

基于瞬时值比较的 PMU 动态性能在线评测方法及系统

段刚¹, 王茂海², 陈程¹, 张道农³, 詹庆才¹, 杨东¹, 祁鸿燕¹, 李廷军¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 国家电网华北电力调控分中心, 北京 100053;
3. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 同步相量测量单元(PMU)的动态性能, 是广域测量系统(WAMS)的各项高级应用可靠性的重要基础。提出一种基于大扰动的特征动态时段的瞬时值比较的 PMU 动态性能评测方法。将 PMU 相量数据还原为相量暂态录波数据, 获取对应的实际暂态录波数据, 分析两者在相关性、相量算法快速响应、纯幅值缩放和总体相似性上的差异, 对 PMU 动态性能进行全面定量的评价。采用实际现场 PMU 数据验证了上述理论分析的正确性和可行性。此外, 设计了在线评测系统, 可应用于实际电网运行过程中实时监控和评价 PMU 动态性能。

关键词: 瞬时值比较; 动态性能; 在线评测系统; 同步相量测量单元; 广域测量系统

Instantaneous value comparison based PMU dynamic characteristics evaluation method and system

DUAN Gang¹, WANG Maohai², CHEN Cheng¹, ZHANG Daonong³, ZHAN Qingcai¹,
YANG Dong¹, QI Hongyan¹, LI Tingjun¹

(1. Beijing Sifang Automation Co. Ltd., Beijing 100085, China; 2. North China Branch of State Grid Power Dispatch & Control Center, Beijing 100053, China; 3. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The dynamic characteristics of phasor measurement unit is the important base of the reliability of advanced applications of wide area measurement system. The paper proposes a PMU dynamic characteristics evaluation method based on instantaneous value comparison during featured dynamic period of great disturbances. The method restores phasor data to instantaneous sampling data, obtains real sampling data from fault recorder, and analyzes the differences in correlation, response speed of phasor algorithms, amplitude change and total similarity between instantaneous sampling data from phasor and instantaneous sampling data from fault recorder. The PMU dynamic characteristics can be roundly and quantificationally evaluated by the indexes. The theory has been proved correctly and feasibly by practical-environment PMU data. Furthermore, for practical application, the paper designs an online evaluation system, which provides realtime monitoring and systematic evaluation.

Key words: instantaneous value comparison; dynamic characteristics; online evaluation system; phasor measurement unit; wide area measurement system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0022-06

0 引言

同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)利用高精度的 GPS/北斗系统进行授时, 对电网运行数据进行同步采集, 向广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)发送数据, 供调度人员实时监视电网的动态过程^[1]。截至 2013 年

底, 全国省级以上调度中心均建设完成 WAMS 主站, 全国累计安装 PMU 近 2 500 套。

在 PMU 接入规模不断扩大的同时, 我国 WAMS 应用和研究也不断广泛和深入^[2], 为提高调控运行人员的势态感知能力提供了可靠的技术保障。WAMS 系统的各项分析控制功能高度依赖于相量测量装置 PMU 的动态数据质量, 因此, 开展对 PMU 量测性能评测的研究显得尤为重要^[3]。

PMU 量测性能评价可分为静态测试和动态测

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52011013508K)

试^[3]。传统标准中主要规定了静态测试的内容, 对动态测试提及较少^[4-6]。随着 PMU 应用环境的日益复杂, 尤其是越来越多地应用于故障暂态过渡过程、以及含 HVDC、FACTS 以及其他谐波污染的电网过渡过程的分析, 因此对 PMU 动态量测性能的评测变得越发重要。最新版本的 PMU 国际标准^[7]详细规定了 PMU 在动态条件下的测试方法与误差极限, 为合理评估 PMU 的动态性能提供了标准。文献[8]介绍了实验室环境下 PMU 动态特性的测试评价方法, 重点利用相量因子的概念分析相量算法的动态特性, 揭示了计算动态相量时的平均化效应。综合来看, 目前动态评价方法主要在实验环境下模拟进行^[9], 但是因为现场运行状态难以在实验室中复现, 尤其在电网动态和暂态过程中, 电压电流信号变化更复杂, 实验室方法难以对 PMU 对现场实际信号的量测性能做出准确评价。

文献[10-11]介绍了非实验室环境下 PMU 动态性能在线评价方法, 即主要通过直接比较不同 PMU 的相量数据或同一 PMU 在不同频率运行点的相量幅值的离散程度来实现 PMU 动态性能的评价。由于不存在标准的相量测量结果, 因此所得指标只有相对意义。

