

计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估

蒋小亮¹, 李元臣², 郝元钊¹, 司瑞华¹, 李甜甜¹, 文云峰²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 湖南大学电气工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:随着新能源规模化并网,并通过虚拟同步机(VSG)参与系统调频,虚拟惯量成为系统惯量的重要组成部分。为此,提出一种计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估方法。首先,建立新能源VSG等效虚拟惯量和同步发电机转动惯量统一惯量解析模型;其次,采用受控自回归模型进行动态建模,将惯量求解问题转化为模型中参数辨识问题,进而利用有功-频率时间序列数据,采用自适应递推最小二乘法求解模型中的待辨识参数,引入自适应遗忘因子并对其进行动态调整,实现不同工况下系统等效惯量的连续追踪;最后,在IEEE 39节点系统上进行仿真分析,实验结果验证理论分析的正确性与辨识方法的有效性。

关键词:虚拟惯量;惯量评估;参数辨识;自适应遗忘因子

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.018 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2023)04-0169-08

Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia

JIANG Xiaoliang¹, LI Yuanchen², HAO Yuanzhao¹, SI Ruihua¹, LI Tiantian¹, WEN Yunfeng²

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the large-scale grid connection of new energy and participating in system frequency modulation through virtual synchronous generator (VSG), virtual inertia has become an important component of system inertia. Therefore, an equivalent inertia evaluation method of power system considering the virtual inertia of new energy is proposed. Firstly, a unified analytical model of new energy VSG equivalent virtual inertia and synchronous generator moment of inertia is established. Secondly, the controlled autoregressive model is used for dynamic modeling and the problem of inertia solution is transformed into the problem of parameter identification in the model. Then, using the active power frequency time series data, the parameters to be identified in the model are solved by adopting the adaptive recursive least square algorithm. The adaptive forgetting factor is introduced and dynamically adjusted to realize the continuous tracking of the system equivalent inertia under different working conditions. Finally, the simulation analysis is carried out on the IEEE-39 bus system. The experimental results verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the identification method.

Key words: virtual inertia; inertia evaluation; parameter identification; adaptive forgetting factor

在“碳达峰,碳中和”目标的指引下,中国电力系统正逐步向低碳化、清洁化和可持续化转型,新

能源逐步成为满足电力增长需求的主导电源^[1]。然而,基于电力电子换流器并网的新能源一般运行于

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(52077066); 国网河南省电力公司科技项目(5217L0210005)

通信作者: 李元臣(1996—),男,硕士研究生,主要从事高比例新能源电力系统惯量评估研究; E-mail: ycli_0903@163.com

最大功率追踪状态,其传输功率与电网频率解耦,呈现出无惯性或弱惯性特征,严重恶化了系统抗扰能力,给电网运行和控制带来巨大挑战^[2-3]。

针对新能源大规模并网造成的惯量缺失问题,有学者提出虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略。虚拟同步机通过设计并网逆变器控制算法,在控制系统中引入惯量和阻尼,可使含有变流器的新能源具备与传统机组类似的惯性、有功调频等运行外特性^[4-5]。在此背景下,研究新能源电厂等效虚拟惯量估计方法,可以实时定量掌握新能源对电网的惯量贡献,更为精确的评估得出电网整体惯量水平。

目前,电力系统惯量评估方法的主要研究对象为以同步机为主导的传统电力系统。文献[6]通过频率事件发生瞬间源荷功率偏差与电网频率变化率之比粗略的获得系统等效惯量;文献[7]建立机电振荡特征参数与同步机惯量之间的数学解析表达式,从机电扰动波信号中提取系统等值惯量;文献[8]通过建立区域等值频率响应模型,利用有功一频率类噪声扰动信息,实现同步发电机主导电力系统等效惯量的连续估计。随着新能源规模化开发利用,并通过VSG为电网提供惯量支撑,虚拟惯量成为系统惯量的重要组成部分。文献[9]通过构建风电场可用惯量与惯量功率增量间的关系模型,提出一种考虑风机风速分布的风电场可用惯量的概率化评估方法;文献[10]通过分析扰动初特定时间段内频率变化与光伏发电系统惯量响应间的线性关系,实现光伏发电系统等效惯量的评估;文献[11]对储能系统进行甩负荷试验,根据甩负荷后变流器输出频率变化率,计算得到VSG控制下储能变流器等效虚拟惯量。上述研究在新能源等效虚拟惯量评估方面进行了有益尝试,但适用于大规模新能源并网下系统级惯量评估方法仍需深入研究。

