

# 基于 GPS 同步时钟的相量测量在电力系统中的应用研究

傅周兴<sup>1</sup>, 郭颖娜<sup>1</sup>, 何文林<sup>2</sup>

(1. 西安科技学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 介绍了基于 GPS 同步时钟的相量测量原理, 并着重论述了其在电力系统电网状态监测与确定、暂态稳定性预测和控制、自适应失步预测、非线性励磁控制、输电线路故障精确定位等诸方面的应用研究。

**关键词:** GPS; 电力系统; 相量测量; 控制; 保护

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2001)07-0031-04

## 1 引言

全球卫星定位系统(GPS—Global position system)具有高精度, 全天候, 全球覆盖, 连续实时等诸多优点, 已渗透到各应用领域, 且已取得了明显的经济效益和社会效益<sup>[1]</sup>。基于 GPS 高精度授时的同步采样技术在电力系统中的应用, 使全网相量同步测量成为可能。本文介绍了基于 GPS 同步时钟的相量测量单元(PMU—Phasor Measurement unit)原理, 并着重论述了相量测量在电网状态监测与确定、暂态稳定性预测和控制、自适应失步保护、系统非线性励磁控制、输电线路故障定位等方面的应用研究。

## 2 基于 GPS 同步时钟的向量测量原理

基于 GPS 高精度授时的同步采样技术已在电力系统得到应用, 而人们最感兴趣的是将它应用于相量测量。相量测量就是在同步采样下直接测量电网中的各母线或节点的电压幅值和相位(通常是正序值)。相量测量中的关键是相角测量, 图 1 中由于时间参考点不同,  $\dot{u}$  和  $\dot{u}'$  的相角也不等。参考点时间误差 1ms 会带来工频相角误差  $18^\circ$ , 测量误差若要求 0.1 的话, 那么时间同步精度应为  $5\mu\text{s}$ , 事实上, 在电力系统中只有当同步精度高于  $40\mu\text{s}$ , 相量测量才

有意义<sup>[2]</sup>。GPS 的精确授时很好地解决了测量的同步问题。

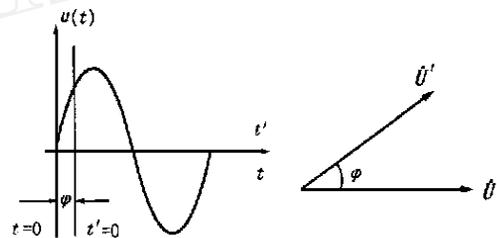


图 1 相量的测量

相量测量可以采用过零检测法、快速傅里叶变换法(FFT)和离散傅里叶变换法(DFT)等, 其 DFT 测量相位方法如下<sup>[3]</sup>:

设采样序列为  $(x_0, x_1, \dots, x_N)$ , 那末其基波频域值为

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^N x_k e^{-j2k/N} \quad (1)$$

由此得到各相向量  $(\dot{X}_a, \dot{X}_b, \dot{X}_c)$ , 其正序相量为:

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{3} (\dot{X}_a + \dot{X}_b + j^2 \dot{X}_c) = e^{j2P/3} \quad (2)$$

相量大小取决于  $t=0$  的时刻, 也就是时间参考点的时刻。

及其自动化方面的教学与科研工作; 王为(1941-), 男, 教授, 长期从事电力系统及其自动化方面的教学与科研工作;

毛明平(1977-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化方面的研究工作。

## A new implementation scheme of integrated automation for substation

ZHANG Ming-ru, WANG Wei, MAO Ming-ping

(Tongji University, Shanghai 200331, China)

**Abstract:** In connection with a particular integrated automation system for a 35kV substation in Anhui, China, an implementation scheme of integrated automation for substation is introduced which is based on the Windows NT and object-oriented configuration software FIX32 and is fitted with the product from SEL of America. The acquisition program of substation - in impulse power quantity is discussed as well as the configuration mode of FIX32 with the protections from SEL company and EPM420 intelligent instrument.

