引用格式:罗萍萍,陈杰.计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量估计[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):1-11.
Citation: LUO Pingping, CHEN Jie. Equivalent inertia estimation of power system considering virtual inertia of wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):1-11.

计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量估计

罗萍萍,陈　杰
(上海电力大学电气工程学院,上海 200090)

摘　要:大规模风电并网削弱了电力系统惯量水平,给电力系统频率稳定带来挑战,亟待对系统惯量水平进行准确估计以保证系统的安全运行。为此,提出一种计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量估计方法。首先,分析同步发电机和风电机组的惯量响应,阐述系统等效惯量估计原理。其次,采用鲍克斯-金肯斯(box-jenkins,BJ)模型对发电装置进行动态建模,并基于机组连接母线处有功-频率扰动数据,利用含有遗忘因子的偏差补偿递推最小二乘算法辨识模型中的参数。再次,在此基础上,提取模型参数中蕴含的惯性常数,计算系统等效惯量。最后,用算例进行了仿真分析,验证了所提方法的有效性。研究结果表明,所提方法在不同扰动类型和不同风电渗透率下均能准确估计出系统的等效惯量。

关　键　词:风电并网;惯量响应;等效惯量估计;系统辨识;惯性常数
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.001　　**中图分类号**:TM712　　**文章编号**:1673-9140(2025)04-0001-11

Equivalent inertia estimation of electric power system considering virtual inertia of wind power

LUO Pingping, CHEN Jie
(School of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Large-scale wind power integration weakens the inertia level of the electric power system and brings challenges to the frequency stability of the electric power system. It is urgent to accurately estimate the inertia level of the system to ensure its safe operation. Therefore, an equivalent inertia estimation method of an electric power system considering the virtual inertia of wind power is proposed. Firstly, the inertia response of the synchronous generator and wind turbine is analyzed, and the principle of system equivalent inertia estimation is explained. Secondly, the Box-Jenkins model is used to dynamically model the power generation device. Based on the active-frequency disturbance data at the connecting bus of the unit, the bias compensation recursive least squares algorithm with forgetting factors is used to identify the parameters in the model. On this basis, the inertia constants contained in the model parameters are extracted, and the equivalent inertia of the system is calculated. Finally, a simulation analysis is conducted using examples to verify the effectiveness of the proposed method. The simulation results show that the proposed method can accurately estimate the equivalent inertia of the system under different disturbance types and different wind power penetration rates.

Key words: wind power integration; inertia response; equivalent inertia estimation; system identification; inertia constant

在“双碳”与构建以新能源为主体的新型电力系统的战略目标下,以风电为代表的新能源呈现出迅猛的发展态势,电力系统中越来越多的同步发电机被风电机组代替[1-4]。然而,风电机组通过电力电子装置实现并网运行,其转子转速与电网频率解耦,并不具备传统同步发电机所具有的惯量和频率

收稿日期:2024-06-06;**修回日期**:2024-12-27
基金项目:国家自然科学基金(51177107)
通信作者:陈　杰(2000—),男,硕士研究生,主要从事电力系统惯量估计方面的研究;E-mail:cjiemail@163.com

的支撑能力,这种变化导致电力系统整体可用惯量不断降低与频率响应能力持续下降[5-6]。对并网风电机组实施虚拟惯量控制是一种有效提升系统惯量水平方法[7-8]。在这种背景下,研究同步发电机和风电机组的惯量估计方法,准确估计新能源电力系统的等效惯量,对电网的规划调度、提高电力系统抗干扰能力具有重要意义。

目前,电力系统惯量估计的方法可归纳为基于机组开关数据的估计方法、基于数据驱动的估计方法和基于频率扰动事件的估计方法这3类[9-15]。

基于机组开关数据的估计方法通过监测发电机的投切状态来计算系统惯量。此类方法在只含有同步机的电力系统中得到了应用,但使用该法应提前给定系统中发电机的准确参数,且该方法无法衡量新能源机组对系统惯量的影响[16]。

基于数据驱动的惯量估计方法运用统计学习、深度学习等数学原理,通过对系统中大量的惯量和频率变化数据的学习,构建估计模型,只要将采集的频率数据输入训练好的模型,即可输出系统惯量[17-18]。文献[19]基于同步相量测量单元(phasor measurement unit,PMU)数据,利用灰箱模型和白箱模型,对同步机和负荷惯量进行了评估。文献[20]建立了贝叶斯参数评估模型,并利用其对系统惯量进行估计。文献[21]基于长递归卷积神经网络和图卷积神经网络,提出了机器学习辅助的惯量估计方法,且该方法考虑了电力电子装置的惯量。这些方法虽然可以将新能源纳入惯量估计的范围内,但仍存在惯量计算理论基础不足和计算资源需求大的问题。

基于频率扰动事件的惯量估计方法是目前应用最广泛的方法[22-24]。当系统出现不平衡功率时,其基于系统惯性常数、频率和有功功率这3者的耦合关系,测量扰动发生后功率和频率数据进行惯量估计。文献[25]提出了一种提取机电振荡时参数的惯量评估方法,但该方法要采集阻尼、振幅、相角等复杂参数,这给其在实际电力系统中的应用带来了困难。文献[26]利用并网发电机突然脱网导致的频率偏移来评估英国电力系统的等效惯量,但由于大扰动事件的偶然性,基于暂态频率事件的惯量估计只能获得某几个电网运行状态下的离散值。文献[27]定义了中心频率平方偏差和惯量图心,并通过计算频率变化率,对新能源系统等效惯量进行了评估,但其难以精确测量扰动发生的具体时间。文献[28]利用有功-频率时间序列数据,采用系统辨识方法,评估新能源系统等效惯量,但该方法将新能源的等效惯量当做定值处理。文献[29]基于大扰动事件,量化了风电场等效惯量对系统的贡献,但该文献未考虑系统的整体惯量水平。

