

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191598

# 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制

孙立明<sup>1</sup>, 杨博<sup>2</sup>

(1. 广州水沐清华科技有限公司, 广东 广州 510898; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 针对电动汽车(Electric Vehicle, EV)供电端的蓄电池/超导混合储能系统(Battery/SMES Hybrid Energy Storage Systems, BSM-HESS)设计了一种新型非线性鲁棒分数阶控制(Nonlinear Robust Fractional-Order Control, NRFOC), 从而快速精准地跟踪负荷需求变化。首先, 基于规则式策略(Rule-Based Strategy, RBS)实现最优的负荷需求分配。然后, 通过高增益扰动观测器(High-Gain Perturbation Observer, HGPO)对 BSM-HESS 的非线性、参数不确定性和未建模动态聚合而成的扰动进行快速估计, 最终该扰动通过 NRFOC 进行在线完全补偿。此外, NRFOC 不依赖于精确的系统模型, 仅需测量蓄电池电流和直流侧电压两个状态量。通过三种算例进行研究, 即重载条件、轻载条件以及参数不确定性, 仿真结果验证了 NRFOC 的有效性和鲁棒性。

**关键词:** 蓄电池/SMES 超导混合储能系统; 电动汽车; 非线性鲁棒分数阶控制; 高增益扰动观测器

## Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems

SUN Liming<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Shuimutech Co., Ltd., Guangzhou 510898, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** This paper designs a novel Nonlinear Robust Fractional-Order Control (NRFOC) for Battery/Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Hybrid Energy Storage Systems (BSM-HESS) used in Electric Vehicles (EVs). It can track the change of load demand quickly and accurately. First, Rule-Based Strategy (RBS) is adopted to assign the optimal power demand. Then the combined effect of nonlinearities, parameter uncertainties and unmodeled dynamics of BSM-HESS are aggregated into a perturbation, which is rapidly estimated by a High Gain Perturbation Observer (HGPO). The perturbation is fully compensated online by NRFOC. NRFOC does not require an accurate system model. It only needs to measure the battery current and DC bus voltage. Finally, three case studies, including heavy load condition, light load condition and parameter uncertainty, are carried out. Simulation results verify the effectiveness and robustness of NRFOC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61963020).

**Key words:** battery/SMES hybrid energy storage system (BSM-HESS); electric vehicles (EV); nonlinear robust fractional-order control (NRFOC); high-gain perturbation observer (HGPO)

## 0 引言

近年来, 随着环境的日趋恶化以及全球能源消耗的不断上升使得具有低噪音、高效率等优点的电动汽车(Electric Vehicles, EV)受到人们的普遍重视<sup>[1-2]</sup>。众所周知, 蓄电池是为其提供能源来源的常

见设备之一, 但蓄电池不可避免地存在功率密度低以及充放电循环寿命短等问题<sup>[3-5]</sup>。针对EV的需求侧响应能力受限的问题, 蓄电池/超导混合储能系统(Battery/SMES Hybrid Energy Storage Systems, BSM-HESS)可有效地满足其负荷特性<sup>[6-7]</sup>。因此, 研究EV的BSM-HESS控制对于提升其需求侧的响应速度和性能至关重要。

目前, 大部分 BSM-HESS 的控制系统主要依赖

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61963020)

于传统比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 控制<sup>[8-10]</sup>, 因具有结构简单、可靠性高等优点而受到工业控制领域的广泛认可。然而, 其控制参数的确定主要依赖于非线性系统在某一运行点处的线性化方程, 当运行点随着环境剧烈变化而频繁抖动时难以实现全局一致的控制性能<sup>[11-13]</sup>。另外, BSM-HESS 通常具有较强的非线性, PID 控制无法实时快速且精准地跟踪 EV 的负荷需求变化, 因此需要更加先进的控制策略来处理此问题<sup>[14-16]</sup>。

为弥补上述控制器的缺陷, 近年来有广大学者开发了大量的非线性控制、鲁棒控制等先进的控制理论并广泛应用于 BSM-HESS, 获得了令人满意的控制效果。文献[17]以 BSM-HESS 为研究对象设计了一种下垂控制器, 混合储能系统在各种运行条件下的暂态响应得以大幅改善。文献[18]提出了一种模糊逻辑控制器, 显著地提高了负荷剧烈变化时混合储能系统的响应速度。此外, 文献[19]提出了一种基于互联和阻尼配置方法的控制策略, 从而明显改善微电网中混合储能系统储能变流器的鲁棒性。

然而, 上述控制器通常需要对多个参数进行整定, 其结构较为复杂难以在实际工程中获得应用。为此, 本文针对 BSM-HESS 提出了一种新型非线性鲁棒分数阶控制 (Nonlinear Robust Fractional-Order Control, NRFOC)。首先, 基于规则式策略 (Rule-Based Strategy, RBS) 实现最优功率分配并确定蓄电池电流的参考值。随后, 将 BSM-HESS 的非线性、参数不确定性和未建模动态聚合为一个扰动, 接着该扰动通过一个高增益扰动观测器 (High-Gain Perturbation Observer, HGPO) 来进行估计。另外, 引入分数阶 PID 控制框架对扰动估计进行在线完全补偿, 系统的暂态响应以及跟踪性能得以大幅改善。特别地, NRFOC 仅需测量蓄电池电流以及直流侧电压而无需精确的系统模型。最后, 基于 Matlab/Simulink 进行重载条件、轻载条件和参数不确定性三种算例研究, 仿真结果验证了 NRFOC 的有效性和鲁棒性。

