

基于量测数据自适应修正的PMU/PQMD混合谐波状态估计

詹翔, 邵振国, 林俊杰, 陈飞雄, 张嫣

(数字能源福建省高校重点实验室(福州大学), 福建省 福州市 350108)

PMU/PQMD Hybrid Harmonic State Estimation Based on Adaptive Modification of Measurement Data

ZHAN Xiang, SHAO Zhenguo, LIN Junjie, CHEN Feixiong, ZHANG Yan

(Key Laboratory of Energy Digitalization (Fuzhou University), Fuzhou 350108, Fujian Province, China)

ABSTRACT: Accurate harmonic state estimation is an important basis for controlling harmonic problems in power grid. To solve the problem that phasor measurement unit (PMU) is difficult to satisfy observability condition and power quality monitoring device (PQMD) time scale is asynchronous. Taking PMU sampling time as estimation time, a PMU/PQMD hybrid harmonic state estimation method based on adaptive modification of measurement data is proposed in this paper. Designed to obtain accurate harmonic state quantities. First, the optimization factor is introduced into the statistical data of PQMD, the harmonic data of PQMD is characterized as bounded uncertainty variable, and the hybrid harmonic measurement set of PMU and PQMD is constructed. Secondly, a hybrid harmonic state estimation model is established with the minimum normalized residual sum of squares as the optimization objective. Subsequently, the linear programming algorithm is used to simplify the state estimation model into a convex optimization model, and the internal point method is used to solve the problem. The harmonic data of PQMD is adaptively corrected by optimization factor during the solution process to enhance the accuracy of state estimation. Finally, the feasibility and superiority of the proposed method are verified in IEEE standard system.

KEY WORDS: phasor measurement unit; power quality monitoring device; hybrid measurement data; harmonic state estimation

摘要: 准确的谐波状态估计是治理电网谐波问题的重要基础。针对同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)难以满足可观性条件和电能质量监测装置(power quality monitoring device, PQMD)时标非同步的问题, 该文以 PMU

采样时刻作为估计时刻, 提出一种基于量测数据自适应修正的 PMU/PQMD 混合谐波状态估计方法, 旨在获取准确的谐波状态量。首先, 在 PQMD 统计型数据中引入寻优因子, 将 PQMD 测点的谐波数据表征为有界的不确定性变量, 并构建 PMU 和 PQMD 的混合谐波量测集; 其次, 以最小标准化量测残差平方和为优化目标, 建立混合谐波状态估计模型; 之后, 运用线性规划算法将状态估计模型简化为凸优化模型, 并采用内点法进行求解, 利用寻优因子在求解过程中自适应修正 PQMD 测点的谐波数据, 以提升状态估计的精度; 最后, 在 IEEE 标准系统中验证所提方法的可行性与优越性。

关键词: 同步相量测量装置; 电能质量监测装置; 混合量测数据; 谐波状态估计

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1328

0 引言

随着大量分布式能源与电力电子设备并网, 电力系统的谐波污染日益加剧, 呈现出分散化和全网化的趋势^[1-3]。电力系统中的谐波会导致电能质量下降, 严重时可能会引起系统谐振, 造成电网设备烧毁等事故。为保障电力系统的安全稳定运行, 需要对谐波进行监测与治理^[4-5]。谐波状态估计(harmonic state estimation, HSE)能够根据有限的量测数据估计全网谐波状态^[6], 为谐波的治理提供技术支撑。

随着广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的发展, 相量量测数据在谐波状态估计中得到应用^[7]。WAMS 以同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)为数据采集单元, 能够为谐波状态估计提供高质量的同步量测数据。但受限于技术与造价等因素, PMU 无法大量部署,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377087)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377087).

难以满足谐波状态估计的可观性要求。文献[8-9]针对 PMU 量测冗余度较低的情况,采用奇异值分解法进行谐波状态估计,但其估计精度受限于测点的位置和数量。文献[10]利用历史负荷数据生成伪量测,并将其作为 PMU 的补充数据以满足谐波状态估计的可观性要求,但该方法的估计准确性受制于伪量测精度。电能质量监测装置(power quality monitoring device, PQMD)成本相对较低,在电网中布置范围较广,更容易满足谐波状态估计的可观性要求。但其采样数据的分辨率较低,仅记录采样时段内的统计型数据。文献[11]采用 PQMD 统计型数据的平均值进行谐波状态估计,但 PQMD 统计型数据具有时标非同步性^[12-13],当电网负荷波动水平较大时,其估计结果的精度较低。文献[14]提取 PQMD 统计型数据的最大值和最小值,构建区间型谐波量测数据进行动态谐波状态估计,但采样时段的偏差会降低估计结果的可靠性。上述方法均采用单一数据源进行谐波状态估计,算法性能受到一定的制约。

当前,融合多源量测数据满足系统可观性以实现状态估计成为研究的热点。在基波状态估计方面,文献[15-17]构建数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)和 PMU 的混合量测集,提高了状态估计的精度。文献[18-19]采用插值法生成 SCADA 在 PMU 采样时刻的伪量测值,提高了状态估计的分辨率。文献[20]分别采用 SCADA 数据和 PMU 数据进行状态估计,并融合 SCADA 和 PMU 的估计结果,得到更精确的状态估计值。在谐波状态估计方面,文献[21]融合 PQMD、配电变压器监测终端和智能电表的量测数据进行谐波状态估计,满足了谐波状态估计的可观性要求,但没有考虑 PQMD 统计型数据的时标非同步性,难以保证估计结果的精度。文献[22]构建了 PMU 和 PQMD 的区间型混合量测集,利用 PMU 提高了状态估计的同步性,并提出了区间型抗差谐波状态估计方法,有效抑制了 PQMD 采样时段非同步带来的误差。但该方法只能估计出 PQMD 采样时段内的谐波状态量区间,具有一定的保守性。

以 PMU 采样时刻作为谐波状态估计的基准时刻,有效融合 PMU 的同步量测数据和 PQMD 的统计型数据,能够提升谐波状态估计的准确性,为电网的谐波分析提供更可靠的手段。为此,本文综合考虑 PMU 和 PQMD 的采样特征,提出了一种基于量测数据自适应修正的 PMU/PQMD 混合谐波状态估计方法。首先,引入寻优因子将 PQMD 测点的谐

波数据描述为不确定性变量,其边界由统计型数据的最大值和最小值构成;其次,融合 PMU 和 PQMD 的量测数据,实现状态估计的全局可观性;之后,将寻优因子与谐波状态量共同作为优化变量,并计及系统中的零注入功率约束^[23],建立以最小标准化量测残差平方和为优化目标的混合谐波状态估计模型;最后,针对状态估计模型非凸无法保证获得全局最优解的问题,运用线性规划算法将状态估计模型简化为带线性约束的凸优化模型,并采用内点法搜索优化变量可行域内的最优解。算例分析结果表明所提方法能够在求解过程中自适应修正 PQMD 测点的谐波数据,有效提升估计结果的准确性。

1 PMU 与 PQMD 的采样特征

PMU 以 50Hz 甚至更高的采样频率来采集某一时间断面下的同步量测数据^[24]。PQMD 的采样数据为 3min 内电能质量数据的最大值、最小值、95% 概率大值和平均值等统计型数据,并且不同测点的 PQMD 采样时段是非同步的^[25]。PMU 和 PQMD 的采样示意图如图 1 所示。

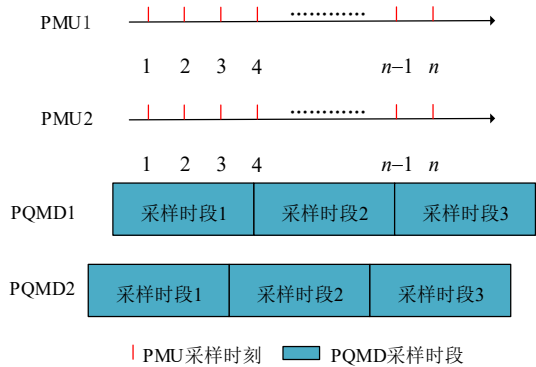


图 1 PMU 和 PQMD 采样示意图

Fig. 1 Sampling diagram of PMU and PQMD

从图 1 中可以看出,PMU 具有较高的采样速率,而 PQMD 无法获取某一时间断面下的量测数据,其统计型数据也具有时标非同步性,即不同的 PQMD 测点无法获取同一时段内的统计型数据。