针对以上问题, 本文提出了一种基于瞬时值比较的 PMU 动态性能评测方法, 并设计实现了在线评测系统。将 PMU 相量数据还原为暂态录波数据, 并获取对应的 PMU 实际录波数据, 找出两者在相关性、相量算法快速响应、幅值缩放和总体相似性上的差异, 从而对 PMU 的动态量测性能进行全面定量的评价。除了具有利用现场运行数据实现在线 PMU 性能评价的特点外, 另一个特点是实现 PMU 动态性能的绝对评价, 即将 PMU 相量数据还原为暂态录波数据, 并直接与最原始的暂态录波结果相比较, 克服了对不同 PMU 相量数据直接做比较时, 暂态过程中相量定义的不同所造成的干扰, 以及对实际现场数据难以确定标准相量计算结果的问题。相对于其他的基于瞬时值比较的评价方法^[12], 本文方法具体给出了相量动态量测在哪些特性上产生了误差。

1 基于瞬时值的 PMU 动态性能评测指标

由于现有 PMU 算法通常都能在电网状态平稳, 即频率平稳、电压电流幅值或功率平稳变化时保证很好的量测精度, 即具有良好的符合现有的 PMU 量测标准的静态量测特性, 因此对 PMU 动态性能的评价主要是以电网发生大的扰动, 导致频率、功率在几秒(通常不超过 3 s)之内有大的变化时的电压

相量、电流相量动态变化曲线为研究和评测对象。为了能评价 PMU 相量算法在严峻动态环境下的计算性能, 选取以下大扰动的特征动态时段的相量量测曲线进行 PMU 动态性能的评测:

(1) 被评价 PMU 所量测的测点发生频率偏移 50 Hz 超过 0.1 Hz 的事件, 取频率偏移 50 Hz 的最远时刻之前 0.5 s 和之后 2 s 的电压和电流相量量测曲线进行 PMU 的动态性能评估。

(2) 被量测电压在 0.1 s 时间内发生超过 0.2 倍额定电压的电压跌落, 则取电压跌落最低点之前 0.06 s 和之后 0.2 s 的电压相量量测曲线和相关联的电流相量量测曲线进行 PMU 的动态性能评估。

对上述选取的大扰动的特征时段的动态相量曲线采用式(1)重构为暂态录波瞬时值曲线 $x(t)$ 。

$$x(t) = \sqrt{2}X(t)\cos(\phi(t)) \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 和 $\phi(t)$ 分别为由 PMU 测量得到的 t 时刻的相量幅值和相角; $x(t)$ 为求得的对应该 t 时刻的暂态录波瞬时值。称由相量曲线重构得出的瞬时值曲线为相量暂态录波曲线。由 PMU 装置实际录波得到的曲线称为实际暂态录波曲线。

本方法主要就以下几个方面比较相量暂态录波数据和实际暂态录波数据, 从而对 PMU 动态性能进行全面定量的评测。

(1) 相关性指标

计算相量暂态录波曲线与实际暂态录波曲线的相关性指标。相关性指标同时考虑了周期分量和非周期分量的相关性。相关性指标越接近 1, 则说明两者越接近。

令相量暂态录波数据为 $x(n)$, 相量采样点处对应的实际暂态录波曲线上的数据点为 $y(n)$, 数据长度为 N 。两条曲线的相关性指标定义为

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x(n)^2 \cdot \sum_{n=1}^N y(n)^2}} \quad (2)$$

$\rho_{xy}=1$ 时两曲线最相关, $|\rho_{xy}|$ 接近 0 时两曲线最无关。两条曲线越相关, 说明相量暂态录波曲线越接近实际暂态录波曲线, 即 PMU 的动态量测精度越高。

(2) 相量算法快速响应指标

相量算法快速响应指标用于评价由于相量算法本身造成的相量相关量测对电力系统事件的响应延迟或超前。

令 $x_0(n)$ 为相量暂态录波曲线, 长度为 N , $x_0(n)$

为对应时间的实际暂态录波曲线。 $y_i(n)$ 为将 $y_0(n)$ 数据序列左移 i 个步长(例如每步长可为1个或 m 个录波采样点)时在上述窗口内相量采样点处折算的瞬时值数据序列,当 i 为负值时表示右移。按式(3)计算移动后的 $y_i(n)$ 与 $x_0(n)$ 的相关性指标。

$$\rho_{xy}(i) = \frac{r(i)_{xy}}{\sqrt{r(0)_{xx}r(i)_{yy}}} = \frac{\sum_{n=1}^N x_0(n)y_i(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x_0(n)^2 \cdot \sum_{n=1}^N y_i(n)^2}} \quad (3)$$

