DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.101 **中图分类号**：TM301.2 **文献标志码**：A

基于模糊PID的开关磁阻飞轮储能充放电控制

朱志莹[1,2]，安 聪[1](中国电源学会学生会员)，丛冰玉[1]，孟凡浩[1]，焦金帅[1]
(1.南京工程学院电力工程学院，南京 211167；2.东南大学电气工程学院，南京 210096)

摘要：针对车载飞轮储能系统FESS(flywheel energy storage system)在转速和负载变化下的稳定控制问题，提出了基于模糊比例-积分-微分PID(proportional integral derivative)控制的开关磁阻飞轮储能充放电控制策略。该策略依据系统基本结构原理，构造参数自适应的模糊PID控制器和充放电控制模型，充电时，采用转速-电流双闭环进行控制，其中转速外环采用模糊PID控制、电流内环采用低速电流斩波和高速角度位置控制来实现不同转速下的稳定运行；放电时，采用电压-电流双闭环控制，稳定输出电压的同时起到限制电流的作用。最后，多工况运行仿真结果验证了模糊PID控制可以有效提高响应速度、降低转速和电压超调，充放电控制策略实现了FESS在转速和负载突变下的稳定运行。

关键词：飞轮储能系统；开关磁阻电机；模糊比例-积分-微分；充放电控制

Charge and Discharge Control of Switched-reluctance Machine Driven Flywheel Energy Storage System Based on Fuzzy PID

ZHU Zhiying[1,2], AN Cong[1], *Student Member*, *CPSS*, CONG Bingyu[1], MENG Fanhao[1], JIAO Jinshuai[1]
(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve the stability of a vehicle-mounted flywheel energy storage system (FESS) under changes in speed and load, a charge and discharge control strategy for switched-reluctance machine (SRM) driven FESS (SRM-FESS) based on fuzzy proportional integral derivative (PID) was proposed. This strategy is based on the basic structure and principle of the system, and a fuzzy PID controller with adaptive parameters and the control models of charge and discharge were constructed. During the charging process, a dual closed-loop control of speed and current was adopted, where the fuzzy PID control was used for the outer-loop speed control, while the low-speed current chopper and high-speed angle position control were used for the inner-loop current control to achieve the stable operation at variable speeds. During the discharging process, a dual closed-loop control of voltage and current was used to stabilize the output voltage and limit the current. Finally, the simulation results under multi-condition operation prove that the fuzzy PID control can effectively improve the response speed and reduce the overshoot of speed and voltage, indicating that the charge and discharge control strategy realize the stable operation of FESS under sudden changes in speed and load.

Keywords: Flywheel energy storage system (FESS); switched-reluctance machine (SRM); fuzzy proportional integral derivative (PID); charge and discharge control

收稿日期：2023-05-06；**修回日期**：2023-09-18；**录用日期**：2023-10-17；**网络首发日期**：2024-01-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52407051)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20241966)；江苏高校“青蓝工程”资助项目(SJS202327)；新型电力系统运行与控制全国重点实验室资助课题(SKLD25KZ11)；江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目(XTCX202404)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52407051; Natural Science Foundation of Jiangsu under the grant BK20241966; “Qing Lan Project” of Jiangsu Higher Education Institutions under the grant SJS202327; Project by State Key Laboratory of Power System Operation and Control under the grant SKLD25KZ11; Open Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network under the grant XTCX202404

由于能源和环境问题，电动车辆得到高度重视和快速发展，动力电池成为制约其发展的关键技

术，传统单一蓄电池难以同时满足车辆长续航里程和强机动性能的一致性要求，迫切需要引入 1 种瞬时大功率、充放电速度快、可靠性高的短时储能装置作为辅助动力电池，以满足车辆对动力电池大功率、高频次充放电的性能需求。