PMU 量测数据主要包括节点电压相量和支路电流相量的实时数据。PQMD 则按照电能质量数据交换格式(power quality data interchange format, PQDIF)记录统计型监测数据,如表 1 所示。

表 1 PQDIF 文件中的监测数据 Table 1 Monitoring data in the PQDIF file	
电能质量指标	内容
基波	电压/电流有效值、电压相角、有功功率、无功功率、视在功率、功率因素等
谐波	2~50 次谐波电压/电流有效值、2~50 次谐波电压相角、2~50 次谐波功率等

2 融合 PMU 和 PQMD 量测数据的混合谐波状态估计模型

2.1 PMU 和 PQMD 的量测数据

本文采用的量测数据为估计时刻的 PMU 量测数据以及对应时段内 PQMD 统计型数据的最小值与最大值,其中,PMU 量测数据如式(1)所示,PQMD 统计型数据的最小值与最大值如式(2)所示。

$$\mathbf{Z}_1 = \{U_i^h, \delta_i^h, I_{ij}^h, \delta_{ij}^h\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Z}_1$ 为估计时刻的 PMU 谐波量测数据;上标 h 表示谐波次数;下标 i, j 表示节点编号; U_i^h 、 δ_i^h 分别为谐波电压幅值和相角量测数据; I_{ij}^h 、 δ_{ij}^h 分别为支路谐波电流幅值和相角量测数据。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{2,d} = \{U_{i,d}^h, P_{i,d}^h, Q_{i,d}^h, P_{ij,d}^h, Q_{ij,d}^h\} \\ \mathbf{Z}_{2,u} = \{U_{i,u}^h, P_{i,u}^h, Q_{i,u}^h, P_{ij,u}^h, Q_{ij,u}^h\} \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 d, u 分别表示最小值和最大值; $\mathbf{Z}_{2,d}$ 、 $\mathbf{Z}_{2,u}$ 分别为采样时段覆盖估计时刻的 PQMD 统计型数据中的最小值与最大值; P_i^h 、 Q_i^h 分别为节点谐波有功功率与无功功率量测数据; P_{ij}^h 、 Q_{ij}^h 分别为支路谐波有功功率与无功功率量测数据。

为减少量测类型以简化后续的计算,将 PMU 的支路谐波电流量测变换为支路谐波功率量测,如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{ij,eq}^h = U_i^h I_{ij}^h \cos(\delta_i^h - \delta_{ij}^h) \\ Q_{ij,eq}^h = U_i^h I_{ij}^h \sin(\delta_i^h - \delta_{ij}^h) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{ij,eq}^h$ 、 $Q_{ij,eq}^h$ 分别为变换后的支路谐波有功功率与无功功率量测数据。

量测变换过程中会产生传递误差,可根据量测不确定度传播理论计算变换后量测数据的标准差^[26],计算公式如式(4)所示。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial f(Z_{p,1} \cdots Z_{p,m})}{\partial Z_{p,i}} \sigma_{p,i} \right]^2} \quad (4)$$

式中: $Z_{p,i}$ 为原始量测数据; f 为变换后量测数据与原始量测数据的函数关系; $\sigma_{p,i}$ 为原始量测数据的标准差; σ_{eq} 为变换后量测数据的标准差; m 为与变换后量测数据存在函数关系的原始量测数量。

2.2 混合谐波状态估计模型

当 PQMD 的采样时段覆盖 PMU 采样时刻时, PQMD 测点在 PMU 采样时刻下的实际谐波数据必然位于其统计型数据的最大值和最小值之间。为了从统计型数据中准确提取出估计时刻的谐波数据,本文将 PQMD 测点的谐波数据视为具有边界的不确定性变量,并将其与谐波状态量共同作为优化变

量,以最小标准化量测残差平方和为优化目标建立混合谐波状态估计模型。该模型充分利用了高精度的 PMU 量测数据和系统中的零注入功率约束,并通过寻优因子自适应修正 PQMD 测点的谐波数据,从而提升估计结果的准确性。

首先,在统计型数据的最大值和最小值中引入寻优因子,将 PQMD 测点的谐波数据表征为有界的不确定性变量,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_{2,d} + \lambda(\mathbf{Z}_{2,u} - \mathbf{Z}_{2,d}) \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Z}_2$ 为估计时刻 PQMD 测点的谐波数据; λ 为寻优因子。

由此可构建 PMU 和 PQMD 的混合谐波量测集,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \{\mathbf{Z}_{1eq}, \mathbf{Z}_2\} \\ \mathbf{Z}_{1eq} = \{U_i^h, \delta_i^h, P_{ij,eq}^h, Q_{ij,eq}^h\} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}$ 为估计时刻的混合谐波量测集; $\mathbf{Z}_{1eq}$ 为变换后的 PMU 谐波量测数据。

之后,以最小标准化量测残差平方和作为优化目标,并计及系统中的零注入功率约束,建立混合谐波状态估计模型,如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min J(\lambda, \mathbf{x}) = \left(\frac{\mathbf{Z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\sigma} \right)^T \left(\frac{\mathbf{Z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\sigma} \right) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{Z}_{1eq} \\ \mathbf{Z}_{2,d} \leq \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \leq \mathbf{Z}_{2,u} \\ \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $J(\lambda, \mathbf{x})$ 为优化目标函数; $\mathbf{x}$ 为谐波状态量, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为量测函数; σ 为量测数据的标准差; $\mathbf{h}_1(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{h}_2(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 分别为 PMU 量测数据、PQMD 量测数据、零注入功率数据对应的量测函数。其中,量测数据的标准差是基于电力系统中常见的量测误差特性来预设的^[27],文献[28]基于经验值给出了单个量测数据标准差的参考计算公式,如式(8)所示。

$$\sigma = \frac{1}{3}(a_m S_t + b_m S_f) \quad (8)$$

式中: S_t 为量测数据的真值; S_f 为量测装置的满刻度值; a_m 为量测误差系数; b_m 为变换器和转换器的误差系数。在实际中, S_t 的数值无法获取,一般采用其量测值代替^[28]。因 PQMD 测点无法记录估计时刻的量测数据,故在计算 PQMD 测点量测数据的标准差时,采用其统计型数据的平均值作为 S_t 。由于没有实际的量测装置作为参考,故采用额定运行条件下的谐波数据作为 S_f ^[29],各类型量测数据的 a_m 和 b_m 设置参照文献[28]。

选取谐波电压幅值与相角作为谐波状态量, 则 PMU 量测数据、PQMD 量测数据、零注入功率数据对应的量测函数分别如式(9)–(11)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{Z}_{1\text{eq}} \\ \begin{cases} U_{s,i}^h = U_i^h \\ \delta_{s,i}^h = \delta_i^h \\ -(U_{s,i}^h)^2 G_{ij} - U_{s,i}^h U_{s,j}^h \\ [-G_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) - B_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] = P_{ij,\text{eq}}^h \\ -(U_{s,i}^h)^2 (-B_{ij} + y_c) - U_{s,i}^h U_{s,j}^h \\ [-G_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) + B_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] = Q_{ij,\text{eq}}^h \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{2,\text{d}} \leq \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) \leq \mathbf{Z}_{2,\text{u}} \\ \begin{cases} U_{i,\text{d}}^h \leq U_{s,i}^h \leq U_{i,\text{u}}^h \\ P_{i,\text{d}}^h \leq U_{s,i}^h \sum_{j=1}^n U_{s,j}^h \\ [G_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) + B_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] \leq P_{i,\text{u}}^h \\ Q_{i,\text{d}}^h \leq U_{s,i}^h \sum_{j=1}^n U_{s,j}^h \\ [G_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) - B_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] \leq Q_{i,\text{u}}^h \\ P_{ij,\text{d}}^h \leq -(U_{s,i}^h)^2 G_{ij} - U_{s,i}^h U_{s,j}^h \\ [-G_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) - B_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] \leq P_{ij,\text{u}}^h \\ Q_{ij,\text{d}}^h \leq -(U_{s,i}^h)^2 (-B_{ij} + y_c) - U_{s,i}^h U_{s,j}^h \\ [-G_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) + B_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] \leq Q_{ij,\text{u}}^h \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{c}(\mathbf{x}) = 0 \\ \begin{cases} U_{s,i}^h \sum_{j=1}^n U_{s,j}^h [G_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) + B_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] = 0 \\ U_{s,i}^h \sum_{j=1}^n U_{s,j}^h [G_{ij} \sin(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h) - B_{ij} \cos(\delta_{s,i}^h - \delta_{s,j}^h)] = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $U_{s,i}^h$ 、 $\delta_{s,i}^h$ 分别为谐波电压幅值状态量和相角状态量; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为谐波节点导纳矩阵中的实部和虚部; y_c 为对地谐波导纳。