**Key words:** substation; integrated automation; supervision and control; configuration

基于 GPS 同步时钟的相量测量单元由三部分构成:即接收天线、GPS 接收器以及数据处理单元。图 2 为相量测量装置原理图。GPS 接收器可选用适合于电力系统要求的接收器,如美国 Ma—Crodyne 公司生产的 1698STV 型、或采用国产的 T—GPS 系列同步时钟,如 F—GPS20 时间精度达  $0.1\mu\text{s}$ ,具有多路同步脉冲输出,多路串行信息输出方式,IRTG—B 信息输出格式,事件输出功能等。一个站(厂)里只需一台接收机,时间信号(UTC)及采样时钟(采样频率  $f_s$  由 GPS 秒脉冲信号(PPS)和相关电路按  $f_s$  要求生产)便可以用光纤传送到站(厂)内其他数据处理或 CPU 单元中完成相量测量。从而实现电网监测、控制。

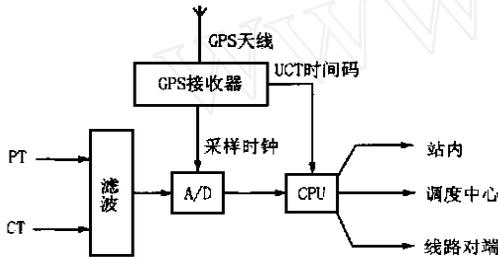


图 2 相量测量装置框图

### 3 基于 GPS 同步时钟的相量测量在电力系统中的应用研究

#### 3.1 基于相量测量的电力系统状态确定

传统的状态估计是根据各个厂(站)的遥测量以及当前运行电网的拓扑结构,利用非线性迭代的方法来求得电力系统的状态量(主要是母线电压相量)。它的缺点是:计算时间长,实时性差;在某些电网结构下迭代不易收敛甚至产生较大误差。实现相量测量后,在调度中心将各 PMU 同一时刻的相量值组合在一起,得到了系统状态量,这称为状态确定。其优点是:实时性强。在  $4800 \sim 9600\text{bit/s}$  的通信支持下,  $2 \sim 5\text{Hz}$  就可更新一次状态,对于频率为  $0 \sim 2\text{Hz}$  的电力系统动态现象(如低频振荡),调度中心可实时地观察到,这为调度员正确决策提供了依据。

准确性高。在 GPS 授时的同步下,测量精度高于  $1^\circ$ 。传输的数据量少。在网络结构和参数已知的情况下,可很快得到潮流,利用节点的相关性,无须知道所有节点的相量值。这种状态确定是实现电网实时监测的较理想方案。文献<sup>[2]</sup>指出了利用网络节点的相关性使 PMU 的量一般为电网全部节点数的  $20\% \sim 30\%$ 。若网络节点的相关性好,所需数目更少。

#### 3.2 基于相量测量的暂态稳定性预测和控制

利用基于 GPS 同步时钟的相量测量单元来测量系统在暂态过程中各节点电压相位、各发电机转子角度、转速,从而预测系统未来的摆动情况。当预测到系统将失去暂态稳定时,按预定的方案对系统进行解列控制或作出切机控制决策,以保持系统暂态稳定性,防止系统崩溃和瓦解<sup>[4]~[7]</sup>。

采用相量测量单元来测量系统在暂态过程中各节点电压相量,能较好地反映系统状态量,自适应失步预测就是根据这一原理开发的。它能根据各 PMU 送来的值及电网结构的变化,自行调整定值及动作方程,以满足新工况下的灵敏度及安全性要求。

采用相量测量单元来测量各发电机的转子角度的变化来预测系统稳定性。其转子角度变化可采用自回归(AR)预测并对预测结果进行稳定判定。当预测到系统将要失去稳定时,利用实测的发电机角度和转速将系统分为两群机组,并估计此等值两机系统的参数,然后用等面积定则确定切机量,再将等值机的切机量转换为实际的切机量以便执行。可适用于各种不同的系统运行方式及各种不同严重程度和情况的故障。且被切机组的位置并不固定,而是根据实际的摇摆情况实时决定。文献<sup>[7]</sup>对此进行了详细的论述。图 3 给出控制的基本结构图。

