

准同步谐波分析的 DSP 实现

韩建超¹, 杨北革², 李芙英¹

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 大同供电分公司, 山西 大同 037008)

摘要: 介绍一种 DSP 准同步谐波分析系统。系统硬件选用主从式双处理器结构, 主处理器 (单片机) 负责人机交互及 DSP 的 Bootloader 等, 从处理器 (DSP 芯片) 专门负责数据处理; 软件采用定点机浮点化运算, 自定义浮点类型简化运算, 提高运算速度和有效位数, 系统在谐波分析中利用准同步算法, 提高非正弦周期信号非同步步采样情况下电网参数运算的准确度。系统成功应用于光电式高压计量装置, 通过仿真试验, 基波准确度优于 0.1%, 11 次以下的谐波准确度优于 2%。具有良好的实用价值和拓展性能。

关键词: 谐波分析; 准同步算法; DSP; 浮点化

中图分类号: TM933 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)18-0049-04

0 引言

随着电力电子技术的广泛应用与发展, 电网谐波“污染”日趋严重, 准确的谐波分析是解决谐波“污染”先决条件。目前, 谐波分析中通常采用 FFT 算法, 得到准确结果的前提是同步采样; 由于电网频率波动, 目前技术很难从硬件上实现严格的同步采样, 且实现起来硬件开销较高, 实际情况大多是准同步采样, 这就限制了 FFT 分析的准确度。本文的谐波分析引入准同步算法, 较好地解决了非正弦周期信号准同步采样下谐波分析准确度问题。

相比普通单片机单总线的冯诺依曼结构, 论文所使用的数字信号处理器 (DSP) TMS320VC54xx 具有先进的哈佛结构、流水线操作、专用硬件乘法器等结构特点, 能够满足准同步算法大量、实时数学运算。DSP 数据处理实现中, 引入自定义浮点类型, 增加了有效位数, 进一步提高运算准确度, 并且运算复杂度低于 IEEE 浮点类型, 运算速度快。

论文的谐波分析系统, 成功应用于光电式高压计量装置, 实现三相各次谐波电压、电流有效值、有功功率、无功功率等电力系统参数的准确测量。

1 准同步算法及其在谐波分析中的应用

1.1 准同步算法的引入

电力系统谐波分析, 理论上可采用同步采样的 FFT 算法, 当周期采样点 $N > 2M$ (M 为周期信号最高谐波次数) 时, 可以复现原始波形。

但电网频率波动会带来采样不同步。众所周知, 信号基波一个微小的同步偏差, 将对电网参数尤其是高次谐波的计算带来很大误差。为了有效减小

非正弦周期信号非同步采样带来的计算误差, 本文在谐波分析中引入准同步算法^[1]。

1.2 准同步谐波分析原理

准同步算法计算原理:

对于周期信号 $g(t)$, 其周期平均值为:

$$\overline{g(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{+2} g(t) dt \quad (1)$$

应用准同步算法, 可证明 (公式推导和证明过程参见文献 [1]):

当收敛因子 $| \frac{(m, N,)}{n} | < 1$ 时, 有

$$G^n(t) = \lim_n G^n \quad (2)$$

其中:

$$G^n = \frac{\sum_{i=0}^{nN} i g_i}{\sum_{i=0}^{nN} i} \quad (3)$$

式中: i 为权系数、 N 为周波采样点数、 n 为迭代次数、 m 为谐波次数、 Δ 为频率偏差; (m, N, Δ) 为收敛因子, 是谐波次数、采样点数以及频率偏差的函数。由于电网频率波动引起的频偏不会太大, 选取合适的 N 及 n , 就可得到较小的收敛因子, 从而得到误差允许的 $g(t)$ 平均值估计, 一般选择 $N = 32$, $n = 3 \sim 5$ 即可达到较高准确度的估计。当 N 和 n 确定后, i 权系数可提前算出。

由此可见, 准同步算法实际上是在准同步采样情况下对周期信号平均值的高准确度估计方法。

对带有谐波分量函数 $f(t)$ 进行傅里叶级数谐波分析, 其 k 次谐波系数为:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k \omega t) dt \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_0^T f(t) \sin(k t) dt \quad (5)$$