综上所述,现有的惯量估计研究缺乏对新能源机组加入后系统等效惯量变化的考虑,且新能源的惯量估计方法存在计算参数不易获取和估计精度不足的问题。鉴于此,本文提出一种计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量估计方法,先通过分析机组的惯量响应,构建鲍克斯-金肯斯(box-jenkins,BJ)模型来描述机组的有功-频率动态过程;再采用含有遗忘因子的偏差补偿递推最小二乘算法,对模型中的时变参数进行辨识,计算系统的等效惯量;然后,分析系统等效惯量在不同风电渗透率下的变化;最后,通过仿真分析验证了系统等效惯量估计方法的有效性和准确性。该方法从机组有功和频率变化量数据中辨识惯量,降低了对系统控制运行参数的依赖,提高了等效惯量估计精度。

1 电力系统惯量估计基础

1.1 惯量响应分析

在系统功率不平衡时,同步机将转子中储存的能量转化为惯性支撑功率,向系统吸收或释放动能,以阻碍系统频率快速变化。同步发电机的惯量是电力系统惯量的重要来源之一,其数值可用惯性常数衡量。将其定义为额定转速时同步机转子的动能E_{nom}与额定容量S_{B}的比值[30-31],即

$$H_{\mathrm{gen}}=\frac{E_{\mathrm{nom}}}{S_{\mathrm{B}}}=\frac{J\omega_{\mathrm{n}}^{2}}{2S_{\mathrm{B}}} \tag{1}$$

式中,H_{gen}为同步风电机的惯性常数;J为转子的转动惯量;ω_{n}为转子的额定角速度。

以双馈异步风力发电机(doubly fed induction generator,DFIG)为例来进行分析。在没有附加其他控制的情况下,其表现出来的惯量可以忽略不计[32]。为提升风电机组的惯量响应能力,可对风电机组施加不同的有功控制策略。按照控制原理的差异,这些有功控制策略可分为跟网型控制和构网型控制2种[33]。风电机组的控制模式不同,其惯量响应特性也不同。由于目前已投运风电机组主要采用跟网型变流器控制并网,故本文对跟网型虚拟惯量控制下风电机组的等效惯量进行估计。图1展

示了风电虚拟惯量控制原理。

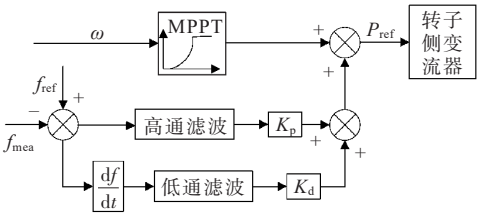


图 1　风电虚拟惯量控制原理

Figure 1　Principle of wind power virtual inertia control

在图 1 中，ω 为风电机组转速；f_{mea} 和 f_{ref} 分别为系统实际频率和参考频率；K_{p} 和 K_{d} 分别为下垂控制系数和惯性控制系数；P_{ref} 为风电机组参考功率。在图 3 中，设置了风机最大功率点跟踪（maximum power point tracking，MPPT）。

风电机组通过虚拟惯量控制来实现惯量响应。虚拟惯量控制将系统的频率变化率引入到变流器的有功控制环节中。当电网频率发生扰动时，常通过改变风电机组输出的电磁功率来模拟同步机组的惯量响应过程。施加虚拟惯性控制的风电机组可为系统提供短时有功功率支撑。类似于同步机组的惯性常数，风电机组的虚拟惯量 H_{equ} 定义为

$$H_{\mathrm{equ}}=\frac{E_{\mathrm{k}}}{S_{\mathrm{N}}}=\frac{J_{\mathrm{equ}}\omega_{\mathrm{s0}}^{2}}{2P^{2}S_{\mathrm{N}}}=\frac{\Delta\omega_{\mathrm{r}}\omega_{\mathrm{s0}}\omega_{\mathrm{r0}}}{\Delta\omega_{\mathrm{s}}\omega_{\mathrm{N}}^{2}}H_{\mathrm{W}} \tag{2}$$

$$J_{\mathrm{equ}}=\frac{(2\omega_{\mathrm{r0}}+\Delta\omega_{\mathrm{r}})\Delta\omega_{\mathrm{r}}}{(2\omega_{\mathrm{s0}}+\Delta\omega_{\mathrm{s}})\Delta\omega_{\mathrm{s}}}J_{\mathrm{W}}\approx\frac{\omega_{\mathrm{r0}}\Delta\omega_{\mathrm{r}}}{\omega_{\mathrm{s0}}\Delta\omega_{\mathrm{s}}}J_{\mathrm{W}} \tag{3}$$

$$H_{\mathrm{W}}=\frac{\omega_{\mathrm{N}}^{2}J_{\mathrm{W}}}{2P^{2}S_{\mathrm{N}}} \tag{4}$$

式（2）～（4）中，E_{k} 为单台风机额定转速下转子储存的动能；S_{N} 为风机的额定容量；P 为风机的极对数；J_{equ} 为风机虚拟转动惯量；J_{W} 为风机固有转动惯量；ω_{N} 为风机额定角速度；ω_{s0} 和 $\Delta\omega_{\mathrm{s}}$ 分别为电网初始角频率和角频率增量；ω_{r0} 和 $\Delta\omega_{\mathrm{r}}$ 分别为风机初始角速度和角速度增量；H_{W} 为风机固有惯量；ω_{s0}、ω_{N} 均为常数。

根据式（2）可以得到风电机组虚拟惯量的计算值。由式（2）可知，风电机组的虚拟惯量与 $\Delta\omega_{\mathrm{r}}/\Delta\omega_{\mathrm{s}}$、$\omega_{\mathrm{r0}}$ 均成正比。当电力系统发生扰动时，$\Delta\omega_{\mathrm{r}}$ 和 $\Delta\omega_{\mathrm{s}}$ 均为 2 个变化的值。因此，与同步发电机不同，风电机组提供的虚拟惯量是个时变的量，且 H_{equ} 的大小与 ω_{r0} 有关。只有准确估计风机的虚拟惯量，才能进一步判断整个系统的惯性支撑能力。

1.2　惯量估计原理

在不平衡功率的短时间作用期间，同步发电机和施加虚拟惯量控制风电机组的有功-频率特性均可用转子运动方程描述[34]，单台同步机或风机转子运动方程的增量形式为

$$2H\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}=(\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{e}}-D\Delta f) \tag{5}$$