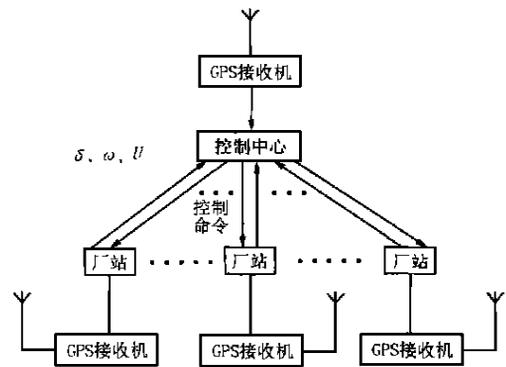


图 3 控制结构

图中厂站与控制中心上行通道用于传输各厂站发电机转子角度和转子转速及电压  $U$ ,下行是用于发送控制命令。各厂站测量的发电机角度<sup>[8]</sup>、速度由 GPS 同步时钟进行同步,以保持它们是同一时刻的值。当系统发生故障后,控制中心根据厂站送来的故障信号进行启动,并应用采集到的各发电机转子角度信息不断地预测系统稳定情况。当预测出系统可能失去稳定时,进行切机决策控制。

#### 3.3 基于相量测量的发电机非线性励磁控制

电力系统中的发电机励磁控制属非线性控制系

统<sup>[9]</sup>,其励磁控制直接影响着系统运行状态和稳定性。人们常将控制器按线性方法来设计,与线性控制器相比,非线性控制更符合电力系统的实际情况,具有对大扰动控制效果好,并能较好地适应系统运行方式变化的特点,但实现非线性励磁控制时必须解耦控制,需假定系统中某台机组为无穷大机组或取它作为参考,但真正实现起来存在问题较多,效果也不是很好。基于GPS相量测量的电力系统非线性励磁控制的基本思想是在全系统建立一个以GPS同步时钟为基准的同步旋转参考系,使电力系统中所有的发电机都相对于这一参考系进行控制,用它来代替参考机。系统中的每个发电厂均设置GPS同步时钟,以它为标准,在相同时刻直接测量各发电机的转子角度和转速,并以这些转子角度和转速作为状态变量进行非线性励磁控制<sup>[10]</sup>。

### 3.4 基于相量测量的输电线路故障定位

对于高压输电线路故障的快速、精确、可靠定位,国内外进行了广泛深入的研究,已形成单端、多端、阻抗行波解析等多种定位方法<sup>[11]-[12]</sup>,基于GPS同步时钟的输电线路故障定位利用故障时测量电流、电压相量对故障进行分析计算实时求出测量点到故障点的距离。

利用故障分析法和行波法进行故障测距定位,能充分显示GPS同步测量的高精度优点。基于输电线路双端信息的定位方法如下:

双端供电系统如图4所示。设单位长度线路阻抗为 $Z$ ,对地电纳为 $Y$ ,故障点与 $S$ 端距离为 $X$ 。

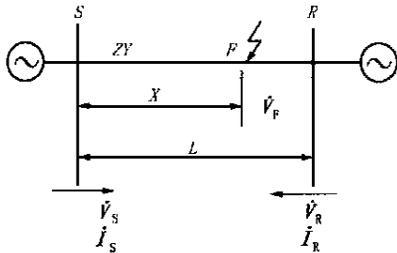


图4 双端供电系统

基于GPS授时在线路两端同步采样,根据矩阵理论和模式传输理论可得到电压、电流。故障处的电压相量 $\dot{V}_F$ 可由两端相量 $\dot{V}_S, \dot{V}_R, \dot{I}_S, \dot{I}_R$ 求得:

$$\dot{V}_{FS} = \dot{V}_S \text{ch } X - \dot{I}_S Z_0 \text{sh } X \quad (3)$$

$$\dot{V}_{FR} = \dot{V}_R \text{ch} [ (L - X) ] - \dot{I}_R Z_0 \text{sh} [ (L - X) ] \quad (4)$$

式中  $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$ , 波阻抗;  
 $= \sqrt{ZY}$ , 导线传播系数。

对于 $F$ 点处发生的任意短路故障,式(3)与式(4)恒等,则故障距离可由下式确定:

$$X = R_e \frac{\text{arcth} \frac{-B}{A}}{A} \quad (5)$$

$$A = \dot{I}_R Z_0 \text{ch } L - \dot{V}_R \text{sh } L + Z_0 \dot{I}_S \quad (6)$$

其中

$$B = \dot{V}_R \text{ch } L - \dot{I}_R Z_0 \text{sh } L - \dot{V}_S \quad (7)$$

