

基于 1/2 周期重构 DFT 的 瞬时谐波电流检测

刘开培¹, 刘传林^{1,2}

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 广东水利电力职业技术学院 电力系, 广东 广州 510635)

摘要: 结合带通滤波器的瞬时谐波检测方法, 设计了基于 1/2 周期重构离散傅里叶变换带通滤波器的谐波检测系统。该带通滤波器在基频处幅值为 1, 在各次谐波处幅值为 0, 且在基频处的相频特性过零点。系统通过带通滤波器分离出基波分量, 再从原电流中减去基波分量得到谐波分量, 计算量小于快速傅里叶变换。理论和仿真表明, 系统可检测电路稳态和暂态谐波, 且缩短了动态响应时间, 改善了滤波器的跟踪性能。

关键词: 离散傅里叶变换; 1/2 周期; 重构; 谐波检测

中图分类号: TM 133; TM 833

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0018-04

用离散傅里叶变换 DFT(Discrete Fourier Transform)确定谐波, 常规上需要检测一个周期的数据, 致使检测至少存在一个周期的时间延迟, 而且计算量大; 并且检测精度越高, 滤波器的阶数要求越高, 计算量越大, 实时性越差, 不能很好适用于电力系统谐波的实时补偿。针对这一问题, 本文在带通 DFT 滤波器的基础上, 讨论了用 1/2 周期重构 DFT 的算法, 在理论上有效地提高了检测的实时性, 在谐波实时补偿方面具有一定的优势。

1 基于 DFT 带通滤波器的谐波电流检测^[1]

1.1 带通滤波的基本原理

对于三相电路中某相(或单相)的谐波电流检测系统, 若设被检测电流信号在基频处的幅值无衰减, 相位无延时, 其他次谐波均滤掉, 就能实时地检测出基波, 再从原电流信号中减去基波即可得到要测量的谐波电流总和。根据此基本原理设计的滤波器称为带通滤波器。从幅频特性与相位特性方面考虑, 带通滤波器须满足:

- 在基频处的幅值为 1, 在各次谐波处的幅值为零, 而其他频率点的幅值不作特别要求;
- 在基频处的相频特性过零点, 而其他频率点的相频特性不作特别要求。

在数字滤波器中, 有限长单位冲激响应 FIR(Finite Impulse Response)滤波器可适应各种幅度特性和相位特性的要求^[2,3], 在此选择采用 FIR 滤波器设计具有特殊幅频与相频特性的带通滤波器, 应具有图 1 所示幅频特性和图 2 所示相频特性(图中 $\lambda = f/f_0$, f_0 为基频; A 为幅值)。

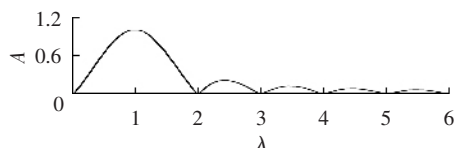


图 1 带通滤波器的幅频特性

Fig.1 The amplitude-frequency characteristics of band filter

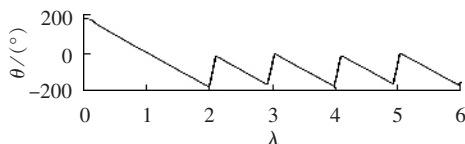


图 2 带通滤波器的相频特性

Fig.2 The phase-frequency characteristics of band filter

选择采用有限冲激响应 FIR 滤波器设计具有特殊幅频与相频特性的带通滤波器, 若数字滤波器采样频率为 f_s , 每个周期的采样点数为 N_s ; 滤波器单位抽样响应为 $h(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$; N 为滤波器长度)。设输入序列为 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换为

$$X(k) = \text{DFT}(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad (1)$$

$$W_N^{nk} = e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}$$

将 DFT 看作一组滤波器^[1,4], $X(k)$ 为序列 $x(n)$ 中 k 次谐波分量的大小, 可看作如下卷积形式:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) h_k(N-1-n) \quad (2)$$

令单位取样响应为

$$h_k(n) = \begin{cases} W_N^{(N-1-n)k} & n=0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & n < 0 \text{ 或 } n \geq N \end{cases} \quad (3)$$

