

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200878

基于北斗授时的 μ PMU 测量误差综合分析

张赢¹, 魏文震², 李江², 孙乾²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 微型相量测量单元(μ PMU)的同步性与时钟源精度密切相关, 目前我国电网中已投运的智能设备多以美国 GPS 为时钟源。伴随北斗系统(BDS)组网完成, 采用北斗作为时钟源的设备将逐渐成为主流。首先, 研究北斗系统时钟脉冲精度、互感器误差、基波频率及谐波等误差影响因素, 揭示各环节对 μ PMU 测量误差的作用机理。然后, 评估基于北斗系统的 μ PMU 测量装置相角误差, 分析基于频率跟踪的极大似然估计相量误差。最后, 评价时钟源、互感器饱和、频率变化、谐波干扰等因素产生的综合误差。通过研究关键影响因素, 给出减小测量误差的主要措施。研究成果将为 μ PMU 在配电网的大规模配置提供理论和实践指导。

关键词: 同步测量; 北斗系统; 动态跟踪; 极大似然估计; 微型相量测量单元

Comprehensive measurement error analysis of μ PMU based on Beidou time service

ZHANG Ying¹, WEI Wenzhen², LI Jiang², SUN Qian²

(1. State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Hulun Buir 021000, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: At present, most of the smart devices in service for power systems in China use Global Positioning System (GPS) as a clock source, and the synchronization of the micro Phasor Measurement Unit (μ PMU) in a distribution network is related to the accuracy of the clock source. With the completion of the Beidou System (BDS), equipments installed with Beidou will gradually become mainstream. First, the influence mechanism of clock pulse accuracy, transformer performance, frequency fluctuation, and harmonic distortion on the measurement error of μ PMU is analyzed comprehensively in this paper. Then, the phase angle error of a μ PMU measurement device based on BDS is calculated, and the error of the maximum likelihood estimation based on tracking frequency algorithms is analyzed to give the comprehensive error of μ PMU under different phasor estimation methods. Finally, the comprehensive errors caused by the clock source, signal conversion, frequency change, harmonic interference, and other factors, are studied. The relevant methods are also used to reduce measurement error. The conclusion will provide theoretical and practical guidance for the large-scale placement of μ PMU in distribution networks.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977030) and Project of State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd. (No. SGMDHBOFCJS1800881).

Key words: synchronized measurement; BDS; dynamic tracking; maximum likelihood estimation; μ PMU

0 引言

目前, 美国 GPS(Global Position System)系统仍是电力系统同步量测单元(Phasor Measurement Units, PMU)的主要时钟源^[1]。但是, GPS 信号受美国军方控制, 一旦信号丢失, PMU 将无法正常工作,

存在安全风险。2020 年, 伴随我国北斗系统(Beidou System, BDS)组网完成, 基于 BDS 信号的安全性大幅提高。授时信号从 GPS 向 BDS 转变, 不仅可提高国家安全性, 还对提高设备精度和开发高级应用功能具有重要价值。

美国电气和电子工程师学会(IEEE)制定的同步相量测量标准—IEEE C37.118.1-2011, 已对频率误差、同步采样误差、相角误差、相量测量总误差(TVE)等方面做了详细规定^[2]。从授时精度上看, GPS 的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977030); 国网内蒙古东部电力有限公司项目资助(SGMDHBOFCJS1800881)

授时精度若为 1 μs, 对应的相角误差为 0.018°。GPS 秒脉冲的误差服从正态分布, 锁住可用卫星达到四颗以上时, 授时脉冲精度在 100 ns 以内; 当锁住的可用卫星少于四颗时, 解算方程组的信息不够充分, 授时精度将有所降低。北斗系统具有单/双向两种授时功能, 单向无源授时只要锁住一颗可用卫星, 即可获得授时信息。星历电文的更新率为 1 次/min, 分脉冲的授时精度服从正态分布, 授时脉冲的精度在 100 ns 以内; 秒脉冲由授时卡根据星历信息再处理获得, 精度在 300 ns 以内^[3]。北斗系统单向授时精度为 100 ns, 双向授时精度为 20 ns。若在主站安装单台北斗授时装置, 则理论上北斗授时装置能够保证各地的时间信号与协调世界时的相对误差小于 20~100 ns, 可实现各电站之间的准确同步^[4]。

近几年, 我国已开发出多种基于 BDS 的微型相量测量单元 (Micro Phasor Measurement Units, μPMU) 和智能终端^[5]。配电网线路短、相量偏差小, 因此安装的 μPMU 同步性需要更高精度的时钟源。BDS 信号的标准脉冲(1PPS), 形成统一时间 UTC 信号。时钟源的授时精度会直接影响相角的测量精度, 如果要保证相角误差小于 1°, 则同步时间 UTC 精度应不大于 55 μs。对于 50 Hz 的工频量来说, 100 ns 时钟偏差产生的相角误差为 0.0018°。理论上, 基于 BDS 的同步相量测量装置的测量精度更高, 同步性能更好^[6]。但是, 实际配电网由于电力电子设备产生谐波, 信号波形发生畸变, 测量误差增加; 电压互感器的阻抗压降及电流互感器激磁电流的存在, 也会使得相角测量产生误差; 并且, 系统的接地方式影响中性点电压偏移, 也会影响正序分量的幅值和相角。因此, 配网运行环境更加复杂, 影响精度的因素更多。

