

# WAMS 技术发展现状及四川电网应用模式探讨

李 建

(四川省电力公司,四川 成都 610041)

**摘 要:**近年来,同步相量测量技术得到了长足的发展,广域监测系统获得广泛应用。概述了广域监测技术的发展历程及应用现状,并总结了广域监测相比传统监测的优势。在此基础上,探讨了广域监测技术在四川电网的应用模式。

**关键词:**广域监测系统;同步相量测量

**Abstract:** In recent years, synchronized phasor measurement technique has got a rapid progress and wide-area measurement system (WAMS) has been widely used. The development history and the application status of WAMS technique are summarized, and the advantages of WAMS over the conventional system for monitoring and measuring are described. On this basis, the application mode of WAMS technique in Sichuan power grid is discussed.

**Key words:** wide-area measurement system; synchronized phasor measurement.

中图分类号:TM93 文献标识码:B 文章编号:1003-6954(2008)02-0062-04

全国联网的实施已使中国电力系统呈现大区交直流互联运行的状态。互联电网范围的扩大和系统容量的增长,使电力系统面临许多新的问题,例如:弱联系的长链式同步交流电网的区域间低频振荡问题;大区电网暂态稳定在线预警与协调控制问题;复杂电力系统实时监视、辨识、仿真问题。这些问题的出现都对电网的实时监测和反事故能力提出了更高的要求。随着卫星授时技术、数字信号处理技术和通信技术的发展,同步相量测量(Synchronized Phasor Measurement, SPM)技术及以此为基础的动态安全监控系统已成为目前电力系统稳定监测与控制的重要发展趋势。

## 1 广域监测相比传统稳态监测的优势

广域监测系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)弥补了传统的适用于稳态监测的SCADA/EMS系统不能监测和辨识电力系统动态行为的不足,相比之下广域监测具有以下四方面重要优势:

1) 监测断面具有一致性。不同地点的所有监测量可统一到具有精确时标的同一时间断面,能够以更同步、更一致的方式描述电力系统的运行状况。

2) 可提供同步的实时相角信息。可直接获得表征发电机同步运行特征的内电势角及电网关键节点的相角信息,为稳定控制策略的在线生成和选取提供更充分的实时信息。

3) 使动态过程监测和辨识成为可能。具有毫秒

级的数据刷新率且全网同步,可监测系统的动态行为并辨识参数的动态变化。

4) 能提供全局化的分析与控制决策信息。广域测量使得控制决策所需的反馈信息不必局限于本地,可优选具有高可观性的监测量作为反馈量,有利于克服仅依据本地信息的控制方法不能考虑电网中其它区域的暂态行为,从而难以满足电网全局稳定的缺点。

## 2 WAMS 的发展及应用现状

美国1992年开始将同步相量测量单元布置于其电网的关键厂站,实现就地监测、扰动事件重演等功能,并研究使用同步测量的相量进行系统参数辨识应用的可行性<sup>[1-2]</sup>。随后,在EPRI(Electric Power Research Institute)的支持下,WSCC(Western System Coordinating Council)、NYPA(New York Power Authority)、TVA(Tennessee Valley Authority)、SCE(Southern California Edison)等电力公司进一步推进广域监测的应用,经由光纤通信网络实现同步相量的实时上送,开发了完整的监测系统<sup>[3-4]</sup>,并研究开发基于同步相量测量的动态安全评估(Dynamic Security Assessment, DSA)<sup>[5]</sup>、谐波状态估计(Harmonic State Estimation)<sup>[6]</sup>、振荡失步判断<sup>[7]</sup>等功能。在1996年夏天美国的两次大停电<sup>[8]</sup>及2003年的美一加8.14大停电<sup>[9]</sup>中,WAMS准确地记录了事故发生的过程,为事故原因分析提供了广阔区域内具有统一时间断面和时序的暂

