

# 基于 DSP 的交流电参量测量仪的研究

赵闻蕾

(大连铁道学院电气信息分院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 在电力系统谐波环境下,采用传统仪器或常规微机测量算法会使电参量测量出现一定程度的误差。应用傅氏变换原理及 FFT 快速算法消除谐波对测量的影响,同时与 DSP 技术相结合,研制了以 TI 公司 TMS320F240DSP 为核心的测控装置,分析了仪器的硬件电路原理,实现了对交流电参量快速、准确、实时的测量。实验结果表明,本装置达到了国家标准对谐波测量仪器的要求。

关键词: 电参量; 谐波; 快速傅立叶变换; 数字信号处理器

中图分类号: TM274.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)14-0045-04

## 0 引言

随着我国电力工业的迅猛发展,对发变电所的微机监测技术要求越来越高。准确、合理的电力参数测量对保证电力系统的安全、可靠、经济运行具有重要意义。目前影响电参量测量准确性的原因有两方面:其一是由于电力电子器件和非线性设备的广泛应用,使得电网中的电压、电流波形发生畸变产生谐波;另一方面传统的测控装置由于硬件资源与速度的限制,常用的以单片机为核心的测量仪由于单片机采用冯·诺依曼结构,程序指令和数据共用一个存贮空间,指令周期长,多为微秒级,无法进行实时高速采样和实时处理,每周波采样点少、计算量小,限制了测量精度。本文介绍的以 TI 公司 TMS320F240 数字信号处理器 DSP 为核心的测量仪采用了先进的哈佛结构,将程序指令和数据的存贮空间分开,各有自己的地址与数据总线,指令周期长为纳秒级,同时配合快速傅立叶级数 FFT 算法,能实时采样、快速地提供电压、电流、有功功率、无功功率、频率等电能质量的参数,为电力系统全面的测量和分析提供了有效的工具。

## 1 实时准确的 DSP 算法

### 1.1 快速傅立叶级数算法

#### 1) 谐波算法的实现

非正弦波是周期性电气量,根据傅立叶级数分析,可分解成基波分量和具有基波频率整数倍的谐波分量,基波和谐波分量的测量算法主要为快速傅立叶变换(FFT)。

本文在进行谐波计算时,对两个连续信号  $u(t)$ 、 $i(t)$  在一个周期内进行  $N$  点等间隔同步采样,得到

时域内电压序列  $\{u(n)\}$  和  $\{i(n)\}$  ( $0 \leq n \leq N-1$ ), FFT 是对复序列进行变换,而电压、电流采样序列  $\{u(n)\}$ 、 $\{i(n)\}$  均为实序列,为缩短计算时间可将二者构成一个复数离散时间序列  $f(n) = u(n) + j i(n)$ ,经 FFT 计算其频谱  $F(k) = FFT[f(n)]$ 。

$$F(K) = FFT[u(n)] + j FFT[i(n)] = U(K) + j I(K)$$

$$F(K) = FFT[f(n)] = FR(K) + j FI(K)$$

这里  $0 \leq K \leq N-1$

$FR(K)$  和  $FI(K)$  分别是  $F(K)$  的实部和虚部。根据文献[2]可以证明,  $\{u(n)\}$ 、 $\{i(n)\}$  对应的频谱为

$$I(K) = [FI(K) + FI(N-K)]/2 +$$

$$j[FR(K) - FR(N-K)]/2$$

$$U(K) = [FR(K) + FR(N-K)]/2 +$$

$$j[FI(K) - FI(N-K)]/2$$

因此,进行一次  $N$  点复序列 FFT,就可以同时求得电压和电流的频谱,得到各次谐波的电压电流的幅值  $U_L$  和  $I_L$ ,进而利用公式求出谐波下的三相电压和三相电流值:

$$\text{电压有效值 } U_i = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_L U_{Li}^2}$$

$$\text{电流有效值 } I_i = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_L I_{Li}^2}$$

$$\text{有功功率 } P_i = \frac{1}{2} \sum_L U_{Li} I_{Li} \cos \varphi_{Li}$$

$$\text{无功功率 } Q_i = \frac{1}{2} \sum_L U_{Li} I_{Li} \sin \varphi_{Li}$$

$$\sum P = \sum_i P_i; \quad \sum Q = \sum_i Q_i$$

其中:  $i$  表示相别,  $L$  表示谐波次数。

采用 FFT 算法原理在求解电网参数中首先可以对各次谐波状况有第一手材料,根据现场实际要求,

可求保留到  $K$  次谐波,因此,其精度是完全可以调整的。在 DSP 指令集中,平方累加、相乘累加在重复命令下都是单周期指令,这使得上述运算得以快速实现。利用 F240 特殊的指令可以很容易实现 FFT 或滤波操作。FFT 采用基 - 2、按时间抽取、原位运算。F240 间接寻址选项 \*BR0+ 提供了位反转变址寻址的能力,可以对基 - 2FFT 程序中数据点重排序以完成原位运算操作。