为实现计及新能源虚拟惯量的电力系统整体惯量水平的评估,本文提出一种基于自适应递推最小二乘的惯量评估方法。首先,利用同步发电机二阶模型刻画VSG有功控制模块的动态过程,建立解析新能源虚拟惯量和同步机转动惯量的统一模型;其次,构建受控自回归模型描述扰动后发电机的有

功一频率动态过程,将惯量求解问题转化为模型中参数辨识问题。然后,引入自适应遗忘因子,采用自适应递推最小二乘辨识方法,求解模型中的未知参数,进而计算得到全网等效惯量大小。最后,通过仿真计算验证所提方法的有效性和准确性。

1 同步发电机及VSG惯量解析模型

当新能源机组采用VSG控制后,其并网逆变器控制系统一般包含功率外环、电容电压及电感电流内环^[12-13]。典型的新能源并网结构及其VSG有功控制原理如图1所示,VSG控制策略通过空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)使新能源具有频率响应能力。

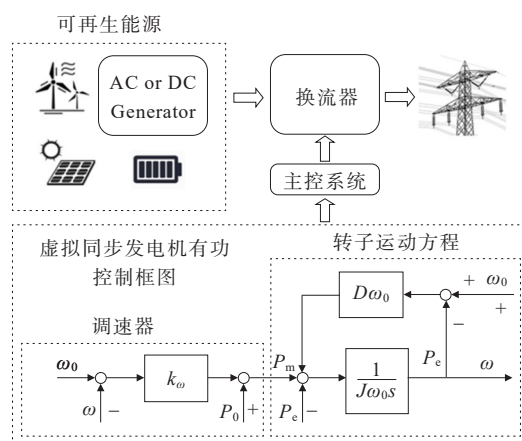


图1 新能源并网示意图和VSG有功控制模块

Figure 1 New energy grid connection diagram and VSG active power control module

本文采用同步发电机经典二阶模型对VSG有功控制模块进行建模。设极对数为1,考虑阻尼效应的转子运动方程如下:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D\omega(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中, J 为转动惯量; ω_0 为额定频率; D 为阻尼系数; P_e 为电磁功率; P_m 为机械功率,由原动机调节方程构成的VSG自适应频率调节器(adaptive frequency controller, AFC)确定,其计算式为

$$P_m = k_\omega(\omega_0 - \omega) + P_0 \quad (2)$$

式中, k_ω 为功率调节系数; P_0 为指定功率。

考虑到一般情况下实际频率 ω 接近额定频率 ω_0 ,即 $\omega \approx \omega_0$ 。将式(2)代入式(1)中,得到新能源

在调速器作用下的VSG有功控制模块的线性运动方程:

$$J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} = P_0 - P_e - (D\omega_0 + k_\omega)(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

将式(3)除以额定功率 S_n 进行归一化处理,得到其标么化形式:

$$\frac{J\omega_0^2}{S_n} \frac{d\omega^*}{dt} = P_{0^*} - P_{e^*} - \frac{(D\omega_0 + k_\omega)}{S_n} (\omega^* - 1) \quad (4)$$

对于同步发电机而言,惯性常数 H 数值上等于发电机以同步转速旋转时单位容量所具有的动能。同样地,可将VSG的等效虚拟惯性常数定义为

$$H_{\text{eqv}} = \frac{J\omega_0^2}{2S_n} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并进行拉普拉斯变换,可得到描述VSG的有功—频率特性的传递函数:

$$G_{\text{eqv}}(s) = \frac{\Delta\omega^*(s)}{\Delta P_{\text{PCC}^*}(s)} = -\frac{1}{2H_{\text{eqv}}s + \frac{D\omega_0 + k_\omega}{S_n}} \quad (6)$$

式中, $\Delta\omega^*(s)$ 为频域形式的频率偏差; $\Delta P_{\text{PCC}^*}(s)$ 为频域形式的公共连接点(point of common coupling, PCC)总功率增量。

根据初值定理,当 $t \rightarrow 0$ 时, $s \rightarrow \infty$,传递函数的冲激响应值为

$$-\frac{sG_{\text{eqv}}(s)|_{s \rightarrow \infty}}{\frac{1}{2H_{\text{eqv}} + (\frac{D\omega_0}{s} + \frac{k_\omega}{s}) \frac{1}{S_n}}} = -\frac{1}{2H_{\text{eqv}}} \quad (7)$$