可见,求解谐波系数也是对周期信号积分求均值,同样可以利用准同步算法来提高计算准确度。实际应用时可推导得出(推导过程参见文献[2]):

$$a_k = \sum_{i=0}^W R_i^{(k)} f_i \quad (6)$$

$$b_k = \sum_{i=0}^W I_i^{(k)} f_i \quad (7)$$

其中,

$$R_i^{(k)} = \frac{2}{N^n} i \cos(k \frac{2}{N} i) \quad (8)$$

$$I_i^{(k)} = \frac{2}{N^n} i \sin(k \frac{2}{N} i) \quad (9)$$

可以提前算出。

而 a_k 、 b_k 可以通过采样值 f_i 乘以相应系数累加求得。

1.3 准同步算法谐波分析的应用

根据电网波动的实际情况,论文在准同步算法应用时每周期采样 32 个点,取 4 个周期采样值进行计算,即 $N = 32$, $n = 4$ 。

对于含有谐波的同相电压、电流采样值 $\mu(m)$ 和 $i(m)$ (其中 $m = 0, 1, \dots, 127$),由式(6)、(7)可得到各次谐波系数。

以 k 次谐波为例:由式(6)、(7)得到 k 次谐波系数 U_{ak} 、 U_{bk} 、 I_{ak} 、 I_{bk} ,再通过式(10)、(11)、(16)、(17)计算得到 k 次谐波电压、电流有效值、有功功率及无功功率等各项电网参数。公式推导如下:

k 次谐波电压、电流有效值和相角计算公式:

$$U_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{U_{ak}^2 + U_{bk}^2}, \quad u_k = \arctan\left(\frac{U_{ak}}{U_{bk}}\right) \quad (10)$$

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_{ak}^2 + I_{bk}^2}, \quad i_k = \arctan\left(\frac{I_{ak}}{I_{bk}}\right) \quad (11)$$

k 次谐波平均有功功率及平均无功功率为:

$$P_k = U_k I_k \cos(i_k - u_k) \quad (12)$$

$$Q_k = U_k I_k \sin(i_k - u_k) \quad (13)$$

其中:

$$U_{ak} = \sqrt{2} U_k \sin u_k, \quad U_{bk} = \sqrt{2} U_k \cos u_k \quad (14)$$

$$I_{ak} = \sqrt{2} I_k \sin i_k, \quad I_{bk} = \sqrt{2} I_k \cos i_k \quad (15)$$

将式(14)、(15)代入式(12)、(13)得出有功功率及无功功率计算公式:

$$P_k = \frac{1}{2} (U_{ak} I_{ak} + U_{bk} I_{bk}) \quad (16)$$

$$Q_k = \frac{1}{2} (U_{bk} I_{ak} - U_{ak} I_{bk}) \quad (17)$$

三相总电压、电流有效值,总有功功率、总无功功率计算公式:

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^N U_k^2}, \quad I = \sqrt{\sum_{k=1}^N I_k^2} \quad (18)$$

$$P = \sum_{k=1}^N P_k, \quad Q = \sum_{k=1}^N Q_k \quad (19)$$

可见,在准同步算法分析出谐波系数的基础上,可以进一步得到较高准确度的各项电网参数。

2 系统硬件设计

2.1 系统整体结构

系统用于光电式高压计量装置,采用了主从式双处理器结构实现各种功能。主单片机完成人机交互,从处理器(TI的 DSP)完成数据处理。此外,系统还包括实时时钟、非易失性 RAM 等外围器件。系统整体结构框图如图 1 所示。

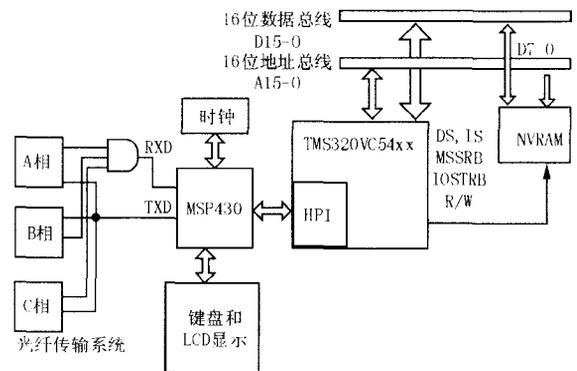


图 1 系统整体结构框图

Fig 1 Overall structure of the system

2.2 主处理器 MSP430F1xx

主处理器为 TI 公司 16 位单片机 MSP430F1xx,具有功耗低、处理功能灵活、片上资源丰富、开发工具高效等显著优点,是一款性价比高、应用广泛的单片机。主处理器主要功能:传送数据(通过光纤接收三相电压、电流采样数据并传送给从处理器 DSP,从 DSP 读取处理结果)、控制液晶显示结果、读取时钟芯片、读取键盘值,此外,在系统上电复位后,主处理器完成 DSP 的 Bootloader 过程。

