

电网广域测量系统中 PMU 的研究和设计

任先文, 谷延辉, 解东光, 张吉, 王佐勋

(东北电力学院电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 介绍了广域测量系统的概念及同步相量测量技术的基本原理, 对系统子站 PMU 的功能进行了分析。针对系统对 PMU 的要求, 采取了模块化分布式的设计方法。由于传统的测量方法忽略了电网频率波动的不足, 该文引入了自适应采样算法, 有效地减少了频谱泄露。PMU 的核心器件采用了先进的 DSP 芯片进行设计, 同时利用 CAN 总线组建了局域网。

关键词: PMU; GPS; DSP; 频谱泄露

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)14-0052-05

0 引言

随着全国联网步伐的加快, 对电力系统的实时监控与管理提出了更高的要求。目前在我国大量应用的电力系统监测手段主要侧重于记录电磁暂态过程的各种故障录波仪和侧重于系统稳态运行情况的 SCADA/EEMS 及相关的应用软件为代表的调度监控系统, 二者都缺乏准确的共同的时间标志, 记录数据只局部有效, 难以用于全系统动态特性的分析。而 GPS 技术, 现代通讯技术和数字信号处理技术的发展, 使电力系统的广域动态实时监测成为可能^[1]。

广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 可以作到时间上的同步, 它可以利用 GPS 高精度的授时功能实现对不同的数据采集点的同步采样, 采样时间同步精度控制在 $1 \mu\text{s}$ 以内。WAMS 亦可以作到空间上的广域, 我国的电力系统趋势为全国联网, 而现在的 WAMS 依靠先进的通讯手段以及不断优化的系统设计可以满足对电力系统监测的精度和实时性要求, 所以它在近些年来无论是在国内还是国外发展都很快, 一些包括系统功角测量的同步测量系统已进入了工程上的实施阶段, 而国外的许多国家也加强了对电力系统监测的力度。例如, 美国在“8·14 大停电”事故后, 在电网中安装了更多的 PMU。

1 PMU 的功能研究

WAMS 是由子站的 PMU、通讯系统以及调度中心的控制系统组成。目前国内的 WAMS 的设计在结构上摒弃了之前的集中式设计的模式, 而采用了分层分布式的设计思想。按照现场的监测过程将系统模块化, 从而减轻了之前的设计中数据处理模块

负担过重的问题, 提高了系统的可靠性, 同时也有利于整个系统的功能扩展和维护。

WAMS 的主站一般设在省调度中心, 而子站为各个功角监测点。在全国联网的情况下, 全国性的监测系统有国家调度中心、网调度中心、省调度中心和就地监控 4 级组成。国调、网调和省调可以在各自的范围内看到全局的相量信息^[2]。子站与主站之间设有专门的通讯通道, 从而保证通讯的实时性、可靠性和安全性。

1.1 PMU 的原理

同步相量测量技术 SMT (Synchronized Phasor Measurement Technology) 源于 20 世纪 80 年代初期, 由美国的 Phadke 博士和一些电气专家提出来的, 它是指在全网统一的时标下 (通常以 GPS 提供的时间作为标准), 对电力系统的不同节点的电压和电流进行同步采样, 生成各节点电压和电流相量的正序相量, 在统一的时间坐标系上对电力系统的状态进行分析。同步相量测量技术实现了对信号采样的同步, 通过数据处理进行了从数据到相量的转化, 由 GPS 给每个相量打上时间标签, 然后将这些信息以一定格式的数据包上传, 以供分析。SMT 技术在近些年来发展很快, 在 1995 年, IEEE 已经制定了针对同步相量的 IEEE Standard 1344^[3]。以 PMU 为核心的监测系统子站是系统设计中一个十分重要的部分, 它是系统设计的低层部分, 见图 1。

根据电力系统的要求, PMU 应该具有以下的基本功能:

