对于 DWT 变换, 可以通过选择合适的小波函数来使得对谐波有效值的计量误差最小。但是该算法没有充分考虑间谐波和直流偏置的影响。不同于 DWT,

DWPT 提供了均匀的频率分辨率, 可以用来计算各次谐波有效值。Hamid^[11]给出了基于 DWPT 计算谐波有效值和功率量的理论基础。但目前基于 DWPT 的谐波电能计量方法仍存在一些问题, 其可概括为: 算法对于信号的分解存在频率混叠现象; 对间谐波计量精度差; 没考虑实际电网基频的波动影响等。

因此, 为避免各间谐波的影响, 本文基于最小频率带宽和相应的小波分解层数等思想, 提出了基于离散小波包分解重构的谐波电能计量改进方法。首先确定了频带宽度和离散小波包分解层数; 之后, 为改进小波滤波器的非理想截止特性, 消除其频率混叠问题, 利用离散 Fourier 变换及其逆变换去掉各子带中多余的频率成分, 对单子带重构算法进行改进; 建立了谐波电能计量模型, 最后通过对非线性负荷的数值仿真, 验证了该算法的有效性与计量精度, 可为电能计量装置的设计提供理论参考。

1 离散小波包变换分解的参数设置

在利用 DWPT 对谐波信号进行分析之前, 首先需要根据识别精度、计算速度等求, 对分解时的频段宽度、分解层数等变量进行设定。

通常情况下, 频带的宽度 W_b 取决于信号中的谐波和间谐波的成分和含量^[12]。较窄的频带宽度有助于减少谐波、间谐波对计算精度的影响。最小频率带宽度取决于负荷特性以及信号样本总数 N_{samp} 。而信号样本总数 N_{samp} 则根据采样窗口宽度 T_w 以及采样频率 f_{samp} 来确定,

$$N_{\text{samp}} = \frac{f_{\text{samp}}}{f_b} T_w \quad (1)$$

其中, $T_w = 10 \times 2^p$; $f_{\text{samp}} = 2^q f_b$, $\forall p, q \in N^+$, f_b 为基波频率。采样窗口宽度 T_w 应为基波周期的整数倍, 为提高频率的分辨率, 可进一步增大窗口的宽度。 f_{samp} 的选择需满足 Shannon 定理, 即 $f_{\text{samp}} > 2f_{\text{max}}$, f_{max} 为信号中谐波的最高频率。

在对频带的宽度 W_b 的设置中, 需要保证 W_b 小于所需要的频率分辨率, 即 W_b 必须小于相邻谐波的最小频率差。其最小频带宽度 W_{b_min} 的计算公式如下所示,

$$W_{b_min} = \frac{f_{s\text{amp}}}{2^m} \quad (2)$$

式中, $m = p + q + 2$ 。

在已知信号样本总数并确定了频带的宽度的情况下, 多层 DWPT 分解的层数 l_n 要满足以下不等式条件,

$$W_{b_min} \leq l_n \leq \text{inv} \left(\log_2 \left(\frac{f_{s\text{amp}}}{2W_b} \right) \right) \quad (3)$$

其中的 $\text{inv}(\ast)$ 为取整函数。

在确定分解层数及带宽之后, 利用小波包分解滤波器 H_0, H_1 对采样得到的电压、电流原始信号 $x(n)$ 进行 DWPT 分解, 则第 k 层的低频和低频小波包系数为

$$\begin{cases} dl_0(x(n)) = x(n) \\ dl_k(x(n)) = \sum_n [h_0(2n-l)dl_{k-1}(x(n))] \\ dh_k(x(n)) = \sum_n [h_1(2n-l)dl_{k-1}(x(n))] \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_0, h_1 分别为对应层的多分辨率滤波器系数。

将原始信号 $x(n)$ 分解可得到的一系列的子带信号, 第 k 层低频小波包系数 $dl_k(x(n))$ 对应的子带频率范围为 $(0 \sim (2^k - 1)W_b)$ Hz, 而高频系数 $dh_k(x(n))$

对应的子带频率范围则为 $((2^k - 1)W_b \sim 2^k W_b)$ Hz。由此频率划分规律可知, DWPT 分解算法本身存在严重的频率混叠现象^[13], 若直接运用到电网谐波检测中, 其精度必不能满足要求。

