

文章编号: 1006-2467(2024)09-1390-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.029

# 新型电力系统点对网惯性支撑能力在线监测方法

邓小宇<sup>1</sup>, 刘牧阳<sup>1</sup>, 常喜强<sup>1,2</sup>, 南东亮<sup>3</sup>, 莫若<sup>1</sup>, 陈俊儒<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830011;  
3. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 准确及时地监测低惯量新型电力系统中聚合电源汇集点对电网的惯性支撑能力, 对于提升系统安全、稳定、经济化运行具有重要意义。为阐明点对网的惯性支撑能力在线监测方法的基本原理, 首先对以摇摆方程为基础的电力系统等效惯性常数定义及现有在线监测方法进行回顾; 然后, 为弥补现有在线监测方法在准确性上的欠缺, 创新性地提出基于回归法的等效惯性常数辨识方法, 并与在线惯量监测方法结合, 构建基于同步相量测量单元的新型电力系统点对网惯性支撑能力在线监测的系统性方法; 最后, 利用改进的新英格兰 10 机 39 节点系统仿真分析, 论证了该惯性支撑能力在线监测方法的实时性、准确性及其对新型电力系统的适用性。

**关键词:** 新型电力系统; 惯量监测; 虚拟同步电机; 等效惯性常数

中图分类号: TM712

文献标志码: A

## Online Monitoring Method for Inertial Support Capacity of Point-to-Grid in New Power Systems

DENG Xiaoyu<sup>1</sup>, LIU Muyang<sup>1</sup>, CHANG Xiqiang<sup>1,2</sup>

NAN Dongliang<sup>3</sup>, MO Ruo<sup>1</sup>, CHEN Junru<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** An accurate and timely monitoring for the inertia support capability of the point of interconnection of aggregated sources to the grid in a low-inertia new power system is crucial for the safety, stability, and economic operation of the system. In order to explain the basic idea of the online point-to-grid inertia monitoring method, the definition of inertia of power system based on the swing equation and existing online monitoring methods are analyzed. Then, in order to improve the accuracy of the existing online inertia monitoring method, an equivalent inertia constant identification method based on the regression method is developed. Combining the proposed inertia constant identification method with the online inertia monitoring method, a systematic method for online monitoring of the inertia support capacity of point-to-grid in new power system is developed based on synchronous phasor measurement units. Finally, the simulation analysis of a modified New England 10-machine 39-bus system proves the

收稿日期: 2023-01-28 修回日期: 2023-03-05 录用日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(52267009), 中国博士后科学基金(2021M702749)资助项目

作者简介: 邓小宇(1995—), 硕士生, 从事电力系统稳定与控制方向的研究。

通信作者: 陈俊儒, 副教授, 博士生导师; E-mail: junru.chen@xju.edu.cn.

accuracy and the feasibility of the developed real-time inertia monitoring method for the new power system.

**Keywords:** new power system; inertia monitoring; virtual synchronous generator; equivalent inertia constant

在“双碳”目标驱动下,我国电力系统正逐步从火电主导的传统电力系统转向由风、光等新能源主导的新型电力系统<sup>[1]</sup>.在此过程中,电力系统逐渐表现出高比例电力电子化和高新能源占比的“双高”新特征<sup>[2-4]</sup>.相较于同步机组,新能源电源几乎不具备惯性支撑能力<sup>[5-6]</sup>;基于常规控制的风电机组转动惯量被隐藏,几乎不向电网提供惯性支撑;光伏电源则与系统完全解耦,无法进行惯量响应<sup>[7]</sup>.因此,“双高”新型电力系统存在明显的惯量不足特征,使电力系统尤其是频率安全稳定面临巨大风险,严重影响新能源大规模接入电网、能源转型和双碳目标的实现.

为克服转动惯量不足的问题,使新能源电源为电网提供类似于同步机的主动惯性支撑,基于电压源型电力电子变流器的虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术<sup>[8]</sup>获得了长足发展,并已在国内外部分地区示范应用<sup>[9-11]</sup>,可能成为新型电力系统建设的关键组成部分.该技术利用电力电子控制及功率型储能的配合模拟转动惯量为系统提供紧急频率救助.此类在惯量响应时间尺度内的、由电力电子接口设备快速响应频率变化而释放的有用功统称为虚拟惯量<sup>[12-13]</sup>.在新能源发电机逐步取代传统能源发电机的过程中,由电力电子接口电压源提供的虚拟惯量可在一定程度上替代系统对转动惯量的需求.VSG的惯性支撑能力受控制手段、控制参数、储能设备等条件的制约,表现出较强的时变性<sup>[14-15]</sup>.因此,针对包括转动惯量与虚拟惯量在内的电力系统综合惯量的监测对保证系统安全稳定和提升电网的经济化运行水平具有重要意义.

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)与同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)的广泛应用为电力系统的动态监测及综合惯量评估奠定了技术基础<sup>[16]</sup>.文献[17-23]中提出可利用数据采集与监视控制(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统和WAMS记录系统意外发生的扰动事件,根据系统响应过程估测系统惯量水平.文献[17-18]中提出可根据系统低频机电暂态振荡时联络线功率变化估测不同区域电网惯量.此方法准确性高,但仅适用于长距离区域互联电网,难以准确监控节点级惯量

变化,无法准确反映惯量的空间分布特性.文献[19-20]中则基于系统有功大扰动后频率演化过程进行惯量估测.此方法为事件驱动法,难以对正常运行系统的惯量水平进行实时监测.同时,考虑到虚拟惯量可根据系统运行状态进行自适应变化<sup>[24-25]</sup>,文献[21]中基于电力系统频差原理,提出能够实时追踪虚拟惯量自适应变化的基于大扰动事件的惯量评估方法.电力系统频差原理<sup>[26]</sup>主要用于刻画电力系统动态频率时空分布特性,为追踪系统中各节点频率与惯量的实时变化提供了理论基础.

