

# DSP 在电力系统实时相量测量的研究

汪玉凤<sup>1</sup>, 刘昕霞<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 刘巧静<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 天津天纺投资控股有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 实时相量测量一直以来都是电力系统实现动态监测、保护及控制的难点, 利用 GPS 技术的时钟信号的定时精度小于 1  $\mu\text{s}$ , 为 DSP 芯片 TMS320LF2406A 的电力系统相量测量建立相同的参考基准, 对相应的实验数据进行分析, 其测量精度较高、准确性较好, 为电力系统快速的在线动态监控提供了重要依据, 具有较好的应用价值。

**关键词:** GPS; 嵌入式 DSP; 离散傅立叶变换; 实时相量测量

## Study of the real-time measurement of power system phasor based on DSP

WANG Yu-feng<sup>1</sup>, LIU Xin-xia<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, LIU Qiao-jing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;  
2. Tianjin Tianfang Investment Stockholding Co., Ltd, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The real-time measurement of phasor is a difficulty in power system dynamic monitoring, protecting and controlling. This paper uses GPS which can provide the clock signal times accuracy of less 1  $\mu\text{s}$ , to establish the same reference for measured TMS320LF2406A embedded DSP chip. The analyzed experimental data improves better precision and veracity. It is a significant evidence for the power systems in rapid, on-line and dynamic monitoring-controlling, and is valuable for practical use.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50607007).

**Key words:** GPS; embedded DSP chip; discrete Fourier transform algorithm; real-time phasor measurement

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0040-03

## 0 引言

随着电力系统各大区互联技术的发展及系统容量的大幅度增长, 系统中的稳定问题日趋突出, 稳定事故造成的后果也更加严重。在电网稳定中, 电压稳定和功角稳定是两种主要的稳定问题。电压相量的幅值代表了电压信号的有效值, 相角是电压信号相对于给定参考相量的相对角。所以稳定问题可主要归结为维持电压相量的稳定。相量分析是电力系统分析中的重要工具, 相量的变化可以精确地描述电力系统运行状态的变化, 因而相量实时测量能够在电网运行中发挥重要的作用。

相量测量的基本方法有过零检测法和傅立叶变换法两大类<sup>[1]</sup>。本文主要采用离散傅立叶算法, 利用 TMS320LF2406A 嵌入式 DSP 接受 GPS 高精度原子时钟授时作为各相量的同步参考时钟的测量方案, 经过实际实验得到了令人满意的结果。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50607007)

## 1 相量测量的原理

电力系统实时相量测量就是在 GPS 高精度的原子时钟同步下, 在电网的各枢纽点测量电压和电流的相量, 并传送到中央站和相应的装置中供实时监测、保护和控制之用。在电力工程中将正弦量信号用相量表示。如图 1 所示的正弦信号为

$$x(t) = \sqrt{2}X \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

采用相量表示为

$$X = X e^{j\varphi} = X \cos \varphi + jX \sin \varphi = X_R + jX_L \quad (2)$$

由式(2)可知, 相量由幅值  $X$ (有效值)和相位  $\varphi$  ( $\varphi = \omega t + \varphi$ ) 组成, 用直角坐标表示为实部  $X_R$  和虚部  $X_L$ , 所以实时相量测量必须同时测量幅值和相位。幅值的测量比较容易, 其测量技术已比较完善; 而相位的大小取决于时间参考点( $t=0$ )的时刻。如图 1 中, 同一个正弦信号在不同的时间参考系( $t=0$ ,  $t'=0$ )中, 相位是不同的。如果要比较两个相

同频率的正弦信号的相位, 它们必须在相同的时间参考系中才有意义。因此采用 GPS 的秒脉冲作为各相量的同步参考时钟, 实现异地数据在相同的时间参考系中进行比较。

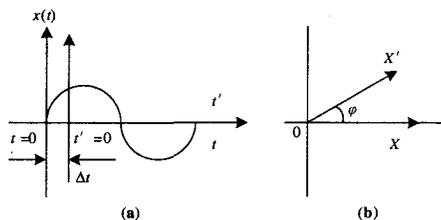


图1 相量的确定

Fig.1 The definition of phasor

根据式(1)可得其离散傅立叶变换为:

$$X(k) = \text{DFT}[x(t)] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(t) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}] \quad (3)$$