飞轮储能 FESS(flywheel energy storage system)是 1 种短时高功率型物理储能技术，具备瞬时功率大、充放电时间短、循环寿命长等特点，特别适用于大功率、高频次充放电的电动车辆应用场景[1-3]。电机是 FESS 能量转换的关键核心，其性能好坏直接影响甚至决定系统的运行性能[4-5]。开关磁阻电机 SRM(switched-reluctance machine)具备结构简单可靠、调速范围宽、生产成本低、适合高速/超高速运行等优点，是 FESS 电机的理想选择之一[6-8]。实际应用中，SRM 的双凸极结构和高饱和磁路现象使其转矩和磁链都是电流及位置角的非线性函数[9-11]，且在充放电过程中，飞轮转速的变化会导致系统电压和频率发生波动，车辆启停会使 FESS 面临复杂的负载扰动和突变，现有广泛使用的比例-积分-微分 PID(proportional integral derivative)控制难以做到宽调速、强扰动下的参数动态调整和实时精确控制[8-11]，迫切需要对其进行改进，以提升系统在不同转速和复杂突变情况下的控制性能。

为此，本文以 1 台常规 SRM 驱动的 FESS 为例，在简要介绍其基本结构和运行机理基础上，重点研究其充放电控制策略，提出将模糊控制与 PID 控制结合，设计了基于模糊 PID 的 FESS 充放电控制器，搭建了系统充放电控制仿真模型，并通过对比仿真验证了算法的有效性。

1 SRM-FESS 结构原理

图 1 为 SRM-FESS 结构示意图，主要包括 SRM、功率变换器、各类传感器、控制器。功率变换器采用三相不对称半桥拓扑结构[12-15]，通过开通或关断 SRM 绕组中电流大小及方向，对飞轮充电、保持和放电进行控制；控制器通过对系统电流、电压、转速等信息进行检测，采取适当的控制算法确定开通、关断角，进而通过控制 SRM 处于电动或发电状态来实现 FESS 充电或放电运行。

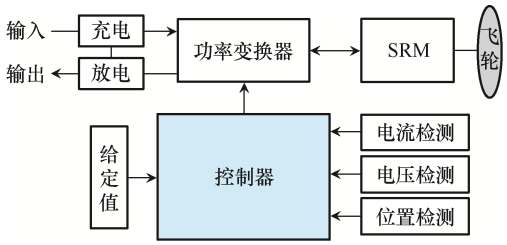


图 1 开关磁阻飞轮储能系统结构

Fig. 1 Structure of SRM-FESS

SRM-FESS 的机理模型主要包括电磁方程、机械方程、机电联系方程 3 部分。

SRM-FESS 的电磁方程为

$$v = iR + \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：v 为相电压；i 为相电流；R 为相电阻；φ 为相绕组磁链。

SRM-FESS 的机械方程为

$$T_\mathrm{e} - T_\mathrm{L} - f\omega = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：T_e 为电磁转矩；T_L 为负载转矩；f 为阻尼系数；ω 为转子角速度；J 为转动惯量。

SRM-FESS 的机电联系方程为

$$T_\mathrm{e}(\theta,i) = \int_0^i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial\theta}\mathrm{d}i = \int_0^i \frac{\partial L(\theta,i)i}{\partial\theta}\mathrm{d}i \tag{3}$$

式中：θ 为转子位置角；L 为电感；$\varphi(\theta,i)$ 和 $L(\theta,i)$ 分别为磁链和电感与转子位置角、电流之间的函数关系。

在定性分析时，其机电联系方程可以采用理想线性模型[14-15]，表达式为

$$T_\mathrm{e}(\theta,i) = \frac{1}{2}i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{4}$$

通过式(4)可知，T_e 的大小与 i 的二次方成正比，方向与 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 有关，该变化率由开通、关断角决定，因此，通过调节开通、关断角的大小来改变转矩的方向和持续作用时间。若相电流在电感上升区间内开通，则 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta>0$，$T_\mathrm{e}>0$，此时电机内产生正向转矩来驱动飞轮加速，系统工作于充电状态；若相电流在电感下降区间内开通，则 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta<0$，

