

简化 DFT 滑窗迭代算法在有源电力 滤波器谐波检测中应用

成 剑¹, 罗 安², 付 青¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:介绍了一种在有源滤波控制器应用中基于简化离散傅里叶变换的谐波电流检测技术的设计和实现。检测中非线性负载产生的谐波电流成分,运算过程中应用了滑窗迭代算法,它能有效地提高系统的实时性、目标跟随特性和抗干扰性,并且具有计算量小、容易工程实现的特点。进行了滑窗迭代算法的 Matlab 仿真试验,结果表明该算法能准确计算出负载电流中的基波成分,误差小,实时性强,能满足实际应用需要。

关键词:有源滤波;离散傅里叶变换;滑窗迭代算法

中图分类号:TM 76;TM 930.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-6047(2005)05-0057-04

目前,谐波抑制解决方案的一个重要趋势是采用有源滤波器 APF (Active Power Filter),从补偿对象中检测出负载谐波电流,由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等、极性相反的补偿电流注入电网,从而使供电电网中只含有基波电流^[1~4]。针对有源滤波器负载谐波电流检测的实时性要求和控制特点,本文提出了一种简化的离散傅里叶变换 DFT (Discrete Fourier Transform) 滑窗迭代算法,并通过数字信号处理器完成了该算法的实现。

1 常用谐波检测分析方法

电力系统单相、三相谐波信号检测分析的方法有很多,下面对几种常用的方法进行简单的分析比较。

1.1 模拟电路法

长期以来,在 APF 的谐波分离环节习惯采用模拟滤波器实现,但此方法的补偿特性受电网阻抗和运行状态的影响,容易和系统发生并联谐振,而且低通滤波器的频率特性和元器件参数容易因外界条件的改变而改变,稳定性差。随着数字化进程的发展,这种方法已基本被取代。

1.2 快速傅里叶变换

建立在 DFT 基础上的快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transform)^[5]被广泛应用于各种谐波信号分析软件中。FFT 要求对信号进行完整的整周期采样,然后分析计算出其傅里叶系数,确定负载电流中的基波和谐波电流成分。因此,它适合于负载变化缓慢的对象。因为其固有至少一个完整工频信号周期的延时,对于要求具有实时跟随特性的 APF 应用而言,将极大地影响系统的谐波抑制效果。

1.3 基于瞬时无功功率理论的 $i_p - i_q$ 法

基于瞬时无功功率理论发展而来的 $i_p - i_q$ 谐波检测算法^[1,6],这种方法通过坐标变换,完成系统三相到两相的分析检测,而且不受电网电压畸变的影响,已成为 APF 谐波检测中的一种重要方法。这一方法实现的关键在于其低通数字滤波器的实现,设计一个既能满足系统各项性能指标要求又要尽量降低滤波器阶数满足实际工程应用的数字滤波器,其难度是相当大的。

1.4 其他方法

近年来,出现了多种智能算法,如将人工神经网络和信号处理中的自适应噪声对消技术应用于有源滤波器的谐波电流检测中,提出了一种基于单个神经元的自适应谐波电流检测方法。利用神经元的映射、自适应和自学习等功能,消除谐波电流检测过程中的误差。此外,还有小波变换法^[7]等。毫无疑问,这些智能算法的引入使得计算准确度较高,响应也很好。但是,这些方法的实现必须通过一系列复杂计算过程,计算量大,难以在 APF 工程应用中实现。

2 简化的 DFT 滑窗迭代算法

2.1 傅里叶变换基础

对任意有限带宽的周期信号 $x(t)$, 设其周期为 T , 频带宽度从基波角频率 ω 到 $(N_{\max} \omega)$, 傅里叶变换的表达式为

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

对上述方程进行离散化,可得:

$$x(k\tau) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cos(n\omega k\tau) + B_n \sin(n\omega k\tau) \quad (4)$$

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i\tau) \cos(n\omega i\tau) \quad (5)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i\tau) \sin(n\omega i\tau) \quad (6)$$

式中 $k=0,1,2,\dots,N-1$; $\tau=T/N$ (N 为周期采样个数)。

这是离散傅里叶变换 DFT 的基本公式^[1],可以看出,这些公式的计算要求从固定的起始点($i=0$)定义的一个整周期采样的 N 个采样数据同时参与计算,计算量相当大。显然,这些公式是不适于瞬时谐波电流检测的快速计算。