## 2) 频率的测量

频率是电能质量的重要指标,本系统利用 DSP 芯片自带的捕获功能,即当捕获引脚上出现指定电平时,DSP 能捕获指定定时器的读数。因此我们将跟踪频率的方波信号作为捕获引脚的输入信号,令连续两次捕获信号是定时器上的读数之差为  $N$ ,DSP 定时器的频率为  $f_s$ ,则交流信号的频率  $f = f_s / N$ 。由于定时器的最大频率为 20 MHz,所以测量的误差极小,为减小偶然因素对测量的影响可测多个周期取平均值。

## 1.2 提高测量速度、测量精度的方法

### 1) 测量速度

响应时间是衡量电参量微机测量方法的主要指标。在需要测量电网电压和电流的各次谐波时,为减小计算量,提高测量反应速度,常采用下述方法:

尽量选用乘法次数较少的 FFT 算法

本文 FFT 采用基 2 算法减少复数乘法次数以提高计算速度,运算效率提高 1~2 个数量级,同时逻辑关系较为简单,易于编程。

数值运算采用定点制

在利用 FFT 进行谐波分析过程中,要进行大量的加减法和乘法运算。为提高谐波测量速度,可采用定点制运算。为保证精度,定点制运算时数值表示必须有足够的字长。一般当字长为 3 字节时,能够满足一般测量精度的要求。

将两个实序列构成一个复序列求傅立叶变换

谐波计算时,为缩短计算时间可将电流和电压两个时间序列交互采样构成一个复序列  $u(n) + j i(n)$ ,先对复序列进行变换,然后再将变换结果按有关公式转换成  $\{u(n)\}$  和  $\{i(n)\}$  的 FFT 变换结果,从而一次 FFT 运算就可同时完成一对电流电压的谐波分析。

### 2) 测量精度

本文采用下述方法提高测量精度,下文对测量结果做了分析。

## 保证一定的采样频率

根据采样定理,采样频率应不低于信号中最高频率的 2 倍,一般情况下,电网中各次谐波含量是随次数的增高而逐渐减少的,对电网观测的结果表明,电网中 19 次以上的谐波含量已很低,因此本算法分析取到 19 次谐波,采样频率至少要在 1900 Hz(每周波采样 38 点)以上。事实上,为了减少噪声对测量的影响,谐波测量时往往采用更高的采样频率,所以每周波采样 64 点或 128 点(由锁相环输出决定)从根本上解决了测量精度和实时性之间的矛盾。

## 保证同步精度

为了保证采样的同步性,我们采用了倍频锁相技术,通过比较器(LM311)、锁相环(CD4046)去控制信号进行采样及 A/D 转换。

## 2 系统软硬件设计

### 2.1 系统硬件设计

整个硬件电路原理如图 1 所示:由两个子系统组成的双 CPU 并行式结构。以单片机 AT89C52 为核心的子系统,实现串口、显示和键盘的管理和与 DSP 间的数据交换;以 TMS320F240 为核心的子系统完成上述的数字信号处理。两个 CPU 通过双口 RAM 交互通信。

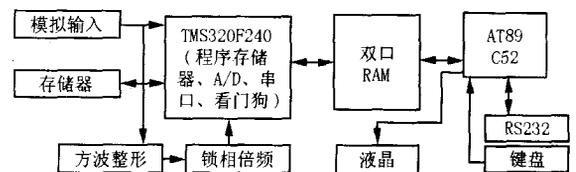


图 1 硬件原理图

Fig. 1 Block Diagram of hardware circuit

1) 数字信号处理部分:采用 TI 公司的 TMS320F240 是 16 位定点处理器。它将高性能的 DSP 内核和丰富的微控制器外设功能集于单片之中,使得外围电路简化,软件编程也变得容易。系统的数据采集和交流采样计算、跳变沿捕捉、“看门狗”、程序的存储等都由 F240 实现。为完成高速 FFT 运算,F240 外面扩展了 64 k 数据存储器用于数据的运算处理和存储。

