基于机电响应特征的电力系统惯量评估方法研究

王 宇，王 博，张 颂

（东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012）

摘要：惯量评估是维持新能源并网的电力系统稳定运行的基础环节，评估结果可有效协助判定系统安全状态，为电力系统惯量优化配置提供指导依据。提出一种数据驱动的区域有效惯量评估方法，解析了频域下机电响应特征与系统惯量的耦合关系，并推导出基于机电响应特征的惯量评估模型。利用随机子空间算法提取机电响应特征，从而计算系统惯量，采用阈值法规避数值奇异问题，具有较好的辨识准确度和实用性。利用 Digsilent 软件提供的时域仿真数据，在单机无穷大系统以及 IEEE4 机 2 区系统验证了所提算法的有效性。

关键词：惯量评估；机电响应特征；随机子空间算法；频域分析

Research on inertia evaluation method for power system based on electromechanical response characteristics

WANG Yu, WANG Bo, ZHANG Song

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Inertia estimation is a fundamental step to maintain the stable operation of the power system with new energy sources connected to the grid. The estimation results can effectively assist in determining the safety status of the system and provide guidance for optimizing the inertia configuration of the power system. This paper proposes a data-driven regional effective inertia estimation method, analyzes the coupling relationship between electromechanical response characteristics in the frequency domain and system inertia, and derives an inertia estimation model based on electromechanical response characteristics. Using the random subspace algorithm to extract electromechanical response characteristics for calculating system inertia, and adopting threshold methods to avoid numerical singular problems, this method has good identification accuracy and practicability. The effectiveness of the proposed algorithm is verified in a single-machine infinite bus system and IEEE 4-machine 2-area system using time-domain simulation data provided by Digsilent software.

Key words: inertia estimation; electromechanical response characteristics; random subspace algorithm; frequency domain analysis

0 引言

能源活动CO_2排放结构中，电力行业碳排放的占比达44%。在国际社会对低碳经济的呼吁日益高涨的背景下，国内外利用清洁能源发电的比例逐年增加。《可再生能源全球状况报告》指出，到2040年，以风电、光伏为代表的新能源

在电力系统中的全球份额预计将进一步上升至45%。系统惯量表现为对功率的抗扰动性[1]，随着大规模新能源接入电力系统，导致惯量水平不断降低，呈现出时变且分布不均的特性[2]，由此引发停电事故[3-5]。惯量评估已成为含有新能源并网的电力系统运行的基础环节，可以协助判定系统安全状态，优化配置惯量支撑资源。因此准确评估系统惯量是重要且富有挑战的。

早期惯量评估方法将系统惯量解析为暂态事故后扰动瞬间功率缺额和频率变化率（RoCoF）的比值[6]。由于量测数据中包含噪声和振荡分量，文献[7-8]分别利用低通滤波器、移动平均滤波器减少测量误差。文献[8]通过改进的去趋势波动分析判断扰动发生时刻。文献[10]通过识别中心惯量以减弱相量测量装置（PMU）分布因素对惯量评估结果的影响。文献[11]分析了影响扰动功率数据的因素并修改了扰动后功率变量的表达式，以提高评估准确率。文献[12]利用一种差值计算规避了扰动功率和发生时刻的判定。

随着广域测量技术的日趋成熟，可以更便利获取发电机电功率、转速等电气变量，通过辨识系统模型的方式评估系统惯量。文献[13-14]分别利用暂态历史数据训练切换马尔可夫高斯模型和人工神经网络模型并进行惯量评估。文献[15]提出一种微扰动法，通过向系统注入小幅低频正弦信号，利用闭环辨识方法在线评估惯量。但该方法不便于评估多区域互联系统的惯性，需要注入额外的探测信号，这增加了实现的复杂性。文献[16-18]利用ARMAX算法、N4SID算法、误差滑动平均辨识系统模型，通过对系统模型的阶跃响应提取惯量。文献[19]分析了模型阶数对辨识结果的影响，提出利用赤池信息准则确定系统最佳阶数，以提高惯量评估准确度。

由于时域量测数据受到噪声、系统机电振荡和其他非线性变量的影响，从而降低可信度，造成计算误差。因此，从频域角度利用机电模态进行惯量评估的方法更具有优势。文献[20]解析了利用Koopman理论分析动态系统特性的可行性。文献[21]实现了基于Koopman理论的惯量评估。在此基础上，文献[22]利用动态模态分解算法评估系统惯量，但含噪数据导致特征根丢失。文献[23]利用随机子空间法提取随机信号的机电特征评估惯量。该方法需要计算电力系统的等效电抗，增加了额外计算负担。