2.2 滑窗迭代 DFT 算法

根据有源滤波器谐波检测分析的实时性要求,利用滑窗迭代算法的思想,对公式(5)(6)进行如下改进:

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \cos(n\omega i\tau) \quad (7)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \sin(n\omega i\tau) \quad (8)$$

式中 N_{cur} 表示最新的采样数据点; $x(i\tau)$ 表示 i 个采样周期前的采样数据。

修改后的式(7)(8)与修改前式(5)(6)相比较, $N_{\text{cur}}-N+1$ 代替了 $i=0$, $i=N_{\text{cur}}$ 代替了 $N-1$, 最新的实时采样数据参与负载电流检测分析,而相应的淘汰了最老的采样数据,大大加快了采样数据的更新速度,提高了系统跟踪负载电流变化的能力。如果式(7)(8)需要对负载电流进行完整的频谱分析,计算出各次谐波的幅值与相位,繁重的计算量使得这种滑窗迭代算法没有实用意义。考虑这里进行电流谐波分析的目的是为有源滤波器控制提供参考电流控制信号,只需要从负载电流中得到各次谐波电流之和,借用瞬时无功功率理论中的 i_p-i_q 算法逻辑,计算出基波电流分量值,然后从总的负载电流中减去它,便得到了所需要的参考电流信号,这样,参考电流信号获取的计算量将大大减少。

基波电流分量 $x_1(k\tau)$ 可以由下面的公式给出:

$$x_1(k\tau) = A_1 \cos(\omega k\tau) + B_1 \sin(\omega k\tau) \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \cos(\omega i\tau) \quad (10)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \sin(\omega i\tau) \quad (11)$$

为了实时得到期望的基波电流值,必须由式(10)(11)在一个采样间隔时间段同时计算出 A_1, B_1 的值,当系统采样频率比较高(N 比较大)时,两式的计算量也将是比较大的。

为了简化计算过程,可以通过软件实现滑窗迭代算法,算法模型如图1所示。

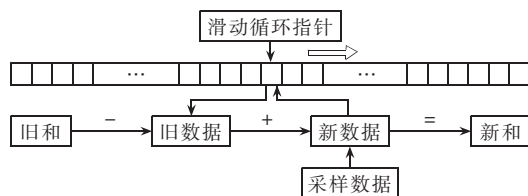


图1 滑窗迭代计算模型

Fig.1 The model of sliding-window iterative algorithm

一个完整周期 N 点的采样数据经过与之对应的旋转因子相乘后存储在一片连续的数据空间中,通过设定一个数据运算循环指针来定位当前采样数据的存储位置,完成一个完整周期 N 点的采样计算数据更替后,指针指回对应数据存储空间的起始位置,开始下一周期的数据循环更替。式(10)(11)中的求和计算就可根据式(12)(13)滑窗迭代算法简化。

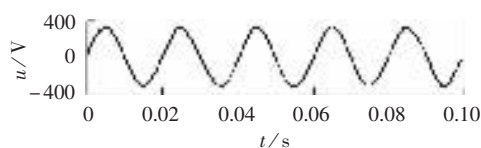
$$\sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \cos(\omega i\tau) = \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \cos(\omega i\tau) - x[(N_{\text{cur}}-N)\tau] \cos[\omega(N_{\text{cur}}-N)\tau] + x(N_{\text{cur}}\tau) \cos(\omega N_{\text{cur}}\tau) \quad (12)$$

$$\sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \sin(\omega i\tau) = \sum_{i=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} x(i\tau) \sin(\omega i\tau) - x[(N_{\text{cur}}-N)\tau] \sin[\omega(N_{\text{cur}}-N)\tau] + x(N_{\text{cur}}\tau) \sin(\omega N_{\text{cur}}\tau) \quad (13)$$

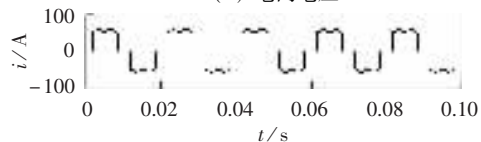
这样,式(10)(11)的求和计算就简化为一个减法和一个加法的计算,计算后的新和被重新存储到旧和的数据存储单元,完成迭代。系统的整个计算过程只要在初始化阶段的一个工频周期内完成整周期求和运算,以后的求和运算就完全可以在一个采样周期内完成。滑窗迭代算法得以实现,使谐波电流检测的运算延时大大减少,提高了系统的实时性。

