

一种递推式单次谐波快速傅立叶算法

王建畴¹, 杨梅², 纪延超¹, 柳焯¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨市电业局教育处, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 谐波检测与抑制技术的研究越来越受到人们的重视。由离散傅立叶变换的定义出发, 提出了一种改进的傅立叶算法, 该算法采用递推方式实现了单次谐波分量的实时检测, 给出了该算法的推导公式, 并通过仿真验证了其有效性。该算法适用于继电保护及有源滤波等需对单次谐波分量进行在线跟踪的场合。

关键词: 傅立叶变换; 谐波分析; 递推算法

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)05-0014-02

1 引言

近年来, 谐波已经成为电力系统公害之一, 谐波的检测与抑制越来越受到人们的重视, 而谐波的检测又是对其进行抑制与消除的基础^[1]。1965年 Cooley 和 Tukey 提出的快速傅立叶变换 (FFT) 利用 DFT 中基函数的对称性来简化算法, 显著提高了算法的计算速度, 随着计算机技术的发展它得到了越来越广泛的应用, 现已成为电力系统谐波分析的主要工具^[2,3]。

继 FFT 之后又出现了许多快速算法如 Winograd 快速算法和 Nussbaumerd 的多项式变换算法等^[4]。但是, 这些算法都是同时处理一个时间窗内的所有的测量数据, 且力求分析信号的全部频谱成分。然而在实际应用当中往往只要求提取信号中基波或某次谐波分量, 如电力有源滤波器工作时需要检测系统电流中除基波以外的所有的谐波分量作为补偿的参考信号, 而这时只要检测出系统电流中基波分量, 然后从总电流中减去基波分量即可得到该参考信号; 另外如在继电保护中也往往只利用基波或某次谐波的幅值和相位构成保护算法, 以上这些情况如果利用 FFT 或其它快速算法求取全部的频谱成分反而造成多余的计算。

基于上述的想法, 本文提出了一种单分量递推式快速傅立叶变换方法, 该方法按照测量数据的顺序, 在采样新的数据后, 利用递推算法对原来的估值进行修正, 数据采样与估值修正同步进行, 且该方法是针对单次谐波的提取, 使算法的计算量得到了进一步的减少, 可实现单次谐波的在线跟踪。该方法有望在电力系统谐波检测及抑制方面得到广泛应用。

2 单分量递推算法

对于采样得到的离散时间信号 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$) 相应的离散傅里叶变换 (DFT) 定义为

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

单一分量的傅立叶变换可以直接利用定义式 (1) 求解, 即直接法。显然, 随着采样点数的增加, 直接法的计算量将显著增加。

下面提出的单分量递推式快速傅立叶变换方法则是利用采样序列相邻样点傅立叶变换的冗余信息构造递推算法, 具体步骤如下: 对于采样得到的数据 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 利用离散傅立叶变换定义式 (1) 可得其 k 次谐波分量为

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} = \frac{1}{N} [x(0) W_N^0 + x(1) W_N^k + \dots + x(N-1) W_N^{(N-1)k}] \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中 $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ 。

同理, 对于后移一个样点的采样数据 $x(n)$ ($n=1, 2, \dots, N$), 利用定义式 (1) 可得

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} = \frac{1}{N} [x(1) W_N^0 + x(2) W_N^k + \dots + x(N) W_N^{(N-1)k}] \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

$X(k)$ 是 $x(n)$ 后移一个采样点的傅立叶变换, 比较式 (2)、(3) 易得

$$X(k) = [X(k) - x(0)] W_N^{-k} + x(N) W_N^{(N-1)k} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

由式 (4) 可见, 由 $X(k)$ 来计算后移一个样点的采样数据的傅立叶变换 $X(k)$ 只需 2 次复数乘法、1 次复数加法和 1 次实数加法。与传统基 2 的 FFT 算法

相比,FFT算法在运算过程中所需乘法的次数为 $(N/2)\log_2 N$,其中 N 为每周期的采样点数,以 1024 点 FFT 为例,其乘法的次数 5120,可见本文提出的方法运算量明显减少。

综上所述,本文提出的算法具有以下优点:

- 1) 计算量不随采样点的增加而增加,因此随着采样点的增加其优越性愈加突出;
- 2) 可实现任意基的傅立叶变换,不必对采样周期加以限制;
- 3) 递推式算法,计算结果相当于加矩形窗的短时傅立叶变换,可实现单次谐波的在线跟踪。

3 仿真研究

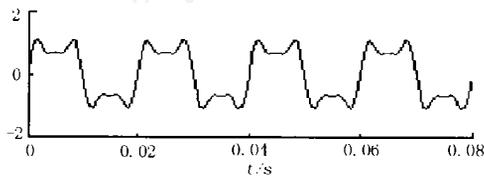
以下仿真结果均利用 MATLAB 仿真软件计算得到。

3.1 标准信号

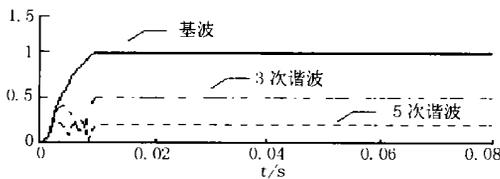
设信号为

$$S(t) = 1.0\sin(\omega t) + 0.5\sin(3\omega t) + 0.2\sin(5\omega t)$$

其中 $\omega = 314 \text{ rad/s}$,采样频率为 1.6 kHz。可见算法的收敛速度为半个周期,且可自启动。



(a) 原始信号



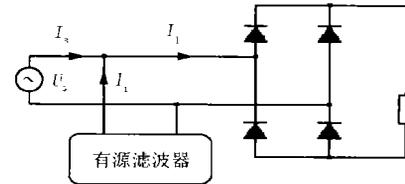
(b) 各次谐波幅值

图 1 标准信号的仿真结果

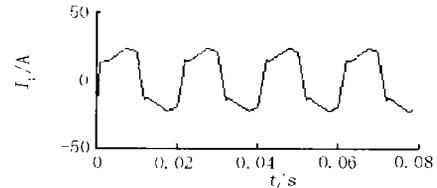
Fig. 1 Simulation results of standard signal