已有研究主要聚焦成本和可靠性等方面, 但对基于 BDS 的相量量测精度分析仍然缺乏。本文以配电网 μPMU 为研究对象, 首先分析基于 BDS 时钟源的量测系统误差来源; 然后, 研究互感器测量误差、谐波和频率采样误差影响机理; 最后, 对比分析离散傅里叶(DFT)和极大似然相量估计方法产生的综合误差, 并给出减小误差的具体措施。

1 μPMU 的采样原理

μPMU 的信号采样原理如图 1 所示。电压电流互感器将交流高压信号变成等比例的小信号; 抗混迭滤波器用于滤除频率超过奈奎斯特(Nyquist)频率的谐波和杂散干扰; 50 Hz 的带通滤波器用于消除非基频干扰; 同时, 同步时钟模块根据 BDS 提供的 1PPS 秒脉冲和频率跟踪秒脉冲, 形成满足时间和频率同步采样的脉冲序列, 启动 A/D 转换器进行模数

转换^[7]; 然后, 数字量被送入数据处理器, 并结合相关算法, 为电压电流相量标记时间; 最后, 将时标数据以帧的格式, 通过通信网络送往数据中心^[8-14]。因此, μPMU 的输出数据会受到互感器、谐波、时钟源、相量估计算法等多个环节的影响。

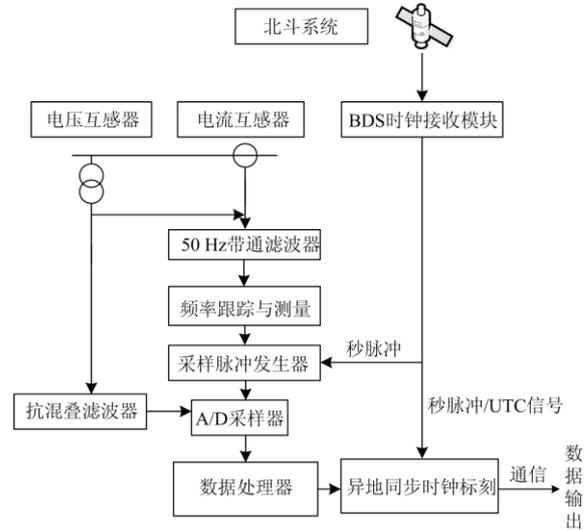


图 1 μPMU 的采样原理

Fig. 1 Sampling principle of μPMU

2 影响误差的环境因素

2.1 互感器误差

电力互感器是连接电力系统和 μPMU 的中间设备, 其转变精度和动态特性对测量精度会产生直接影响^[15]。电压互感器(PT)中的阻抗压降使得互感器两侧电压比不等于匝数比, 且阻抗为复数, 导致互感器两侧电压存在相位差。电流互感器(CT)中励磁电流的存在, 会导致二次侧相比一次侧既有幅值误差也有相位误差。本节分别对 PT 以及 CT 进行讨论, 并分析二者对测量误差的影响。

1) 电压互感器(PT)误差分析

实验采用 220 V/100 V 变压器模拟电压互感器, 电气试验台模拟单相接地短路, 接线如图 2 所示。二次侧电压由 DS1052E 示波器记录, 实验波形如图 3 所示。正常情况下, 互感器输出为正弦波, 可精确转变一次侧波形; 单相接地故障后, 非故障相出现过电压, 二次侧输出波形畸变。将一次侧实际数据和互感器测量数据导出, 均折算到二次侧进行对比, 如图 3 所示。当系统过电压时, 铁心饱和, 励磁电流的非正弦分量引起电容器与电抗器压降, 导致测量值与实际值发生偏差。

从理论上分析, 电容式电压互感器(CVT)的等值电路如图 4 所示。图 4 中, 实际电压可表示为

$$U(k) = U_0(k) + U_1(k) + U_2'(k) + a \cdot U_m(k) \quad (1)$$

式中: $U_0(k)$ 、 $U_1(k)$ 、 $U'_2(k)$ 分别为分压电容器电压、调节电抗器电压、一次绕组等效阻抗电压; a 为互感器匝数比, 且 $a = N_1 / N_2$ 。