## 1 混合储能系统建模

为 EV 提供能量来源的 BSM-HESS 一般由蓄电池组、SMES、DC/DC 变换器所组成, 其结构示意图如图 1 所示。考虑到 EV 的运行特性, 电动机启动时其等效电阻可忽略不计, 因此可将逆变器和电动机等效为一个阻值在一定范围内变动的电阻。值得注意的是, 开关管  $S_1$ 、 $S_2$  (或  $S_3$ 、 $S_4$ ) 应避免同时处

于开/断状态。

BSM-HESS 的五阶方程如式(1)所示<sup>[20]</sup>。

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{v}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{v_1}{R_c C_1} - \frac{i_1}{C_1} + \frac{E}{R_c C_1} \\ \frac{I_{sc} - i_2}{C_2} \\ \frac{v_1 - v_0}{L_1} - \left( \frac{R_{L1} + R_{on2}}{L_1} \right) i_1 \\ \frac{v_2}{L_2} + \left( \frac{R_{on4} - R_{on3}}{L_2} D_2 - \frac{R_{L2} + R_{on4}}{L_2} \right) i_2 + (D_2 - 1) \frac{v_0}{L_2} \\ (1 - D_1) \frac{i_1}{C_0} - \frac{v_0}{R_0 C_0} + \frac{i_2}{C_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{R_{on2} - R_{on1}}{L_1} i_1 + \frac{v_0}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{i_2}{C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 占空比  $D_1$  和  $D_2$  的取值处于开区间(0,1)内以确保系统的安全可靠运行;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_0$  分别为蓄电池侧、SMES 侧和负载侧的滤波电容;  $L_{sc}$  为超导线圈电感;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为蓄电池侧和 SMES 侧的等效串联电感;  $R_c$  为蓄电池内部等效电阻;  $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$  分别为蓄电池侧和 SMES 侧的等效串联电阻;  $R_{on1}$ 、 $R_{on2}$ 、 $R_{on3}$ 、 $R_{on4}$  分别为开关管  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  的导通电阻;  $R_0$  为负载等效电阻;  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_0$  分别为滤波电容  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_0$  的端电压;  $i_1$ 、 $i_2$  分别为电感  $L_1$  和  $L_2$  的电流;  $E$  为蓄电池的开路电压;  $I_{sc}$  为 SMES 的电流;  $R_0$  为电动汽车的等效电阻。

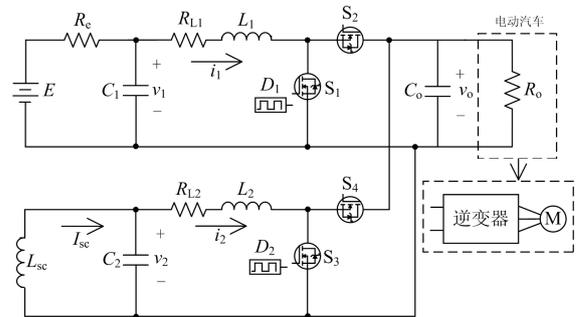


图 1 混合储能系统结构示意图

Fig. 1 Configuration of hybrid energy storage system

## 2 混合储能系统的非线性鲁棒分数阶控制器设计

定义状态  $x$  的估计误差:  $\tilde{x} = x - \hat{x}$ , 其  $\hat{x}$  为状态  $x$  的估计。

本文针对 BSM-HESS 提出一种通过负荷需求和 SMES 电流来决定能量出力分配的 RBS, 其可实现 SMES 和蓄电池之间的最优功率分配, 并获得蓄电池电流的参考值  $i_1^*$ , 其能量分配规则可总结如下。

(1) 牵引工况 ( $P_{\text{demand}} \geq 0$ ): 当负荷需求  $P_{\text{demand}}$  小于功率阈值  $P_{\text{min}}$  时, 蓄电池为 EV 提供电能输出, SMES 停止能量供应; 相反, 当负荷需求  $P_{\text{demand}}$  大于功率阈值  $P_{\text{min}}$  时, 蓄电池输出一个恒定的电能功率  $P_{\text{min}}$ , SMES 承担剩余的负荷需求 ( $P_{\text{demand}} - P_{\text{min}}$ )。

(2) 制动工况 ( $P_{\text{demand}} < 0$ ): SMES 回收制动能量并向蓄电池充电。

(3) SMES 的荷电状态(State of Charge, SOC): 为实现高效的能量转换效率, 需确保 SMES 的电流  $I_{\text{sc}} > 0.5 \text{ p.u.}$ 。

(4) 蓄电池的 SOC: 其取值设定于闭区间  $[0.2, 0.9]$  内。

SMES 的电流  $I_{\text{sc}}$ : 满足约束条件  $I_{\text{sc}} < 0.5 I_{\text{sc,max}}$  时, 蓄电池向 SMES 充电, 其充电功率为  $P_{\text{ch}}$ 。RBS 的流程图如图 2 所示。