为了减少计算量采用递归 DFT 算法, 在实时测量中得到两个采样集:  $\{x_r | n=r, \dots, N+r-1\}$ , 对应相量  $X_R(k)$ ;  $\{x_{r+1} | n=r+1, \dots, N+r\}$ , 对应相量  $X_{R+1}(k)$ 。

$$X_r(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=r}^{N+r-1} [x(t) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}] \quad (4)$$

$$X_{r+1}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=r+1}^{N+r} [x(t) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}] \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)相减, 即可得到本文的算法公式:

$$X_{r+1}(k) = X_r(k) + \frac{1}{N} (x(N+r) - x(r)) e^{-j\frac{2\pi rk}{N}} \quad (6)$$

## 2 GPS 的授时原理

GPS(Global Positioning System)即全球定位系统, 是 20 世纪 70 年代由美国国防部研制的新一代卫星导航定位系统。GPS 主要由空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分三大部分组成。空间星座部分主要由 24 颗 GPS 卫星组成, 它们被安排在 6 个轨道平面上, 即每个平面上 4 颗。在地球上任何地点、任何时刻均至少可以观测到 4 颗卫星, 因此 GPS 系统是一种全天候、全球覆盖、高精度、自动化、高效益的新一代卫星导航定位系统。由于用户接收机实现的是无源工作(即只作接收), GPS 可向无限数目的用户提供服务。GPS 系统的每颗卫星上都装有走时长期稳定且精确的原子钟(其误差为

每三十万年相差一秒), GPS 接收机通过接收卫星发射的信号得精确的时间信息, 并根据地区不同显示当地位置的时间。

本文采用 Eazix 公司的 EZGPM01 GPS 接收器芯片。该芯片基于 SiRFstar<sup>TM</sup> II e/LP 体系结构, 8Mb Flash 存储器, 使用 1920 time/frequency 搜索信道, 具有先进的低功耗控制模式, 工作电源电压 3.3 V, 通过电池备用引脚为芯片内部的备用存储器和实时时钟提供电源, 支持无源和有源的天线, 具有有源天线偏置电源电压引脚和过电流保护。利用该 GPS 的秒脉冲作为相量的同步参考时钟, 其同步时钟误差 0.5  $\mu$ s, 相角测量引起的误差为 0.009°, 满足电力系统相角测量精度的要求。

## 3 实时相量测量的实现

电力系统实时相量测量硬件框图如图 2 所示。

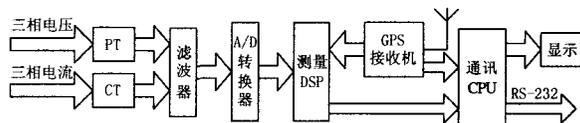


图 2 相量测量原理图

Fig.2 The principle of phasor measurement

本文采用的是美国 TI 公司的 TMS320LC2406A DSP 芯片。该芯片采用 3.3V 电源供电, 最高运算速度为 40MIPS, 内部有 544 字的双存取 RAM, 2K 的单存取 RAM, 32K 字 ROM, 具有程序自举 ROM, 通用定时器 4 个, PWM(Pulse Width Modulation 脉冲宽度调制)通道 16 个, A/D 通道 16 个, A/D 转换时间较其他类型芯片短, I/O 引脚 41 条, 内部还集成有串行外设接口(SPI)、串行通信接口(SCI)、局域网接口(CAN)。

与单片机相比, DSP 具有较高的集成度, 更快的 CPU, 更大容量的存储器, 内置有波特率发生器和 FIFO 缓冲器可以提供高速、同步串口和标准异步串口; 片内集成了 A/D 和采样/保持电路, 可提供 PWM 输出。采用改进的哈佛结构, 具有独立的程序和数据空间, 允许同时存取程序和数据。内置高速的硬件乘法器, 增强的多级流水线, 使其具有高速的数据运算能力。DSP 比 16 位单片机单指令执行时间快 8~10 倍, 完成一次乘加运算快 16~30 倍。此外, DSP 器件提供 JTAG 接口, 具有更先进的开发手段, 批量生产测试更方便, 开发工具可实现全空间透明仿真, 不占用用户任何资源。软件配有汇编/链接 C 编译器、C 源码调试器。

