

母线电压同步相角测量算法研究及实现

周捷, 陈尧, 崔建中

(电力自动化研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 讨论了基于 GPS 绝对时钟的电力系统母线电压同步相角测量的实现方法, 研究了电压相角的过零测量法、离散 Fourier 和递归 Fourier 算法, 探讨了变采样速率的同步相量测量算法。利用 DSP 数据处理芯片实现了基于 DFT 算法的 GPS 同步电压相角测量装置的软硬件设计, 给出了实验仿真结果。

关键词: 同步电压相角; GPS; 过零测量法; DFT 算法; 变速率同步采样; DSP 芯片

中图分类号: TM764 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)03-0013-04

1 引言

电压相量是电力系统的一个重要参数, 其中母线电压相量及功角状况是系统运行的主要状态变量, 是系统能否稳定运行的标志之一。然而长期以来, 由于没有一个绝对的参考电压相角, 电力系统中各节点电压的相角差很难直接测量到。随着通信技术的发展, 特别是全球定位系统 (GPS) 的出现, 为电力系统提供了统一的时钟标准, 使电压相量的同步测量成为可能。西方国家从九十年代之后开始把电压相量测量装置 (PMU) 应用于电力系统的监测、稳定控制和保护的理论及应用研究工作中。国内的一些单位和学者也开展了 PMU 的研究开发工作, 并取得了一些成果。本文讨论了基于 GPS 统一时钟的电压相量同步测量的实现技术, 探讨了变采样速率的同步相量测量算法。以 DSP 芯片为核心, 实现了基于离散 Fourier 算法的 GPS 同步电压相角测量装置的软硬件设计, 给出了实验仿真结果。

2 同步电压相角测量算法研究

2.1 过零测量法

过零测量法是比较直观的一种同步相角测量方法, 只需要将被测工频信号的过零点时刻与某一时间标准相比较即可得出相角差。目前市场上 GPS-OEM 接收模块的秒脉冲 (1PPS) 上升沿的精度误差在 $\pm 1\mu\text{s}$ 之内, 对于 50Hz 的工频其相位误差在 $\pm 0.018^\circ$, 在允许的相位误差范围之内。国内目前 RTU 通信网络的速率比较低, 传送一次数据需 0.5 ~ 1.5s, 因此只要将正序电压过零点时刻与 1PPS 相比较, 便能得到相对于 UTC 绝对时间的各节点正序电压相角, 如图 1(a) 所示。再以系统中的主力发电厂或中枢变电站作为参考站, 各子站根据自身的相角和参考相角即可得到各子站相对于参考点的角

度, 此角度可用于子站的控制, 如发电机的调速、切机等等。

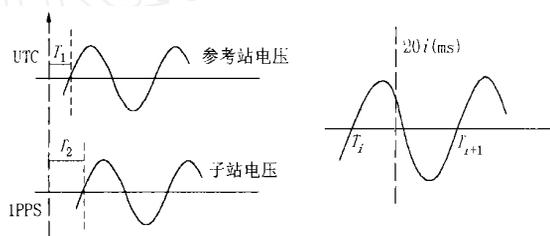


图 1 电压相角的过零测量法

图 1(a) 中, 对于 50Hz 的工频信号, 子站相对于参考站的电压相角差为:

$$= \frac{360^\circ}{20\text{ms}} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

若要提高相角测量的实时性, 在每一个周波内都能进行相位比较, 则需要以 GPS 的 1PPS 为基准, 在 CPU 内由精确晶振时钟建立标准 50Hz 的信号, 由 CPU 对电压的过零点时刻打上时间标签, 求出各节点电压相对于标准 50Hz 的相角差。如图 1(b) 所示, 第 k 个测量点时被测电压的过零时刻分别为 T_i 及 T_{i+1} , 那么在 T_i 时刻相对于标准 50Hz 信号过零时刻 $20i \text{ ms}$ 的角度为:

$$i^k = \frac{360^\circ}{T_{i+1} - T_i} (20i - T_i) \quad (2)$$

子站相对于参考站的角度可表示为:

$$i_0^k = i^k - i_0 \quad (3)$$

其中 k 表示第 k 个测量点, i_0 表示 T_i 时刻参考站相对于标准 $20i \text{ ms}$ 的角度。

要真正实现相角的每一个周波的实时监控, 就必须大大提高 RTU 的通信速率, 达到每 1 个周期传送一次数据, 这在实际工程中较难实施。另一种解决方法是采用专用的通信网络传送相角实时数据,

技术上可行,但工程代价较昂贵。

过零测量法原理简单,硬件软件上较易实现,但此方法假定系统频率是稳定不变的,而实际系统中电压频率是波动的。并且由于电压过零点的谐波影响和过零检测电路的不一致性也会造成测量误差。

