

Windows 环境下相量测量系统性能分析

刘炳旭,赵建国,高厚磊

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 分析了电力系统实时监控对同步相量测量装置(PMU)在实时性、可靠性和精确性 3 个方面的要求,并以一套典型硬件平台为例,讨论了基于 Windows 系统的 PMU 的性能特点以及在实时性方面的不足,给出了描述 PMU 实时性的重要指标——发送延时。在相量计算中采用了递归离散傅里叶(DFT)算法,大大减小了计算量,提高了系统的实时性;分析了 Windows 系统下消息机制的根本缺陷,提出分别利用虚拟设备驱动(VxD)和多线程技术实现中断和查询 2 种软件运行机制的方法,并应用于 PMU 的原始数据处理与数据传输中。测试结果表明,该方法可以有效改进 Windows 环境下监测系统的实时性,能够满足系统实时运行的要求。

关键词: 相量测量装置;递归离散傅里叶变换;虚拟设备驱动;多线程

中图分类号: TM 933

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0028-04

0 引言

广域测量系统(WAMS)基于同步相量测量和现代通信技术,实现了对地域广阔的电力系统的实时动态监测,是在当前技术条件下解决大电网稳定监控问题最为有效的途径之一^[1-2]。对电网相量的异地同步测量是广域测量系统建立的基础。同步相量测量单元(PMU)接收全球定位系统(GPS)提供的精确时间信息对电网状态进行异地同步采样,计算出带有时标的相量,并通过高速网络快速集中,实现对电网相量的异地测量。

目前,广域测量系统在国内外电网中已开始推广应用^[3-5]。在我国,广域测量系统和 PMU 的研究推广工作已在各网调、省调展开,并制定了相关的标准,国家电力调度通信中心于 2003 年 3 月发布了《电力系统实时动态监测系统技术规范(试行)》^[6](以下简称《规范》),并在此后的 2 年中进行了 2 次修正,《规范》在 IEEE Std 1344-1995 标准^①的基础上,对广域测量和电网动态监测系统的概念和监控网络构成、PMU 装置技术规范(同步特性、相量测量精度、实时性等)以及数据通信规约等提出了统一的标准,而对具体的实现方法未作要求。

PMU 是广域测量系统的关键设备,其性能对整个系统的正常运行有着决定性的影响。下面将在总结 PMU 性能指标的基础上,以一种典型 PMU 装置为例,分析基于 Windows 操作系统的 PMU 软件系统的特点,并依据《规范》的规定和电力系统实时运行的要求,提出必要的改进措施。

1 PMU 性能指标分析

在广域测量系统中,PMU 装置的主要作用是对

电网中的相量进行异地同步采样,通过高速数据通信网集中数据,从而实现对电网动态监测。与传统的 SCADA 系统相同,对实时运行的 PMU 装置的基本要求主要体现在可靠性、准确性和实时性 3 个方面^[7]。

1.1 可靠性

可靠性是对实时监控系统的基本要求,它包括设备的可靠性、数据传输与处理的可靠性。设备的可靠性是指设备在规定的时间内和使用条件下完成所要求功能的能力,它可用平均故障间隔时间和可用率表示。数据传输的可靠性是指数据通信系统保持正常连续运行的能力。此外,PMU 是一种对数据进行定时循环采样的装置,处理对象是带有时标的相量,PMU 应保证采样点连续而不丢失。因此,PMU 的可靠性还应包括数据的完整性,它可以用单位时间内数据的丢失率表示。

1.2 精确性

对一般的测量系统,设备的精确性精度主要是指设备的测量精度,主要与模/数转换等各测量环节有关,采用高精度的 A/D 转换装置可有效地提高测量精度。此外,由于同步采样和相量计算的需要,PMU 装置的精度还与同步采样时钟和相量计算的精度有关。采样环节采用了以 GPS 信息为基础的同步时钟信号,同步时钟的误差将控制在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内,在工频 50 Hz 的条件下由同步时钟引起的相角测量误差在 $\pm 0.018^\circ$ 之间。这样,装置的测量误差就主要取决于采用的相量计算方法。

1.3 实时性

实时性是实时监控系统的重要特性。PMU 装置的实时性可用装置实时传送的动态数据的输出延时(即数据的发送时刻与时标的时间差)表示,在《规范》中规定该值应不大于 30 ms。

^① IEEE Std 1344-1995, IEEE standard for synchrophasors for power systems.