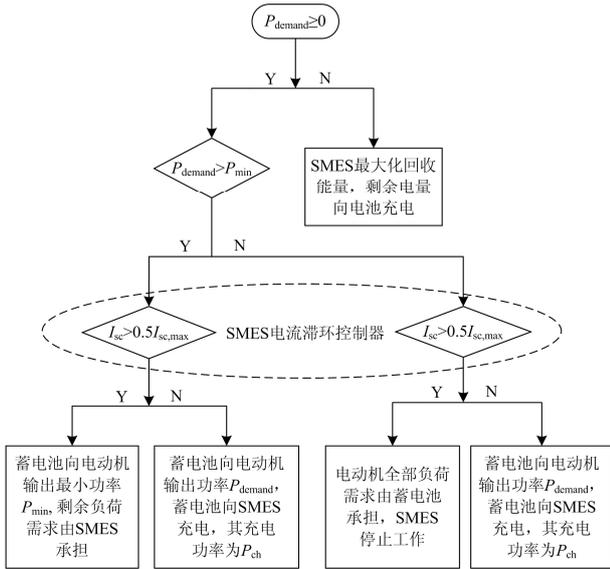


图 2 RBS 流程图

Fig. 2 Flow chart of RBS

定义状态向量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (v_1, v_2, i_1, i_2, v_0)^T$ , 定义系统输出  $\mathbf{y} = (y_1, y_2)^T = (i_1, v_0)^T$  以及系统输入  $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T = (D_1, D_2)^T$ , 定义

跟踪误差  $\mathbf{e} = (e_1, e_2)^T = (i_1 - i_1^*, v_0 - v_0^*)^T$ , 并对跟踪误差  $\mathbf{e}$  求导直到控制输入  $\mathbf{u}$  显性出现, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \frac{v_1}{L_1} + \left( \frac{R_{\text{on}2} - R_{\text{on}1}}{L_1} D_1 - \frac{R_{L1} + R_{\text{on}2}}{L_1} \right) i_1 + (D_1 - 1) \frac{v_0}{L_1} - \dot{i}_1^* \\ \dot{e}_2 = (1 - D_1) \frac{i_1}{C_0} + (1 - D_2) \frac{i_2}{C_0} - \frac{v_0}{RC_0} - \dot{v}_0^* \end{cases} \quad (2)$$

进一步地, 将式(2)改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} + \mathbf{B}(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_1^* \\ \dot{v}_0^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$g_1(x) = \frac{v_1 - v_0}{L_1} - \left( \frac{R_{L1} + R_{\text{on}2}}{L_1} \right) i_1 \quad (4)$$

$$g_2(x) = (1 - D_1) \frac{i_1}{C_0} - \frac{v_0}{R_0 C_0} + \frac{i_2}{C_0} \quad (5)$$

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} \frac{R_{\text{on}2} - R_{\text{on}1}}{L_1} i_1 + \frac{v_0}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{i_2}{C_0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

为确保上述式子输入输出线性化可行, 需保证控制增益矩阵  $\mathbf{B}(x)$  在其运行区间内可逆, 即

$$\det[\mathbf{B}(x)] = -\frac{i_2 [(R_{\text{on}2} - R_{\text{on}1}) i_1 + v_0]}{C_0 L_1} \neq 0 \quad (7)$$

在系统正常工作区间内, 由于 SMES 的电流  $i_2$  恒不等于 0, 并且直流母线电压  $v_0 \neq (R_{\text{on}1} - R_{\text{on}2})$ , 因此式(7)恒为成立。

定义跟踪误差  $\psi_1(\cdot)$  和  $\psi_2(\cdot)$  如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \psi_1(\cdot) \\ \psi_2(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} + [\mathbf{B}(x) - \mathbf{B}_0] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, 控制增益  $b_{11}$  和  $b_{22}$  为正常数, 可实现解耦的蓄电池电流  $i_1$  和直流母线电压  $v_0$  控制。

因此, 式(2)所示的系统可等价于

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1(\cdot) \\ \psi_2(\cdot) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_0 \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_1^* \\ \dot{v}_0^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

应用一个 HGPO 来实时估计扰动  $\psi_1(\cdot)$ , 得

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_1 = \hat{\psi}_1(\cdot) + \frac{\alpha_{11}}{\varepsilon_1} (i_1 - \hat{i}_1) + b_{11} u_1 \\ \hat{\psi}_1(\cdot) = \frac{\alpha_{12}}{\varepsilon_1^2} (i_1 - \hat{i}_1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, Luenberger观测器增益  $\alpha_{11}$  和  $\alpha_{12}$  均为正常数, 此外,  $0 < \varepsilon_1 \leq 1$ 。

同理, 应用另一个HGPO来实时估计扰动  $\psi_2(\cdot)$ , 可得

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}}_0 = \hat{\psi}_2(\cdot) + \frac{\alpha_{21}}{\varepsilon_2}(v_0 - \hat{v}_0) + b_{22}u_2 \\ \hat{\psi}_2(\cdot) = \frac{\alpha_{22}}{\varepsilon_2^2}(v_0 - \hat{v}_0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: Luenberger观测器增益  $\alpha_{21}$  和  $\alpha_{22}$  均为正常数;  $\varepsilon_2$  处于区间(0,1)内。