式中，H 为发电机的等效惯性常数；ΔP_{m} 和 ΔP_{e} 为发电机的机械功率和电磁功率的变化量；D 为阻尼系数；Δf 为发电机的转子频率偏差。

对式（5）进行拉普拉斯变换，将其写成传递函数的形式，可将转子运动方程化成一个一阶惯性环节，即

$$G(s)=\frac{\Delta f(s)}{\Delta P(s)}=\frac{1}{2Hs+D} \tag{6}$$

式中，$G(s)$ 为 ΔP 到 Δf 的传递函数；$\Delta f(s)$ 为频域形式的角频率偏差；$\Delta P(s)$ 为频域形式的并网点功率变化，$\Delta P(s)=\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{e}}$；$s$ 为拉普拉斯算子。

将式（6）转化为时域形式，即

$$g(t)=-\frac{1}{2H}\mathrm{e}^{-\frac{D}{2H}t} \tag{7}$$

式中，$g(t)$ 为 $G(s)$ 的时域形式。

由式（7）可知，$g(t)$ 的初始幅值等于发电机 2 倍惯量的负倒数。若能求出 $g(t)$ 初始幅值，就能得到同步机惯量和风机的等效惯量，进而可得到表征系统的惯量水平的等效惯量，即

$$H_{\mathrm{sys}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}H_{\mathrm{g},i}S_{\mathrm{g},i}+\sum_{j=1}^{m}H_{\mathrm{eqW},j}S_{\mathrm{eqW},j}}{\sum_{i=1}^{n}S_{\mathrm{g},i}+\sum_{j=1}^{n}S_{\mathrm{eqW},j}} \tag{8}$$

式中，H_{sys} 为系统等效惯量；$H_{\mathrm{g},i}$ 和 $S_{\mathrm{g},i}$ 分别为第 i 台同步发电机的惯性常数和额定容量；$H_{\mathrm{eqW},j}$ 和 $S_{\mathrm{eqW},j}$ 分别为第 j 台风电机组的等效惯性常数和额定容量；n 和 m 分别为电力系统中同步机台数和风电机组台数。

2　等效惯量估计方法

通过前文分析可知，同步发电机和风电机组的惯量特征都反映在其有功-频率动态响应中。为提取出系统的惯量响应环节、准确估计系统的等效惯量，采用系统辨识的方法。这种方法基于系统输入输出数据，对频率响应过程的传递函数进行辨识，进而估计系统的惯量。与对发电机本体模型进行参数辨识相比，系统辨识方法在新能源电力系统中具有更低的计算复杂度，且其对系统控制运行参数

的依赖小，在大(小)扰动场景下均可实现系统的等效惯量估计。

2.1 系统辨识模型

本文将同步发电机与风电机组并网点量测的功率增量ΔP作为系统输入，频率偏差Δf作为输出，构建系统辨识模型。电力系统中的有功-频率动态过程常受到各种外部扰动的影响，且常伴随着噪声干扰。为准确反映发电装置惯性响应的动态特性，采用BJ模型作为系统辨识模型。BJ模型在描述扰动项时具有较高的精确度，能较好地拟合系统，适用于辨识包含风电虚拟惯量的电力系统等效惯量。其具体结构为

$$A(z^{-1})y(t)=B(z^{-1})u(t-n_k)+\frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v(t) \tag{9}$$

$$\begin{cases}A(z^{-1})=1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\cdots+a_{n_a}z^{-n_a}\\B(z^{-1})=b_1z^{-1}+b_2z^{-2}\cdots+b_{n_b}z^{-n_b}\\C(z^{-1})=1+c_1z^{-1}+c_2z^{-2}\cdots+c_{n_c}z^{-n_c}\\D(z^{-1})=1+d_1z^{-1}+d_2z^{-2}+\cdots+d_{n_d}z^{-n_d}\end{cases} \tag{10}$$

式(9)、(10)中，$y(t)$和$u(t)$分别为系统的输出和输入；$v(t)$为零均值白噪声；z^{-1}为后向位移算子；n_k为输入-输出延迟；$A(z^{-1})$、$B(z^{-1})$、$C(z^{-1})$、$D(z^{-1})$分别为关于z^{-1}的阶次为n_a、n_b、n_c、n_d的多项式；$a_1\sim a_{n_a}$、$b_1\sim b_{n_b}$、$c_1\sim c_{n_c}$、$d_1\sim d_{n_d}$均为BJ模型中的待定系数。

由式(9)可知，BJ模型由确定性部分$A(z^{-1})$、$B(z^{-1})$和随机部分$C(z^{-1})$、$D(z^{-1})$这2部分组成。确定性部分表示系统对输入信号的响应，随机部分表示噪声对确定性部分的影响[35]。与常用的受控自回归滑动模型和受控自回归滑动平均模型相比，BJ模型对扰动的描述更精确。这使得该模型在处理非平稳问题和噪声抑制方面更具有优势。

在构建模型过程中，一般使用确定性部分表征系统的频率响应过程，即

$$G_1(z)=\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{11}$$

式中，$G_1(z)$为频率响应过程的离散形式。

采用双线性变化法将该传递函数从离散形式转化为连续形式，BJ模型转化后的连续传递函数$G_1(s)$为

$$G_1(s)=\frac{b'_{n-1}s^{n-1}+b'_{n-2}s^{n-2}\cdots+b'_0}{a'_ns^n+a'_{n-1}s^{n-1}\cdots+a'_0} \tag{12}$$

式中，$b'_{n-1}\sim b'_0$、$a'_n\sim a'_0$为连续传递函数中的系数。

由$G_1(s)$冲激响应初始值，即可得到机组惯量。

2.2 系统辨识算法

为求解BJ模型中的未知参数，进而计算出系统的等效惯量，采用含有遗忘因子的偏差补偿递推最小二乘辨识(bias compensation recursive least-squares with forgetting factor，FF-BCRLS)算法。该算法将递推最小二乘法(recursive least-squares，RLS)和偏差补偿思想相结合，并引入了遗忘因子。这使得该算法在计算过程中既避免了数据饱和问题，又能实现参数的无偏参数估计，具备良好的参数跟踪能力和稳定性。该算法适用于风电场的时变惯量辨识和同步机的时变惯量辨识。FF-BCRLS算法流程如图2所示。