对于任意结构的 $n$ 相系统,只要模分量存在,便可由上式计算线路两端电压间和电流间的相位关系,从而精确确定故障点。

图5给出输电线路双端信号故障定位原理图。图中利用GPS提供的高精度时钟和数据采集板来实现同步采集。使用调制解调器(Modem)通过通信信道实现输电线路各侧信号的交换。工控机完成相关计算和故障精确定位。

### 2.5 基于相量测量的其它应用

电力系统的电压崩溃,是困扰电力系统的另一个重要问题。电压相量中包含了决定电压稳定裕度的足够信息。由电压相量可计算出电压崩溃近似指标(voltage collapse proximity index)。

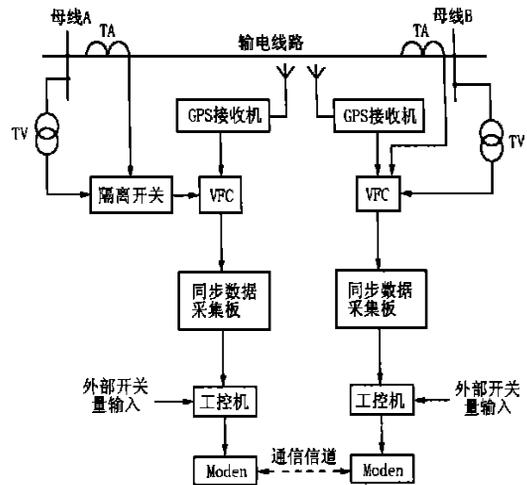


图5 采用双端信号的输电线路故障精确定位系统

相量还可以应用于象灵活交流输电系统(FACTS)的控制方法。

相量测量值可用于本地保护和控制系统,如阻尼系统振荡的SVC控制等。

## 4 结语

基于GPS同步时钟的相量测量已应用于电力系统状态确定、暂态稳定性预测和控制、非线性励磁控制、输电线路故障准确定位等各方面,使电力系统计算机监测、控制和保护提高到一个新的水平。也

给电力系统的分析、控制和电网的安全运行带来深刻变化。

#### 参考文献:

- [1] 张守信. GPS 卫星测定理论与应用. 长沙:国防科技大学出版社,1996.
- [2] 张文涛,邱宇峰,郑旭军. GPS 及其在电力系统中的应用. 电网技术,1996,20(5):38~45.
- [3] Phadke AG. Synchronized phasor measurements in power systems. IEEE Computer Applications in power, April 1994.
- [4] Burnett RO. Synchronized phasor Measurements of a power system Event. IEEE Transactions on power system, 1994,9(3):1643~1650.
- [5] Romyak S et al. Predicting Future Behavior of Transient Events Rapidly Enough to Evaluate Remedial Control options Red-time. IEEE Transactions on power system, 1995,10(3):1195~1203.
- [6] Station S E. Application of phasor Measurements and partial

Energy Analysis in Stability large Disturbances. IEEE Transactions on power system, 1995,10(1):297~306.

- [7] 郭强,刘晓鹏,占世荣,等. GPS 同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制. 电力系统自动化,1998,22(6):11~13.
- [8] 王少荣,孙海顺,苗世洪,等. 同步发电机功角调度测量方法及实现. 中国机械工程,1999,10(6).
- [9] 戴克健. 同步电机励磁及其控制. 北京:水利电力出版社,1988.2,798,102.
- [10] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制. 北京:科学出版社,1993.
- [11] 葛耀中. 新型继电保护与测距原理与技术. 西安:西安交通大学出版社,1996.217~315.
- [12] 曾祥群,尹项根,陈浩,等. 新型输电线路综合定位系统研究. 电力系统自动化,2000,24(22):39~44.

收稿日期: 2001-02-09

作者简介: 傅周兴(1959-),男,副教授,硕士,主要从事电力系统自动化方面的科研及教学工作。

#### Study on application of synchronous clock's phasor measurements based on GPS in power system

FU Zhou-xing<sup>1</sup>, GUO Ying-na<sup>1</sup>, HE Wen-lin<sup>2</sup>

(1. Xi'an Technology College, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle of the unit of synchronous clock's phasor measurement based on the GPS, and it emphasizes its application in supervising and determining the state, predicting and controlling the transient stability, protecting the self-adapting stepout, locating the faults of transmission line precisely etc.

**Keywords:** GPS; power systems; phasor measurement; control; protection