

# 相量测量装置 (PMU) 动态测量精度在线检验

王茂海<sup>1</sup>, 鲍捷<sup>1</sup>, 齐霞<sup>2</sup>, 徐正山<sup>1</sup>, 郭子明<sup>1</sup>

(1. 华北电力调度通信中心, 北京 100053; 2. 北京送变电公司, 北京 102401)

**摘要:** 广域测量系统 (WAMS) 的高级应用功能高度依赖于相量测量装置 (PMU) 的动态数据质量。迄今为止, 各厂家的 PMU 产品只是在实验室内进行过离线检验, 而在实际运行环境中的精度并没有严格地经过检验。因为许多现场环境中的实际信号难以在实验室中复现, 因此有必要在 WAMS 主站开发相量测量算法, 对 PMU 自身记录的采样数据 (暂态录波数据) 进行分析计算, 计算结果应与同时段该 PMU 上传的动态数据进行比较, 从而判断 PMU 动态数据质量的好坏。最后以华北电网广域测量系统的实测数据为例, 论证了 PMU 动态性能在线监测的必要性与可行性。

**关键词:** 广域测量系统; 相量测量装置; 动态数据; 采样数据

## Online assessment of phasor measurement unit's performance based on sample data

WANG Mao-hai<sup>1</sup>, BAO Jie<sup>1</sup>, QI Xia<sup>2</sup>, XU Zheng-shan<sup>1</sup>, GUO Zi-ming<sup>1</sup>

(1. North China Power Dispatching Centre, Beijing 100053, China;

2. Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 102401, China)

**Abstract:** Advanced applications of WAMS are highly depended on the preciseness of phasor measurement unit. So far, almost all PMUs are only offline tested in laboratory before being put into service, whereas in practical operation environment, actual electrical signals cannot be repeated in test environment. It's necessary to develop online performance assessment program in control center to analyze PMU sample data, and compare the phasor calculation results based on sample data with the dynamic data of the same period of time reported to control center by PMU. The qualification of PMU dynamic data can be determined by the comparison results. Based on the actual PMU dynamic and sample data, this paper illustrates that online assessment of PMU performance is necessary and feasible.

**Key words:** WAMS; PMU; dynamic data; sample data

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0048-05

## 0 引言

我国华北、华东等区域电网都已步入装机、负荷双过亿的特大电网时代。尊重电网的物理规律, 从系统全局角度对电力系统进行监测、控制和规划是特大电网发展的必然趋势。广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 正是顺应这一趋势而诞生的电网动态过程监测分析系统。

我国自 90 年代中期开始进行 WAMS 的研究, 目前 WAMS 的应用和研究已达到世界先进水平。以华北电网为例, 到 2008 年 6 月份, 接入华北网调 WAMS 主站的 PMU 子站达 71 个, 覆盖了 500 kV 主网架大部分厂站和部分 220 kV 发电厂, 上传遥测量达到 16 000 多个, 大大提高了电力系统动态过程的可观测性。

作为互联电力系统动态过程监测分析的重要手

段, WAMS 在规模不断扩大的同时, 其高级应用功能也日益得到重视<sup>[1-7]</sup>。WAMS 系统的分析控制等高级应用功能高度依赖于相量测量装置 PMU (phasor measurement unit) 的动态数据质量。关于 PMU 的动态性能测试可分为实验室测试<sup>[8]</sup>和现场测试。迄今为止, 各厂家的 PMU 产品只是在实验室内进行过离线检验, 而在实际运行环境中的精度并没有严格地经过检验。而 PMU 的动态测量性能是其区别于传统 SCADA 的最重要特征之一, 因为许多现场环境中的实际信号难以在实验室中复现, 因此有必要在 WAMS 主站开发相量测量算法, 对 PMU 自身记录的采样数据 (暂态录波数据) 进行分析计算, 计算结果与同时段该 PMU 上传的动态数据进行比较, 从而判断 PMU 动态数据质量的好坏。

本文以华北电网 WAMS 系统的实测数据为例, 论证了 PMU 动态性能在线监测的必要性与可行性。

## 1 PMU 动态性能监测指标

在线 PMU 测试中主要应找出 PMU 在以下方面存在的动态特性问题:

### (1) 滤波延迟差异引起的计时不一致

PMU 的相量计算实际上是包含平均处理过程, 该过程包含或等值于一个滤波器。该滤波器带宽过大导致引入过多的不感兴趣频段的信号, 带宽过窄将导致信号延迟并使曲线被不合理平滑, 丧失快速变化信息。