2) 采样保持和 A/D 转换:模拟信号经采样保持和运算放大单元接入 A/D 进行数据转换和处理。TMS320F240 内含两组 8 路 10 位 A/D 转换器,转换速度达 100 kHz,而且采用多种采样启动方式。我们采用外部引脚触发启动方式,每次触发后依次对模拟量进行采样,并将采样结果存入数据存储器 RAM

中。

3) 锁相同步单元:为了保证采样的同步性,采用锁相倍频技术取一相电压信号经比较器(LM311)输出跟踪电网的频率方波信号,作为锁相环(CD4046)的输入信号,同时也是频率监测的信号源。方波经锁相倍频后作为采样保持器(LF398)采样保持和 A/D 转换的触发信号。

4) 通信电路:采用 RS232 传输仪器与 PC 机间的数据和命令,便于将 DSP 处理后的数据传输到 PC 即做进一步分析处理或用 PC 机对仪器实现远程控制。

5) 键盘和显示电路:采用 320 × 240 点阵的高分辨率微彩液晶屏显示测量参数。通过 F240 的 I/O 完成 4 × 4 键盘的设计,键盘行线通过四输入端与门连接到 F240 外部中断 XINT1 引脚,以实现键盘中断响应。

6) 双口 RAM:采用 IDT7133 实现 AT89C52 和 TMS320F240 通信。IDT7133 是一种高速 2 k × 16 双口静态 RAM,且带片内总线仲裁电路,它具有两组数据总线和地址总线,两组总线可以同时访问不同的存储器单元,当两组地址总线完全相同时,由片内总线仲裁逻辑向后访问的一方发出等待信号,使该方进入等待,待另一方访问结束后等待撤消,等待方继续访问这一地址。由于双端口 RAM 的特殊结构,使得双机可以方便快速地进行数据交换,从而大大提高了 AT89C52 和 TMS320F240 的并行处理能力。

## 2.2 系统软件设计

DSP 程序设计:TMS320F240 应用程序开发过程分为程序编写与模拟调试、现场调试和脱离开发环境独立运行三个阶段。其中第二个阶段需要在 PC 机和测试仪两种环境交替进行,需要频繁地启动和停止系统运行,检查运行结果数据等,甚至直接修改程序代码;第三阶段则要求测量仪独立运行情况下,提供一定的显示信息。我们采用了汇编语言和 C 语言的混合编程完成了 19 次谐波运算,为了提高程序代码的效率,采样中断子程序、数字滤波器和 FFT 算法都采用了汇编语言编程,主程序采用 C 语言编程,提高了代码可读性和程序结构的清晰性。采用 TI 的 CCS 动态调试软件,通过开发系统 JTAG 电缆,写入 F240 片内 SRAM 中进行调试。最后将程序固化在串行 Flash 存储器中,系统上电复位自动加载到 F240 片内 SRAM 中,用于独立运行环境。

单片机 AT89C52 程序设计:将编好的单片机程序通过 51 开发系统,对串口、显示及键盘等电路分

别调试,最后将程序通过编程器直接固化串行 PROM 中。

## 3 实验结果

电网中 19 次以上的谐波含量已很低,因此本算法分析取到 19 次谐波。下面是一组电压信号测量及误差结果。系统测量误差主要来源于系统模拟处理和数字处理的误差,模拟处理引入的误差包括电阻的精度,运放的失偏,A/D 转换精度等。数字处理的误差主要来自定点处理中的有限字节长效应。表 1 所示为电压信号测量结果,图 2 所示为测量数据与理论值的误差曲线,横坐标为谐波次数,纵坐标为谐波幅值误差。可以看出,直到 19 次谐波,检测仪的测量误差小于 3%,测量精度达到国标对 B 级谐波测量仪的要求。

表 1 电压信号测量结果表

Tab. 1 Results of voltage signals measurement

谐波次数	实际幅值	FFT 测量值
0	0.2000	0.2005
1	100.0000	99.6800
3	0.6000	0.5934
5	0.4000	0.3960
7	0.3000	0.2979
9	0.1000	0.0980
11	0.8000	0.7968
13	0.5000	0.4950
15	0.2000	0.1970
17	0.3000	0.2967
19	0.4000	0.3976