- 1) 对三相电压、电流信号进行采集, 采集的模拟量可以包括零序电压和零序电流。数据采集单元还要对监测点的开关等状态量进行采集。
- 2) 对采集的量通过模数转换, 采用一定的算法

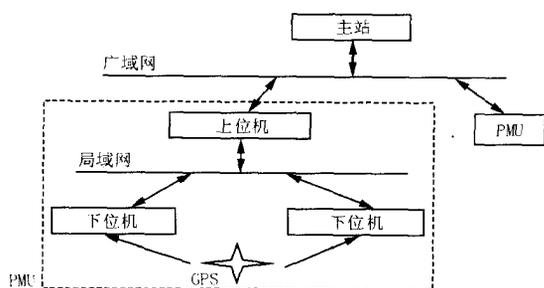


图 1 WAMS 简图

Fig 1 Sketch map of WAMS

实时计算出电压的有效值、电流的有效值、零序电压、零序电流、有功、无功、功率因数和电网频率等。通过对电压量相角的计算,我们还可以得到功角。这是 PMU 有别于其它的测量装置的最重要的一点,国外的多数的 PMU 装置只是测量电气量的相角而不是功角。

3) 利用 GPS 的高精度授时功能实现对监测点电量的同步采集,并给获得的相量加上时间标签,结合监测点在系统的位置和电量类型获得监测量的统一规定下的 ID 号,然后将这些信息打包传给子站的上位机。

4) 子站的上位机可以对数据进行就地显示、存储,必要的信息要通过广域网将其上传到主站的中央处理机进行集中处理。子站和主站之间要有可靠的通讯通道,以保证数据传输的实时性和可靠性,同时又有利于系统的扩展和对数据的堵塞现象的解决。

1.2 相量测量算法

若三相的相量为 X_a, X_b, X_c , 则正序相量

$$X_1 = \frac{1}{3} (X_a + X_b + \sqrt{3} X_c)$$

其中 $\omega = e^{j2\pi/3}$ 。

同步相量的算法主要有两类:即过零检测法和傅里叶变换法。由于过零检测法受谐波影响比较大,因此测量的精度不高,所以没有傅里叶变换法应用广泛。

离散 Fourier 算法工频电压值可表示为:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

式 (1) 用矢量表达:

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi} \quad (2)$$

虽然相量的概念是用纯正弦来定义的,但是它同样可以用在含暂态量的情况下。我们可以通过傅里叶算法将其基频成分提取出来。首先选定采样间

隔,采样时间满足 $t = k$, k 是自然数。则我们可以得到 x_k 。相量 X 可表示为:

$$X = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{N} (X_C - jX_S) \quad (3)$$

在这里

$$X_C = \sum_{k=1}^N x_k \cos(k)$$

$$X_S = \sum_{k=1}^N x_k \sin(k)$$

其中 N 是额定电网频率下一个周期的采样点数。

和 X 之间的关系是 $\omega = \frac{2\pi}{N} = 2\pi f_0$, 其中 f_0 为电网的额定频率。等式 (3) 代表了一个周期的数据窗所生成的相量。

为减少 DFT 的运算量,通常采用改进的递推 Fourier 算法,对于式 (1) 表示的正弦工频信号,在实时测量中得到两个采样集:

$\{X_k | k = r, \dots, N+r-1\}$ 对应基波相量 X^r

$\{X_k | k = r+1, \dots, N+r\}$ 对应基波相量 X^{r+1} 。

而 X^{r+1} 可以通过数据窗的移动来获得^[4], 即:

$$X^{r+1} = X^r + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{N} (X_{N+r} - X_r) e^{-jr} \quad (4)$$

现在几乎所有的 PMUs (Phasor Measurement Units) 都采用这种递推算法。此法在计算新的相量时,只需在旧值的基础上利用两点采样值进行简单运算即可完成,大大减少了计算量。虽然现在的 DSP 芯片可以很好的完成 FFT 的运算,但是 FFT 算法要求采样数据窗的点数必须是 2^n , 考虑电网谐波的影响和奈奎斯特频率的限制,基于 FFT 的采样频率的选择是很有局限的。