图 2 电压互感器实验接线图

Fig. 2 Wiring diagram of transformer experimental model

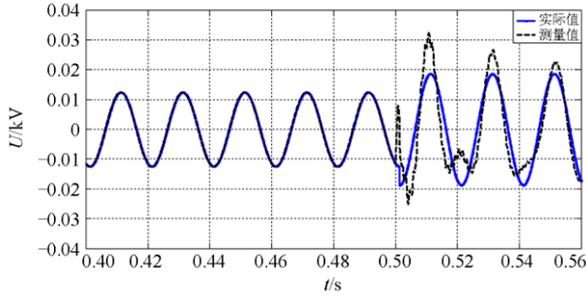


图 3 非故障相实际值与测量值对比

Fig. 3 Comparison of real values and measurement values of non fault phase

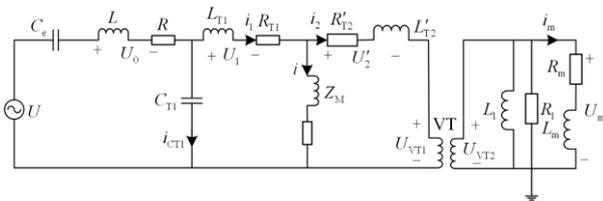


图 4 CVT 等值电路图

Fig. 4 CVT equivalent circuit

二次绕组等效阻抗电压变换后经离散化采样, 其电压可表示为

$$U'_2(k) = R'_{T2} i_2(k) + L'_{T2} [i_2(k+1) - i_2(k)] \quad (2)$$

$$i_2(k) = \frac{1}{a} [i_m(k) + i_{L1}(k) + i_{R1}(k)] \quad (3)$$

$$U_m(k) = L_1 [i_{L1}(k+1) - i_{L1}(k)] \quad (4)$$

$$U_m(k) = R_1 i_{R1}(k) \quad (5)$$

$$U_m(k) = R_m i_m(k) + L_m [i_m(k+1) - i_m(k)] \quad (6)$$

式中, $U_m(k)$ 为可测的电压值, 通过上式联立可求

得二次绕组的阻抗电压 $U'_2(k)$ 和二次电流 $i_2(k)$ 。

一次绕组等效阻抗电压为

$$U_1(k) = R_{T1} i_1(k) + L_{T1} [i_1(k+1) - i_1(k)] \quad (7)$$

$$i_1(k) = i_2(k) + i(k) \quad (8)$$

图 4 中, 一次侧的电容分压和可调电抗器有如下关系式:

$$U_0(k) = \frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^N i_{CRL}(k-N+m) + U_c(k-1) + R i_{CRL}(k) + L [i_{CRL}(k+1) - i_{CRL}(k)] \quad (9)$$

$$i_{CT1}(k) = C_{T1} [U_1(k+1) + U'_2(k+1) + a \cdot U_m(k+1) - (U_1(k) + U'_2(k) + a \cdot U_m(k))] \quad (10)$$

$$i_{CRL}(k) = i_{CT1}(k) + i_1(k) \quad (11)$$

$$C_e = C_1 + C_2 \quad (12)$$

式中, C_1 和 C_2 分别为 CVT 中的高压电容和中压电容。简化模型中, 实际值 $U(k)$ 与测量值 $U_m(k)$ 之间的关系为

$$U(k) = \frac{C_1}{C_2} \times U_m(k) \quad (13)$$

式(1)一式(12)为复杂模型, 式(13)的简化模型在分析暂态过程时误差较大, 参数含义见文献[15]。例如, 过电压时铁心饱和, 励磁电流增加, 互感器一二次电压无法成比例变化。此时, 若依旧按电容比计算, 忽略铁心饱和和电容暂态的影响, 暂态测量值与实际值将会发生偏差。

2) 电流互感器(CT)误差分析

Rogowski 线圈由于其非铁磁结构和良好的稳定性, 是目前应用最广泛的电流互感器。当电流互感器一次侧发生故障, 产生大电流而使铁心饱和, 特别是存在非周期分量时, 会使二次电流大大减小, 导致其波形产生严重畸变。对电流互感器一次侧电流进行拉普拉斯变换式如(14)所示^[17-18]。

$$I_1(s) = A\omega / (S^2 + \omega^2) \quad (14)$$

对电流互感器二次侧电流进行拉普拉斯变换如式(15)所示。

$$I_2(s) = H(s) \frac{I_n k}{s + (1/T)} = \frac{KAM\omega}{L_0 C_0 RC} \left(\frac{a_1}{s - \lambda_1} + \frac{a_2}{s - \lambda_2} + \frac{a_3}{s - \lambda_3} + \frac{a_4}{(s + \omega_1)^2 + 3\omega_1^2} + \frac{a_5}{s - \lambda_5} \right) \quad (15)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为 Rogowski 线圈传递函数特征值; λ_3 为积分部分特征值; $a_1 \sim a_5$ 为拉普拉斯变换期间获得的常数值; $I_n k$ 为主信号的特征值。

从式(15)可以看出,二次侧电流除了基频分量之外,还包含谐波和最大短路电流偏移分量。因此 μ PMU的量测必然受到谐波和最大短路电流偏移的影响。

2.2 谐波对相角测量的影响

由于 μ PMU等测量装置多数都是按工频运行设计的,谐波必然会对幅值和相角产生影响^[19]。图5所示为谐波对正弦信号的影响机理。

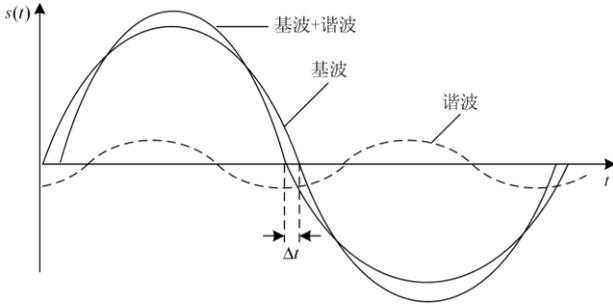


图5 谐波对测量影响的原理

Fig. 5 Effect of harmonic on measurement

从图5可以看出,谐波会影响待测信号的过零点。当谐波与基波的初相位相同时,谐波对相位测量结果将不产生影响,如方波的谐波虽然很丰富,但其相位测量结果和基波并没有差别。当谐波初相角 θ_n 为 $\pm\pi/2$ 时对测量精度的影响最大。

$$|\Delta\theta| = 2\pi f \Delta t = \left(\sum_{n=2}^k U_n \right) / U_1 \quad (16)$$