输入序列为: $\dots, 0, 0, x(0) \dots x(N-1), 0, 0, \dots$, 此输入序列加入到单位取样响应为 $h_k(n)$ 的滤波器

后,在 $(N-1)$ 时刻的输出为

$$y(N-1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) h_k(N-1-n) \quad (4)$$

由式(2)(4)可得:

$$y(N-1) = X(k) \quad (5)$$

因此,求序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换 $X(k)$ 的过程相当于以序列 $x(n)$ 为输入,加入到单位取样为 $h_k(n)$ 的滤波器,其在 $(N-1)$ 时刻的输出就是 $X(k)$ 。

由式(3)可见, $h_k(n)$ 与 k 的值有关,取不同的 k 值可得不同的单位取样响应,分别对应不同的数字滤波器。设要提取的是基波,则 $k=1$,再考虑到滤波后的基频幅值无衰减,可令

$$h(n) = \begin{cases} W_N^{(N-1-n)} & n=0,1,\dots,N-1 \\ 0 & n < 0 \text{ 或 } n \geq N \end{cases} \quad (6)$$

求 $h(n)$ 的 z 变换,分析该滤波器的频率特性:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{(N-1-n)} z^{-n} = W_N^{(N-1)} \frac{1-z^{-N} W_N^{-N}}{1-z^{-1} W_N^{-1}} \quad (7)$$

而 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$, 令 $z = e^{j\omega}$, 代入式(7),可得该滤波器的相频特性与幅频特性分别为

$$\theta(\omega) = -\frac{2\pi}{N} + \frac{N-1}{2}(\omega - \frac{2\pi}{N}) \quad (8)$$

$$|H(j\omega)| = \frac{\sin[N(2\pi/N - \omega)/2]}{\sin[(2\pi/N - \omega)/2]} \quad (9)$$

若需要提取基波,则对于基波信号有 $\omega = 2\pi/N$, 此时

$$\theta = -2\pi/N \quad (10)$$

由式(10)可见,当 N 足够大时,基波的相位移可以忽略不计,从而可以实现实时跟踪,其相频特性如图 2 所示。由式(9)可知,其幅频特性具有如图 1 所示的特性,可以有效滤除各次谐波。

1.2 基于 DFT 带通滤波器的谐波电流检测系统

设在三相电路中某相(或单相)的谐波电流检测系统中,选择基于 DFT 改进的带通滤波器,构成在基频处幅值无衰减、相位无延时而其他次谐波均滤掉的基波检测系统,实时检测基波,如图 3 所示。

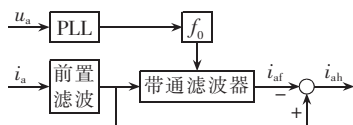


图 3 基于 DFT 带通滤波的谐波检测原理
Fig.3 The principle of harmonic detection based on DFT band filter

在检测系统中,前置滤波器用于过滤高次谐波。 a 相电压 u_a 经锁相环 PLL 得到电压的频率 f_0 , 即基波频率。带通滤波器的通带中心频率为基频 f_0 , 经滤波得到 a 相的基波电流 i_{af} , 从原信号 a 相电流 i_a 减去基波 i_{af} 即得到 a 相要测量的谐波电流总和 i_{ah} 。

2 基于 1/2 周期重构 DFT 带通滤波方式谐波检测

首先考虑一个周期数据的 DFT 带通滤波检测, 采样后的输入序列 $x(n) (n=0,1,\dots,N-1)$ 经滤波器后的输出为

$$y(N-1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) h(N-1-n) \quad (11)$$

后移一采样点时,输入序列 $x(n) (n=1,2,\dots,N)$, 由 DFT 圆周移位定理^[3]可得递推 DFT 计算公式:

$$y(N) = W_N^1 y(N-1) + x(N) - x(0) \quad (12)$$

$$W_N^1 = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

由式(11)和式(12)可知,由于利用了采样序列相邻点的傅里叶变换已有的计算数据去构造递推算法,每采样一次新数据,只需要进行 2 次乘法运算和 2 次加法运算,其计算量很小。

