

DOI:10.11784/tdxbz202504039

# 一种可加速预测误差最小化的系统惯量在线评估方法

曲小慧<sup>1</sup>, 陈国剑<sup>2</sup>, 伍文聪<sup>3,4</sup>, 蔡海青<sup>3,4</sup>, 顾浩瀚<sup>3,4</sup>

- (1. 东南大学电气工程学院, 南京 210096; 2. 东南大学软件学院, 南京 211189;  
3. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663;  
4. 广东省新能源电力系统智能运行与控制重点实验室, 广州 510663)

**摘要:** 针对现有电力系统惯量在线评估方法存在鲁棒性差、准确度低和计算复杂等问题, 提出了一种可加速预测误差最小化(PEM)的系统节点等效惯量连续在线评估方法. 该方法以电力系统节点为对象, 基于多变量输出误差状态空间(MOESP)模型辨识和 PEM 的协同优化算法, 可同时实现电力系统节点等效惯性常数和阻尼系数的解耦评估. 相较于现有在线惯量评估方法, 通过 PEM 算法的迭代特性弥补 MOESP 算法可能产生随机误差的缺陷, 不仅保留了 PEM 算法的鲁棒性和准确性, 还利用 MOESP 算法提升了 PEM 算法的速度, 两者相辅相成, 稳定且高效地实现电力系统惯量的在线快速评估, 利于推动电力系统更加稳定、高效地运行. 最后通过改进型 IEEE 9 总线电力系统对所提方法的有效性和准确性进行了验证, 结果表明, 采用所提方法得到的节点惯性常数评估相对误差 $\leq 2.12\%$ , 阻尼系数评估相对误差 $\leq 4.00\%$ , 较传统方法如状态子空间(N4SID)模型辨识方法精度提升约 64.96%.

**关键词:** 电力系统节点惯量; 惯性常数; 阻尼系数; 在线评估; 协同优化算法

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)05-0520-11

## Online Evaluation Method for System Inertia with Accelerated Prediction Error Minimization

Qu Xiaohui<sup>1</sup>, Chen Guojian<sup>2</sup>, Wu Wencong<sup>3,4</sup>, Cai Haiqing<sup>3,4</sup>, Gu Haohan<sup>3,4</sup>

- (1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. College of Software Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;  
3. State Key Laboratory of HVDC, CSG Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;  
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** To address the issues of existing power system inertia online evaluation methods, including insufficient robustness, low prediction accuracy, and computational complexity, this paper proposed a continuous online evaluation method for equivalent nodal inertia featuring accelerated prediction error minimization (PEM). For power system nodes, a collaborative optimization algorithm is proposed to synergistically integrate multivariable output error state space (MOESP) model identification and PEM principles, thereby enabling simultaneous real-time evaluation of equivalent inertia constants and damping coefficient at power system nodes. Compared with existing online inertia evaluation techniques, the iterative characteristics of the PEM algorithm compensate for the potential stochastic errors inherent in the MOESP algorithm. This approach preserves the robustness and accuracy of PEM while enhancing computational efficiency by using the MOESP algorithm. The complementary integration of these methods enables stable and high-speed online evaluation of power system inertia, thereby promoting stable and efficient grid operation. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method were verified using an improved IEEE 9-

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-06-18.

作者简介: 曲小慧 (1981—), 女, 博士, 教授, xhqu@seu.edu.cn.

通信作者: 陈国剑, 220225960@seu.edu.cn.

基金项目: 直流输电技术全国重点实验室开放基金资助项目 (SKLHVDC-2023-KF-09).

Supported by the State Key Laboratory of HVDC (No. SKLHVDC-2023-KF-09).

bus power system. Results show that the proposed method achieves a relative error of less than or equal to 2.12% in evaluating the node inertia constant and less than or equal to 4.00% in evaluating the damping coefficient. Compared with traditional methods such as the state subspace (N4SID) model identification method, the accuracy is improved by approximately 64.96%.

**Keywords:** power system nodal inertia; inertia constant; damping coefficient; online evaluation; collaborative optimization algorithm

在传统电力系统中,惯性主要源于旋转元件的转子动能。然而,随着双碳战略的持续推进,以化石能源为主的同步电源将被大量淘汰<sup>[1]</sup>,取而代之的是通过电力电子设备并网的非同步电源。由于其提供的功率与系统频率相互解耦<sup>[2]</sup>,当系统遭受有功功率冲击时,非同步电源无法主动吞吐线路中的功率变化量,为系统提供惯性支撑。在惯量水平逐年降低的新型电力系统中<sup>[3]</sup>,系统频率动态响应性能低下<sup>[4]</sup>,无法有效抑制系统的频率变化,容易诱发电力系统的低频减载或高频切机事故,严重时甚至会造成电力系统大面积瘫痪<sup>[5]</sup>。因此,为掌握传统电力系统承载非同步电源的极限,准确连续的在线监测系统惯量水平具有十分重要的现实意义。

按评估的时效性,现有惯量评估方法分为基于频率事故的离线惯量评估<sup>[6-9]</sup>、基于稳态运行的在线惯量评估<sup>[10-16]</sup>和基于人工智能的惯量预测<sup>[17-18]</sup>。基于频率事故的离线惯量评估是指电力系统出现频率事故后,利用广域测量系统实时反馈的故障信息进行惯量评估<sup>[6-9]</sup>。然而,这类方法依赖系统故障时的信息,属于事后评估,无法实现电力系统惯量的常态化估计。基于人工智能的惯量预测是指应用各种人工智能算法,对电力系统历史数据进行回归分析,建立惯量与系统其他变量之间的预测回归模型,从而实现对未来惯量的近似预测<sup>[17-18]</sup>。尽管人工智能算法能够高效地获取多变量之间复杂的非线性特征,实现惯量水平趋势的智能化预测,但这类方法当前仍处于探索阶段,尚存在数据需求量大、预测准确度低和模型鲁棒性差等诸多缺陷<sup>[19]</sup>。此外,基于大量数据训练出的模型通常仅适用于数据所代表的特定电力系统,当系统中结构发生变化时,该模型可能无法再发挥作用。因此,这类方法的实际应用价值有待进一步验证和优化。综上,目前上述两类方法对如今惯量资源时空分布错杂的新型电力系统具有一定的局限性<sup>[20]</sup>。

电力系统在稳态运行过程中,由于机组出力波动、负荷连续变化等不确定性功率扰动,使得电网频率会始终围绕工频微幅波动<sup>[21]</sup>。基于这一特性,相关研究提出利用电力系统稳态功率波动数据进行系统惯量的在线监测。文献[10]利用容积卡尔曼算法实现

