

电网实际运行环境中相量测量装置性能在线评价方法

王茂海¹, 赵玉江¹, 齐霞², 孙昊³

(1. 国家电网公司华北分部, 北京 100053; 2. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100005;
3. 国网新源控股有限公司, 北京 100053)

摘要: 广域测量系统(WAMS)的各项应用功能的可靠性高度依赖于相量测量装置(PMU)的数据质量。目前, PMU性能评价主要在实验中离线进行, 性能指标主要采用综合矢量误差(TVE)。TVE作为一种离线评价指标, 并没有将频率测量误差考虑在内, 并且只适合于在被测信号已知的情况下使用。随着PMU布点越来越普遍, 迫切需要建立一种在电网实际运行环境下的在线评价PMU测量性能的综合指标。PMU的主要任务是真实地反映交流电压(电流)输入信号的频率、幅值、相位等相量特征, 如果利用PMU输出的测量结果重新构造一个正弦信号, 这一正弦信号与PMU输入信号之间的差别信号的频谱中应不包含PMU输出的信号频率。基于这一思路, 提出了综合相量误差(TPE)作为PMU性能的在线评价指标。TPE的优点是不受噪声、谐波和动态变化分量的影响, 能够在输入信号未知的情况下对PMU的测量性能进行评价。算例验证了该方法的有效性。

关键词: 电力系统; 电力系统测量; 相量测量装置; 广域测量系统; 性能评价

Proposal of index for PMU field performance evaluation in actual operating environment

WANG Maohai¹, ZHAO Yujiang¹, QI Xia², SUN Hao³

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China; 2. State Grid JIBEI Electric Economic Research Institute, Beijing 100005, China; 3. State Grid Xin Yuan Company Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: The reliability of Wide Area Measurement System (WAMS) advanced applications is highly dependent on the accuracy of PMU data. Presently, Total Vector Error (TVE) is usually adopted as an index for Phasor Measurement Unit (PMU) performance evaluation. However, TVE does not take frequency error into account, and is applicable only in laboratory, where the characteristics of test signal are given. With more and more PMUs put into field operation, it is a pressing task to develop a comprehensive index to evaluate PMU's field performance. The objective of phasor measurement is to truly reflect the characteristics of sinusoidal signals in power system. Suppose that a sinusoidal signal is reconstructed from PMU measurements. In an ideal case, the difference between the reconstructed signal and original signal should not contain any components of fundamental frequency. Based on this idea, Total Phasor Error (TPE) is proposed to evaluate PMU's field performance. Taking amplitude error, phase angle error, and frequency error into account, TPE is a comprehensive index hardly affected by harmonics and noise. It's not necessary to know the characteristics of original signal to calculate TPE; hence, TPE is applicable not only in lab test, but also for field evaluation. Examples based on PMU data at North China Grid are given to demonstrate the reasonability and feasibility of TPE.

Key words: power systems; power system measurements; Phasor Measurement Unit (PMU); Wide Area Measurement System (WAMS); performance evaluation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0086-07

0 引言

随着可再生能源的持续接入和电网规模的不断扩大, 电网运行方式越来越多变, 电网运行的动态

行为也越来越复杂。如何实时把握电网的运行状态, 提升电网运行的安全稳定裕度、供电可靠性和运行效率, 通过提供完备的监视、防御和优化控制以减少大停电事故的发生, 成为了备受瞩目的焦点问题。

基于授时精度优于 1 μ s 的高精度 GPS/北斗等时钟信号, 由众多相量测量装置(PMU)组成的广域

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52011013508K)

