

基于 GPS 的高精度功角实时测量系统

赵新红¹, 夏春燕², 孙明宇¹, 袁 洪³

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2 南京工业大学江浦校区, 江苏 南京 211800
3. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003)

[摘要] 功角的高精度实时测量是电网动态安全稳定监控系统中的关键技术. 传统的发电机功角测量方法不能满足实时要求, 为此, 提出利用发电机自有的转速信号并基于 GPS 实时测量功角的新方法, 给出了分布式相量测量单元的原理结构和实现模式. 实测数据表明该方法可以实现各相量之间的同步, 从而保证了实测相角的同步, 具有一定的理论和实用价值.

[关键词] GPS, 发电机功角, 分布式相量测量系统

[中图分类号] TM 764 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2007) 03-0013-04

High Precision Real Time Measuring System of Power Torque Angle

Zhao Xinhong¹, Xia Chunyan², Sun Mingyu¹, Yuan Hong³

(1. School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China
2. The New Campus Nanjing University of Technology, Nanjing 211800, China
3. Guodian Nanjing Automation Co. Ltd. Nanjing 210003, China)

Abstract Real time measuring of power phase angle with high precision is a key technique for the monitoring and controlling system of dynamic safety and stabilization of electric power systems. Traditional measuring method of power phase angle of a generator can't meet the real time requirements, therefore a new method utilizing the rotating speed of the generator based on GPS has been proposed. The principle and realization mode of the distributed measuring unit is described. Experimental result proved that synchronization between each vector can be realized by this method and the synchronization of real measured phase angle is assured. The method has theoretical and practical value.

Key words GPS, power torque angle, distributed phasor measuring system

0 引言

在新的电力市场环境下, 电网迫切需求快速的、在线的动态安全稳定监视和控制系统. 相角是反映系统稳定性的最主要的状态量, 由于相角无法直接测量, 给电力系统的计算和控制带来了很多困难. 通过潮流、解非线性方程组进行反算相角, 计算时间较长, 满足不了实时的要求^[1]. 卫星技术、计算机技术和通信技术的发展为相角测量提供了成熟的基础, 尤其是 GPS 全面民用化以来, 就以其定时精度高、性价比高和可靠性高, 在电力系统中得到了广泛的应用.

本文在研究发电机功角传统测量方法的基础上, 提出了基于 GPS 实时测量功角的新方法^[2], 给出了分布式相量测量单元的原理结构和实现模式, 实验结果表明该方法能有效测量转子位置和发电机功角.

1 GPS 在相量测量中的作用

全球定位系统 (GPS) 是美国于 1993 年全面建成并运行的新一代卫星导航、定位和授时系统. GPS 的工作频率大约为 1.5 GHz, 以载码的形式向地面发射信号. 目前, GPS 已被广泛应用于电力系统的相量测量、系统故障定位、故障录波和继电保护等领域^[3].

在相量测量中, 主要是利用 GPS 高精度全球统一的时标给信号加上一个绝对时标. GPS 地面装置接收由 GPS 卫星同步到全球统一时间 (UTC) 的 1 pps (每秒钟脉冲数) 脉冲信号, 这个信号可以被分频成更

收稿日期: 2006-11-18

作者简介: 赵新红 (1973-), 女, 讲师, 主要从事电力系统安全稳定控制方面的教学与研究. E-mail: zhaoxinhong@njnu.edu.cn

小的时钟信号, 用来作为采样的触发信号. GPS 的秒脉冲信号的误差在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 以内. 这样, 对于电力系统所使用的 50Hz 工频信号, 相位误差在 0.018° 以内, 能够满足分析的精度要求. GPS 时标的应用一方面保证了进行比较的信号是在同一时刻采集得到的, 另一方面将所有的电压信号放在同一个绝对时间轴上. 由于分散于各地的 PMU 所采集的都是带有 GPS 时标的相量值, 在调度端服务器上统一到相同的 GPS 时标^[4], 就可以实现各相量之间的同步, 从而保证了实测相角的同步性.