本文首先针对等效惯性常数理论及现有在线惯量监测理论进行回顾与讨论;在此基础上,创新性地提出基于数据回归的等效惯性常数辨识方法,弥补现有实时惯量监测法收敛后准确性不足的问题,并将非实时性的等效惯性常数辨识方法与实时惯量监测技术结合,构建兼顾实时性与准确性的基于PMU测量的新型电力系统点对网惯性支撑能力系统性在线监测方法;最后,采用改进的10机39节点系统验证所提方法的效果.

## 1 等效惯性常数及其实时监测方法

### 1.1 等效惯性常数概念

狭义的电力系统惯量仅仅指同步发电机的转动惯量.等效惯性常数是用于表征同步发电机惯量水平的物理量,利用摇摆方程对其进行定义.标么值形式下,同步发电机的摇摆方程可写为

$$M\dot{\omega} = p_m - p_e + p_D \quad (1)$$

式中: $M$ 为同步发电机的机械启动时间; $\omega$ 为同步机的角频率; $p_m$ 、 $p_e$ 分别为机械功率和电磁功率; $p_D$ 为由阻尼效应引起的有功功率变化,具体为

$$p_D = D \int \dot{\omega} dt \quad (2)$$

$$M = 2H \quad (3)$$

式中: $D$ 为阻尼系数,用于描述同步发电机阻止转矩突变的能力; $t$ 为时间; $H$ 为等效惯性常数.

随着电力电子接口电源主动支撑电网相关技术的发展,电力电子控制可模拟同步发电机惯量响应为电网提供虚拟惯量,此类虚拟惯量对电网的惯性支撑能力也可由等效惯性常数进行量化<sup>[21]</sup>.

## 1.2 等效惯性常数辨识

在式(1)中,  $p_m$  无法直接测量. 因此, 若要根据式(1)估测  $H$ , 需对  $p_m$  的变化规律做进一步探讨. 可将  $p_m$  分解为 3 个部分:

$$p_m = p_{UC} + p_{PFC} + p_{SFC} \quad (4)$$

式中:  $p_{UC}$  为当前优化调度结果给予的功率参考点;  $p_{PFC}$  为由一次频率控制调节的有功功率;  $p_{SFC}$  为由二次频率控制调节的有功功率. 将式(4)代入式(1)并求等号两侧关于时间的微分得:

$$2H\dot{\omega} = \dot{p}_{UC} + \dot{p}_{PFC} + \dot{p}_{SFC} - \dot{p}_e - \dot{p}_D \quad (5)$$

在分析对象为接入电网的同步机组聚合电源时,  $\dot{p}_e$  为机组接入点的功率变化率 (Rate of Change of Power, RoCoP), 其估测方法见后文;  $\dot{\omega}$  为电源等效角频率的二阶时间导数, 在分析对象为接入电网的同步机组聚合电源时, 电源等效角频率  $\omega$  的估测方法见后文. 文献[21]中提出, 在可测得  $\omega$  的情况下, 利用比例积分 (PI) 滤波器处理可获知  $\dot{\omega}$ .

图 1 展示了适合采集惯量监测数据的两类时间窗口, 即经济调度完成后的稳定运行状态及频率事件发生后惯量响应主导的时期. 在这两个时期, 频率控制未介入, 阻尼作用相对惯量作用而言极小, 电网频率特性主要由系统惯量主导<sup>[27-28]</sup>. 图中:  $T_{Ine}$  为惯量响应时间;  $T_{PFC}$  为一次调频响应时间;  $T_{SFC}$  为二次调频响应时间.

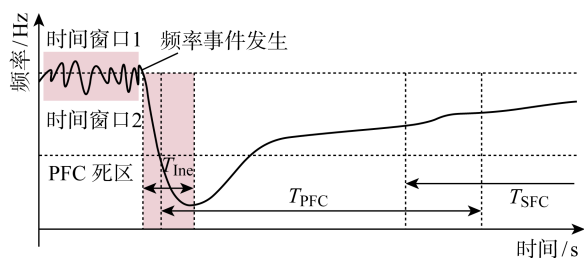


图 1 高新能源渗透电力系统频率响应

Fig. 1 Frequency response of power system with a high penetration of new energies

在图 1 所示的两个时间窗口中均可认为  $\dot{p}_{UC} = 0$ . 时间窗口 1 中电力系统会不断受到负荷和新能源波动的小干扰, 在这种情况下, 电力系统的综合惯量将对系统的频率波动形成抑制效果. 在此情况下, 由于频率偏差必定在一次调频控制 (Primary Frequency Control, PFC) 及二次调频控制 (Secondary Frequency Control, SFC) 死区内, 相关控制不动作, 所以  $\dot{p}_{PFC} = 0$ ,  $\dot{p}_{SFC} = 0$ . 时间窗口 2 中  $\dot{\omega}$  和  $\dot{p}_e$  相对较大, 与正常工作条件相比, 测量噪声对惯量监测的影响更小, 准确性更高. 然而, 如图 1 所示, 惯量响应和 PFC 周期的部分发生重叠, 且 PFC 的动作时间针对

不同事件具有较大差异性, 难以明确, 故 PFC 效果可能对基于时间窗口 2 的惯量估测准确性造成一定影响. 但若监测方法得当, 在  $\dot{\omega}$  与  $\dot{p}_e$  大于一定临界值的情况下, 相关影响极为有限<sup>[21]</sup>.