了电力系统区域惯量的在线评估,但该方法的准确度和速度受限于算法初值的人为设定。同时,在评估过程中忽略了阻尼系数对评估结果的影响,导致阻尼系数和惯性常数的相互耦合,进而影响评估结果的准确性。文献[11]借助旋转不变技术估计信号参数,通过辨识系统的振荡模态,进一步计算系统惯性常数和阻尼系数。该方法虽然能够提供较高精度的评估结果,但其计算过程繁琐,且无法体现在线评估的实时性。文献[12]基于电力系统小扰动的量测数值,建立系统的状态空间模型,进而从中提取惯量。然而,采用状态子空间(numerical algorithms for subspace state space system identification, N4SID)空间模型时,会导致模型与实际系统不匹配,从而降低评估结果的准确性。文献[13]提出运用输出误差(output error, OE)算法对系统参数进行辨识的方法,并以此求解全网各区域的惯量水平。尽管该方法在一定条件下可用于评估系统惯量水平,但由于结果误差较大,通常要求取长时间窗口内的惯性常数平均值以降低评估结果的误差,故实时性较差,难以满足在线评估的实际需求。文献[14-16]则利用最小二乘原理间接获取系统的惯量水平,但在应对新型电力系统中惯量参数的时变特性时,算法会出现明显的不稳定性,且长数据窗口导致的实时性能问题同样限制着其应用范围。

综上,现有的惯量在线评估方法虽然克服了离线惯量评估方法依赖于频率事故的缺陷,实现了电力系统惯量的常态化评估,但大多存在鲁棒性差、准确率低和计算繁琐等问题。为此,本文提出一种可加速预测误差最小化的节点等效惯量连续在线评估方法,该方法采用多变量输出误差状态空间(multivariable output error state space, MOESP)进行模型辨识和预测误差最小化(prediction error minimization, PEM)方法构建协同优化算法,利用PEM算法的迭代特性弥补MOESP算法可能产生随机误差的缺陷,通过MOESP算法缩短PEM算法的迭代过程。同时将阻尼系数纳入建模考虑范畴,解决节点等效惯性常数和阻尼系数之间的耦合问题,进一步提高评估结果的准确性和评估方法的鲁棒性,有效实现了对电力系统节点等效惯量参数的在线评估。

## 1 电力系统惯量在线评估理论基础

### 1.1 电力系统惯量的演变

在物理学中,惯性是物质的固有属性,表现为物质抵御自身运动状态发生改变的能力,是物质蕴含能量的外在表现<sup>[22]</sup>.而电力系统中的惯性则体现为阻碍系统交流频率变化的能力,惯量表证着其能力的大小.

传统电力系统中的惯性主要来源于同步发电机组的转子,系统惯量则被定义为系统中所有在线同步发电机组转子在额定转速下存储的旋转动能,其表达式为

$$\begin{cases} E_{i,\text{gen}} = \frac{1}{2} J_{i,\text{gen}} \omega_0^2 \\ E_{\text{gen}} = \sum_{i=1}^m E_{i,\text{gen}} \alpha_{i,\text{gen}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_{i,\text{gen}}$  为系统中第  $i$  台同步发电机转子的旋转动能,  $\text{MW} \cdot \text{s}$ ;  $J_{i,\text{gen}}$  为相对应的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $\omega_0$  为额定角速度;  $E_{\text{gen}}$  为系统中存储的总旋转动能; 机组运行状态由  $\alpha_{i,\text{gen}}$  表示(0 为离网, 1 为并网运行);  $m$  为同步发电机组总台数.

为更直观地反映系统惯量水平,定义惯性常数  $H_{\text{sys}}$  为电力系统中所有在线同步发电机组转子存储的旋转动能与系统额定容量  $S_n$  之比,单位为 s,即

$$H_{\text{sys}} = \frac{E_{\text{gen}}}{S_n} \quad (2)$$

伴随着同步发电机组的逐步退出,越来越多的非同步电源通过电力电子设备并网运行.由于非同步电源发电与电网完全解耦,无法主动参与电网的惯量支撑<sup>[23]</sup>.在不考虑系统存在额外惯量资源的情况下,随着非同步电源渗透率的提高,系统的相对惯量水平将逐渐下降,导致系统抵御外部有功功率冲击的能力也愈发减弱.

### 1.2 频率响应过程

当传统电力系统遭受外部有功功率冲击时,系统频率发生突变,同步机组主动吞吐转子动能以抚平系统中的功率不平衡量,避免系统因频率跃变而故障.同步机组的频率响应过程具体可通过转子运动方程进行表述,即

$$\frac{2H_{i,\text{gen}}}{f_0} \frac{df_i}{dt} = \frac{P_{i,m} - P_{i,e}}{S_n} - D_{i,\text{gen}} \frac{f_i - f_0}{f_0} \quad (3)$$

式中:  $D_{i,\text{gen}}$  为同步机组  $i$  的阻尼系数;  $P_{i,m}$  和  $P_{i,e}$  分别为相应机组  $i$  的机械功率和电磁功率;  $f_i$  为同步机组  $i$

的连接母线频率;  $f_0$  为工作频率,  $f_0 = 50 \text{ Hz}$ .

若分别以  $f_0$  和  $S_n$  为频率和有功功率的基准值,则式(3)可进一步简化为标么化形式,即

$$2H_{i,\text{gen}} \frac{df_i^*}{dt} = P_{i,m}^* - P_{i,e}^* - D_{i,\text{gen}} (f_i^* - 1) \quad (4)$$

式中:  $f_i^*$  为同步机组  $i$  的连接母线频率的标么值;  $P_{i,m}^*$  和  $P_{i,e}^*$  分别为相应机组  $i$  的机械功率和电磁功率的标么值.

由于常规同步发电机组的一次调频死区为  $\pm 0.033 \text{ Hz}$ ,在电力系统稳态运行条件下,系统频率虽然持续波动,但其波动幅值始终不会超过一次调频死区.因此,电力系统的一次调频功能不会被触发,此时,调速器不会动作,即同步发电机的机械功率变化量  $\Delta P_{i,m}^*$  为零.

由于在实际测量时,同步机组的电磁功率难以直接获取,但其变化量可通过连接母线的有功变化量间接反映.因此,电磁功率的不平衡量可以通过扰动前后联络线功率变化量进行替代.同时,频率偏差的变化率等于频率的变化率,故同步机组  $i$  的转子运动方程可进一步改写为相应的增量形式,即

$$2H_{i,\text{gen}} \frac{d\Delta f_i^*}{dt} = \Delta P_{i,e}^* - D_{i,\text{gen}} \Delta f_i^* \quad (5)$$

式中:  $\Delta f_i^*$  为同步机组  $i$  的连接母线频率偏差的标么值;  $\Delta P_{i,e}^*$  为相应机组  $i$  的有功功率偏差的标么值.

### 1.3 节点等效惯量

受电力系统结构、参数及同步机组分布位置差异的影响,系统的惯性资源呈现出明显的时空分布特性,即随时间和空间的变化而改变<sup>[24]</sup>.同时,随着新能源在电网中渗透率的逐年提升,系统相对惯量水平不断下降,并且伴随着严重的时空分布不均现象.因此,本文类比同步机组的转子运动方程,定义节点等效惯量以表征其阻碍节点频率变化的能力,从而实现系统惯量水平时空分布的可视化实时监测.节点  $i$  的虚拟转子运动方程为

$$2H_i \frac{d\Delta f_i^*}{dt} = \Delta P_i^* - D_i \Delta f_i^* \quad (6)$$

式中:  $H_i$  和  $D_i$  分别表示节点  $i$  的等效惯性常数和阻尼系数;  $\Delta P_i^*$  为连接母线中有功功率偏差的标么值.