3 混合谐波状态估计模型的求解方法

本文所建立的混合谐波状态估计模型中, 式(9)–(11)的量测函数非凸^[30], 无法保证获得全局最优解。为此, 本文提出了一种基于可行域线性化的模型求解方法, 采用基于迭代运算的线性规划算法求解谐波状态量的线性可行域, 从而将状态估计模型简化为带线性约束的凸优化模型。

3.1 谐波状态量可行域的线性化

首先, 设置谐波状态量的初始可行域为 $\mathbf{x}_{\text{d}(0)} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\text{u}(0)}$, $\mathbf{x}_{\text{d}(0)}$ 、 $\mathbf{x}_{\text{u}(0)}$ 分别为谐波状态量初始可行域的下界和上界, 如下定义谐波状态量初始可行域的中点

$\mathbf{x}_{\text{m}(0)}$:

$$\mathbf{x}_{\text{m}(0)} = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_{\text{d}(0)} + \mathbf{x}_{\text{u}(0)}) \quad (12)$$

其次, 在 $\mathbf{x}_{\text{m}(0)}$ 处对 PMU 量测数据、PQMD 量测数据、零注入功率数据的量测函数进行一阶泰勒展开^[31], 得到如下表达式:

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) = \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) + \mathbf{H}_2(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \\ \mathbf{c}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) + \mathbf{C}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{H}_1$ 、 $\mathbf{H}_2$ 、 $\mathbf{C}$ 分别为 $\mathbf{h}_1(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{h}_2(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ 在 $\mathbf{x}_{\text{m}(0)}$ 处的雅可比矩阵。

定义修正量 $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{m}(0)}$, 可以将谐波状态量表达为带有线性约束条件的不确定性集合, 如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{m}(0)} + \Delta \mathbf{x} \\ \text{s.t. } \mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{x} = \mathbf{Z}_{1\text{eq}} - \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \\ \mathbf{Z}_{2,\text{d}} - \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \leq \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{x} \leq \mathbf{Z}_{2,\text{u}} - \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \\ \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{c}(\mathbf{x}_{\text{m}(0)}) \end{cases} \quad (14)$$

因此, 只需求取修正量 $\Delta \mathbf{x}$ 即可求得谐波状态量的线性可行域。令 $\Delta \mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_{1\text{eq}} - \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_{\text{m}(0)})$, $\Delta \mathbf{Z}_{2,\text{d}} = \mathbf{Z}_{2,\text{d}} - \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_{\text{m}(0)})$, $\Delta \mathbf{Z}_{2,\text{u}} = \mathbf{Z}_{2,\text{u}} - \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_{\text{m}(0)})$, $\Delta \mathbf{Z}_0 = -\mathbf{c}(\mathbf{x}_{\text{m}(0)})$, 则线性可行域的求解问题转换为如下两个线性优化问题:

$$\begin{cases} \Delta x_{i,\text{d}} = \min \Delta x_i \\ \text{s.t. } \mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{Z}_1 \\ \Delta \mathbf{Z}_{2,\text{d}} \leq \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{x} \leq \Delta \mathbf{Z}_{2,\text{u}} \\ \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{Z}_0 \end{cases}, i=1 \cdots n \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{i,\text{u}} = \max \Delta x_i \\ \text{s.t. } \mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{Z}_1 \\ \Delta \mathbf{Z}_{2,\text{d}} \leq \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{x} \leq \Delta \mathbf{Z}_{2,\text{u}} \\ \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{Z}_0 \end{cases}, i=1 \cdots n \quad (16)$$

式中: $\Delta x_{i,\text{d}}$ 、 $\Delta x_{i,\text{u}}$ 分别为修正量 Δx_i 的下界和上界; n 为谐波状态量的数量。

采用线性规划算法对式(15)–(16)进行求解可求得修正量的下界和上界, 进而求得线性可行域上下界的第一次近似解, 如式(17)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{\text{d}(1)} = \Delta \mathbf{x}_{\text{d}} + \mathbf{x}_{\text{m}(0)} \\ \mathbf{x}_{\text{u}(1)} = \Delta \mathbf{x}_{\text{u}} + \mathbf{x}_{\text{m}(0)} \end{cases} \quad (17)$$

将 $\mathbf{x}_{\text{d}(1)}$ 和 $\mathbf{x}_{\text{u}(1)}$ 代替 $\mathbf{x}_{\text{d}(0)}$ 和 $\mathbf{x}_{\text{u}(0)}$, 更新得到 $\mathbf{x}_{\text{m}(1)}$, 如式(18)所示。

$$\mathbf{x}_{\text{m}(1)} = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_{\text{d}(1)} + \mathbf{x}_{\text{u}(1)}) \quad (18)$$

此后, 将 $\mathbf{x}_{\text{m}(1)}$ 代替 $\mathbf{x}_{\text{m}(0)}$ 进行迭代计算可获取更加精确的求解结果^[32], 当迭代次数达到设定上限或

迭代结果满足式(19)所示的收敛条件时,停止迭代。值得注意的是,合理设置初始可行域的中点是影响算法收敛性能的关键。为此,本文将 PMU 量测数据和 PQMD 统计型数据的平均值作为量测集,采用传统的加权最小二乘法进行谐波状态估计,并取估计结果作为初始可行域的中点,从而提升算法的收敛性能。

$$\max \left(\begin{array}{l} |(x_{i,d})_k - (x_{i,d})_{k-1}| \\ |(x_{i,u})_k - (x_{i,u})_{k-1}| \end{array} \right) \leq \eta, i=1 \cdots n \quad (19)$$

式中: $||$ 表示取绝对值; k 为迭代次数; η 为设置的收敛阈值; 本文取 10^{-5} 。

迭代结束后,即可求得谐波状态量的线性可行域 $\mathbf{x}_d \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u$ 。

求得谐波状态量的线性可行域后,状态估计模型(7)可简化为带线性约束的凸优化模型,如式(20)所示。

$$\begin{cases} \min J(\lambda, \mathbf{x}) = \left(\frac{\mathbf{Z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\sigma} \right)^T \left(\frac{\mathbf{Z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\sigma} \right) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_m) + \mathbf{H}_m (\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_d \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{x}_m$ 为谐波状态量线性可行域的中点; $\mathbf{H}_m$ 为 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 在 $\mathbf{x}_m$ 处的雅可比矩阵。

采用内点法(interior point method, IPM)即可求解式(20),获取谐波状态量的估计结果,内点法的具体原理可参见文献[33]。

3.2 混合谐波状态估计的整体流程

本文所提的混合谐波状态估计方法的整体流程如图2所示,具体步骤如下:

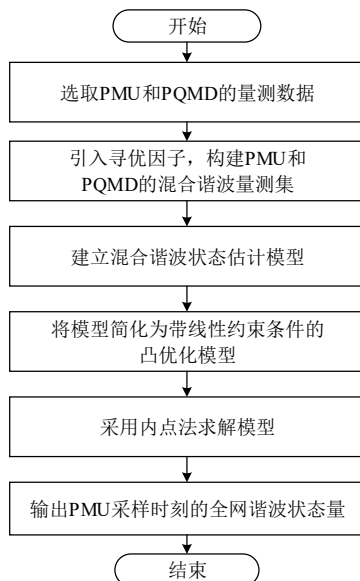


图2 混合谐波状态估计流程图

Fig. 2 Flow chart of hybrid harmonic state estimation

1) 以 PMU 采样时刻为估计时刻,根据式(1)–(3)选取 PMU 和 PQMD 的量测数据。

2) 根据式(5)–(6)构建 PMU 和 PQMD 的混合谐波量测集。

3) 按式(7)建立混合谐波状态估计模型。

4) 根据式(12)–(16)建立谐波状态量线性可行域的估计模型。

5) 采用线性规划算法迭代求解谐波状态量的线性可行域。

6) 按式(20)将状态估计模型简化为带线性约束条件的凸优化模型。

7) 采用内点法求解式(20),输出估计时刻的全网谐波状态量。

4 算例分析

本文选取谐波电压幅值和相角作为状态量,以 IEEE57 节点系统和 IEEE118 节点系统为例验证所提方法的可行性与有效性,仿真软件为 MATLAB2018b,采用 MATPOWER 工具箱进行基波潮流计算。

4.1 量测数据

在 IEEE57 节点系统中,设置谐波源位于节点 2、6、14、23、33、42、47、52、56;在 IEEE118 节点系统中,设置谐波源位于节点 5、13、24、35、50、66、78、89、102、114;两个系统的参考节点均设为节点 1。其次,基于 0-1 型整数线性规划算法^[34]计算出满足系统可观性所需的最少量测设备数量及安装位置,得到至少需要 17 个量测设备和 37 个量测设备才能使得 IEEE57、IEEE118 节点系统完全可观。之后,依据最大冗余度原理^[35]在 IEEE57 节点系统中配置 7 个 PMU 并在剩余 10 个节点配置 PQMD,在 IEEE118 节点系统中配置 15 个 PMU 并在剩余 22 个节点配置 PQMD,IEEE57、IEEE118 节点系统的网络拓扑及量测配置见附录 A。

量测配置完成后,通过谐波潮流计算获取所需要的谐波量测数据,具体流程如下:首先通过 MATPOWER 计算基波潮流,并根据谐波频谱计算谐波注入电流,谐波负荷频谱表见附录 A;再通过谐波潮流计算得到电网的谐波状态量及相应的量测数据。

为模拟谐波源的波动性,设置 PQ 节点的负荷在额定值的 $\pm 10\%$ 内波动,以 0.2s 为间隔进行多次谐波潮流计算,每一次谐波潮流计算得到一组 PMU 量测数据。PQMD 每隔 3min 上传一次统计值,故 PQMD 采样时段内共有 900 组量测数据,统计每 900

组量测数据的最大值、最小值、平均值、95%概率大值、95%概率小值作为 PQMD 的统计型数据。为模拟 PQMD 采样的非同步性, 赋予每个 PQMD 一个采样偏差 Δt , Δt 服从均值为 0 且标准差为 10s 的正态分布。

4.2 评估指标

为了验证本文所提谐波状态估计方法的有效性, 采用均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)、最大绝对百分比误差(maximum absolute percentage error, MaxAPE)来对谐波状态估计结果进行评估。评估指标的计算公式如式(21)–(23)所示。

$$E_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (21)$$

$$E_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (22)$$

$$E_3 = \max\left(\left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right|\right) \times 100\%, i = 1 \cdots n \quad (23)$$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 分别谐波状态估计值的均方根误差、平均绝对百分比误差和最大绝对百分比误差; $\hat{x}_i$ 为第 i 个谐波状态量的估计值; x_i 为第 i 个第 i 个谐波状态量的真实值。上述指标越小, 说明谐波状态估计结果的精度越高。

4.3 谐波状态估计算法的精度对比分析

为验证本文所提谐波状态估计算法的准确性, 设置以下 3 种算法进行对比分析。

算法一: 在 PQMD 统计型数据的最大值和最小值间进行 1000 次随机采样, 每次采样得到的 PQMD 量测数据均与 PMU 量测数据融合, 由此构建 1000 组融合数据。此后针对每组融合数据, 采用加权最小二乘法进行谐波状态估计, 由此得到 1000 组估计结果, 取 1000 组估计结果的平均值作为最终估计结果。

算法二: 将算法一中的估计方法改为基于 Huber 权函数的抗差估计法^[20], 其余设置均与算法一相同。

算法三: 在统计型数据的最大值和最小值中引入寻优因子, 将 PQMD 测点的谐波数据表征为有界的不确定性变量, 并构建 PMU 和 PQMD 的混合谐波量测集, 采用本文所提方法进行谐波状态估计。

以 IEEE57 节点系统的 5 次谐波为例, 各算法谐波电压幅值和相角的估计结果如图 3 所示, 各算法估计结果的绝对百分比误差如图 4 所示。IEEE57 节点系统中 7 次、11 次谐波的估计结果和 IEEE118

节点系统中各次谐波的估计结果如附录 B 所示。

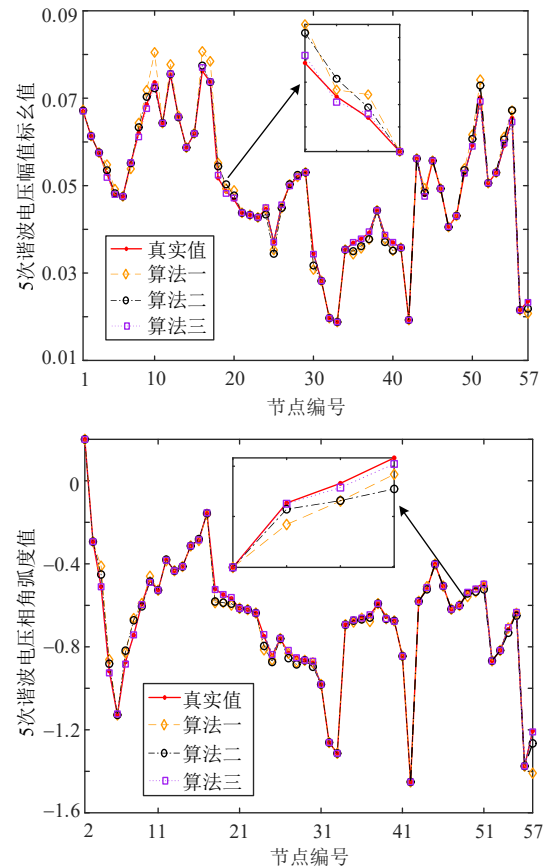


图3 IEEE57 节点系统中不同算法的 5 次谐波估计结果
Fig. 3 Estimation results of 5th harmonic by different algorithms in IEEE57 bus system

由图 3—4 和图 B1—B5 可知, 算法一在 PMU 测点及其邻近节点的状态估计精度较高, 但其余节点存在较大的估计误差。这是由于统计型数据的时标非同步性导致其与实际谐波数据之间存在较大的偏差, 算法一在赋予量测数据先验权重后采用最小二乘法对状态量进行估计, 此算法在量测数据存在偏差时的估计精度较低, 故其在 PQMD 测点及其邻近节点的估计误差较大。算法二通过引入 Huber 权函数, 在估计过程中依据量测残差自适应调整量测权重, 在一定程度上抑制了 PQMD 统计型数据的时标非同步偏差。但当多个量测数据均存在偏差时, 此类方法会发生残差污染和残差淹没的问题^[36], 即其量测残差可能会错误指导量测权重的调节, 导致算法的抗差性能下降甚至失去抗差能力, 故算法二的估计结果精度仍有待提高。算法三通过引入寻优因子将谐波状态估计转换为一个优化问题, 充分利用了高精度的 PMU 量测数据与系统中的零注入功率约束, 能够自适应修正 PQMD 测点的谐波数据, 确保标准化量测残差平方和在优化变量的可行域内达到最小, 避免了残差污染和残差淹没的问题, 从而得到更加精确的估计结果。