3.2 仿真信号

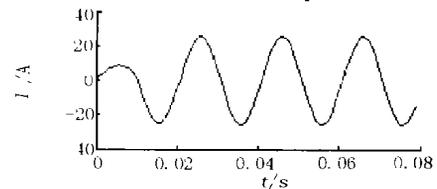
图 2(a) 给出了利用有源滤波器补偿不控整流电路的系统结构图,其中负载电流的波形如图 2(b) 所示,图 2(c) 给出了利用本文提出的单分量递推算法跟踪的基波分量,为电力有源滤波器提供的参考信号可由总电流中减去基波分量得到,如图 2(d) 所示。可见,由于该方法的实时性可保证补偿的跟踪速度。



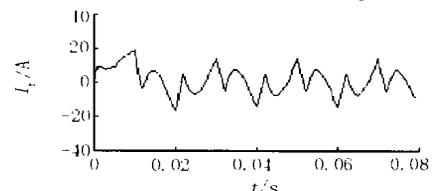
(a) 有源滤波器补偿不控整流电路的系统结构



(b) 负载电流 I_L 的波形



(c) 跟踪得到的负载电流 I_L 基波分量



(d) 补偿参考电流 I_r

图 2 有源滤波器的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of active filter

4 结论

本文提出了一种新颖的单分量快速傅立叶算法,该算法由离散傅立叶变换的定义出发,利用采样序列相邻样点傅立叶变换的冗余信息构造递推算算法,该算法计算量小,且不随采样点的增加而增加;可实现任意基的傅立叶变换,不必对采样周期加以限制;算法容易由 DSP 实现单次谐波的实时跟踪。

参考文献:

- [1] Reid W E. Power Quality Issues: Standards and Guidelines [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1996, 32(3): 625-631.
- [2] Simpson R H. Instrumentation, Measurement Techniques, and Analytical Tools in Power Quality Studies [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1998, 34(3): 534-548.
- [3] Cristaldi L, Ferrero A. Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(3): 683-685.

(下转第 22 页)

有故障指示与记忆功能。

6 结论

本装置经实验调试,运行稳定,能够实现软启动和软停机的基本功能,同时可以提供各种故障保护。采用这套装置不仅可以保护电动机,而且通过控制可控硅的导通时间进而控制电动机的启动电流,最大限度地减少电能损耗。对于在高压领域替换断路器进行高压线路的投切也具有积极意义。

参考文献:

- [1] 潘留占. 单片机控制的三相电动机保护器[J]. 电工技术杂志, 2000, 17(1): 36 - 39.
- [2] 宋书中. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社,

1998.

- [3] Robert L Steigerwald. Power Electronic Converter Technology, Proceedings of The IEEE, 2001, 89(6): 121 - 126.
- [4] 汪建, 孙开放, 章述汉. MCS - 96 系列单片机原理及应用技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [5] 王福瑞. 单片机测控系统设计大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.

收稿日期: 2002-11-01; 修回日期: 2002-12-18

作者简介:

卢宇(1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动控制;

涂光瑜(1941 -), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统运行与控制研究;

罗毅(1966 -), 男, 副教授, 从事 EMS 和 DMS 的研究。

Application of soft start in electromotor starting

LU Yu¹, TU Guangyu¹, LUO Yi¹, SHENG Ge-hao¹, ZHU Zhong-yan²

(1. Dept. of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Surr-Star Electric Technology CO. LTD, Shenzhen 518036, China)

Abstract: The paper presents a new switch with soft starting, which consists of a group of anti-parallelly connected thyristors and common switch, and can open or close without arc. This system mainly contains a single chip, a signal converter, a synchronous circuit and a pulse magnifier circuit. The functions of the system software include electricity detection, error recognition and protection, alarming, etc. The system has the ability to set the start-up voltage, start-up current and start-up time. The device can solve the problem of over current in electromotor start-up process, and has the digital displaying of fault such as under voltage, over voltage and over current, etc.

Key words: soft start; single chip; synchronous trigger

(上接第 15 页)

- [4] Blahut R E 著. 数字信号处理的快速算法[M]. 肖先赐译. 北京: 科学出版社, 1992.

王建贻(1972 -), 男, 副教授, 主要研究方向为信号处理技术在电力系统中的应用;

杨梅(1970 -), 女, 工程师, 主要研究方向为信号处理技术在电力系统中的应用;

纪延超(1962 -), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2003-02-09

作者简介:

A recursive fast Fourier transform of single harmonic component

WANG Jiar-ze¹, YANG Mei², JI Yan-chao¹, LIU Zhuo¹

(1. Electrical Engineering Dept., Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Educational Dept., Harbin Power Bureau, Harbin 150001, China)

Abstract: The technology of measuring and restraining harmonics has drawn more and more attention. This paper presented an improved Fourier method, which achieves realtime measurement of single harmonic component in recursive form. In this paper the derivation of this method is presented, and its availability is verified through simulations. This method is suitable for tracking single harmonic component in relay protection and active filter, etc.

Key words: Fourier transform; harmonic analysis; recursive arithmetic