由式(7)可知,扰动下新能源VSG的等效虚拟惯量 H_{eqv} 可通过求解模型式(6)的初始冲激响应来得到。

同理分析可得,对于同步发电机而言,其有功—频率调整过程的动态行为可表示为

$$G_{\text{syn}}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P(s)} = -\frac{1}{2H_{\text{syn}}s + D} \quad (8)$$

式中, $\Delta\omega(s)$ 为频率偏差频域; $\Delta P(s)$ 为功率偏差频域; D 为阻尼系数; H_{syn} 为同步发电机的惯性常数。

式(8)表明了同步发电机的惯性常数也可通过其传递函数模型初始时刻的冲激响应来求解得到,且形式上与式(7)相似。由此,建立起解析新能源等效虚拟惯量和同步发电机转动惯量的统一模型。

2 计及新能源VSG的系统等效惯量评估

电力系统的整体惯量水平可以采用等效惯量常数^[8]表示:

$$H_{\text{sys}} = \frac{H_1 S_1 + H_2 S_2 + \dots + H_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (9)$$

式中, H_{sys} 为全网等效惯量估计值; H_1, H_2, \dots, H_n 为第1, 2, \dots, n 个发电机惯量估计值; S_1, S_2, \dots, S_n 为第1, 2, \dots, n 个发电机的在线容量。

由式(9)可知,已知全网同步发电机的转动惯量和新能源VSG的虚拟惯量,可获得电力系统的等效惯量。按此思路,若能寻得适宜的辨识方法求解式(6)~(8),则可评估得到含新能源VSG的系统等效惯量。

2.1 输出误差自回归辨识模型

一个系统过程的输入/输出数据能够反映该过程的动态特性^[14]。本文将同步发电机(synchronous generator, SG)与VSG控制并网逆变器输出的有功功率变化量 ΔP 作为输入,其所连母线的频率变化量 Δf 作为输出,构建输入/输出辨识模型;采用预处理后的信号进行模型辨识,从中提取一阶等效模型,进而得到各发电机等效惯量。为实现新能源电力系统等效惯量的快速追踪,采用受控自回归模型(controlled autoregressive model, CAR model)捕捉发电机有功—频率动态响应过程中的主要动力学特征。CAR模型具有待估计参数少、拟合度高的优势,其数学表示如下:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + v(t) \quad (10)$$

式中, $u(t)$ 为模型输入序列,即发电机输出有功功率变化量; $y(t)$ 为模型输出序列,即发电机所连母线频率变化量; $v(t)$ 为零均值随机白噪声序列; z^{-1} 为单位后移算子, $z^{-1}y(t) = y(t-1)$ 。 $A(z), B(z)$ 为算子 z^{-1} 的常数时不变多项式,定义如下:

$$\begin{cases} A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \end{cases} \quad (11)$$

式中,多项式系数 a_n, b_n 为模型中的未知参数, n_a, n_b 分别为 $A(z), B(z)$ 的阶次。

式(10)中 $B(z)/A(z)$ 是模型的确定性部分,反映了系统内在的固有特性,可将其作为描述发电机有功—频率特性的离散传递函数:

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \dots + a_n z^{-n}} \quad (12)$$

采用欧拉变换将传递函数式(12)从离散形式转化为连续形式。欧拉变换描述 Z 变换算子 z 与拉普拉斯变换算子 s 间关系为

$$z = e^{Ts} \approx 1 + Ts \quad (13)$$

式中, T 为采样周期。

转换后的连续传递函数一般形式为

$$G(s) = G(z) \Big|_{z=1+Ts} = \frac{b_{n-1} s^{n-1} + b_{n-2} s^{n-2} \dots + b_1 s^1 + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} \dots + a_1 s^1 + a_0} \quad (14)$$

式中, $b_{n-1}, \dots, b_1, b_0, a_n, \dots, a_1, a_0$ 为连续传递函数模型中的待定系数。

2.2 自适应递推最小二乘辨识方法

为了评估得出系统等效惯量,首先需要选取合适的辨识算法来求解上述CAR模型中的待定系数。传统递推最小二乘(recursive least squares, RLS)算法在计算过程中将所有数据同等对待,随着迭代次数的增加,会出现数据饱和现象,降低算法的收敛性和稳定性^[15]。为提高新数据对误差参数估计值的修正能力,本文在RLS算法的基础上引入自适应遗忘因子,改善算法的跟踪性能,快速追踪非平稳信号的局部趋势^[16]。构造带遗忘因子的准则函数为