经分析:在稳态谐波的检测时,如果采用一个周期的信息点进行计算,仍然有半个周期的数据是冗余的,因此可采用输入序列 $x(n) (n=1,2,\dots,N)$ 中的一半数据去计算整个序列 $x(n) (n=1,2,\dots,N)$ 的 DFT。

基于 1/2 周期数据重构 DFT 的计算过程就是用 $\{x(n) (n=(N/2+1),\dots,N)\}$ 与 $\{-x(n) (n=(N/2),\dots,N)\}$ 替换序列 $x(n) (n=1,2,\dots,N)$ 。由 DFT 的圆周移位定理得递推 DFT 计算公式,从而得到其基波分量的输出为

$$y(N) = W_N^1 y(N-1) + 2[x(N) + x(N/2)] \quad (13)$$

$$W_N^1 = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

根据实际情况,希望滤波器在基波处幅值为 1, 则滤波器的实际输出为

$$y' = y(N)/N \quad (14)$$

3 仿真分析^[5,6]

根据以上理论分析设计带通滤波系统,如果系统的采样频率为 6.4 kHz,一个周期采样 128 个点,则滤波器的阶次也为 128。

3.1 带通滤波器跟踪性能

a 相电流如图 4 所示。当电网中含谐波电流时,由于分别使用 1 周期和 1/2 周期的数据,采用 1 周期和 1/2 周期重构的 DFT 检测系统的跟踪性能有所差别,如图 5,6 所示。基于 1/2 周期重构的 DFT 检测系统的动态响应为 1/2 周期。

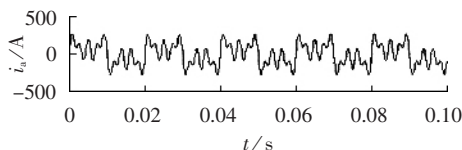


图 4 a 相电流波形

Fig.4 The current waveform of phase a

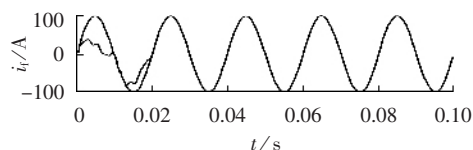


图 5 基于 1 周期重构 DFT 带通滤波器的跟踪性能

Fig.5 The tracing performance of DFT reconfiguration by 1 period

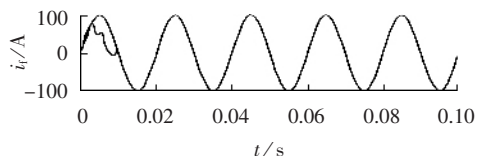


图 6 基于 1/2 周期重构 DFT 带通滤波器的跟踪性能

Fig.6 The tracing performance of DFT reconfiguration by 1/2 period

3.2 带通滤波稳态谐波检测仿真

3.2.1 算例 1

设在某时刻开始测得通过前置模拟滤波器滤波后的三相电网某相(或某单相)电流 i 如图 7(a)所示,该含有稳态谐波的电流通过基于 1 周期重构的 DFT 带通滤波器滤波后的基波电流 i_t 如图 7(b)所示,谐波电流 i_h 如图 7(c)所示,可见该系统可以很好地检测稳态谐波电流,其跟踪性能与准确性能较差。