2.2 离散 Fourier 算法

工频电压值可表示为:

$$x(t) = \sqrt{2}|x| \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$\text{用矢量表达: } \bar{x} = |x| e^{j\theta} = X_s + X_c \quad (5)$$

若一个周波被 N 点采样,采样值为:

$$x(k) = \sqrt{2}|x| \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k + \theta\right) \quad (6)$$

对于(5)式,由离散 Fourier 变换可得:

$$X_s = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \quad (7)$$

$$X_c = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k\right) \quad (8)$$

假设对 50Hz 的工频进行 24 点采样,采样角为 15° ,则(7)、(8)式可写为:

$$X_s = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=1}^{24} x(k) \sin(k \cdot 15^\circ) \quad (9)$$

$$X_c = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=1}^{24} x(k) \cos(k \cdot 15^\circ) \quad (10)$$

将(9)式分别乘以对称分量法中的算子 a 逆时针旋转 120° 及 a^2 顺时针旋转 120° ,其中 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$,可得:

$$X_{s1} = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=1}^{24} x(k) \sin(k - 8) 15^\circ \quad (11)$$

$${}^2 X_s = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=1}^{24} x(k) \sin(k + 8) 15^\circ \quad (12)$$

对于 X_c 也可作同样的处理,这里略去公式。

设正序电压相量表示为:

$$X_1 = X_{1s} + jX_{1c} = |X_1| e^{j\theta_1} \quad (13)$$

其中 X_{1s} 、 X_{1c} 可由对称分量法表示为:

$$X_{1s} = \frac{\sqrt{2}}{72} \sum_{k=1}^{24} [x_A(k) \cdot \sin k 15^\circ + x_B(k) \cdot \sin(k - 8) 15^\circ + x_C(k) \cdot \sin(k + 8) 15^\circ] \quad (14)$$

$$X_{1c} = \frac{\sqrt{2}}{72} \sum_{k=1}^{24} [x_A(k) \cdot \cos k 15^\circ + x_B(k) \cdot \cos(k - 8) 15^\circ + x_C(k) \cdot \cos(k + 8) 15^\circ] \quad (15)$$

其中 $x_A(k)$ 、 $x_B(k)$ 、 $x_C(k)$ 分别是 A、B、C 三相电压在一个周波内的采样值, $k=1$ 的采样值对应于 GPS 的 1PPS 脉冲上升沿。

2.3 递归 Fourier 算法

若需要每一个采样点都能实时地计算出电压相角,可采用如下的递归 Fourier 算法。对于式(4)表示的正弦工频信号,在实时测量中得到两个采样集:

$$\{X_k | k = r, \dots, N + r - 1\} \quad \text{对应基波相量 } X^r \quad (16)$$

$$\{X_{k+1} | k = r + 1, \dots, N + r\} \quad \text{对应基波相量 } X^{r+1} \quad (17)$$

其中 $X_k = \sqrt{2}|x| \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot k + \theta\right)$, N 为一个周波的采样点数, r 为测量中的任一时刻。式(16)、(17)的离散 Fourier 变换可分别表示为:

$$X^r = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=r}^{N+r-1} X_k e^{-jk} \quad (18)$$

$$X^{r+1} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=r}^{N+r-1} X_{k+1} e^{-jk} \quad (19)$$

其中 ω 为采样角, $\omega = \frac{2\pi}{N}$,则式(19)可变换为:

$$X^{r+1} = X^r + \frac{\sqrt{2}}{N} (X_{N+r} - X_r) e^{-jr} \quad (20)$$

式(20)即为电压相量 DFT 递归算法的迭代计算公式。

对于纯工频的电压信号,上述递归算法计算出的相量在复平面上是一个固定的量。利用 GPS 提供的精确时标,即能计算出不同地域同一时刻的相角差。

3 变采样率的相角测量算法

即使在稳定运行时,电力系统中的频率也是在小范围内波动的,因此一般交流采样中都采用同步采样技术,以防止 DFT 处理数据时带来的泄漏误差。同步采样是指工频周期 T 、采样间隔 T_s 、以及采样点数 N 严格满足 $T = NT_s$ 。目前软件同步的一般实现方法是:首先测量工频周期 T ,然后计算采样周期 T_s 并确定定时器的计数值,最后用定时中断方式实现同步采样。

