

电网相量实时同步测量的一种新方法

江道灼¹, 孙伟华¹, 陈素素²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 浙江省玉环县供电局, 浙江省玉环县 317600)

摘要: 电网相量的异地实时同步测量, 对于电力系统状态估计、稳定控制、故障识别及继电保护等都具有重要意义。文中提出一种基于全球定位系统(GPS)与锁相技术的电网相量实时异地同步测量方法, 采用硬件逻辑电路产生既能自适应跟踪电网频率变化、又能实现异地同步的等间隔采样脉冲序列, 并由它启动 A/D 转换器自动完成对输入模拟信号的同步采样, 很好地解决了电网相量的异地同步测量问题并保证有较高的测量精度。

关键词: 电力系统同步相量测量; 异地同步采样; 全球定位系统; 锁相技术

中图分类号: TM933.313; TM73

0 引言

电网相量的实时异地同步测量, 对于电力系统状态估计、稳定控制、故障识别及继电保护等具有重要意义。实现相量参数的实时异地同步测量, 需考虑两个问题: ①频率同步, 即采样频率与被测信号频率同步; ②时间同步, 即异地被测信号的时间同步。

频率同步问题在离散化采样处理电网相量时一般有两种方法^[1]: 一种方法是准同步采样, 其特点是采样频率无须与被测信号频率成 n 倍频同步关系, 但需通过延长采样时间和增加周期采样点数, 并采用迭代算法来消除同步误差, 计算量大, 不适合动态信号的测量^[2,3]; 另一种方法是同步采样(含硬、软件同步), 其特点是采样频率与被测信号频率成 n 倍频的同步关系, 避免了准同步采样所存在的问题, 软件算法也较简单, 因而是目前交流信号数字化处理时较常用的离散化采样方法。

至于异地被测信号在时间上的同步采样问题, 传统的方法主要有主站广播对时法^[4]和基于通信信道的采样时间补偿法^[5,6]两种。全球定位系统(GPS)的民用化及其所具有的高精度同步授时等功能, 为异地同步测量提供了精确时钟。一般, GPS 接收器都设有误差在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内的 1 PPS(1 个脉冲每秒)脉冲输出, 某些型号(如 GSU-25)还设有与 1 PPS 脉冲精确同步的 10 kHz 脉冲输出。因此, 只要很好地利用 GPS 接收器的时钟脉冲和授时信息, 理论上讲应能很好地解决电网相量的异地同步测量问题。

在异地同步测量电网相量时, 必须解决上述频

率同步和时间同步的协调问题, 因为电网频率是一个随时间变化的变量。

本文提出的一种基于 GPS 与锁相技术相结合的电网相量异地同步测量方法, 能够自适应跟踪电网频率变化, 实现对电网相量的实时异地同步测量, 很好地解决了异地同步测量时频率同步和时间同步的协调问题, 并具有较高的精确度。

1 频率波动对 DFT 算法相量测量的影响

目前应用最多的电网相量离散化数据采样处理算法是离散傅里叶变换(DFT)算法, 其数学模型如下:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right) \quad (1)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

DFT 算法实际上是对采样信号 $x(n)$ 周期延拓后进行离散时间周期信号的傅里叶变换, 并取其频域的一个周期进行分析处理^[7]。因此, 要求采样信号与被测信号成 n 倍频严格同步, 使每一个采样数据窗都能反映被测信号的一个完整周期, 周期延拓后能够完整再现被测信号, 否则将导致周期被测信号始端和终端在相位上的不连续^[8], 出现频谱泄漏, 造成 DFT 算法误差。

由式(1)可推得, 当频率变化量 $\Delta f \rightarrow 0$ 时, DFT 算法是准确的。但被测相量基波及各次谐波的有效值与相角的误差将会随着 $|\Delta f|$ 的增大而增大, 这就意味着 DFT 算法的精度与频率变化量 Δf 有关^[9]。图 1 是利用 MATLAB 对不同频率($f=49 \text{ Hz} \sim 51 \text{ Hz}$)和初相角($\varphi = -180^\circ \sim 180^\circ$)的信号分别进行采样(采样频率 f_s 为 $16 \times 50 \text{ Hz}$), 并采用 DFT 算法获得的幅值、相角误差仿真结果。