2.3 从处理器 TMS32054xx

论文选用 TMS320VC54xx^[3]作为从处理器,对采样数据进行准同步算法谐波分析。

TMS320VC54xx 是 TI 公司生产的一款操作灵活、高速、性价比较高、功耗低的 16 位定点通用 DSP 芯片。其主要特点包括:改进哈佛结构(1 条程序存储器总线,3 条数据存储器总线和 4 条地址总线)、

带有专用硬件逻辑 CPU和片内存储器以及片内外围专用的指令集、具有专用汇编语言工具等。

TMS320VC54xx片内含 4 k字 ROM和 16 k字双存取 RAM、1个 HPI(Host Port Interface)接口、2个多通道缓冲串口,单周期指令执行时间为 10 ns,双电源(1.8 V和 3.3 V)供电;此外,该 DSP带有符合 IEEE1149.1标准的 JTAG边界扫描仿真逻辑。使用该 DSP适于实时数据处理并且开发比较方便。

TMS320VC54xx芯片完成对三相电压、电流采样数据的准同步算法谐波分析,并将计算结果保存到特定内存区域,等待主处理器读取,同时,计算结果也被保存于片外非易失性 RAM。

2.4 HP接口通讯及 DSP的 Bootloader设计

MSP430F1xx通过 TMS320VC54xx的 8位并行口 HPI向 DSP发送采样数据并读取 DSP计算结果,实现双机通讯。HPI是主处理器和 DSP片内存储器交换数据的界面,通过自动读写连续字节的功能完成 16位数据的读写;主处理器执行数据交换时,HPI自动完成对指定地址的读写。HPI使得两个微处理器的通信不必匹配数据传输速率,也不会影响各自程序的执行速度。

另外,TMS320VC54xx片内没有可以擦写、掉电保存的存储区域用于存储程序,所以 DSP程序需要在复位时由外部加载到内部 RAM,这一过程称为 Bootloader。系统上电复位之后,主处理器(MSP430F1xx)首先通过 HPI接口把预先存储在 FLASH的程序加载到 TMS320VC54xx中,并在完成后将程序起始地址写入 TMS320VC54xx的 0x7Fh单元,从而使 TMS320VC54xx程序从该地址开始运行,这就完成了 DSP芯片的 Bootloader过程。

系统利用 TMS320VC54xx的 HPI接口实现 MSP430F1xx与 TMS320VC54xx的数据通讯及 Bootloader。

3 准同步算法在 DSP中的实现

系统运行时,主处理器定时将电流、电压采样值通过 HPI发送给 TMS320VC54xx,并在发送一周波数据后触发 DSP中断。从处理器在 HPI中断中实现准同步算法谐波分析,计算各项参数,并将计算结果保存到片外非易失性 RAM中。

此外,论文利用自定义的浮点数进行数据处理,有效提高了计算准确度。

3.1 自定义浮点类型及其运算

众所周知,为了确保准确度,运算过程中必须保

留足够的有效位数。TMSVC54xx是 16位定点 DSP,如果采用定点运算,在数据不溢出的前提下势必降低有效位数。论文采用定点机的浮点运算,自定义了一种浮点数据类型,格式如下:

$$\text{实际数值} = \text{man} \times 2^{\text{Exp}} \quad (20)$$

实际数值表示为有效数字乘以 2的指数形式。Man为有效数字,Exp为指数,两个数都是 16位二进制数。且规定 Man和 Exp的 D15位是符号位,取值范围为: -32768 ~ +32767。

可见,自定义浮点数类型不同于 IEEE浮点数(如图 2所示),论文中自定义浮点数各用了一个字作为有效数字和指数,这样,两个浮点数的乘、加运算可通过对各自有效数字和指数的乘、加运算来完成,利于定点 DSP的实现,加快了整个程序的运行速度。尽管自定义浮点数的有效位数不如 IEEE所定义浮点数多,但足以满足运算准确度的需要。

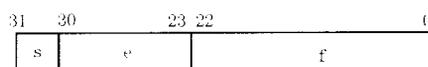


图 2 IEEE浮点类型

Fig 2 IEEE's definition of float point

程序设计了各种自定义浮点数运算子程序,包括 NomaFloat, AddFloat, MulFloat, SqrtFloat等,分别实现浮点数规格化、浮点数加、浮点数乘、浮点数开方。