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^t \lambda_i [y(i) - \varphi^T(i)\theta]^2 \quad (15)$$

式中, λ_i 为遗忘因子,表示 i 时刻预测误差的权值,是小于1的正实数; $\varphi(t) := [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_b)]^T$ 为系统模型的信息向量; $\theta := [a_1 a_2 \dots a_n b_1 b_2 \dots b_n]^T$ 为系统模型的参数向量。

为使 $J(\theta)$ 最小化,求式(15)一阶导数并令其等于0,并校验其二阶导数大于0,此时可求得 θ 的估计值:

$$\hat{\theta}(t) = \left[\sum_{i=1}^t \lambda_i \varphi(i) \varphi^T(i) \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^t \lambda_i \varphi(i) y(i) \right] \quad (16)$$

引入遗忘因子后CAR模型辨识的迭代计算公式为

$$\begin{cases} \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t) [y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \\ L(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda_t + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \\ P(t) = \frac{1}{\lambda_t} [I - L(t)\varphi^T(t)]P(t-1) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $L(t)$ 为增益矩阵; $P(t)$ 为协方差矩阵; λ 为遗忘因子,一般根据算法的跟踪性能和对噪声的鲁棒性确定 λ 值。

为提高算法的综合性能,引入评价函数 J 和评价函数的变化率 ΔJ ,设计模糊控制器^[17]对遗忘因子进行动态调整。第 k 时刻 $J, \Delta J$ 的计算如下:

$$\begin{cases} J(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=k-n}^k |y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)| \\ \Delta J(k) = \frac{1}{m} (J(k) - J(k-m)) \end{cases} \quad (18)$$

式中, n 为选取残差的数量; m 为计算变化率的时间常数的离散值。

基于模糊控制的自适应递推最小二乘算法(adaptive recursive least square, ARLS)的原理如图2所示。在每个修正周期内,预处理部分根据式(18)计算得到 $J, \Delta J$,并将其输入到模糊控制器中计算得到修正值 $\Delta\lambda$,实现对遗忘因子的动态调整。进一步地,采用ARLS算法实现对待定参数向量 θ 的快速求解。

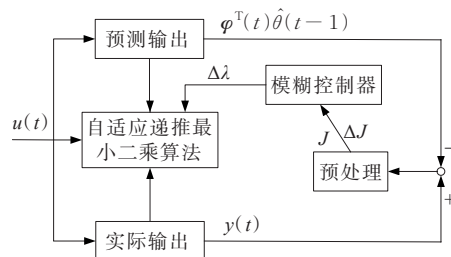


图2 基于模糊控制的自适应递推最小二乘算法
Figure 2 Adaptive recursive least squares algorithm based on fuzzy control

2.3 系统等效惯量估计流程

基于自适应递推最小二乘的系统等效惯量估计流程如图3所示,具体描述如下。

1) 数据量测与预处理。获取PMU实时采集得

到的同步发电机和 VSG 控制并网逆变器输出有功功率,及其所连母线的频率;分别基于机组额定容量和系统额定频率对量测数据进行归一化处理并去除信号均值,形成标准形式的数据集。

2) 构建受控自回归模型。利用式(10)构建 CAR 模型,描述小信号扰动时发电机有功-频率响应过程,并将其改写为传递函数形式,解析模型参数与惯量大小之间的耦合关系,从而将惯量估计问题转化为模型中参数辨识问题。

3) 自适应递推最小二乘求解。利用步骤 1) 预处理得到的标准形式数据,采用 ARLS 算法求解 CAR 模型中的待辨识参数。在每个修正周期内,根据式(18)利用实际输出与预测输出之间的残差,计算得到评价函数以及评价函数的变化率,进而设计模糊控制器对遗忘因子 λ 进行在线修正;在每个采样周期内,利用式(17)迭代计算增益矩阵和协方差矩阵,并通过式(16)快速更新未知参数的辨识结果;直到计算结束,得到最优参数向量 $\hat{\theta}$ 。

