电力系统相角测量和应用

卢志刚　郝玉山　康庆平　杨以涵
（华北电力大学电力系　071003　保定）

摘　要　随着GPS技术的出现，各国研究机构和电力公司对相角测量的应用越来越重视。IEEE 成立了一个专门委员会，研究相角测量、通信接口规则和可能的应用等；美国的 EPRI 正在协调一个项目“美国西部电力系统协调委员会监控用相角实时测量”；法国电力公司防止系统失步的措施之一就是测量超高压网络节点上的相位。而美国的各个电力公司都在逐渐增加安装 PMU 的数量，以增强对系统的监控能力。文中综述了电力公司对电力系统相角测量的应用对策，及各个电力公司安装 PMU 和试验情况，展望了相角测量的应用前景。

关键词　全球定位系统　相角测量　相角测量装置

0　引言

众所周知，电力系统中的电量（如电流、电压等）均为正弦量，正弦量的三要素分别为幅值、频率和初始相角。对于同频率的电量来讲，幅值和相角是关键因素，而长期以来电量的幅值可方便地测量，但相角测量却是一个未解的难题。由于相角无法直接测量，从而造成实时潮流计算需解非线性方程；调度员只能从模拟盘上的潮流，根据经验间接判断系统的稳定性；电力系统的紧急安全控制无法应用简单的相角条件来实现。

随着卫星技术、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，尤其自1993年全球定位系统（GPS）全面民用化以来，就以其定时精度高、性能价格比高和可靠性高，在电力系统中得到了广泛的应用，甚至改变了人们的一些观念[1,2]。GPS 用于故障测距可使测距精度达到300 m，用于故障录波可准确到世界标准时（UTC）±1 μs。最有意义的是把GPS 用于电力系统相角测量，能使人们直接看到系统的运行状态。世界上许多国家的电力公司、科研机构和高等院校投入了大量的人力和物力，开发、研制同步相角测量装置（PMU），研究 PMU 在暂态稳定预测、控制和自适应失步保护中的应用[3~5]。美国几乎所有的电力公司都安装了 PMU，并准备继续扩大安装数量；法国也在扩大安装 PMU 的数量。一个使用 PMU 加强对大型电力系统监控的热潮正在全世界各国电力公司兴起。

1996－09－02收稿。

1　国外相角测量应用

在美国，IEEE 在电力系统继电保护和控制委员会下，设立了一个专门委员会H－7；由 Phadke A G 任主席，研究同步相角测量、通讯接口的规则、推荐的标准和可能的应用等[6]。美国的电力科学研究协会（EPRI）正在协调“美国西部电力系统协调委员会监控用相角实时测量”项目，自1993年他们组织了北美整个西部有关电力公司，计划装设许多相角测量装置，进行多种试验以研究电力系统在各种故障条件下的动态行为，并研究相角数据的实时传递和处理等。至1995年，在乔治亚、佛罗里达、田纳西、纽约、邦纳维尔电管局（BPA）、加利福尼亚、安大略、太平洋公司等，安装了数量不等的 PMU，少则2台，多则数十台。

美国 BPA 在约翰迪和马林两个变电站配备了 Phadke A G 博士开发的 PMU[7]，测量数据通过微波送到 BPA 实验室，整个系统运行得非常好。数据通信误码率低，相角数据与模拟遥测数据比，具有响应好、准确度高和噪声小的特点，所用的通信频带也比模拟遥测窄，相角测量的总体性能与模拟技术比具有一系列显著的优点。

田纳西流域管理局（TVA）是个大电力公司[8]，有600条主干线，因 PMU 价格较高，经过优化设计，可把 PMU 放在69条主干线上，通过这些点的电流、电压和相角测量，可观测到整个系统的状态，他们正在分期实施此方案。