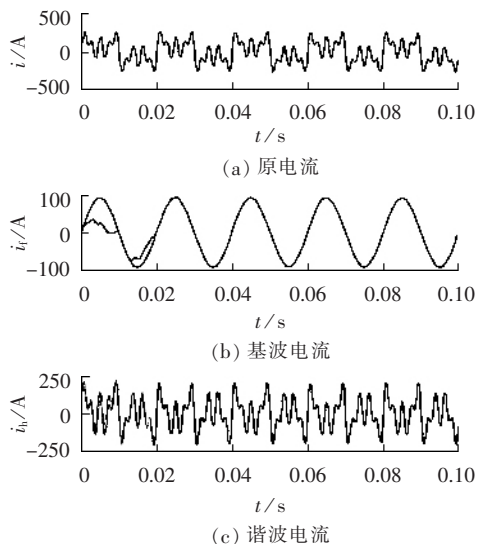


图 7 基于 1 周期重构 DFT 带通滤波器的稳态谐波检测

Fig.7 The steady harmonic detection based on DFT reconfiguration by 1 period

3.2.2 算例 2

设在某时刻开始测得通过前置模拟滤波器滤波后的三相电网某相(或某单相)电流 i 如图 8(a)所示,该含有稳态谐波的电流通过基于 1/2 周期重构的 DFT 带通滤波器滤波后的基波电流 i_t 如图 8(b)所示,谐波电流 i_h 如图 8(c)所示,可见该系统可以很好地检测稳态谐波电流,其跟踪性能与准确性能都比较好。

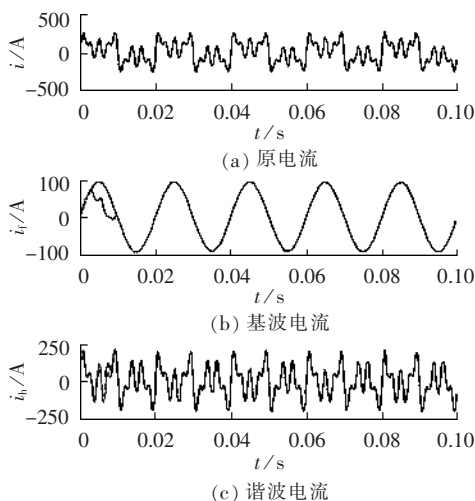


图 8 基于 1/2 周期重构 DFT 带通滤波器的稳态谐波检测

Fig.8 The steady harmonic detection based on DFT reconfiguration by 1/2 period

3.3 带通滤波暂态谐波检测仿真

分别采用基于 1/2 周期重构 DFT 和基于 1 周期重构 DFT 系统检测谐波的算例,用以说明当电网污染电流含有暂态基波变化与稳态或暂态谐波分量的检测性能。

由于只需要使用 1/2 个周期的数据,采用基于 1/2 周期重构 DFT 可以更好地反映暂态过程的变化,进一步克服基于 DFT 带通滤波器的弱点,改善 DFT 跟踪的精确性能。

3.3.1 算例 3

设在某时刻开始测得通过前置模拟滤波器滤波后的三相电网某相(或某单相)电流 i 如图 9(a)所示,该电流含有稳态谐波与暂态基波谐波分量,通过基于 1 周期重构 DFT 带通滤波器滤波后的基波电流 i_t 如图 9(b)所示,谐波电流 i_h 如图 9(c)所示。

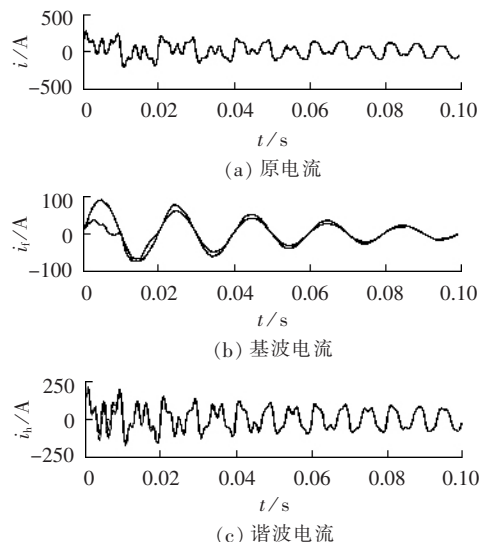


图 9 基于 1 周期重构 DFT 带通滤波器的暂态谐波检测

Fig.9 The transient harmonic detection based on DFT reconfiguration by 1 period

3.3.2 算例4

设在某时刻开始测得通过前置模拟滤波器滤波后的三相电网某相(或某单相)电流 i 如图10(a)所示,该电流含有暂态基波变化与暂态基波和谐波分量,通过基于1/2周期重构DFT带通滤波器滤波后基波电流 i_f 如图10(b)所示,谐波电流 i_h 如图10(c)所示。其精确性能优于基于1周期重构的滤波。