但是电网的频率不可能是 50 Hz 恒定不变的,考虑到电网波动的情况,采样间隔如果恒定不变,由于截取波形的时间长度不恰当,破坏信号的周期性,从而会引起频率泄露。为了避免频率泄露,就要求对周期信号进行频谱分析时,截取的信号长度应该为一个基本周期或者基本周期的整数倍。如果不能准确的预测出信号的瞬时频率,那么对采样数据就不能生成准确的正序相量,也就不能准确的反映出系统的状态。所以瞬时频率的测量对于 PMU 来说是一个非常关键的因素。

如果对于被采样信号来说,第 m 个采样窗口的采样点为 $(t_0, x_0), (t_1, x_1) \dots (t_{N-1}, x_{N-1})$, 已知各个点的瞬时频率分别为 f_0, f_1, \dots, f_{N-1} , 我们可以知道下一个采样点的时间间隔为 $t = 1/(N \cdot f_{N-1})$, 得

到了第 N 个采样点。则由新生成的第 $m+1$ 个数据窗可以算出 f_n , 由于频率的波动, 则 X^{m+1} 不等于 X^m , 相角差不为 0, 则

$$2(f_n - f_{n-1}) \cdot t = 2(f_n - f_{n-1}) / (N \cdot f_{n-1})$$

由此可得第 n 点的频率为^[5]:

$$f_n = f_{n-1} (1 + N \cdot 2 / \dots)$$

在仿真设计中, 我们取一个周期采样 12, 20, 40, 64 点分别进行试验。表 1 是一个周期采 20 点的仿真结果。

由仿真结果可以看出即使在电网波动很大的时候, 电网的瞬时频率测量几乎都可以在半个信号周期内跟踪上。根据一个周期取其它点数的仿真结果我们可以得到同样的结论。

需要说明的是, 由于电网波动, 我们采用了变采样的方法。而在同步相量技术中, 如果采用傅里叶算法, 在每一个周期内都要求采样得到的时间序列是等时间间隔的。所以在用 DFT 计算时, 不能算是严格意义上的 DFT 算法, 由于我们可以实时的预测电网的频率, 然后再根据得到的新的频率得到下一个点的采样时间, 所以这是一种等角度采样的方法。

表 1 自适应算法的仿真结果

Tab 1 Simulation results of the adaptive algorithm

理论值	第 7 个采样间隔	第 8 个采样间隔	第 9 个采样间隔	第 10 个采样间隔	Hz
49.8	49.780 6	49.783 1	49.792 9	49.802 9	
49.2	49.119 1	49.124 9	49.170 0	49.205 0	
47.5	47.284 8	47.299 7	47.420 0	47.510 2	
50.2	50.217 8	50.216 6	50.206 7	50.199 2	
51.0	51.063 0	51.058 6	51.023 4	50.988 1	
60.0	58.283 5	58.726 3	59.935 5	60.021 0	

2 PMU 的结构设计

广域监测系统的设计主要分为集中式和分布式 2 种。集中式设计方法中各功能模块的连接与硬件无关, 各模块之间通过软件来连接, 信息采用集中采集和处理方式。这样系统底层的数据交换和远程通信都是在一台工控机上完成, 系统实现起来相对比较容易, 但是这种结构下的主机负担过重, 系统功能层次不清晰, 在规模上受到了很大限制, 而且可靠性、可维护性和可扩展性也不好。

而分层分布式的设计方法是按照功能划分, 采用模块化的设计思想, 状态数据的交换、组织和通信均在底层完成, 使得上位机工作站负担大大减轻, 这样也就增强了系统的可靠性, 也方便以后的扩展^[6]。