T_e<0，此时电机内产生反向转矩来抑制飞轮旋转，系统工作于放电状态。

2　SRM-FESS 充放电控制

2.1　模糊 PID 控制器设计

模糊控制具有较强的自适应和非线性逼近能力，将模糊控制与 PID 控制器结合，设计参数自适应模糊 PID 控制器，如图 2 所示。控制器采用两输入三输出类型，以飞轮目标转速 n_{ref} 和实际转速 n 之差得到的误差 e 和误差变化 e_c 作为输入，以 PID 控制器的比例、积分、微分 3 个系数 K_p、K_i、K_d 作为输出，通过对输入变量 e 和 e_c 的模糊化操作处理，实现对 PID 控制参数的在线自整定，以适应 SRM 结构双凸极和磁路高饱和特性及电动车辆转速和负载变化时的参数时变和非线性特征。

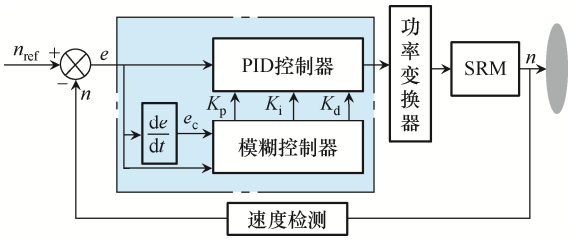


图 2　模糊 PID 控制器结构

Fig. 2 Structure of fuzzy PID controller

输入输出变量 e、e_c、K_p、K_i、K_d 的模糊规则见表 1~表 3，模糊集均确定为“负大/NB”“负中/NM”“负小/NS”“零/ZO”“正小/PS”“正中/PM”“正大/PB”7 个级别，其中输入变量 e 和 e_c 论域为[−2, 2]，输出变量 K_p、K_i、K_d 的论域分别为[0, 25]、[0, 10]、[0, 7]。

表 1　K_p 的模糊规则

Tab. 1 Fuzzy rule of K_p

e \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2　K_i 的模糊规则

Tab. 2 Fuzzy rule of K_i

e \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3　K_d 的模糊规则

Tab. 3 Fuzzy rule of K_d

e \ e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NS	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据模糊子集隶属度和各参数模糊规则，采用重心法进行解模糊，得到 K_p、K_i、K_d 的精确值。

PID 控制器的表达式为

$$u(k)=K_p\cdot e(k)+K_i\cdot\int e(k)\mathrm{d}k+K_d\cdot e_c(k) \tag{5}$$

式中：$u(k)$为 PID 控制器在 k 时刻的输出；误差 $e(k)$为 k 时刻飞轮转速设定值与输出值的偏差。

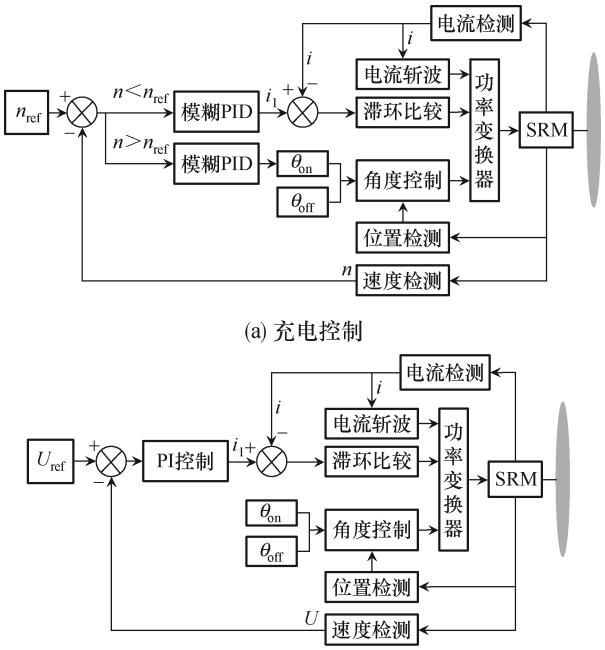
对 PID 参数进行在线校正，由模糊算法得到的 3 个输出量结合 PID 控制器初始参数代入校正公式，可表示为

$$\begin{cases}K_{p1}=K_{p0}+K_p\\K_{i1}=K_{i0}+K_i\\K_{d1}=K_{d0}+K_d\end{cases} \tag{6}$$