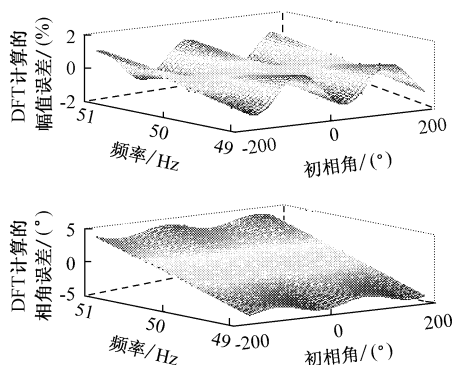


图1 采样频率不同步对DFT计算误差的影响
Fig. 1 Non-synchronous sampling effect on DFT result errors

由此可见,提高DFT算法精度的关键在于采样频率能够实时跟踪、锁定被测信号频率,并在满足香农定理前提下与其保持 n 倍频关系,以保证DFT算法的每一个采样数据窗都能反映被测信号的一个完整周期,周期延拓后能够完整再现被测信号。

2 GPS与锁相技术相结合的电网相量异地同步测量方法

2.1 基本原理

不管被测信号的频率如何变化,其每个完整周期都是 360° 电角度。如果把 360° 按每周期采样点数 M 等分,则不管被测信号的频率如何变化,只要每隔 $360^\circ/M$ 电角度采样1次,就能保证一个数据窗内的采样数据反映一个完整的周期,而且所有的采样点是等间隔的。这一思想可以方便地利用锁相环^[10]及计数器等芯片,构成采样频率自动跟踪被测信号频率变化的自适应等间隔同步采样电路加以实现。

在进行异地交流信号的同步测量时,还必须解决它们在时间上的同步采样问题。采用GPS与锁相技术相结合的方法,可以很好地解决这一问题:每个周期的第1个采样脉冲由GPS接收器输出的同步时间脉冲信号(1 PPS+10 kHz)提供,其余采样脉冲则根据采样频率(每个周期采样点数)通过对锁相环输出的、与被测交流信号基频成 n 倍频关系的锁相倍频脉冲信号分频后获得。

异地同步采样的时间(相位)误差,主要取决于GPS同步授时精度和锁相环的锁相精度。

2.2 硬件实现

图2为应用GPS和锁相技术实现的异地同步测量装置硬件结构原理框图,其中,自适应异地同步采样脉冲生成器电路由模拟信号叠加电路、隔直带通滤波器、整形电路、锁相倍频器(锁相环+1/N分

频器)、计数器、可重触发单稳态电路、与门电路以及GPS接收器等构成。

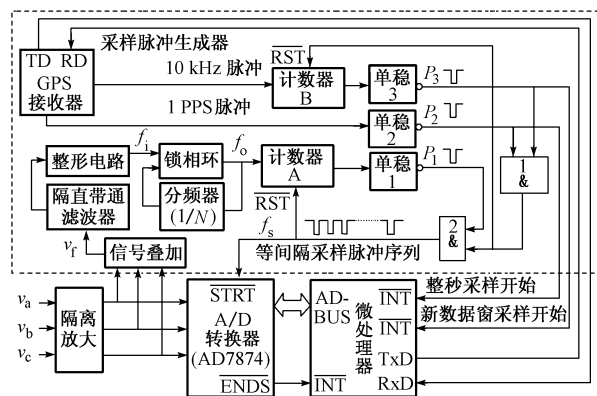


图2 自适应异地同步测量装置硬件结构
Fig. 2 Hardware structure frame of self-adaptive synchronous measurement unit

2.3 工作原理

2.3.1 信号叠加电路和隔直带通滤波器

隔离放大处理后的三相交流信号 v_a, v_b, v_c ,经过信号叠加电路后形成一个复合模拟信号 $v_f = (k_1 v_a + k_2 v_b - k_3 v_c)$,此信号经隔直带通滤波器滤除直流成分和谐波分量后,获得一对称的基波交流信号并送往整形电路进一步处理。显然,只要 v_a, v_b, v_c 中有一相存在, v_f 就一定存在,从而保证锁相环工作正常,这就是信号叠加的目的。