设采样点数为 N ,理论计算得出的采样间隔为 t_b ,由定时器给出的采样间隔为:

$$T_s = T_D \cdot \text{INT}(T/NT_D) \quad (21)$$

式中 $\text{INT}()$ 为取整函数, T_D 为定时器的分辨率。由于 T_D 不可能无限小而存在截断误差:

$$= t_b - T_s \quad (22)$$

显然有 $t_b < T_D$,定义周期误差为一周波内实际总采样时间与工频周期 T 之差,对于单采样速率,

有:

$$T = T - NT_s = Nt_b - NT_s = N < NT_D \quad (23)$$

在高精度的测量场合, N 通常取得较大, 如 96 点采样甚至更高时, 同步误差可能累积达到一个比较大的数值, 从而影响测量的精度。

从式 (23) 可以看出, 减小同步采样误差的一种直观的方法是减小 T_D , 采用高性能的 CPU (如 TMS320F206), 其晶振频率可达 40M, 内部定时器的分辨率 T_D 为 25ns, 在大部分测量场合, 由周期误差造成的测量误差是在允许的精度范围之内。

减小同步采样误差的另一种方法是在一个周期内采用变采样速率, 如双速率采样, 令:

$$M = \text{INT}(T/T_D) \quad (24)$$

$$\text{可得: } T = T - MT_D < T_D \quad (25)$$

将 T 以 T_D 为间隔等分为 M 份加到 N 个采样点中的前 M 个, 即前 M 个点的采样间隔为 $T_s + T_D$, 后 $N - M$ 点的采样间隔为 T_s , 则周期误差将变为 T , 远小于前面单采样速率的时间误差 T 。该方法在一周期内采用两种间隔采样, 大大减小了由于实际采样时间小于工频周期 T 所造成的误差。

另外, 我们也可采用如下的变采样速率方法来减小同步误差, 对于式 (21) 中的取整函数, 设定计数器数值 $P = \text{INT}(T/NT_D)$, 截掉的小数部分为偏差, 显然在采样过程中, 随着采样点 i 的增大, 采样点偏离理想同步采样点的程度也不断加剧。因此要减小周期误差 T , 必须消除采样过程中偏差的累积效应。在具体的采样过程中, 可作如下处理:

在内存中设一单元 W 对偏差进行累加, 首次采样时, $W = 0$, 其后 $W = W +$, 若 $W < 1$, 则此次采样的定时器计数值取为 P ; 若 $W \geq 1$, 则计数值取为 $P + 1$, W 重新归零。在一个工频周期内重复上述过程, 可使偏差不产生累积, 保证在一个工频周期内的周期误差 $T < T_D$ 。此方法会使某几次的采样间隔增大一个 T_D , 但由于 T_D 一般很小, 由它引起的测量误差相对于周期误差 T 只是一个较小的值。

将变速率采样得到的数值用于上述的 DFT 算法中, 即可得到相对于 1PPS 的绝对相角。该方法也同样可用于谐波分析的 FFT 算法中。

4 同步相角测量装置的硬软件实现及实验仿真结果

相量测量装置 (PMU) 的基本硬件结构如图 2 所示。GPS 模块将精度在 $\pm 1\mu\text{s}$ 之内的 1PPS 脉冲信号

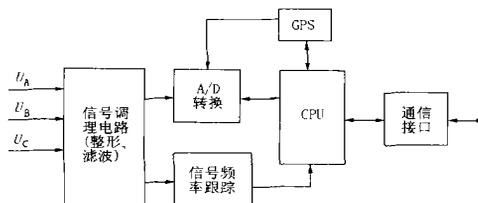


图 2 PMU 的硬件结构框图

和标准时间信号送入 CPU 单元和 A/D 转换器, 作为数据采集和相量计算的标准时间源。由 PT 耦合过来的三相电压 U_A 、 U_B 、 U_C 经过滤波整形, A/D 同步采样后送到 CPU 进行离散 Fourier 计算, 求出相对于 1PPS 的正序电压相位角。另一种方法是把滤波整形后的频率信号直接送入 CPU 模块, 利用过零测量法计算出相对于 1PPS 的相角。图中的信号频率跟踪电路用于测量系统的工频, 以实现算法的同步采样。

在实际的装置硬件设计中, CPU 采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F206, 采用 Xilinx 的可编程 CPLD 集成电路。软件设计采用 C 语言和汇编语言混合设计, 采用 DFT 算法, 以 GPS 的秒脉冲为采样基准, 便可得到全电网统一的相对于 GPS 秒脉冲的母线电压相角差。

表 1 对同一电源正序电压的 GPS 同步相角测量实验仿真结果

序号	GPS 时间 (时分秒)	测量相角° (装置 1)	测量相角° (装置 2)	两者绝对误差°
1	11:12:34	281.25	281.76	0.51
2	11:12:35	276.10	275.92	0.18
3	11:12:36	270.92	271.20	0.28
4	11:12:37	265.73	265.94	0.21
5	11:12:38	260.46	260.34	0.12
6	11:12:39	254.84	255.02	0.18
7	11:12:40	248.38	248.58	0.20
8	11:12:41	240.84	240.61	0.23