通过式(16)可以看出,最大相位误差为各次谐波幅值之和与基波幅值之比。若采用滤波器滤除谐波,由于滤波环节只有在线性相位特性的基础上实现信号的零相移,才能保证较好的滤波效果^[20]。同时,滤波器的延迟特性会影响相角的测量精度,且锁相环(PLL)在动态倍频跟踪时不具备精确的跟踪能力。

3 影响误差的内部因素

μ PMU是在UTC下,对配电网中各安装节点的电压、电流进行同步测量,确保全网测量结果具有同时性。因此,系统测量误差主要包括异地测量误差和本地测量误差。异地误差由BDS时钟误差决定;本地测量误差主要由 μ PMU本身决定,包括硬件测量和软件测量误差^[10]。实际应用中,相量相减会减小异地误差,本地误差受环境和算法的影响大,具有不确定性。

3.1 BDS时钟异地误差

北斗卫星导航标准化技术委员会2014年已在相关标准中对北斗的精度进行了说明。由于BDS具有单/双向两种授时功能,分别提供100 ns(单向授

时)和20 ns(双向授时)时间同步精度。

单向授时状态下,授时精度相对低,对50 Hz的工频相量,100 ns产生的相角误差为 $(360^\circ/20000) \times 0.1 = 0.0018^\circ$ 。因此,BDS的综合精度如果按50 ns计算,当系统信号频率为50 Hz时,其相角误差为 0.0009° ,频率变化时的相角误差为 $(1 + \Delta f) \times 0.0009^\circ$ 。可见,BDS作为 μ PMU的异地同步测量时钟源具有比GPS更高的精度^[21]。IEEE C37.118.1-2011中提出了相量测量总误差(TVE)的概念,用来衡量测量误差,其中规定 0.57° 的相角误差对应1%的TVE值。时钟源授时精度到相角测量误差的转换,TVE的定义分别为

$$\theta' = (\delta \times 10^{-9} / 0.02) \times 360 \quad (17)$$

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (18)$$

式中: δ 为时钟源的授时精度,单位为ns; $X_r(n)$ 、 $X_i(n)$ 为测量值; X_r 、 X_i 分别为输入信号实部和虚部的理论值,参数含义见文献[11]。

3.2 μ PMU的同步误差

目前, μ PMU采用离散傅里叶变换(DFT)实现信号处理,一般的处理方法是对频率进行准确跟踪,即同步采样。但在实际电网中,频率是波动的,且微处理器在计算周期时存在差异,使得采样周期和被测信号周期间很难保持同步,存在同步误差^[22]。

首先,考虑采样时刻对同步误差的影响。传统的采样时刻有三种:在数据窗的起始、中间和末尾进行采样。起始点采样同步时刻标记性强,但存在提前记录事件的问题;中间点采样数据拟合效果较好,要取异地同步时刻前后各 $T/2$ 采样数据窗的数据;末尾点采样可以很好地反映事件发生的先后顺序,需取异地同步时刻前一个采样数据窗的数据。可见后两者需预先采样,要做到完全的同步采样很困难,因此频率跟踪是 μ PMU同步测量的关键^[23]。

其次,考虑频率跟踪方式对误差的影响。目前的频率跟踪包括硬件和软件两种跟踪方法。前者主要采用锁相环技术,适用于实时性要求较高的系统,而软件自适应频率跟踪方法不需增加硬件开支,计算工频周期较准确,且简单易实现,缺点就是实时性不如硬件频率跟踪方法。下面对基于PLL同步采样的 μ PMU进行误差分析,图6为PLL信号的同步示意图。

从图6中可见,虽然PLL的实时性较好,但同步跟踪能力不太理想,产生了明显的同步误差。图7为同步采样周期 T_s 对同步测量精度的影响。设相邻采样周期为 m 和 $m+1$,每周期采样点数为 N ,

两周期的第一个采样点分别为 α 与 β , 由于存在同步误差导致 $\alpha \neq \beta$, 使得电力系统在连续等间隔采样时, 通道之间以及各通道相邻周波之间的初始相角均存在差异。

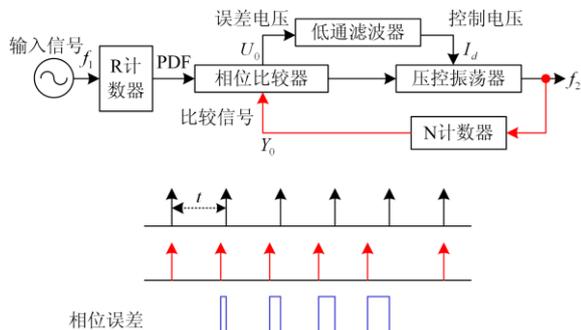


图 6 PLL 同步示意图

Fig. 6 PLL synchronization schematic diagram

图 7 中, 如果微处理定时器的计数周期为 τ , 其时间常数四舍五入取 $\text{round}\left(\frac{T}{N\tau}\right)$, 则实际采样周期 T'_s 和同步误差 ΔT 分别为

$$T'_s = \text{round}\left(\frac{T}{N\tau}\right)\tau \quad (19)$$

$$\Delta T = NT'_s - T = N \left[\text{round}\left(\frac{T}{N\tau}\right) - \frac{T}{N\tau} \right] \tau \quad (20)$$