PMU 需定时传输数据,其输出延时除与相量计算和数据处理速度有关外,还依赖于操作系统对时间信号的响应延时。一般,CPU 响应硬件定时器中断的延时在 1 μs 内,而在 Windows 环境下,以消息方式响应时间信号时将产生较长延时。研究系统的实时性必须对软件系统本身的运行机制进行分析。

由以上分析可以看出,在硬件装置的性能充分满足要求的基础上,PMU 的性能取决于软件本身的性能,以及采用的相量计算方法,而软件系统包括操作系统与应用软件 2 个方面。

2 装置整体功能介绍

下面以一种典型的配置方式为硬件平台,分析 Windows 环境下 PMU 装置的性能。

文献[8]中的装置硬件配置如图 1 所示,主要包括 DSP 和主 CPU 2 个执行模块。

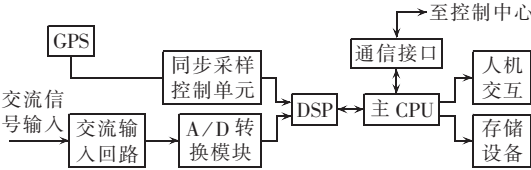


图 1 PMU 装置硬件配置
Fig.1 Configuration of PMU hardware

同步采样控制单元接收 GPS 模块的国际标准时间(UTC)和秒脉冲信号,并通过分频装置产生满足实时采样频率要求的同步采样脉冲;DSP 模块根据同步采样脉冲控制 A/D 转换模块,对输入的交流信号进行采样,利用离散傅里叶变换(DFT)法计算出对应的相量值,将带有时标的相量送入主 CPU。主 CPU 模块与 DSP 通过双口 RAM,以共享内存的方式连接,运行于 Windows 环境下,主要功能是对 DSP 模块的相量计算结果进行必要的处理与转换,并根据通信规约的要求,将数据打包,通过高速通信网送至控制中心。此外,该模块还具有人机交互、数据存储等功能。

DSP 模块工作于嵌入式系统环境下,完成对数据定时采样和相量计算功能。要保持系统长期稳定运行,相量计算应在一个采样周期内完成,否则将产生数据丢失,影响数据的完整性。该模块以硬件中断方式响应采样信号,其延时主要是相量计算时间,控制在一个采样周期内。相量计算精度决定了装置的精度,它主要取决于采用的相量计算方法。

主 CPU 运行于 Windows 环境下,有数据处理、数据传输、数据存储及人机交互的功能,与装置的可靠性、实时性密切相关。其稳定性不仅与应用程序本身有关,还依赖于 Windows 系统的稳定性,而数据延时则取决于 Windows 系统对时间信号的响应速度。

因此,该系统的性能主要与相量计算方法以及 Windows 系统的运行机制 2 方面的因素有关。

3 相量计算原理

相量计算就是利用实时采集的暂态数据计算出对应相量的幅值、相位和频率。目前,常用的计算方法是 DFT 法,该算法计算精度高,对高次谐波具有滤波作用,适用于稳态或频率变化较慢的场合^[9-11],下面介绍其基本原理。

根据《规范》中的规定,模拟信号

$$v(t)=\sqrt{2} V \cos (\omega_0 t+\varphi)$$
 (1)

在 $t=0$ 时刻对应的相量表达式为

$$V(t)=V e^{j \varphi}=V(\cos \varphi+j \sin \varphi)$$
 (2)

设对信号进行离散采样后的脉冲序列为

$$V(0), V(1), \cdots, V(k), \cdots$$

当一个周期内的采样点数为 N 时,

$$V(k)=\sqrt{2} V \cos (2 \pi k / N+\varphi)$$

则利用 DFT 计算的任一时刻的相量的一般表达式为

$$V(r)=\frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=r}^{r+N-1} V(k) e^{-j 2 \pi(k-r) / N}$$
 (3)

式(3)的计算中是以数据窗中第 1 个采样点为参考相量的,测得的相量对应第 1 个采样点时刻的相位。当以数据窗中第 m 个($0 \leq m < N$)采样点为参考点时,通过式(4)可计算出第 m 点时刻的相位。

$$V(r)=\frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=r-m}^{r-m+N-1} V(k) e^{-j 2 \pi(k-r) / N}$$
 (4)

在上面的基础上,引入递归算法。令

$$V'(r)=\sum_{k=r-m}^{r-m+N-1} V(k) e^{-j 2 \pi(k-r) / N}$$
 (5)