因此, 在惯性主导阶段可由式(5)推导出:

$$2H \approx -\frac{\dot{p}_e}{\dot{\omega}} \quad (6)$$

## 1.3 惯量实时监测技术

在实际应用中, 基于式(6)的等效惯性常数计算需改写为

$$2H^* = -\frac{\dot{p}_e^*}{\dot{\omega}^*} = -\frac{\dot{p}_e + \eta_p}{\dot{\omega} + \eta_\omega} \quad (7)$$

式中: 上标 “\*” 表示估计值;  $\eta_p$ 、 $\eta_\omega$  分别为功率和角频率的测量误差. 式(7)存在严重的数值稳定性问题, 即当分子  $\dot{\omega}^* \rightarrow 0$  时, 分母将趋向于无穷小; 此时,  $\eta_p$  的影响将被严重放大, 导致  $H^*$  的估计出现极大误差.

文献[21]中通过规避分式结构, 提出在线惯量监测方法, 有效提升了数值稳定性, 表示为

$$T_M \dot{H}^* = \gamma(\dot{\omega})(\dot{p} - 2H^* \dot{\omega} - D^* \dot{\omega}) \quad (8)$$

$$T_D \dot{D}^* = \gamma(\dot{\omega} dt) \left( \int \dot{p} dt - 2H^* \dot{\omega} - D^* \int \dot{\omega} dt \right) \quad (9)$$

式中: 时间常数  $T_M$  和  $T_D$  可决定惯量监测的收敛速度,  $\dot{p}$  即接入点 RoCoP, 与  $\omega$  均可通过 PMU 测量数据进行测量. 同时有

$$\gamma(x) = \begin{cases} -1, & x \geq \zeta_x \\ 0, & -\zeta_x < x < \zeta_x \\ 1, & x \leq -\zeta_x \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\zeta_x$  为一个接近于 0 的正阈值, 用于剔除导数过零时的数值问题. 式(10)为惯量监测创造了一个死区, 即  $(-\zeta_x, \zeta_x)$ , 选择合适的  $\zeta_x$  可以有效减少频率波动和噪声的影响, 但若  $\zeta_x$  取值过大, 则可能因丢失过多暂态过程信息降低惯量监测的准确性.

## 2 基于频差原理的新型电力系统惯量监测系统性方法

### 2.1 基于数据回归的等效惯性常数辨识

**2.1.1 电源内部角频率测量** 在已知系统拓扑的情况下, 可测量电源汇集点 (Point of Interconnection, POI)<sup>[29]</sup> 处母线的动态频率测量同步机组的等效角频率.

如图 2 所示, 若可测得机组的输出 RoCoP, 则仅可通过电源汇集点处的母线角频率  $\Delta\omega_{B,1}$ , 对机组等效角频率进行测量, 如下:

$$\Delta\omega(t) = \Delta\omega_{B,1}(t) - x_k \dot{p}(t) \quad (11)$$

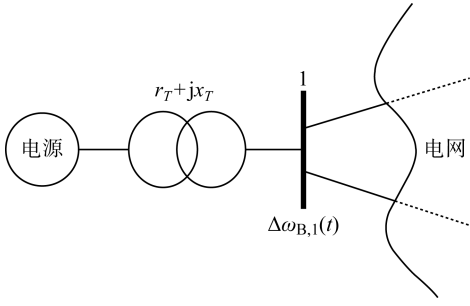


图2 电源经单线路接入电网

Fig. 2 Interface of power supply via a single branch

式中:  $x_k$  为同步机电抗,  $x_k = 1/b$ ,  $b$  为电纳. 图中:  $r_T, x_T$  分别为变压器参数电阻和电抗.

此方法不仅适用于同步机组等效角频率测量, 在已知电力电子接口电源内部阻抗的情况下, 也可用于测量电压源型电力电子电源频率, 文献[22-23]中对其准确性进行了实验验证.

**2.1.2 RoCoP 测量** 根据电力系统潮流计算直流法<sup>[27]</sup>作时间的微分可得如下关系:

$$\dot{p}_B(t) = \Omega_b \mathbf{B}_{Bus} \Delta\omega_B(t) \quad (12)$$

式中: 向量  $\dot{p}_B(t)$  即为 RoCoP;  $\Omega_b$  为同步参考角速度, 对于 50 Hz 的电网而言为  $100\pi$  rad/s;  $\mathbf{B}_{Bus}$  为电网的电纳矩阵; 各母线上的频率偏差  $\Delta\omega_B(t)$  可由 PMU 测量获得. 因此, 在已知电网导纳矩阵的情况下, 可由聚合电源接入点处 PMU 测量数据推知经流入电网的 RoCoP<sup>[22-23]</sup>.

需注意的是, 直流法是一种较为粗略的计算方法, 忽略了电压暂态变化的影响. 因此, 基于式(12)的电源 RoCoP 测量可能难以准确刻画电压暂态带来的影响, 但电压暂态相较于有功频率衍化过程而言时间尺度较短, 影响相对有限. 后文实验部分将对该影响作直观展示.

**2.1.3 基于数据回归的等效惯性常数辨识** 1.3 节所展示的在线惯量监测方法<sup>[21]</sup>难以兼顾实时性与准确性, 虽能有效监测电源接入点惯量的变化趋势, 但其对等效惯性常数  $H^*$  监测的准确性有限. 对此提出一种基于数据回归的等效惯性常数辨识方法, 牺牲惯量监测的部分实时性以保障其准确性.

据式(6), 基于  $t_i$  时刻测得的 RoCoP 与机组角频率存在如下关系:

$$H_i^* = \frac{|\dot{p}^*(t_i)|}{2 |\ddot{\omega}^*(t_i)|} \quad (13)$$

$$2 |\ddot{\omega}^*(t_i)| |H_i^* - |\dot{p}^*(t_i)| \approx 0 \quad (14)$$

式中:  $\dot{p}^*$  和  $\ddot{\omega}^*$  使用绝对值形式, 可在不影响等效惯性常数识别准确性的前提下, 节约储存其符号位

所占的空间.