利用拉普拉斯变换对上式进行改写,可以得到节点  $i$  关于特征  $H_i$  和  $D_i$  的 1 阶传递函数为

$$G_i(s) = \frac{\Delta f_i^*}{\Delta P_i^*} = -\frac{1}{2H_i s + D_i} \quad (7)$$

式中  $G_i(s)$  为节点  $i$  处从  $\Delta P_i^*$  到  $\Delta f_i^*$  的 1 阶传递函数,  $s$  为拉普拉斯算子.

## 2 系统节点惯量参数在线评估方法

### 2.1 状态空间模型

根据现代控制理论,式(7)所示的1阶传递函数 $G_i(s)$ 可以转化为离散状态空间模型 $M$ ,即

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{K}\mathbf{e}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{e}(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 、 $\mathbf{e}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k)$ 和 $\mathbf{y}(k)$ 分别表示第 $k$ 采样时刻系统状态变量、噪声变量、输入变量和输出变量; $\mathbf{x}(k+1)$ 为第 $k+1$ 采样时刻的系统状态变量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别表示状态矩阵、控制矩阵、输出矩阵、前馈矩阵和噪声矩阵。

本文所提出的可加速预测误差最小化的电力系统惯量在线评估方法,基于同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)构建的广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)。该方法通过在线获取电力系统稳态运行的实时数据,并应用基于MOESP和PEM的复合算法,对节点 $i$ 的系统状态空间模型进行参数辨识,从而逆向推导出式(7)所示的1阶传递函数 $G_i(s)$ ,并从中提取出节点 $i$ 的等效惯性常数和阻尼系数。

### 2.2 数据采集与预处理

#### 2.2.1 数据采集

为实现对状态空间模型 $M$ 的参数辨识,结合式(7)和(8),以节点 $i$ 处连接母线的有功功率变化量 $\Delta P_i$ 作为系统输入矩阵 $\mathbf{u}$ ,以母线上频率变化量 $\Delta f_i$ 构成系统输出矩阵 $\mathbf{y}$ ,并将其输入由MOESP和PEM构建的复合算法,从而实现对系统矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{K}$ 的参数辨识。然而,在实际工程应用中,由WAMS反馈的量测数据往往受到多重因素影响,从而存在误差,这可能导致辨识结果偏离真实值。为此,需要对量测数据进行必要的预处理。

#### 2.2.2 数据处理

由式(6)可知,有功和频率偏差均为标么值,故需要对量测数据进行标么化处理。其中,频率的基准值为 $f_0$ ,有功功率的基准值为系统容量 $S_n$ 。

为避免由于测量误差而造成输入输出伪相关性的错误判断,本文采用基于随机过程理论和混沌动力学新发展的去趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, DFA)方法对标么化后的量测数据进行预处理<sup>[25]</sup>。DFA方法可以有效滤除量测数据中因测量误差而产生的趋势成分。

对节点 $i$ 处连接母线上有功变化量 $\Delta P_i$ 和频率变

化量 $\Delta f_i$ 做预处理后,得到输入输出序列 $\mathbf{Z}_{\text{bus},i}^N$ 为

$$\mathbf{Z}_{\text{bus},i}^N = \{\mathbf{y}(k), \mathbf{u}(k) | k = 1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

式中 $N$ 为采样点数。

### 2.3 基于MOESP-PEM的协同优化算法

基于MOESP和PEM构建的协同优化算法目的是通过某一特定凹代价函数 $V_N(\boldsymbol{\theta})$ 搜索出全局最优离散状态空间模型 $M^*$ ,如图1所示,其中 $\boldsymbol{\theta}$ 为参数向量。若仅使用单一的PEM算法对系统空间模型 $M$ 进行参数辨识,虽然最终也可以通过不断迭代获取全局最优离散状态空间模型 $M^*$ ,但算法速度完全取决于人为设定的初始值 $M_0$ ,这显著限制了惯量在线评估的速度。同时,单一的MOESP算法虽然可以快速辨识出离散状态空间模型,但结果误差相对较大且算法鲁棒性较差,这不利于惯量的稳定在线评估。综上所述,单独使用这两种算法均存在着不可忽视的弊端,不利于电力系统惯量在线评估的有效开展。

为此,本文提出一种基于MOESP-PEM的协同优化算法,其核心创新在于:利用MOESP算法为PEM提供高精度初始值 $M_0$ ,并借助PEM的迭代优化能力对MOESP模型偏差进行修正,从而构建出“快速初始化-精准优化”的双阶段闭环识别框架。该算法不仅保留了PEM算法的鲁棒性和准确性,还利用MOESP算法提升了PEM算法的速度,从而能够稳定且高效地实现电力系统惯量的在线快速评估。

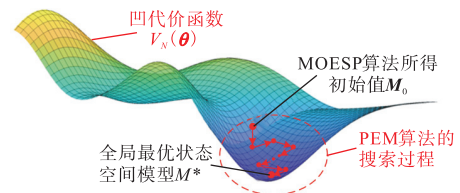


图1 所提协同优化算法的实现示意

Fig.1 Implementation illustration of the proposed collaborative optimization algorithm

#### 2.3.1 MOESP 算法

子空间辨识方法(subspace identification method, SIM)是对传统线性系统辨识方法的重要补充,包含了多种实现方式。其中,MOESP算法因其简便的数值计算和较高的辨识精度,已经广泛应用于各类工程问题<sup>[26]</sup>。为进一步提高惯量评估的速度,本文选用MOESP算法作为复合算法的初始化算法。以下将简要介绍MOESP算法的实现流程。

(1) 构建Hankel矩阵。

将式(8)所示的系统状态空间模型转化为Hankel矩阵表示形式,即

$$Y_k = \Gamma_k X_k + H_k U_k \quad (10)$$

式中:  $U_k$ 、 $Y_k$  和  $X_k$  分别表示输入、输出和状态 Hankel 矩阵;  $\Gamma_k$  和  $H_k$  分别为系统广义能观和 Toeplitz 矩阵, 定义为

$$\Gamma_k = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{k-2} \\ CA^{k-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} D & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ CB & D & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ CA^{k-2}B & CA^{k-3}B & \cdots & D \end{bmatrix} \quad (12)$$

输入-输出 Hankel 矩阵可由式 (9) 所示输入-输出序列  $Z_{bus,j}^N$  构建, 即

$$Y_k = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & y(3) & \cdots & y(k) \\ y(2) & y(3) & y(4) & \cdots & y(k+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y(p) & y(p+1) & y(p+2) & \cdots & y(p+k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$U_k = \begin{bmatrix} u(1) & u(2) & u(3) & \cdots & u(k) \\ u(2) & y(3) & y(4) & \cdots & u(k+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u(p) & u(p+1) & u(p+2) & \cdots & u(p+k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $k$  为 Hankel 矩阵的列数;  $p$  为 Hankel 矩阵的行数, 由于原始数据长度为  $N$ , Hankel 矩阵的构造需满足  $p+k \leq N$ , 以保证有足够的数生成全部矩阵列。

(2) QR 分解.