2.3.2 整形电路

正确检来自隔直带通滤波器的基波交流信号的正负过零点位置并形成具有足够陡度和宽度的脉冲信号(频率为 f_i),若设被测交流信号基波频率为 f_x ,则显然有 $f_i = 2f_x$,即整形电路不但检出被测信号基波分量的过零点,而且实现了信号倍频。采用锁相前的预倍频,有利于进一步提高锁相环跟踪系统基波频率的变化速度和锁相精度。

2.3.3 锁相倍频器

锁相倍频器由锁相环和1/N分频器构成,实现对输入信号(频率为 f_i)的 N 倍频并输出倍频信号(频率为 f_o),即: $f_o = Nf_i = 2Nf_x$ 。由于锁相倍频器能够保证输出信号频率 f_o “跟踪锁定”在输入信号频率 f_i 上,并与其成线性倍频关系,换句话说,在一个固定周期内,输出信号脉冲个数总是输入信号脉冲个数的 N 倍,并保持固定不变,因此,每一个 f_o 脉冲都代表一个固定的电角度。

2.3.4 异地同步采样

可预置数计数器A按照预先设定的采样频率计数值,对锁相环输出的 f_o 脉冲进行分频计数,当计数到预置计数值时,即输出1个脉冲,并经可重触

发单稳态电路(单稳 1)后,获得自动跟踪被测信号基频变化的等间隔采样脉冲序列信号 P_1 (负脉冲),用以实现对被测信号的频率同步采样。

GPS 接收器提供两路与 UTC 时钟同步的标准脉冲信号:一路是 1 PPS 脉冲信号;另一路是与 1 PPS 脉冲信号同步的 10 kHz (或其他 n kHz) 脉冲信号。1 PPS 脉冲信号经单稳 2 后形成“整秒同步”采样脉冲信号 P_2 (负脉冲);10 kHz 脉冲信号经计数器 B (其构成及工作原理同计数器 A) 分频计数 (计数值可根据周期采样数据窗大小预置) 和单稳 3 后,形成“周期数据窗同步”采样脉冲信号 P_3 (负脉冲)。 P_2, P_3 这两个异地时间同步采样脉冲信号同时分别送往微处理器的中断口线 $\overline{\text{INT1}}$ 和 $\overline{\text{INT2}}$,以请求其响应中断并分别记录“整秒同步”和“周期数据窗同步”采样开始时刻。

与门 1 对 P_2 和 P_3 两个采样脉冲进行合成,其输出送往与门 2 继续与 P_1 合成处理,同时,复归计数器 B 使其重载预置值并重新开始计数;与门 2 输出的采样脉冲序列 ($P_1 \sim P_3$ 的合成),一方面启动 A/D 转换器开始 A/D 转换,另一方面同时自动复归计数器 A 使其重载预置值并重新开始计数。显然, $P_1 \sim P_3$ 这 3 个采样脉冲的优先级为: P_2 高于 P_3 高于 P_1 ,即秒同步采样级别最高,周期数据窗同步次之,频率同步最低。因此,这种频率自适应异地同步采样电路保证了异地时间同步前提下的频率自适应同步采样。

2.4 试验结果分析

我们已成功研制出基于 GPS 和锁相环技术的电网相角异地同步测量单元 (PMU),并在动模实验室进行了 GPS 同步授时脉冲同时性测试 (实测平均同步误差不大于 300 ns,最大同步误差不大于 500 ns,限于篇幅,文中省略试验录波图)、PMU 静态及动态测量精度等大量的实验验证。

PMU 动模试验一次系统接线如图 3 所示。试验时采用的仪器仪表有: TDS-210 型 60 MHz 双踪数字示波器 2 台 (最高采样频率为 10^6 次/s); HP 公司 6 位半万用数字表 1 台 (测频用); 监视用的数字万用表、电压表、电流表等。