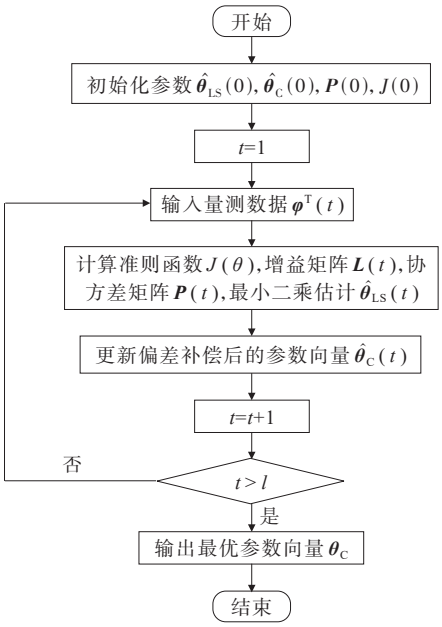


图2 FF-BCRLS算法流程

Figure 2 Flowchart of FF-BCRLS algorithm

根据式(9)，将BJ模型表达式修改为FF-BCRLS算法能适应的最小二乘的形式，即

$$\begin{aligned}y(t)=&-a_1y(t-1)-a_2y(t-2)-\cdots-a_{n_a}y(t-n_a)+\\&b_1u(t-1)+b_2u(t-2)+\cdots+b_{n_b}u(t-n_b)+\\&v(t)+c_1v(t-1)+c_2v(t-2)+\cdots+c_{n_c}v(t-n_c)-\\&d_1e(t-1)-d_2e(t-2)-\cdots-d_{n_d}e(t-n_d)=\\&\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\theta}+e(t)\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)=\left[\boldsymbol{\varphi}_1{}^{\mathrm{T}}(t)\ \boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{e}}{}^{\mathrm{T}}(t)\right]\\ \boldsymbol{\varphi}_1^{\mathrm{T}}(t)=\begin{bmatrix}-y(t-1),-y(t-2),\cdots,-y(t-n_{\mathrm{a}}),\\ u(t-1),u(t-2),\cdots,u(t-n_{\mathrm{b}})\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}(t)=\begin{bmatrix}v(t-1),v(t-2),\cdots,v(t-n_{\mathrm{c}}),\\ -e(t-1),-e(t-2),\cdots,-e(t-n_{\mathrm{d}})\end{bmatrix}\end{cases}\tag{14}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{\theta}=\left[\boldsymbol{\theta}_1^{\mathrm{T}}\ \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\theta}_1=\left[a_1,a_2,\cdots,a_{n_{\mathrm{a}}},b_1,b_2,\cdots,b_{n_{\mathrm{b}}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{e}}=\left[c_1,c_2,\cdots,c_{n_{\mathrm{c}}},d_1,d_2,\cdots,d_{n_{\mathrm{d}}}\right]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{15}$$

式(13)～(15)中，$\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)$为系统有功-频率量测数据的输入、输出信息向量；$\boldsymbol{\theta}$为BJ模型中待辨识的参数向量；$e(t)=\dfrac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v(t)$，$t=1,2,\cdots l$，$l$为数据长度。

构造误差准则函数$J(\boldsymbol{\theta})$：

$$J(\boldsymbol{\theta})=\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\left[y(i)-\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)\boldsymbol{\theta}\right]^2\tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)$为$i$时刻的系统信息向量；$\lambda_i(i=1,2,\cdots,t)$为$t$时刻的遗忘因子，$\lambda_i\in[0.90,0.99]$。

为求误差准则函数的极小值，对式(16)求一阶导数，可得$\boldsymbol{\theta}$的估计值$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)$：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)=\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)y(i)\right)\tag{17}$$

带有遗忘因子的递推最小二乘模型为

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)=\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t-1)+\boldsymbol{L}(t)\left[y(t)-\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t-1)\right]\\ \boldsymbol{L}(t)=\dfrac{\boldsymbol{P}(t-1)\boldsymbol{\varphi}(t)}{\lambda+\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t-1)\boldsymbol{\varphi}(t)}\\ \boldsymbol{P}(t)=\dfrac{1}{\lambda}\left[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{L}(t)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\right]\boldsymbol{P}(t-1)\end{cases}\tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{L}(t)$为增益矩阵；$\boldsymbol{P}(t)$为协方差矩阵；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；λ为遗忘因子。

利用式(13)，可将式(17)转化为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)=\boldsymbol{\theta}+\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)v(i)\right)\tag{19}$$

由式(19)可知，利用含有遗忘因子的递推最小二乘算法进行参数估计是有偏差的，其偏差项为$\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)v(i)\right)$，须对得到的参数估计值进行偏差补偿才能得到无偏估计。

由式(19)可得

$$\left(\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(i)\right)\left(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)-\boldsymbol{\theta}\right)=\sum_{i=1}^{t}\lambda_i\boldsymbol{\varphi}(i)v(i)\tag{20}$$

对式(20)等式左、右两边同时求极限，可得补偿后的估计参数。在此基础上，将引入补偿项后的辨识算法写成递推形式，即

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{c}}(t)=\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)+t\sigma^2(t)\boldsymbol{P}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{c}}(t-1)\\ \hat{\sigma}^2(t)=\dfrac{J(t)}{t\left(1+\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{c}}(t-1)\boldsymbol{\Lambda}\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t)\right)}\\ J(t)=\lambda J(t-1)+\dfrac{\left(y(t)-\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{LS}}(t-1)\right)^2}{\lambda+\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t-1)\boldsymbol{\varphi}(t)}\end{cases}\tag{21}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{c}}(t)$为偏差补偿后的估计参数向量；$\hat{\sigma}^2$为估计噪声方差；$\boldsymbol{\Lambda}$为相关矩阵；$J(t)$为$t$时刻的损失函数。$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{c}}$包含BJ模型多项式的系数向量。

利用$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{c}}$，先求出BJ模型中的$A(z^{-1})$、$B(z^{-1})$参数的对应式(11)，再计算即可得到机组惯量。

3　系统等效惯量估计流程

基于所提出的等效惯量估计方法，绘制计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量估计流程，结果如图3所示。该方法的步骤可分为4步。

1）数据采集与处理。采集同步机和风电机组母线出口处的输出功率和频率波动数据。对采集的数据使用低通滤波器滤波，基于机组额定容量和系统额定频率，将数据化为标幺值，再进行去均值处理。