将 $y_i(n)$ 按步长左移和右移若干次,计算出各次的 $\rho_{xy}(i)$ 。当 $\rho_{xy}(i)$ 达到最接近1的极大值点时,求得 i_{\max} ,计算得到 $x_0(n)$ 相对于 $y_0(n)$ 延迟时间大约为 $L = |i_{\max}| \cdot m$ 个采样点。即PMU相量算法快速响应时间为 L 。

(3) 纯幅值变化指标

纯幅值变化指标即信号缩放指标,该指标去掉了相量计算带来的信号延迟和零点上下漂移(或直流成分)对信号的影响。纯幅值指标越接近1,代表幅值缩放程度越小。

指标计算公式如式(4),其中相量暂态录波数据为 $x(n)$,相量采样点处对应的实际暂态录波曲线上的数据点为 $y(n)$,数据长度为 N 。 $\overline{x(n)}_N$ 为 $x(n)$ 的平均值, $y(n-L)$ 表示 $y(n)$ 左移 L 个采样点得到的采样点, $\overline{y(n-L)}_N$ 为将 $y(n)$ 左移 L 个采样点后在长度为 N 的窗口内数值点的平均值。 k_{xy} 越接近于1,则幅值缩放程度越小。

$$k_{xy} = \frac{\sum_{n=1}^N \left| \frac{y(n-L) - \overline{y(n-L)}_N}{x(n) - \overline{x(n)}_N} \right|}{N} \quad (4)$$

(4) 综合相似性指标

即PMU量测质量的综合指标,同时考虑了PMU测量的相位延迟、幅值缩放以及其他非周期成分影响。当 s_{xy} 接近于1时,两条曲线最相似,则相量暂态录波曲线越接近实际暂态录波曲线,即PMU的动态量测精度越高。

$$s_{xy} = \begin{cases} k_{xy} \rho_{xy}, & \text{若 } k_{xy} \leq 1 \\ \frac{1}{k_{xy}} \rho_{xy}, & \text{若 } k_{xy} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

2 基于瞬时值比较的PMU动态性能评测方法

基于瞬时值比较的PMU动态性能评测方法的具体步骤如下:

步骤1: 量测量获取。获取待评测PMU在电网

发生满足要求的大扰动期间的特征动态时段的一段相量量测数据和对应的故障录波数据。这里的故障录波数据可以由PMU装置本身记录得到的,或者来自于带有高精度时标的故障录波器,其时标精度不低于PMU的时标精度,称为实际暂态录波曲线。

步骤2: 根据PMU相量测量得到的幅值 A ,相角 Φ ,求得对应的瞬时值 $\sqrt{2}A \cos \Phi$,称根据相量计算出的瞬时值构成的录波曲线为相量暂态录波曲线。

步骤3: 计算相量暂态录波曲线与实际暂态录波曲线的相关性指标。

步骤4: 计算相量算法快速响应指标 L 。

步骤5: 计算纯幅值变化指标。在步骤4的基础上,进一步计算纯幅值指标。

步骤6: 计算相似性指标,即PMU量测质量的综合指标。

方法的流程框图如图1所示。

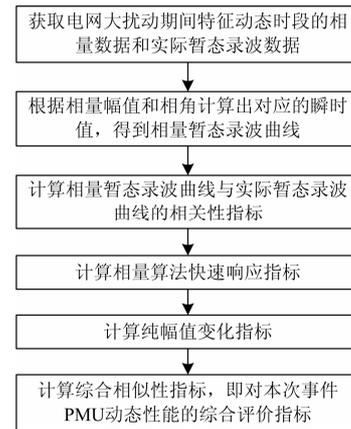


图1 基于瞬时值比较的PMU动态性能评测方法流程图

Fig. 1 Diagram for instantaneous value comparison based PMU dynamic characteristics evaluation method

本方法将大扰动的特征动态时段的PMU相量数据还原为暂态录波数据,然后借助所提出的指标找出相量暂态录波数据与实际录波数据在相关性、相量算法快速响应、纯幅值缩放和总体相似性上的差异,从而对PMU的动态量测性能进行定量的评价。相对于已经提出的其他PMU性能评价方法,本方法一方面仅利用工程现场实测数据实现了PMU性能的评价,不需要专门的测量装置和实验环境,更能反映PMU在现场复杂情况下的动态性能;另一方面将PMU相量测量结果还原为暂态录波数据并直接与最原始的暂态录波结果相比较,克服了对不同PMU相量数据直接做比较时,暂态过程中