3 滑窗迭代算法的 Matlab 仿真

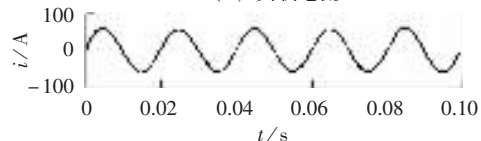
对滑窗迭代算法进行了 Matlab 仿真,信号采样频率设定为 6.4 kHz。仿真参数如下:电源相电压 220 V, 50 Hz; 负载为不可控三相整流桥带纯阻性负载, $R_L=10\ \Omega$ 。仿真结果如图2、图3所示。



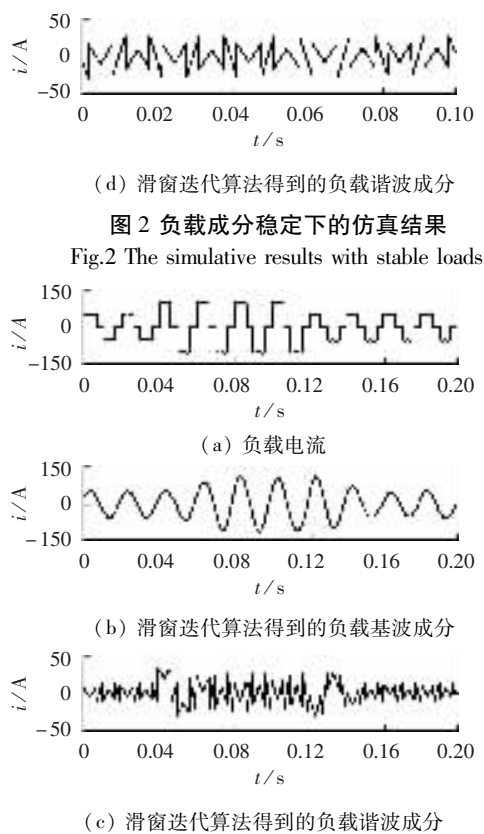
(a) 电网电压



(b) 负载电流



(c) 滑窗迭代算法得到的负载基波成分



从仿真实验结果可以看出,滑窗迭代算法能准确地计算出负载电流中的基波成分,误差小,实时性强,满足实际应用需要。但在负载发生突变的情况下,滑窗迭代算法会产生一个工频周期的跟踪延时。

4 系统硬件与软件设计与实现

研制了 1 台 300 kV·A 混合型有源电力滤波器的实验样机,并用它进行谐波滤除研究。整个有源滤波器控制系统由工控机 + DSP 的上下位机结构组成,谐波检测通过 DSP 实现,具有实时性强、动态响应较好的特点。

硬件采用 TI 公司的数字信号处理器 TMS320F2407 加 MAXIM 公司的模/数转换芯片 MAX 125 完成系统的数据采集和数据预处理。TMS320F2407 是 TI 公司生产的 16 位定点数字信号处理芯片,运算频率可达 40 MHz,即执行一个指令周期只需要 25 ns。MAX 125 是 14 位高速多通道数据采集芯片,且能实现多通道的同步跟踪与锁存,完成一路数据采样的转换时间仅需 3 μs。滑窗迭代算法的软件流程图如图 4 所示。

配合有源滤波控制器输出部分功率电路的输出开关频率,系统采样频率设定为 6.4 kHz,即信号的采样周期为 156.25 μs,利用滑窗迭代算法进行谐波检测分析,完成一次数据处理的时间不到 1 μs,留下 155.25 μs 的时间给有源滤波的控制器,为后部分控制器的设计处理提供了更多的系统灵活性。

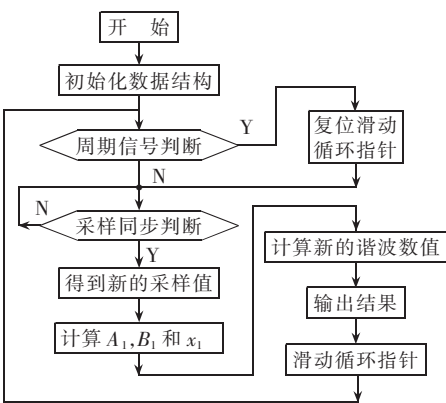


图 4 谐波检测滑窗迭代算法软件流程图

Fig.4 The flowchart of sliding-window iterative algorithm for harmonic detection

5 结论

针对有源滤波器中谐波检测技术的需要,本文提出了一种简化 DFT 分析的滑窗迭代算法,通过很少的计算就能准确地求取负载电流中的谐波成分。

从滑窗迭代算法的分析和实验过程中可以发现,在有源滤波系统的应用中,该算法对于负载基波电流成分稳定,谐波突变频率较高的治理对象有很高的实用价值,但对于负载基波电流成分时常突变的对象,该算法在每次突变后会有一个周期的突变跟踪过渡过程。

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,1998.

