基于主导振荡模式特征提取的构网型储能惯量估计方法研究

周新博[1]，史一明[2]

（1. 东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012；
2. 国网河北省电力有限公司保定供电公司分公司，河北 保定 071000）

摘要：相比于跟网型变流器，构网型变流器因其具有发电机特性的优点被广泛应用。在新能源占比不断增加和传统发电机被不断替代的背景下，系统的惯量水平不断降低，因此精确估计系统的惯量可为保障新型电力系统稳定运行提供重要依据。在构网型储能基础上，提出了一种基于小扰动响应的惯量估计方法。基于构网型控制详细模型，通过对各个控制环节部分进行时域下的分析，构建了适用于机电尺度下的惯量响应模型。基于构网型储能控制的小信号模型在小扰动下的机电振荡响应特性，不仅可以推导出其惯量的解析表达式，还可以有效避免惯量估计意义不充分的情况。通过变模态分解（VMD）技术进行主要振荡模式提取，为估计多机系统的惯量提供依据。利用所提方法对 IEEE 3 机系统和四机两区系统进行仿真验证，结果证明了其有效性。

关键词：构网型储能；惯量估计；机电响应；模态提取

The research on the grid-forming energy storage inertia estimation method based on dominant oscillation mode feature extraction

ZHOU Xinbo[1], SHI Yiming[2]

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding Power Supply Company Branch, Baoding 071000, China)

Abstract: Compared to grid-following converters, grid-forming converters are widely used due to their voltage source characteristics. With the increasing share of renewable energy and the gradual replacement of traditional generators, the system's inertia level is continuously decreasing. Accurately estimating system inertia is crucial for ensuring stable new power system operation. This paper proposes an inertia estimation method based on small disturbance response using grid-forming energy storage systems. By analyzing the detailed model of grid-forming control and examining each control loop in the time domain, an inertia response model suitable for the electromechanical scale is developed. Based on the small-signal model of grid-forming energy storage control, the electromechanical oscillation response characteristics under small disturbances can not only derive an analytical expression of inertia but also effectively avoid scenarios where inertia estimation lacks practical significance. The proposed method uses the variational mode decomposition technique to extract the primary oscillation modes, providing a foundation for multi-machine system inertia estimation. The effectiveness of the proposed method is validated through simulations on the IEEE 3-machine system, demonstrating its accuracy and reliability.

Keywords: grid-forming energy storage; inertia estimation; electromechanical response; modal extraction

0 引言

在“双碳”背景下，随着新型电力系统不断发展，电力电子元件不断接入电力系统，其惯量水平不断降低，惯量分布不均匀的现象更加明显[1]。惯量是电力系统的固有属性，也是衡量系统稳定运行的重要参数，电力电子接入的新能源发电设备通常呈现弱惯量和零惯量，一般控制策略下，无法为电力系统提供惯量支撑，新能源发电设备的接入会影响系统频率稳定[2]。因此，准确得到电力系统的惯量信息意义重大。

惯量估计的方法通常分为两类：一是基于模型的惯量估计方法；二是基于量测数据的惯量估计方法[3]。基于模型的惯量估计方法的准确性取决于所使用模型的精度，然而电力系统参数具有不确定性，因此主要研究方法采用基于量测数据的惯量估计方法。

早期的惯量估计方法侧重于以同步发电机为主的电力系统，文献[4]基于同步发电机的多机系统，在系统中施加扰动，通过对扰动量ΔP与频率变化率（Rate of Change of Frequency，RoCoF）进行分析得到系统的等效惯量。随着基于相量测量单元（Phasor Measurement Unit，PMU）的广域测量技术不断发展，可以更加方便地获得系统中的电气参数，并为系统辨识的方法进行惯量估计提供数据支撑。

然而，基于RoCoF的惯量估计计算精度会受到污染的频率数据影响，导致其计算不准确。文献[5]通过对频率信号进行多项式拟合和滤波的方法来提取频率信号并平滑处理。文献[6]提出用滑动平均滤波器过滤噪声。随着数据驱动技术的不断发展，文献[7]基于功率和惯量的关系构建了一种惯量辨识模型，并提出一种最小二乘法的惯量估计方法。

随着新能源风电、光伏等可再生能源不断并入电网，构网型储能不断增加，因此有必要对含高比例新能源的电力系统进行惯量估计。目前较为流行的技术是大扰动数据的估计方法，基于PMU量测技术对扰动后的功率和频率进行分析计算。在此基础上，文献[8]基于输出误差滑动平均模型，构建惯量空间分布估计模型，并通过多信息辨识求解模型未知量，从而进行系统惯量的分析计算，但该方法过于依赖数据的准确性。文献[9]从能量的角度出发，提出了一种基于中心频率二次方差的新能源系统等效惯量估计方法。文献[10]推导了含新能源接入的风电场等效虚拟惯量表达式，但基于模型方法的准确性较差。近年来，人工智能与模型分析方法共同用于提高电力系统准确性。文献[11]利用受控自回归模型以及含有遗忘因子的递推最小二乘算法，对含虚拟惯性响应的风电场等效惯量进行估计。文献[12]提出一种基于神经网络预测工具和数据驱动方法的等效惯量预测模型。文献[13]通过机器学习对系统的功率和惯量进行预测。