式中, $\text{round}\left(\frac{T}{N\tau}\right) - \frac{T}{N\tau}$ 为量化误差, 量化误差随频率波动周期而波动, 波动频率与采样点数 N 、计数周期 τ 有关。量化误差随频率偏移的变化规律如图 8 所示。

由式(20), 可以得出同步误差最大值为

$$|\Delta T|_{\max} = \frac{N\tau}{2} \quad (21)$$

同步误差最大值与系统定时器计数周期以及采样频率有关, 减小计数周期可减小同步误差。若 N 值取较大值例如($N=2000$, 对应 50 kHz 采样率)可增

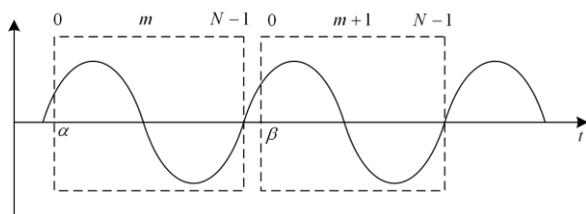


图 7 同步采样周期数据窗

Fig. 7 Synchronous sampling period data window

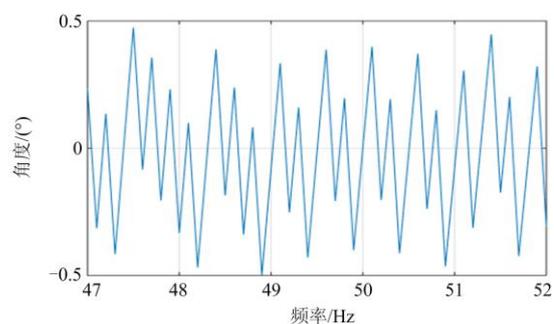


图 8 量化误差随频率偏移的变化规律

Fig. 8 Change rules of quantization error with frequency offset

强系统抑制噪声的能力, 提高测量精度, 但也有可能增大同步误差。

3.3 频率同步采样误差

系统在实际运行时频率是波动的, 频率的波动范围和波动速率会影响相角测量精度。由于 μ PMU 测量的相角为绝对相角, 即被测交流信号相对于从 BDS 零时刻开始的基准正弦波相位存在一定的相角误差。目前还缺乏相角测量的标准检验仪器, 需要利用相量校正算法来进行相位补偿^[22]。相角精度测量原理如图 9 所示。

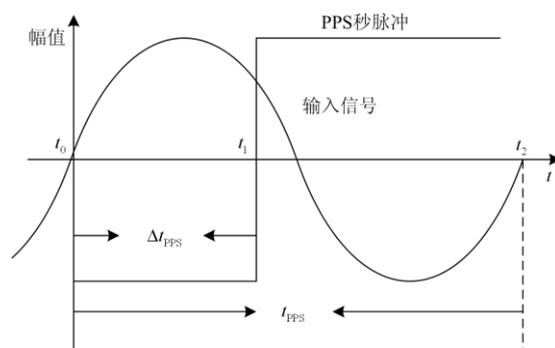


图 9 相角精度测试原理

Fig. 9 Phase precision test principle

将 BDS 和被测交流信号从两个独立通道接入可录波的高分辨率数字示波器中, 用示波器对 1PPS 秒脉冲到来前后几秒内的信号进行录波。根据录波数据计算出被测交流信号正向过零点时刻 t_0 与 1PPS 秒脉冲上升沿时刻 t_1 的时间差 $\Delta t_{\text{PPS}} = t_1 - t_0$, 其中被测交流信号的周期为 $t_{\text{PPS}} = t_2 - t_0$ 。

根据图 9 可以计算出被测交流信号在 1PPS 秒脉冲上升沿时刻 t_1 的绝对相角为

$$\varphi_{\text{PPS}} = \frac{2\pi\Delta t_{\text{PPS}}}{t_{\text{PPS}}} - \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

将被测交流信号的绝对相角 φ_{PPS} 与 μ PMU 在

t_1 时刻测得的相角 $\varphi_{\mu\text{PMU}}$ 进行比较,即可检验出绝对相角的测量误差。

利用上述方法分别对恒定频率和变化频率的相角精度进行测试,其结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 恒定频率下的相角精度测试结果

Table 1 Test results of phase accuracy under constant frequency

频率/ Hz	t_{PPS}/ms	$\Delta t_{\text{PPS}}/\text{ms}$	$\varphi_{\text{PPS}}/(\circ)$	$\varphi_{\mu\text{PMU}}/(\circ)$	误差/ (\circ)
47	21.274	4.57	-10.62	-10.24	0.38
49	20.369	10.12	87.46	89.63	0.17
50	20.047	2.69	-38.33	-38.18	0.14
51	19.706	0.48	-80.28	-80.19	0.09
53	18.463	0.79	-73.97	-73.74	0.23

表 1 中,频率在工频附近时的相角测量误差较小,且误差没有超过 0.4° 。表 2 分析了动态频率变化对相角测量精度的影响,被测信号在 47~53 Hz 范围内按不同的速率变化。测量结果显示,相角的测量精度与波动范围、波动速率均有关。在工频附近,频率变化率较小时,经相位校正后的相角测量精度误差较小。