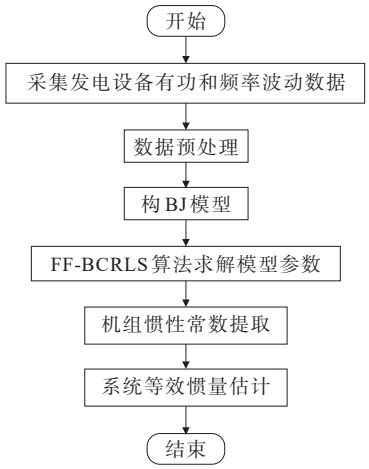


图3　电力系统等效惯量估计流程

Figure 3　Flowchart of equivalent inertia estimation process of electric power system

2）系统辨识模型建立。根据式(9)建立BJ模型，描述系统频率响应过程。通过求解BJ模型传递函数的冲激响应来估计机组惯量。

3）求解模型中的未知参数。采用FF-BCRLS算法求解BJ模型中的参数。将处理后的数据和BJ模型参数写成最小二乘形式，设置算法参数初值，按照式(16)计算误差准则函数，按照式(18)计算增益矩阵、协方差矩阵和递推最小二乘估计值，依据式(21)，对含遗忘因子的递推最小二乘估计值进行偏差补偿，得到BJ模型的最优参数向量。

4）惯性常数提取。由求解出的BJ模型参数得到系统有功-频率过程的离散传递函数模型，利用双线性变化法将离散的传递函数连续化，通过求解连续传递函数冲激响应初始值，即可得到同步机或风电机组的惯性常数，进而估计系统等效惯量。

4 算例分析

在MATLAB/Simulink中搭建改进的IEEE 39节点系统，验证本文所提方法的有效性。该系统额定频率为60 Hz，IEEE 39节点系统各同步机参数见表1。将该39节点系统中的9号同步机组替换为由166台额定功率为5 MW风电机组构成的风电场，风机采用DFIG，控制方式为虚拟惯量控制。通过单机等值处理风电场。IEEE39节点系统拓扑结构如图4所示。

表1 IEEE 39节点系统各同步机参数

Table 1 Parameters of each synchronous machine of IEEE 39-bus system

发电机	P_i/MW	S_i/(MV·A)	H_i/s
G_1	1 000.0	10 000	5.00
G_2	520.8	700	4.33
G_3	650.0	800	4.48
G_4	632.0	800	3.58
G_5	508.0	600	4.33
G_6	650.0	800	4.35
G_7	560.0	700	3.78
G_8	540.0	700	3.47
G_9	830.0	1 000	3.45
G_{10}	250.0	1 000	4.20

设置2个扰动场景，验证本文方法有效性。

1）小扰动场景。分别在节点3、7、15、20、23和27的负荷处加入幅值很小的随机变化负荷，模拟电力系统正常运行中的功率波动。

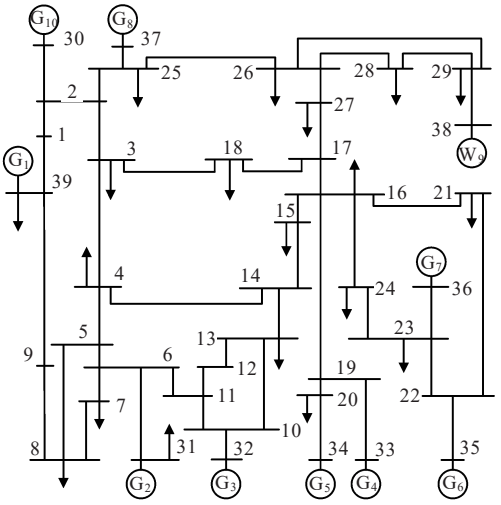


图4 IEEE39节点系统拓扑结构

Figure 4 IEEE 39-bus system topology structure

2）大扰动场景。在节点20处，其负荷突增500 MW(约占额定功率负荷8%)，并在1 s内切除。

为模拟实际电力系统中的噪声干扰，在采集得到的发电设备有功和频率波动数据中加入服从高斯分布的随机变量。

4.1 同步机惯量估计

采用本文所提出的惯量估计方法，获取各同步发电机母线出口处的有功和频率波动数据，在大、小扰动下分别估计同步机组的惯性常数，该同步发电机惯量估计结果见表2。可知，在这2种不同的扰动场景下，同步发电机惯量估计结果误差均在4%以内。其中，在小扰动场景下，同步机的惯量估计误差最小为1.31%，最大为3.55%。在大扰动场景下，同步机惯量估计误差最小为1.46%，最大为3.56%。大扰动场景下惯量估计的平均误差2.39%，

表2 同步发电机惯量估计结果

Table 2 Inertia estimation results of synchronous generator

发电机	实际惯量/s	小扰动场景		大扰动场景	
		估计值/s	误差/%	估计值/s	误差/%
G_1	5.00	5.18	3.55	5.14	2.72
G_2	4.33	4.39	1.31	4.42	2.15
G_3	4.48	4.61	3.11	4.63	3.56
G_4	3.58	3.52	1.63	3.49	2.43
G_5	4.33	4.42	1.90	4.26	1.72
G_6	4.35	4.25	2.31	4.42	1.58
G_7	3.78	3.83	1.54	3.66	3.05
G_8	3.47	3.58	3.15	3.52	1.46
G_{10}	4.20	4.10	2.42	4.32	2.83

小扰动场景下平均误差2.32%。这说明本文提出的惯量估计方法在不同扰动下均能准确估计出同步机的惯量，在小扰动场景下具有更高的估计精度。

4.2　风电场等效惯量估计

为准确估计出风电机组的变化的惯量，在大扰动场景下对风电机组的等效惯量进行估计。用等值风电场替换9号机组，不同风速下惯量估计结果如图5所示。

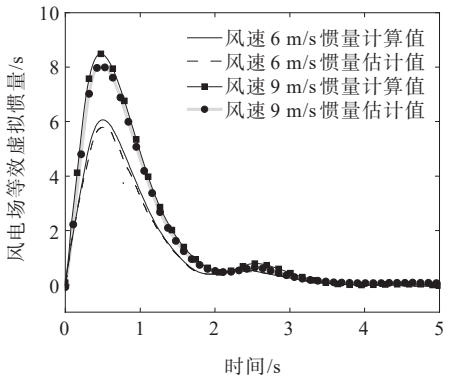


图5　不同风速下风电场惯量估计结果

Figure 5　Inertia estimation results of wind farms under different wind speeds

图5中的风电场等效惯量计算值是利用仿真中获取的风电机组转速变化量$\Delta\omega_r$和系统频率变化量$\Delta\omega_s$，结合系统初始运行时的参数ω_{s0}、ω_{r0}、ω_N^2和风电机组的固有惯量H_W，将其全部带入式(2)计算得到的。其中，$\Delta\omega_r$和$\Delta\omega_s$是通过将添加扰动后实时测量的风机转速和系统频率与稳态时测量的风机转速和系统频率作差得到的。为避免偶然误差，稳态的测量值采用1 s数据的平均值。