测量系统(WAMS)能够实现电网运行数据的同步采集, 从而帮助电网运行人员提高其对电网运行的动态情况的实时感知能力, 及早做出有利于电网稳定运行的控制决策。

随着 PMU 布点规模越来越广, 基于广域相量测量的电网运行监测分析功能也越来越实用, 电力系统科研工作者和电网运行人员对广域测量系统(WAMS)的重视程度越来越高^[1-6]。WAMS 的各项应用功能的可靠性高度依赖于相量测量装置(PMU)的数据质量。科研和生产单位的相关人员在 PMU 量测算法性能改进方面进行了大量的研究^[7-9]。但到目前为止, 评价 PMU 性能的指标都是针对实验室离线测试的, 包括频率测量误差、频率变化率误差以及综合矢量误差(TVE)等^[10-14], 无法应用于实际运行中的在线测试。文献[10]对现有国内外 PMU 静态测试方法及性能评价方法进行了介绍, 并重点针对 TVE 进行了分析。这些评价方法均为离线评价方法, 离线评价指标的应用前提是必须事先准确了解 PMU 输入信号的真实特征, 从而与 PMU 输出的测量结果进行比对。然而, 在现场环境下的电网运行动态过程难以在实验室中复现, 无法准确掌握 PMU 在现场真实环境下的输入信号的信号特征, 因此离线评价指标完全没有办法扩展到实际负荷情况下的在线应用。文献[11]提出了基于实测相量数据统计特性的 PMU 性能评价方法。该方法能够应用于 PMU 性能的在线评价, 但是只能基于统计数据给出 PMU 稳态性能的定性评价结果, 无法适用于动态过程且不能给出定量结果。

我国《电力调度自动化系统运行管理规程》(DLT516-2006)、《交流采样测量装置运行检验管理规程》(Q/GDW 140-2006)等电力行业标准及国网企业标准均要求 PMU 投入运行后需定期进行校验。由于现有技术规范和测试标准^[10-14]均无法应用于实际负荷下的在线评估, 因此有必要建立 PMU 性能在线评价方法, 评估 PMU 在实际运行环境中对电力系统实际运行工况的测量精度。

PMU 的输入信号中主要是交流工频量(电压、电流)。PMU 的主要任务是真实地反映其输入信号中交流工频量的频率、幅值、相位等相量特征, 如果利用 PMU 输出的测量结果重新构造一个正弦信号, 那么这一正弦信号与 PMU 输入信号之间的差别信号中不应包含工频量的成份, 也不包含频率为 PMU 频率测量结果的成份。基于这一思路, 本文提出了综合相量误差(TPE)作为 PMU 性能的在线评价指标。TPE 的优点是不受噪声、谐波和动态变化分量的影响, 能够在输入信号未知的情况下对 PMU

的测量性能进行评价。

1 同步相量测量的概念

WAMS 系统在数据采集方面最显著的特点是能够实现基于 PMU 的全网同步数据采集。PMU 作为 WAMS 系统的关键组成部分, 其核心特征包括: 基于标准时钟信号的同步相量测量; 失去标准时钟信号的守时能力; PMU 与主站之间能够实时通信并遵循有关通信协议。

在交流电力系统中, 电压和电流信号可以用式(1)表示。

$$x(t) = \sqrt{2}X \cos(2\pi ft + \varphi) + \Delta x(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 是具有正弦波波形的电压或电流信号; X 是有效值; f 是频率; φ 为相角。 $\Delta x(t)$ 包括噪声、谐波、动态和暂态变化分量等。

不考虑频率变化的情况下, 式(1)中包含的正弦波信号可以表示为一个矢量(相量), 即

$$\dot{X} = X e^{j\varphi} = X_r + jX_i = X(\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (2)$$

由于电网潮流分布完全取决于各节点电压相量, 因此, 相量测量应基于同一时间基准。根据文献[12-14]的定义, “式(1)信号 $x(t)$ 的同步相量可以表示为式(2)所示的形式, 其中 φ 是该信号相对于一个与 UTC 时间同步的标准工频余弦函数的瞬时相位”。

2 综合矢量误差(TVE)及其缺陷

2.1 综合矢量误差(TVE)^[13]

对式(1)所示的信号, 假设 PMU 输出的相量测量结果为

$$\dot{X}_m = X_m e^{j\varphi_m} = X_{m_r} + jX_{m_i} = X_m(\cos\varphi_m + j\sin\varphi_m) \quad (3)$$

式中, 下标“m”表示 PMU 测量结果。

PMU 测量结果 \dot{X}_m 与 $x(t)$ 的真实相量 \dot{X} 之间的差异如图 1 所示。

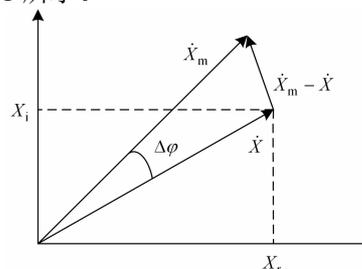


图 1 \dot{X}_m 与 \dot{X} 之间的关系

Fig. 1 Relationship between \dot{X} and \dot{X}_m

图 1 中, $\Delta\varphi$ 为相角测量误差, 即 $\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi$ 。TVE 的定义为