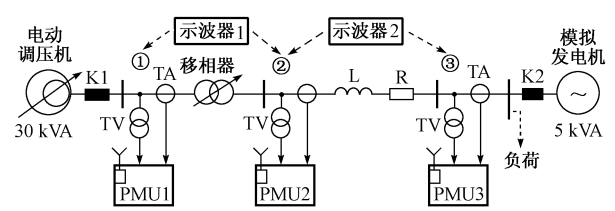


图 3 PMU 装置模拟试验系统接线示意图
Fig. 3 PMU analog testing system sketch map

试验时, PMU 装置采样来自图 3 中 ①, ②, ③ 点的模拟信号; 移相器用于随意调节 ① 与 ② 两点间的相位差 (② 与 ③ 两点间的相位差固定); 进行 PMU 静态相角测量误差试验时, 由 30 kVA 电动调压机供电 (模拟无穷大电源); 进行 PMU 动态 (即变频率情况下) 相角测量误差试验时, 由 5 kVA 模拟发电机供电。

2.4.1 静态异点相角检测试验

试验目的是检验 3 台 PMU 装置检测不同地点电压相角差时的精度 (与示波器结果比较)。

试验方法是: 3 台 PMU 分别从图 3 中的 ①, ②, ③ 点采样模拟信号, 同时用示波器分别监视 ① 与 ② 点之间以及 ② 与 ③ 点之间的 a 相电压相位差 (分别为: $\varphi_{a①-②} \approx 132.5^\circ, \varphi_{a②-③} \approx 23.5^\circ$); 被测模拟信号来自 30 kVA 电动调压机, 频率 $f = 50$ Hz, 模拟发电机退出 (K2 断开)。

静态试验结果如表 1 和表 2 所示。与示波器监视值 $\varphi_{a①-②} = 132.5^\circ, \varphi_{a②-③} = 23.5^\circ$ 比较, 误差不超过 $\pm 0.5^\circ$, 可见 PMU 测量结果满足精度要求。

表 1 静态异点三相信号相角实测值
Table 1 Static phase real measuring value of different site three phase signal

同步测量时间	PMU1 装置(①)			PMU2 装置(②)			PMU3 装置(③)		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
00:25:01.000	282.65	163.32	43.53	150.35	31.11	270.69	126.60	7.93	247.61
00:25:01.066	29.82	270.50	150.05	257.22	137.90	17.50	233.73	114.75	354.13
00:25:01.132	136.70	17.62	256.50	4.02	245.06	124.40	340.67	221.65	100.76
00:25:01.198	243.35	123.98	3.60	110.91	351.66	231.05	87.44	327.83	207.46
00:25:01.264	349.99	230.93	110.60	217.81	98.25	337.78	193.68	74.68	314.33
00:25:01.330	96.98	337.75	217.54	324.60	205.42	84.92	300.91	181.44	61.35
00:25:01.396	203.97	85.15	323.66	71.63	312.53	191.53	48.11	288.58	167.55
00:25:01.462	310.56	191.26	71.13	178.22	59.04	298.18	154.29	34.94	274.72
00:25:01.528	57.28	298.21	178.03	285.10	165.61	45.42	261.21	141.85	21.92
00:25:01.594	164.17	45.14	284.59	32.02	272.66	152.06	8.21	248.71	128.18

表 2 静态异点三相信号相差实测值
Table 2 Static phase contrast measuring value of different site three phase signal

同步测量时间	①与②之间的相角			②与③之间的相角		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
	(°)					
00:25:01.000	132.30	132.21	132.84	23.75	23.18	23.08
00:25:01.066	132.60	132.60	132.55	23.49	23.15	23.37
00:25:01.132	132.68	132.56	132.10	23.35	23.41	23.64
00:25:01.198	132.44	132.32	132.55	23.47	23.83	23.59
00:25:01.264	132.18	132.68	132.82	24.13	23.57	23.45
00:25:01.330	132.38	132.33	132.62	23.69	23.98	23.57
00:25:01.396	132.34	132.62	132.13	23.52	23.95	23.98
00:25:01.462	132.34	132.22	132.95	23.93	24.10	23.46
00:25:01.528	132.18	132.60	132.61	23.89	23.76	23.50
00:25:01.594	132.15	132.48	132.53	23.81	23.95	23.88
平均值	132.36	132.46	132.57	23.70	23.69	23.55