表 2 动态频率下的相角精度测试结果

Table 2 Measurement results of phase angle precision under dynamic frequency

频率/Hz	t_{PPS}/ms	$\Delta t_{\text{PPS}}/\text{ms}$	$\varphi_{\text{PPS}}/(\circ)$	$\varphi_{\mu\text{PMU}}/(\circ)$	误差/ (\circ)
49~51(0.1 Hz/s)	20.21	6.29	22.73	22.48	0.25
51~49(0.2 Hz/s)	19.34	1.32	-64.39	-64.23	0.16
51~53(0.1 Hz/s)	19.18	1.89	-56.14	-55.97	0.17
53~51(0.2 Hz/s)	19.04	2.11	-50.42	-50.20	0.22
47~49(0.1 Hz/s)	21.02	10.23	83.25	83.57	0.28
49~47(0.2 Hz/s)	20.49	10.57	91.76	92.11	0.35

3.4 相量估计算法的误差

相量估计普遍采用 DFT 算法实现,但该方法不能对信号进行完整周期采样,存在严重的栅栏现象和频谱泄漏现象。信号动态特性的不完全表示及衰减直流分量的影响,使得 DFT 算法产生较大的相量估计误差。近年来,最大似然估计算法(CML)动态估计性能较好,能够适应复杂的配电网运行方式^[23]。

在三相不平衡系统中, $k=a,b,c$,第 k 相的电力信号波形模型为

$$y_k[n] = d_k a[n] \cos(f[n] + f_k) + b_k[n] \quad (23)$$

待测量的幅值和相位可以表示为 $c(\theta) = [d_0 e^{j\theta_0}, d_1 e^{j\theta_1}, d_2 e^{j\theta_2}]$, 根据最大似然估计得相角:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \text{Tr} [P_{1/A}(\theta) \hat{R}] \quad (24)$$

式中: $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] y^T[n]$ 为样本协方差矩阵;

$A(\theta) = A = [\text{Re}[c(\theta)] - \text{Im}[c(\theta)]]$, $P_{1/A}$ 是 A 的正交投影,满足 $P_{1/A} = I - A(A^T A)^{-1} A^T$ 。

对于中性点不接地系统 $g^T A(\hat{\theta}) = 0$, 即

$$\sum_{k=0}^2 g_k d_k e^{j\theta_k} = 0, \text{ 中性点直接接地或经消弧线圈接地}$$

时 $g^T c(\hat{\theta}) \neq 0$, 此时 $\sum_{k=0}^2 g_k d_k e^{j\theta_k} - d_0 e^{j\theta_0} = 0$ 。式中 g

为样本协方差矩阵 \hat{R} 的最小特征值所对应的特征向量,可以表示为 $g = [g_0, g_1, g_2]^T$, $g_k d_k$ 对应各相的相量幅值,参数含义见文献[24]。

对于中性点不接地系统,最大似然估计法(CML)需要对基准值进行选取,只需选择一相作为基准值;而对于中性点直接接地或经消弧线圈接地的系统,需要选择中性线和三相中的某一相作为基准值。因此,基准相的精度将直接影响测量结果,由于不同接线方式的基准相数量不同,则对测量精度的影响也会不一样^[25]。当样本总数为 200 时,以 MSE 作为衡量标准,对相量值和相位偏移估计的性能进行分析,其幅值和相角的估计性能分别如图 10 所示。由图 10 可见,极大似然估计方法具有更稳定的幅值和相角估计性能。

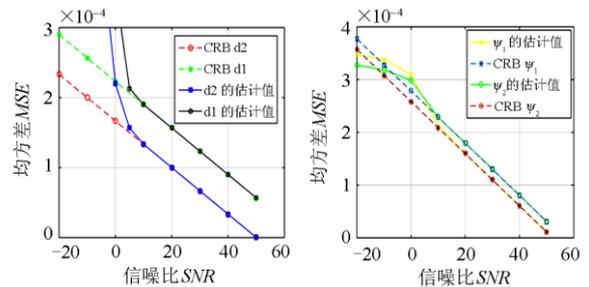


图 10 CML 的幅值和相角估计性能

Fig. 10 Estimated performance of amplitude and phase angle of CML

4 μPMU 综合误差和解决措施

4.1 综合误差

通过上述实验和理论分析,本节对 μPMU 的综合误差进行估计。对于 μPMU 的异地同步测量相角误差可按 $(1 + \Delta f) \times 0.0009^\circ$ 计算, μPMU 同步测量误差要考虑互感器、滤波器、频率波动误差及相量估计误差等^[26-28]。表 3 为最大频率变化率为 2.05 Hz/s 时, μPMU 的各种误差及综合误差的实验和理论估算值。由表 3 可知,时钟源、互感器、相量估计是主要因素,这为降低综合误差提供依据。