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_{mr} - X_r)^2 + (X_{mi} - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (4)$$

式(4)中:下标“r”表示实轴(横轴)分量;下标“i”表示虚轴(纵轴)。

2.2 综合矢量误差的局限性

式(4)所示的综合矢量误差可以用另外一种形式表达。

$$TVE = \frac{|(X_{mr} + jX_{mi}) - (X_r + jX_i)|}{|X_r + jX_i|} = \frac{|\dot{X}_m - \dot{X}|}{|\dot{X}|} \quad (5)$$

采用综合矢量误差(TVE)指标进行PMU性能评价时,流程示意图如图2所示。

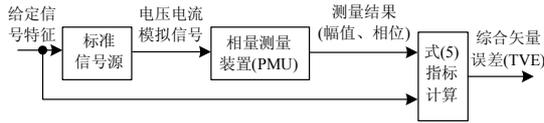


图2 采用TVE对PMU性能进行评价的流程示意图

Fig. 2 Flow chart of PMU performance evaluation using TVE

由式(4)、式(5)和图2可以看出,利用TVE来衡量PMU的测量性能具有以下局限性:

1) 要计算TVE,首先要准确地掌握输入信号中工频正弦量的真实幅值 X 和相角 φ ,这只有在试验室环境中利用可设定的标准信号源做虚负荷测试时才能满足。

2) 真实的电网每时每刻都处在动态变化之中,PMU的使命也是要尽可能准确地反映电网的动态过程,因此,对PMU在运行环境下的性能评价就比实验室中的离线测试显得更加重要。然而,现场环境下的电网运行过程难以在实验室中复现,尤其是电网动态和暂态过程中,电压电流信号中包含大量的谐波、交直流衰减分量和振荡分量,甚至还可能包括谐振成份等,准确给出PMU输入信号的信号特征也是不可能完成的任务(即使将现场采集到的录波数据在实验室中复现,但也无法用准确的解析的形式给出这一录波数据的信号特征)。因此,对于在现场真实运行环境下的实际负荷测试,由于无法准确掌握输入信号的真实特征,从而导致TVE无法应用。

3) 频率与幅值和相位一起构成了正弦量的三要素,频率测量与幅值和相位测量具有同等的重要性^[15-17]。同调机组分群、惯性中心的计算等都依赖于频率测量的准确性。频率测量与幅值和相位测量是耦合在一起的。然而,TVE只考虑了幅值和相角的综合误差,而将频率误差单独作为一项指标。因此,综合矢量误差TVE其实不够“综合”。

3 一种适用于现场测试的PMU性能在线评价指标——综合相量误差(Total Phasor Error, TPE)

3.1 PMU在线性能评价的基本原则

PMU相量测量的目的是为了准确地提取其输入信号中工频量的相量特征,包括幅值 X 、频率 f 和相位 φ 。因此PMU在线性能的评价原则应该是:理想情况下,PMU的输出应该准确地反映PMU的输入。

假设PMU对其输入信号 $x(t)$ 的相量测量结果为:幅值 X_m ,相位 φ_m ,频率 f_m 。设 $x_m(t)$ 是利用 X_m 、 φ_m 和 f_m 构造的一个正弦信号(以下简称重构信号),如式(6)所示。

$$x_m(t) = \sqrt{2}X_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) \quad (6)$$

在理想情况下,重构信号 $x_m(t)$ 与真实信号 $x(t)$ 中包含的工频正弦量应完全相同。即

$$x_m(t) = \sqrt{2}X_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) = \sqrt{2}X \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (7)$$

$$\Delta x_m(t) = x(t) - x_m(t) = \Delta x(t) \quad (8)$$

式(8)意味着基于PMU测量结果的重构信号与PMU输入信号之间的差异信号 $\Delta x_m(t)$ 中只包含噪声、谐波等与工频信号无关的分量。反之,如果差异信号 $\Delta x_m(t)$ 中包含了工频分量,则可以断定PMU的测量结果没有真实地反映PMU的输入信号的特征。

根据这一思路,给出PMU动态性能的综合评价指标:综合相量误差(TPE)。

3.2 综合相量误差(TPE)