随着神经网络等数据驱动方法不断发展，文献[14]提出对每个区域的惯量进行估计的方法，基于扰动后各区域内的有功缺额和对应区域加权平均频率偏差之间的动态耦合关系，通过建立系统辨识构建自回归滑动平均模型，进而加权计算得到系统惯量，该模型为一阶模型。文献[15]在此基础上提出一种二阶模型，基于扰动的滑动窗口惯量估计方法，通过预测误差法辨识模型参数，并采用梯度优化进行求解。

上述方法惯量估计的准确性非常依赖系统的量测数据，因此量测数据的有效性对惯量估计有非常大的影响。通过量测得到的量测数据可能会受到一些干扰，如随机误差、机电振荡和噪声，进而影响数据的有效性，对惯量估计的准确性造成较大的影响。文献[16]提出一种从类噪声数据中提取机电振荡模式的方法，可以对电力系统实现在线惯量估计和对每个区域进行惯量估计。采用滤波可使其精度得到一定的提升，文献[17]分析验证了基于Koopman理论进行系统动态特性分析的可行性，并提出了一种基于Koopman理论的惯量估计方法。文献[18]提出一种鲁棒Koopman滤波器进行惯量估计。文献[19]提出利用滑动离散傅里叶变换进行在线惯量估计的方法。

构网型控制通过模拟发电机运行，使其自身

具有发电机的特性，因此构网型储能换流器具有频率支撑能力，也可改善传统跟网型换流器频率响应问题，并为系统惯量提供支撑。并网运行的构网型储能应作为电力系统的一部分进行惯量估计，由于惯量是机电尺度下的参数，因此通过对构网型控制的各个部分进行详细分析，可以基于时间尺度进行模型的简化，进而可得到机电尺度下的动力学模型。可在此动力学模型的基础上进一步对构网型控制的小信号进行建模，推导出惯量的响应特性，并通过变模态分解（Variational Mode Decomposition，VMD）技术为惯量估计提供依据。最后通过构网型储能接入的IEEE 3机系统验证了该方法的有效性。

1 储能的构网控制模型

1.1 详细模型

图1给出了构网型储能的基本控制框架及其等效电路图。图中，C_1和L_1为滤波电容和滤波电感；Z_x为线路电抗；i_{Labc}、u_{Cabc}为滤波电感的电流和滤波电容的电压；i_{Zabc}为线路电流；Q和Q_{ref}分别为测量无功功率和参考无功功率；P和P_{ref}分别为测量有功功率和参考有功功率；V_{ref}为参考电压；v_{dc}为主流侧电压。

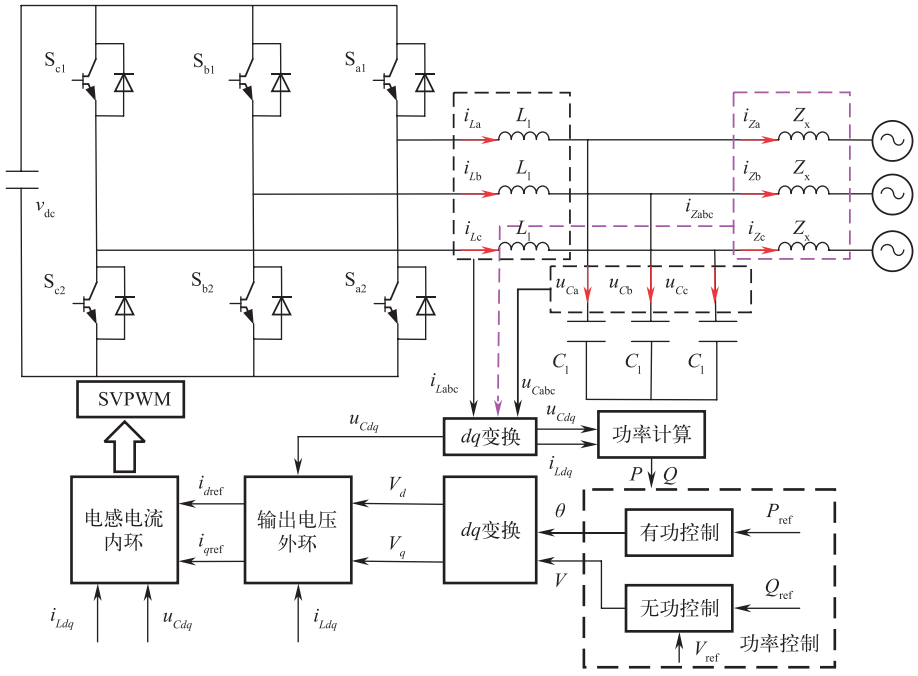

图 1 构网型变流器控制框架

Fig. 1 Control framework for grid type inverter

构网型有功功率控制是一种模拟同步发电机运行的控制方法，它可以对同步发电机的惯量和阻尼特性进行模拟，因此构网型储能具有同步发电机的功能。

由图1可看到完整的控制框图，包括有功控制、无功控制、输出电压外环控制和电感电流内环控制四部分。系统受到扰动时，测量环节测量得到构网型储能出口的电压和电流以及滤波后的电压和电流，并通过dq变换的方式得到直流量信号送入有功控制部分和无功控制部分。其中，有功控制部分经过下垂控制及发电机转子运动方程后得到θ_{ref}，无功控制部分经下垂控制得到电压幅值V。将信号V和θ_{ref}经dq分解后的直流量送入输出电压外环和电感电流内环控制，电感电流内环控制负责电流的控制，并产生SVPWM信号传至变流器。以下对各控制部分进行详细分析。