对于一组采样时间序列  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , 可以定义以下向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= 2 \begin{bmatrix} |\ddot{\omega}^*(t_1)| & |\ddot{\omega}^*(t_2)| & \dots \\ |\ddot{\omega}^*(t_{N-1})| & |\ddot{\omega}^*(t_N)| \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} |\dot{p}^*(t_1)| & |\dot{p}^*(t_2)| & \dots \\ |\dot{p}^*(t_{N-1})| & |\dot{p}^*(t_N)| \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (15)$$

式中: 每个矩阵的维度为  $N \times 1$ ,  $N$  由时间窗的长度  $\tau = t_N - t_1$  以及 PMU 的采样率决定.

根据式(14)可将等效惯性常数辨识问题转化为针对式(15)矩阵中数据的回归问题, 采用最小方差的方法, 可将此回归问题表述为

$$\mathbf{X}\mathbf{H}^* - \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad (16)$$

线性方程(16)的解即

$$\mathbf{H}^* = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (17)$$

表达式(17)可以用来有效辨识等效惯性常数. 为了避免出现奇异的  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  矩阵, 可采用下式针对  $\mathbf{X}$  进行修正,

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \mathbf{X}^T \mathbf{X} + \boldsymbol{\zeta} \quad (18)$$

式中:  $\boldsymbol{\zeta} = \text{diag}(\epsilon, \epsilon, \dots, \epsilon)$ , 即维度为  $N \times N$  的矩阵, 其对角元素均为一极小的非零元素  $\epsilon$ . 在后文案例分析中, 使用  $\epsilon = 10^{-6}$  来避免  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  的奇异问题.

相比 1.3 节的实时惯量监测方法<sup>[21]</sup>, 基于数据回归的等效惯性常数辨识方法具有更强数值稳定性, 对测量窗口的选择相对要求更加宽泛.

## 2.2 新型电力系统惯性支撑能力在线监测系统性方法

1.3 节所提方法可用于在线监测电源的实时惯量变化, 并将该信息用于辅助新型电力系统的先进保护与控制策略, 但其收敛后的等效惯性常数通常存在一定误差, 且其准确性对参数  $\zeta_x$  的敏感度极高; 2.1 节提出基于数据回归的等效惯性常数辨识, 可在惯性支撑效果未发生显著变化的时间段内辨识该时段此电源的等效惯性常数, 为电力系统运营及频率辅助服务市场提供参考信息<sup>[30]</sup>, 但该方法不具有 1.3 节惯量监测方法的实时性. 结合上述两种惯量监测方法, 提出如图 3 所示的兼顾实时性与准确性的新型电力系统点对电网惯性支撑能力在线监测的系统性方法, 监测针对的是安装有 PMU/WAMS 设备的关键 POI, 惯性支撑能力由等效惯性常数进行量化表征. 如图 3 所示, 该系统性方法需要利用 PMU 测量估测两个关键变量: 聚合电源内部角频率和聚合点输入电网的 RoCoP, 2.1 节介绍了相关估测方法.

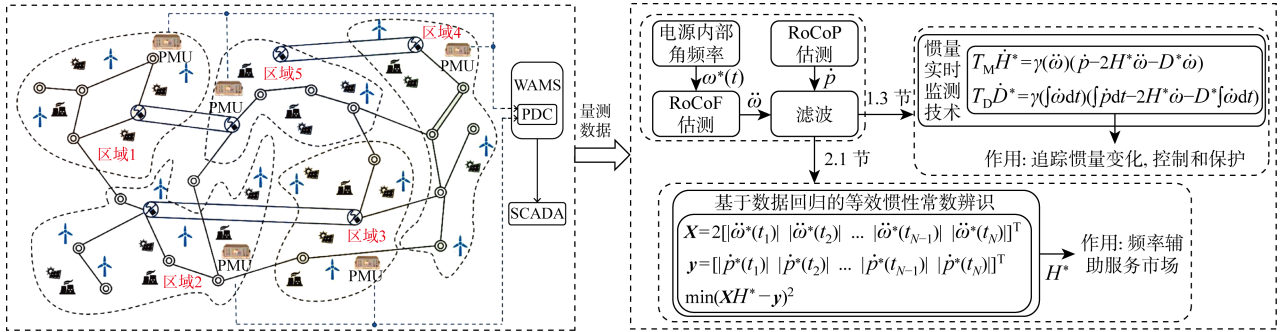


图 3 新型电力系统点对电网惯性支撑能力在线监测系统性方法

Fig. 3 Systematic method of online monitoring of inertia support capacity of point-to-grid in new power system

3 案例分析

采用新英格兰 10 机 39 节点系统<sup>[31]</sup>验证前文所述电力系统点对网惯性支撑能力在线监测方法的准确性. 为准确模拟新型电力系统特性, 对该系统进行改进, 提升新能源及电力电子电源渗透率, 改进系统拓扑如图 4 所示. 由图可见, 母线 33 和 35 连接的同步发电机(G)被替换为 VSG; 母线 37 和 38 连接的同步发电机替换为风电厂(Wind Power Plant, WPP), 此 WPP 采用双馈异步发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)聚合等值模型进行模拟<sup>[31]</sup>, 并假设 WPP 不为系统提供惯性支撑. 改进后新英格兰系统中新能源装机量及其稳态出力如表 1 所示.