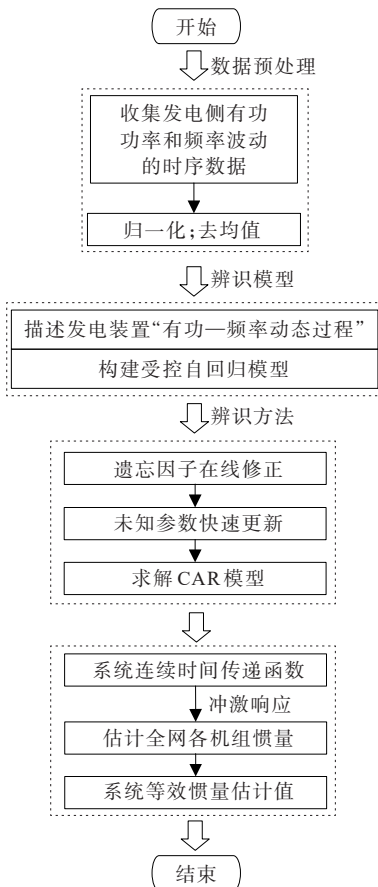


图 3 系统等效惯量估计流程

Figure 3 System equivalent inertia estimation process

4) 系统惯量评估。将最优参数向量回代到 CAR 模型中,基于欧拉变换将模型转化为连续传递函数形式,求解其初始时刻冲激响应,利用式(6)、(8)得到各发电机等效惯量,在获得各发电机惯量估计值的基础上,基于式(9)聚合得到全网等效惯量,完成一次系统等效惯量评估。

3 算例分析

为了验证本文所提出的新能源电力系统等效惯量评估方法的有效性,通过 PowerFactory 搭建 IEEE 39 节点系统进行仿真分析。该系统拓扑结构如图 4 所示,4、7 号机为风电机组,通过 VSG 控制的逆变器并网。在 VSG 控制器中设置虚拟惯量参数 J ,可以相应地改变风电机组所具有的等效虚拟惯量。

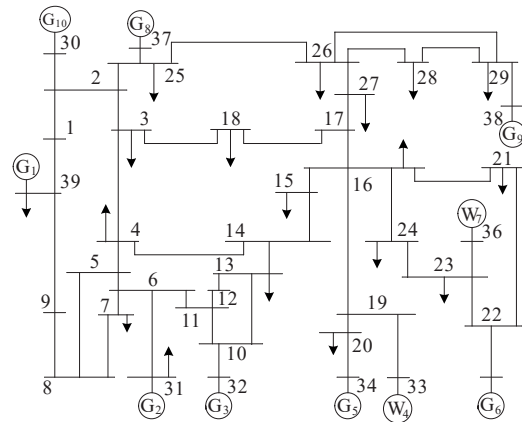


图 4 IEEE 39 节点系统拓扑结构

Figure 4 IEEE 39 node system topology structure

3.1 所提方法的有效性验证

为分析本文所提方法对不同大小的扰动故障的适应性,设置不同故障场景。①大扰动场景设置:第 10 s 时切除母线#20 处负荷,总计 508 MW(约占总负荷 8%);②小扰动场景设置:分别在母线#4、#7、#15、#23、#27 处加入小幅值随机变化负荷,模拟电力系统在正常运行情况下可能遇到的功率波动。各发电机等效惯量估计结果如表 1 所示,在各场景下,基于本文所提方法评估得到的同步发电机惯量值的误差均在 5% 以内,总体估计结果精确度较高,其中,大扰动场景下最大、最小误差分别为 4.53%、0.09%;准稳态场景下最大、最小误差分别为

4.47%、1.11%。2个风电VSG等效惯量在大扰动场景下估计误差分别为5.40%、4.81%；准稳态场景下估计误差分别为7.90%、5.17%，受虚拟惯性控制方法的影响误差略高同步发电机估计误差，但所辨识得到的结果和VSG算法中设置的等效惯量较为接近，证明本文所提方法对评估含新能源VSG的电力系统等效惯量的有效性。

表1 发电机等效惯量估计结果

Table 1 Estimation results of equivalent inertia of generators

编号	实际惯量/s	大扰动场景		准稳态场景	
		估计值/s	误差/%	估计值/s	误差/%
G1	4.25	4.06	4.37	4.20	1.11
G2	3.03	3.07	1.36	3.17	4.47
G3	3.58	3.42	4.53	3.49	2.40
W4	2.86	3.01	5.40	3.09	7.90
G5	2.60	2.60	0.09	2.68	3.13
G6	3.48	3.49	0.15	3.61	3.63
W7	3.45	3.28	4.81	3.63	5.17
G8	4.20	4.16	1.03	4.25	1.24
G9	2.64	2.60	1.52	2.70	2.43
G10	2.43	2.41	0.90	2.51	3.23