态过程同步数据。在开发负荷监测系统、负荷模拟方法及负荷模型方面,美国也做了不少工作。美国电科院(EPRI)与新墨西哥州大学(New Mexico State University)合作,选择典型的居民负荷、商业负荷、工业负荷和农业负荷馈线安装数据采集装置,捕捉负荷对电压扰动的响应,用所测得的数据,识别每一类负荷的响应,转换并简化,利用分类数据进行外推。法国 1992 年开始设计基于 PMU 的协调防御计划,希望通过实时判断同调区之间的功角稳定情况,进行解列、切负荷、切机控制,目的是防止局部故障向全网扩散<sup>[10-11]</sup>。日本 1993 年开始尝试使用 PMU 构造同步监测网,至 2002 年已配置了 11 个同步监测点,实现广域动态监测、电网参数估计、谐波估计等功能,并计划将同步测量引入自适应保护<sup>[12]</sup>。

中国于 1995 年研制出使用全球卫星定位系统同步授时的 PMU<sup>[13]</sup>,并成功应用于黑龙江东部电网的区域稳定监测系统<sup>[14]</sup>。在黑龙江区域稳控系统的基础上,文献[15]提出广域动态安全监测系统的理论框架,对 WAMS 技术的深入研究和应用发展起到重要推动作用。2003 年 1 月,国调中心结合中国电网的特点,在 IEEE Std 1344-1995 的基础上,制定了《电力系统实时动态监测系统技术规范(试行)》,并于 2005 年 5 月通过专家评审,申报为国家电网公司的企业标准。该标准为同步相量测量技术在中国的广泛应用确定了统一标准的接口方式和性能指标。2003 年至 2007 年期间,国调中心、华北、东北、华东、华中、西北等区域电网以及江苏、广东、山东、贵州、湖北、湖南、广西等省网已经成功实施了一系列广域监测工程,使中国 PMU 布点接近 400 个厂站,以 20 ms(甚至 10 ms)间隔向数据中心站实时上送同步相量数据,实现了发电机进相运行监视、快速计算和控制策略搜索、功角稳定预测、在线低频振荡监测、同步故障记录重演等功能。各网省 WAMS 系统在历次事故分析及系统试验中提供了可靠的同步断面数据,发挥了重要作用。其中,2004 年 4 月 8 日,华东电网在黄渡附近做了一次单相短路试验,通过分析 PMU 记录的暂态试验数据,查清了之前系统发生短路故障时母差保护误动的原因。东北和华北的 WAMS 系统完成了 2004 年 3 月 25 日和 2005 年 3 月 29 日东北大扰动试验过程中,东北网内主要发电厂和变电站以及东北—华北联络线的动态监测和数据记录,为分析东北—华北联网送电能力及校核仿真结果提供了直接的数据源。西

北电网 2007 年 4 月进行了大扰动试验,利用 WAMS 系统获取扰动过程的同步断面,验证仿真模型修正后电网稳定特性的变化。

目前,同步相量测量主要还应用于广域监测,但学者们已经在广域控制研究领域取得了较大的进展:文献[16]较全面地分析了同步相量测量应用于暂稳控制的可行性;文献[17-18]系统地研究了将同步相量技术应用于互联电网广域阻尼控制,解决区域间低频振荡问题;文献[19-20]探索了利用实测的同步相量进行暂态稳定预测以及在线生成切机、切负荷的暂稳控制策略;文献[21-22]探讨了将同步相量应用于电压稳定预测和控制的方法;文献[23-24]讨论了通信时滞和通道故障对广域控制的影响,并提出了利用线性矩阵不等式的处理方法,有利于广域控制器的实用化设计。

### 3 四川电网 WAMS 系统应用模式探讨

四川电网目前已经建成“在线安全稳定预警及控制决策系统”,该系统基于 EMS 状态估计后数据,实现在预想故障集下的电网安全稳定评估及辅助决策,已成为调度员和运行方式分析人员的高效率得力工具。因此,四川电网 WAMS 系统的高级应用建设应与在线安全稳定预警及控制决策系统相结合,整合并综合利用电力系统的稳态和动态运行信息,集电网稳态及动态监测、安全评估、安全预警、模型及参数辨识等功能于一体,共同构成四川电网动态监测预警系统。