[2] 张俊敏,宣 扬. 基于瞬时无功功率理论谐波检测的新方法[J]. 电力情报,2002,(2): 4-6,29.

ZHANG Jun-min, XUAN Yang. New harmonic detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Information on Electric Power, 2002,(2): 4-6,29.

[3] 唐 欣,罗 安,涂春鸣. 基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波器电流控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10): 38-41.

TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming. Recursive integral PI for current control of hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 38-41.

[4] 涂春鸣,罗 安,刘 娟. 无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3): 17-21.

TU Chun-ming, LUO An, LIU Juan. Multi-objective optimal design of passive power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 17-21.

[5] MARIETHOZ S, RUFER A C. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering[J]. IEEE Trans. on P. E., 2002, 17(4): 564-573.

[6] TANAKA T, AKAGI H. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits[J]. IEEE Trans. on Power Deli., 1995, 6(3): 1737-1742.

- [7] 胡国胜,任 震,黄雯莹.小波变换在电力系统中应用研究[J].电力自动化设备,2002,22(3):71-78.
HU Guo-sheng,REN Zhen,HUANG Wen-ying. Application of wavelet transform to electric power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2002,22(3):71-78.
- [8] 应启珩,冯一云,窦维蓓.离散时间信号分析和处理[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [9] 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):63-66.
ZHANG Fu-sheng,GENG Zhong-xing,GE Yao-zhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. **Proceedings of the CSEE**,1999,19(3):63-66.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:

成 剑(1980-),男,湖南湘乡人,硕士研究生,主要从事电力电子技术及谐波检测技术的研究(E-mail:jc_csu@163.com);

罗 安(1957-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事电力电子技术、电力系统自动化、工业过程控制、智能控制的研究;

付 青(1976-),男,湖南益阳人,博士研究生,主要从事电力系统自动化和节能技术的研究。

Application of simplified DFT based sliding-window iterative algorithm in APF harmonic detection

CHENG Jian¹, LUO An², FU Qing¹

(1. Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The design and implementation of a harmonic current computation technique is presented, which is used in active power filter based on a simplified discrete Fourier transform. A sliding-window iterative algorithm is applied in the computation to detect the harmonic components generated by nonlinear loads, which improves the real-time, tracing and anti-interference performances with less computation and easy implementation. The algorithm is simulated with Matlab, and the results show that it calculates the fundamental component of load current with small errors, which satisfies the practical application.

This project is supported by National Natural Science Fund of China(60474041).

Key words: active power filter; discrete Fourier transform; sliding-window iterative algorithm

(上接第56页 continued from page 56)

(责任编辑:李育燕)

LIN Tao, WAN Qiu-lan, JIN Hua-zheng. Packaged technique and its application in calculation software design of power system[J]. **Jiangsu Electrical Engineering**, 2002, 21(10):23-24.

- [8] 李胜利,任 军,赖 菲.基于组件技术动态生成 Web 服务统计图形[J].电力系统自动化,2003,27(14):79-82.
LI Sheng-li,REN Jun,LAI Fei. Development of Web service dynamic statistic graphics based on component technology[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, 27(14):79-82.

作者简介:

徐 箭(1980-),男,湖北咸宁人,博士研究生,主要从事电力系统稳定方面的研究(E-mail:collenstick@163.com);

袁荣湘(1965-),男,湖南新化人,副教授,主要从事电力系统继电保护、电力系统稳定方面的教学和研究工作;

陈允平(1945-),男,湖南新化人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统、电力电子、高电压工程等方面的研究工作。

Design and realization of on-line transient stability computation program

XU Jian, YUAN Rong-xiang, CHEN Yun-ping

(School of Electrical Engineering,

Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The design and realization of an on-line transient stability computation program based on COM technology are brought forward, in which the realization of communication module, transient stability calculation module and result output module is emphasized. The communication module, designed according to IEC61970, makes the "plug and play" of computation program possible. The design of unified interface and data structure based on COM enhances the flexibility and reusability of program. The implementation of parallel-in-time transient stability computation based on DCOM technology is briefly introduced.

Key words: on-line; transient stability; COM; IEC61970; uniform interface