2.1 时钟模块的设计

GPS 的同步精度一般都在 $1 \mu\text{s}$ 以内, 广域测量系统依靠 GPS 精确的授时功能实现对生成的相量追加时间标签, 这样就可以在广域范围内进行数据分析。模数转化器的采样频率由芯片内部资源中 EVA 的定时器 1 提供, 通过对芯片主频进行分频得到的时钟信号可以被 GPS 接收器提供的标准的 TTL 电平的秒脉冲信号进行严格的同步, 以保证在全局范围内实现对电信号在时间上的同步采集。因为普通的外接晶振一般没有采取温度补偿措施很难满足设计中对于内部时钟的高精度高稳定性的要求, 所以设计上应该采用对晶体频率温度特性进行补偿, 以达到在宽温温度范围内满足稳定度要求的温补晶体振荡器或者恒温晶振。DSP 和 GPS 模块之间采用的 RS232 的通讯方法, GPS 可以通过某些指令提供满足 DSP 的授时格式, 而且 GPS 本身采用伪码、扩频技术, 有效地提高了通讯通道的抗干扰性和准确性。在变电站或者发电厂内需要采集的模拟量可能很多, 这样在 PMU 中就会有多个下位机, 而它们都需要接受 GPS 的授时, 考虑到 GPS 的成本和安装情况, 我们需要在 GPS 和多个下位机之间加上一个 GPS 的扩展装置, 多路分别设定的秒、分、时同步脉冲均经高速光电隔离, 空接点输出, 秒脉冲亦可以通过光电隔离, 这样满足多点授时的要求。

2.2 数据采集和处理单元设计

TMS320LF2407A 是 TI 公司 C2000 系列的一个主推类型。专为实时信号处理而设计。它采用流水线的设计, 增强型的哈佛结构。40 MHz 的晶振频率使单指令周期缩短为 25 ns, 片内高达 32 kb \times 16 位 FLASH 程序存储器, 2.5 kb \times 16 位的数据程序 RAM, 544 b DARAM 和 2 kb 的 SARAM。而且程序存储器、数据存储器和 I/O 空间都可以外扩至 64 kb。10 位 A/D 的最小转换时间为 375 ns, 支持 RS232、SPI、SCI、CAN 等多种通讯方式, 使系统设计灵活简单。

数据采集单元可以采用外扩 AD 转换器的形式, 是考虑到了转换精度, 信号输入范围和信噪比等的因素。如果采用 DSP 芯片内部集成的 AD 转换器, 那样需要对信号输入限制在 $0 \sim 3.3 \text{ V}$ 之间, 硬件电路相对复杂, 但是在本次设计中采用了后者。而且数据采集启动的脉冲信号是由芯片内部提供, 有别于通常的对 GPS 秒脉冲信号分频的设计方法, 因为以前的设计是认为频率不变, 而不能跟踪电网频率的变化, 造成了信号的频谱泄漏。而现在的方

法可以灵活的改变采样频率,跟踪电网频率的变化,而且每隔一定的时间利用 GPS秒脉冲信号对其进行同步,以保证其采样的同步精度。

在利用 DSP做数据处理时,是采用汇编指令编程的,这样定时器的定时精度和同步精度都有了可靠的保证。在利用 DSP汇编语言编程中,可以体会到它对数据信号的滤波处理等算法实现上是很方便的。算法中要求是采用递归式 DFT,算法中用到的三角和反三角函数都可以用汇编实现的,而无需进行函数调用,这样就可以减少整个过程消耗的时间。硬件由于采用的是支持定点运算的芯片,这样在程序中需要考虑到非整数运算的定标问题,设计中采用了混合的定标方法,使得生成的结果具有很好的精度。

2.3 子站局域网的组建

在子站的监测点很多的情况下,测量单元也会很多,在现场的环境下也会存在很多电磁干扰。这就需要在下位机和上位机通讯的过程中建立一个高速、稳定、可靠的通讯方式,避免由于数据集中而引起的数据堵塞现象和减少传输数据的误码率。