可见，基于时序数据，本文所提模型与方法能够有效提取发电机有功—频率动态过程中蕴含的惯量特征，精确估计出各同步发电机的转动惯量以及新能源VSG的虚拟惯量，且对不同大小的扰动具有良好的适应性。

3.2 系统等效惯量连续追踪

受新能源出力及负荷波动等因素的影响，电力系统的整体惯量水平在不同时段可能有所不同。为模拟系统惯量的时变特征，本文设置各发电机等效惯量在最初给定值 $\pm 10\%$ 的范围内随机变化。采用ARLS算法连续辨识求解模型中未知参数，提取发电机组的惯性常数，进而聚合得到系统等效惯量，并与各时段系统实际惯量理论值对比。选取数据窗长度为300 s，共进行10次辨识，每次辨识所需时间为1 s，采用本文方法与RLS算法^[18]对系统等效惯量连续估计结果如表2所示，可知本文方法估计系统等效惯量误差控制在5%以内，平均误差为

4%，最高误差为4.77%，最低误差为2.97%，系统等效惯量估计值与实际值至多相差0.16 s。而RLS算法的平均误差为8.02%，最高误差为10.66%，最低误差为4.77%，系统等效惯量估计值与实际值相差最高达到0.35 s。可见，本文所提方法对系统等效惯量的评估准确度较高。

表2 系统等效惯量连续估计结果

Table 2 Continuous estimation results of system equivalent inertia

时间/s	实际惯量/s	本文方法		RLS	
		估计值/s	误差/%	估计值/s	误差/%
30	3.37	3.21	4.77	3.21	4.77
60	3.29	3.15	4.32	3.08	6.51
90	3.32	3.20	3.42	3.04	8.23
120	3.14	3.02	3.71	2.87	8.51
150	3.21	3.07	4.37	3.00	6.50
180	3.26	3.16	2.97	2.99	8.19
210	3.20	3.06	4.20	2.96	7.35
240	3.32	3.21	3.30	2.96	10.66
270	3.25	3.10	4.56	2.96	9.01
300	3.31	3.17	4.31	2.96	10.52

系统等效惯量连续追踪曲线如图5所示，随着时间的推移，RLS算法辨识得到的系统惯量估计值误差逐渐增大。这是由于历史数据长时间累积，导致RLS算法中新数据的修正作用显得十分微弱，难以反映系统惯量的变化。

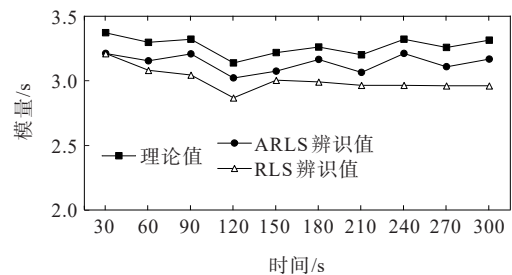


图5 系统等效惯量连续追踪曲线

Figure 5 Continuous tracking curve of system equivalent inertia

对比分析可知，引入自适应遗忘因子的ARLS算法能够有效减少历史数据对当前系统惯量辨识结果的影响，从而很好地解决数据饱和的问题，实

现不同工况下系统等效惯量的自适应辨识与精确追踪。同时,考虑新能源机组所具有的虚拟惯量对整体惯量的贡献,对新型电力系统而言更具参考价值。

4 结语

本文基于受控自回归模型对发电机进行动态建模,进而采用自适应递推最小二乘算法辨识模型中未知参数,求解得到同步机和新能源等效惯量,实现含新能源 VSG 的电力系统等效惯量精确追踪。

1) 利用转子运动方程刻画新能源 VSG,同时引入等效虚拟惯性常数的概念,构建了 SG 及 VSG 的统一惯量解析模型,依据该模型,本文方法能识别出机组的惯性响应特性,以量化分析 SG 的转动惯量和 VSG 的虚拟惯量;