其中, Luenberger观测器增益  $\alpha_i$ ,  $i=1,2,\dots, n+1$ 。旨在使多项式  $s^{n+1} + \alpha_1 s^n + \dots + \alpha_{n+1} = (s + \lambda_\alpha)^{n+1} = 0$  的极点落于复平面的左半平面上的  $-\lambda_\alpha$ , 且满足

$$\alpha_i = C_{n+1}^i \lambda_\alpha^i, \quad i=1,2,\dots,n+1 \quad (13)$$

至此, BSM-HESS 的 NRFOC 可设计为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = B_0^{-1} \begin{bmatrix} i_1^* - \hat{\psi}_1(\cdot) - K_{P1}(i_1 - i_1^*) - \frac{K_{I1}}{s^{\mu_1}}(i_1 - i_1^*) - K_{D1}s^{\lambda_1}(i_1 - i_1^*) \\ v_1^* - \hat{\psi}_2(\cdot) - K_{P2}(v_0 - v_0^*) - \frac{K_{I2}}{s^{\mu_2}}(v_0 - v_0^*) - K_{D2}s^{\lambda_2}(v_0 - v_0^*) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $K_{P1}$ 、 $K_{P2}$ 、 $K_{I1}$ 、 $K_{I2}$ 、 $K_{D1}$ 、 $K_{D2}$  为 PID 控制增益;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为分数阶积分增益;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为分数阶微分增益。

另外, 分数阶导数的 Riemann-Liouville 如下定义<sup>[10]</sup>

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (15)$$

式中:  $n$  为大于或等于  $\alpha$  的第一个整数, 满足  $n-1 < \alpha < n$ ;  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。

此外, 通过 Outaloup 近似对分数阶微分方程进行逼近, 可得

$$s^\alpha \approx K \prod_{n=-N}^N \frac{1 + \left(\frac{s}{\omega_{z,n}}\right)}{1 + \left(\frac{s}{\omega_{p,n}}\right)}, \quad \alpha > 0 \quad (16)$$

式中, 增益  $K$  使得式(16)的两边单位增益均为 1 rad/s。近似频率的下限  $\omega_{z,n}$  和上限  $\omega_{p,n}$  可分别由式(17)、式(18)表示<sup>[21]</sup>

$$\omega_{z,n} = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{(n+N+(1-\alpha)/2)/(2N+1)}{2N+1}} \quad (17)$$

$$\omega_{p,n} = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{(n+N+(1+\alpha)/2)/(2N+1)}{2N+1}} \quad (18)$$

式中:  $(2N+1)$  为极点和零点的总数; 选取  $\omega_b = 0.2$ ,  $\omega_h = 5$ , 以及阶数  $N = 3$ 。

最终, BSM-HESS 的 NRFOC 的总体控制框图如图 3 所示。另外, NRFOC 整体设计流程可总结如下:

(1) 首先, 测量蓄电池电流  $i_1$  和直流母线电压  $v_0$ , 并将其值输送至 HGPO, 即式(11)和式(12)。

(2) 接着, 基于 HGPO 实时估计蓄电池端的扰动  $\psi_1(\cdot)$  和直流母线电压侧的扰动  $\psi_2(\cdot)$ , 即式(8)。

(3) 随后, 将 HGPO 获得的扰动实时估计值  $\hat{\psi}_1(\cdot)$  和  $\hat{\psi}_2(\cdot)$  通过 NRFOC(14)进行在线实时完全补偿。

(4) 将控制器输出  $u_1$ 、 $u_2$  返回到被控系统(2)。

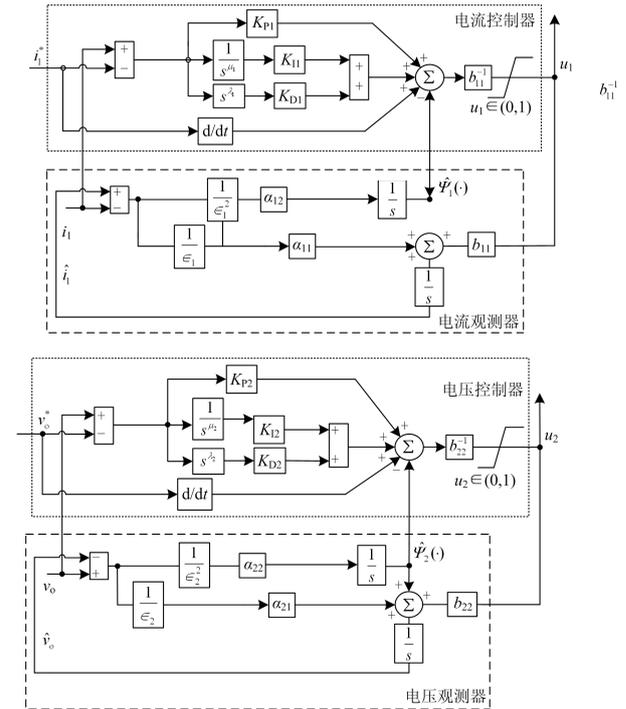


图 3 BSM-HESS 的 NRFOC 整体框图

Fig. 3 Overall NRFOC structure of BSM-HESS

### 3 算例研究

为验证 NRFOC 应用于 BSM-HESS 的有效性, 本章将基于三种算例测试其控制性能并与 PID 控制、反馈线性化控制(Feedback Linearization Control, FLC)<sup>[22]</sup>和滑模控制(Sliding-Mode Control, SMC)<sup>[23]</sup>进行比较。通过 Matlab/Simulink2016a 搭建仿真模型, 固定步长设定为  $10^{-4}$  s, 仿真时间  $T$  均设定为 2 s。