从图5中可以看出，与同步机的惯量不同，风电场的等效惯量是个时变的值。当系统中出现大扰动时，风电机组虚拟惯量从0 s开始迅速增大，扰动消失后虚拟惯量逐渐减小恢复到0 s。风速也会影响风电场的惯量。在相同的扰动情况下，风电机组参与系统惯量响应时的风速不同，导致提供的惯量也不同。当风速为9 m/s时，风电场的虚拟惯量最大值为8.48 s；而当风速为6 m/s时，风电场的虚拟惯量最大值减小到6.06 s。这表明在风速较高时，风电场可提供更强的惯量支撑。这一规律也可以从式(2)中得出，初始风速状态会影响H_{equ}中的ω_{r0}，使风电机组在相同的扰动中呈现出不同的虚拟惯量。从图5中还可以看出，在不同风速下，风电场虚拟惯量估计值与计算值的变化趋势基本一致，这验证了本文提出的惯量估计算法的有效性和准确性。

4.3　系统等效惯量估计

在同步发电机和风电场惯量估计的基础上，根据式(8)对系统等效惯量进行计算。改变系统中被替换的同步机组数量，在不同风电透率下讨论系统的等效惯量。系统中所有机组均为同步机组，此时的风电渗透率为0.0%；将系统中的9号同步机组替换为风电机组，此时的系统风电渗透率为13.5%；将系统中的7、8、9号同步机组替换为风电机组，此时的系统风电渗透率为31.4%。

小扰动场景下系统等效惯量估计结果如图6所示。在小扰动场景下系统惯量由同步机提供，扰动过程中保持不变。从图6中可以看出，风电渗透率分别为0、13.5%和31.4%时，系统等效惯量分别为4.58、4.46和4.16 s。对比不同渗透率下系统的等效惯量可知，随着渗透率增加，系统等效惯量逐渐减小。这是风电机组替代同步机组，在小扰动场景下风电虚拟惯量控制基本不动作，系统可用惯量减少导致的。

大扰动场景下系统等效惯量如图7所示。从图7中可以看出，当风电渗透率为0.0%时，系统惯量全部由同步机组提供，系统受到扰动后，系统等效惯量维持4.58 s不变；风电渗透率为13.5%时，系统受到扰动后，风电机组的虚拟惯量响应被激发，系统等效惯量从4.46 s开始增大，最大值为4.80 s，系统频率下降到最低点时，系统等效惯量又回到稳态值；风电渗透率为31.4%时，在风电虚拟惯量的作用下，系统等效惯量从4.16 s增大到4.99 s，最后又回到稳态值。由分析可知，随着风电渗透率的增大，系统等效惯量变化更明显。由于风电机组的等

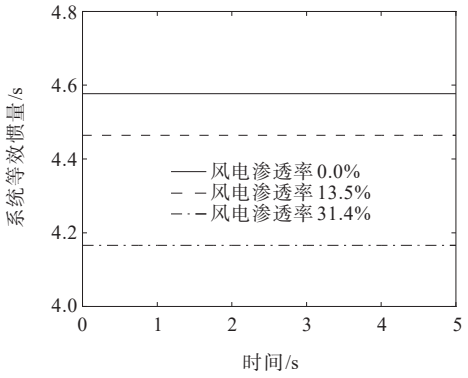


图6　小扰动场景下系统等效惯量

Figure 6　System equivalent inertia under small disturbance scenario

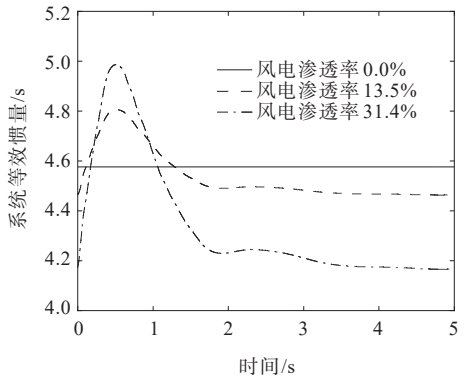


图7 大扰动场景下系统等效惯量

Figure 7 System equivalent inertia under large disturbance scenario

效虚拟惯量具有时变性，在风电并网后，系统的等效惯量也呈现出时变的特点，且风电渗透越高，变化幅度越大。

从图7中可以看出，计及风电虚拟惯量的电力系统等效惯量变化主要分为3个阶段。初始阶段：当系统中出现扰动时，系统频率快速变化，扰动开始时刻的频率变化率$\mathrm{d}f/\mathrm{d}t$较大，风电机组虚拟惯量响应动作，风电机组通过虚拟惯量控制调整风机转速调节风机输出功率，以模拟同步机组的惯量响应，向系统提供惯量，系统等效惯量逐渐增大。恢复阶段：在同步机组和风电机组的惯量响应下，系统频率变化速度减缓，风电机组提供的虚拟惯量减小，系统可用惯量也逐渐减小。稳定阶段：系统恢复稳态运行，风电虚拟惯量控制基本不动作，系统等效惯量由同步机组提供，再次回到稳态值。