2 发电机功角测量原理

在现代电力系统中, 无论是汽轮发电机组还是水轮发电机组, 都装有测速装置—转速表^[5]. 该装置的构成是: 在发电机的轴上安装一个 60 个齿的齿轮, 这 60 个齿大小完全一样, 均匀分布在圆盘上, 每一个齿在发电机转轴上都代表一固定的机械位置, 转速表的测量电路负责检测齿轮所发出的脉冲, 每 60 个脉冲代表转子旋转一周, 转子的瞬时速度可以表示为:

$$\omega_r(t) = 2\pi/60T_0$$

(1)

式中, T_0 为两个相邻脉冲的时间间隔.

在确定转子转速后, 转子位置可由下式确定:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_0$$

(2)

式中, $\omega_r(t)$ 由转速表测量. 当转子的初始时刻位置 θ_0 确定后, 就可以准确地确定转子在任意时刻的位置 $\theta(t)$. 该式能通用于电力系统的任意状态, 并且也通用于汽轮发电机组和水轮发电机组.

在稳态情况下, 利用发电机出口端的电压相量、电流相量以及发电机有关参数计算发电机的空载电势 E_0 . 进一步可以得到 E_0 与 U 的相位差, 即发电机的实时功角 $\delta^{[6]}$:

$$\delta = \arccot \frac{R E_0}{\text{Im} E_0} - \arccot \frac{R U}{\text{Im} U}$$

(3)

为便于计算, 选择发电机出口端 A 相电压正向过零时刻 T_0 为测量点, 如图 1 所示, 此时 A 相电压 U_A 相角为 $\pi/2$ 当空载电势 E_0 的相位角为 θ_1 , 则功角为 δ

$$\delta = \theta_1 - \pi/2$$

(4)

取 A 绕组中心线的位置为转子 d 轴的零点, 则在 T_0 时刻, 转子的位置为 $\theta_0 = \theta_1$.

于是, 任意时刻转子的位置 $\theta(t)$ 及发电机功角 $\delta(t)$ 为:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_0 = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_1$$

(5)

$$\delta(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_1 - \phi(t)$$

(6)

式中, $\phi(t)$ 为发电机出口端电压实测相位角.

取 $\phi(t) = \pi/2$ 即检测时刻为电压过零时刻, 式 (6) 可简化为:

$$\delta(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_1 - \pi/2$$

(7)

3 厂站端相量测量系统

3.1 相量测量装置

相角测量装置^[7]采用多微处理器技术, 由 3 片 8 位单片机 DS80C32Q 2 片 4 k 字节的双口 RAM IDT7134, 2 片 14 位高速 A/D 转接口 MAX125 以及相应的信号处理电路组成. 显示采用 128×64 点阵液晶, 在其上开发具有汉字和图形显示功能, 可分别显示 GPS 日期和时间、系统频率、三相电压电流的有效值及发电机转速. 装置的结构原理如图 2 所示. 装置输入 6 路模拟量和 1 路脉冲量, 其中 6 路模拟量分别为 3 路电压量和 3 路电流, 脉冲量为转速信号的分频信号; 模拟量经过变换电路后得到反映电量有效值大小的直流电压, 此直流信号经过 A/D 变换为数字量, 再由 CPU 读取 A/D 转换的结果, 两个测量 CPU 把测量的结果通过双口 RAM 传给通信 CPU.

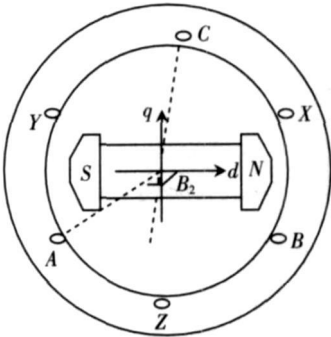


图 1 T_0 时刻的转子图
Fig.1 Rotor's position at T_0

转速脉冲的分频信号直接接到通信 CPU 的中断口,通过中断程序记下中断时刻的时标,并且由通信 CPU 计算相角.通信 CPU 把计算所得的相角、电压电流相量及时标信息通过通信模块发送到调度中心.