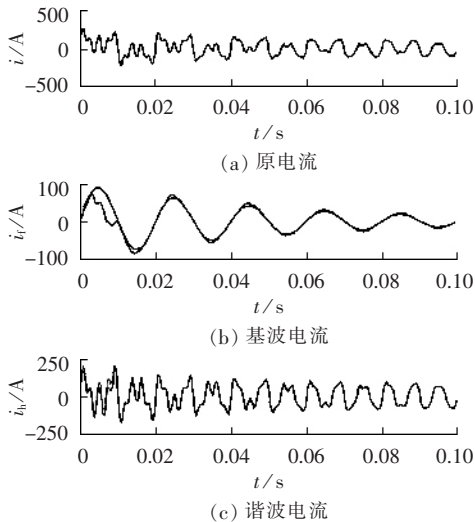


图10 基于1/2周期重构DFT带通滤波器的暂态谐波检测

Fig.10 The transient harmonic detection based on DFT reconfiguration by 1/2 period

基于DFT带通滤波器检测的优点是:能单独实时地检测出各单相电流基波,直接对电流的基频进行处理,不需坐标变换;同时,每一点的输出的计算量大大小于快速傅里叶变换。因为基频处的无幅值衰减,无相位延时,从原信号中减去基波就得到要测量的谐波总和;其检测不涉及三相三线制电网系统三相电压的畸变影响,适用于三相和单相的谐波检测。

4 结论

本文基于DFT带通滤波的电网谐波检测方法:

滤波器幅频特性为基频处的幅值无衰减,相位无延时,能全部滤去2次以上整数次的谐波。讨论了用1/2周期重构DFT的算法,该算法易于实现,保留了数字滤波器的准确性,提高了滤波跟踪性能。仿真实验证明,其动态响应为1/2周期,大大地缩短了动态响应的时间,而且计算量小、可靠性高。更重要的是改进后只使用1/2个周期的数据,可以进一步减小基于DFT带通滤波器对变化电流检测的偏差,更好地反映谐波的变化状况,改善了滤波器的跟踪性能。

参考文献:

- [1] 刘开培,张俊敏.基于DFT的瞬时谐波检测方法[J].电力自动化设备,2003,23(3):8-10.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min. Instantaneous harmonic detection based on DFT[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(3):8-10.
- [2] 胡广书.数字信号处理[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [3] 程佩青.数字信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [4] MANCHUR G,ERVEN C C. Development of a model for predicting filter from electric arc furnaces[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1992,7(1):416-420.
- [5] 楼顺天,李博菡.基于MATLAB的系统分析与设计——信号处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [6] 梁虹,梁浩,陈跃斌,等.信号与系统分析及MATLAB实现[M].北京:电子工业出版社,2002.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

刘开培(1962-),男,湖北荆门人,教授,博士研究生导师,从事智能控制和信号检测与处理、电能质量分析与控制等方面的研究(E-mail:kpliu@s1000e.wuhee.edu.cn);

刘传林(1965-),男,湖南醴陵人,副教授,硕士研究生,从事电能质量分析与控制方面研究及电路教学(E-mail:liuel@gdsdx.edu.cn)。

Instantaneous harmonic detection based on DFT reconfiguration by half period

LIU Kai-pei,LIU Chuan-lin

(1. Wuhan University,Wuhan 430072,China;2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering,Guangzhou 510635,China)

Abstract: Combined with the band-filter-based instantaneous harmonic detection method, a harmonic detection system based on DFT(Discrete Fourier Transform) reconfiguration by 1/2 period is designed. The fundamental amplitude of the proposed band filter is 1,its harmonic amplitude is 0 and its fundamental phase is 0. The harmonic component is obtained by subtracting the fundamental component,which is separated from the original current through the band filter. Its computing work is less than that of fast Fourier transform. The theoretic and simulative results show that the proposed system can detect the steady and transient harmonics with shorter dynamic response time and better tracing performance of filter.

This project is supported by Natural Science Fund of Hubei Province(2003ABA046).

Key words: DFT; 1/2 period; reconfiguration; harmonic detection