自定义浮点数的运用,实现了定点 DSP浮点化,在不增加硬件成本的情况提高了运算准确度。

3.2 DSP程序设计

如前所述,准同步算法谐波分析归结为 4个周期采样点的加权求和。预先计算得出的各次谐波系数通过 HP接口存储到 DSP指定 RAM,系统运行中 DSP实时接收主处理器的采样数据,并在 HPI中断子程序中进行数据加权求和、计算各项电网参数。而主程序只对 DSP及各项参数进行设置。

由于 128个点数据加权求和的计算量较大,所以系统每个周波(32点)产生一次 HPI中断,对本次周波数据进行加权求和,并在第四个 HPI中断中得出谐波系数,进一步计算各项参数,把计算结果保存到片外非易失性 RAM中,程序用 HPI_FLAG作为周波序号变量;此外,为了防止采样数据被覆盖,程序采用双缓冲模式,即:HPI中断首先把接收到的一个周波采样数据搬移到另一内存区域,再对数据进行处理;同时,为了主处理器的显示方便,程序将计算结果转换为 BCD码。DSP的 HPI中断处理程序流程如图 3所示。

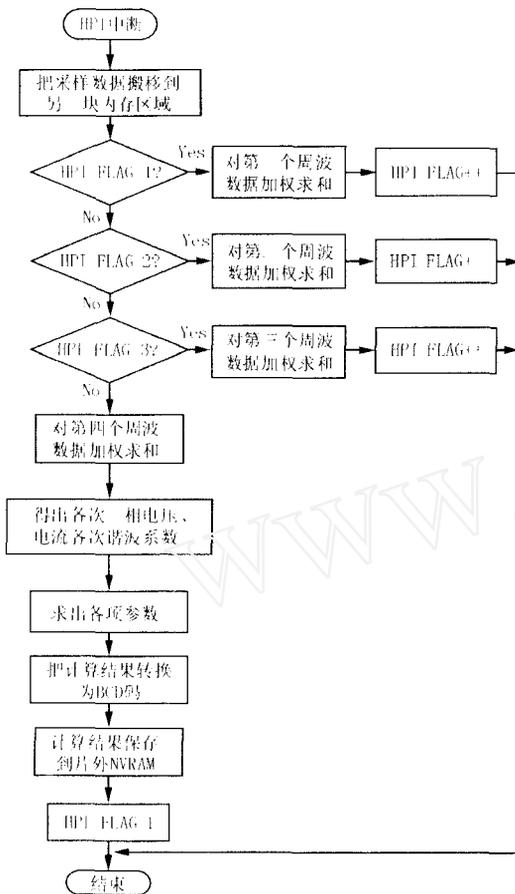


图 3 HP中断程序流程图

Fig 3 Flow chart of HPI port ISR

4 实验结果

论文进行了仿真试验,并与普通 DFT算法进行比较。假定电网波动范围为 0.25Hz,即同步误差 =0.005T,仿真选取 $f=49.75$ Hz,采样点 N 为 32 点,迭代次数为 4,仿真的采样数据按照实际频率和次序传送给系统,系统分析结果如表 1 所示。

表 1 谐波分析中准同步算法与普通 DFT比较

Tab 1 Quasi-synchronous algorithm compared with normal DFT in harmonic analysis

次数	理论值	准同步算法		普通 DFT		相对误差比(普通/准同步)
		分析结果	相对误差 (%)	分析结果	相对误差 (%)	
1	30	29.995	0.016	30.042	0.14	9
3	5	4.993	0.148	5.072	1.448	10
5	3	2.998	0.411	3.062	2.076	5
7	2	1.984	0.804	2.075	3.76	5
9	0.5	0.493	1.327	0.564	12.74	10
11	1.5	1.470	1.976	1.566	4.42	2

由表 1 可见,准同步算法分析结果准确度远远

高于普通 DFT方法,提高了几倍甚至 10 倍。

5 结语

论文完成了电网频率波动情况下用 DSP 实现准同步算法的谐波分析。

1) 硬件上采用主从结构,主单片机完成人机交互,从处理器 (DSP) 完成数据处理,以提高运算速度,在 4 个周期内完成各次谐波三相电压、电流、有功、无功等各项参数的计算并在液晶屏上显示。

2) 谐波分析采用准同步算法,提高非正弦周期信号非同步采样情况下谐波分析的准确度。

3) 实现准同步算法的 DSP 程序中自定义浮点数据类型,巧妙的利用定点机完成浮点化运算,运算简化度优于 IEEE 浮点数,提高计算过程的有效位数及准确度。

4) 系统成功应用于光电式高压计量装置,仿真试验表明,准同步算法比普通 DFT 算法在谐波分析准确度上有不可比拟的优越性。

论文设计的基于 DSP 和准同步算法的谐波分析系统不仅具有较高的计算准确度,而且拓展性能好,适用范围广,具有很好的实用价值。

参考文献:

[1] DA I Xian-zhong, Gretscher R. Quasi-synchronous Sampling Algorithm and Its Application[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1994, 43 (2): 204-209.