2 基于单子带重构变换的谐波电能计量算法

谐波电能计量的关键是有效地提取各次谐波电压和谐波电流信号^[14]。为避免过大的小波包分解尺度带来的波形的台阶化, 可通过单子带重构算法进行消除, 小波包单子带重构算法是一个将信号分解到一系列二进划分的频带上的过程, 其表达式为

$$dl_k(x(n)) = \sum_n [g_0(2n-l)dl_{k+1}(x(n)) + g_1(2n-l)dh_{k+1}(x(n))] \quad (5)$$

式中: g_0, g_1 分别为小波包重构的低通和高通滤波器系数。

然而, 由小波包滤波器的非理想截止特性所导致的 DWPT 固有的频率混叠现象仍得不到根除, 故为消除各子带中多余的频率成分, 实现对谐波信号电能的准确计量, 在重构滤波算法中增加 3 个算子 $F_0[\ast], F_1[\ast]$ 以及 $IF_1[\ast]$, 其分树结构如图 1 所示。

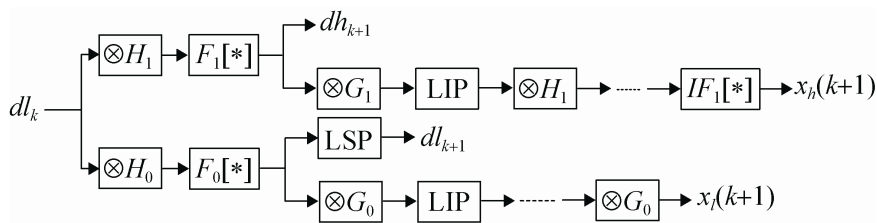


图 1 改进重构算法分层层树结构

图中, $\otimes H_0, \otimes H_1$ 以及 $\otimes G_0, \otimes G_1$ 分别表示与小波分解滤波器、重构滤波器的卷积计算。LIP 代表隔点插零; LSP 则代表隔点采样。 $x_l(k+1)$ 和 $x_h(k+1)$ 分别是第 $k+1$ 层上的低频、高频子带的重

构信号。算子 $F_0[\ast], F_1[\ast]$ 分别表示对第 k 层分解得到的低频和高频子带小波包系数的离散 Fourier 变换操作; $IF_1[\ast]$ 为对高频子带重构系数的逆变换, 其输出的具体变换式为

$$\widetilde{dl}_k(i) = F_0[dl_k(n)] = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_k-1} dl_k(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N_k}}, & 0 \leq i \leq \frac{N_k}{4}, \frac{3N_k}{4} \leq i \leq N_k \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\widetilde{dh}_k(i) = F_1[dh_k(n)] = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_k-1} dh_k(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N_k}}, & \frac{N_k}{4} \leq i \leq \frac{3N_k}{4} \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$dh_k(n) = IF_1[\widetilde{dh}_k(i)] = \frac{1}{N_k} \sum_{n=0}^{N_k-1} \widetilde{dh}_k(i) e^{j\frac{2\pi kn}{N_k}}, \begin{cases} 0 \leq i \leq \frac{N_k}{4} \\ \frac{3N_k}{4} \leq i \leq N_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: N_k 为第 k 层信号时间序列个数。

在通过 DWPT 准确获取电网中各次谐波时域信号的基础上, 对同频带的电压和电流信号求积分电能, 以 $V_w(k, n)$ 与 $I_w(k, n)$ 分别表示第 k 频带内第 l_n 层的第 n 个电压及电流小波包系数。则电网采样信号中基波电压与电流的有效值为

$$\begin{cases} V_f = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{m=k_1}^{k_2} \left\{ \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [V_w(m, n)]^2 \right\}} \\ I_f = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{m=k_1}^{k_2} \left\{ \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [I_w(m, n)]^2 \right\}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $k_1 \sim k_2$ 为基波所在的频带。当若 $f_b/W_{b_{\min}}$ 为整数时, 取 $k_2 = k_1 + 1$, 式(9)对两个频带内的系数进行计算; 而当 $f_b/W_{b_{\min}}$ 不为整数时, 取 $k_2 = k_1$, 此时只对一个频带内的系数进行计算。