相量定义的不同所造成的干扰, 以及对实际现场数据难以确定标准相量计算结果的问题。

3 实际算例分析

本部分算例采用华北电网广域测量系统所采集的实际故障时刻数据, 利用在线评测系统对故障期间 PMU 动态性能进行评测, 并对评测结果进行分析。

华北电网某电厂某线路于 2014 年 8 月 20 日 15 点 34 分 28 秒发生一次短路告警事件, 事件触发 PMU 子站记录下故障前后共 2 s 的数据, 录波数据采样率为 4 800 帧/s, 按照相量电压幅值最低点时刻选取之前 0.06 s 到之后 0.2 s, 共 0.26 s 的特征动态录波曲线用于动态性能评测指标的计算。同时时间的 PMU 相量数据也上传到主站存储到历史数据库中, 相量数据采样率为 50 帧/s。相量数据曲线如图 2 所示, 实际暂态录波曲线如图 3 所示, 分别给出了特征动态时段的曲线以及全扰动过程的曲线。

首先将特征动态过程的相量数据转换为瞬时数据, 得到相量暂态录波曲线, 如图 4 所示。

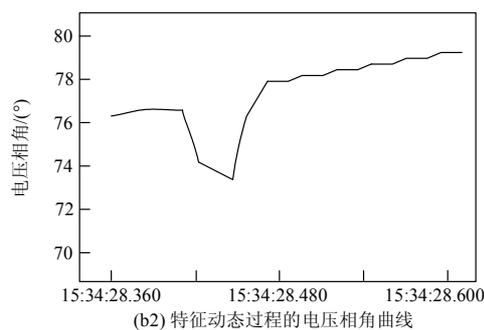
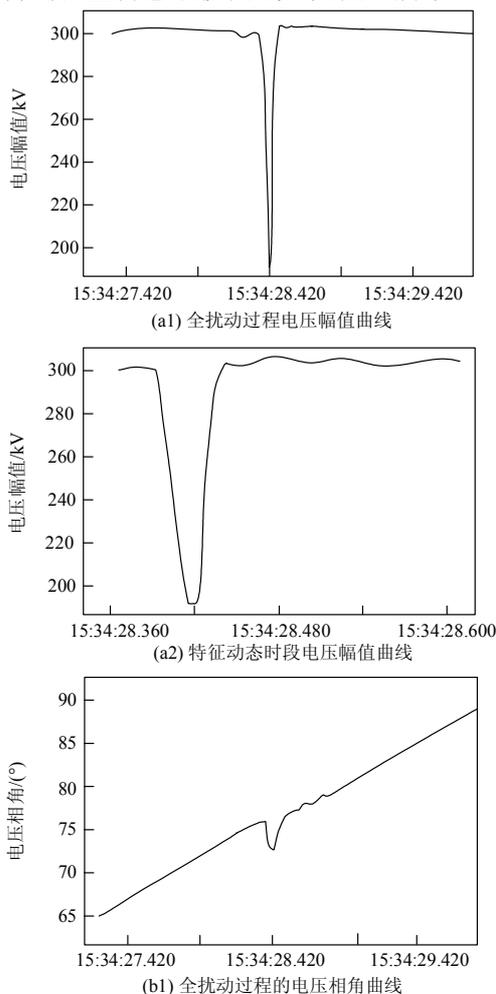