系统中,两个测量模块接受 GPS 的秒脉冲 (pps)同步信号,通信模块接受 GPS 的串行时间信息和秒脉冲同步信息.

装置测量时,通过 GPS 同步秒脉冲 (1pps),对三相电压、电流、转速信号的过零点进行同步实时采样^[8],可获取各相电压、电流过零时刻的有效值及过零点对本次 GPS 秒脉冲的前沿时间,经 RS-422 接口以 115.2 kbps 的传输速率向上位机高速传送,再由上位机计算出功角.

3.2 分布式相量测量系统 (DPMS)

各厂、站端的 PMU 等实时信息在快速发送到调度中心集中处理的同时,就地须进行适当的处理,如图形化地显示本地设备的运行状况,并具有数据的记录、打印等功能,供调度运行人员查询及相关应用部门调用.

为了实现 PMU 数据的就地处理和应用的扩展,采用了上下位机的结构.下位机与上位机之间数据通信的模式除了必须保证快速、可靠的要求之外,还必须适应光纤化、网络化的发展趋势,即在上级调度与厂站之间传输的实时数据必须采用 TCP/IP 协议与电力系统的其他信息一起在电力数据专用网络上传输^[9].为了实现上述目的,本文在 PMS 研制的基础上,进一步研究分布式相量测量系统 (DPMS),该系统可将分布于各个机组电气间隔的数据采集和处理单元通过通信网络连接成一个有机的整体,共同完成 PMU 采集信息的传送.

分布式相量测量系统中, PMS 通信方式选用以太网,以 TCP/IP 为传输协议,拓扑结构为总线形式.随着以太网速度的提高,从最初的 10Mbps 发展到 100Mbps 足够的带宽使以太网实时性得到了很大的提高^[10].加之交换机以太网,使接入网络的节点各自独占一条线路,彻底解决了速度的问题.

厂站分布式 PMS 结构如图 3 所示,其中采集单元数据加装协议转换器 (RS422 转 TCP/IP) 可直接上网.

4 测试研究

应用本系统对河南某电厂 #1 机组进行了测量,测量数据与计算结果如表 1 所示.由表可见:

表 1 #1 机组 PMS 测量与计算结果

Table 1 Measurement and computation results of #1 generator's PMS

时分秒	A 相过零时间	转速脉冲时间	A 相过零时间与转速脉冲之差		转速齿与 d 轴	实测功角	计算功角
	/μs	/μs	时间差 /μs	角度差 δ/DEG	夹角 δ ₀ /DEG	δ-δ ₀ /DEG	/DEG
15 7 31	59 174	74 798	15 624	281.23	255.05		26.18
	79 179	94 808	15 629	281.32		26.27	26.14
	99 186	114 812	15 626	281.27		26.22	26.18
15 7 36	200 055	215 699	15 644	281.59		26.54	25.82
	220 059	235 703	15 644	281.59		26.54	25.86
	240 064	255 707	15 643	281.59		26.54	25.86
	860 174	875 807	15 633	281.40		26.35	26.24
	880 175	895 805	15 630	281.34		26.29	26.28
15 11: 5	401 734	417 383	15 649	281.68		26.63	25.67
15 11: 6	521 379	537 018	15 649	281.68		26.63	26.10