谐波电压和电流的总有效值则为

$$\begin{cases} V_H = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{\text{samp}}} (V_{k-h})^2} \\ I_H = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{\text{samp}}} (I_{k-h})^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, V_{k-h} , I_{k-h} 为第 k 频带内谐波电压与电流的有效值, 其具体形式为

$$\begin{cases} V_{k-h} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [V_w(k, n)]^2} \\ I_{k-h} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [I_w(k, n)]^2} \end{cases} \quad (11)$$

电压和电流信号中的直流分量为

$$\begin{cases} V_{dc} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [V_w(1, n)]^2} \\ I_{dc} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [I_w(1, n)]^2} \end{cases} \quad (12)$$

进一步可得, 基波有功功率 P_f 、谐波有功功率 P_H 及总有功功率 P 分别为

$$P_f = \frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{m=k_1}^{k_2} \left\{ \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} V_w(m, n) I_w(m, n) \right\} \quad (13)$$

$$P_H = \frac{1}{N_{\text{samp}}} \sum_{m=1}^{2^h} \sum_{n=1}^{N_{\text{samp}}/2^h} [V_w(m, n) I_w(m, n)] \quad (14)$$

$$P = P_f + P_H + V_{dc} I_{dc} \quad (15)$$

基波无功功率 Q_f 、谐波无功功率 Q_H 、总无功功率 Q 则可表示为

$$Q_f = \sqrt{(V_f I_f)^2 - P_f^2} \quad (16)$$

$$Q_H = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq k_1, k_2}}^{2^h} \sqrt{(V_{k-h} I_{k-h})^2 - P_{k-h}^2} \quad (17)$$

$$Q = Q_f + Q_H \quad (18)$$

式中, P_{k-h} 为第 k 频带的谐波有功功率。

3 计量算法仿真验证与实验分析

3.1 电能计量仿真分析

3.1.1 电网稳态信号的电能计量仿真

为验证谐波电能计量性能, 采用 db40 小波函数, 采样频率 $f_{\text{samp}} = 800$ Hz, 满足 $f_{\text{samp}} > 2f_{\text{max}} = 700$ Hz

的约束要求, 则由式(1)的定义可得 $q=4$; 为提高分辨率, 增大窗口的宽度, 设定 $p=3$, 进而可确定信号样本总数 $N_{\text{samp}}=1280$ 。由 $m=9$ 可该变换中最小频带宽度 $W_{b_min}=1.5625$ Hz, 则由式(3)可确定多层 DWPT 分解的层数 $2 \leq l_n \leq 6$ 。对 80 个基波周期 T 的信号进行采样, 其余参数设置均同上节, 设仿真输入的稳态信号为

$$u(t) = 50 \sin(100\pi t + 90^\circ) + 25 \sin(300\pi t + 90^\circ) + 10 \sin(500\pi t + 90^\circ) + 5 \sin(700\pi t + 90^\circ) \quad 0 \leq t < 80T \quad (19)$$

$$i(t) = 10 \sin(100\pi t) + 5 \sin(300\pi t) + 2 \sin(500\pi t) + 0.5 \sin(700\pi t) \quad 0 \leq t < 80T \quad (20)$$

图 2~3 为稳态信号(21), (22)经改进的 DWPT 变换后提取的各次谐波电压波形和电流波形。稳态信号的有功电能计量仿真结果如表 1 所示。表 1 中的真值为原始信号在各频带的有功电能, 仿真值为通过改进的 DWPT 变换后提取的各频带有功电能。为去除边界效应影响, 取第 $5T \sim 75T$ 内的数据计算有功电能。仿真结果表明, 改进的 DWPT 可有效提取各频带信号, 式(13)~(15)所示的有功电能计量方法具有合理性与准确性。

按式(16)~(18)计算得到的稳态信号无功电能计量仿真实验数据列于表 2。表 2 中所列真值为原始信号在各频带的无功电能, 仿真值则为经过改进 DWPT 变换后提取的各频带无功电能, 并取第 $5T \sim 75T$ 内的数据进行计算。