针对上述问题，本文提出了一种基于机电响应特征的惯量评估方法。该方法无须辨识系统模型。文中解析了机电响应特征与系统惯量之间的耦合关系，并推导出惯量评估的数学模型。利用随机子空间算法提取机电特征。分别在单机无穷大系统以及IEEE 4机2区系统进行区域有效惯量评估，以验证所提方法的有效性。

1 机电响应特征与系统惯量耦合关系解析

电力系统中的一个子系统通常等效为一台接在母线上的发电机，其在扰动期间的机电动力学模型可表示为

$$M\Delta\dot{\omega}=\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{e}}-D\Delta\omega \tag{1}$$

式中，M为发电机惯性时间常数；D为发电机阻尼系数；P_{e}为电磁功率；P_{m}为机械功率；ω为发电机转子转速。

由于调速器动作需要时间，难以响应瞬时扰动，因此扰动期间P_{m}可视为常数。对转子运动方程线性化表述为

$$\Delta P_{\mathrm{m}}=0 \quad \Delta P_{\mathrm{e}}=k_{\mathrm{s}}\Delta\delta \quad \Delta\dot{\omega}=\Delta\dot{\delta} \tag{2}$$

式中，k_{s}为同步系数；δ为功角。

将式（2）代入式（1）中可以推导出线性化后的转子运动方程为

$$M\Delta\ddot{\delta}+D\Delta\dot{\delta}+k_{\mathrm{s}}\Delta\delta=0 \tag{3}$$

对于稳定系统而言，式（3）对应的特征方程解为一对共轭复根。根据模态分析理论，特征值实部对应机电振荡响应过程的阻尼比，虚部对应振荡频率，即

$$\lambda_{1,2}=-\alpha\pm\mathrm{j}\beta=-\frac{D}{2M}\pm\mathrm{j}\frac{\sqrt{4Mk_{\mathrm{s}}-D^2}}{2M} \tag{4}$$

由式（4）可见，特征根实部建立了阻尼系数和惯性时间常数的数学关系。利用阻尼比与特征值之间的关系消除式（3）中的D，建立系统

惯量的数学解析表达式为

$$M=-\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\Delta\dot{\omega}_{\mathrm{e}}+2\alpha\Delta\omega_{\mathrm{e}}} \tag{5}$$

式中，ΔP_{e}和$\Delta\omega_{\mathrm{e}}$分别为机电动态响应过程下的电磁功率和转速信号，可通过PMU直接获取。

需要注意的是，为避免评估过程中惯性常数出现负值或不符合实际的数值问题，文献[24]，可通过阈值法使估计惯量在分母为零的时刻保持当前值的简单方式来解决，具体表达式为

$$M^{*}=\begin{cases}-\dfrac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\Delta\dot{\omega}_{\mathrm{e}}+2a\Delta\omega_{\mathrm{e}}}, & \left|\Delta\dot{\omega}_{\mathrm{e}}+2a\Delta\omega_{\mathrm{e}}\right|\geqslant\varepsilon_0\\ M^{*}(t-\Delta t), & \left|\Delta\dot{\omega}_{\mathrm{e}}+2a\Delta\omega_{\mathrm{e}}\right|<\varepsilon_0\end{cases} \tag{6}$$

式中，Δt为采样时间；ε_0为经验正阈值，为避免数值问题，通常根据RoCoF的标准差设定。

2 基于随机子空间算法的机电响应特征提取方法

随机子空间方法以其较高的辨识准确度和易于实现的特点，在电力系统机电响应特征提取领域得到广泛应用。在实际应用中，量测数据在时间上是离散的。在考虑噪声因素前提下，离散采样后系统状态空间方程可表述为

$$\begin{aligned}x_{k+1}&=\boldsymbol{A}x_k+w_i\\ y_k&=\boldsymbol{C}x_k+e_i\end{aligned} \tag{7}$$

式中，x为系统状态量；y为测量得到的输出量；w_i为过程噪声；e_i为观测噪声，且满足$E(w_i)=E(e_i)=0$；$\boldsymbol{A}$为状态矩阵，$\boldsymbol{C}$为输出矩阵。