2.2　充放电控制设计

图 3 为 SRM-FESS 充放电控制框图，充电控制采用转速电流双闭环控制方式，如图 3(a)所示，其中外环为转速控制环，采用模糊 PID 控制器对转速进行调节，内环为电流控制环，根据转速不同采用不同控制方式，低速时采用电流斩波与滞环控制

结合将电流控制在合理范围内，高速时采用角度位置控制，通过调节开通、关断角来调节电流。放电控制采用电压电流双闭环控制，如图 3(b)所示。



(a) 充电控制

(b) 放电控制

图 3 SRM-FESS 充放电控制框图

Fig. 3 Block diagram of charge and discharge control of SRM-FESS

3 仿真研究

在 MATLAB/Simulink 环境中搭建 SRM-FESS 充放电控制仿真模型，如图 4 所示。

SRM-FESS 系统性能主要由相电流和开通、关断角决定，通过控制变量分别测试相电流和开通、关断角大小对系统性能的影响。图 5 为固定开通角 θ_{on}=40°和关断角 θ_{off}=80°，电流最大值 I_{max} 分别为 40 A、80 A 和不限制 3 种情况下的电机转速和转矩曲线。由图 5 可见，不限制电流大小时，飞轮转子在 t=0~0.06 s 内加速度较大，转速上升较快，但由图 5(b)可见，转矩脉动最大；I_{max}=40 A 时，转矩脉动较小，飞轮转子加速度最小，转速上升最慢；当 I_{max}=80 A 时，转矩波动较小，转速能够平稳快速上升。以此，对不同 I_{max} 进行多次测试和验证，可获得电流对系统性能的影响规律，经多次试验，仿真中选取电流最大值为 I_{max}=80 A。

进一步测试开通、关断角对电机转速和转矩性能的影响，图 6 为固定电流峰值 I_{max}=80 A，开通、关断角分别为 θ_{on}=40°、θ_{off}=90°，θ_{on}=45°、θ_{off}=75°，θ_{on}=50°、θ_{off}=60°这 3 种情况下的电机转速和转矩特性曲线。由图 6 可见，当 θ_{on}=40°、θ_{off}=90°时，系统加速度最大，转速上升最快，但出现了转矩为负值的现象；当 θ_{on}=50°、θ_{off}=60°时，系统加速度最小，转速上升最慢；相比前 2 种情况，当 θ_{on}=45°、θ_{off}=75°时，转矩均为正值，且飞轮转子能够快速稳定上升，为此，仿真中开通、关断角优选为 θ_{on}=45°、θ_{off}=75°。

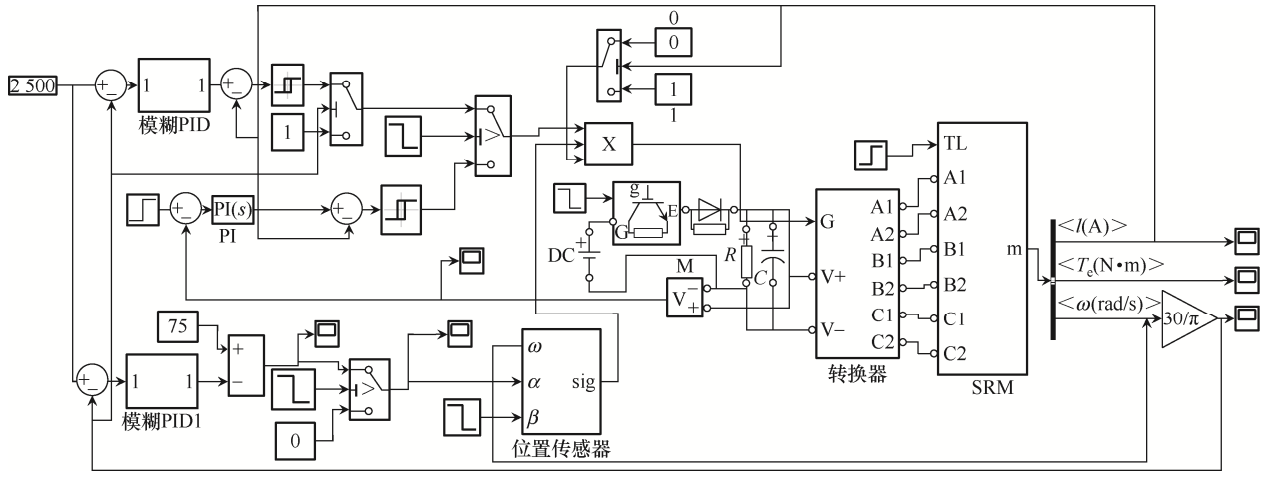
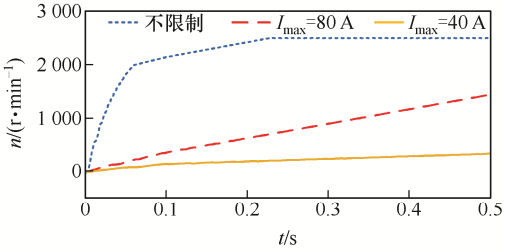
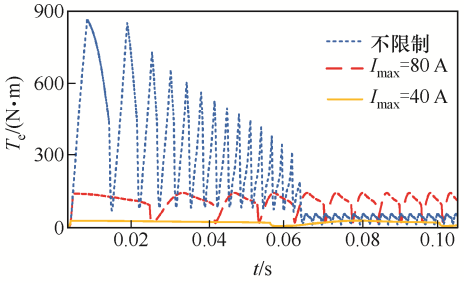