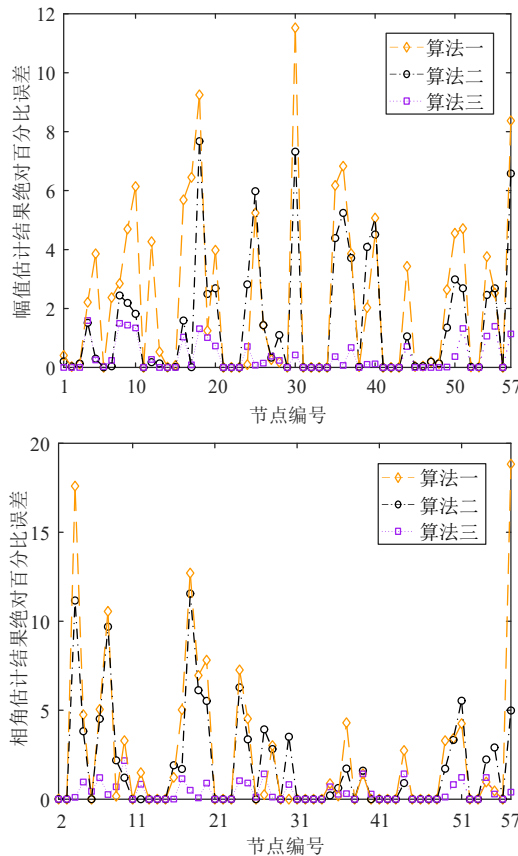


图 4 IEEE57 节点系统中不同算法的 5 次谐波估计误差
Fig. 4 Estimation error of 5th harmonic by different algorithms in IEEE57 bus system

为了对不同算法的估计结果进行量化对比分析,分别计算 3 种算法的评估指标,IEEE57 节点系统中各算法的评估指标如表 2 所示,IEEE118 节点系统中各算法的评估指标如附录 B 所示。

由表 2 和表 B1 可知,算法三在 IEEE57 节点系

表 2 IEEE57 节点系统中不同算法的评估指标
Table 2 Evaluation index of different algorithms in IEEE57 bus system

谐波次数	类型	算法	E_1	$E_2/\%$	$E_3/\%$
5 次	幅值	算法一	0.0018	2.1883	11.796
		算法二	0.0009	1.4564	7.8792
		算法三	0.0004	0.3541	1.5923
	相角	算法一	0.0354	2.2693	19.045
		算法二	0.0219	1.7839	11.295
		算法三	0.0043	0.3986	2.1709
7 次	幅值	算法一	0.0017	2.4052	13.564
		算法二	0.0008	2.1608	10.276
		算法三	0.0003	0.4816	1.8390
	相角	算法一	0.0436	3.8176	21.254
		算法二	0.0263	2.3721	12.937
		算法三	0.0062	0.6209	1.8718
11 次	幅值	算法一	0.0011	2.9861	16.227
		算法二	0.0006	2.6471	10.861
		算法三	0.0001	0.4814	1.8493
	相角	算法一	0.0387	4.0671	20.948
		算法二	0.0305	3.0179	13.965
		算法三	0.0061	0.6011	1.8913

统和 IEEE118 节点系统中的 3 个评估指标均最小,具有最低的估计误差。此外,值得注意的是,算法三在 IEEE57 节点系统中的最大绝对百分比误差仅为 2%左右,在 IEEE118 节点系统中的最大绝对百分比误差仅为 8%左右,远小于算法一和算法二,验证了本文所提算法具备良好的估计精度且适用于不同的系统。

4.4 不同负荷波动水平下的估计精度测试

为进一步验证本文方法的有效性,将 PQ 节点的负荷在其额定值附近的波动范围定义为负荷波动水平,设置负荷的波动水平从 10%逐步增大至 25%,分别采用 3 种算法进行谐波状态估计。考虑到篇幅因素,本节仅以 IEEE57 节点系统的 5 次谐波为例,第 4.5 节同理。各算法谐波电压幅值和相角估计结果的评估指标如表 3 所示。为更直观地展示不同算法在负荷波动水平变化下的估计精度,绘制不同波动水平下各算法的平均绝对百分比误差变化图,如图 5 所示。

表 3 不同波动水平下各算法估计结果的评估指标
Table 3 Evaluation index of estimation results of each algorithm under different fluctuation levels

波动	类型	算法	E_1	$E_2/\%$	$E_3/\%$
10%	幅值	算法一	0.0018	2.1883	11.796
		算法二	0.0009	1.4564	7.8792
		算法三	0.0004	0.3541	1.5923
	相角	算法一	0.0354	2.2693	19.045
		算法二	0.0219	1.7839	11.295
		算法三	0.0043	0.3986	2.1709
15%	幅值	算法一	0.0025	3.7578	15.624
		算法二	0.0016	2.3926	10.037
		算法三	0.0005	0.4398	2.1186
	相角	算法一	0.0427	3.4961	24.351
		算法二	0.0308	2.5281	16.592
		算法三	0.0057	0.5446	2.7251
20%	幅值	算法一	0.0043	5.2564	22.106
		算法二	0.0026	3.8173	14.316
		算法三	0.0007	0.6838	3.6567
	相角	算法一	0.0587	5.0843	32.364
		算法二	0.0409	3.8732	22.037
		算法三	0.0092	0.8385	4.2926
25%	幅值	算法一	0.0073	7.1246	30.276
		算法二	0.0039	4.9798	24.003
		算法三	0.0011	0.8927	5.8724
	相角	算法一	0.0891	6.8726	43.622
		算法二	0.0538	5.1429	35.741
		算法三	0.0154	1.3185	7.4536

从表 3 和图 5 中可以看出,随着负荷波动水平的增大,3 种算法的估计误差均呈现上升趋势。其中算法一和算法二的估计误差随波动水平的增大而显著增大,这是由于波动水平增大时,PQMD 统计型数据时标非同步引起的误差也随之增大,进而

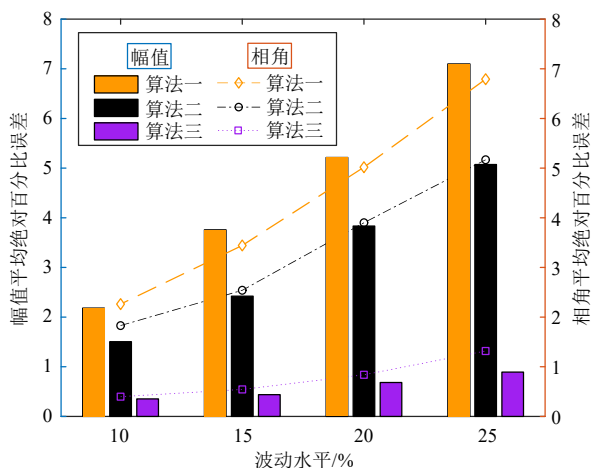


图5 不同波动水平下各算法的估计误差变化

Fig. 5 Variation of estimation error of each algorithm under different fluctuation levels

造成估计误差显著增大。而本文算法在负荷波动水平增大至 25% 时仍具备较低的估计误差，其原因在于，负荷波动水平的增大相当于扩大了 PQMD 测点谐波数据的边界范围，即增大了内点法的可行域搜索范围。对于凸优化模型而言，内点法能够保证求解的全局最优性，故所提算法在负荷波动水平较大的情况下仍然有效。

4.5 PMU 配置数量占比对算法精度的影响

为进一步验证本文算法的适用性，本节分析 PMU 配置数量占比对本文算法估计效果的影响，在 IEEE57 节点系统中设置以下 4 个场景进行对比分析，以 5 次谐波为例，每个场景的负荷波动水平平均设置为 10%。