并引入变量

$$\delta=2 \pi / N, \quad p=r-m+N, \quad q=r-m$$

则

$$V'(r+1)=\sum_{k=r+1-m}^{r-m+N} V(k) e^{-j 2 \pi(k-r-1) / N}=$$

$$[V'(r)+(V(p)-V(q)) e^{-j m \delta}] e^{-j \delta}$$
 (6)

对应的相量为

$$V(r+1)=\frac{\sqrt{2}}{N} V'(r+1)$$
 (7)

其中, $V(p)$ 为数据窗后的一个采样点数据, $V(q)$ 为原数据窗中的第 1 个采样点数据。

该方法利用前一次的计算结果和当前的采样数据直接计算出当前时刻的相量,不必每次进行循环迭加运算,减小了计算量。

根据式(4)或式(7)结果可直接计算相量的幅值 $V(r)$ 和相角 $\Phi(r)$ 。当幅值不变时,频率为相位角的导数,因此稳态情况下,系统频率可由下式直接计算:

$$f(r)=f_0+f_0 \times \frac{\Phi(r)-\Phi(r-N)}{2 \pi}$$
 (8)

式中 f_0 为系统额定频率。

递归离散傅里叶变换公式由 DFT 计算公式推导得出,未作简化,因此具备 DFT 算法的优点和计算精度,同时减小了计算量,可以有效改善系统的实时性。

式(6)中,对相量的计算是利用前一次的计算结果,在计算机内部经过多次运算后,将产生舍入误差。在实际的系统中,可以间隔一段时间利用式(5)计算一次相量,其他采样点处则采用式(6)计算,以减少舍入误差的影响。

4 Windows 操作系统分析

主 CPU 运行于 Windows 环境下时,Windows 系统对监控系统的性能起着至关重要的作用。作为一种通用操作系统,Windows 在当前的商用和家用电脑领域得到广泛的应用,它操作灵活方便,具有丰富的图形界面,强大的软件和硬件的支持能力,软件设计和维护工作量小;同时,Windows 环境通过对高级语言编程的支持,进行面向对象的设计,有利于编制功能完善的大型程序。

但 Windows 系统的运行是基于事件驱动消息传递机制的,在实时性方面有着明显的缺陷。操作系统的实时性是指系统对外部事件响应的及时性。事件驱动机制中,当外部事件发生时,将发送消息进入消息队列,操作系统依次响应队列中的消息,传送给应用程序进行处理。从事件发生到应用程序开始处理之间的时间间隔为操作系统的响应延时,它反映了操作系统的实时性。对 Windows 系统响应定时器消息的过程进行观测,连续记录 1 000 次,延时情况如图 2 所示(横轴表示统计计数,纵轴表示延时记录;图 3 同),其平均值为 55.7 ms,最大值为 178 ms,说明这种机制实时性较差。

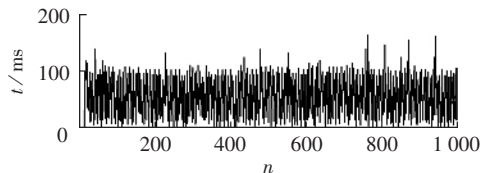


图 2 消息机制延时记录

Fig.2 Transmission delay record of message mechanism

要使 Windows 系统能够用于实时监控,必须改善其实时性,即根据 Windows 系统的特点,最大限度地缩短操作系统对事件的响应延时。

一般,CPU 对外部事件的响应有硬件中断和查询 2 种方式。硬件中断方式响应速度快,但对任务执行时限有明确限制,应在下一次中断到来前执行完毕,否则将产生中断丢失现象。该方式适于完成工作量较小的任务。Windows 系统下的虚拟设备驱动(VxD)或 WDM 技术可实现对硬件中断的编程,在目前的实时监控系统中已有应用^[12-14]。查询方式就是程序反复查询信号状态,当信号状态改变时,进入任务执行程序,这种响应延时与程序执行周期以及各任务的执行时限有关,对循环中的任务进行合理规划,可以将延时限制在一个较小的范围内。Windows 是一种多任务的操作系统,通过多线程技术,可以多个任务间自动切换、循环执行。多线程技术为 Windows 环境下查询机制的实现提供了条件。