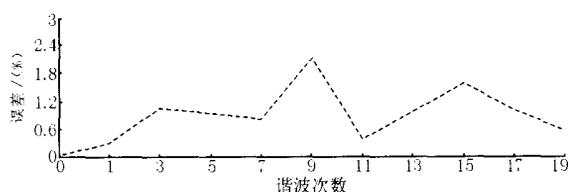


图 2 谐波误差

Fig. 2 Errors of harmonics

## 4 结语

通过以上分析可以得出如下结论:

- 1) 采用数字信号处理器构成的双 CPU 计算机控制,保证了测量仪实时性的要求;
- 2) 双口 RAM IDT7133 的使用解决了双机间数据的大量快速双向传送,且可靠性高;
- 3) 谐波污染对电网设备构成威胁和损害,该测量仪能有效对电力系统实行实时在线谐波监测,确定谐波污染情况,以便采取相应的措施进行控制;

4) 本装置在实验室进行了测量实验,结果表明,所选 DSP 是目前用于电量测量方面比较理想的选择,其价格低于通常模拟电路的价格,系统有很高的性价比,精度较高,满足谐波测量仪的要求,具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张雄伟,曹铁勇 (ZHANG Xiong-wei, CAO Tie-yong). DSP 芯片原理与开发应用 (Digital Signal Processing Principle & Application) [M]. 北京:电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2000.
- [2] 吴湘淇 (WU Xiang-qi). 信号系统和信号处理 (Signal Sys-

tem & Signal Processing) [M]. 北京:电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 1996.

- [3] 吴竞昌 (WU Jing-chang). 电力系统谐波 (Power System Harmonics) [M]. 北京:中国水利电力出版 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1998.
- [4] TMS320F240 User Guide. Digital Signal Processing [Z]. Texas Instruments. 1997.

收稿日期: 2003-11-02; 修回日期: 2004-02-19

#### 作者简介:

赵闻蕾 (1972-), 女, 讲师, 在读博士生, 从事电力系统及其自动化研究及教学工作。

### Study of AC electrical parameter measuring instrument based on DSP

ZHAO Wen-lei

(Electrical Information Branch, Dalian Railway Institute, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In the power system polluted by harmonics, both traditional instrument and computer based instrument with traditional measuring algorithm may bring certain errors for electric parameters. Principle of Fourier transforming and algorithm of FFT are employed to eliminate the impact of harmonics, and combined with digital signal processor, the device of measuring and controlling is developed, which uses DSP TMS320F240 as CPU. The principle of hardware circuit of the device is analysed, it can realize the measurement of AC electric parameter fast, accurately and in real time, and the test results indicate the instrument has met the requirements of national criteria.

**Key words:** electrical parameter; harmonics; FFT; DSP

(上接第 31 页 continued from page 31)

- [6] 胡泽春,王锡凡 (HU Ze-chun, WANG Xi-fan). 配电网无功优化的分时段控制策略 (Time-interval Based Control Strategy of Reactive Power Optimization in Distribution Networks) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 45-49.
- [7] Grainger J J, Civanlar S. Volt/ var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. IEEE Trans PAS, 1985, 104(11): 3284-3290.

收稿日期: 2003-11-04 修回日期: 2004-06-08

#### 作者简介:

张芙蓉 (1979-), 女, 硕士, 从事配电系统无功优化方面的研究工作; E-mail: rong-201@mail.sdu.edu.cn

孟昭勇 (1964-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事配电网自动化系统方面的研究工作;

李剑 (1975-), 男, 硕士, 从事配电系统可靠性方面的研究。

### Optimization of distribution capacitor scheme based on TS and GA

ZHANG Fu-rong<sup>1</sup>, MENG Zhao-yong<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Northeast China

Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

**Abstract:** In order to reduce active power losses, improve voltage quality, and simplify control operations of the distribution systems equipped with shunt capacitors, a new reactive power optimization strategy of the time-interval control based on load level and its changing trends is employed. The Tabu search combining with genetic algorithm is integrated to determine the best schedule for each load level, and then find proper dispatch schedule for shunt capacitors of the next day.

**Key words:** time-interval control; genetic algorithm; Tabu search; reactive power optimization