### (2) 频率的非正常突变

电力系统作为一个惯性系统, 其频率是不能突变的。现有采用电气量测量频率的方法往往在暂态过程中测量结果会出现突变, 从而影响动态过程监测分析的可信性。

### (3) 频率偏移引起的栅栏效应和泄漏误差

非同步采样时, 离散傅立叶变换结果存在栅栏效应(grid effect)和泄漏(leakage)误差, 这部分误差会造成相量计算结果存在固定偏差和虚假振荡。

### (4) 采样定理得不到满足而引起的混叠误差

目前我国 PMU 厂家所生产的 PMU 产品采样频率基本分为 4 800 Hz 和 10 000 Hz 两种。实际电力系统信号中往往包含高于采样频率一半的分量, 例如 HVDC 控制系统引起的高频分量等, 这些高频分量会对离散傅立叶变换的计算结果产生混叠效应(aliasing effect)。一般情况下, 电力系统中高频分量的含量很小, 混叠效应引起的误差不会太大。

### (5) 数据延迟比较

带有正确时标的 PMU 相量可能由于子站或通信系统的延迟, 在不同的时刻到达主站, 这将影响后续的分析计算, 并进一步影响控制效果, 因此有必要比较子站 PMU 在结果输出上的延迟。

### (6) GPS 同步错误

GPS 同步错误来自于 GPS 故障, 时标与量测时间匹配错误等原因。

## 2 PMU 动态性能监测分析方法

目前, 我国几大 PMU 生产厂家生产的 PMU 均具有暂态数据录波功能。暂态录波数据是子站装置按照其采样间隔记录采集的通道瞬时值, 录波数据采样频率分 4 800 Hz (即每周波 96 点) 和 10 000 Hz (即每周波 200 点) 两种。录波数据本身的精度取决于 A/D 转换的精度, 目前接入华北电网 WAMS 的相量测量装置的 A/D 转换分辨率一般为 16 位, 完全可以满足重现现场真实信号和相量计算的要求。

在调度中心 WAMS 主站对 PMU 的暂态录波数据进

行计算分析, 分析结果与同时段 PMU 上传的相量测量结果进行比较, 可以找出 PMU 测量结果不合理的方

由于各 PMU 厂家的具体相量测量算法属于商业机密, 同时为了避免投资浪费, 一个厂站只能安装一套 PMU 装置, 因此, 不可能对不同 PMU 实现同信号(现场信号)的比较测试。在线 PMU 测试主要应通过比较不同的 PMU 量测结果与主站计算结果的差异, 寻找数据中的矛盾或异常, 在此基础上, 对出现的矛盾或异常加以解释, 从而达到评价各 PMU 动态性能的目的。

## 3 实际算例分析

本部分算例均基于华北电网广域测量系统所记录的实际电压数据。

在华北电网调度中心 WAMS 主站对 A 电厂和 B 电厂的 PMU 子站进行扰动触发后, 将同一时段的暂态录波数据和动态数据召唤到主站。在主站对电压录波数据进行计算分析后与子站上传的电压相量动态数据进行对比分析。

为避免滤波延迟, 主站对录波数据没有进行滤波, 对录波数据的分析处理直接采用文献[7~9]的算法。

### 3.1 频率测量对比

图 1 给出了 A 电厂的频率分析结果。图中两条曲线分别为基于 2008 年 3 月 26 日 17:27:39 的录波数据在主站的频率计算结果和子站 PMU 上传的同时段频率动态数据。图 2 给出了这两条曲线之间的差别。图 1 和图 2 中纵坐标为 Hz。

由图 1 和图 2 可以看出, 在 WAMS 主站基于 A 电厂的录波数据计算得到的 A 电厂频率与同一时间段该厂 PMU 装置上传到主站的频率有一定差别, 二者的差别在 0.004 Hz 左右。

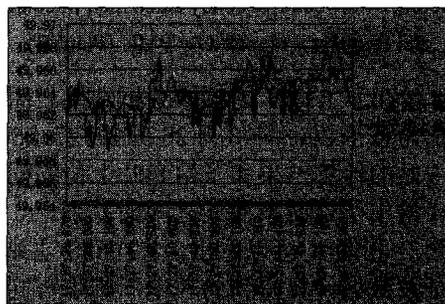


图 1 主站计算的 A 电厂频率和子站上传的 A 电厂频率对比  
Fig.1 Comparison of frequency calculated in control centre and frequency reported by PMU (Plant A)