功率控制包含有功控制和无功控制，其中有功控制包含下垂控制与转子摇摆方程，无功控制包含下垂控制。下垂控制框图如图2所示。图中，P_{ref}、Q_{ref}、P和Q分别为变流器的额定有功功率和无功功率以及计算的有功功率和无功功率；K_p和K_q为下垂系数；ω_c为低通滤波器的截止角频率；ω_{ref}和ω分别为变流器的额定角频率和输出角频率。

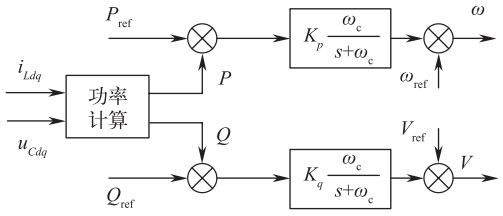

图 2　下垂控制框图

Fig. 2 Droop control diagram

在同步发电机并网运行时，采用调速器的方式维持系统频率在安全的范围内。因此，在构网型储能中为模拟出同步发电机的调频特性，采用下垂控制。为改变逆变器过硬的外特性，进一步加入虚拟惯量和阻尼，即模拟同步发电机的转子运动方程，称构网型控制，控制框图如图3所示。其中，H为惯量，D为阻尼系数，$K_\omega=1/K_p$。

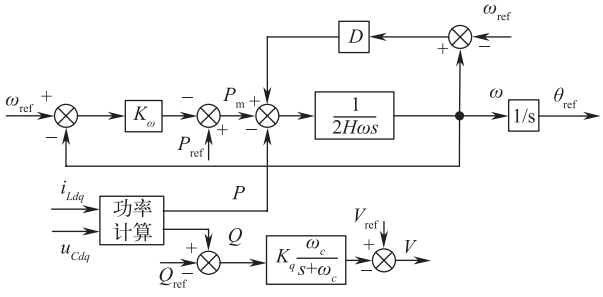

图 3　构网型控制框图

Fig. 3 Grid-forming control diagram

在构网型储能并网运行方式下，其输出电压的幅值和相位可通过变流器的SVPWM进行直接的控制。但这种控制模式可能会使变流器发生过载，进而影响构网型储能的稳定运行，因此可采用输出电压外环和电感电流内环的控制方式，进而提高系统的动态响应。将输出电压外环和电感电流内环的控制通过PI控制器连接起来。输出电压外环的控制框图如图4所示，其中$K_C=\omega C$。

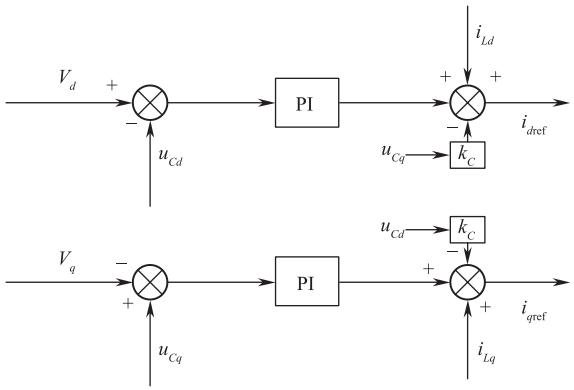

图 4　输出电压外环的控制框图

Fig. 4 Output voltage outer loop control diagram

内环为电感电流内环控制，与输出电压外环控制类似，同样采用PI控制器，可达到信号跟踪控制的目的，实现对参考值i_{dref}和i_{qref}的准确跟踪。电感电流内环的控制框图如图5所示。$K_L=\omega L$，输出信号作用于SVPWM。

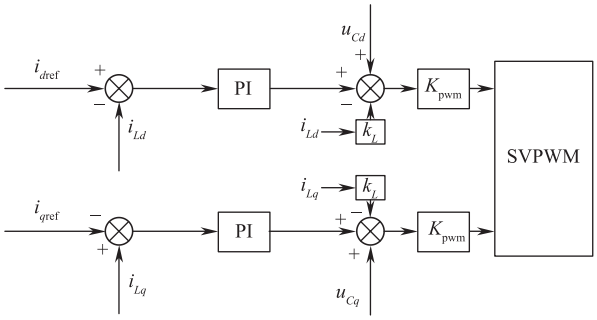

图 5　电感电流内环控制

Fig. 5 Inductive current inner loop control

1.2　惯量响应模型

构网型储能控制具有同步发电机的特性，其工作的原理等同于在变流器的控制部分引入发电机的摇摆方程和电气方程，使变流器具有与同步发电机并网运行相似的惯性和阻尼特性。

$$\begin{cases}\Delta\dot{\omega}=\dfrac{1}{2H}\left(\dfrac{P_m}{\omega}-\dfrac{P_e}{\omega}-D\Delta\omega\right)\\ \dot{\theta}=\omega_{ref}\Delta\omega\end{cases}\tag{1}$$