将表示未来数据的扩展Hankel矩阵块投影到表示过去数据的扩展Hankel矩阵中，即

$$O_i=Y_f/Y_p \tag{8}$$

令$W_1\in R^{li\times li}$和$W_2\in R^{j\times j}$分别为加权矩阵且满足W_1满秩，rank（Y_{P}）= rank（$Y_{\mathrm{P}}\cdot W_2$）。则可对O_i进行奇异值分解为

$$W_1O_iW_2=\begin{pmatrix}U_1 & U_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}S_1 & 0\\ 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}V_1^{\mathrm{T}}\\ V_2^{\mathrm{T}}\end{pmatrix}=U_1S_1V_1^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

根据式（9）可以确认系统的阶数等价于非零奇异值个数。投影矩阵$\boldsymbol{O}$可进一步表述为

$$\boldsymbol{O}_i=\boldsymbol{\Gamma}_i\hat{\boldsymbol{X}}_i \tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{\Gamma}_i$是扩展的可观测矩阵，可表述为$\boldsymbol{\Gamma}_i=W^{-1}{}_1U_1S^{1/2}{}_1\boldsymbol{T}$，$T$是平移矩阵；$\hat{\boldsymbol{X}}_i$是正序时间序列的卡尔曼滤波状态序列矩阵，将卡尔曼滤波状态序列矩阵和输出代入系统的状态方程中，即

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}\\ \boldsymbol{C}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\hat{X}_{i+1}\\ Y_{i,i}\end{bmatrix}(\hat{X}_i)^{\dagger} \tag{11}$$

式中，$(\cdot)^{\dagger}$表示伪逆。

利用式（12）计算连续系统状态矩阵$\boldsymbol{A}_c$，并对其进行特征值分解，即

$$\boldsymbol{A}_c=\frac{\ln A}{\Delta t},\boldsymbol{A}_c=\psi\Lambda\psi^{-1} \tag{12}$$

式中，$\Lambda=\mathrm{diag}(\lambda_i)$，$\lambda_i$为第$i$阶模态特征值。

3 基于机电响应特征的区域有效惯量评估

根据辨识的层级分类，系统惯量评估方法可分为发电机惯量评估、节点惯量评估、区域惯量评估以及整个系统的惯量评估。考虑到新能源电力系统惯量具有时空特性，为体现不同地区的惯量分布，本文对电力系统进行区域有效惯量评估。电力系统区域惯量是指某一区域内所有并网元件提供惯量支撑的叠加，可数学解析为各机组惯量在本区域惯性中心坐标系下的等效。根据扰动后同步机的同调性，可以将电力系统中的各个同步机划分为不同的区域。各个区域的等效机电磁功率由区域间联络线电磁功率累加表示，即

$$P_{\mathrm{eq}}=\sum_{i=1}^{m}P_{\mathrm{e},i} \tag{13}$$

式中，$P_{\mathrm{e},i}$为区域联络线电磁功率；m为与该区域相连的全部联络线。

各区域的等效机转速可由区域中心频率来表示，即

$$\Delta\omega_{\mathrm{eq}}=\frac{\sum_{i}^{N}\chi_i\Delta f_i}{\sum_{i}^{N}\chi_i} \tag{14}$$

式中，Δf_i为区域电网母线频率；χ_i为加权系数，在文中定义为母线频率的方差倒数。

根据前述分析，将量测数据转化为区域等效数据后，利用随机子空间算法，通过数据驱动提取机电响应特征，通过惯量评估模型即可求取区

域有效惯量，本文方法的具体步骤为：

1）采用滑动数据窗方法提取电力系统稳态运行下的联络线功率以及母线频率数据，并转化为该区域的等效机电磁功率和转速信号。

2）提取机电响应特征，利用随机子空间算法提取出机电响应特征。

3）根据前述理论推导的机电响应特征与系统惯量的耦合关系，利用式（6）进行系统区域有效惯量评估。

4 算例分析

本节利用Digsilent软件提供的仿真数据，验证本文方法在单机系统以及IEEE 4机2区系统的有效性。本文算例部分$\varepsilon_x=10^{-6}$。按前述惯量评估步骤进行区域有效惯量评估。

4.1 单机无穷大算例系统

单机无穷大系统拓扑结构可视为单个发电机通过变压器和传输线路连接到无穷大母线上，其中待评估的机组惯量在1 000 MW基准功率下为5 s。通过设置0.02 s激发的三相短路故障并持续0.05 s以激发系统机电振荡响应。参照PMU寻常采样频率设置采样间隔为1 ms，时域仿真时长设置为20 s，提取暂态信号数据。量测信号如图1所示。其中图1a为转速信号，图1b为功率信号。