表 3 μ PMU 综合误差
Table 3 μ PMU comprehensive error

频率跟踪方式	频率/Hz	异地同步		互感器	滤波器	频率波动	最大似然估计算法误差		综合误差	
		相角误差/($^{\circ}$)	误差/%	误差/%	误差/%	相角误差/($^{\circ}$)	幅值/%	相角/($^{\circ}$)	幅值/%	相角/($^{\circ}$)
PLL 跟踪法	48	0.001 3	8.704	2.413	0.097	1.37	5.310	1.37	5.408 3	
	50	0.001 1	6.047	2.356	0.068	1.26	4.927	1.26	4.996 1	
	52	0.001 3	7.619	2.482	0.083	1.39	4.998	1.39	5.082 3	
NLS 跟踪法	48	0.001 3	8.704	2.169	0.093	1.06	4.013	1.06	4.107 3	
	50	0.001 1	6.047	1.618	0.065	0.84	3.741	0.84	3.807 1	
	52	0.001 3	7.619	1.709	0.081	0.97	3.869	0.97	3.951 3	
ADFTA 跟踪法	48	0.001 3	8.704	0.526	0.091	0.35	1.042	0.35	1.134 3	
	50	0.001 1	6.047	0.304	0.062	0.22	0.939	0.22	1.002 1	
	52	0.001 3	7.619	0.418	0.080	0.29	1.103	0.29	1.184 3	

4.2 主要解决措施

1) 采用多时源北斗授时补偿方法, 减小时钟误差

在软件设计上, 可采用优先级分组策略选择正确时钟源。当失去有效时钟源时, 采用高精度恒温晶振授时算法, 判断是否需要进行补偿; 可选用晶振频率预测补偿算法进行补偿, 以保证授时精度^[29]。

2) 利用互感器铁心饱和曲线, 实现数据还原

基于铁心饱和曲线, 构造励磁电流与磁通的解析函数, 根据量测数据还原一次侧真值。研究表明, 未补偿时电压测量值的幅值误差和相位误差分别为 0.692% 和 53.94", 经过算法补偿后其比差和相位误差分别为 0.0798% 和 20.08" ^[30-31]。

3) 采用概率性相量估计算法, 提高算法适应性

针对配电网三相不平衡特点, 可以采用最大似然估计算法, 实现复杂电磁环境下的基准相和频率估计。概率性算法抗干扰能力强、相量精度高, 能够准确跟踪频率变化, 更加适应配网的复杂环境。

5 结论

采用北斗系统时钟源后, 分析 μ PMU 测量误差, 主要可得出如下结论:

1) 同步时钟的授时精度、互感器的性能是同步相量测量误差的主要影响因素, 并且幅值的影响要小于相角的影响。

2) 动态频率跟踪技术直接影响 μ PMU 的频率稳定性, 基于 BDS 与 PLL 的相角测量精度偏低, 应用动态频率跟踪技术将提高频率和相量估计的精度。

3) 频率波动的范围和波动速率对 μ PMU 的测量误差影响也很明显, 问题的关键仍是动态频率跟踪的能力。如果能够减小 μ PMU 在滤波和频率跟踪方面的频偏误差, 能大大降低相量估计算法的测量误差。

参考文献

- [1] 纳少华, 马彩虹. 电力系统同步相量测量装置(PMU)应用及分析[J]. 中国科技信息, 2011(5): 116-119.
NA Shaohua, MA Caihong. Power system phasor measurement unit (PMU) application and analysis[J]. Chinese Science and Technology Information, 2011(5): 116-119.
- [2] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems: IEEE Std C37.118[S]. 2011.
- [3] 罗长兵, 张敏, 高寿. 北斗卫星导航技术在电力行业中的运用探究[J]. 中国新通信, 2019, 21(7): 124-125.
LUO Changbing, ZHANG Min, GAO Shou. Research on the application of Beidou satellite navigation technology in the electric power industry[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(7): 124-125.
- [4] 童伟. 基于北斗 II 代/GPS 的电力系统双模时间同步时钟的研制[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 81-85.
TONG Wei. Development of Beidou II/GPS dual-mode synchronization clock for power system[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4): 81-85.
- [5] 吕雅婧, 滕玲, 邢亚, 等. 北斗卫星导航系统在电力行业的应用现状[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 70-74.
LÜ Yajing, TENG Ling, XING Ya, et al. Application status of Beidou satellite navigation system in power industry[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(8): 70-74.
- [6] 崔永俊, 黄江鹏, 杨慧. 基于 GPS/BD 的高精度授时关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2015(2): 574-576.
CUI Yongjun, HUANG Jiangpeng, YANG Hui. Research of key technology of high-precision timing based on GPS/BD[J]. Computer Measurement and Control, 2015(2): 574-576.
- [7] 张景超. 基于北斗卫星导航定位系统的 PMU 可行性研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 86-88.