式中，$\Delta\omega$为转速偏差；θ为构网型储能虚拟转子角；P_m为机械功率；P_e为电磁功率；D为阻尼系数。

有功功率控制部分包含惯性参数，它是机电尺度下的参数。根据图3可得到有功功率控制部分的数学方程为

$$P_{\mathrm{m}}=P_{\mathrm{ref}}+k_{\omega}\left(\omega_{\mathrm{ref}}-\omega\right) \tag{2}$$

由于输出电压外环和电感电流内环控制都采用PI控制，在时间尺度上，控制时间远小于机电时间尺度，因此可将输出电压外环和电感电流内环控制进行简化处理。无功功率的控制取决于控制参数，与PI控制类似，其控制时间也远小于机电时间尺度。因此，基于构网型储能的发电机时域模型可进一步简化。

与传统发电机所提供的惯量类似，在惯量响应期间，系统主要依赖储能系统和变流器的惯性特性来平衡频率的波动，通常通过快速释放或吸收能量来维持系统的稳定，因此可忽略下垂控制部分，将P_{m}=0代入式（1）。惯性响应模型为

$$\begin{cases}\Delta\dot{\omega}=\dfrac{1}{2H}\left(P_{\mathrm{e}}-D\left(\omega-\omega_{\mathrm{ref}}\right)\right)\\ \dot{\theta}=\omega_{\mathrm{ref}}\Delta\omega\end{cases} \tag{3}$$

式中，H为构网型储能的惯量，也是将要估计的参数。

接下来，以式（3）为基础，推导出估计构网型储能惯量的模型。

2 构网型储能的惯量估计

2.1 基于机电响应特征的构网型储能惯量解析

由于形成电网的构网型储能能够参与电网的动态过程，因此当它与电网连接时，将参与电网的机电响应过程，这将导致状态量的变化，即

$$\begin{cases}\Delta\dot{\omega}=-\dfrac{1}{2H}\left(D\Delta\omega+\Delta P_{\mathrm{e}}\right)\\ \Delta\dot{\theta}=\omega_{\mathrm{ref}}\Delta\omega\end{cases} \tag{4}$$

通过对式（4）的运算推导，可得到惯量的表达式为

$$H=-\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}+D\Delta\omega}{2\Delta\dot{\omega}} \tag{5}$$

因此，可以通过对构网型储能进行小信号建模来推导出基于机电特性的构网型储能惯量表达式。基于图1可得到化简的电路图，如图6所示。

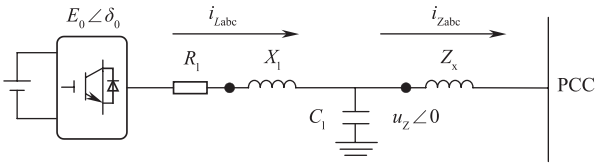

图 6 简化电路图

Fig. 6 Simplified circuit diagram

摇摆方程和功率方程为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}=2H\omega\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}+D(\omega-\omega_{\mathrm{ref}})\\ \theta=\int(\omega-\omega_{\mathrm{ref}})\mathrm{d}t\\ P=\dfrac{E_0u_l}{Z}\cos(\alpha-\delta_0)-\dfrac{u_l^2}{Z}\cos\alpha\end{cases} \tag{6}$$

式中，θ为逆变器的电动势相位，设电网电压相角为0°，因此构网型储能的功角δ_0为0。其中u_z=$E\angle\delta_0$−$I_a(R_1$+j$X_1)$，并对P进行化简可得到

$$P\approx\frac{E_0u_1}{Z}\cos(\frac{\pi}{2}-\delta)=\frac{E_0u_1}{Z}\sin\delta=\frac{E_0u_1}{Z}\delta \tag{7}$$

基于上述可得到有功功率控制环节的闭环传递函数，如图7所示。

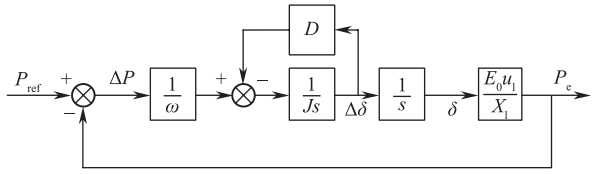

图 7 有功功率控制环节的闭环传递函数

Fig. 7 Closed loop transfer function of active power control loop

传递函数公式为

$$\frac{P}{P_{\mathrm{ref}}}=\frac{Eu_1}{2HX_1\omega_{\mathrm{ref}}+DX_1\omega_{\mathrm{ref}}s+Eu_1}=\frac{\dfrac{Eu_1}{JX_1\omega_{\mathrm{ref}}}}{s^2+\dfrac{D}{2H}s+\dfrac{Eu_1}{2HX_1\omega_{\mathrm{ref}}}} \tag{8}$$

基于式（8），通过对分母进行分析可得到

$$s^2+\frac{D}{2H}s+\frac{Eu_1}{2HX_1\omega_{\mathrm{ref}}}=s^2+2\zeta\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2 \tag{9}$$

由式（9）可得到传递函数特征根为

$$p_{1,2}=-\frac{D}{4H}\pm\sqrt{\left(\frac{D}{4H}\right)^2-\frac{Eu_1}{2HX_1\omega_{\mathrm{ref}}}}=-\zeta\omega_{\mathrm{n}}\pm\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2} \tag{10}$$