以风电渗透率13.50%为例，对比不同扰动场景下系统等效惯量计算值与估计值，结果如图8所示。用平均相对误差（mean relative error，MRE）

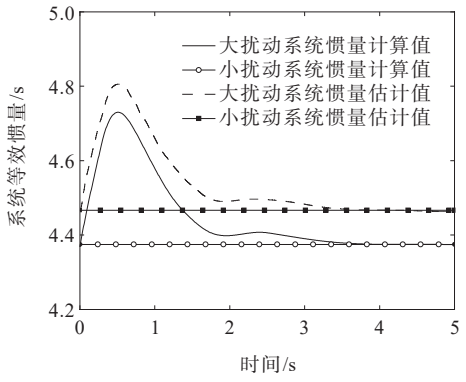


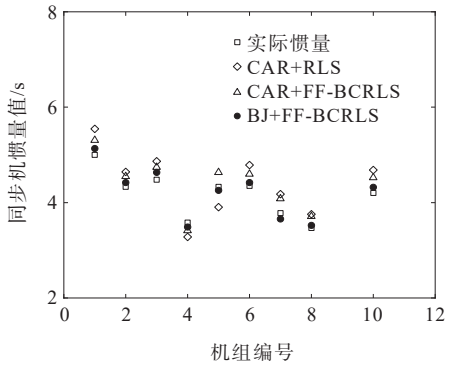
图8 不同扰动下系统等效惯量计算值与估计值对比

Figure 8 Comparison of calculated and estimated values of system equivalent inertia under different disturbances

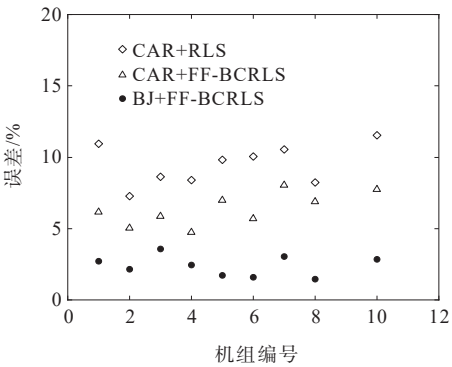
衡量惯量变化曲线间的差异，大扰动场景下系统惯量计算值与估计值的MRE为1.95%，小扰动场景下系统惯量计算值与估计值的MRE为2.10%。不同场景下的系统等效惯量的MRE均在3.00%以内，大扰动场景下的MRE略低于小扰动场景的，这说明在不同扰动场景下，本文所提的方法均能实现对系统惯量的追踪，有效量化系统的等效惯量，且在大扰动场景下具有更高的估计精度。

4.4 模型与算法精确性对比

在大扰动下分别采用受控自回归（controlled autoregressive，CAR）模型、RLS算法、CAR模型和FF-BCRLS算法对同步机进行惯量估计，不同模型与算法惯量估计结果对比如图9所示。



（a）不同模型与算法惯量估计值



（b）不同模型与算法惯量估计误差

图9 不同模型与算法惯量估计结果对比

Figure 9 Comparison of inertia estimation results of different models and algorithms

从图9中可以看出，基于CAR模型和RLS算法的惯量估计方法误差最大为11.54%，最小为7.86%；基于CAR模型和FF-BCRLS算法的惯量估计方法误差最大为8.04%，最小为4.72%；本文所提基于BJ模型和FF-BCRLS算法的惯量估计方法误差最大为3.56%，最小为1.46%。这3种不同情况的

平均误差依次为9.49%、6.34%、2.39%，利用CAR模型进行惯量估计时将RLS算法换为FF-BCRLS算法，误差整体降低了3.15个百分点，在此基础上将CAR模型换为BJ模型，误差整体降低3.95个百分点，从基于CAR模型和RLS算法的惯量估计方法到本文基于BJ模型和FF-BCRLS算法的惯量估计方法，误差整体降低7.10个百分点。通过与常规模型和递推算法的对比可知，本文所提基于BJ模型和FF-BCRLS算法的惯量估计方法具有更高的准确性。

5　结语

本文通过分析同步机和风电机组的惯量响应，利用BJ模型和FF-BCRLS算法对含风电的电力系统等效惯量进行估计，经过理论分析和算例验证得出如下结论：

1）在小扰动场景下，系统惯量由同步机组提供，系统等效惯量保持恒定；在大扰动场景下，风电虚拟惯量响应发挥作用，系统整体等效惯量呈现时变特征，并且与风电场的虚拟惯量变化趋势相同。

2）含风电电力系统等效惯量在不同风电渗透率下呈现不同的变化幅度，风电渗透率越大，虚拟等效惯量的作用越明显，系统等效惯量变化幅度越大。

3）本文所提方法解决了惯量估计存在参数不易获取和估计精度不足的问题，能有效准确估计出系统的等效惯量，为系统的惯量水平监测和频率稳定分析提供参考。

参考文献：

[1] 胡博，谢开贵，邵常政，等．双碳目标下新型电力系统风险评述：特征、指标及评估方法[J]．电力系统自动化，2023，47(5)：1-15.
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(5):1-15.

[2] YAN W H, CHENG L, YAN S J, et al. Enabling and evaluation of inertial control for PMSG-WTG using synchronverter with multiple virtual rotating masses in microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019,11(2):1078-1088.

[3] 程林，王吉利，韩志勇，等．新能源接入对区域系统频率稳定的影响及机组改进控制策略[J]．电力科学与技术学报，2024，39(2)：28-34.
CHENG Lin, WANG Jili, HAN Zhiyong, et al. Impact of new energy access on regional system frequency stability and unit improvement control strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024, 39(2):28-34.

[4] 李雪萍，王自力，陈燕东，等．基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]．电力系统保护与控制，2024，52(20)：25-37.
LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. Power System Protection and Control,2024,52(20):25-37.

[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)：855-868.
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):855-868.

[6] 于琳琳，陈姝彧，张凯南，等．考虑最低惯量需求的受端电网储能规划研究[J]．电网与清洁能源，2024，40(10)：149-158.
YU Linlin, CHEN Shuyu, ZHANG Kainan, et al. Research on the energy storage planning of the receiving-end power grid considering minimum inertia requirement[J]. Power System and Clean Energy,2024,40(10):149-158.

[7] 陈金玉，陈大玮，张抒凌，等．面向风电功率波动平抑的储能系统鲁棒模型预测控制[J]．供用电，2023，40(8)：28-33.
CHEN Jinyu, CHEN Dawei, ZHANG Shuling, et al. Robust model predictive control of energy storage system for wind power fluctuation smoothing[J]. Distribution & Utilization,2023,40(8):28-33.