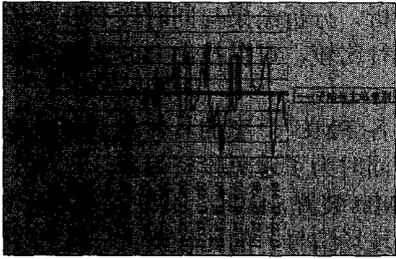


图 2 主站计算的 A 电厂频率和子站上传的 A 电厂频率之间的差别

Fig.2 Difference between frequency calculated in control centre and frequency reported by PMU (Plant A)

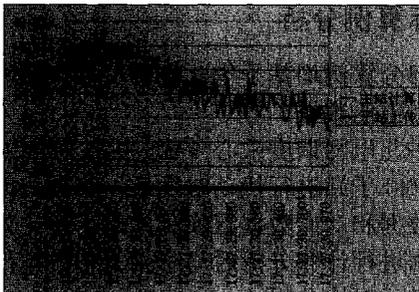


图 3 主站计算的 B 电厂频率和子站上传的 B 电厂频率对比  
Fig.3 Comparison of frequency calculated in control centre and frequency reported by PMU (Plant B)

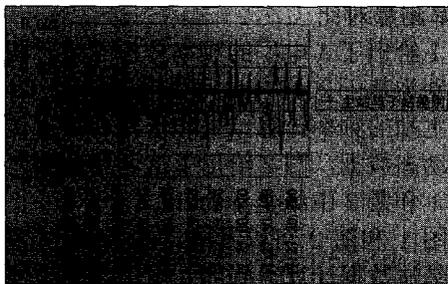


图 4 主站计算的 B 电厂频率和子站上传的 B 电厂频率之间的差别

Fig.4 Difference between frequency calculated in control centre and frequency reported by PMU (Plant B)

图 3 给出了 B 电厂的频率分析结果。图中两条曲线分别为基于 2008 年 3 月 26 日 17:27:28 的录波数据在主站的计算结果和子站 PMU 上传的同时段结果。图 4 给出了这两条曲线之间的差别。

由图 3 和图 4 可以看出，在 WAMS 主站基于 B 电厂的录波数据计算得到的 B 电厂频率与同一时间段该厂 PMU 装置上传到主站的频率基本一致，二者的差别在 0.002 Hz 以内。

为比较 A 厂 PMU 装置和 B 厂 PMU 装置的动态性能，图 5 给出了同一时间段内，B 电厂和 A 电厂的

频率分析结果。由于本时段电网基本处于稳态运行，因此电网各节点频率应基本一致。由图 5 可以看出，B 电厂的主站计算频率和子站上传频率以及 A 电厂的主站计算频率基本一致，而 A 电厂的 PMU 上传频率与其他三条曲线差异较明显。

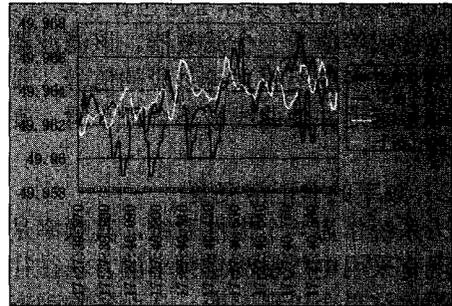


图 5 同一时间段内 A 电厂和 B 电厂频率曲线对比  
Fig.5 Comparison of frequency calculated in control centre and frequency reported by PMU (Plant A and B)

### 3.2 幅值测量对比

图 6 给出了基于 A 厂 PMU 录波数据的主站幅值计算结果和子站上传的 A 电厂幅值结果。图中纵坐标为 500 kV 线路相电压的有效值，单位为伏特。

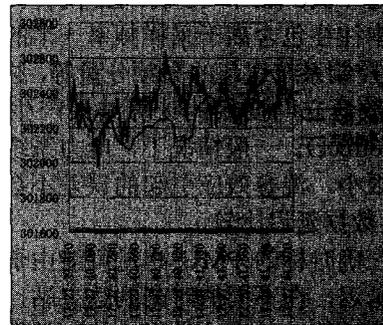


图 6 主站计算的 A 电厂电压幅值和子站上传的 A 电厂电压幅值对比  
Fig.6 Comparison of amplitude calculated in control centre and reported by PMU (Plant A)

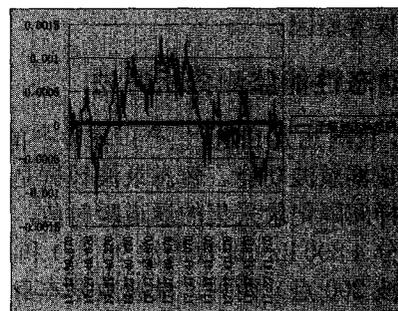


图 7 主站计算和子站上传的 A 电厂电压幅值相对差别(基准线电压 500 kV)  
Fig.7 Relative difference between amplitude calculated in control centre and amplitude reported by PMU (Plant A)