场景一：与初始量测配置一致，即配置 7 个 PMU 测点和 10 个 PQMD 测点。

场景二：在初始的 7 个 PMU 测点中选取 1 个测点，并将其更改为 PQMD 测点。

场景三：在初始的 7 个 PMU 测点中选取 2 个测点，并将其更改为 PQMD 测点。

场景四：在初始的 7 个 PMU 测点中选取 3 个测点，并将其更改为 PQMD 测点。

上述场景中，场景二至场景四均具有多种配置情况，故在后续的算例分析中，3 种算法均历遍所有的配置情况，在计算评估指标时，取所有配置情况估计结果指标的平均值。

分别采用 3 种算法在上述 4 个场景中进行谐波状态估计，各算法谐波电压幅值和相角估计结果的评估指标如表 4 所示。为更直观地展示不同算法在 PMU 数量占比变化下的估计精度，绘制不同场景下各算法估计结果的平均绝对百分比误差变化图，如图 6 所示。

表 4 不同场景下各算法估计结果的评估指标

Table 4 Evaluation index of estimation results of each algorithm under different scenarios

场景	类型	算法	E_1	$E_2/\%$	$E_3/\%$
场景一	幅值	算法一	0.0018	2.1883	11.796
		算法二	0.0009	1.4564	7.8792
		算法三	0.0004	0.3541	1.5923
	相角	算法一	0.0354	2.2693	19.045
		算法二	0.0219	1.7839	11.295
		算法三	0.0043	0.3986	2.1709
场景二	幅值	算法一	0.0038	4.8982	17.429
		算法二	0.0025	3.5867	14.006
		算法三	0.0009	0.7541	4.2826
	相角	算法一	0.0511	4.5061	25.499
		算法二	0.0379	3.2663	16.873
		算法三	0.0079	0.6993	3.8928
场景三	幅值	算法一	0.0063	6.3781	27.823
		算法二	0.0045	5.4096	22.061
		算法三	0.0014	1.2992	7.5881
	相角	算法一	0.0857	6.6723	34.962
		算法二	0.0504	5.0356	27.026
		算法三	0.0132	1.1714	7.0255
场景四	幅值	算法一	0.0091	9.1727	39.864
		算法二	0.0076	7.4971	31.718
		算法三	0.0021	1.8609	12.043
	相角	算法一	0.1221	10.641	48.953
		算法二	0.0937	7.2789	43.828
		算法三	0.0203	1.7938	13.391

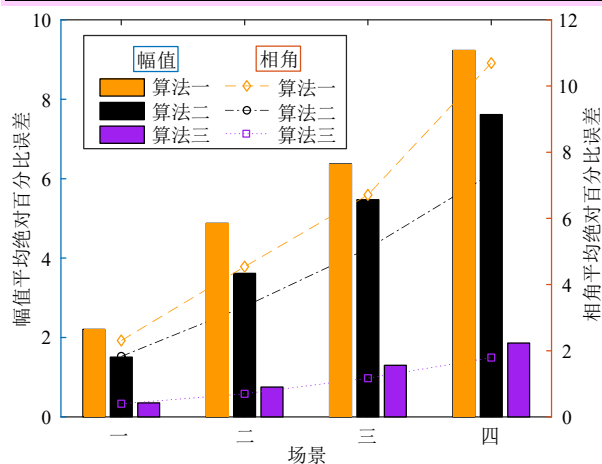


图6 不同场景下各算法的估计误差变化

Fig. 6 Variation of estimation error of each algorithm under different scenarios

从表 4 和图 6 中可以看出，随着 PMU 配置数量占比的减少，3 种算法的估计误差均呈现上升趋势。这是由于当 PMU 配置数量占比减少时，混合量测集的质量也随之下降。然而，即使在 PMU 配置数量占比较低的情况下，本文算法的估计精度仍远高于算法一和算法二，说明了本文算法具备更好的估计性能。

5 结论

针对 PMU 难以满足谐波状态估计可观性条件

的问题,本文将 PQMD 的统计型数据作为 PMU 的数据补充源,提出了融合 PMU 和 PQMD 量测数据的混合谐波状态估计方法。在满足可观性条件的同时,有效解决了统计型数据时标非同步导致估计精度较低的问题。

1) 针对统计型数据存在时标非同步偏差的问题,提出了一种基于量测数据自适应修正的谐波状态估计方法。将 PQMD 测点的谐波数据视为待优化变量,使谐波状态估计转换为一个优化问题,通过寻优因子自适应修正 PQMD 测点的谐波数据,从而获取更加准确的估计结果。

2) 针对谐波状态估计模型非凸,导致模型求解效率低且难以获得全局最优解的问题。提出了一种基于可行域线性化的模型求解方法,将状态估计模型简化为带线性约束的凸优化模型,从而保证求解结果的全局最优性。

3) 在算例中验证了所提算法相较于传统状态估计算法具有显著的优势,能够有效提升谐波状态估计的准确性,且在负荷波动水平较大和 PMU 配置数量占比较低的情况下仍具备有效性。

本文验证了基于量测数据自适应修正的 PMU/PQMD 混合谐波状态估计的有效性和鲁棒性,但该算法仅适用于全网可观的系统,后续将研究不完全可观系统中的谐波状态估计方法,以提升算法的适用性。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 聂铭,李猛,和敬涵,等.基于状态估计的大规模新能源送出线路纵联保护[J].电网技术,2024,48(5):2189-2198.
NIE Ming, LI Meng, HE Jinghan, et al. Pilot protection of large-scale renewable energy transmission lines based on state estimation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2189-2198(in Chinese).
- [2] 姜洪浪,王爽,汪龙峰,等.新能源发电典型波动工况下动态电能计量算法研究[J].电力信息与通信技术,2024,22(12):69-76.
JIANG Honglang, WANG Shuang, WANG Longfeng, et al. Research on dynamic energy metering algorithms under typical fluctuation conditions of new energy power generation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(12): 69-76(in Chinese).
- [3] 冯函宇,王红,齐林海,等.基于时空图卷积网络的谐波状态估计方法研究[J].电网技术,2023,47(11):4488-4496.
FENG Hanyu, WANG Hong, QI Linhai, et al. Harmonic state estimation based on spatiotemporal graph convolutional network[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4488-4496(in Chinese).
- [4] 何逢广,李朝阳,张华赢,等.基于实测数据的牵引供电系统并联谐波谐振概率识别方法[J].电网技术,2024,48(5):2084-2094.
HE Fengguang, LI Zhaoyang, ZHANG Huaying, et al. Parallel harmonic resonance probability identification of traction power supply system based on measured data[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2084-2094(in Chinese).
- [5] 张逸,刘必杰,林才华,等.基于负荷等值阻抗参数的谐波责任划分方法[J].高电压技术,2023,49(8):3487-3496.
ZHANG Yi, LIU Bijie, LIN Caihua, et al. Harmonic responsibility division method based on load equivalent impedance parameters[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3487-3496.
- [6] HEYDT G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 569-576.
- [7] 吴笃贵,徐政.基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)——理论、模型与求解算法[J].电工技术学报,2004,19(2):64-68,88.
WU Dugui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (I)——theory, model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 64-68, 88(in Chinese).
- [8] 徐志向,侯世英,周林,等.基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J].电力自动化设备,2006,26(11):28-31.
XU Zhixiang, HOU Shiyong, ZHOU Lin, et al. Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 28-31(in Chinese).
- [9] 欧朱建,程新功,宗西举,等.电网谐波状态估计中的可观性分析[J].电力系统自动化,2015,39(6):53-59,151.
OU Zhujian, CHENG Xingong, ZONG Xiju, et al. Observability analysis of power grid harmonic state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 53-59, 151(in Chinese).
- [10] MELO I D, PEREIRA J L R, VARIZ A M, et al. Harmonic state estimation for distribution networks using phasor measurement units[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 147: 133-144.
- [11] 肖先勇,胡誉蓉,王杨,等.基于非同步电能质量监测系统的谐波状态估计[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4121-4131.
XIAO Xianyong, HU Yurong, WANG Yang, et al. Harmonic state estimation based on asynchronous power quality monitoring system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4121-4131(in Chinese).
- [12] 张逸,林焱,吴丹岳.电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):138-147.
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147(in Chinese).
- [13] IEEE recommended practice for the transfer of power quality data: IEEE Std 1159.3—2003[S]. New York: IEEE, 2004: 1-138.
- [14] 林洪洲,邵振国,陈飞雄,等.采用区间型非同步监测数据的鲁棒动态谐波状态估计[J].电网技术,2023,47(4):1701-1708.
LIN Hongzhou, SHAO Zhenguo, CHEN Feixiong, et al. Robust dynamic harmonic state estimation using interval asynchronous monitoring data[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1701-1708(in Chinese).
- [15] 巨云涛,吴文传,程学启,等.基于多源信息的配电网电流匹配状态估计[J].电力系统自动化,2012,36(16):53-57.
JU Yuntao, WU Wenchuan, CHENG Xueqi, et al. Multi-source information based current matching state estimation for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 53-57(in Chinese).
- [16] LI Jiang, GAO Ming, LIU Bo, et al. Forecasting aided distribution network state estimation using mixed μ PMU-RTU measurements[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 6524-6534.
- [17] 徐俊俊,吴在军,张腾飞,等.融入多源量测数据的配电网分布式区间状态估计[J].中国电机工程学报,2022,42(24):8888-8899.
XU Junjun, WU Zaijun, ZHANG Tengfei, et al. A distributed interval state estimation framework of distribution networks based on multi-