对输入输出 Hankel 矩阵进行 QR 分解, 求解  $Y_k$  的行空间在矩阵  $U_k$  的行空间的正交补空间上的正交投影.

$$\begin{bmatrix} U_k \\ Y_k \end{bmatrix} = RQ^T = \begin{bmatrix} R_{11} & \mathbf{0} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $R_{11}$ 、 $R_{21}$  和  $R_{22}$  为下三角形矩阵  $R$  的子阵;  $Q_1^T$  和  $Q_2^T$  为正规正交矩阵  $Q$  的子阵且相互正交.

(3) 奇异值分解.

联立式 (10) 和 (15) 可得

$$\Gamma_k X_k Q_2^T = R_{22} \quad (16)$$

对  $R_{22}$  进行奇异值分解

$$R_{22} = USV^T = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} S_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \approx U_1 S_1 V_1^T \quad (17)$$

式中:  $S$  为  $R_{22}$  的特征值组成的对角阵;  $U$ 、 $V^T$  为  $R_{22}$  的特征向量组成的奇异向量;  $S_1$ 、 $S_2$  和  $U_1$ 、 $U_2$  以及  $V_1^T$ 、 $V_2^T$  分别为  $S$  和  $U$  以及  $V^T$  的子阵.  $U_1 S_1 V_1^T$  表征

系统中的噪声污染且数量级相对  $U_1 S_1 V_1^T$  较小, 忽略不计不仅不影响矩阵精度, 还可以在在一定程度上达到降噪的目的.

系统阶数  $n$  等于待确定参数  $S$  的主导奇异值数, 可通过赤化信息准则 (akaike information criterion, AIC) 来确定. AIC 旨在通过尽可能小的系统阶数, 拟合出最符合实际系统的模型. 由于系统运行在稳态工况下, 故 AIC 搜索范围通常不超过 10 阶.

联立式 (16) 和 (17) 可得广义能观矩阵  $\Gamma_k$  为

$$\Gamma_k = U_1 S_1^{1/2} \quad (18)$$

(4) 系统参数求解.

系统矩阵  $A$ 、 $C$  计算式为

$$\begin{cases} C = \Gamma_k(1:p, 1:n) \\ A = [\Gamma_k(1:p(k-1), 1:n)]^\dagger \Gamma_k(p+1:kp, 1:n) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $(\cdot)^\dagger$  表示 Moore-Penrose 矩阵的伪逆运算;  $\Gamma_k(1:p, 1:n)$  为矩阵  $\Gamma_k$  的前  $p$  行和前  $n$  列组成的新矩阵; 其余矩阵运算同理.

矩阵  $B$ 、 $D$  可利用最小二乘法求解超线性方程获得, 即

$$U_2^T H_k = U_2^T R_{21} R_{11}^{-1} \quad (20)$$

2.3.2 PEM 算法

通过 MOESP 算法得出的系统矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  可以确定状态空间模型  $M_0$ , 但其相对于实际系统会存在一定误差, 并且在算法运行中可能会出现算法中断而导致结果偏差. 由此, 本文引入 PEM 算法<sup>[27]</sup>, 通过迭代的手段不断修正初始状态空间模型  $M_0$ , 使之接近全局最优状态空间模型  $M^*$ . 算法的主要步骤如下.

**步骤 1** 利用参数向量  $\theta$  对系统状态空间模型参数进行完全参数化, 即

$$\begin{cases} x(k+1) = A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k) + K(\theta)e(k) \\ y(k) = C(\theta)x(k) + D(\theta)u(k) + e(k) \end{cases} \quad (21)$$

式中: 参数向量  $\theta$  为先验未知数;  $A(\theta)$ 、 $B(\theta)$ 、 $C(\theta)$ 、 $D(\theta)$ 、 $K(\theta)$  则为参数化表示的状态矩阵、控制矩阵、输出矩阵、前馈矩阵和噪声矩阵. 一个  $\theta_s$  ( $s = 1, 2, \dots$ ) 代表了一种状态空间模型  $M(\theta_s)$ .

**步骤 2** 一个状态空间模型  $M(\theta_s)$  可输出一组预测输出序列  $\hat{y}(k|\theta_s)$ , 将其与量测输出序列  $y(k)$  比较, 可以得出模型  $M(\theta_s)$  的预测误差  $\varepsilon(k, \theta_s)$  和相应的均方误差  $V_N(\theta_s)$ , 即构建带正则化的损失函数为

$$\begin{cases} \varepsilon(k, \theta_s) = y(k) - \hat{y}(k|\theta_s) \\ V_N(\theta_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon^2(k, \theta_s)\|_2^2 + \lambda \|\theta_s - \theta_0\|_2^2 \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\theta_0$  为 MOESP 算法提供的初始参数向量;  $\lambda$  为

正则化系数,用于防止出现过拟合现象。

**步骤 3** 将均方误差  $V_N(\theta_s)$  作为凹代价函数搜索状态空间模型的最优解  $M^*$ 。其寻优过程可表示为

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} V_N(\theta) \quad (23)$$

此处,求解过程中所用寻优算法为牛顿-拉夫逊线搜索<sup>[28]</sup>。其中参数  $\theta_s$  的更新公式为

$$\theta_{s+1} = \theta_s - \eta [\nabla^2 V_N(\theta_s)]^{-1} \nabla V_N(\theta_s) \quad (24)$$

式中  $\eta$  表示步长,范围为  $(0, 1]$ , 每次迭代需满足

$$V_N(\theta_{s+1}) \leq V_N(\theta_s) + c\eta \nabla V_N(\theta_s)^T (\theta_{s+1} - \theta_s) \quad (25)$$

式中  $c$  为常数。

式(25)中的梯度和 Hessian 矩阵的计算式分别为

$$\nabla V_N(\theta_s) = -\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial \hat{y}(k|\theta_s)}{\partial \theta} \right)^T \varepsilon(k, \theta_s) + 2\lambda(\theta_s - \theta_0) \quad (26)$$

$$\nabla^2 V_N(\theta_s) \approx -\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial \hat{y}(k|\theta_s)}{\partial \theta} \right)^T \frac{\partial \hat{y}(k|\theta_s)}{\partial \theta} + 2\lambda E \quad (27)$$

式中  $E$  为单位矩阵。灵敏度矩阵可以通过计算伴随方程获取,即

$$\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \theta} = C \frac{\partial x(k)}{\partial \theta} + \frac{\partial C}{\partial \theta} x(k) + \frac{\partial D}{\partial \theta} u(k) \quad (28)$$