CAN (Contoller Area Network) 总线是德国 Bosch公司开发的一种串行数据通信协议。它废除了传统的站地址编码,代之以对通信数据块进行编码,使网络上的节点个数在理论上不受限制。而且针对子站的设计还有下面的优点:

- 1) 支持分布式控制和实时控制,这一点正好满足设计的要求。CAN的直接通讯距离最远可达 10 km,通讯速率最高可达 1 Mb/s(通讯距离小于 40 m时)。CAN节点在自身发生错误时有自动关闭功能,不会影响其它节点的正常工作。这是以往的 RS232和 RS485通讯方式所无法相比的。

- 2) 协议遵循 ISO/OSI模型,采用了其中的物理层、数据链路层和应用层。它可以以主从模式工作,本质上是一种 CSMA/CD方式,网络上的任意一个节点均可以在任意时刻主动向网络其它节点发送信息。节点之间有不同的优先级,通讯方式灵活。这样在多个下位机和上位机通讯时,就可以避免由于数据集中而堵塞的现象。而且不会丢失数据。

- 3) 支持点对点,一点对多点及全局广播等通讯方式。在子站服务器发出命令时,可以准确的将控制命令到达具体的某一下位机。

- 4) 采用非破坏性仲裁技术、优先级发送,链路层采用短帧结构,保证通讯实时性,而且每一帧信息都有 CRC校验,降低传输的误码率。

一个比较理想的电网实时监控与管理系统的实现能对电力系统的实时控制,要求系统必须在 30 ~ 50 ms内完成 PMU数据的测量、传输、分析处理等一系列过程,生成命令到执行端。相量数据的刷新频率最高为 50 Hz,而综合 WAMS各部分的延时 20 Hz的刷新频率是可以实现的。对于从采集点到主站的通信延时存在一些不确定因素(采样的网络通讯方式不同,即使相同的通讯方式由于可能采用了异步不确定网络,负载的大小也会影响它的实时性;根据不同的要求数据包的大小会不同;主站与子站通讯距离不同)难以精确分析,可以采用统计的方法来考虑通讯的延时^[6]。对于基于 CAN总线的子站而言,相对于一般的子站设计来说是有它稳定性和实时性的优势的。另外,由 CAN总线构建的局域网便于硬件扩展和系统的升级。

2.4 上位机软件支持

PMU的上位机要完成下位机生成的数据的存储、上传,有些数据还需要显示,以实现就地实时监测。在 PC内要有 2个网卡:一个网卡(CAN适配卡)是为了在局域网进行通讯;另一个网卡要实现数据和广域网的连接,将数据传送到远程调度中心。

在上位机软件编程上,VB和VC等都可以较为容易的实现,但是 LabVIEW软件有着明显的优势。基于虚拟仪器技术的软件平台可以实现就地监控,分析和显示。而且在电网谐波分析中可以实现图像显示,软件本身提供了数据分析的很多方法,如 FFT,FR等。虚拟仪器的界面接近于真实的仪器,而且操作简单实用。在数据处理中应用虚拟仪器技术容易实现高性能的谐波分析方法,这就可以硬件软件化。当系统需要谐波测量(故障状态下要求对记录的波形进行谐波分析)时就可以构建电力网络的谐波在线分析系统。

2.5 PMU的模块图及 PMU之间的关系

图 2是 PMU的模块化结构图。对于一般的发电厂都会有 2台发电机组,而在一些比较老的电厂里甚至会有 6台,如果在现场需要采集的量很多,就需要多个 DSP数据采集和处理单元协调工作,下位机和上位机以及下位机之间都是通过 CAN总线进行通讯的。设计中考虑到现场的各种干扰,DSP芯片应该采用外接的 40 MHz晶振的方式工作。芯片内置看门狗电路,可以提高其抗干扰能力。在上位机的 PC插槽上装有上位机和 CAN总线连接的适配卡。