如果PMU测量结果准确地反映了输入信号中的工频正弦量的特征,则差异信号 $\Delta x_m(t)$ 中不应该包含频率为工频分量真实频率 f 的分量。

由于 $\Delta x_m(t)$ 包含频率为 f_m 的信号与频率为 f 的信号之间的差异信号,因此可以将测量结果 $x_m(t)$ 看作输入,将原始信号 $x(t)$ 看作是输出,在理想条件下,差异信号 $\Delta x_m(t)$ 中也不应该包含频率为 f_m 的分量,即

$$\int_0^{T_m} \sin(2\pi f_m t) \cdot \Delta x_m(t) dt = 0 \quad (9)$$

$$\int_0^{T_m} \sin(2\pi f_m t) \cdot \Delta x(t) dt = 0$$

$$\int_0^{T_m} \cos(2\pi f_m t) \cdot \Delta x_m(t) dt = 0 \quad (10)$$

$$\int_0^{T_m} \cos(2\pi f_m t) \cdot \Delta x(t) dt = 0$$

以上两式中, $T_m = 1/f_m$ 。

式(9)和式(10)表明:如果PMU测量结果准确地

反映了输入信号中的工频正弦量的特征, 则差异信号 $\Delta x_m(t)$ 中不应该包含频率为 f_m 的分量。也就是说, 理想情况下, $\Delta x_m(t)$ 在 $\sin(2\pi f_m t)$ 和 $\cos(2\pi f_m t)$ 上的投影应该为零。由式(9)和式(10), 给出综合相量误差(TPE)的确定方法如下:

第一步: 计算 $\Delta x_m(n)$ 的离散傅立叶变换(DFT), 结果中的基频分量为

$$\Delta \dot{X} = \frac{2}{N_m} \cdot \sum_{n=0}^{N_m-1} \Delta x_m(n) e^{-j \frac{2\pi}{N_m} n} = \frac{2}{N_m} \cdot \sum_{n=0}^{N_m-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N_m} n} - \frac{2}{N_m} \cdot \sum_{n=0}^{N_m-1} x_m(n) e^{-j \frac{2\pi}{N_m} n} \quad (11)$$

式中: T_s 为 PMU 的采样间隔; $\omega_m = 2\pi f_m T_s$; $N_m = \text{round}[T_m/T_s]$ 。

$\Delta \dot{X}$ 的实部为 $\Delta x_m(t)$ 在 $\cos(2\pi f_m t)$ 上的投影, $\Delta \dot{X}$ 的虚部为 $\Delta x_m(t)$ 在 $\sin(2\pi f_m t)$ 上的投影。

第二步: 对 PMU 测量结果的误差进行综合评价, 定义 TPE 为

$$TPE = \frac{|\Delta X|}{X} \approx \frac{|\Delta \dot{X}|}{X_m} \quad (12)$$

应该注意到, 实际生产应用中, PMU 的采样频率高达 4 800 Hz 甚至 10 000 Hz, T_m/T_s 取整对 $|\Delta X|$ 的计算结果影响很小^[18-19]。实际的 PMU 在幅值测量方面有较高的准确度(一般情况下幅值相对误差均小于 1%), 式(12)中, 分母用 X_m 代替 X 引起的相对误差很小。

采用综合相量误差(TPE)指标进行 PMU 性能评价时, 流程示意图如图 3 所示。

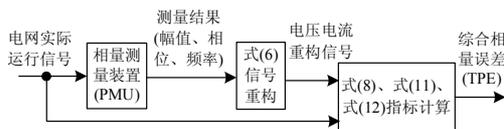


图 3 采用 TPE 对 PMU 性能进行评价的流程示意图

Fig. 3 Flow chart of PMU performance evaluation using TPE

3.3 综合相量误差(TPE)与综合矢量误差(TVE)的比较

假定被测信号(PMU 输入信号)为

$$x(t) = \sqrt{2} X \cos(\omega t + \varphi) \quad (13)$$

如果式(13)中 X 和 φ 已知, 则可以计算 TVE 如下:

$$TVE = \frac{|\dot{X}_m - \dot{X}|}{|\dot{X}|} = \frac{|X_m e^{j\varphi_m} - X e^{j\varphi}|}{X} \quad (14)$$