佛罗里达电力公司（FPL）和乔治亚电力公司

(GPC)的联络线上，于1993年安装了基于同步相角测量的自适应失步保护装置[5]。这套装置多次记录了扰动时联络线上的功率摆动情况，其数据非常有意义。

法国电力公司制定了一个通过测量电压相角防止系统失步的计划[9,10]，就是通过安装在超高压(EHV)网络节点上的PMU测量电压相角，通过通信线路把数据传送到主机，主机根据这些不同点的相位情况，在故障时确定系统如何解列和切负荷，以避免事故的进一步扩大。到1995年，法国的东南部安装了更多的PMU。

到目前为至，应用PMU在电力系统做了很多试验研究，如短路试验[11]、切机试验和甩负荷试验、发电机失磁试验[12]、线路的开断试验[13]以及电力系统的模型校验等。通过PMU做的这些试验，使人们首次看到了系统的动态行为，认识到了以往所没有的现象和规律。如：在Texas的Commanche Ⅱ Nuclear Plant发电厂做了一个切机试验[12]，切机后失去约1 100 MW功率，50 ms后又掉了40 MW负荷，4个不同地点的PMU分别记录了频率的变化情况。从记录结果看，4个不同地点的频率变化规律大体相同，频率都降低了约0.2 Hz，约4 s后频率开始上升。然而频率的变化又各不相同，最远的一点比最近一点频率下降的时间延迟了近0.5 s，频率的变化呈振荡形式，这可能导致根据频率减负荷的对策失误。图1为切机点Venus的频率变化；图2是4个地点的频率变化，Robinson是最远点。

这次试验还被佛罗里达电力公司和乔治亚电力公司的联络线上的PMU记录下了联络线上功率和相角的摆动情况，功率摆幅300 MW，而网络上的其它录波装置都没有动作。另外一个例子是佛罗里达