表 3 动态同点三相信号相角实测值
Table 3 Dynamic phase real measuring value of same site three phase signal

同步测量时间	PMU1			PMU2			PMU3		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
	(°)								
00:02:00.000	282.56	163.43	41.05	282.17	163.39	40.83	282.23	163.33	41.16
00:02:00.066	30.13	270.00	148.54	30.26	271.79	148.35	29.95	270.00	148.81
00:02:00.132	137.52	18.43	255.92	137.50	18.39	255.87	137.35	18.39	256.63
00:02:00.198	245.16	125.83	3.64	245.29	125.61	3.19	245.19	125.83	3.57
00:02:00.264	352.69	233.65	110.80	352.88	233.58	110.92	352.66	233.65	111.58
00:02:00.330	99.90	341.08	218.75	99.98	340.90	218.45	99.98	340.93	218.92
00:02:00.396	207.83	90.00	326.23	207.68	90.00	325.91	207.73	90.00	326.29
00:02:00.462	315.38	196.19	74.24	315.32	196.20	73.53	315.18	196.04	74.29
00:02:00.528	63.17	303.49	181.37	63.23	303.92	181.29	62.65	303.54	181.61
00:02:00.594	170.39	51.51	288.51	170.33	51.31	288.78	170.60	51.62	289.04

3 异地同步采样装置的改进

上述硬件实现电路中,周期数据窗同步脉冲的间隔一旦设定(如 20 ms)就不可改变,因此,为保证每个周期数据窗都能按要求采足所需的点数,对系统频率的下限有一个最小要求(见表 4)。当系统频率过低时,将导致周期采样点数不足,从而严重影响同步测量的精度。

表 4 20 ms 数据窗时周期采样点与最低系统频率关系
Table 4 Relation between cycle sampling number and lowest system frequency under 20 ms data window

每个周期采样点数	允许最低频率/Hz
16	46.875
32	48.437
64	49.218
128	49.619

考虑到系统频率通常是一种慢速蠕变过程,因此,可以考虑采用软件控制周期数据窗同步脉冲间隔的办法解决上述因固定周期数据窗同步脉冲间隔

2.4.2 动态同点相角检测误差试验

a. 试验目的

检验 PMU 装置在系统频率变化情况下的电压相角检测精度(3 台同点互校)。

b. 试验方法

3 台 PMU 从同一点(图 3 中③点)采样模拟信号,被测模拟信号由模拟发电机提供,30 kVA 电动调压机退出(K1 断开)。

动态试验结果如表 3 所示(频率在 46.08 Hz~46.31 Hz 范围内变化)。

从表 3 中可以看出,3 台 PMU 在同一时刻测得的各相的相角实时值基本相同,偏差也不超出±0.5°。

情况下所存在的问题,此时图 3 硬件电路中的“周期数据窗同步”脉冲形成电路也要做相应的改进,如图 4 所示。

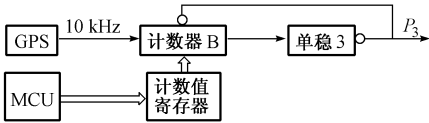


图 4 周期数据窗同步采样电路的改进
Fig. 4 Improvement of cycle data window synchronous sampling circuit

改进后,周期数据窗同步采样脉冲的间隔不是固定不变,而是由微处理器根据所监测到的被测信号基波频率偏移量是否超过设定值(例如±1 Hz, ±2 Hz, …)进行动态修改,一旦发现其偏移值超过设定范围,则立即计算出新的周期数据窗同步脉冲间隔的分频计数值并写入计数值寄存器。这样,当每次输出周期数据窗同步脉冲并重装载时,就会自动用新的计数值刷新计数器 B 的计数值,从而实现