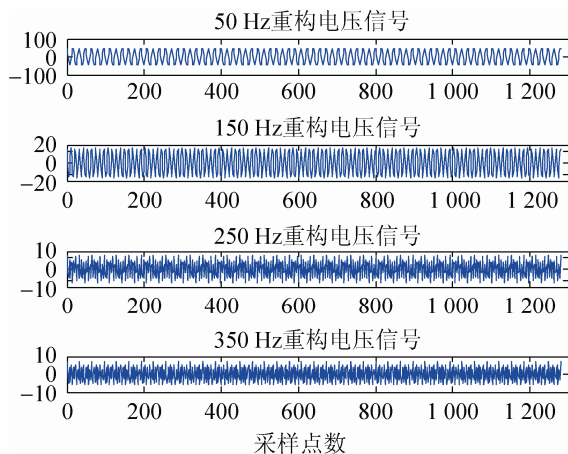


图 2 稳态输入电压信号的重构波形

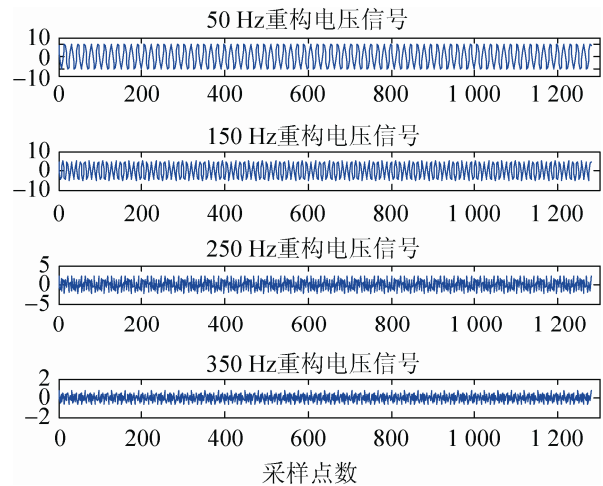


图 3 稳态输入电流信号的重构波形

表 1 稳态信号有功电能计量数据对比

频带/Hz	仿真值/Wh	真值/Wh	相对误差/%
0~100	149.37/3 600	150.0/3 600	0.420
100~200	9.365/3 600	9.45/3 600	0.899
200~300	7.204/3 600	7.20/3 600	-0.056
300~400	1.008/3 600	1.01/3 600	0.198
总值	166.93/3 600	167.66/3 600	0.441

表 2 稳态信号无功电能计量数据对比

频带/Hz	仿真值/Wh	真值/Wh	相对误差/%
0~100	149.97/3 600	150.0/3 600	0.020
100~200	9.378/3 600	9.45/3 600	0.762
200~300	7.175/3 600	7.18/3 600	0.0696
300~400	0.993/3 600	0.986/3 600	-0.720
总值	167.52/3 600	167.62/3 600	0.0597

3.1.2 电网非稳态信号的电能计量仿真

设定仿真输入的非稳态信号如式(21), (22)所示, 经改进的 DWPT 变换后提取的各次谐波电压波形和电流波形如图 4~5 所示。非稳态信号的有功电能、无功电能计量仿真结果分别列于表 3 和表 4。通过一系列仿真结果表明, 改进的 DWPT 可有效提取各频带信号, 适用于稳态和非稳态信号的有功和无功电能计量。

$$u(t) = \begin{cases} 50\sin(100\pi t + 90^\circ) & 0 \leq t < 20T \\ 50\sin(100\pi t + 90^\circ) + \\ 20\sin(300\pi t + 90^\circ) & 20 \leq t < 40T \\ 50\sin(100\pi t + 90^\circ) + \\ 20\sin(300\pi t + 90^\circ) + \\ 30\sin(500\pi t + 90^\circ) & 40 \leq t < 50T \\ 50\sin(100\pi t + 90^\circ) + \\ 20\sin(300\pi t + 90^\circ) + \\ 30\sin(500\pi t + 90^\circ) + \\ 10\sin(700\pi t + 90^\circ) & 50 \leq t < 80T \end{cases} \quad (21)$$

$$i(t) = \begin{cases} 10\sin(100\pi t) & 0 \leq t < 20T \\ 10\sin(100\pi t) + \\ 2\sin(300\pi t) & 20 \leq t < 40T \\ 10\sin(100\pi t) + 2\sin(300\pi t) + \\ 3\sin(500\pi t) & 40 \leq t < 50T \\ 10\sin(100\pi t) + 2\sin(300\pi t) + \\ 3\sin(500\pi t) + \sin(700\pi t) & 50 \leq t < 80T \end{cases} \quad (22)$$