图 4 SRM-FESS 充放电控制仿真模型

Fig. 4 Simulation model of charge and discharge control of SRM-FESS



(a) 转速曲线

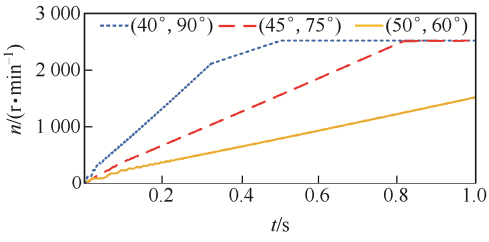


(b) 转矩曲线

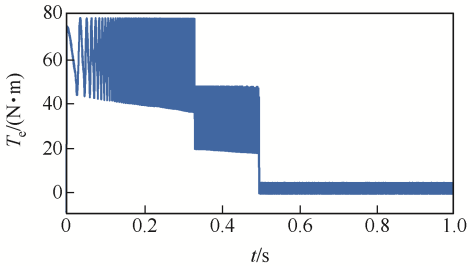
图 5　不同峰值电流下的电机转速和转矩曲线

Fig. 5 Speed and torque curves of motor at different limiting currents

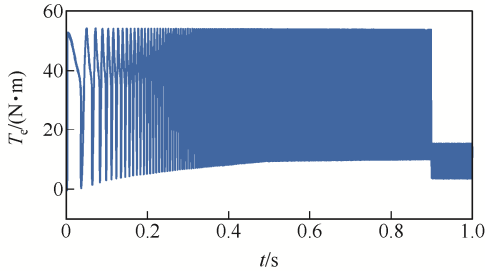
结合电流和开通、关断角对系统性能的影响分析，仿真参数设置为：系统充电过程设为 t=0~1.00 s，目标转速 n_{ref}=2 500 r/min，电源选择 220 V (DC)，I_{max}=80 A，电流滞环宽度为±1 A，飞轮转动惯量为 J=0.1 kg·m^2，低速电流斩波控制时的开通、关断角为 θ_{on}=45°、θ_{off}=75°，高速角度位置控制时将关断角保持在 θ_{off}=75°；系统放电过程设为 t=1.00~ 1.40 s，目标电压 U_{ref}=300 V，优选的开通、关断角为 θ_{on}=0°、θ_{off}=45°。