如果 PMU 的频率测量误差为零, 即 $\omega_m = \omega$, 则

$$x_m(t) = \sqrt{2} X_m \cos(\omega t + \varphi_m) \quad (15)$$

$$\Delta x_m(t) = \sqrt{2} X \cos(\omega t + \varphi) - \sqrt{2} X_m \cos(\omega t + \varphi_m) \quad (16)$$

$$\Delta \dot{X} = \frac{2}{N_m} \cdot \sum_{n=0}^{N_m-1} \Delta x_m(n) e^{-j \frac{2\pi}{N_m} n} = \dot{X} - \dot{X}_m \quad (17)$$

$$TPE = \frac{|\dot{X} - \dot{X}_m|}{X_m} = \frac{X}{X_m} \cdot TVE \quad (18)$$

根据式(18)可知, 如果频率测量误差为零, TPE 与 TVE 的评价结果基本一致。但两者在计算过程中的差别很大:

1) TVE 的计算需要准确地了解输入信号的幅值 X , 角频率 ω 和相位 φ , 这在现场运行环境中是不可能得到的;

2) TPE 的计算只需要了解 PMU 输入信号的采样值, 不需要了解其真实幅值、角频率和相位。

对比图 2 和图 3, 可以进一步总结 TPE 的优点如下:

1) 适用于现场复杂运行条件下的在线评价。

2) 评价原则适用于各种动态和暂态过程。计算结果不受谐波和噪声的影响, 也适用于工频分量存在调频、调幅、调相及突变等动态和暂态过程。

3) 综合考虑了频率测量误差、幅值测量误差和相位测量误差。

4 算例

我国基于 PMU 构建的 WAMS 系统在设计上均具备部分录波功能, 通过在 WAMS 主站人为触发, 或者在 PMU 子站通过告警事件触发, 均可触发 PMU 保存采样数据, 并可响应 WAMS 主站的召唤命令, 将采样数据上传至主站。

本文算例均采用华北电网 PMU 在实际运行中的采样数据及其对应的相量测量结果数据, 包括:

1) 48 000 个采样数据(对应时长为 10 s);

2) 与采样数据对应的 1 000 帧相量数据(对应时长也为 10 s)。

基于以上数据, 算例部分开展了以下工作:

1) 对 PMU 上传的采样数据和相量测量结果进行综合相量误差(TPE)计算;

2) 利用文献[18]和文献[19]的算法对采样数据进行相量计算, 然后对计算结果进行综合相量误差(TPE)计算。

为了方便表述, 本部分对 PMU 采样数据简称为“采样数据”, 对 PMU 测量结果简称为“PMU 数据”, 对利用文献[18]和文献[19]算法计算得到的相量数据简称为“计算数据”。

图 4 给出了采样数据与基于 PMU 数据的重构数据之间的差别 $\Delta x_m(t)$ 。为了便于看清细节,图 4 中的时间范围为 100 ms。通过图 4 可以直观地看出,差别信号包含频率接近于工频(50 Hz)的分量。

图 5 给出了 PMU 数据的综合相量误差计算结果。

图 6 给出了采样数据与基于计算数据的重构信号之间的差别。为了便于看清细节,图 6 中时间轴的时间范围也为 100 ms。通过图 6 可以直观地看出,差异信号中基本不包含工频 (50 Hz) 的分量。

图 7 给出了计算数据的综合相量误差计算结果。将图 7 与图 5 相比,可以看出,计算数据的准确度要明显高于 PMU 数据。

图 8 给出了 PMU 数据中的频率测量结果与计算数据中的频率计算结果。可以看出,两者的频率计算结果相近(PMU 数据在从子站上传到主站前进行了滤波,因此看起来要相对平滑)。

将图 7 与图 8 比较,可以看出,工频信号的频率偏移(工频信号的实际频率与额定频率 50 Hz 的差

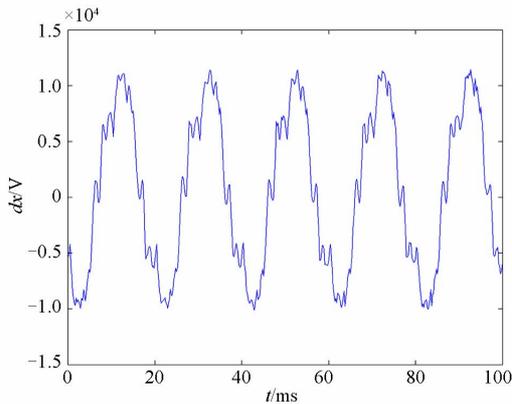


图 4 基于 PMU 数据的重构信号与采样信号的差别
Fig. 4 Difference between sample data and reconstructed data from PMU phasor measurements