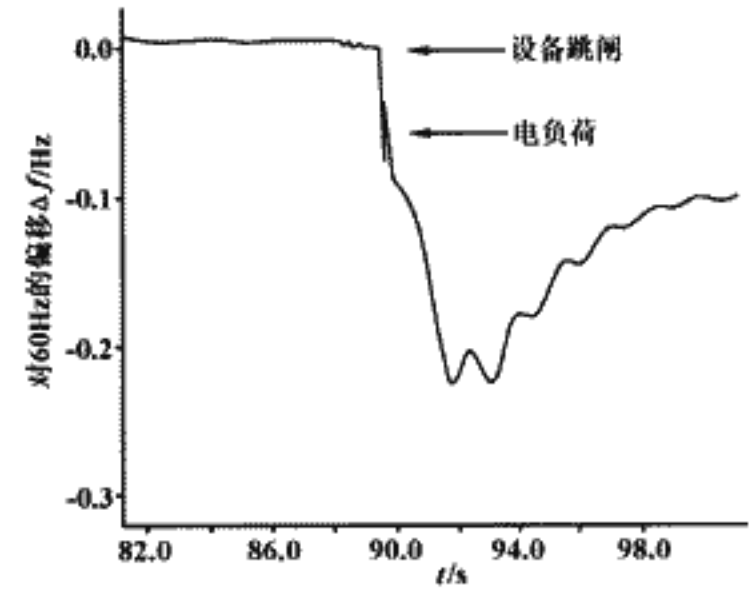

图1 切机点Venus的频率变化

Fig. 1 Measured frequency at Venus substation

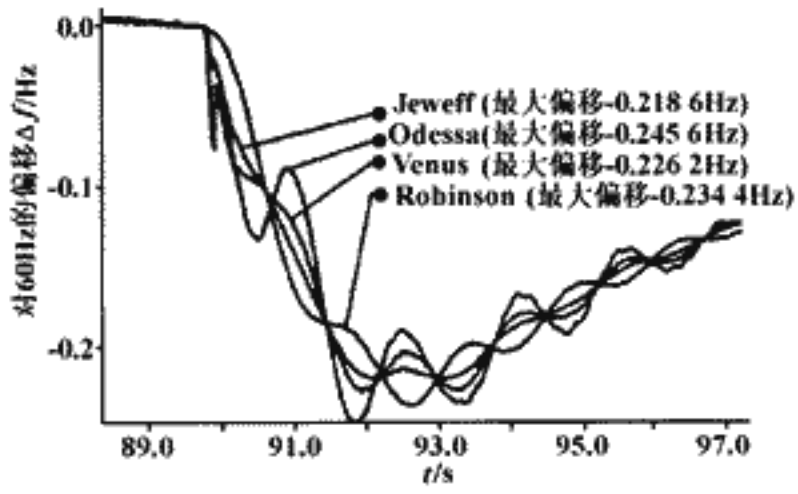

图2 Comanche Ⅱ核电厂负荷全甩试验

Fig. 2 Comanche Ⅱ nuclear plant full load rejection test

电力公司有一台400 MW发电机失磁后被切除，导致佛罗里达电力公司和乔治亚电力公司的联络线上有近700 MW的功率振荡。正常时联络线上的功率为1 200 MW，PMU记录了这一事件，而网络上的其它录波器也都没有动作。因此，大面积安装故障录波器，对系统发生类似摇摆的事故无益。

相角测量原理基本可分为两大类：一类是采用过零检测法；另一类是傅里叶变换法[6]。安大略电力局、太平洋公司使用过零检测相角测量装置；而Phadke A G博士开发的相角测量装置属后一类，法国电力公司开发的相角测量装置也属后一类。

Phadke A G博士开发的相角测量装置广为美国各电力公司使用，它具有30路模拟量输入和32路开关量输入，输出有显示屏、打印机和4个串行口。模拟量输入经低通滤波器、16位A/D变换给68030 CPU。其工作原理是：三相电力线上的波形每个周期被采样12次，用递推傅里叶变换提取出基波分量，用对称分量法将三相组合起来产生正序相量，并对应UTC时间有一个绝对的相角。

2 国内相角测量应用

国内在相角测量方面处于起步阶段，天津大学、电力科学研究院、清华大学和西安交通大学等都已开展这方面的研究工作，多是跟踪国外，目前国内的文献多是综述[14~16]。

华北电力大学以郝玉山博士为首的课题组，自1994年就开始对相角测量进行研究。1995年研制出了基于GPS的相角测量装置，它采用过零检测原理，具有测量精度高、结构简单、成本价格低的特点，于1996年2月通过专家评审，并获得一致好评。他们还建立了一整套关于相角测量、数据传送方面的理论和方法，并申请了国内和国际专利。目前他们

正在与河北省电力公司合作，进入到实验和实施阶段。

3 展望

由于相角的实时测量使得人们能实时地看到系统的状态，必将使电力系统的监控和保护提高到一个新的水平，因此各国电力公司都在研究对策，积极增加PMU的数量，开展多种试验研究。相角测量可望在电力系统的状态估计、静态稳定的监视、暂态稳定的预测及控制和自适应失步保护方面发挥其作用[17]。

(1) 系统的状态估计是一种数学方法，它能根据系统的特征方程确定系统的稳定性，然而它的响应慢，基于相角测量的状态估计是一个线性估计，它的计算速度非常快，能够做到实时运行。

(2) 检验稳定程序中的电力系统元件的数学模型。通过PMU记录试验时电流、电压及相角的变化，然后与稳定程序计算的结果相对照，并加以分析就能得出结果。

(3) 对静态稳定的监视来说，相角测量可望成为一个重要的数据来源。PMU测得的相角值通过通信线路，实时送到调度中心并显示给调度员，调度员很容易知道电网的电压水平，当将两个系统连接起来时，可防止这两个系统的反相连接。