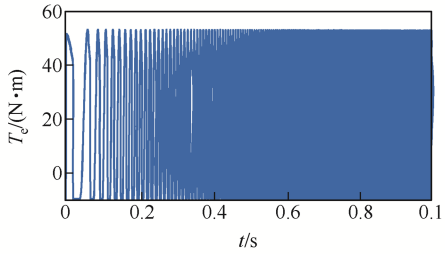
(a) 转速曲线



(b) θ_{on}=40°、θ_{off}=90°转矩曲线



(c) θ_{on}=45°、θ_{off}=75°转矩曲线

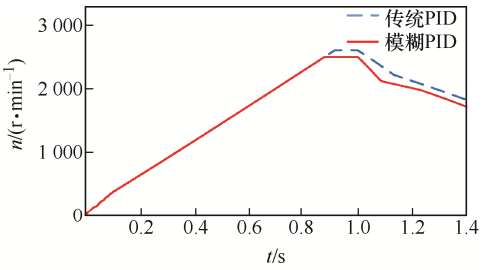


(d) θ_{on}=50°、θ_{off}=60°转矩曲线

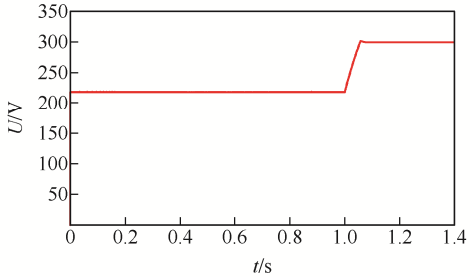
图 6　不同开通、关断角下的电机转速和电机转矩

Fig. 6 Speed and torque of motor at different turn-on and turn-off angles

图 7 为系统充放电过程转速和电压变化情况。由图 7(a)转速曲线可见，系统充电时，飞轮转速平稳上升并在 t=0.87 s 时达到目标转速 n_{ref}= 2 500 r/min，在 t=0.87~1.00 s 内保持转速稳定不变；t= 1.00 s 时，系统进入放电模式，此时飞轮转速快速下降，较常



(a) 转速曲线



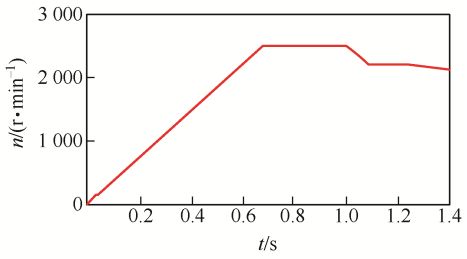
(a) 电压曲线

图 7　充放电过程中转速、电压变化曲线

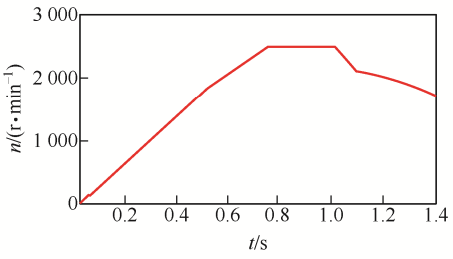
Fig. 7 Speed and voltage curves during charging and discharging process

规 PID 控制，所提模糊 PID 控制提高了系统的响应速度，有效降低了转速超调。进一步观察图 7(b)电压曲线可见，在系统充放电过程中，电压在 t=1.00 s 进入放电模式开始升高，在 t=1.10 s 时稳定在目标电压 U_{ref}=300 V，电压恢复稳定迅速且超调量小于 2%，符合实际工程的需要。

进一步对负载突变情况下充放电控制算法的有效性进行测试，仿真中设定 2 种工况：①目标转速 n_{ref}=2 500 r/min、负载转矩始终为 0；②目标转速 n_{ref}=2 500 r/min，初始负载转矩为 0，t=0.5 s 时突变为 20 N·m。图 8 为 2 种工况下充放电过程的转速曲线。由图 8 可以看出，当发生负载突变时，飞轮加速和减速过程较为平稳，表明所提充放电控制策略结合模糊 PID 控制器有效实现了 FESS 在负载突变情况下的稳定运行。



(a) 工况①转速曲线



(b) 工况②转速曲线

图 8 充放电过程中负载变化下的转速曲线

Fig. 8 Speed curves during charging and discharging process under changes in load

4 结论

针对不同转速下和车辆负载突变情况下的 SRM 驱动 FESS 充放电控制问题展开研究，设计了基于模糊 PID 控制的充放电控制策略，给出了转速电流双闭环的充电控制、电压电流双闭环的放电控制模型，并进行仿真分析和验证，得出以下结论。