[2] 李芙蓉,王恒福,葛荣尚.用准同步离散 Fourier 变换实现高精度谐波分析[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(5):47-50
LI Fu-ying, WANG Heng-fu, GE Rong-shang. Realization of High Precision Harmonics Analysis with Pleisiochronous DFT Arithmetic[J]. Journal of Tsinghua University, Sci & Tech, 1999, 39(5): 47-50.

[3] Texas Instruments TMS320VC54XX Fixed-point Digital Signal Processor[Z]. 2000.

收稿日期: 2005-01-05

作者简介:

韩建超(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化; E-mail: hanjianchao@tsinghua.org.cn

杨北革(1967-),男,高级工程师,现从事电力技术工作;

李芙蓉(1943-),女,教授,研究方向为电力系统自动化。

(下转第 66 页 continued on page 66)

- LU Dun-min, SUN Yun-lian The Supervisory Management System of Electrical Technology Based on B/S Mode [J]. Relay, 2003, 31(1): 58-60
- [2] 胡平凡, 黄建华. 开发基于 WEB 的火力发电厂技术监督管理系统 [J]. 电力信息化, 2004, 2(4): 52-55.
HU Ping-fan, HUANG Jian-hua Develop Technical Supervision Management System for Thermal Power Plants Based on Web Technology [J]. Electric Power Information Technology, 2004, 2(4): 52-55.
- [3] 王天华, 杨威, 李勇, 等. 配电自动化系统中对象关系实时数据库的开发 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 63-66
WANG Tian-hua, YANG Wei, LI Yong, et al Development of an Object-relation Real-time Database for the Distribution Automation System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 63-66.
- [4] 史忠植. 知识发现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
SHI Zhong-zhi Knowledge Discovery on Database [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [5] 李代平, 张文. SQL Server 2000 数据库应用基础教程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
LI Dai-ping, ZHANG Wen SQL Server 2000 Database Application Foundation Study Course [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [6] Powers S. Developing ASP Components, Second Edition [M]. O reilly & Associates, Inc

收稿日期: 2004-12-23; 修回日期: 2005-05-02

作者简介:

钟世明 (1973 -), 男, 博士, 研究方向为电力信息化、WEBGIS、LBS应用; Email: smzhong@asch.whigg.ac.cn

邵锐 (1977 -), 女, 硕士, 研究方向为图像处理、WEB-GIS;

张胜 (1969 -), 男, 博士, 研究方向为电力信息化、人工智能、决策支持。

Technical supervision management system based on real-time early warning

ZHONG Shiming^{1,4}, SHAO Ru², ZHANG Sheng^{1,4}, QIAN Chuang³

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Shenzhen Tempo Digit Engineering Co., Ltd, Shenzhen 518052, China; 4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The existed information of the technical supervision management is separate and isolated in thermal power plant, and it cannot make the technical supervisor know the running state of the equipments in time. So it is necessary to build a management system platform that can integrate all technical supervision information. And this platform can process the information in real-time and early warning. The function design, real-time database and system characteristics are detailed in the technical supervision management system, which has been developed the B/S/D-based system. The techniques such as Java Applet, Java Servlet, COM+, Database trigger, data mining are applied. And technical supervision online is realized with the technical supervision works.

Key words: thermal power plant; technical supervision; B/S/D; data mining

(上接第 52 页 continued from page 52)

Quasi-synchronous harmonic analysis system based on DSP

HAN Jian-chao¹, YANG Bei-ge², LI Fu-ying¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Datong Power Supply Filiale, Datong 037008, China)

Abstract: This paper introduces a system of harmonic analysis, which applies quasi-synchronous sampling arithmetic and DSP. Two processors is used in the system. The main processor (MCU) is for man-machine interface and the bootloader of DSP. The coprocessor (DSP) achieves data processing. By defining float data on fixed-point DSP, accuracy is improved. And with application of quasi-synchronous sampling arithmetic, high precision harmonic analysis is realized when there would be a non-synchronization between the sampling period and the signal period. The system has been applied in optoelectronic high-voltage measurement set. The accuracy of fundamental wave and harmonic wave (3rd-11th) is better than 0.1% and 2%. The system has practical value and expansibility.

Key words: harmonic analysis; quasi-synchronous sampling arithmetic; DSP; float point