状态导数的递推公式为

$$\frac{\partial x(k+1)}{\partial \theta} = A \frac{\partial x(k)}{\partial \theta} + \frac{\partial A}{\partial \theta} x(k) + \frac{\partial B}{\partial \theta} u(k) \quad (29)$$

为确保算法所得状态空间模型的可靠性,可通过量测数据来交叉验证模型的拟合效果。量化指标为拟合百分比为

$$F_{it} = \left( 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [\hat{y}(t) - y(t)]^2}{\sum_{t=1}^N y(t)^2} \right) \times 100\% \quad (30)$$

式中  $y$  为量测输出;  $\hat{y}$  为模型预测输出。

若  $F_{it} < F_{th}$ , 则表明辨识所得状态空间模型无法准确刻画系统的动态响应性能,其中  $F_{th}$  表示拟合度判据阈值。

## 2.4 惯量参数提取

经过以上预处理和复合算法处理后,可以得到一个全局最优状态空间模型  $M^*$ , 该模型可以较好地描述系统的动态响应性能。此时,系统矩阵为  $A^*$ 、 $B^*$ 、 $C^*$  和  $D^*$ 。根据现代控制理论,可通过式(31)将  $M^*$  转化为离散传递函数,以便后续节点等效惯性常数和阻尼系数的提取。

$$G(z) = C^*(zI - A^*)^{-1} B^* + D^* \quad (31)$$

式中  $z$  表示离散域。

根据零阶保持器原理,假设在分段采样周期内输入恒定,则可以将离散传递函数  $G(z)$  转化为连续传递函数  $G(s)$ , 其可表述为

$$G(s) = \frac{m_0 s^n + m_1 s^{n-1} + \dots + m_{n-1} s + m_n s^0}{l_0 s^n + l_1 s^{n-1} + \dots + l_{n-1} s + l_n s^0} \quad (32)$$

式中  $m_0, m_1, \dots, m_n$  和  $l_0, l_1, \dots, l_n$  均为  $G(s)$  的系数。

此时,传递函数  $G(s)$  虽包含着节点等效惯性常数和阻尼系数的信息,但由于其阶数较高,难以直接读取相关信息。因此,可通过 Arnoldi、Lanczos、Pade 等算法将式(32)化简为式(7)的低阶形式,从而实现惯量参数的直接提取<sup>[28-30]</sup>。本文选用在电力系统低频动态建模中具备显著优势的 Pade 算法以完成降阶处理<sup>[31]</sup>。

综上所述,可得出如图 2 所示的节点等效惯量参数在线评估方法的完整流程。其中,当  $\varepsilon \leq 1 \times 10^{-4}$  时,继续迭代对参数优化的提升可忽略不计<sup>[31]</sup>。因此,为兼顾计算精度与资源效率,本文  $\varepsilon$  取保守值  $1 \times 10^{-4}$ 。电力系统动态模型的拟合度通常需达到 85% ~ 95% 方可满足工程需求<sup>[26]</sup>, 本文取其中间值,将拟合度判据阈值设定为  $F_{th} = 90\%$ 。在模型阶次选择过程

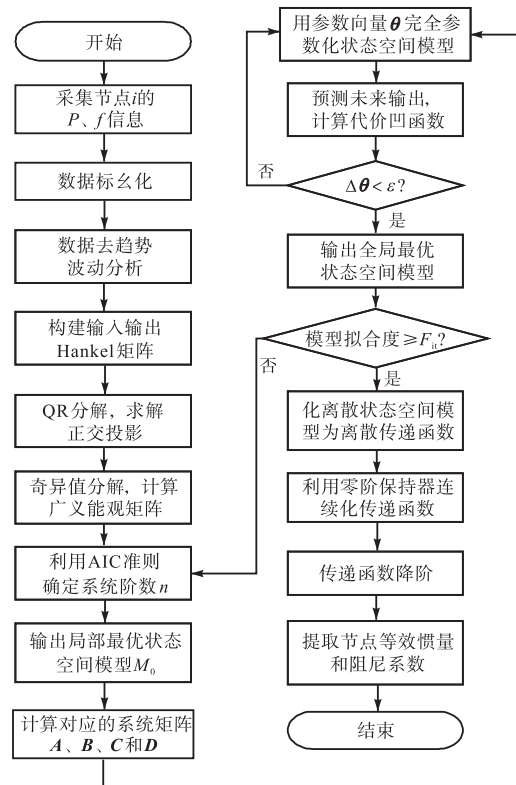


图 2 基于 MOESP-PEM 算法的节点等效惯量参数在线评估方法流程

Fig.2 Flow chart of online evaluation method based on MOESP-PEM algorithm for equivalent nodal inertia parameters

中,当某一候选阶对应的实际拟合度低于该阈值时,需要结合 AIC 值与拟合度进行综合判断,优先选择满足拟合度判据 ( $F_{it} \geq 90\%$ ) 的系统阶数  $n$ ,并据此重新对系统进行参数辨识。

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真系统及工况设置

为验证本文所提出的可加速预测误差最小化的系统惯量连续在线评估方法的可行性和准确性,本节在 Digsilent/Powerfactory 平台上搭建了改进型 IEEE 9 总线电力系统进行仿真分析。电力系统结构如图 3 所示。

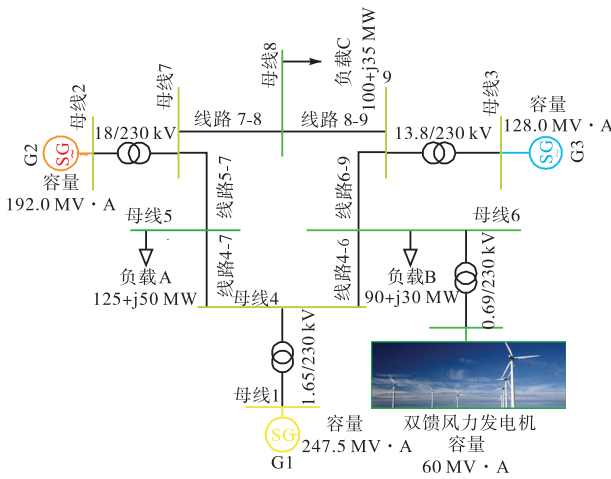


图 3 改进型 IEEE 9 总线电力系统结构

Fig.3 Structure of an improved IEEE 9-bus power system

传统 IEEE 9 总线系统由 3 台同步发电机组、3 台变压器、3 组负荷、6 条线路和 9 条联络线组成。系统工作频率为 50 Hz(工频),线路电压等级为 230 kV。系统中各台同步发电机组的额定容量  $S_{gn}$ 、惯性常数  $H_{ref}$  和阻尼系数  $D_{ref}$  如表 1 所示。系统总的额定容量  $S_n$  为系统中所有同步发电机组的容量之和,即  $S_n = S_{gn1} + S_{gn2} + S_{gn3} = 567.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,全系统惯性常数均以此为基准值。系统中每条母线均配备有 PMU,以便实现相关节点有功-频率扰动信息的测量和反馈。