本测量方法在软件方面主要包括主程序、A/D

采集程序、中断程序、通讯程序等。主程序用来完成管理和协调,包括 A/D 采集、读取时间秒脉冲中断响应以及与其它模块之间通讯传送。DSP 的程序流程图如图 3 所示,其中  $T_f$  是标志位,  $H=0$  表示 A 相电压电流,运算结果存到 A 区;  $H=1$  表示 B 相电压电流,结果存到 B 区;  $H=2$  表示 C 相电压电流,结果存到 C 区。c 是所需要计算的最大谐波次数。

为了验证实时相量测量方法的性能,在黑龙江某矿进行了测试实验,实验采用两套独立的测量装置对同一母线进行了测试。试验所得数据如表 1 所示,序号表示每隔 20 ms 的测量点,角度的最大偏差  $0.8^\circ$ ,在测量过程人为改变试验条件的,系统需要进行无功补偿,第六组数据快速做出测试,达到预期的效果。

表 1 实时相量的实测结果

Tab.1 The measuring result of real-time phasor

序号	装置 A						装置 B						误差(%)					
	A 相		B 相		C 相		A 相		B 相		C 相		A 相		B 相		C 相	
	电压 相位	电流 相位																
1	345.1	320.1	224.5	200.2	124.2	80.3	345.6	320.4	223.9	200.6	124.5	80.1	-0.5	-0.3	0.6	-0.4	-0.3	0.2
2	330.4	311.7	210.1	190.9	90.7	70.4	330.7	312.1	210.5	190.5	90.1	70.7	-0.3	-0.4	-0.4	0.4	0.6	-0.3
3	320.6	301.5	201.5	180.5	80.9	60.8	321.2	301.1	202.1	180.8	81.7	60.8	-0.6	0.4	-0.6	-0.3	-0.8	-0.1
4	291.9	269.2	172.1	148.9	52.3	28.7	291.7	268.7	172.7	149.4	52.7	28.2	0.2	0.5	-0.5	-0.5	-0.4	0.5
5	268.5	246.7	148.4	126.3	28.4	6.6	269.1	246.2	248.2	126.1	28.5	6.5	-0.6	0.5	0.2	0.2	-0.1	0.1
6	256.6	193.6	136.5	73.7	16.6	313.5	256.3	194.1	237.1	73.4	16.5	313.1	0.3	-0.5	-0.6	0.3	0.1	0.4
7	248.7	229.6	129.1	109.8	9.2	349.2	248.3	230.2	128.4	109.7	9.5	349.5	0.4	-0.6	0.7	0.1	-0.3	-0.3
8	233.5	210.2	113.1	90.7	353.3	330.5	233.3	210.1	113.6	90.1	353.3	330.3	0.2	0.1	-0.5	0.6	0.0	0.2
9	225.1	204.3	103.4	84.4	343.1	324.1	224.3	204.6	104.1	84.9	343.7	324.7	0.8	-0.3	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6
10	209.6	188.7	90.3	68.5	330.5	308.7	210.1	188.9	90.7	69.1	330.3	308.4	-0.5	-0.2	-0.4	-0.6	0.2	0.3