- ZHANG Jingchao. Feasibility study of PMU based on the Beidou satellite navigation and positioning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 86-88.
- [8] 童晓阳, 王睿晗, 王洪彬, 等. 基于有限 PMU 的电网故障在线识别算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 49-55.
- TONG Xiaoyang, WANG Ruihan, WANG Hongbin, et al. Online detection algorithm of power system fault using limited PMUs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 49-55.
- [9] 李江, 徐志临, 李国庆, 等. 配电网微型 PMU 与故障录波装置研究与开发[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 54-59.
- LI Jiang, XU Zhilin, LI Guoqing, et al. Research and development of micro PMU and fault wave recording device for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 54-59.
- [10] 邢浩江. 电网同步采集相位精度影响因素的权重分布与补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- XING Haojiang. Weight distribution and compensation of influencing factors of phase accuracy of synchronous sampling in power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [11] 张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.
- ZHANG Xiaohong, ZUO Xiang, LI Pan, et al. Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256.
- [12] 耿池勇, 高厚磊, 刘炳旭, 等. 适用于同步相量测量的 DFT 算法研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(1): 84-87.
- GENG Chiyong, GAO Houlei, LIU Bingxu, et al. Study of DFT algorithm in synchronous phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 84-87.
- [13] 麦瑞坤. 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. Research on synchronized phasor measurement algorithm under dynamic condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 52-58.
- [14] 徐凯. 时间同步方式及同步偏差对同步相量量测的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- XU Kai. Influence of time synchronization mode and synchronization deviation on synchronous phasor measurement[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [15] 刘灏, 毕天姝, 周星, 等. 电力互感器对同步相量测量的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 176-182.
- LIU Hao, BI Tianshu, ZHOU Xing, et al. Impact of instrument transformers on synchronous phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 176-182.
- [16] 罗亚桥, 胡翀. 谐波对电能计量的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 130-132.
- LUO Yaqiao, HU Chong. The harmonic effect on electric energy metering analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 130-132.
- [17] 尹亮, 刘海涛, 黄鸣宇. 应用 PMU 数据对电力互感器变比误差进行校准[J]. 科技通报, 2019, 35(11): 123-129.
- YIN Liang, LIU Haitao, HUANG Mingyu. Error calibration of instrument transformers by using phasor measurement unit data[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(11): 123-129.
- [18] 李贺龙, 袁晓蕾, 赵晓健, 等. 基于 BP 神经网络的互感器计量误差在线检测[J]. 电气自动化, 2019, 41(6): 83-85.
- LI Helong, YUAN Xiaolei, ZHAO Xiaojian, et al. On-line detection of instrument transformer measurement error based on BP neural network[J]. Electrical Automation, 2019, 41(6): 83-85.
- [19] 代双寅, 刘书铭, 赵麒麟, 等. 基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 141-147.
- DAI Shuangyin, LIU Shuming, ZHAO Qizhe, et al. Harmonic voltage measurement method based on CVT capacitance current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 141-147.
- [20] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
- WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [21] 赵娜. 微波带通滤波器的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- ZHAO Na. Study of microwave band-pass filter[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2007.
- [22] 朱云. 频率对相位测量的影响[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2004(4): 47-48.
- ZHU Yun. Influence of frequency on phase measurement[J]. Instrumentation Standardization and Metrology, 2004(4): 47-48.
- [23] CHOQUEUSE V, BELOUCHRANI A, BOUCHIKHI E H E, et al. Estimation of amplitude, phase and unbalance

- parameters in three-phase systems: analytical solutions, efficient implementation and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62: 4064-4076.
- [24] 李江, 魏文震, 陈继开. 基于 CML 的配电网 μ PMU 相量测量算法[J]. 南方电网技术, 2017, 11(7): 58-67.
LI Jiang, WEI Wenzhen, CHEN Jikai. CML based μ PMU phasor measurement algorithm for distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(7): 58-67.
- [25] 张俊芳, 刘鹏. 基于改进模糊神经网络的配电网故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 120-125.
ZHANG Junfang, LIU Peng. Research on fault line detection for distribution network based on improved fuzzy neural networks algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 120-125.
- [26] 陈克绪, 陈垒, 胡涛, 等. 计及较大频率偏移的谐波相量测量算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 22-28.
CHEN Kexu, CHEN Lei, HU Tao, et al. Harmonic phasor estimation algorithm considering large frequency deviations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 22-28.
- [27] 黄潇潇, 杨韬, 郑晓麟, 等. 基于 PMU 量测信息的短线路同杆并架双回线参数辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 141-148.
HUANG Xiaoxiao, YANG Tao, ZHENG Xiaolin, et al. Parameter identification of double circuit lines on the same tower based on PMU measurement information[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 141-148.
- [28] 葛维春, 张硕, 张艳军, 等. 基于 μ PMU 同步量测数据的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 39-46.
GE Weichun, ZHANG Shuo, ZHANG Yanjun, et al. A novel method for fault location of distribution network based on μ PMU synchronized measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 39-46.
- [29] 张孟琛, 牛益国, 宣文华. 含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 115-121.
ZHANG Mengchen, NIU Yiguo, XUAN Wenhua. Hierarchical zoning collaborative fault location and isolation technology for distribution networks containing DG[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 115-121.
- [30] 朱小锴, 赵晓铎, 李超, 等. 基于多时源的高稳时间同步装置的研制[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 175-179, 189.
ZHU Xiaokai, ZHAO Xiaoduo, LI Chao, et al. Development of high stability time synchronization device based on multiple time source[J]. Computer Measurement and Control, 2018, 26(12): 175-179, 189.
- [31] 王洋. 电容式电压互感器的误差分析与校正[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
WANG Yang. Error analysis and correction of capacitive voltage transformer[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2018.

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2021-01-14

作者简介:

张 赢(1980—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析和供电企业管理;

魏文震(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网同步相量测量算法的研究与应用;

李 江(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: lijia@mail.nedu.edu.cn

(编辑 魏小丽)