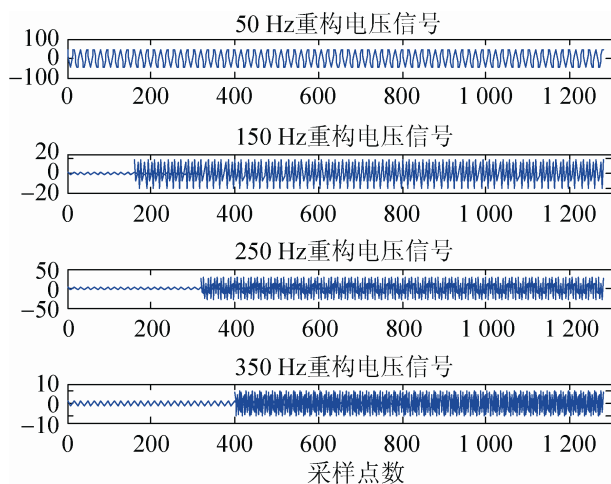


图 4 非稳态输入电压信号的重构波形

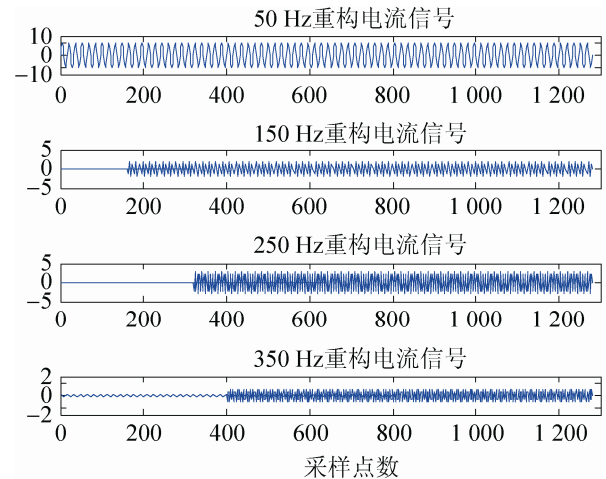


图 5 非稳态输入电流信号的重构波形

表 3 非稳态信号有功电能计量数据对比

频带/Hz	仿真值/Wh	真值/Wh	相对误差%
0~100	149.68/3 600	150.0/3 600	0.213 3
100~200	9.513/3 600	9.52/3 600	0.073 5
200~300	7.195/3 600	7.15/3 600	-0.629 4
300~400	1.009/3 600	1.02/3 600	1.078 4
总值	167.39/3 600	167.69/3 600	0.174 7

表 4 非稳态信号无功电能计量数据对比

频带/Hz	仿真值/Wh	真值/Wh	相对误差%
0~100	149.45/3 600	150.0/3 600	0.366 7
100~200	9.547/3 600	9.52/3 600	-0.283 6
200~300	7.174/3 600	7.15/3 600	-0.335 7
300~400	1.102/3 600	1.10/3 600	-0.181 8
总值	167.27/3 600	167.77/3 600	0.296 2

3.2 基于单子带重构变换的电能计量装置实现

在利用 Matlab 仿真验证本文算法可行的基础上, 基于离散小波包变换单子带改进算法, 作者所在的实验室研制了相应的谐波电能计量装置, 其硬件原理框图如图 6 所示。该系统采用高精度 ADC 转换器 AD73360 对电网三相电压信号和电流信号进行同步采样, 采用结构对称、具有线性相位特性的 FIR 滤波器对 6 路采样数据分别进行低通数字滤波处理; 在进行交流增益误差及相位偏移误差校正之后, 通过高速数据采集卡送 DSP(ADSP-BF533) 进行处理, 输出谐波分析与谐波电能计量结果。