所进行的大干扰仿真中, 大干扰事件为母线 30

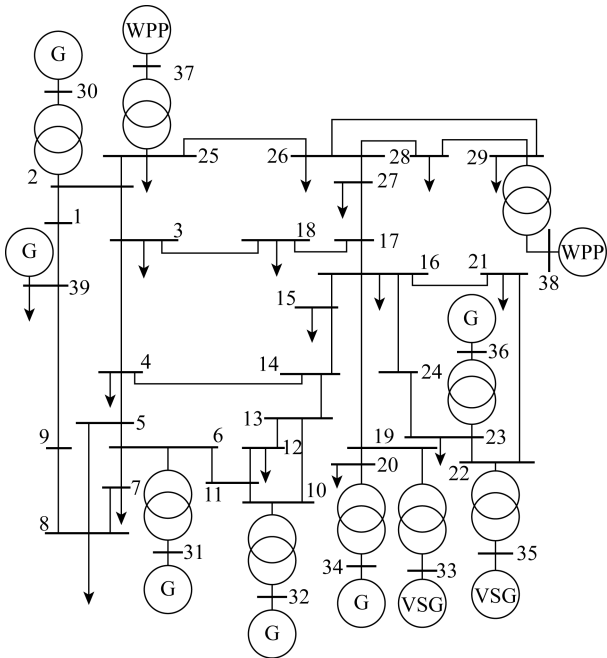


图 4 改进后的 10 机 39 线系统

Fig. 4 Modified 10-machine 39-bus system

表 1 改进后 10 机 39 节点系统的新能源电源

Tab. 1 New energy power supply of modified 10-machine 39-node system

母线序号	发电机编号	装机量/MW	有功出力/MW
33	4 号 VSG	1 000	632
35	6 号 VSG	1 000	650
37	1 号 WPP	606	540
38	2 号 WPP	900	830

连接的同步发电机解列; 小干扰仿真中, 小干扰事件为风速的连续变化, 风速模型为基于 Weibull 分布的连续变换的时序随机数列, 其跳变步长为 0.1 s<sup>[31]</sup>.

使用采样率为 60 Hz 的 PMU 测量各母线频率和输出的有功功率. 所有仿真分析结果均由基于 Python 的电力系统仿真软件工具 DOME<sup>[32]</sup>获得. 改进后的新英格兰 10 机 39 线系统的各个发电机实际等效惯性常数如表 2 所示.

表 2 各聚合电源实际惯量信息

Tab. 2 Actual inertia information of each generator

编号	母线	发电机编号	等效惯性常数/ [MW · s · (MV · A) <sup>-1</sup> ]
1	39	1 号 G	100
2	31	2 号 G	60.6
3	32	3 号 G	71.6
4	34	5 号 G	52
5	36	7 号 G	52.8
6	33	4 号 VSG	120
7	35	6 号 VSG	100

3.1 基于 PMU 测量的大扰动下的实时惯量监测效果

探讨在系统遭受大扰动时, 基于 PMU 测量数据和频差原理的电源等效角频率和 RoCoP 估测方

法追踪动态变化的准确性;对比分析基于 PMU 测量数据的式(8)和(9)的惯量实时监测效果,并与文献[21]中的方法进行对比,从而论证基于 PMU 测量的惯量实时监测的可行性. 为了直观展示实时惯量监测方法的数值特性,未引入其他小干扰,即采用常风速模型.

将同步发电机组在大扰动下的等效角频率、RoCoP 和等效惯性常数的估计值分别记作  $\omega^*$ 、 $\dot{p}^*$  和  $H^*$ ; 母线 39、31、34 和 36 连接的同步机组在大扰动后的动态演化过程及其等效角频率、RoCoP 与等效惯性常数的监测结果如图 5 所示. 图中:下标 p. u. 表示标么值.