#### 3.1 电网动态监测

广域监测是 WAMS 系统的基本应用功能。根据 WAMS 具有全网同步测量以及毫秒级数据刷新能力的优势,可重点实现发电机功角监测、频率监测、枢纽站电压监测、关键断面功率监测等功能。上述电网动态过程的实时监测作为 EMS 系统稳态监测的补充,并结合历史数据追忆功能,构筑全方位的在线监测平台和事故分析支撑平台。

#### 3.2 利用 WAMS 信息的状态估计模块

整合 EMS 系统的实时量测、WAMS 的相量量测数据估计全网的母线电压幅值和相角,检测可疑数据,辨识不良数据,计算支路潮流,估计出全部状态量,为电力系统的可观测部分和不可观测部分提供一致的、可靠的电网潮流解。利用 WAMS 信息的状态

估计可借助PMU的精确测量优势,提供更可靠的量测量,作为状态估计中权重更高的基础数据,可改善状态估计的收敛性,提高状态估计的辨识能力和电网状态量估计结果的准确度。

### 3.3 低频振荡实时检测及分析

基于广域测量的功角、电压和功率等同步数据,采用Prony算法等分析方法,对系统动态特性模型进行分析,获取系统低频振荡的频率、阻尼比等特征信息,辨识主导低频振荡发生的关键状态量并进行同调机组分群。在此基础上,通过“在线安全稳定预警及控制决策系统”的辅助决策功能,进一步提出抑制低频振荡的措施,提供稳定控制的辅助决策方案。

### 3.4 电力系统负荷模型辨识

由于现阶段离线仿真中负荷模型对仿真结果影响较大,且尚无有效手段获得较为准确可靠的负荷模型。因此考虑利用WAMS主站接收的动态数据,通过将数字仿真结果与实测结果不断进行比较,利用负荷辨识软件建立负荷模型,并且在WAMS的日常运行中不断对负荷模型进行校核修正。最终将所建模型应用于电网的仿真计算与分析,改善仿真计算的准确度。

### 3.5 优化系统解列控制

当系统发生稳定破坏时,快速检测系统的失步振荡状态,并且准确定位系统的振荡中心位置,启动振荡报警及相应的处理过程。通过快速分析各个局部系统之间的功率平衡变化情况,将系统迅速而合理地解列为供需尽可能平衡而各自保持同步运行的两个或几个孤立网;同时与低周减载、高周切机、低频自启动水轮发电机等措施相互配合,防止系统长时间不能拉入同步或造成系统频率和电压崩溃,扩大事故。

## 4 结语

概述了广域监测技术在国内外的发展历程及应用现状,并在此基础上,结合四川电网的实际情况,讨论了WAMS系统的高级应用与在线安全稳定预警及控制决策系统相结合的应用模式,对四川电网即将进行的WAMS系统建设工作具有参考意义。

### 参考文献

[1] Burnett R O, Butts M M, Cease T W. Synchronized phasor measurements of a power system event. IEEE Transactions on

Power Systems, 1994, 9(3): 1643—1650.

[2] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power systems. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10—15.

[3] Bhargava B. Synchronized phasor measurement system project at southern California Edison Co. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, 1: 16—22

[4] Cease T W, Feldhaus B. Real time monitoring of the TVA power system. IEEE Computer Applications in Power, 1994, 7(3): 47—51.

[5] Mittelstadt W A, Hauer J F, Krause P E, et al. The DOE wide area measurement system (WAMS) project — Demonstration of dynamic information technology for the future power system. Proceedings of the Fault and Disturbance Analysis and Precise Measurement in Power Systems Conference, Arlington, Virginia, 1995.

[6] Meliopoulos A P S, Fardanesh B, Zelingher S, et al. Harmonic measurement system via synchronized measurements. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1094—1100.