该装置在雅砻江流域水电开发有限公司进行

了运行试验与准确性检验, 实验中利用 PS-3E 标准信号源产生正弦波叠加谐波分量, 并将该装置测试结果与 Arbiter Systems 931 谐波分析仪进行对比, 其谐波测量准确性检验对比结果如表 5 所示。从表中可看出, 利用本文算法得到的检测误差与标准仪器接近, 证明了该装置的可行性。

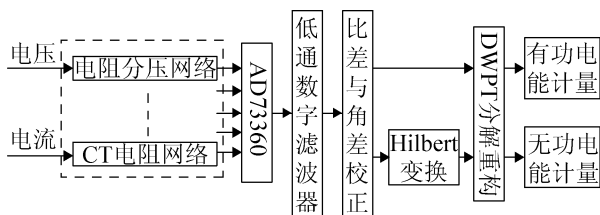


图 6 谐波电能计量装置原理框图

表 5 谐波电流测量准确性检验对比结果

谐波次数	AS931 测量误差/%	研发装置测量误差(%)			最大引用误差/%
		A 相	B 相	C 相	
3	2.184	2.045	1.991	2.042	0.013
5	2.037	1.966	2.054	2.199	0.016
7	2.086	2.346	2.195	1.995	0.024
9	1.980	1.820	1.876	1.957	0.022
11	2.105	2.274	2.105	2.438	0.030
13	1.994	2.075	2.205	1.999	0.029

4 结论

本文最小频率带宽和相应的小波分解层数等思想, 提出了基于离散小波包分解重构的谐波电能计量改进方法。通过采样点数、窗口宽度及频率, 确定了频带宽度和离散小波包分解的层数; 利用离散 Fourier 变换及其逆变换去掉各子带中多余的频率成分, 对单子带重构算法进行改进。利用 db40 小波函数进行谐波电能计量数值仿真, 克服了离散小波包变换中存在频率混叠现象的固有缺陷, 验证了该算法的有效性与计量精度, 其理论方法可为电能计量装置的设计提供理论参考。

参考文献:

[1] Testa A, Gallo D, Langella R. On the processing of harmonics and interharmonics: using Hanning window in standard framework [J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S0885-8977), 2004, 19(1): 28-34.
[2] Novotny M, Slepicka D, Sedlacek M. Uncertainty

analysis of the RMS value and phase in the frequency domain by noncoherent sampling [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on (S0018-9456), 2007, 56(3): 983-989.

- [3] Paulo F R. Time-varying waveform distortions in power systems [M]. USA: Wiley-IEEE Press, 2009.
[4] Li C, Xu W S, Tayjasanant T. Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement [J]. Elect. Power Syst. Res. (S0378-7796), 2003, 66(1): 39-48.
[5] Davis E J, Emanuel A E. Harmonic pollution metering: Theoretical consideration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S0885-8977), 2000, 15(1): 19-23.
[6] Julio B, Diego R I. A new method for measurement of harmonic groups in power systems using wavelet analysis in the IEC standard framework [J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2006, 76(4): 200-208.
[7] Yoon W K, Devaney M J. Reactive power measurement using the wavelet transform [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas. (S0018-9456), 2000, 49(2): 246-252.
[8] Walid G M, Hawary M E. Reformulating three-phase power components definitions contained in the IEEE standard 1459-2000 using discrete wavelet transform [J]. IEEE Trans. Power Deliv. (S0885-8977), 2007, 22(3): 1917-1924.
[9] Walid G M, Hawary M E. A new perspective for the IEEE standard 1459-2000 via stationary wavelet transform in the presence of non-stationary power quality disturbance [J]. IEEE Trans. Power Deliv. (S0885-8977), 2008, 23(4): 2356-2365.
[10] Vatansever F, Ozdemir A. A new approach for measuring RMS value and phase angle of fundamental harmonic based on wavelet packet transform [J]. Elect. Power Syst. Res. (S0378-7796), 2008, 78(1): 74-79.
[11] Hamid E Y, Mardiana R, Kawasaki Z. Method for RMS and power measurements based on the wavelet packet transform [J]. Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. (S0954-4062), 2002, 149(2): 60-66.
[12] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
[13] Julio B, Ramon I D. Analysis of harmonics in power systems using the wavelet-packet [J]. IEEE Transaction on Instrument and Measurement(S0018-9456), 2008, 57(1): 63-69.
[14] 杨建国. 小波分析及其工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.