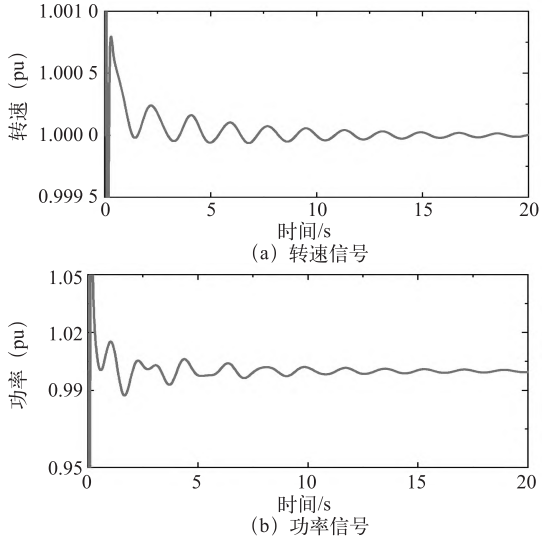

图 1 量测信号

Fig. 1 Measurement signal

利用随机子空间算法提取机电响应特征，辨识结果为－2.272，将辨识结果和量测数据代入到惯量评估模型中，计算结果见表1。并引入误差式（15）来分析评估准确度。

$$E_r=\left|\frac{V_s-V_e}{V_s}\right|\times 100\% \tag{15}$$

由表1可以看出，本文方法与真实值较为接近，最大误差为9.93%，绝对误差为0.5 s，验证了方法的有效性。

表 1 不同时刻惯量评估结果

Tab.1 Inertia estimation results at different time points

时刻 /s	0.02	0.03	0.04	0.06
估计值 /s	5.29	5.31	5.245	5.28
误差（%）	5.80	6.21	4.93	5.67
误差值 /s	0.29	0.31	0.245	0.28

4.2 IEEE 4机2区系统

IEEE4机2区系统结构如图2所示，设备参数可参考文献[25]，共有4台发电机，其编号为SG1～SG4。其中发电机SG1与发电机SG2同属一个区域，发电机SG3和发电机SG4同属一个区域。将各发电机惯量转化为100 MW基准值下。在母线4处设置0.02 s触发三相接地短路，并持续0.05 s以激发系统机电响应，将各区域量测数据转化为区域等效机的电磁功率和转速信号。

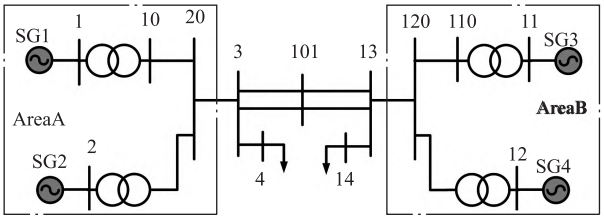

图 2 IEEE 4 机 2 区系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of IEEE 4 machine 2 area system

将本文方法与文献[28]提出的基于瞬时频率变化率的惯量评估方法进行对比。惯量评估结果见表2。根据表2可知，基于瞬时频率变化率的算法评估结果为108.186 s、106.69 s，其最大误差为8.24%，误差值为8.814 s。相比之下本文方法具有更高的准确度，最大误差为5.59%，误差值为5.56 s。由于基于瞬时频率变化率的惯量评估

方法易受量测噪声、机电振荡等的影响而产生误差，因此在频域角度利用机电模态进行惯量评估的方法更具优势。

考虑到不同机电响应特征提取方法对本文方法的影响，选择将文献[26]采用的动态模式分解（Dynamic Mode Decomposition，DMD）算法与本文方法进行对比，计算结果见表2。根据表2可知，本文方法具有较好的计算结果，这是由于本文方法相比于DMD算法使用两倍数据量的Hankel矩阵，利用正交投影可以滤除量测信号中的噪声成分，具有更精准的辨识能力。

表 2　基于不同评估方法的区域惯量评估结果

Tab. 2 The inertia estimation results of different evaluation methods in the area.