主 CPU 的实时性任务主要包括与 DSP 模块的

数据交换、数据处理与传输 2 个方面。前一任务主要是数据的读写操作,操作简单、执行时间短。后者较复杂,包括三角函数等复杂运算,同时数据传输中需要网络传输协议的支持。要改善主 CPU 模块的实时性,必须对上述任务进行合理规划。

4.1 与 DSP 的数据交换

主 CPU 与 DSP 之间的数据交换需要每个采样周期进行一次,若处理不及时将发生采样数据丢失的现象,因此对实时性要求较高。基于 VxD 技术的硬件中断方式,可以较好地满足系统实际运行的需要。可以利用 DSP 和主 CPU 之间的握手信号,通过互发硬件中断实现信息交换;此外,主 CPU 可响应自身的硬件中断(例如定时器中断),定时查询 DSP 中的更新数据,从而达到信息交互的目的。系统运行试验表明,2 种方式都可实现上述功能,前者延时短,但对系统的可靠性要求较高,当中断未及时响应或执行时间超过时限,任务的执行将被中断;后者具有较高的容错性,产生的延时在一个采样周期之内。

4.2 数据处理与传输

主 CPU 从 DSP 接收的是带有时标的相量数据,即式(4)或式(7)的结果,主 CPU 计算各相量的相位角及其正序分量,依据式(8)计算系统的频率,然后根据数据传输规约的要求将数据打包后通过高速数据网发送,并周期性地保存实时数据。该过程包含复杂的数学运算,并需要高级网络通信软件的支持,在中断方式下难以实现。利用 Windows 系统的多线程技术,以查询方式进行。在 PMU 中,数据的传输和存储是周期性的,查询过程的关键是对标准时钟信号的查询。一般,数据计算、发送和存储的时间是固定的,模块的输出延时主要取决于信号查询产生的延时。相量数据发送时刻与数据所带时标的时间差反映了整个装置的延时特性。实验室中对装置进行了延时试验,连续记录 1 000 次,统计结果如图 3 所示。其延时最大为 25 ms,平均值为 4 ms,延时 2 ms 以内的次数占 80% 以上。

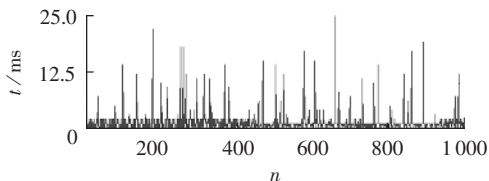


图 3 查询机制延时记录

Fig.3 Transmission delay record of demand mechanism

5 结论

实时监控系统中的 PMU 装置的性能要求应包括可靠性、精确性和实时性 3 个方面,当硬件平台采用“DSP+主 CPU”的方式,主 CPU 运行于 Windows 环境下时,装置的缺陷主要是实时性差。

从相量计算方法和软件系统设计 2 个方面进行了改进。

a. 在相量计算中,采用递归 DFT 方法,可以有效减小计算量,改善 DSP 模块的实时性。

b. 通过对 Windows 操作系统性能特点及 PMU 实时性任务的分析,采用 VxD 和多线程技术代替常规的消息传递机制,通过 Windows 环境下的中断和查询方式,合理分配任务。通过实验室运行测试,表明该措施可以较好地提高系统运行的实时性。

通过上述措施,PMU 装置的性能,尤其在实时性方面得到了很大提高,满足了当前 WMAS 系统实时运行的需要。

参考文献:

- [1] 高厚磊,厉吉文,文锋,等. GPS 及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化,1995,19(9):41-44.
GAO Hou-lei,LI Ji-wen,WEN Feng,et al. GPS and its potential applications to power system[J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(9):41-44.
- [2] 韩英铎,王仲鸿,孔兴,等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术,智能控制,基于 GPS 的动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报:自然科学版,1997,37(7):1-6.
HAN Ying-duo,WANG Zhong-hong,KONG Xing,et al. Three new front subjects in power systems - FACTS,intelligent control and dynamic security analysis and monitor system based on GPS [J]. Journal of Tsinghua University:Sci & Tech,1997,37(7):1-6.
- [3] 王英涛,印永华,蒋宜国,等. 我国实时动态监测系统的发展现状及实施策略研究[J]. 电网技术,2005,29(11):44-48.
WANG Ying-tao,YIN Yong-hua,JIANG Yi-guo,et al. Study on current development situation and implementation strategy of real-time dynamic monitoring system in power systems in China [J]. Power System Technology,2005,29(11):44-48.
- [4] 苗世洪,王少荣,刘沛,等. 基于 GPS 的电网状态监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化,2000,24(12):52-54.
MIAO Shi-hong,WANG Shao-rong,LIU Pei,et al. The design and implementation of the GPS based real-time monitoring system for the states of power network [J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(12):52-54.
- [5] 吴京涛,谢小荣,王立鼎,等. 广域测量系统在电力系统的发展与展望[J]. 电力设备,2006,7(3):46-49.
WU Jing-tao,XIE Xiao-rong,WANG Li-ding,et al. Development and prospect of WAMS in power system[J]. Electrical Equipment,2006,7(3):46-49.
- [6] 国家电力调度通信中心. 电力系统实时动态监测系统技术规范(试行)[S]. 北京:国家电力调度通信中心,2003.
- [7] 盛寿麟. 电力系统远程监控原理[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [8] 耿池勇,高厚磊,刘炳旭,等. 基于同步相量测量技术的功角监测系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(3):17-19.