图 7 给出了这两条曲线之间的相对差别 (以线电压 500 kV 为基准, 对应的基准相电压为  $500/1.732 = 288.675$  kV)。

由图 6 和图 7 可以看出, 基于 A 厂 PMU 真实录波数据的幅值计算结果与 A 厂 PMU 子站上传的同时段幅值结果基本一致, 二者的误差在 1% 以内。

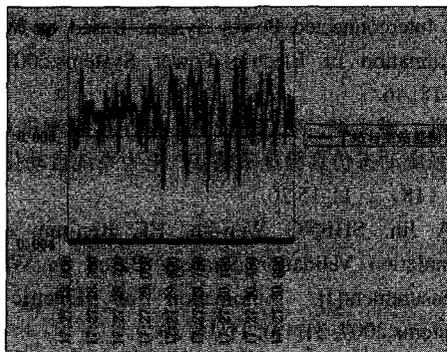


图 8 主站计算和子站上传的 B 电机电压幅值相对差别 (基准线电压 500 kV)

Fig.8 Relative difference between amplitude calculated in control centre and amplitude reported by PMU (Plant B)

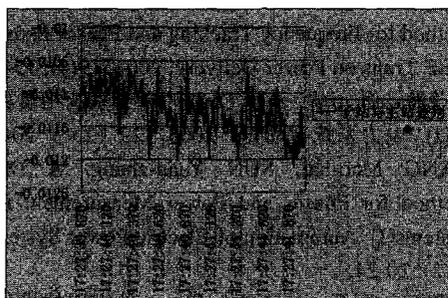


图 9 主站计算的 A 电机电角度和子站上传的 A 电机电角度之间的差别 (弧度)

Fig.9 Difference between angle calculated in control centre and angle reported by PMU (Plant A)

图 8 给出了基于 B 电厂 PMU 录波数据的主站幅值计算结果和子站上传的 B 电厂幅值结果之间的相对差别。由图 8 可以看出, 基于 B 厂 PMU 真实录波数据的幅值计算结果与 B 厂 PMU 子站上传的同时段幅值结果存在固定差别, 其相对差别在 5% 以上。

### 3.3 角度测量对比

图 9 给出了主站基于 A 厂 PMU 录波数据的电压角度计算结果和该厂 PMU 装置上传的 A 电厂电压角度。图中纵坐标为弧度。

由图 9 可以看出, 基于真实录波数据的幅值计算结果与子站上传的同时段角度结果之间的差别在 0.011 弧度 (对应角度为  $0.7^\circ$ ) 左右。

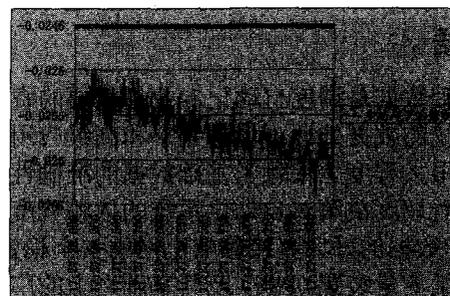


图 10 主站计算的 B 电机电角度和子站上传的 B 电机电角度之间的差别 (弧度)

Fig.10 Difference between angle calculated in control centre and angle reported by PMU (Plant B)

图 10 给出了主站基于 B 电厂 PMU 录波数据的电压角度计算结果和 B 电厂 PMU 装置上传的同时段电压角度之间的差别 (弧度)。

由图 10 可以看出, 基于 B 电厂 PMU 真实录波数据的角度计算结果与子站上传的同时段角度结果之间差别较大, 达到了 0.0255 弧度 (对应角度为  $1.4^\circ$ ) 左右。

### 3.4 算例分析

当原始信号频率偏离额定频率 (50 Hz) 的数值在 0.1 Hz 以内时, A 厂和 B 厂 PMU 静态测量误差指标都为: 电压 (电流) 幅值  $< 0.1\%$ ; 频率误差  $< 0.001$  Hz; 角度误差  $< 0.1^\circ$ 。

主站算法的测量精度<sup>[9]</sup>: 原始信号频率偏离额定值 (50 Hz) 小于 0.5 Hz 的情况下, 频率测量误差小于 0.000 02 Hz, 幅值测量误差小于 0.01%, 角度测量误差小于  $0.000 3^\circ$ 。在 0.5% 的白噪声干扰下, 主站算法的测量精度为: 频率测量误差小于 0.001 Hz, 幅值测量误差小于 0.015%, 角度测量误差小于  $0.015^\circ$ 。