(4) 相角测量能极大地改善系统暂态稳定的预测及控制。当故障时，调度中心可根据各个点的实时相角，判断出那个机组可能失稳并采取相应的对策，如切机、切负荷、解列等，以防止事故的进一步扩大；也可以用来进行就地控制，如励磁、调速、电容器的接入等。另外，通过PMU的监测可扩大线路的传输功率。

(5) 相角测量用于系统失步保护可以简化参数的设计。应用相角条件作为判据，能够不必考虑故障的类型，设定参数非常容易。应用相角这个量必将会产生新的保护思想和装置。

随着电力系统互连网络的增大，控制系统和保护越来越复杂，实时相角测量为电力系统的稳定控制和保护开辟了一个新的领域。

4 参考文献

1 Wilson R E. Methods and Uses of Precise Time in Power Systems. IEEE Trans on PWRD, 1992,7(1):126～132

2 傅鸿志，等. 关于电网时间统一系统的探讨. 电力系统自动化，1994，18(10)：44～46

3 Stanton S E *et al*. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances. IEEE Trans on PWRS，1995.2，10(1)：297～302

4 Rovnyak S *et al*. Predicting Future Behavior of Transient Events Rapidly Enough to Evaluate Remedial Control Options in Real-time. IEEE Trans on PWRS，1995.8，10(3)：1195～1201

5 Centeno V *et al*. Adaptive Out-of-Step Relaying Using Phasor Measurement Techniques. IEEE Computer Applications in Power，1993.10，12～17

6 IEEE Working Group Report. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control. IEEE Trans on PWRD，1994，9(1)：442～339

7 Street M A *et al*. 应用全球定位系统加强大型电力系统的性能. CIGRE，1994

8 Cease T W. Real-Time of the TVA Power System. IEEE Computer Application in Power，1994.7：47～51

9 Denys P *et al*. Measurement of Voltage Phase for the French Future Defense Plan Against Losses of Synchronism. IEEE Trans on PWRD，1992，7(1)：442～449

10 Counan C，Trotignon M *et al*. Major Incidents on the FRENCH Electric System：Potentiality and Curative Measures Studies. IEEE Trans on PWRS，1993.8，8(3)：879～885

11 Wilson R E *et al*. GPS Synchronized Power System Phase Angle Measurement，International Joural of Satellite Communications，1994，12：499～505

12 Murphy R J. Disturbance Recorders Trigger Detection and Protection. IEEE Computer Application in Power，1996.1：24～28

13 Barnett R O *et al*. Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event. IEEE Trans on PWRD，1994.8，9(3)：1643～1649

14 高厚磊，等. GPS及其在电力系统中的应用. 电力系统自动化，1995.9，19(9)：41～44

15 高厚磊，等. 基于GPS的同步采样及在保护与控制中的应用. 电网技术，1995.7，19(7)：30～32

16 张文涛，等. GPS及其在电力系统中的应用. 电网技术，1996.5，20(5)：38～45

17 Phadk A G. Synchronize Phasor Measurements in Power System. IEEE Computer Application in Power，1993.4：10～15

卢志刚，男，1963年生，博士研究生，主要研究电力系统相角测量及其应用。

郝玉山，男，1960年生，博士，教授，主要从事电力系统稳定运行与控制等方面的研究。

康庆平，男，1945年生，硕士，副教授，主要从事配电系统自动化等方面的研究。

(下转第46页)

(上接第43页)

PHASOR MEASUREMENT AND ITS APPLICATIONS IN POWER SYSTEM

Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, Yang Yihan

(North China Electric University, 071003, Baoding, China)

Abstract With the advent of GPS, research institues and power companies in the world have payed more and more attentions to phasor measurement and its practical use. Power companies is increasing PMU' s number gradually so as to improve ability of monitoring power system. This paper summarises the attitudes of power company towards phasor measurement, and the situations of fixing PMU and testing with PMU. Finally, we look forward to the prospects of this technique for application in power system.

Keywords GPS phasor measurement phasor measurement unit (PMU)