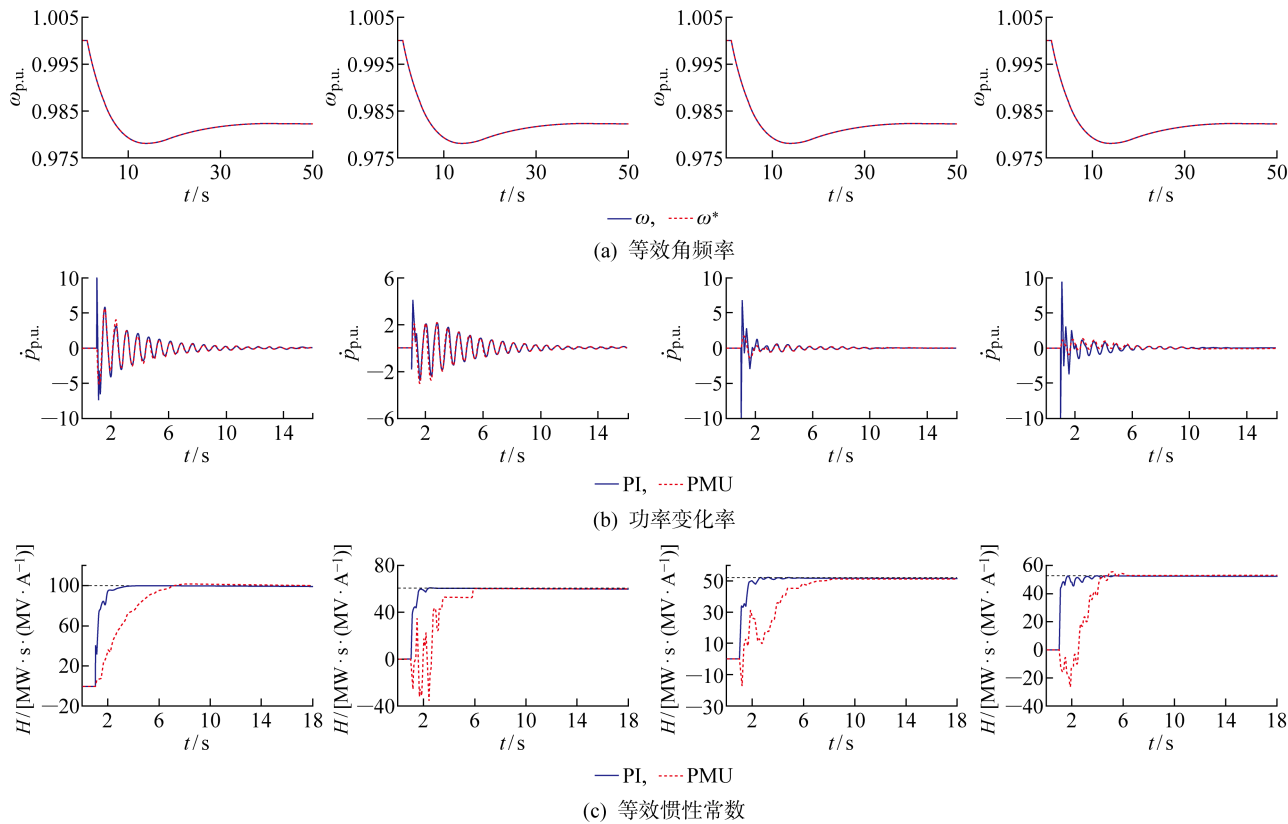


图 5 1 号、2 号、5 号和 7 号同步发电机组大扰动下的动态演化过程及其监测结果

Fig. 5 Dynamic evolution and monitoring results of the synchronous generators No. 1, No. 2, No. 5 and No. 7

图 5(a)对比了机组等效角频率准确值  $\omega$  和基于 PMU 测量的估测值  $\omega^*$ , 论证了文中式(11)所示方法的准确性, 仿真发现两者在动态过程中的相对误差绝对值保持在 0.1 % 以内, 估测准确性极高. 图 5(b)展示了由准确的机组出力通过 PI 滤波器测量所得 RoCoP 以及基于 PMU 测量估测所得 RoCoP 的结果对比, PI 滤波器获得的 RoCoP 相比 PMU 测量结果在动态过程中展现出更剧烈的波动性, 但总体而言两者捕获的 RoCoP 动态演化特性基本一致. 图 5(c)对比了基于 PI 滤波器及准确的机组等效角频率与 RoCoP 的同步发电机组惯量监测结果和完全基于 PMU 测量的惯量结果, 可见两种情况下基于式(8)和(9)的惯量监测方法均可收敛到较为准确的等效惯性常数, 然而基于 PMU 测量时其收敛速度更慢, 约需要 5~10 s. 上述实验结果证明, 基于

PMU 的 RoCoP 测量中, 直流潮流法中假设条件造成不可避免的误差, 因为在有功功率变化剧烈时忽略了电压暂态带来的影响, 所以在故障后 2 s 内的追踪效果存在一定误差, 进而影响惯量监测的收敛速度. 但将采用测量的 RoCoP 用于在线惯量监测仍能确保收敛至较为准确的等效惯性常数, 故总体而言不影响实时惯量监测方法的可行性.

3.2 基于 PMU 测量的等效惯性常数识别效果

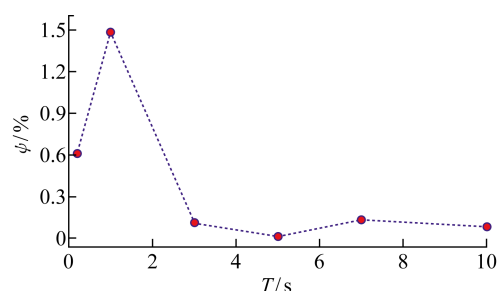
对 2.1 节所提等效惯性常数识别方法的准确性进行论证, 并探讨所需时间窗口长度. 实验对象选取经由母线 31 和 36 接入电网的同步机组进行验证. 主要考虑受风速随机波动影响的小干扰仿真, 并假设每个 PMU 均具有测量噪声. 测量噪声利用奥恩斯坦-乌伦贝克随机函数<sup>[33]</sup>进行模拟, 该噪声的主要分布范围标么值为  $\pm 0.001$ , 符合实际 PMU 要



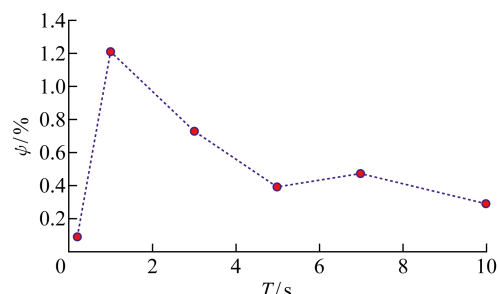
求. 考虑在电力系统正常运行状态下即无大干扰事件发生的情况下, 采用蒙特卡罗实验法, 重复 300 次实验以充分考虑新能源出力不确定性的影响, 并对结果求取平均值. 相对误差计算方法如下:

$$\psi = \left| \frac{H^* - H}{H} \right| \quad (19)$$

图 6 为不同长度的时间窗口 ( $T$ ) 下, 两同步机组等效惯性常数识别结果的相对误差. 图 6(a) 所展示的 2 号同步机组等效惯性常数识别结果相对误差分布在  $[0.01\%, 1.5\%]$  的范围内, 图 6(b) 所示的 7 号同步机组等效惯性常数识别的相对误差分布在  $[0.1\%, 1.3\%]$  的范围内, 证实了该方法的准确性.



(a) 母线 31 的 2 号同步机组



(b) 母线 36 的 7 号同步机组

图 6 不同时间窗口下同步机的等效惯性常数识别

Fig. 6 Identification results of equivalent inertia constant of synchronous generator via different time windows

由图 6 可知, 当时间窗口长度在 2 s 以上时, 等效惯性常数识别相对误差收敛至 0.5% 以内, 具有极高的准确性. 因此, 在高比例新能源电力系统正常运行状态下, 选取长度为 2 s 及以上的时间窗口可保证获得较为准确的同步机等效惯性常数.