周期数据窗同步脉冲间隔的自适应调整。

4 结语

采用 GPS 与锁相环技术结合,可以较好地解决异地被测交流信号在频率小范围蠕变情况下的实时同步测量,并具有较高的异地同步测量精度(相角同步测量误差平均为 0.5° 电角度),可以为系统潮流计算、状态估计、安全稳定监控等提供可靠的数据源。这种采用硬件实现的交流信号异地同步采样技术已经申请国家发明专利,并已成功地应用于开发研制的电力系统相角测量单元(PMU)及其他测控装置中,所研制的 PMU 目前已在广东省 500 kV 电网中挂网试运行。

参考文献

- 1 Ma Hongzhong, Hu Qiansheng. Analysis and Simulation of Errors in Software Synchronous Sampling in Periodic-signal Measurement. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2000, 16(1): 57~63
- 2 戴先中(Dai Xianzhong). 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用(Quasi-synchronous Sampling and It's Application in Non-sine Power Measurement). *仪器仪表学报(Chinese Journal of Scientific Instrument)*, 1984, 5(4)
- 3 Turgel R S. Digital Wattmeter Using Sampling Method. *IEEE Trans on Instrument & Measurement*, 1974, 23(4)
- 4 Phadke A G, Pickett B, Begovic M, et al. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1994, 9(1)
- 5 高厚磊,江世芳,贺家李(Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali). 数字电流差动保护中几种采样同步方法(Sampling Synchronization Methods in Digital Current Differential

- Protection). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1996, 20(9): 46~53
- 6 许建得,陆以群(Xu Jiande, Lu Yiqun). 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式(A New Scheme of Sampling Synchronization & Communication for Digital Current Differential Relay). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1993, 17(4): 23~26
- 7 胡广书(Hu Guangshu). 数字信号处理——理论、算法与实现(Digital Signal Processing—Theory, Algorithm and Realization). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1997
- 8 马仁政,陈明凯(Ma Renzheng, Chen Mingkai). 减少频谱泄漏的一种自适应采样算法(An Adaptive Sampling Algorithm for Reducing Spectrum Leakage). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 2002, 26(7): 55~58
- 9 江道灼,马进,章鑫杰(Jiang Daozhuo, Ma Jin, Zhang Xinjie). 锁相环在电力系统现场测控装置中的应用(The Application of Phase Locked Loop in the Data Acquisition and Control Apparatus of Power System). *继电器(Relay)*, 2000, 28(8): 43~45, 52
- 10 郝鸿安(Hao Hong'an). 常用模拟集成电路手册(Common Use Analog IC Circuit Manual). 北京:人民邮电出版社(Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House), 1991

江道灼(1960—),男,教授,主要从事 HVDC 微机控制、FACTS 及其应用、配电网自动化等方面的科研工作。
E-mail: jiang_dz@hotmail.com

孙伟华(1977—),女,硕士研究生,研究方向为配电网自动化系统。

陈素素(1962—),女, MBA, 经济师,主要从事电力系统生产管理工作。

A NEW METHOD OF REAL TIME AND SYNCHRONOUS MEASUREMENT ON POWER NETWORK PHASE PARAMETERS

Jiang Daozhuo¹, Sun Weihua¹, Chen Susu²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. Yuhuan Power Supply Bureau of Zhejiang Province, Yuhuan 317600, China)

Abstract: Real-time and synchronous measurement of power network phase parameters at different site is very important to system state estimation, stability control, fault identification and relay protection etc. A new measurement method based on global position system (GPS) and phase locked loop (PLL) technique is discussed. An equal phase interval sampling pulse sequence which formed by the hardware logic circuit is used to self-adaptively follow system frequency variance, and makes the different site synchronous sampling achievable. These sampling pulses start up A/D converter to complete the synchronous sampling of input analog signal automatically. It effectively solves the problem of how to measure different site power system phase parameters with high precision synchronously.

Key words: synchronized phasor measurement of electric power systems; different site synchronous measurement; GPS; phase locked loop(PLL)