表 1 是 2001 年 3 月 6 日的实验结果, 两个实验装置对同一电源正序电压进行 GPS 同步相角测量的一组实验结果。从表中可以看出, 两个装置对同一电源的 GPS 秒脉冲的绝对相角误差在 1° 之内, 完全满足测量的精度要求。至于同一装置相邻两 GPS 秒间的相角偏移, 则是由于电源频率不是绝对的 50Hz 所造成的, 而系统要求的是两地 (各地) 母线正序电压的绝对相角差, 因此这种相角偏移不会对测量结果造成影响。

5 结束语

基于 GPS 的母线电压同步相角是电网运行中的一个重要参数,在电力系统中的许多领域如电力系统监测、电力状态估计、稳定预测控制、自适应继电保护中有着广阔的应用前景。本文的实验仿真结果表明算法正确且能满足精度要求,下一步的工作重点是广域实时数据通讯问题,这也是全电网实时数据采集并决策的一个前提条件。

参考文献:

- [1] Stewart E, Stanton et al. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances [J]. IEEE Transactions on PWRS, 1995, 10(1): 297-302.
- [2] Denys Ph, Counan C. et al. Measurement of Voltage Phase for the French Future Defense Plan Against Losses of Synchronism [J]. IEEE Transactions on PWRD, 1992, 7(1): 62-69.
- [3] Burnett R O, Butts M M et al. Synchronized Phasor Measurement of A Power System Event [J]. IEEE Transaction on

- PWRS, 1994, 9(3): 1643 - 1649.
- [4] IEEE Power Engineering Society. IEEE Standard for Synchronized Phasors for Power Systems, Sponsored by the Power System Relaying Committee [S].
- [5] 刘东, 单渊达. GPS 在电力系统稳定控制中的应用 [J]. 东南大学学报, 1997, (2): 67-71.
- [6] 卢志刚, 赫玉山, 等. 电力系统实时相角监控系统研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, (9): 17-19.
- [7] 闵勇, 丁仁杰, 等. 自适应调整采样率的相量在线测量算法研究 [J]. 电力系统自动化, 1998, (10): 10-13.
- [8] 周军, 李孝文, 等. 双速率同步采样法在电力系统谐波测量中的应用 [J]. 计量学报, 1999, (2): 151-155.

收稿日期: 2001-07-25

作者简介: 周捷(1969 -), 男, 工程师, 博士, 主要从事变电站综合自动化的科研开发和工程应用; 陈尧(1970 -), 男, 工程师, 硕士, 从事变电站自动化监控系统的开发和工程应用; 崔建中(1968 -), 男, 工程师, 从事变电站自动化保护测控的开发和工程应用。

Study and implementation of the algorithm for bus synchronized voltage phase angle measurement

ZHOU Jie, CHEN Yao, CUI Jian-zhong

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing, 210003, P. R. China)

Abstract: The technical methods are discussed in this paper for bus synchronized voltage phase angle measurement based on GPS absolute time in power system. The zero-crossover, DFT and recursive DFT algorithm methods are studied for voltage phase angle measurement. Variable sampling-rate measurement algorithms for synchronized phasor are also presented in the paper. By virtue of DSP chips, the design of hardware and software of GPS synchronized voltage phase angle instrument are realized based on DFT algorithm. The experiment simulation results are presented finally.

Keywords: synchronized voltage phase angle; GPS; zero-crossover measurement; DFT algorithm; variable-rate synchronized sampling; DSP chip

许继开关厂开关柜中标 970 万元

从许继通用电气销售公司再次传来喜讯:日前,继变压器公司在深圳地铁一期工程中标 1000 万之后,福建省三安钢铁有限公司也向许继开关厂签定了一笔价值 970 万元的开关柜合同。

为降低成本,保证质量,福建省三安钢铁有限公司今年对所需的 JYNI-35、KYN28-10 型的开关柜均采用公开招标。许继开关厂、天水长城开关厂、北京开关厂、厦门 ABB 公司等国内知名企业都参与了竞标。经过严格的资格评审、报价竞标等多项程序,许继开关厂在激烈的竞争中最终胜出。此次成功中标,表明开关厂的技术水平在不断增强,已初步具备与国内名牌企业竞争的实力。

据了解,本合同是开关厂迄今所接合同中金额最大的一笔。开关厂负责人表示将投入充足的人力、物力,确保按期供货。