由以上算例可以看出, PMU 子站的相量计算结果与主站根据同时段 PMU 录波数据的计算结果之间有一定差别: A 厂 PMU 装置的频率测量精度略差于 B 厂 PMU 装置, 但其幅值和角度测量精度要略好于 B 厂 PMU 装置。

根据分析结果可知, 由于现场存在干扰, 无论是 A 厂还是 B 厂的 PMU 装置的测量性能都达不到其出厂精度。以上仅为根据不同 PMU 装置量测结果之间的差异进行的定性分析, 但已充分说明有必要制订相关标准和分析手段对各厂站的 PMU 在线测量精度进行分析比较。

本算例只针对 PMU 的相量测量精度进行了分析, 对滤波延迟、GPS 故障等没有进行分析, 这部分工作有待于进一步开发新的算法进行综合考虑。

### 4 结语

基础数据是调度自动化专业最重要的资源。自动化系统的数据处理、信息共享和高级应用功能的实现在很大程度上依赖于基础数据的准确性与可靠性。随着调度决策对自动化系统的依赖程度不断加深,基础数据的好坏直接影响电网的安全稳定运行。

相量测量装置(PMU)及其基础之上的广域测量系统为电力系统各领域中的新应用功能的研究提供了技术上的新思路和新手段,随着其应用理论体系的成熟完善以及在电力系统中的推广应用,将会把现有电力系统动态分析与监控技术全面提升到一个新的水平。在开发基于PMU动态数据的高级应用功能的同时,应高度重视PMU基础数据的质量问题,制订相关标准,实现PMU量测性能在线评估,为高级应用功能的开发完善打好基础。

### 参考文献

[1] 段俊东, 郭志忠. 基于广域测量的在线电压稳定监视[J]. 继电器, 2006, 34(15):24-28.  
DUAN Jun-dong, GUO Zhi-zhong. On-line Assessment of Voltage Stability of Power System Based on Wide-area Measurement System[J]. Relay, 2006, 34(15):24-28.

[2] 郑相华, 米增强, 赵洪山, 等. 基于PMU的状态估计的研究[J]. 继电器, 2004, 32(17):16-19.  
ZHENG Xiang-hua, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, et al. Research on State Estimation Based on PMU[J]. Relay, 2004, 32(17):16-19.

[3] 袁野, 程林, 孙元章, 等. 广域阻尼控制的时滞影响分析及时滞补偿设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 1-4.  
YUAN Ye, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Effect of Delayed Input on Wide-area Damping Control and Design of Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 1-4.

[4] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.  
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying. An Overview of State Estimation Based on Wide-area Measurement System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.

[5] 薛禹胜, 徐伟, DONG Zhao-yang, 等. 关于广域测量系统和广域控制系统的综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 1-5, 16.  
XUE Yu-sheng, XU Wei, DONG Zhao-yang, et al. A Review of Wide Area Measurement System and Wide

Area Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5,16.

[6] 王茂海, 徐正山, 谢开, 等. 基于WAMS的系统自然频率特性系数确定方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 15-18,46.  
WANG Mao-hai, XU Zheng-shan, XIE Kai, et al. Calculation of Frequency Characteristic Coefficients for An Interconnected Power System Based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 31(3): 15-18, 46.

[7] 马进, 盛文进, 贺仁睦, 等. 基于广域测量系统的电力系统动态仿真验证策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 11-15,20.  
MA Jin, SHENG Wen-jin, HE Ren-mu, et al. A Simulation Validation Strategy Based on Wide Area Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 31(18): 11-15, 20.

[8] 王建, 张胜, 贺春, 等. 国内外PMU装置性能对比[J]. 继电器, 2007, 35(6):74-76.  
WANG Jian, ZHANG Sheng, HE Chun, et al. Comparison of PMU Devices from Domestic and Overseas[J]. Relay, 2007, 35(6):74-76.

[9] WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.

[10] 王茂海, 孙元章. 基于DFT的电力系统相量测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.  
WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A DFT-based Method for Phasor and Power Measurement in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.

[11] 王茂海, 谢开, 徐正山, 等. 一种实用的幅值和功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 66-69.  
WANG Mao-hai, XIE Kai, XU Zheng-shan, et al. A Practical Method for Amplitude and Power Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 66-69.

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-09-22

### 作者简介:

王茂海(1976-),男,博士,主要从事广域测量系统的高级应用、稳定分析与控制等方面的工作; E-mail: wang.maohai@ncgc.com.cn

鲍捷(1966-),男,高级工程师,从事电网调度管理、通信、自动化等方面的工作。