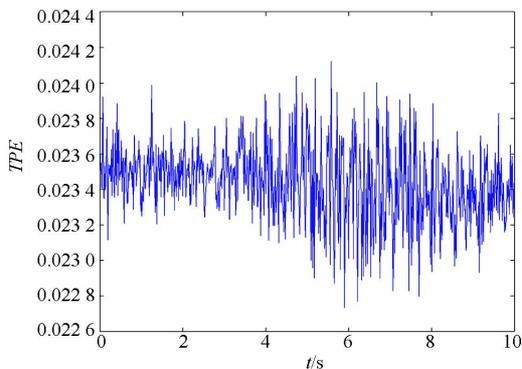


图 5 PMU 数据的 TPE 计算结果
Fig. 5 Performance index (TPE) of PMU data

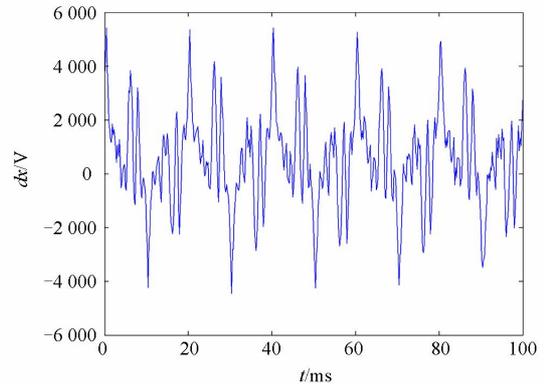


图 6 基于计算数据的重构信号与采样信号的差别
Fig. 6 Difference between sample data and reconstructed data from calculated data

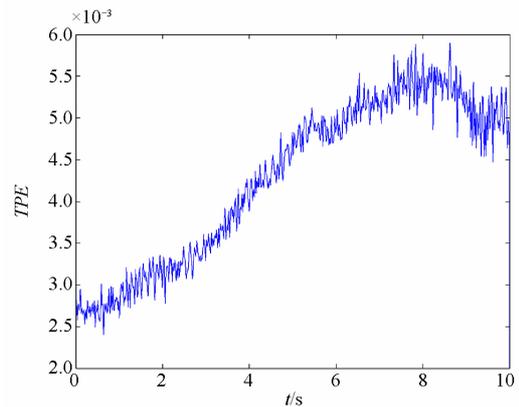


图 7 计算数据的 TPE 计算结果
Fig. 7 Performance index (TPE) of calculated data

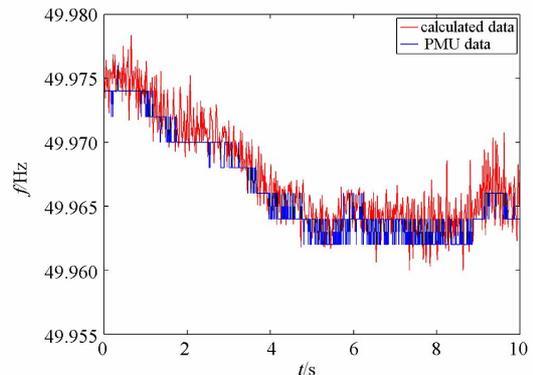


图 8 PMU 数据与计算数据间的频率计算结果比较
Fig. 8 Comparison of frequency calculation results between PMU data and calculated data

值)越大,计算数据的 TPE 越大,也就是说,计算数据的 TPE 主要是由于非同步采样引起的。

比较图 5 和图 8,可以看出,工频信号的频率偏移越大,PMU 数据的 TPE 也越大,但影响 PMU

数据 TPE 数值的因素不仅仅是非同步采样, 也包括其他原因(如算法精确程度等)。

以上算例表明, 综合相量误差(TPE)能够应用于现场分析, 给出频率、幅值、相位的综合误差评价, 并给出有效的减少误差提高测量准确度的指导意见。

5 结论

我国《电力调度自动化系统运行管理规程》(DLT516-2006)、《交流采样测量装置运行检验管理规程》(Q/GDW 140-2006)等电力行业标准及国网企业标准均要求 PMU 投入运行后需定期进行校验。