- source measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8888-8899(in Chinese).
- [18] 王少芳, 刘广一, 黄仁乐, 等. 多采样周期混合量测环境下的主动配电网状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 30-36. WANG Shaofang, LIU Guangyi, HUANG Renle, et al. State estimation method for active distribution networks under environment of hybrid measurements with multiple sampling periods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 30-36(in Chinese).
- [19] 刘喆林, 王成山, 李鹏, 等. 多源量测数据融合的配电网状态估计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2605-2614. LIU Zhelin, WANG Chengshan, LI Peng, et al. State estimation of distribution networks based on multi-source measurement data and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2605-2614(in Chinese).
- [20] COSTA A S, ALBUQUERQUE A, BEZ D. An estimation fusion method for including phasor measurements into power system real-time modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1910-1920.
- [21] WANG Ying, MA Haixing, XIAO Xianrong, et al. Harmonic state estimation for distribution networks based on multi-measurement data [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2311-2325.
- [22] 陈艺煌, 邵振国, 林俊杰, 等. 融合多源量测数据的区间型抗差谐波状态估计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(23): 7394-7405. CHEN Yihuang, SHAO Zhengguo, LIN Junjie, et al. Interval harmonic robust state estimation method based on multi-source measurement data fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7394-7405(in Chinese).
- [23] 郭桦, 张伯明, 吴文传, 等. 直角坐标下含零注入约束的电力系统状态估计修正牛顿法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 96-100. GUO Ye, ZHANG Bomeng, WU Wenchuan, et al. Power system state estimation solution with zero injection constraints using modified newton method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 96-100(in Chinese).
- [24] 李从善, 刘天琪, 李兴源, 等. 用于电力系统状态估计的 WAMS/SCADA 混合量测数据融合方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2686-2691. LI Congshan, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Data fusion method of WAMS/SCADA hybrid measurements in power system state estimation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2686-2691(in Chinese).
- [25] BI Tianshu, GUO Jinrui, XU Kai, et al. The impact of time synchronization deviation on the performance of synchrophasor measurements and wide area damping control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1545-1552.
- [26] 曲正伟, 张嘉曦, 王云静, 等. 考虑分布式电源不确定性的配电网改进仿射状态估计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 104-112. QU Zhengwei, ZHANG Jiaxi, WANG Yunjing, et al. Improved affine state estimation for distribution network considering uncertainty of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 104-112(in Chinese).
- [27] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 53-60. LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60(in Chinese).
- [28] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [29] ABURA A, EXPOSITO A G. Power system state estimation: theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [30] 黄蔓云, 费有蝶, 卫志农, 等. 高比例新能源下的交直流配电网预测辅助区间状态估计[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 34-43. HUANG Manyun, FEI Youdie, WEI Zhinong, et al. Interval state estimation aided by forecasting for AC/DC distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 34-43(in Chinese).
- [31] 廖小兵, 刘开培, 张亚超, 等. 基于区间泰勒展开的不确定性潮流分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 750-758. LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, ZHANG Yachao, et al. Uncertain power flow analysis based on interval Taylor expansion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 750-758(in Chinese).
- [32] 徐俊俊, 吴在军, 胡秦然, 等. 考虑多类型分布式电源和负荷不确定性的主动配电网区间状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3255-3266. XU Junjun, WU Zaijun, HU Qinran, et al. Interval state estimation for active distribution networks considering uncertainties of multiple types of DGs and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3255-3266(in Chinese).
- [33] 厉超, 卫志农, 倪明, 等. 基于变量代换内点法的加权最小绝对值抗差状态估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 48-52, 106. LI Chao, WEI Zhinong, NI Ming, et al. WLAV robust state estimation based on variable substitution interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 48-52, 106(in Chinese).
- [34] 朱茂林, 刘灏, 毕天姝. 考虑风电场量测相关性的双馈风力发电机鲁棒动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 726-740. ZHU Maolin, LIU Hao, BI Tianshu. Robust dynamic state estimation of doubly-fed induction generator considering measurement correlation in wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 726-740(in Chinese).
- [35] 鲍威, 蒋雪冬, 陈利跃, 等. 考虑观测冗余度最大的 0-1 线性规划电力系统 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2051-2056. BAO Wei, JIANG Xuedong, CHEN Liyue, et al. A 0-1 linear programming approach to optimal phasor measurement units placement considering maximized system observability redundancy[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2051-2056(in Chinese).
- [36] DOBAKSHARI A S, TERZIJA V, AZIZI S. Normalized deleted residual test for identifying interacting bad data in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4006-4016.



詹翔

在线出版日期: 2025-03-27。

收稿日期: 2024-07-16。

作者简介:

詹翔(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量, E-mail: 2212772726@qq.com;

邵振国(1970), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为能源系统不确定理论与方法、电能质量分析与治理、电力大数据理论与方法等, E-mail: shao.zg@fzu.edu.cn;

林俊杰(1992), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统状态估计, E-mail: linjunjie@fzu.edu.cn;

陈飞雄(1990), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统协同优化控制, E-mail: feixiongchen@fzu.edu.cn;

张嫣(1979), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电能质量及电力系统稳定与控制, E-mail: zyyww@fzu.edu.cn。

(编辑 李健一)