图 2 相量数据曲线

Fig. 2 Phasor data graph

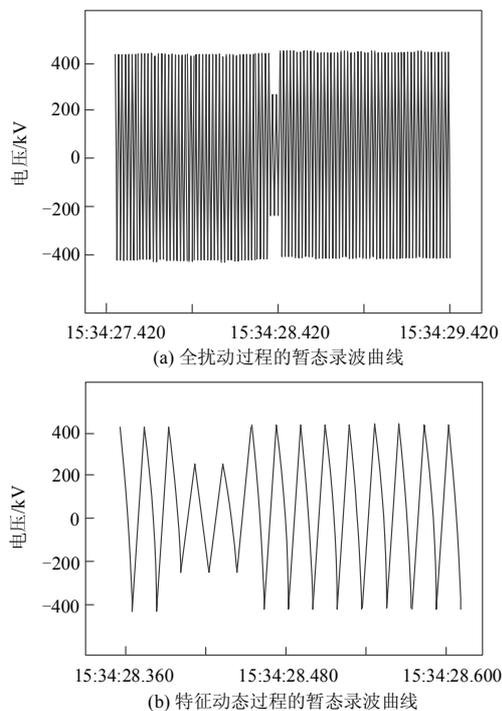


图 3 实际录波数据曲线

Fig. 3 Real sampling data graph

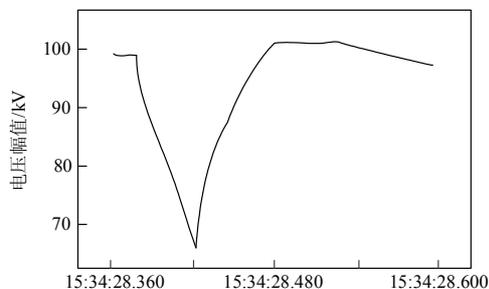


图 4 特征动态过程中的相量暂态录波曲线

Fig. 4 Phasor sampling data graph during featured dynamic period

与实际暂态录波曲线比较, 计算指标如下:

(1) 相关性指标

计算相关性指标 $\rho_{xy}=0.974$, 说明相量暂态录波曲线与实际暂态录波曲线比较接近。

(2) 相量算法快速响应指标

以录波数据步长为移动步长, 依次左移 40 ms, 右移 80 ms, 得到一系列相关性指标。

其中最接近 1 的值是 0.993, 位置是录波数据右移动 $N=156$ 个步长。相量算法快速响应指标 $L=32$, 即 PMU 相量数据相对于录波数据有 32 ms 的延迟。

(3) 纯幅值变化指标

在计算出快速响应指标 $L=32$ 后, 进一步计算纯幅值变化指标 $k_{xy}=1.137$ 。说明相量暂态录波数据和实际暂态录波数据在幅值上有一定的差异。

(4) 综合相似性指标

综合相关性指标和纯幅值变化指标, 计算得到综合相似性指标为 0.857。综合相似性指标反映了该 PMU 在这次暂态过程中整体动态性能。

在实际应用中, 可经过一段时间的动态性能指标计算, 得到相似性指标的平均值。若某个 PMU 量测的相似性指标的平均值偏离 1 较多, 则说明相应的 PMU 在动态过程中的测量精度较差, 即 PMU 的动态性能较差。

4 在线评测系统

由上述理论分析和实验可知, 有必要研发 PMU 动态性能在线评测系统, 用于在实际电网运行过程中实时监测 PMU 的动态量测性能。本文基于智能电网调度技术支持平台和广域测量系统, 设计了基于瞬时值比较的 PMU 动态性能在线评测系统。该系统可自动截取电网扰动事件, 获取对应特征动态时段的相量数据和录波数据, 完成对扰动期间 PMU 动态性能的评价, 并提供友好的人机展示界面。图 5 为系统软件方案。