表 1 列出了仿真使用的 BSM-HESS 参数,根据试错法得到的各控制器参数如表 2 所示。此外,蓄电池的初始 SOC 设定为 90%,其输出电压限制在[36, 144]V, SMES 的额定电流为 100 A。另外, RBS 的  $P_{\min}=2 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{ch}}=100 \text{ W}$ 。

表 1 BSM-HESS 的参数

Table 1 BSM-HESS parameters

参数	值	单位
蓄电池侧的等效串联电感 $L_1$	680	$\mu\text{H}$
蓄电池内部等效电阻 $R_c$	0.04	$\Omega$
蓄电池侧的等效串联电阻 $R_{L1}$	0.25	$\Omega$
蓄电池侧的滤波电容 $C_1$	1	mF
SMES 侧的等效串联电感 $L_2$	39	mH
SMES 侧的等效串联电阻 $R_{L2}$	0.114	$\Omega$
SMES 侧的滤波器电容 $C_2$	0.22	mH
超导线圈电感 $L_{sc}$	25	H
开关管的导通电阻 $R_{on}$	0.021	$\Omega$
负载侧的滤波器电容 $C_0$	1	mF

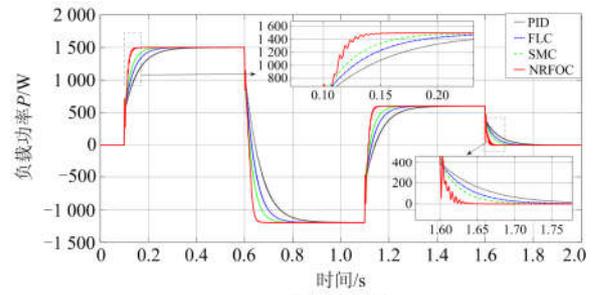
表 2 四种控制器的参数

Table 2 Parameters of four controllers

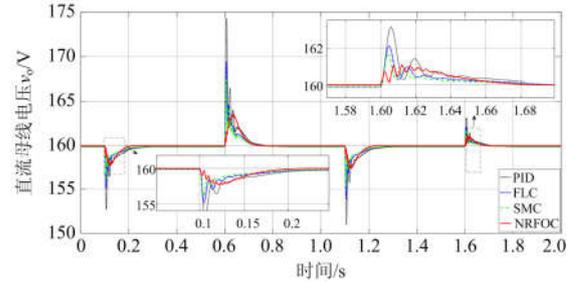
控制器	电流回路		
PID	$K_{p1} = 462$	$K_{i1} = 328$	$K_{D1} = 45$
FLC	$\lambda_1 = 120$		
SMC	$\varsigma_1 = 60$	$\varphi_1 = 45$	$\lambda_{c1} = 50$
	$K_{p1} = 350$	$K_{i1} = 220$	$K_{D1} = 30$
NRFOC	$\mu_1 = 1.59$	$\lambda_1 = 1.26$	$\lambda_{a1} = 25$
	$b_{11} = 1500$	$\varepsilon_1 = 0.1$	
控制器	直流侧电压回路		
PID	$K_{p2} = 425$	$K_{i2} = 287$	$K_{D2} = 42$
FLC	$\lambda_2 = 150$		
SMC	$\varsigma_2 = 55$	$\varphi_2 = 40$	$\lambda_{c2} = 45$
	$K_{p2} = 300$	$K_{i2} = 175$	$K_{D2} = 25$
NRFOC	$\mu_2 = 1.83$	$\lambda_2 = 1.17$	$\lambda_{a2} = 25$
	$b_{22} = 1250$	$\varepsilon_2 = 0.1$	

### 3.1 重载条件

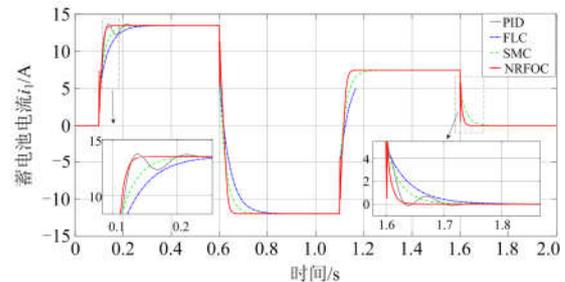
为评估 EV 在重载条件下各控制器对 BSM-HESS 的控制性能,对 EV 的负荷需求发生阶跃变化进行研究,此工况下基准直流母线电压为 160 V。值得注意的是,负载功率为负时表明 EV 处于制动工况。各控制器对应的动态响应如图 4 所示,由图可见与 PID 控制、FLC 和 SMC 相比, NRFOC 通过对扰动的在线完全补偿获得了最快速度跟踪负荷需求变化的能力,从而最为平滑地调节直流母线电压在其额定值附近。