### 3.3 虚拟惯量在线监测效果

讨论 2.2 节所提点对网惯性支撑能力在线监测系统性方法对提供虚拟惯量的 POI 的监测作用. 相较于同步发电机组, VSG 为系统提供的虚拟惯性支撑效果可能因储能及(或)新能源电源运行情况、运营商对控制参数整定等因素发生改变, 故等效惯性常数在不同时间段可能发生变化. 2.2 节所提惯量

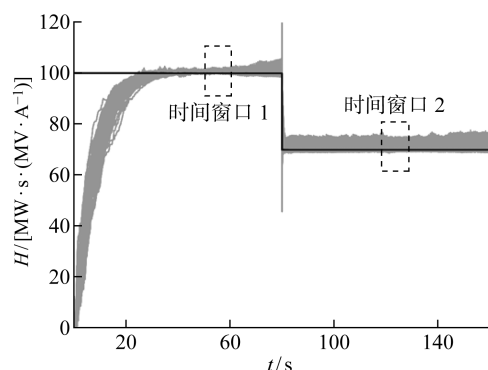
在线监测系统性方法将式(8)和(9)与式(17)相结合, 在监测虚拟惯性支撑效果变化的同时, 准确辨识不同时段下 VSG 的等效惯性常数.

现考虑两种不同情况:

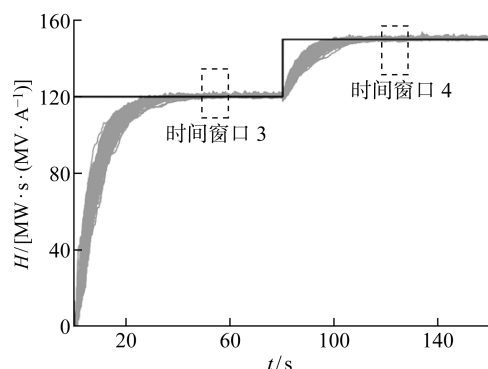
(1) 在仿真时间为 80 s 时, 母线 33 上 4 号 VSG 的等效惯性常数由  $100 \text{ MW} \cdot \text{s}/(\text{MV} \cdot \text{A})$ , 下降为  $70 \text{ MW} \cdot \text{s}/(\text{MV} \cdot \text{A})$ .

(2) 在仿真时间为 80 s 时, 母线 35 上 6 号 VSG 的等效惯性常数由  $120 \text{ MW} \cdot \text{s}/(\text{MV} \cdot \text{A})$ , 上升为  $150 \text{ MW} \cdot \text{s}/(\text{MV} \cdot \text{A})$ .

图 7 展示了上述两种情况下, 300 组蒙特卡罗模拟实验所获得的 VSG 虚拟惯量在线监测结果及用于等效惯性常数辨识的时间窗口. 由图可见, 基于式(8)和(9)的在线惯量监测在不输入初始估值的情况下收敛至 VSG 准确的等效惯性常数附近大约需要 30 s, 且存在一定误差. 如图 7(a) 所示, 4 号 VSG 的虚拟惯性支撑效果削弱后, 2.2 节所提方法能立刻对此变化进行监测. 图 7(b) 则展示了 6 号 VSG 虚拟惯性支撑效果增强后, 另需约 30 s 时间才能收敛到新的等效惯性常数附近. 具有这个差异性的原因是虚拟惯性支撑效果削弱后, 小扰动造成的频率及 RoCoP 变化更为剧烈, 所以基于频差原理的惯量监测方法反应迅速; 而虚拟惯性支撑效果增强后, 小



(a) 4 号 VSG



(b) 6 号 VSG

图 7 VSG 虚拟惯量在线监测结果

Fig. 7 Online monitoring results of virtual inertia of VSG

扰动影响被抑制,故需要一定时间才能对该变化进行准确监测。

采用实时监测与数据回归结合的系统性方法,以确保避开汇集点对电网惯性支撑能力调整时段;选用 10 s 的时间窗口用于等效惯性常数辨识,以保证其监测结果的准确性。具体实验结果如表 3 所示。由表可见,4 个不同时间窗口所测得的等效惯性常数平均相对误差范围均保持在 0.5 % 以内,准确性极高。综上所述,所提在线监测系统性方法能够准确监测虚拟机接入点的惯量变化情况。

表 3 不同时间窗口下等效惯性常数的识别结果  
Tab.3 Results of equivalent inertia constant identification via different time windows

VSG	时间窗口	$H^*/[\text{MW}\cdot\text{s}\cdot(\text{MV}\cdot\text{A})^{-1}]$	$H/[\text{MW}\cdot\text{s}\cdot(\text{MV}\cdot\text{A}^{-1})]$	$\psi/\%$
4 号	1	100.20	100.00	0.20
	2	70.33	70.00	0.48
6 号	1	120.39	120.00	0.33
	2	150.63	150.00	0.42

## 4 结论

在梳理已有惯量在线监测技术的基础上,提出基于数据回归的等效惯性常数识别,构建适用于新型电力系统的点对网惯性支撑能力在线监测系统性方法。利用改进的新英格兰 10 机 39 节点系统对所提惯量监测方法的准确性及可行性进行探讨,可得到结论如下:

- (1) 电网控制调度中心可通过汇集点 PMU 的测量数据准确监测系统中各关键聚合电源内部角频率及其对网输出的 RoCoP。
  - (2) 基于式(8)和(9)的在线惯量监测在大干扰及小干扰下均可准确监测惯量变化,为新型电力系统的控制与保护提供相关信息。
  - (3) 基于式(17)的等效惯性常数识别方法可通过较短的时间窗口准确监测转动惯量及虚拟惯量的等效惯性常数,为新型电力系统运营及频率辅助服务市场提供参考信息。
  - (4) 结合在线惯量监测与等效惯性常数辨识的汇集点惯量监测方法可实现对传统同步机组及其他电力电子电源的惯性支撑效果的全面监测,适应新型电力系统精确运行监测与控制需求。
- 基于上述结论可知,所提电力系统点对网惯性支撑能力在线监测系统性方法具有准确性、普适性和及时性 3 个突出特征。未来将进一步探究区域级

电网等效惯量的监测方法,利用尽可能少的测量设备对区域级电网惯量水平进行准确监测。

## 参考文献:

[1] 巩伟峥,许凌,姚寅. 计及风速分布与机组惯量转化不确定性的风电场可用惯量估计[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(Sup.2): 51-59.  
GONG Weizheng, XU Ling, YAO Yin. Estimation of wind farm available inertia considering uncertainty of wind speed distribution and unit Inertia transformation[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(Sup.2): 51-59.

[2] 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.

[3] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, *et al.* Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(6): 1843-1856.

[4] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 1-11.  
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, *et al.* Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(12): 1-11.

[5] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 174-183.  
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, *et al.* Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(10): 174-183.

[6] 邵昊舒,蔡旭. 大型风电机组惯量控制研究现状与展望[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1166-1177.  
SHAO Haoshu, CAI Xu. Research status and prospect of inertia control for large scale wind turbines [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(10): 1166-1177.



- [7] 赵珊珊, 周勤勇, 赵强, 等. 计及频率约束的风电最大接入比例研究[J]. **中国电机工程学报**, 2018, 38(Sup. 1): 24-31.  
ZHAO Shanshan, ZHOU Qinyong, ZHAO Qiang, *et al.* Study on the maximum access ratio of wind power considering frequency constraint[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(Sup. 1): 24-31.
- [8] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. **中国电机工程学报**, 2017, 37(2): 349-360.  
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, *et al.* Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(2): 349-360.
- [9] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F, *et al.* 100% Converter-interfaced generation using virtual synchronous generator control: A case study based on the Irish system[J]. **Electric Power Systems Research**, 2020, 187: 106475.
- [10] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J]. **电网技术**, 2021, 45(5): 1658-1665.  
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, *et al.* Fuzzy adaptive virtual inertia control strategy of wind turbines based on system frequency response interval division[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(5): 1658-1665.
- [11] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. **中国电机工程学报**, 2017, 37(2): 336-349.  
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(2): 336-349.
- [12] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. **电力自动化设备**, 2020, 40(9): 211-222.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2020, 40(9): 211-222.
- [13] 柯贤波, 张文朝, 李朋旺, 等. 高风电渗透率系统的模糊自适应虚拟惯量控制[J]. **电网技术**, 2020, 44(6): 2127-2136.  
KE Xianbo, ZHANG Wenchao, LI Pengwang, *et al.* Fuzzy adaptive virtual inertia control for high wind power penetration system[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(6): 2127-2136.
- [14] 任凯奇, 张东英, 黄越辉, 等. 基于新能源出力比例的大规模系统惯量估计[J]. **电网技术**, 2022, 46(4): 1307-1315.  
REN Kaiqi, ZHANG Dongying, HUANG Yuehui, *et al.* Large-scale system inertia estimation based on new energy output ratio[J]. **Power System Technology**, 2022, 46(4): 1307-1315.
- [15] 李美依, 黄文焘, 邵能灵, 等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. **电网技术**, 2020, 44(4): 1525-1533.  
LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, *et al.* Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(4): 1525-1533.
- [16] 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.
- [17] CAI G W, WANG B, YANG D Y, *et al.* Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2019, 34(6): 4291-4299.
- [18] YOU S T, LIU Y, KOU G F, *et al.* Non-invasive identification of inertia distribution change in high renewable systems using distribution level PMU[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(1): 1110-1112.
- [19] 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.
- [20] SCHIFFER J, ARISTIDOU P, ORTEGA R. Online estimation of power system inertia using dynamic regressor extension and mixing[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2019, 34(6): 4993-5001.
- [21] LIU M Y, CHEN J R, MILANO F. On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2021, 36(3): 2693-2701.
- [22] MILANO F, ORTEGA Á. A method for evaluating frequency regulation in an electrical grid-part I: Theory[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2021, 36(1): 183-193.
- [23] ORTEGA Á, MILANO F. A method for evaluating

frequency regulation in an electrical grid-part II: Applications to non-synchronous devices[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2021, 36(1): 194-203.

[24] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F, *et al.* Adaptive virtual synchronous generator considering converter and storage capacity limits[J]. **CSEE Journal of Power & Energy Systems**, 2020, 8(2): 580-590.

[25] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. **中国电机工程学报**, 2016, 36(21): 5724-5731.

CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, *et al.* Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2016, 36(21): 5724-5731.

[26] MILANO F, ORTEGA Á. Frequency divider[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2017, 32(2): 1493-1501.

[27] 韦钢. 电力系统分析基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

WEI Gang. Fundamentals of power system analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[28] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[29] LIU J H, WANG C, BI T S, *et al.* Online estimation of POI-level aggregated inertia considering frequency spatial correlation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2023, 38(4): 3232-3244.

[30] AEMC. System security market frameworks review, final report[R]. Sydney: AEMC, 2017.

[31] MILANO F. Power system scripting [M] // Power system modelling and scripting. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 31-58.

[32] MILANO F. A python-based software tool for power system analysis[C]// **2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. Vancouver, Canada: IEEE, 2013: 1-5.

[33] MILANO F, ZÁRATE-MINANO R. A systematic method to model power systems as stochastic differential algebraic equations[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013, 28(4): 4537-4544.

(本文编辑:王历历)