表 1 同步发电机组的主要参数

Tab.1 Main parameters of synchronous generators

| 同步发电机<br>组序号   | 连接母线<br>编号 | 额定容量<br>$S_{gn}/(\text{MV} \cdot \text{A})$ | $H_{ref}/\text{s}$ | $D_{ref}$ |
|----------------|------------|---|--------------------|-----------|
| G <sub>1</sub> | 母线 1       | 247.5                                       | 3.925 1            | 1.744 5   |
| G <sub>2</sub> | 母线 2       | 192.0                                       | 1.691 6            | 1.015 0   |
| G <sub>3</sub> | 母线 3       | 128.0                                       | 1.353 3            | 0.225 6   |

考虑实际应用中存在新能源并网,本节对 IEEE

9 总线系统进行改进。目前的新能源机组多数采用跟网型控制策略或下垂控制方式并入电网。对于跟网型控制策略,其始终遵循最大功率点跟踪原则,无法提供虚拟惯量控制。而下垂控制虽属于构网型控制策略,因其仅是对传统同步机组下垂特性的简单模拟,亦不能够提供虚拟惯性支撑。鉴于此,本节研究选取 60 MW 的新能源机组接入母线 6 节点,该新能源机组由 10 台 6 MW 的风力发电机组并联而成,从而验证所提出的方法在包含新能源机组的新型电力系统惯量参数评估方面具有适用性。

鉴于该风力发电机组并不具备提供惯性控制的能力,其并网相当于在系统中接入一个输出相当功率的电流源,取代了原同步机组的相应出力部分。因此,用来求解惯量参数的系统容量  $S_n$  仍等同于 3 台传统同步机组的容量总和,故各同步发电机组的惯量参数保持不变。本文提出的惯量在线评估方法所需数据时间窗长为 30 s。

在扰动设置方面,针对实际电力系统在稳态运行过程时持续存在的微小有功波动特性,仿真在负荷 B 处引入了高斯白噪声作为持续扰动源。该设计具有两方面的意义:其一,通过有色噪声注入模拟随机负荷投切、新能源出力波动等现实工况;其二,确保频率偏移量始终控制在一次调频死区  $\pm 0.033 \text{ Hz}$  范围内,严格满足惯量响应阶段的理论假设条件。相较于传统的阶跃扰动测试方式,这种持续微扰动模式更符合电力系统实际运行场景,可有效验证所提方法在稳态工况下的可行性。

#### 3.2 MOESP-PEM算法验证

由于同步发电机组附近节点的惯量已知,故以 G<sub>1</sub> 的惯性常数和阻尼系数的在线评估过程为例,对本文所提方法的实现过程做详细说明并验证。

首先,通过 PMU 测量并反馈同步机组 G<sub>1</sub> 连接母线 1 的有功功率偏差  $\Delta P$  和频率偏差  $\Delta f$  数据。测量时间长度为 60 s,前 30 s 信号用于模型辨识,后 30 s 信号用于模型交叉验证。图 4(a)、(b)所示为 0~60 s 母线 1 的有功功率偏差、频率偏差随时间的变化。随后对信号进行预处理。对时间窗长内的母线频率偏差和有功功率偏差数据分别除以各自基准值 50 Hz 和 567.5 MV·A,转换单位后,通过去趋势波动分析进一步滤除部分信号误差,预处理后的频率偏差、有功功率随时间的变化特性如图 4(c)、(d)所示。

然后,将 0~30 s 内经过预处理后的有功功率数据作为输入,频率数据作为输出,应用前文所提复合算法,对母线 1 节点相应全局最优状态空间模型  $M^*$

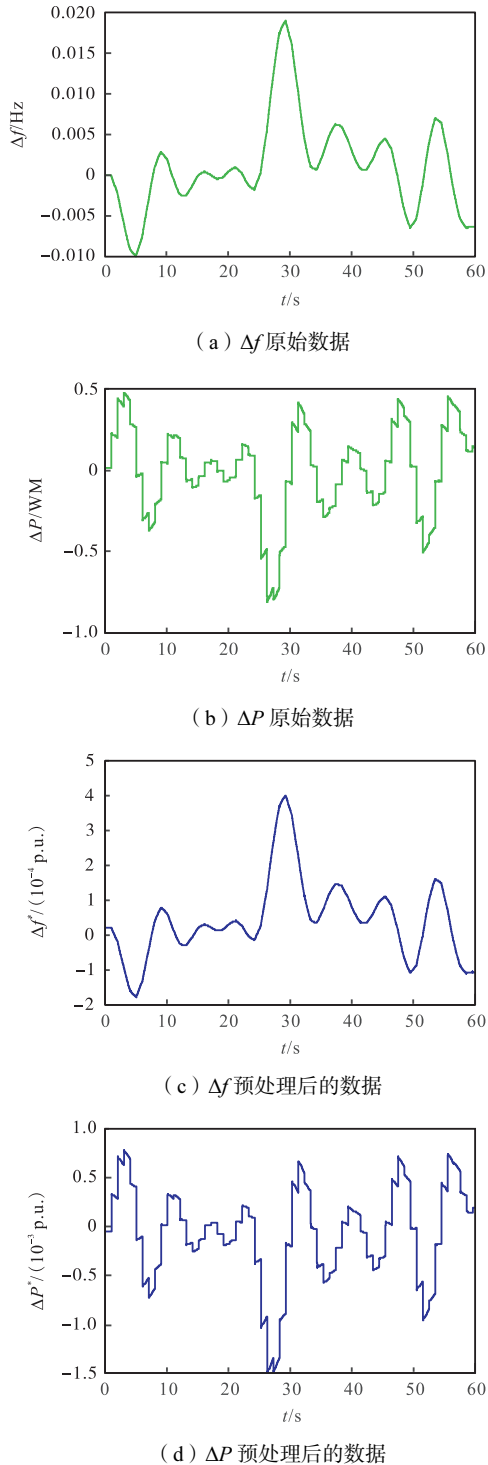


图4 含新能源系统同步机组 G<sub>1</sub> 的有功功率偏差、频率偏差随时间的变化

Fig.4 Active power and frequency deviation variations of synchronous generator G<sub>1</sub> in the renewable energy integrated system

的系统矩阵进行参数辨识. 在这个过程中, 复合算法通过优化技术对系统进行建模, 确保所得到的状态空间模型能够精确地反映系统的动态特性. 利用母线 1 节点在 30~60 s 内的有功功率-频率扰动数据作为验证数据, 以该时间段的有功功率偏差  $\Delta P$  为输入, 代

入最优状态空间模型, 得到频率偏差预测值  $\Delta f$ , 将预测值与同期实际量测的频率偏差进行对比, 完成交叉验证, 如图 5 所示, 拟合百分比为 96.78%, 表明辨识结果的准确度较高, 所得模型可以较好地对系统性能进行表述, 无需重新迭代.