2) 在递推最小二乘算法的基础上引入自适应遗忘因子并对其进行动态调整,能够有效减少历史数据对当前辨识结果的影响,提高算法的跟踪性能,保证系统等效惯量连续辨识的精确性;

3) 所提方法能够有效求解系统整体惯量水平,实现不同工况下系统惯量的连续追踪,有助于增强对系统惯量水平的常态监测能力。

参考文献:

- [1] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL].https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.htm,2020-12-12.
XI Jinping. Building on past achievements and launching a new journey for Global Climate Actions[EB/OL].https://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.htm, 2020-12-12.
- [2] 孟沛彧,向往,潘尔生,等.分址建设直流输电系统拓扑方案与运行特性研究[J].电工技术学报,2022,37(19):4808-4822.
MENG Peiyu, XIANG Wang, PAN Ersheng, et al. Research on topology and operation characteristics of HVDC transmission system based on site-division construction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19):4808-4822.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [4] 和萍,李钊,李从善,等.基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):11-22.
HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):11-22.
- [5] 苏晨,吴在军,窦晓波.基于虚拟同步机的微电网分布式一致性经济控制策略[J].电测与仪表,2022,59(10):45-52.
SU Chen, WU Zaijun, DOU Xiaobo. Distributed consistency economic control strategy for microgrids based on virtual synchronous machines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10):45-52.
- [6] CHASSIN D P, HUANG Z, DONNELLY M K, et al. Estimation of WECC system inertia using observed frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):1190-1192.
- [7] CAI G W, WANG B, YANG D Y. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):4291-4299.
- [8] 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):4430-4439+4723.
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):4430-4439+4723.
- [9] 韩帅,张峰,丁磊,等.基于混合 Copula 函数的风电场可用惯量评估方法[J].电力自动化设备,2021,41(3):189-195+210.
HAN Shuai, ZHANG Feng, DING Lei, et al. Available inertia evaluation method of wind farm based on mixed Copula function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):189-195+210.

- 2021,41(3):189-195+210.
- [10] 李东东,郭天洋,刘庆飞,等.计及光伏发电的新能源电力系统惯量评估[J].太阳能学报,2021,42(5):174-179.
LI Dongdong, GUO Tianyang, LIU Qingfei, et al. Inertia estimation of renewable power system considering photovoltaics[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 174-179.
- [11] 胡安平,杨波,潘鹏鹏,等.基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J].中国电机工程学报,2018,38(17):4999-5008+5297.
HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999-5008+5297.
- [12] 涂丹凤,张代润,范文,等.基于VSG的并网变流器LADRC策略研究[J].电测与仪表,2022,59(7):137-144.
TU Danfeng, ZHANG Dairun, FAN Wen, et al. Research on LADRC strategy of grid-connected converter based on VSG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 137-144.
- [13] 高娟,秦岭,许骥.电力物联网环境下可实现VSG功率环鲁棒解耦的虚拟电感设计[J].供用电,2020,37(1):37-43+56.
GAO Juan, QIN Ling, XU Ji. Virtual inductance design that can realize robust decoupling of VSG power loop in the environment of power Internet of things[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(1): 37-43+56.
- [14] 张喆,杨宏宇,高新亭,等.大数据环境下基于BPNN模型的配电网规划适应性评价方法研究[J].供用电,2021,38(5):56-63+88.
ZHANG Zhe, YANG Hongyu, GAO Xinting, et al. Research on adaptability evaluation method of distribution network planning based on BPNN model in big data environment [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 56-63+88.
- [15] 吴章哈,蔺红.基于MDPSO的永磁直驱风力发电机参数辨识[J].电测与仪表,2021,58(8):83-87.
WU Zhanghan, LIN Hong. Parameter identification of permanent magnet direct drive wind turbine based on mdps0[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 83-87.
- [16] 赵海森,杜中兰,刘晓芳,等.基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5386-5394.
ZHAO Haisen, DU Zhonglan, LIU Xiaofang, et al. An on-line identification method for rotor resistance of squirrel cage induction motors based on recursive least square method and model reference adaptive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5386-5394.
- [17] 杨旭红,郭凯,杨峰峰,等.基于模糊PCI与PR控制的三相LC型并网逆变器控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):20-26.
YANG Xuhong, GUO Kai, YANG Fengfeng, et al. A control strategy of grid-connected inverter with three-phase LC filter based on fuzzy PCI and PR control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 20-26.
- [18] 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 Qin, 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.