PMU 相量测量的目的是为了准确地反映其输入信号中工频分量的相量特征。基于这一思想, 本文给出了 PMU 在线性能的评价原则: 理想情况下, PMU 的输出应该准确地反映 PMU 的输入。在此基础上, 建立了 PMU 在线性能综合评价指标——综合相量误差(TPE), 与现有评价指标 TVE 相比, TPE 具有以下优点:

1) 适用于现场复杂运行条件下的在线评价, 具有实用性。

2) 评价原则适用于各种动态和暂态过程。计算结果不受谐波和噪声的影响, 也适用于工频分量存在调频、调幅、调相及突变等动态和暂态过程。

3) 综合考虑了频率测量误差、幅值测量误差和相位测量误差。

参考文献

- [1] 孙昊, 王茂海, 齐霞. 基于PMU实测数据的同步发电机参数在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 31-36.
SUN Hao, WANG Maohai, QI Xia. Synchronous generator parameters identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 31-36.
- [2] 丁涛, 董柏峰, 顾伟, 等. 基于PMU的电压稳定动态线性化指标优化切负荷算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 27-33.
DING Tao, DONG Bofeng, GU Wei, et al. Optimization of a load shedding scheme using dynamic voltage stability linearized index based on PMU[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 27-33.
- [3] 罗建, 李阎君, 王一夫, 等. 一种基于PMU降阶的系统受扰轨迹预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 41-45.
LUO Jian, LI Yanjun, WANG Yifu, et al. A perturbed trajectory prediction based on the reduced order of PMU[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 41-45.
- [4] 谢惠藩, 张尧, 林凌霄, 等. 基于时间最优和自抗扰跟踪的广域紧急直流功率支援控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 145-153.
XIE Huifan, ZHANG Yao, LIN Lingxue, et al. Emergency DC power support control based on time-optimal control and auto-disturbance rejection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 145-153.
- [5] 顾雪平, 李扬, 吴献吉. 基于局部学习机和细菌群体趋药性算法的电力系统暂态稳定评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 271-279.
GU Xueping, LI Yang, WU Xianji. Transient stability assessment of power systems based on local learning machine and bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 271-279.
- [6] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [7] 麦瑞坤, 何正友, 薄志谦, 等. 动态条件下的同步相量测量算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 52-58.
MAI Ruikun, HE Zhengyou, BO Zhiqian, et al. Research on synchronized phasor measurement algorithm under dynamic conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 52-58.
- [8] 刘林, 林涛, 徐遐龄. 用于动态条件下同步相量测量的复带通滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 142-149.
LIU Lin, LIN Tao, XU Xialing. A complex bandpass filtering algorithm for synchronized phasor measurement under dynamic conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 142-149.
- [9] 刘灏, 毕天姝, 杨奇逊. 数字滤波器对PMU动态行为的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 49-57.
LIU Hao, BI Tianshu, YANG Qixun. The impact of digital filter on the PMU dynamic performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 49-57.
- [10] 张道农, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外PMU静动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.
- [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] GB/T26862—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.
- [13] IEEE Std C37.118.1-2011 IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems[S].
- [14] IEEE Std C37.118.2-2011 IEEE standard for data transfer for power systems[S].
- [15] WU H, TSAKALIS K S, HEYDT G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1935-1941.
- [16] PHADKE A G, THORP J S, ADAMIAK M G. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1025-1038.
- [17] BEGOVIC M M, DURIC P M, DUNLOP S, et al. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 480-485.
- [18] WANG M H, SUN Y Z. A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.
- [19] WANG M H, SUN Y Z. A practical method to improve phasor and power measurement accuracy of DFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1054-1062.
-
- 收稿日期: 2014-06-09; 修回日期: 2014-07-02
- 作者简介:
- 王茂海(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为广域同步动态监测技术及基于广域同步动态监测信息的应用分析技术等; E-mail: wmmhw@tom.com
- 赵玉江(1967-), 男, 工程师, 研究方向为电网运行管理等;
- 齐霞(1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力技术经济。
- (编辑 魏小丽)