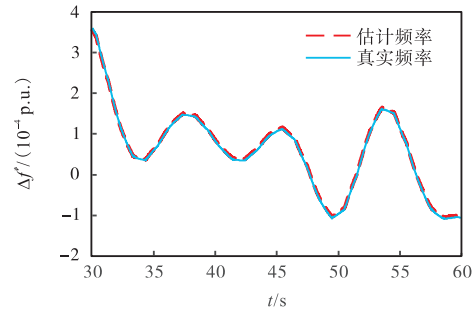


图5 频率偏差预测对比

Fig.5 Comparison of frequency deviation prediction

最后, 经过图 2 所示的剩余流程步骤, 计算得到传递函数为

$$G_1(s) = -\frac{1}{2 \times 4.0084s + 1.7333} \quad (33)$$

对比式 (7), 可得同步发电机组  $G_1$  惯性常数  $H_e = 4.0084$  s, 阻尼系数  $D_e = 1.7333$ .

参考上述步骤, 对相同时间段内的剩余同步发电机机组的惯性常数和阻尼系数进行评估, 结果如表 2 所示.

表2 含新能源机组的新型电力系统中各同步发电机组惯性常数和阻尼系数的评估结果

Tab.2 Evaluation results of inertia constants and damping coefficients for each synchronous generator in the new power system with renewable energy units

| 同步发电机组序号       | $H_e/s$ | $H_e$ 相对误差/% | $D_e$  | $D_e$ 相对误差/% |
|----------------|---------|--------------|--------|--------------|
| G <sub>1</sub> | 4.0084  | 2.12         | 1.7333 | 0.64         |
| G <sub>2</sub> | 1.7085  | 1.00         | 0.9744 | 4.00         |
| G <sub>3</sub> | 1.3718  | 1.37         | 0.2233 | 1.00         |

将表 2 与各同步机组惯性常数以及阻尼系数的真实值进行对比可以发现: 在应对由风机并网而构成的新型电力系统时, 本文所提出的方法对各同步发电机组惯性常数的评估相对误差均控制在 2.50% 之内, 其中最低评估相对误差仅为 1.00%, 表明所提方法能够具备较高的评估相对准确度. 此外, 各机组阻尼系数的评估相对误差同样能够被准确地辨识, 相对误差也都被控制在 5.00% 以内, 最低相对误差仅为 0.64%. 上述评估结果表明本文所提出协同算法的引入能够有效地提高模型参数的辨识准确度, 从而实现了同步发电机组惯性常数与阻尼系数的高精度与可靠在线评估.

本算例亦采用 N4SID 算法<sup>[12]</sup>对惯量进行评估,并将之与本文提出方法所得结果进行比较.表 3 呈现了两种方法下同步发电机组  $G_1$  的惯性常数评估结果及相对误差.尽管两种方法的评估相对误差皆在 7.00% 以内,但相较于文献[12]采用 N4SID 算法识别系统状态空间模型,本文提出的 MOESP-PEM 协同算法在准确度上更具优势.此外,与文献[12]从辨识模型阶跃响应的初始斜率获取惯性常数有所不同,本文针对传递函数予以降阶处理,能够同时对惯性常数与阻尼系数加以评估,有效规避了两者在评估进程中的耦合现象,进一步提升了惯量评估结果的精确程度.

表 3 评估结果对比

Tab.3 Comparison of evaluation results

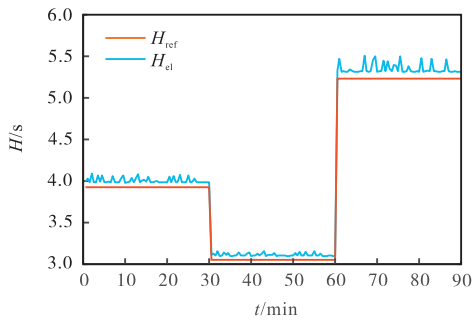
| 算法       | $H_e/s$ | 惯性常数 $H_e$ 相对误差/% |
|----------|---------|-------------------|
| N4SID 算法 | 4.162 4 | 6.05              |
| 本文所提协同算法 | 4.008 4 | 2.12              |

### 3.3 惯量参数实时跟踪

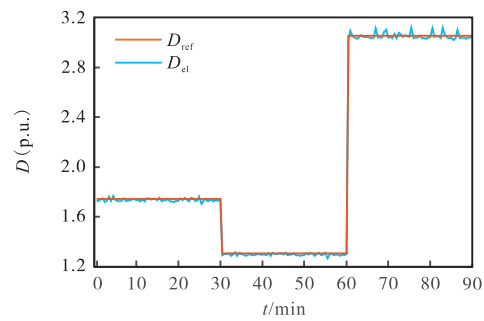
为验证本文所提方法在常态化连续跟踪电力系

统节点等效惯性常数和阻尼系数方面的能力,本小节对仿真算例中同步发电机组  $G_1$  的相关参数进行了进一步调整.通过间歇性地改变仿真系统的运行参数,可以体现系统参数的时变特征.仿真时长共计 90 min,分为 3 个阶段,并对各同步发电机组仿真参数做如下调整:①0 ~ 30 min 内,惯性常数  $H_{ref} = 3.925 1 s$ ,阻尼系数  $D_{ref} = 1.744 5$ ;②30 ~ 60 min 内,惯性常数  $H_{ref} = 3.052 9 s$ ,阻尼系数  $D_{ref} = 1.308 4$ ;③60 ~ 90 min 内,惯性常数  $H_{ref} = 5.233 5 s$ ,阻尼系数  $D_{ref} = 3.052 9$ .

采用本文提出的方法,对同步机组  $G_1$  的惯性常数与阻尼系数进行了连续实时跟踪.在评估数据窗长设定为 30 s 的条件下,所获惯性常数与阻尼系数的数据跟踪如图 6 所示.由图 6 可知,惯性常数和阻尼系数的评估值始终在真实值附近以较小幅度波动,这表明本研究提出的方法能够实现电力系统惯性常数与阻尼系数的常态化、连续且精确的跟踪,为电力系统相关参数的稳定监测与有效控制提供了可靠的技术支撑与数据依据.



(a) 惯性常数  $H$



(b) 阻尼系数  $D$

图 6 同步机组  $G_1$  的惯性常数  $H$  和阻尼系数  $D$  数据跟踪

Fig.6 Data tracking of inertia constant  $H$  and damping coefficient  $D$  for synchronous generator  $G_1$

## 4 结 论

在当今电力系统领域,现有惯量在线评估方法尚存在一定的局限性.鉴于此,本文提出了一种基于 MOESP-PEM 的协同优化算法,通过深入分析系统处于稳定运行工况下的节点有功功率-频率信息,得出了以下几方面重要结论.

(1) 基于 MOESP 和 PEM 的协同算法可加速预测误差最小化,能够对辨识模型的误差起到有效的抑制作用,并且显著提高了电力系统惯量在线评估结果的精度.