由传递函数的特征根可以看到，当构网型储能受到扰动后，其响应的过程是一个振荡过程，通过对特征根的分析可以得到其振荡的固有频率和阻尼比。因此，对于一个振荡的信号可采用三角函数和指数的形式表示，令$\Delta\omega$为

$$\Delta\omega=I_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{-\zeta\omega_{\mathrm{n}}t}\cos\left(\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2}t+\phi_{\omega}\right) \tag{11}$$

式中，$\Delta\omega$为指数函数与三角函数共同作用的结果，因此可通过式中各个参数对信号进行分析；I_{m}为频率振幅；ϕ_{ω}为频率初始相位。

在电力系统中，有功功率与相角有线性的强相关性。因此，ΔP_{e}也可表示为三角函数与指数函数共同作用的结果，即

$$\Delta P_{\mathrm{e}}=I_{\mathrm{g}}\mathrm{e}^{-\zeta\omega_{n}t}\cos\left((\omega_{\mathrm{n}}\sqrt{1-\zeta^2})t+\phi_{\mathrm{g}}\right) \tag{12}$$

基于式（11）和式（12）得到$\Delta\omega$和ΔP_{e}，但对于式（5），由于$\Delta\omega$在分母，因此有必要对$\Delta\omega$的取值进行讨论，如$\Delta\omega$为零时，使式（5）的惯量H的值无意义。$\Delta\omega$由指数函数和三角函数组成，三角函数是周期性函数，因此$\Delta\omega$存在零点；但在指数函数的作用下，$\Delta\omega$在一个周期内的变化趋势由指数函数变化趋势所决定，因此在一个振荡周期内，振荡曲线所围成的面积不为零。进而可以对式（4）两侧同时求取积分，即

$$\int H\mathrm{d}t=\int-\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}+D\Delta\omega}{2\Delta\dot{\omega}}\mathrm{d}t \tag{13}$$

因此，得到了所求惯量与$\Delta\omega$和ΔP_{e}的关系式，但为求解出惯量，需要给出积分的上下限，在数据驱动下可以得到完整的数据及波形，因此可取积分的上限为信号截止的时间τ，即

$$\int_0^{\tau}H\mathrm{d}t=\int_0^{\tau}-\frac{\Delta P_{\mathrm{e}}+D\Delta\omega}{2\Delta\dot{\omega}}\mathrm{d}t \tag{14}$$

进一步化简，并考虑惯量的非负性，得到

$$H=\frac{\left|\int_0^{\tau}\left(\Delta P_{\mathrm{e}}+D\Delta\omega\right)\mathrm{d}t\right|}{2\tau\left|\int_0^{\tau}\Delta\dot{\omega}\mathrm{d}t\right|} \tag{15}$$

2.2 基于主导振荡模式特征提取的惯量估计

推导出基于机电特性的构网型储能惯量表达式后，可以通过PMU来获取功率和转速信号。但在构网型储能接入电力系统且系统受到扰动后，其自身会参与系统的所有振荡模式，获得的信号也可能会受到一定噪声污染。因此，采用VMD技术对主要振荡模式进行提取。

随着信号处理技术和识别技术的发展，基于本征模态函数的迭代算法逐渐成为信号分解的有利工具。在电力系统的机电振荡过程中，由于系统规模和复杂性的影响，通过采样得到的信号大多是不平滑的。文献[20]提出了变模态分解（VMD）算法，通过变分原理将原始信号分解为k个模态$y_k(t)$，其中每个模态的中心频率是不同的，因此每个模态在频域上实现了独立，进而这些信号的成分可以更好地反映信号的频域特性，最后确定模态分量的中心频率和带宽。在不断交替求解的过程中，将每个模态分量$\sigma_k(t)$看作具有一定带宽的IMF分量，可以表示为

$$\begin{cases}y_k(t)=A_k(t)\cos\phi_k(t)\\ \sigma_k(t)=\phi_k^{'}(t)=\dfrac{\mathrm{d}\phi_k(t)}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{16}$$

式中，$A_k(t)$为$y_k(t)$的幅值函数，信号包络非负值，故$A_k(t)>0$；$\phi_k(t)$为非递减相位函数，所以$\phi'_k(t)\geqslant0$。

根据式（16），可通过以下筛选过程获得用于惯量估计的转速和功率IMF振荡分量。

1）构造变分问题，将原始信号$f(t)$分解为K个分量，确定惩罚参数η与上升步长τ，并设置约束条件为所有模态之和与原始信号相等。受约束的变分问题可以表示为

$$\begin{cases}\min\limits_{\{y_k\},\{\sigma_k\}}\left\{\sum\limits_{k=1}^{K}\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\dfrac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)u_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sigma_k t}\right\|_2^2\right\}\\ \mathrm{s.t.}\sum\limits_k y_k=f(t)\end{cases} \tag{17}$$

2）通过引入拉格朗日乘法算子μ，将约束问题转变为非约束问题，采用交替方向乘子法解决变分问题。涉及的拉格朗日增广函数可以表示为

$$L\left(\{y_k\},\{\sigma_k\},\mu\right)=\eta\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)y_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sigma_k t}\right\|_2^2+\left\langle\mu(t),f(t)-\sum_k y_k(t)\right\rangle \tag{18}$$