[8] 安军，盛帅，周毅博，等．基于量测数据的风电场等效虚拟惯量评估方法[J]．电网技术，2023，47(5)：1819-1829.
AN Jun, SHENG Shuai, ZHOU Yibo, et al. Evaluation of equivalent virtual inertia of wind farm based on measured data[J]. Power System Technology,2023,47(5): 1819-1829.

[9] 鲁宗相，姜继恒，乔颖，等．新型电力系统广义惯量分析与优化研究综述[J]．中国电机工程学报，2023，43(5)：1754-1776.
LU Zongxiang, JIANG Jiheng, QIAO Ying, et al. A review on generalized inertia analysis and optimization of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1754-1776.

[10] 李志军，郭燕龙，苗庆玉．基于解析法的高比例可再生能源系统惯量支撑储能配置[J]．电测与仪表，2023，60(11)：11-18.

LI Zhijun,GUO Yanlong,MIAO Qingyu.High proportion of renewable energy storage system for inertial support energy storage configuration based on analytical method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60 (11):11-18.

[11] 李勇,常樊睿,彭衍建,等.基于小扰动频率量测数据的电网节点惯量分布评估方法[J].电力系统自动化,2024,48(13):50-59.
LI Yong,CHANG Fanrui,PENG Yanjian,et al.Evaluation method for node inertia distribution of power grids based on small disturbance frequency measurement data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 50-59.

[12] 李东东,张先明,姚寅,等.考虑风速时空分布及机组运行状态差异的风电场有效惯量估计[J].电力建设,2024,45(1):112-124.
LI Dongdong, ZHANG Xianming, YAO Yin, et al. Estimation of effective inertia of wind farms considering temporal and spatial distribution of wind speed and differences in unit operating states[J]. Electric Power Construction,2024,45(1):112-124.

[13] 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):6842-6856.
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):6842-6856.

[14] 胡英杰,李强,李群.考虑容量限制的构网型光储系统惯量与一次调频参数优化配置方法[J].中国电力,2024,57(10):115-122.
HU Yingjie,LI Qiang,LI Qun.Co-optimization of inertia and droop control coefficient for grid-forming photovoltaic-storage system considering capacity limits [J].Electric Power,2024,57(10):115-122.

[15] 王彤,邢其鹏,李鸿恩,等.计及虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估与响应特性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):52-60.
WANG Tong, XING Qipeng, LI Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control,2022,50(11):52-60.

[16] 李元臣,文云峰,叶希,等.基于多新息辨识的电力系统节点惯量估计方法[J].电力自动化设备,2022,42(8):89-95.
LI Yuanchen, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Estimation method of power system nodal inertia based on multi-innovation identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(8):89-95.

[17] 刘方蕾.基于惯量分布特性的新能源电力系统分区惯量评估研究[D].北京:华北电力大学,2021.
LIU Fanglei. Reserach on area inertia evaluation of power system with high-penetration of renewable energy considering ditribution characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University,2021.

[18] 刘林,王大龙,綦晓,等.基于双锁相环的海上风场综合惯量调频策略研究[J].发电技术,2024,45(2):282-290.
LIU Lin, WANG Dalong, QI Xiao, et al. Study on double phase-locked loop on the synthetic inertia control of offshore wind farm frequency regulation[J]. Power Generation Technology,2024,45(2):282-290.

[19] PAIDI E S N R, MARZOOGHI 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.

[20] PETRA N, PETRA C G, ZHANG Z, et al. A Bayesian approach for parameter estimation with uncertainty for dynamic power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,32(4):2735-2743.

[21] TUO M J, LI X P. Machine learning assisted inertia estimation using ambient measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4): 4893-4903.

[22] 李世春,宋秋爽,薛臻瑶,等.含风电虚拟惯性响应的新能源电力系统惯量估计[J].电力工程技术,2023,42(2):84-93.
LI Shichun,SONG Qiushuang,XUE Zhenyao,et al.Inertia estimation of new energy power system with virtual inertia response of wind power[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(2):84-93.

[23] 禹海峰,马俊杰,周年光,等.面向储能惯量支撑能力评估的新型电力系统惯性系数辨识方法[J].智慧电力,2023,51(5):1-7+72.
YU Haifeng, MA Junjie, ZHOU Nianguang, et al. New power system inertia coefficient identification method for energy storage inertia support capability evaluation [J].Smart Power,2023,51(5):1-7+72.

[24] 马燕峰,李金媛,王子建,等.基于量测数据的新能源电力系统区域等效惯量评估方法[J].电工技术学报,2024,39(17):5406-5421.
MA Yanfeng,LI Jinyuan,WANG Zijian,et al.Assessment method of regional equivalent inertia of new energy power system based on measured data[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(17):5406-5421.

[25] 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,2019,35(4):3122-3132.

[26] ASHTON P M, SAUNDERS C S, TAYLOR G A, et al. Inertia estimation of the GB power system using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(2):701-709.

[27] 李东东,张佳乐,徐波,等.考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J].电网技术,2020,44(8):2913-2921.
LI Dongdong, ZHANG Jiale, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties[J]. Power System Technology,2020,44(8):2913-2921.

[28] 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等.计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J].电力科学与技术学报,2023,38(4):169-176.
JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.

[29] 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.

[30] 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+373.
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+373.

[31] YOO Y, JUNG S, JANG G. Dynamic inertia response support by energy storage system with renewable energy integration substation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2019,8(2):260-266.

[32] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(16):5179-5192.

[33] XIE Z, FENG Y T, MA M Y, et al. An improved virtual inertia control strategy of DFIG-based wind turbines for grid frequency support[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(5): 5465-5477.

[34] 黄思维,张俊勃,曾繁宏.适用于电力系统惯性秒级追踪的高效在线算法[J].高电压技术,2021,47(10):3519-3527.
HUANG Siwei, ZHANG Junbo, ZENG Fanhong. Efficient online algorithm for fast inertia tracking of power system[J].High Voltage Engineering,2021,47(10):3519-3527.

[35] 秦昊.基于准稳态数据的电力系统惯量评估方法研究[D].济南:山东大学,2023.
QIN Hao. Research on inertia evaluation method of power system based on quasi-steady-state data[D].Jinan: Shandong University,2023.