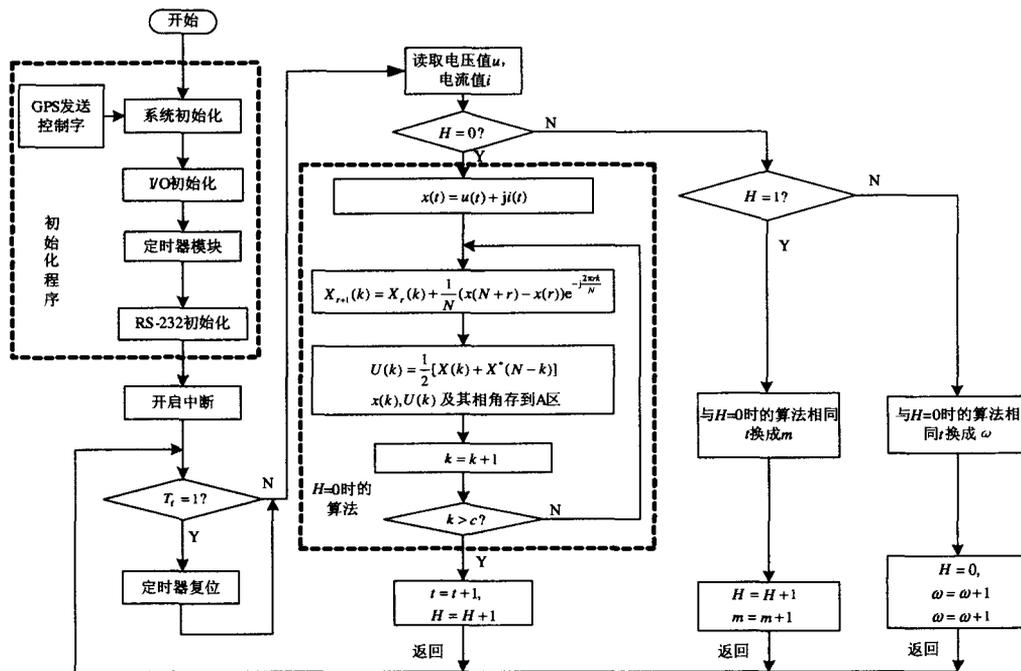


图 3 DSP 程序框图

Fig.3 Flow chart of DSP program

(下转第 47 页 continued on page 47)

了井下 6 kV 变电站的无人值守。

## 参考文献

- [1] 张剑锋. 全集成自动化在煤矿中的应用[J]. 河北煤炭, 2004, (4): 26-27.  
ZHANG Jian-fen. Application of Totally Integrated Automation in the Coal Mine[J]. Hebei Coal, 2004, (4): 26-27.
- [2] SHI Li-ping. Coal Mine Central Pump Room's Security Control System Based on PLC and OPC[J]. Progress Insafety and Technology, Part A, 2005.
- [3] 王卓. 嵌入式 Linux 系统及其应用前景[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2004, (5): 5-8.  
WANG Zhuo. Future Application of Embedded Linux System[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2004, (5): 5-8.
- [4] 冯竹建. IEC104 规约在城轨电力监控系统中的应用[J]. 电气化铁道, 2005, (4): 35-37.  
FENG Zhu-jian. Application of IBC60870-5-104 Telecontrol Protocol in Power SCADA for Urban Mass System[J]. Electric Railway, 2005, (4): 35-37.
- [5] 吴爱国. Modbus 协议客户/服务器通讯模型的实现[J].

组合机床与自动化加工技术, 2005 (1), 55-57.

WU Ai-guo. Implement of Client / Server Model Using Modbus Protocol[J]. Combination Machine Tools and Automated Processing Technology, 2005, (1): 55-57.

- [6] 张广龙. 多协议以太网网关的研究与开发(硕士学位论文)[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.

ZHANG Guang-long. Study and Development of Multi-protocol Ethernet Gateway, Thesis[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-08-31

## 作者简介:

史丽萍(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事配电网自动化及大型机电设备的监控研究工作; Email: slpbbb@263.net

王攀攀(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力拖动自动化;

张广龙(1981-), 男, 硕士, 主要从事配电网自动化方面工作。

(上接第 42 页 continued from page 42)

## 4 结语

本文提出了电力系统实时相量测量实验方案和原理, 并在黑龙江某矿电厂进行了试验, 实验结果达到预期的目的。文中利用 GPS 的授时功能, 测量精度较高; 采用的基于 DSP 芯片的硬件控制系统具有开发周期短、成本低的特点, 具有较好的应用价值。

## 参考文献

- [1] IEEE Working Group Reports. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control[J]. IEEE Trans on PWRD, 1994, 9(1): 442-449.
- [2] Stanton S E, et al. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 297-305.
- [3] Burnett R, et al. Power System Applications for Phasor Measurement Units[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1994, (1): 8-13.
- [4] 韩富春. 电力系统自动化技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

HAN Fu-chun. Automatic Technology of Power System[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.

- [5] 张永建. 电网监控与调度自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

ZHANG Yong-jian. Electricity Network and Attemperring Automation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

- [6] 张雄伟, 邹霞, 贾冲. DSP 原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

ZHANG Xiong-wei, ZOU Xia, JIA Chong. DSP Principle and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

收稿日期: 2007-05-11; 修回日期: 2007-06-04

## 作者简介:

汪玉凤(1962-), 女, 工学硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为现代电力系统的分析与设计、智能电气理论及应用、交流电机控制新方法; E-mail: helenna681@163.com

刘昕霞(1980-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化;

刘静(1956-)女, 大学, 副教授, 主要从事工业自动化方向的教学与科研。