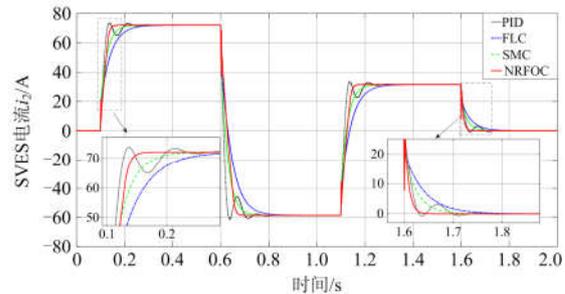
(a) 负载功率



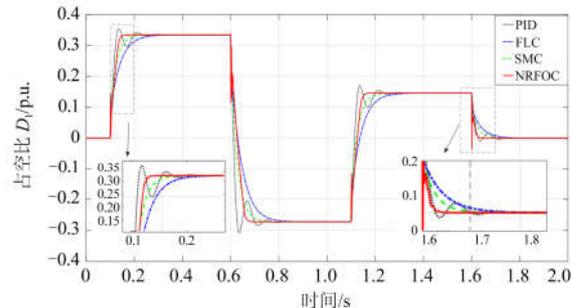
(b) 直流母线电压



(c) 蓄电池电流



(d) SMES 电流



(e) 占空比  $D_1$

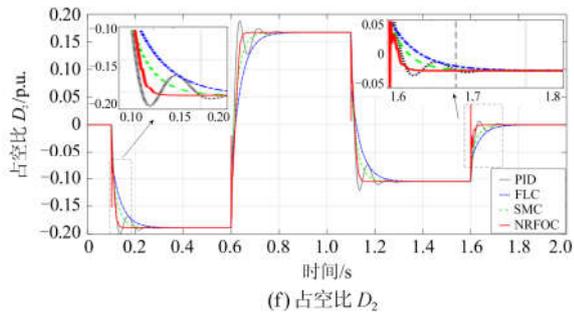
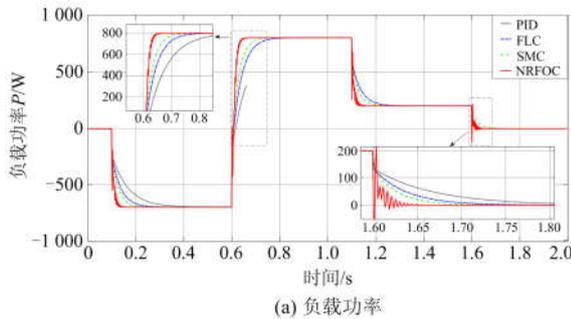


图 4 重载条件下的系统响应示意图

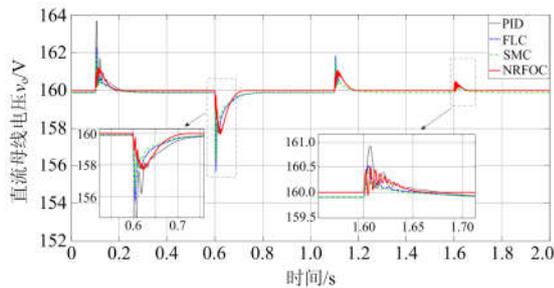
Fig. 4 System responses obtained under heavy load condition

### 3.2 轻载条件

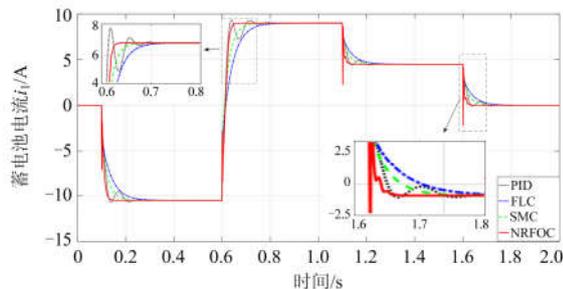
进一步地, 在轻载条件下对各控制器的控制性能进行比较分析, 为此, EV 的负荷需求发生阶跃变化, 此工况下基准直流母线电压为 100 V。系统响应如图 5 所示, 可以发现相较于其他控制器而言, NRFOC 具有最快速跟踪负荷需求以及最优调节直流侧电压的能力, 这是通过引入分数阶 PID 控制框架以及对扰动的在线完全补偿实现的。