3）将2）中所求得的鞍点代入式（17），并设置循环过程，在用VMD算法求解过程中，y_k、σ_k、$\mu(\sigma)$的交替迭代寻优的详细过程为

$$\begin{cases}\hat{y}_k^{n+1}(\sigma)\leftarrow\dfrac{\hat{f}(\sigma)-\sum\limits_{i\neq k}\hat{y}_i(\sigma)+\hat{\mu}(\sigma)/2}{1+2\alpha(\sigma-\sigma_k)^2}\\ \sigma_k^{n+1}\leftarrow\dfrac{\int_0^\infty\sigma\left|\hat{y}_k^{n+1}(\sigma)\right|^2\mathrm{d}\sigma}{\int_0^\infty\left|\hat{y}_k^{n+1}(\sigma)\right|\mathrm{d}\sigma}\\ \hat{\mu}^{n+1}\leftarrow\hat{\mu}^n(\sigma)+\gamma(\hat{f}(\sigma)-\sum\limits_k\hat{y}_k^{n+1}(\sigma))\\ \sum\limits_k\left\|y_k^{n+1}-y_k^n\right\|/\left\|y_k^n\right\|_2^2<\varepsilon\end{cases} \tag{19}$$

式中，n为迭代次数；$y_k^{n+1}(\sigma)$为当前剩余分量的维纳滤波；σ_k^{n+1}为当前子模态函数的中心频率值；μ为随机频率；对$\sigma_k(\omega)$进行傅里叶逆变换，其实部即为分解后的子模态分量$y_k(t)$。

其中，VMD算法中参数分解模态数K和惩罚参数η可通过网络结构进行人为设定，但受主观因素影响较大，因此可采用基于灰狼算法的自适应变分模态分解方法。

基于上述步骤，可将故障后得到的转速信号$\Delta\omega$和功率信号ΔP_e的原始信号作为原始信号$y_k(t)$，进行不断迭代求解$\sigma_k(t)$，进而可将转速信号$\Delta\omega$和功率信号ΔP_e的主要模式提取出来，经过上述步骤后，即可对包含多模耦合的功率和速度振荡信号进行解耦，最后代入式（14）进行惯量的估计计算。

3　算例分析

3.1　构网型储能接入IEEE 3机9节点系统

算例分析采用IEEE 3机9节点系统，算例仿真在Digsilent软件进行搭建。具体网络结构如图8所示。在原系统结构上将发电机G3替换为构网型电池储能系统（Battery Energy Storage System，BESS），系统储能由构网型储能、发电机G1和发电机G2三部分构成，三者分别向三个负荷供电，其中发电机G1的惯量H_1=5，发电机G2的惯量H_2=6，构网型储能的惯量H设定为6。

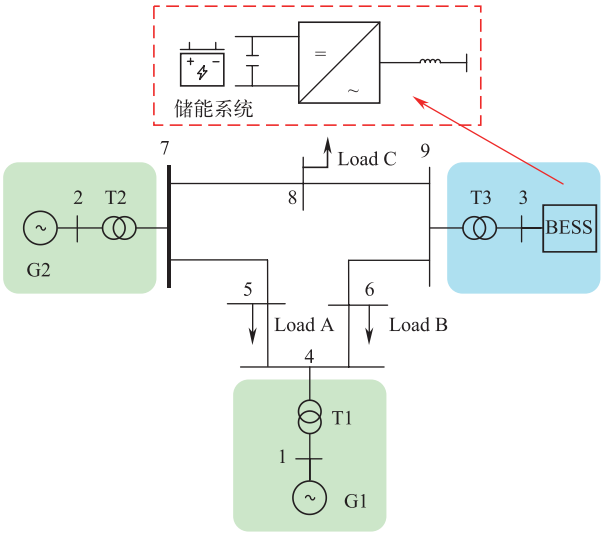

图 8　含构网型储能的 IEEE3 机电力系统

Fig. 8 IEEE 3-machine power system with grid-forming energy storage

为验证所提方法的正确性，在含构网型储能的IEEE 3机电力系统的母线6处，在1 s时加入三相短路故障，0.05 s后短路故障清除。基于上述可以得到构网型储能的功率偏差信号和构网型控制的转速偏差信号，如图9所示。从图9中可以看到，功率信号和转速信号都呈现出衰减的振荡形式。振荡的波形中包含系统的多个机电振荡模式，为更加清晰地得到各个机电振荡模式，对信号进行频谱分析，如图10所示。从图10可以看到，转速信号和功率信号都包含多个振荡模式，其中频率为1.530 27 Hz的模式是主模式，其中阻尼为0.004 77，阻尼比为0.049 4%，振荡周期为0.65。