(2) 以往的惯量评估过程中,惯性常数与阻尼系

数常存在难以解耦的问题,严重影响了评估精度.本文所提出的算法有效克服了这一难题,具备同步预测惯性常数与阻尼系数的能力,实现了二者的解耦辨识.该特性显著提升了惯量评估结果的准确性,为电力系统运行状态的精确感知与动态特性分析提供了有力支撑.

(3) 在应对融入大量新能源机组的新型电力系统时,本文所提出的方法展现出良好的适用性.该方法能够以较高精度有效评估系统节点的等效惯量参数,体现出其在不同电力系统架构下的广泛适应能力与稳定可靠的性能表现,为电力系统惯量评估领域提供了一种通用且精准的技术路径.

(4) 所提出的在线评估方法可实现对电力系统

惯量资源分布的准确且连续的在线监测。

### 参考文献:

- [1] 马 钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.  
Ma Zhao, Zhang Hengxu, Zhao Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945 (in Chinese).
- [2] 叶 林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-462.  
Ye Lin, Wang Kaifeng, Lai Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-462 (in Chinese).
- [3] 李国庆, 刘先超, 辛业春, 等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1165-1181.  
Li Guoqing, Liu Xianchao, Xin Yechun, et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1165-1181 (in Chinese).
- [4] 刘瑞煦, 汪 震, 吴佳良, 等. 考虑频率空间分布特性的虚拟惯量配置优化[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 122-130.  
Liu Ruixu, Wang Zhen, Wu Jialiang, et al. Configuration optimization of virtual inertia considering spatial distribution characteristics of frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 122-130 (in Chinese).
- [5] 闵 勇, 陈 磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-867.  
Min Yong, Chen Lei, Liu Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-867 (in Chinese).
- [6] Inoue T, Taniguchi H, Ikeguchi Y, et al. Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 136-143.
- [7] Shams N, Wall P, Terzija V, et al. Active power imbalance detection, size and location estimation using limited PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1362-1372.
- [8] 刘方蕾, 胥国毅, 王 凡, 等. 基于差值计算法的系统分区惯量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 46-53.  
Liu Fanglei, Xu Guoyi, Wang Fan, et al. Assessment method of system partition inertia based on differential calculation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 46-53 (in Chinese).
- [9] 刘方蕾, 胥国毅, 刘家豪, 等. 考虑电网结构和参数的电力系统惯量分布特性[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 60-67.  
Liu Fanglei, Xu Guoyi, Liu Jiahao, et al. Inertia distribution characteristics of power system considering structure and parameters of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 60-67 (in Chinese).
- [10] 曹 斌, 原 帅, 刘家豪, 等. 考虑频率动态响应实时分区的电力系统惯量在线评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 930-940.  
Cao Bin, Yuan Shuai, Liu Jiahao, et al. Power system online inertia estimation considering real-time clustering of frequency dynamic response[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 930-940 (in Chinese).
- [11] Panda R K, Mohapatra A, Srivastava S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3122-3132.
- [12] Zeng F H, Zhang J B, Chen G, et al. Online estimation of power system inertia constant under normal operating conditions[J]. IEEE Access, 2020, 8: 101426-101436.
- [13] 李世春, 夏智雄, 程绪长, 等. 基于类噪声扰动的电网惯量常态化连续估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4430-4438.  
Li Shichun, Xia Zhixiong, Cheng Xuchang, et al. Continuous estimation method of power system inertia based on ambient disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4430-4438 (in Chinese).
- [14] 罗琴琴, 苏建徽, 林志光, 等. 基于递推最小二乘法的虚拟同步发电机参数辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 215-221.  
Luo Qinqin, Su Jianhui, Lin Zhiguang, et al. Parameter identification method for virtual synchronous generators based on recursive least squares algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 215-221 (in Chinese).
- [15] 曾 正, 邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机

- 惯性和阻尼辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 37-43, 81.
- Zeng Zheng, Shao Weihua. Estimation of inertia and damping for virtual synchronous generator based on linearized model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 37-43, 81 (in Chinese).
- [16] 李世春, 徐松林, 李惠子, 等. 风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4683-4692.
- Li Shichun, Xu Songlin, Li Huizi, et al. Rapid estimation of equivalent virtual inertia of wind farm[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4683-4692 (in Chinese).
- [17] Du P, Matevosyan J. Forecast system inertia condition and its impact to integrate more renewables[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1531-1533.
- [18] Paidi E, Marzoughi H, Yu J, et al. Development and validation of artificial neural network-based tools for forecasting of power system inertia with wind farms penetration[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 4978-4989.
- [19] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6842-6855.
- Zhang Wuqi, Wen Yunfeng, Chi Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6842-6855 (in Chinese).
- [20] 方秋实, 于继来, 郭钰锋. 基于频率轨迹信息的电力系统等值惯性时间系数评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 435-448.
- Fang Qiushi, Yu Jilai, Guo Yufeng. Evaluation of equivalent inertia time coefficient for power system based on frequency trajectory[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 435-448 (in Chinese).
- [21] 王 博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
- Wang Bo, Yang Deyou, Cai Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007 (in Chinese).
- [22] 赵凯华, 罗蔚茵. 惯性的本质[J]. 大学物理, 1995, 14(4): 1-5.
- Zhao Kaihua, Luo Weiyin. The nature of inertia[J]. College Physics, 1995, 14(4): 1-5 (in Chinese).
- [23] 林晓煌, 文云峰, 杨伟峰. 惯量安全域: 概念、特点及评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3065-3078.
- Lin Xiaohuang, Wen Yunfeng, Yang Weifeng. Inertia security region: Concept, characteristics, and assessment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3065-3078 (in Chinese).
- [24] 曾繁宏, 张俊勃. 电力系统惯性的时空特性及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 50-58.
- Zeng Fanhong, Zhang Junbo. Temporal and spatial characteristics of power system inertia and its analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 50-58 (in Chinese).
- [25] 杨 萍, 侯 威, 封国林. 基于去趋势波动分析方法确定极端事件阈值[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5333-5342.
- Yang Ping, Hou Wei, Feng Guolin. Determining the threshold of extreme events with detrended fluctuation analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5333-5342 (in Chinese).
- [26] Verhaegen M. Subspace model identification part 3: Analysis of the ordinary output-error state-space model identification algorithm[J]. International Journal of Control, 1993, 58(3): 555-586.
- [27] Smith J R, Fatehi F, Woods C S, et al. Transfer function identification in power system applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1282-1290.
- [28] Arnoldi W E. The principle of minimized iterations in the solution of the matrix eigenvalue problem[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1951, 9(1): 17-29.
- [29] Remis R F, van den Berg P M. A modified Lanczos algorithm for the computation of transient electromagnetic wavefields[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(12): 2139-2149.
- [30] Zheng C D, Zhang H G, Tian H. Generalized homogeneous multivariate matrix Padé-type approximants and Padé approximants[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(11): 2160-2165.
- [31] Ljung L. System Identification: Theory for the User [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.

(责任编辑:孙立华)