附录 A

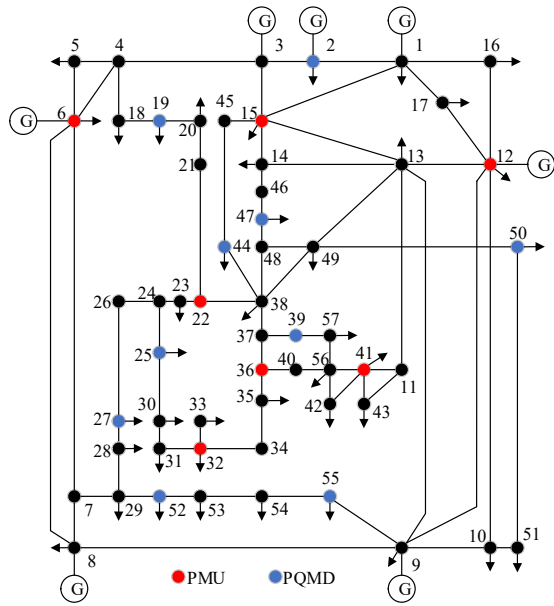


图 A1 IEEE 57 节点系统及量测配置
Fig. A1 IEEE57 bus system and measurement configuration

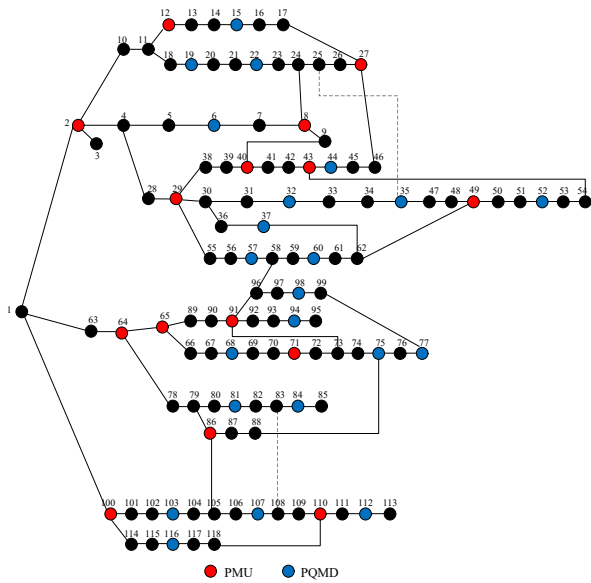


图 A2 IEEE 118 节点系统及量测配置
Fig. A2 IEEE118 bus system and measurement configuration

表 A1 谐波负荷频谱表

Table A1 Spectrum table of harmonic loads

谐波次数	幅值/%	相对相角/°
1	100	0
5	18.24	-55.68
7	11.9	-84.11
11	5.73	-143.56

附录 B

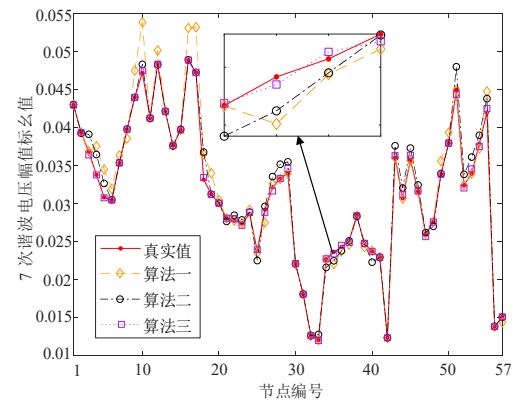


图 B1 IEEE57 节点系统中不同算法的 7 次谐波估计结果
Fig. B1 Estimation results of 7th harmonic by different algorithms in IEEE57 bus system

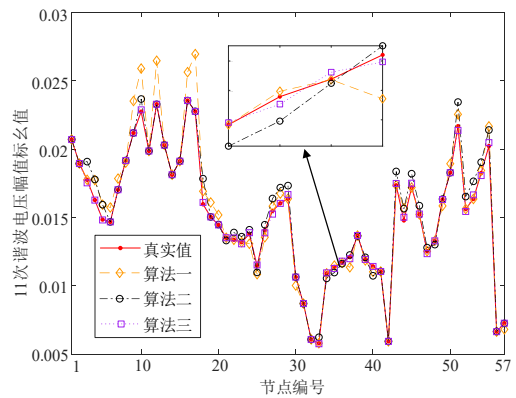


图 B2 IEEE57 节点系统中不同算法的 11 次谐波估计结果

Fig. B2 Estimation results of 11th harmonic by different algorithms in IEEE57 bus system

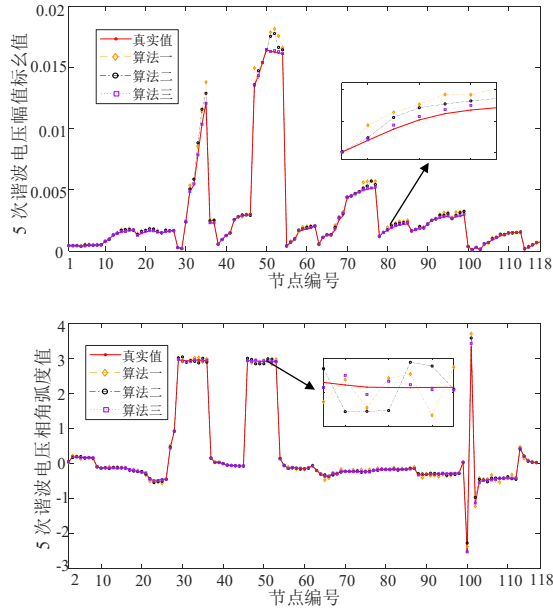


图 B3 IEEE118 节点系统中不同算法的 5 次谐波估计结果
Fig. B3 Estimation results of 5th harmonic by different algorithms in IEEE118 bus system

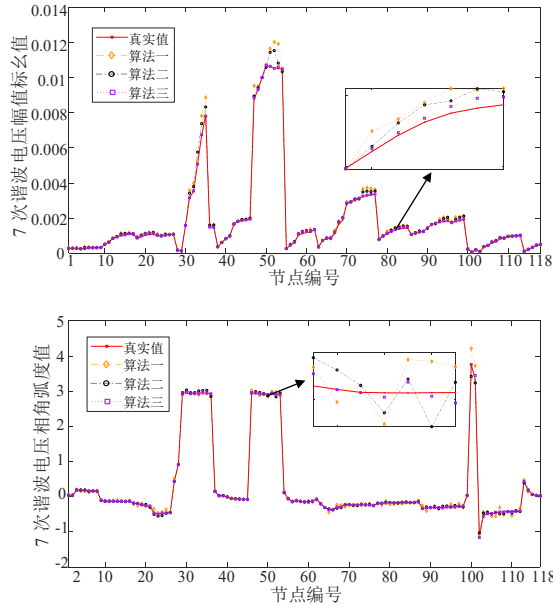


图 B4 IEEE118 节点系统中不同算法的 7 次谐波估计结果
Fig. B4 Estimation results of 7th harmonic by different algorithms in IEEE118 bus system

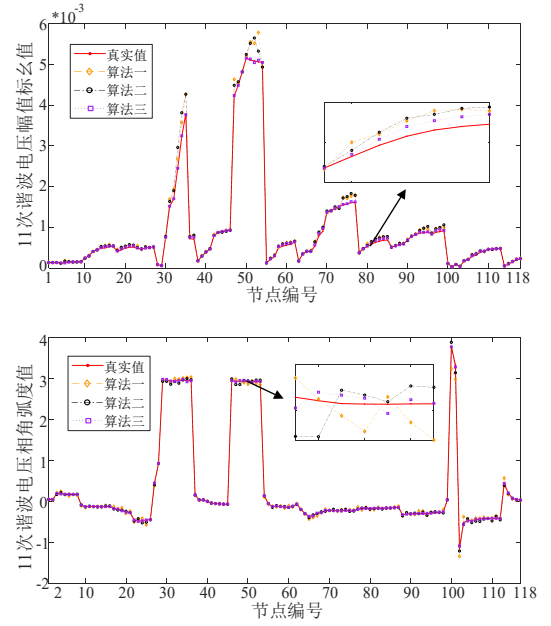


图 B5 IEEE118 节点系统中不同算法的 11 次谐波估计结果
Fig. B5 Estimation results of 11th harmonic by different algorithms in IEEE118 bus system

表 B1 IEEE118 节点系统中不同算法的评估指标

Table B1 Evaluation index of different algorithms in IEEE118 bus system

谐波次数	类型	算法	E_1	$E_2/\%$	$E_3/\%$
5 次	幅值	算法一	0.00039	8.1488	32.054
		算法二	0.00027	4.3712	19.004
		算法三	0.00005	1.3643	8.6451
	相角	算法一	0.0561	10.005	29.531
		算法二	0.0454	5.7219	16.213
		算法三	0.0124	1.1678	8.2765
7 次	幅值	算法一	0.00028	8.0487	32.329
		算法二	0.00017	4.3153	18.468
		算法三	0.00004	1.6697	8.4998
	相角	算法一	0.0714	10.367	30.049
		算法二	0.0439	5.2089	17.089
		算法三	0.0143	1.2125	7.2303
11 次	幅值	算法一	0.00012	7.9466	38.221
		算法二	0.00009	6.0587	31.709
		算法三	0.00002	2.1973	8.7427
	相角	算法一	0.0726	9.7721	38.383
		算法二	0.0357	5.8011	29.157
		算法三	0.0125	1.5735	7.7983