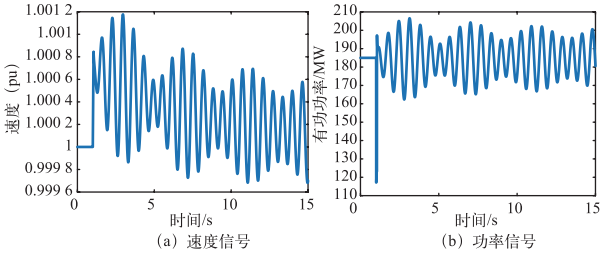

图 9　构网型储能的速度信号和功率信号响应

Fig. 9 Speed and power signal response of grid type energy storage

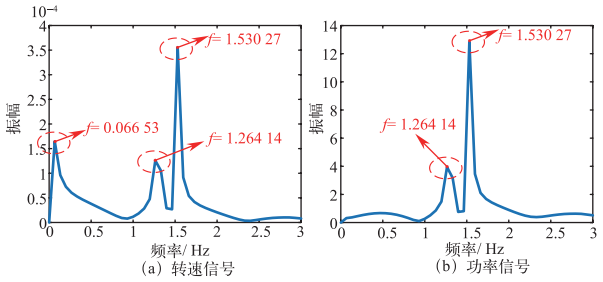

图 10　速度信号和功率信号的频谱

Fig. 10 Frequency spectrum of speed and power signal

利用VMD技术将转速信号和功率信号中的主要振荡模态1.530 27 Hz提取出来，为进行惯量估计提供依据。将提取的主要模态的振荡分量代入式（15），可计算出估计的惯量H_e，并与真实惯量H_r进行对比，结果见表1。相对误差κ为

$$\kappa\% = \frac{|H_r - H_e|}{H_r} \times 100\% \tag{20}$$

表 1　惯量估计结果

Tab. 1 Inertia estimation results

机组	H_r	H_e	κ（%）
构网型 BESS	7.5	6.56	12.53

由表1可知，采用本文所提方法进行惯量估计，所得到的惯量与实际惯量存在一定误差。但相对误差为12.53%，准确度满足要求，因此验证了本文方法的正确性。

为进一步验证本文提出方法的有效性，将发电设备的惯量大小进行更改，再按上述步骤进行惯量估计。发电机G1的惯量H_1=8，发电机G2的惯量H_2=7.5，构网型EES的惯量H=10。基于上述步骤可得到功率信号和转速信号，以及相对应的频谱，如图11和图12所示。

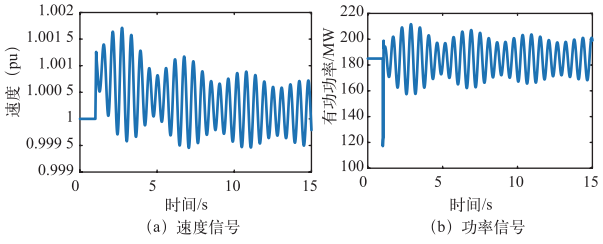

图 11　调整后构网型储能的速度信号和功率信号响应

Fig. 11 Speed and power signal response of the grid type energy storage after adjustment

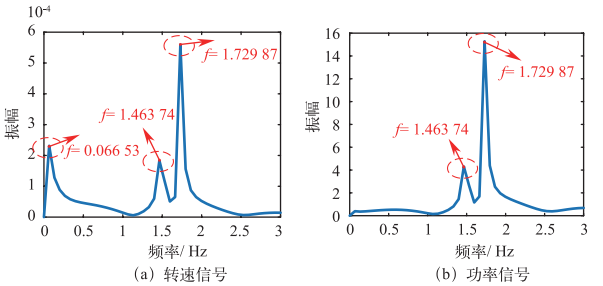

图 12　调整后速度信号和功率信号的频谱

Fig. 12 Frequency spectrum of speed and power signal after adjustment

重复上述步骤，可进行各发电设备惯量改变后的惯量估计，结果见表2。

表 2　惯量估计结果

Tab. 2 Inertia estimation results

机组	H_r	H_e	κ（%）
构网型 BESS	5	4.39	12.2

由表2可知，各发电设备惯量改变后的构网型储能惯量估计的误差为12.2%，虽然存在一定误差，但准确度满足要求，因此进一步验证了本文所提出方法的有效性。

以上均基于一台构网型储能设备，因此，为进一步验证本文提出方法在多个构网型储能的系统中仍具有有效性，在图8的基础上将发电机G2替换为构网型BESS2，如图13所示。重复上述过程，即在母线6加入0.05 s的三相短路故障，