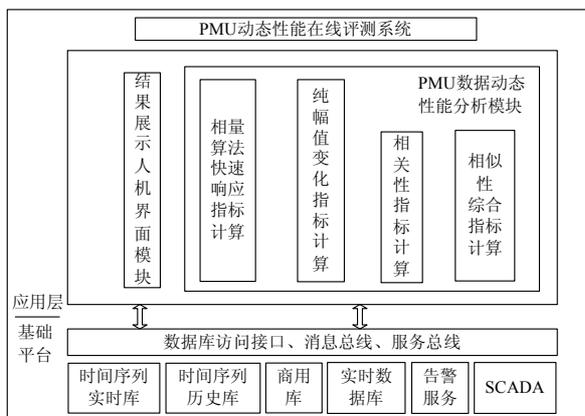


图 5 在线评测系统框架

Fig. 5 On-line evaluation system diagram

系统软件方案给出了基于瞬时值比较的 PMU 动态性能在线评测软件系统框架图, 该系统总体分为 PMU 数据动态性能分析模块、结果展示人机界面模块。

其中 PMU 数据动态性能分析模块的流程图如图 6 所示。

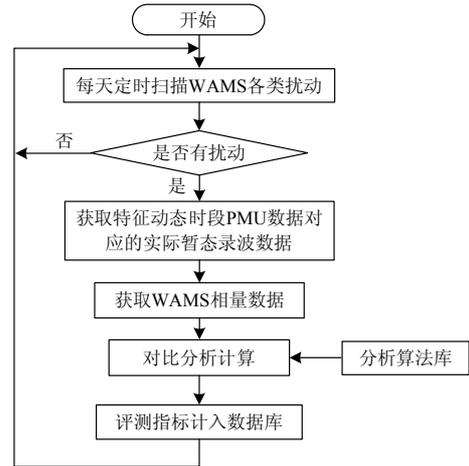


图 6 PMU 数据动态性能分析模块流程图

Fig. 6 PMU dynamic characteristic analysis diagram

数据动态性能分析模块实时运行, 定时查看 WAMS 系统中是否有扰动告警。检测到满足要求的告警后, 系统自动获取扰动期间特征动态时段的相量数据和暂态录波数据, 依据本文提出的评测方法对数据进行评测, 并将评测结果记入到结果数据库中进行保存, 供界面查看。

结果展示人机界面模块负责展示每次扰动过程中 PMU 动态性能分析结果及数据曲线。

5 结语

本文提出的一种基于瞬时值比较的 PMU 动态性能评测方法, 将大扰动的特征动态时段的 PMU 相量数据还原为暂态录波数据, 与 PMU 实际录波数据比较, 找出两者在相关性、相量算法快速响应、幅值缩放和总体相似性上的差异, 从而对 PMU 的动态量测性能进行全面定量的评价。此外, 基于瞬时值比较的原理实现了 PMU 动态性能的绝对评价, 克服了以往基于不同 PMU 相量数据比较原理的方法中, 由于暂态过程中相量定义或算法的不同所造成的干扰, 以及对实际现场数据难以确定标准相量计算结果的问题。相对于其他的基于瞬时值比较的评价方法, 本文方法具体给出了相量动态量测在哪些特性上产生了误差。

采用实际现场 PMU 数据验证了上述理论分析

的正确性和可行性。进一步, 为了在实际电网运行过程中实时监控 PMU 的动态性能, 设计并实现了 PMU 动态性能的在线评测系统。

参考文献

- [1] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [2] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.
DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80.
- [3] 张道农, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外 PMU 静态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 140-145.
ZHANG Daonong, LIU Hao, BI Tianshu, et al. Comparison of the PMU static and dynamic standards and evaluation methods between Chinese standards and IEEE[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 140-145.
- [4] IEEE Power System Relaying Committee. IEEE Std C37.118-2005 IEEE standard for synchrophasors for power systems[S]. 2006.
- [5] 国家调度电力通信中心. Q/GDW 131-2006 电力系统实时动态监测系统技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2006.
National Electric Power Dispatching and Communication Center. Q/GDW 131-2006 technology guidance of power system real time dynamic monitoring system[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2006.
- [6] WAMS 及时间同步工作组. GB/T 26862-2011 电力系统同步相量测量装置检测规范[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011.
WAMS & Time Synchronization Working Group. GB/T 26862-2011 test specification for synchrophasor measurement unit for power system[S]. Beijing: Standardization Administration of People's Republic of China, 2011.
- [7] IEEE Standard C37.118.1-2011 IEEE standard for synchrophasors for power systems[S]. 2011.
- [8] 毕天姝, 刘灏, 杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.
BI Tianshu, LIU Hao, YANG Qixun. Dynamic performance of PMU algorithm and its testing system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 62-67.
- [9] 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.
- [10] 王茂海, 鲍捷, 齐霞. 相量测量装置动态测量精度在线检验[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 39-44.
WANG Maohai, BAO Jie, QI Xia. Online assessment of phasor measurement unit's performance based on sample data[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 39-44.
- [11] 毕天姝, 刘灏, 吴京涛, 等. PMU 电压幅值与频率量测一致性的在线评估方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 21-26.
BI Tianshu, LIU Hao, WU Jingtao, et al. On-line assessment on voltage consistency and frequency consistency of PMU measurement under steady state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 21-26.
- [12] 王茂海, 牛四清, 张哲, 等. 一种 PMU 动态性能的在线检测方法及其装置: 中国, CN201410233902.X[P].

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2015-01-15

作者简介:

段刚(1972-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为广域测量系统, 智能电网调度自动化等;

王茂海(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为广域同步动态监测技术及基于广域同步监测信息的应用分析技术;

陈程(1989-), 女, 工程师, 主要研究方向为广域测量系统, 同步相量测量等. E-mail: chen Cheng@sf-auto.com

(编辑 周金梅)