[7] Centeno V, Phadke A G, Edris A. Adaptive out-of-step relay with phasor measurement developments in power system protection. Sixth International Conference on, 1997: 210—213.

[8] Taylor C W, Erickson D C. Recording and analyzing the July 2 cascading outage. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(1): 26—30.

[9] Hauer J F. WAMS outreach project: Sharing of knowledge & technology. DOE Transmission Reliability Program Peer Review, 2004.

[10] Denys Ph, Counan C, Hossenlopp L, et al. Measurement of voltage phase for the French future defence plan against losses of synchronism. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 62—69.

[11] Faucon O, Dousset L. Coordinated defense plan protects against transient instabilities. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 22—26.

[12] Saitoh H. GPS synchronized measurement applications in Japan. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002; Asia Pacific, 2002, 1(10): 494—499.

[13] 丁仁杰. 电力系统同步相量动态测量技术的研究与实现[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 1995.

[14] 闵勇,丁仁杰,任勇,等. 电力系统全网同步监测系统[D]. 清华大学学报,1997,37(7): 86—88.

- [15] 吴京涛. 基于PMU的电力系统动态监测系统软件包的框架研究[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.
- [16] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10-14.
- [17] Snyder A F, Hadjsaid N, Georges D, et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements, 1998 International Conference on Power System Technology, 1998, 2(8): 790-794.
- [18] Xie Xiaorong, Li Jian, Xiao Jinyu, et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004, 1: 222-227.
- [19] Bretas N G, Phadke A G. Real time instability prediction through adaptive time series coefficients. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1999, 1: 731-736.
- [20] Wang Yi-Jen, Liu Chih-Wen, Sue Len-Dar. A remedial control scheme protects against transient instabilities based on phasor measurement units (PMUs) — A case study. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1191-1195.
- [21] Nuqui R F, Phadke A G, Schulz R P. Fast On-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1347-1352.
- [22] Milosevic B, Begovic M. Voltage stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [23] Snyder A F, Ivanescu D, Hadjsaid N, et al. Delayed input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1009-1014.
- [24] Mekki K, Snyder A F, Hadjsaid N, et al. Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 2: 1015-1019.

(收稿日期: 2007-12-10)

(上接第59页) 南非的132~400 kV的电力系统中共安装了30套行波采集单元, 所监视的线路包括3条串联补偿线路和一条直流线路。加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司在1993年研制出双端行波故障测距系统, 并安装在不列颠哥伦比亚省的14个500 kV变电所, 覆盖线路总长超过5 300 km。该系统通过专门研制的耦合装置采集故障产生的高频电压信号。实际运行表明, 上述系统均可以将故障定位到300 m以内。国内科汇公司推出行波测距产品十多年来, 取得很大的成功。产品XC-2000投入在数个省网和南方电网以及500 kV葛南直流输电线路运行, 测距平均绝对误差小于200 m。

## 5 结论与展望

行波测距技术能够实现高压架空线路故障的精确定位, 具有简单、可靠、适应性强和适用面广的特点。电力电缆故障的离线探测与定位较成熟, 其原理也比较简单, 发展方向是联系应用架空线上的成熟技术, 发展在线行波故障点定位。

现代行波故障测距系统需要解决的关键问题仍然包括的有: 信号的确定性与防范受扰动的问题; 波

速的精确性与测距误差如何进一步控制; 小波变换和GPS与行波测距的有效结合以及研制光互感器用于取得暂态信号等问题。新的基于行波信息的故障定位原理的开拓及行波和相关新技术的应用结合也是发展的大方向。

## 参考文献

- [1] 徐丙垠, 李京, 陈平等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
- [2] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 36-39.
- [3] 陈平, 牛燕雄, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距系统的研制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 81-85.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 2007.
- [5] 乔峰, 余发山, 张宇华. 基于行波法的输电线路故障测距的研究[J]. 煤矿机电, 2004(5): 69-72.
- [6] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-52.

### 作者简介:

党晓强(1975~), 男, 四川西昌人, 博士, 讲师, 从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008-01-20)