- GENG Chi-yong,GAO Hou-lei,LIU Bing-xu,et al. PMU based real-time monitoring system for power angle [J]. Proceedings of the EPSA,2003,15(3):17-19.
- [9] 李丹,韩福坤,郭子明,等. 华北电网广域动态实时监测系统[J]. 电网技术,2004,28(12):52-56.
LI Dan,HAN Fu-kun,GUO Zi-ming,et al. Wide-area real time dynamic security monitoring system of north China power grid [J]. Power System Technology,2004,28(12):52-56.
 - [10] 杨贵玉,江道灼,邱家驹. 相量测量装置的同步测量精度问题[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):56-61.
YANG Gui-yu,JIANG Dao-zhuo,QIU Jia-ju. Synchronous measurement precision of phasor measurement unit [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(14):56-61.
 - [11] 耿池勇,高厚磊,刘炳旭,等. 用于同步相量测量的 DFT 算法研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):84-87.
GENG Chi-yong,GAO Hou-lei,LIU Bing-xu,et al. Study of DFT algorithm in synchronized phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):84-87.
 - [12] 常勇,郑玉平,周文. 相量测量系统软件的构想与实现[J]. 电力系统通信,2004,25(3):40-43.
CHANG Yong,ZHENG Yu-ping,ZHOU Wen. Design of phasor measurement system monitoring software[J]. Electric Power System Communication,2004,25(3):40-43.
 - [13] 严登俊,鞠平,袁洪. 网络通信模式下电网相量的广域测量与实时传输系统[J]. 电网技术,2004,28(4):15-18.
YAN Deng-jun,JU Ping,YUAN Hong. Wide area measurement and real-time transmission for phasor data under network communication mode[J]. Power System Technology,2004,28(4):15-18.
 - [14] 陈素芬,张波,李萍,等. Windows 操作系统下电力系统实时数据采集的 VxD 技术[J]. 电力自动化设备,2003,23(3):13-15.
CHEN Su-fen,ZHANG Bo,LI Ping,et al. VxD Technology for power system real-time data collecting in Windows operating system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(3):13-15.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

刘炳旭(1970-),男,山东宁津人,讲师,博士研究生,主要从事电力系统自动监控与广域测量等方面的教学与研究工作(E-mail:liu_bing_xu@sdu.edu.cn);

赵建国(1955-),男,山东乳山人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统自动调度与安全稳定分析等方面的教学与研究工作;

高厚磊(1964-),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,长期从事电力系统继电保护与广域测量等方面的教学与研究工作。

Analysis of PMU performance in Windows system

LIU Bing-xu,ZHAO Jian-guo,GAO Hou-lei

(School of Electric Engineering,Shandong University,Ji'nan 250061,China)

Abstract: Performance indexes of PMU(Phasor Measurement Unit) are analyzed in real-time, reliability and accuracy. With a typical hardware platform as an example,features of PMU in Windows system and its shortages in real-time performance are discussed. An important index is proposed to represent the real-time performance—the transmission delay. The recursive DFT is introduced in phase calculation to reduce calculation time and improve real-time performance. The limitation of MPI(Message Passing Interface) in Windows system is analyzed,and VxD(Virtual Device Driver) and multithread technologies are used to implement message mechanism and demand mechanism for data acquisition and data transmission respectively. Test results show that the real-time performance is improved to meet the requirement.

Key words: PMU; recursive DFT; Virtual Device Driver; multithread