由于全网动态监测系统采用的是分层分布化的

设计方案,系统中子站之间的关系构建也较为灵活。

1) 星形子站结构。这种结构 PMU 之间是并列的关系。他们都是通过高速传输网络实现数据的上传。

2) 主从式子站结构。这种结构是选择一个子站作为参考站,如一个主力发电厂和枢纽变电站,该站的功角不仅传到调度中心而且还要传到其它的子站,作为其它子站测量的参考点。

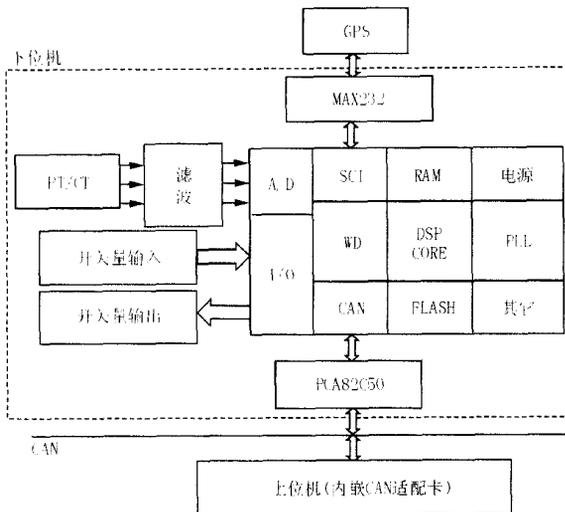


图 2 PMU 的模块化结构图

Fig 2 Modularization diagram of PMU

3 结论

本文对全网动态监测系统中 PMU 的功能进行了分析。根据现场的实际需要构建了基于 DSP 的同步相量测量单元。PMU 算法采用了自适应采样的算法,在不考虑 A/D 误差情况下,有良好的测量精度。考虑到工况,在子站内部组建了 CAN 局域网。上位机利用 LabVIEW 软件完成对数据显示和谐波分析系统的设计。

参考文献:

[1] 闵勇,丁任杰,任勇,等.电力系统全网同步监测系统

[J]. 清华大学学报,1997,37(7):86-88

M N Yong, D N G Ren-jie, REN Yong, et al Wide Area and Synchronous Monitoring System [J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(7): 86-88

[2] 鞠平,郑世宇,等.广域测量系统研究综述 [J]. 电力自动化设备,2004,24(7):37-40

JU Ping, ZHENG Shi-yu, et al The Summary of the Research of Wide Area Measuring System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 37-40

[3] Working Group H-8 of the Relay Communications Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee IEEE Standard for Synchrophasor for Power System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13: 73-77.

[4] Working Group H-8 of the Relay Communications Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9: 442-451.

[5] 耿池勇,高厚磊,刘炳旭,等.适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):84-86

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): 84-86

[6] 李刚,王少荣,程时杰.广域网同步状态监测系统中的实时通信 [J]. 电网技术,2004,28(18):39-43

LI Gang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie Real-time Communication in a Synchronous States Monitoring System for Wide Power Systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 39-43.

收稿日期: 2004-11-10; 修回日期: 2005-01-24

作者简介:

任先文(1954-),男,教授,研究方向为微机在电力系统上的应用;

谷延辉(1978-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: gyh_31@163.com

解东光(1970-),男,助教,研究方向为微机在电力系统上的应用。

Study and design of PMU in dynamic security monitoring system

REN Xian-wen, GU Yan-hui, XIE Dong-guang, ZHANG Ji, WANG Zuo-xun

(Department of Electric Engineering, Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jinlin 132012, China)

Abstract: This paper introduces the conception of dynamic security monitoring system and the principle of synchronized phasor measurement technology. The functions of PMUs in substations are analysed as well. In the design of this unit, a modularized and distributed method is adopted to meet the need of the system. In addition, to solve the problem existing in the traditional method without considering the fluctuation of electric network's frequency, an adaptive sampling algorithm is used, with which the leakage of frequency can be reduced effectively. The core unit is designed with the advanced DSP chip, and the local area with CANBUS is built.

Key words: PMU; GPS; DSP; leakage of frequency