区域有效惯量	区域惯量 1	区域惯量 2
真实值 /s	117.9	117.9
本文方法 /s	111.31	114.68
误差（%）	5.59	2.73
瞬时频率变化率法 /s	108.186	106.69
误差（%）	8.24	9.51
DMD/s	112.095	112.71
误差（%）	4.93	4.40

5　结束语

电力系统动态过程中具有丰富的机电响应信息。本文为从频域角度利用机电响应特征提取系统惯量提供了新的思路。文中利用机电响应特征与系统惯量的耦合关系构建惯量评估模型，采用随机子空间算法提取机电响应特征，实现了以数据驱动的方式准确评估系统区域有效惯量。利用Digsilent平台仿真数据对区域有效惯量进行了准确评估。

根据算例分析结果，本文方法在单机无穷大系统和IEEE 4机2区系统具有较好的辨识结果，验证了其有效性。与基于瞬时频率变化率的评估方法和DMD算法相比具有更好的计算结果。如何利用本文方法进行随机动态响应下的惯量评估将是未来研究重点。

参考文献

[1] 张武其，文云峰，迟方德．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．

[2] 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)：930-941．

[3] 李兆伟，吴雪莲，庄侃沁．“9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]．电力系统自动化，2017，41(7)：149-155．

[4] 李世春，薛臻瑶，申骜，等．常态下风电场并网惯量削弱量估计方法[J/OL]．电力系统及其自动化学报[2023-04-12]．https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001188．

[5] 李东东，刘强，徐波，等．考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]．电力系统保护与控制，2021，49(22)：24-33．

[6] KERDPHOL T，WATANABE M，NISHIKAWA R．Determining inertia of 60 hz japan power system using PMUs from power loss event[C]．2021 IEEE Texas Power and Energy Conference，USA，2021：1-5．

[7] LUGNANI L，DOTTA D，FERREIRA J M F，Frequency response estimation following large disturbances using synchrophasors[C]．IEEE Power Energy Soc.Gen.Meet.Augus 1，USA：1–5．

[8] 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．

[9] ASHTON P M，TAYLOR G A，CARTER A M，Application of phasor measurement units to estimate power system inertial frequency response[C]．IEEE Power Energy Soc．Gen．Meet，2013．

[10] Lara-Jimenez JD，Ramirez JM，F Mancilla-David．Allocation of PMUs for power system-wide inertial frequency response estimation[J]．IET Gener. Transm.Distrib，2017，11 (11)：2902–2911．

[11] Negar Shams，Peter Wall，Vladimir Terzija，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.

[12] 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.

[13] CAO X，STEPHEN B，ABDULHADI I F，et al．Switching markov gaussian models for dynamic power system inertia estimation[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(5)：3394-3403.

[14] SCHMITT A，LEE B．Steady-state inertia estimation using a neural network approach with modal information[M]．IEEE Power & Energy Society General Meeting，2017：1-5.

[15] ZHANG J，XU H．Online identification of power system equivalent inertia constant[J]．IEEE Transactions Ind．Electron，2017，64 (10)：8098–8107.

[16] TUTTELBERG K，KILTER J，WILSON D．Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2018，33(6)：7249-7257.

[17] HANG Junbo，XU Hanchen．Online identification of power system equivalent inertia constant[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2017，64(10)：8098–8107.

[18] 李元臣，文云峰，叶希．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.

[19] 徐波，章林炜，俞向栋，等．基于系统辨识的电力系统惯量在线评估改进方法[J]．电力系统保护与控制，2021，49(18)：62-69.

[20] SUSUKI Y，MEZIC I．Nonlinear koopman modes and coherency identification of coupled swing dynamics[J]．in IEEE Transactions.

[21] SUSUKI Y，HAMASAKI R，ISHIGAME A．Estimation of power system inertia using nonlinear koopman modes[M]．2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)，2018：1-5.

[22] 杨德友，邵致远，王博．基于动态模式分解的发电机惯量及阻尼系数评估方法[J]．电网技术，2022(1)：46.

[23] 陈志杰，杨德友，赵芳琦．随机数据驱动下的两区域系统惯量估计[J]．东北电力大学学报，2020，40(4)：7.

[24] LIU M，CHEN J，MILANO F．On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(3)：2693-2701.

[25] KUNDUR P．Power system stability and control [M]．McGraw-Hill，Inc，1994.

[26] KERDPHOL T，WATANABE M，NISHIKAWA R，Determining inertia of 60 hz japan power system using PMUs from power loss event[C]．2021 IEEE Texas Power and Energy Conference，2021：1-5.

作者简介

王宇（1996—），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统稳定与控制。

（收稿日期：2023-04-18）