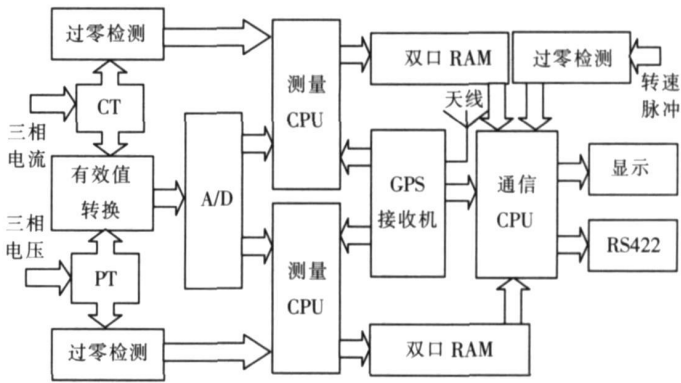


图 2 相角测量装置结构
Fig.2 Structure of PMU

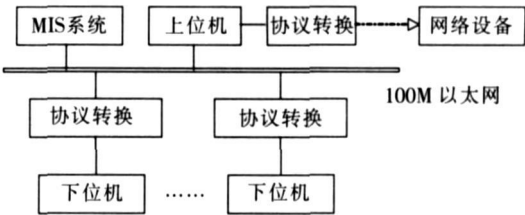


图 3 厂站分布式 PMS 系统原理图
Fig.3 Schematic of PMS

(1) 实测功角的最大波动幅度为 0.36, 计算功角的最大波动幅度为 0.61, 实验测量结果与理论计算相符, 可达到工程要求。

(2) 由于频率的波动, 造成相邻时刻的功角产生偏移, 但本系统测量的是各地功角的绝对相角差, 因此这种偏移不会影响测量结果。

5 结束语

本文从工程应用角度提出了利用转速表实时测量发电机功角的新方法, 针对厂站端 PMU 的应用要求, 给出了项目中所设计的基于以太网技术的分布式相量测量系统模型。

实测数据表明, 所提出方法能有效测量发电机功角, 并具有以下优点:

- (1) 避免了在发电机内部安装探测元件, 降低了方法的工程施工难度;
- (2) 不需要在发电机每次大修或因意外事故停机后对初始功角进行校正;
- (3) 测量设备可以在发电机运行过程中进行实时测试。

[参考文献] (References)

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurement in power systems [J]. IEEE Computer Application in Power Systems, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] 严登俊, 鞠平, 吴峰, 等. 基于 GPS 时钟信号的发电机功角实时测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 38-40.
Yan Dengjun, Ju Ping, Wu Feng, et al. Real-time power angle measurement of a synchronous generator based on GPS clock signal and tachometer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 38-40 (in Chinese).
- [3] 时伯年, 崔文进, 吴京涛, 等. 基于 GPS 同步相量的电力系统暂态稳定预测控制 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(3): 316-320.
Shi Bonian, Cui Wenjin, Wu Jingtao, et al. Power systems transient stability control based on synchronous phasor measurements [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2002, 42(3): 316-320 (in Chinese).
- [4] 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术、智能技术、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 Yingduo, Wang Zhonghong, Lin Kongxin, 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: Science and Technology Edition, 1997, 37(7): 1-6 (in Chinese).
- [5] 郭炳庆, 孙元章, 卢强. 电力系统稳定性分析与控制实时仿真决策系统 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 6-10.
Guo Bingqing, Sun Yuanzhang, Lu Qiang. Real-time simulation and decision making system for stability analysis and control of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(18): 6-10 (in Chinese).
- [6] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统实时相角监控系统研究 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 17-19.
Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, et al. Research of the phase angle monitoring control system in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 17-19 (in Chinese).
- [7] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 基于 PMU 的电力系统暂态稳定实时快速预测的研究 [J]. 继电器, 2000(1): 3-5.
Lu Zhilai, Zhang Baohui, Ha Hengxu. Real-time transient stability prediction for multi-machine power system based on phasor measurement units [J]. Relay, 2000(1): 3-5 (in Chinese).
- [8] 袁萍生. 新型发电机功角测量装置的设计 [J]. 广东电力, 1997(3): 43-45.
Yuan Pingsheng. The design of generator power angle measuring device [J]. Guangdong Electric Power, 1997(3): 43-45 (in Chinese).
- [9] 聂志伟, 陆于平. 网络化数字保护信息通信设计 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 45-48.
Nei Zhivei, Lu Yuping. Design on internet based information management system for digital protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 45-48 (in Chinese).
- [10] 刘志超, 丁建明, 任锦兴, 等. 基于以太网的分布式发电厂电气监控系统实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 24(8): 16-20.
Liu Zhichao, Ding Jianming, Ren Jinxing, et al. Realization of a distributed electrical control system based on ethernet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 24(8): 16-20 (in Chinese).

[责任编辑: 严海琳]