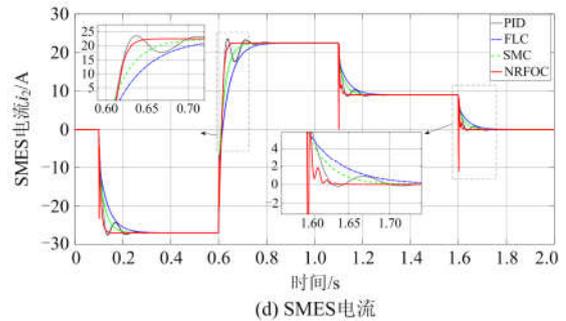
(a) 负载功率



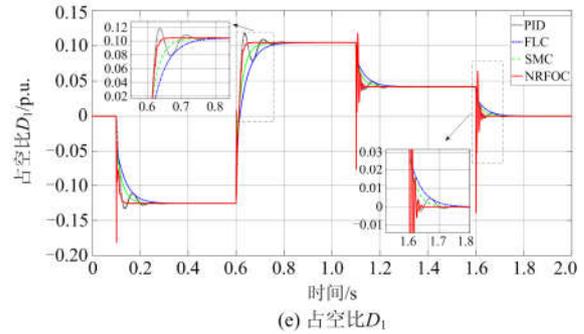
(b) 直流母线电压



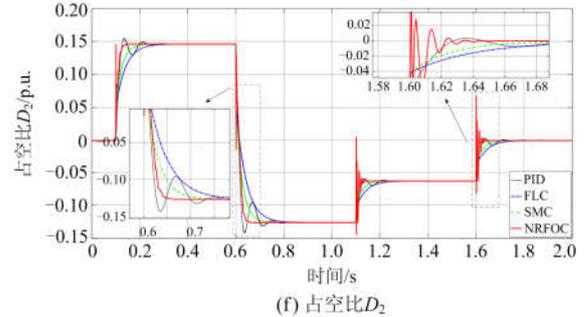
(c) 蓄电池电流



(d) SMES 电流



(e) 占空比  $D_1$



(f) 占空比  $D_2$

图 5 轻载条件下的系统响应示意图

Fig. 5 System responses obtained under light load condition

### 3.3 参数不确定性

为研究 BSM-HESS 参数不确定时 NRFOC 的鲁棒性, 对蓄电池侧和 SMES 侧的等效串联电阻  $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  以及等效串联电感  $L_1$  和  $L_2$  在标称值附近分别发生  $\pm 20\%$  的测量误差进行测试。选取系统发生一个持续 100 ms 且幅值为 0.25(标么值)的负载跌落, 图 6 表明 PID 控制、FLC、SMC 和 NRFOC 的有功功率变化峰值  $|P|$  分别为 11.31%、31.86%、14.54% 和 8.79%。显然, 能够对估计扰动进行完全补偿的 NRFOC 在 BSM-HESS 参数不确定的情况下具有最高的鲁棒性。

### 3.4 定量分析

表 3 列出了不同负载下四种控制器的误差绝对值积分(Integral of Absolute Error, IAE)指标以评估各控制器的跟踪性能和鲁棒性, 其中  $IAE_x = \int_0^T |x - x^*| dt$ ,  $x^*$  为变量  $x$  的参考值<sup>[24-25]</sup>。由表 3 可

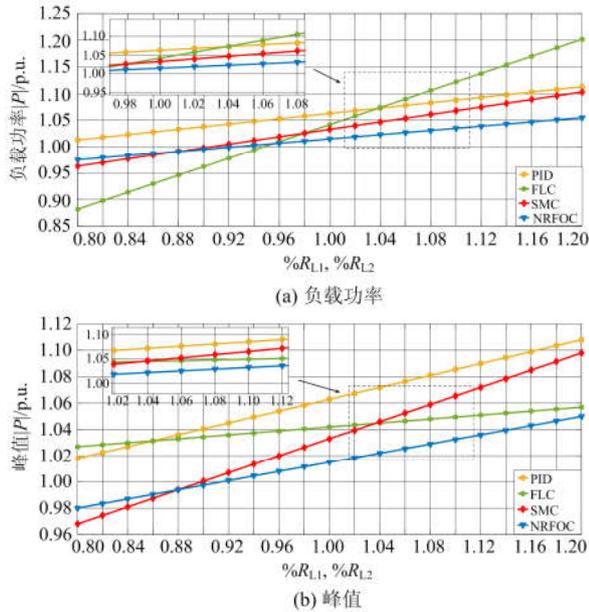


图 6 BSM-HESS 参数不确定下的系统鲁棒性

Fig. 6 System robustness under BSM-HESS parameter uncertainties

知, NRFOC 在两种工况下均具有最低的 IAE 指标 (加粗表示)。特别地, 在重载条件下, NRFOC 的  $IAE_i$  和  $IAE_v$  分别仅为 PID 控制的 59.68% 和 51.56%, FLC 的 73.51% 和 67.99%, SMC 的 83.64% 和 78.94%。另外, 表 4 罗列了不同工况下各控制器的控制成本, 其定义为  $\int_0^T (|u_1| + |u_2|) dt$ , 可见在不同工况下 NRFOC 均具有最小的控制成本。值得注意的是, 在轻载条件下, NRFOC 的总体控制成本分别仅为 PID 控制、FLC 和 SMC 的 74.45%、86.44% 和 78.31%。

表 3 四种控制器两种工况下的 IAE 指标

Table 3 IAE indices of four controllers obtained in two cases

		p.u.			
工况	IAE 指标	PID	FLC	SMC	NRFOC
重载条件	$IAE_i$	0.3529	0.2865	0.2518	<b>0.2106</b>
	$IAE_v$	0.3082	0.2337	0.2013	<b>0.1589</b>
轻载条件	$IAE_i$	0.2836	0.2191	0.1857	<b>0.1325</b>
	$IAE_v$	0.2208	0.1588	0.1246	<b>0.0892</b>

表 4 不同控制器在不同算例下的总体控制成本

Table 4 Overall control costs of different controllers obtained in different scenarios

		p.u.			
工况		PID	FLC	SMC	NRFOC
重载条件		0.3729	0.3382	0.3551	<b>0.2946</b>
轻载条件		0.2517	0.2168	0.2393	<b>0.1874</b>

## 4 结论

本文针对 BSM-HESS 设计了一款新型的非线性鲁棒分数阶控制以实现快速且平滑地跟踪负荷需求变化从而提升 EV 的需求侧响应速度和性能, 其贡献可概括为以下三个方面:

(1) 基于 RBS 实现蓄电池与 SMES 之间的最优功率分配, 同时获得蓄电池电流以及直流母线电压的参考值。随后, 通过 HGPO 实时估计 BSM-HESS 的非线性和各类不确定性并由 NRFOC 对扰动估计进行完全补偿以显著提高系统的鲁棒性。

(2) NRFOC 不依赖于系统精确模型, 仅需测量蓄电池电流和直流侧电压两个状态量, 具有结构简单、易于实现等优点。此外, 引入分数阶 PID 控制框架来对扰动进行补偿, 显著提高闭环系统的暂态响应特性。

(3) 基于重载条件、轻载条件以及 BSM-HESS 参数不确定性的三个仿真算例表明: NRFOC 能够在不同的运行状况下实现平滑且快速地跟踪负荷需求变化, 且控制成本最低。

## 参考文献

- [1] 陈旭, 叶琳浩, 黄廷城, 等. 基于电动汽车最小高峰负荷模型的微电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 47-54.  
CHEN Xu, YE Linhao, HUANG Tingcheng, et al. Reliability evaluation of microgrid based on minimum peak load model of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 47-54.
- [2] CAI H, CHEN Q Y, GUAN Z J, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(9): 1-15. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [3] 伍惠铖, 王淳, 左远龙, 等. 基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 23-30.  
WU Huicheng, WANG Chun, ZUO Yuanlong, et al. Home energy system optimization based on time-of-use price and real-time control strategy of battery[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 23-30.
- [4] YANG Y Q, BREMNER S, MENICTAS C, et al. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 109-125.
- [5] YANG H, LI S, LI Q, et al. Hierarchical distributed control for decentralized battery energy storage system based on consensus algorithm with pinning node[J].

- Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 52-60. DOI: 10.1186/s41601-018-0081-5.
- [6] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 105-114.  
FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 105-114.
- [7] LI J, ZHANG M, YANG Q, et al. SMES/battery hybrid energy storage system for electric buses[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [8] LI J, GEE A M, ZHANG M, et al. Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model[J]. Energy, 2015, 86: 175-185.
- [9] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-83.  
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-83.
- [10] CANSIZ A, FAYDACI C, QURESHI M T, et al. Integration of a SMES-battery-based hybrid energy storage system into microgrids[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2018, 31(5): 1449-1457.
- [11] YANG B, YU T, SHU H C, et al. Passivity-based sliding-mode control design for optimal power extraction of a PMSG based variable speed wind turbine[J]. Renewable Energy, 2018, 119: 577-589.
- [12] YANG B, ZHONG L E, YU T, et al. PCSMC design of permanent magnetic synchronous generator for maximum power point tracking[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 14(13): 3115-3126.
- [13] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. SMES based a new PID controller for frequency stability of a real hybrid power system considering high wind power penetration[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(11): 1304-1313.
- [14] BIZON N. Effective mitigation of the load pulses by controlling the battery/SMES hybrid energy storage system[J]. Applied Energy, 2018, 229: 459-473.
- [15] NGAMROO I. Optimization of SMES-FCL for augmenting FRT performance and smoothing output power of grid-connected DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [16] ALAFNAN H, ZHANG M, YUAN W, et al. Stability improvement of DC power systems in an all-electric ship using hybrid SMES/battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-6.
- [17] LI J, YANG Q, ROBINSON F, et al. Design and test of a new droop control algorithm for a SMES/battery hybrid energy storage system[J]. Energy, 2017, 118: 1110-1122.
- [18] SUN Q, XING D, YANG Q, et al. A new design of fuzzy logic control for SMES and battery hybrid storage system[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 4575-4580.
- [19] 林晓冬, 雷勇. SMES/BESS 储能变流器在微电网中的控制策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1458-1466.  
LIN Xiaodong, LEI Yong. Research on control strategy of energy storage converters of SMES/BESS in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1458-1466.
- [20] KOUCHACHVILI L, YAICI W, ENTACHEV E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2018, 374: 237-248.
- [21] MONTOYA O D, ALEJANDRO G, GERARDO E P. A generalized passivity-based control approach for power compensation in distribution systems using electrical energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 16: 259-268.
- [22] DAI X K, ZHANG B H, CHEN Y. Square of voltage out-loop based feedback linearization control of voltage source converter (VSC) in SMES[J]. Advanced Materials Research, 2013, 732-733: 1216-1221.
- [23] SONG Z Y, HOU J, HOFMANN H, et al. Sliding-mode and Lyapunov function-based control for battery/supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicles[J]. Energy, 2017, 122: 601-612.
- [24] YANG B, YU T, SHU H C, et al. Robust sliding-mode control of wind energy conversion systems for optimal power extraction via nonlinear perturbation observers[J]. Applied Energy, 2018, 210: 711-723.
- [25] YANG B, ZHANG X S, YU T, et al. Grouped grey wolf optimizer for maximum power point tracking of doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133: 427-443.

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-03-27

作者简介:

孙立明(1977—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统、工业制造过程的先进控制系统与装置, 电力系统生产过程数据的智能分析; E-mail: 2410924502@qq.com

杨博(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电系统优化与控制以及人工智能在智能电网中的应用。 E-mail: yangbo\_ac@outlook.com

(编辑 张爱琴)