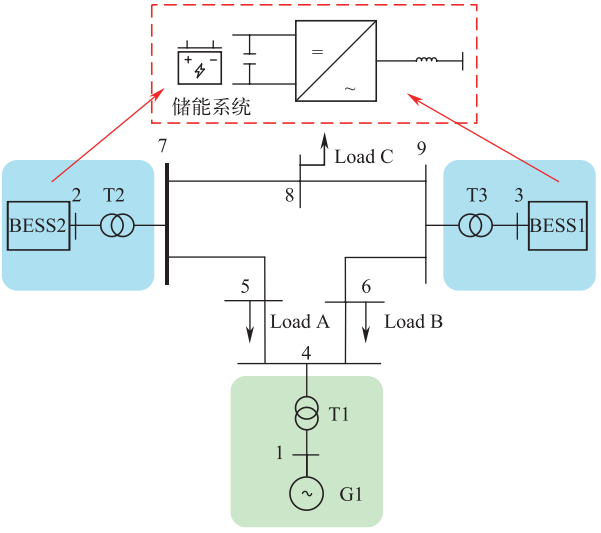

图 13　含两个构网型 BESS 的 IEEE 3 机电系统

Fig. 13 IEEE 3-machine power systerm with two grid type BESS

得到其转速和功率信号的振荡波形，进一步采用VMD技术提取主要振荡模态，最终得到构网型储能的估计惯量，并与真实惯量进行对比并计算得到平均误差，结果见表3。

表 3 惯量估计结果

Tab. 3 Inertia estimation results

机组	H	H_e	κ（%）
构网型 BESS1	6	5.29	11.83
构网型 BESS2	8	6.98	12.75

由表3可知，增加构网型储能的数量，对本文所提方法没有较大的影响，两个构网型储能与一个构网型储能的平均误差相差不大，均在12%左右，验证了本文所提方法在多构网型储能系统中进行惯量估计的有效性。

3.2 构网型储能接入四机两区电力系统

为验证所提方法在多机系统中应用的有效性，采用四机两区电力系统进行验证。如图14所示，在母线7处接入构网型BESS，其中包含G1～G4四台发电机，负荷包含L_1和L_2，无功补偿器C_1和C_2。

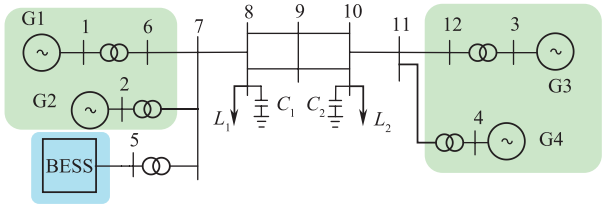

图 14 含构网型储能的四机两区电力系统

Fig. 14 Four machine two zone power system with grid type energy storage

重复上述步骤，在母线9处1 s时加入三相短路扰动，在0.05 s后将故障切除。得到有功功率和转速信号的曲线，再利用VMD技术提取出主要振荡模态，为惯量估计提供依据。其惯量估计结果见表4。

表 4 惯量估计结果

Tab. 4 Inertia estimation results

机组	H_r	H_e	κ（%）
构网型 BESS	7.5	6.512	13.17

由表4可知，在构网型储能接入的四机两区系统中，采用本文所提方法进行惯性估计，与真实值存在一定误差，平均误差为13.17%，其误差大小符合要求。再次验证了本文所提出方法的有效性。

4 结束语

本文提出一种基于构网型储能系统的惯量估计方法。通过对构网型储能的详细控制部分进行分析，进而对机电尺度下的模型进行简化。在简化后的机电尺度下的模型推导出惯量与机电振荡特性的关系，通过VMD的技术方法提取振荡分量来对电力系统的惯量进行评估。通过对构网型储能接入的IEEE 3机系统和四机两区系统进行分析，可知惯量估计和真实惯量的平均误差符合要求，验证了本文所提方法的正确性。

参考文献

[1] WU X L，LI Z W，HUANG X F. System inertia allocation method considering transient frequency safety under multiple concurrent power impacts[J]. Automation of electric Power System，2024，48(12)：68-78.

[2] ARANI Z D，TAHER S A，GHASEMI A，et al. Application of multi-resonator notch frequency control for tracking the frequency in low inertia microgrids under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2017，10(1)：337-349.

[3] TAN B，ZHAO J，NETTO M，et al. Power system inertia estimation：Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2022，134：107362.

[4] 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.

[5] 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, 2014, 30(2): 701-709.

[6] ZOGRAFOS D, GHANDHARI M, PARIDARI K. Estimation of power system inertia using particle swarm optimization[C]. 2017 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). IEEE, 2017: 1-6.

[7] 张磊，熊致知，叶婧，等. 考虑风电不确定性的电力系统惯量评估方法[J]. 电工电能新技术，2023，42(1)：89-96.

[8] 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(8)：89-95.

[9] 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估计[J]. 电网技术，2020，44(8)：2913-2921.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 巴文岚，文云峰，叶希，等. 风电高渗透电网等效惯量概率预测方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(3)：124-130.

[13] KRALJIC D, SOBOCAN B, KATANEC J, et al. Inertia constants for individual power plants[C]. 2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2022: 1-5.

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

[15] LUGNANI L, DOTTA D, LACKNER C, et al. ARMAX-based method for inertial constant estimation of generation units using synchrophasors[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180: 106097.

[16] WANG B, YANG D, CAI G, et al. Online inertia estimation using electromechanical oscillation modal extracted from synchronized ambient data[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 10(1): 241-244.

[17] YANG D Y, SHAO Z Y, WANG B. Evaluation of generator inertia and damping coefficient based on dynamic mode decomposition[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 311-319.

[18] ZHAO J, TANG Y, TERZIJA V. Robust online estimation of power system center of inertia frequency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 821-825.

[19] VANBECELAERE F, DERAMMELAERE S, NEVARANTA N, et al. Online tracking of varying inertia using a SDFT approach[J]. Mechatronics, 2020, 68: 102361.

[20] 符玲，郭颖，李红艳，等. 基于变分模态分解的宽频信号估计算法[J]. 电网技术，2025，49(2)：748-758.

作者简介

周新博（1997—），男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定分析与控制。

（收稿日期：2024-12-31）