(1)模糊 PID 控制作用下系统充放电过程响应速度快，转速和电压超调小，稳态精度高，有效缓解了系统因转速突变导致的系统超调问题，提高了系统的稳定性。

(2)在不同转速和负载突变情况下，充放电控制策略能有效实现 FESS 平稳运行，这对提升电动车辆启停和爬坡时的 FESS 充放电运行性能有重要意义。

参考文献：

[1] 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 765-782.
Dai Xingjian, Wei Kunpeng, Zhang Xiaozhang, et al. A review on flywheel energy storage technology in fifty years [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 765-782. (in Chinese)

[2] 邢向上, 姜新建. 飞轮储能系统电机及其控制器概述[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 147-152.
Xing Xiangshang, Jiang Xinjian. Introduction to motors and controllers of flywheel energy storage systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 147-152. (in Chinese)

[3] Ho C Y, Wang J C, Hu Kaiwei, et al. Development and operation control of a switched-reluctance motor driven flywheel [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 526-537.

[4] 韩磊, 王育飞, 薛花. 基于浸入与不变理论的电动汽车快充站飞轮储能系统非线性控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 260-268.
Han Lei, Wang Yufei, Xue Hua. Nonlinear control strategy of flywheel energy storage system for electric vehicle fast charging station based on immersion and invariance theory [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 260-268. (in Chinese)

[5] 宋良全, 孙佩石, 苏建徽. 飞轮储能系统用开关磁阻电机控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(9): 55-57.
Song Liangquan, Sun Peishi, Su Jianhui. Research on switched reluctance motor control strategy for flywheel energy storage system [J]. Power Electronics, 2013, 47(9):

55-57. (in Chinese)

[6] 朱彦波, 石朋飞, 李光军. 基于开关磁阻电机的储能飞轮充放电控制[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 155-161.
Zhu Yanbo, Shi Pengfei, Li Guangjun. Charge and discharge control of a switched reluctance motor based fly-wheel [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1): 155-161. (in Chinese)

[7] Fan Jiayi, Lee Y. Design consideration to achieve wide-speed-range operation in a switched reluctance motor [J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 43(4): 290-294.

[8] 朱学忠, 刘闯, 刘迪吉. 开关磁阻电机发电运行的角度位置控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): 64-67.
Zhu Xuezhong, Liu Chuang, Liu Diji. Angle position control of switched reluctance generator [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(1): 64-67. (in Chinese)

[9] 温浩. 开关磁阻电机调速系统研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Wen Hao. Research and design of switched reluctance motor speed control system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

[10] Sun Xiangdong, Koh K H, Yu B G, et al. Fuzzy-logic-based *V/f* control of an induction motor for a DC grid power-leveling system using flywheel energy storage equipment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3161-3168.

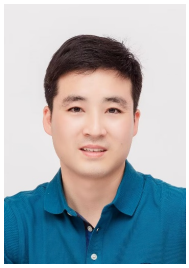
[11] Murayama M, Kato S, Tsutsui H, et al. Combination of flywheel energy storage system and boosting modular multilevel cascade converter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 5700704.

[12] Liu Zeyuan, Cao Xin, Cai Jun. A magnetic bearing switched reluctance motor with simultaneous excitation by a modified half-bridge converter [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(10): 7500905.

[13] 王喜莲, 许振亮. 基于 PI 参数自适应的开关磁阻电机调速控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4215-4223.
Wang Xilian, Xu Zhenliang. Speed regulation control of switched reluctance motors based on PI parameter self-adaptation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4215-4223. (in Chinese)

[14] 刘勇智, 戴聪, 王程. 基于自抗扰的航空开关磁阻转速转矩控制方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 113-120.
Liu Yongzhi, Dai Cong, Wang Cheng. Method on aerial reluctance switched speed-torque control based on auto-disturbances rejection [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 113-120. (in Chinese)

[15] 郑伟杰, 周扬忠. 基于有限电压矢量集优化的永磁同步电动机模型预测瞬时转矩控制[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 213-223.
Zheng Weijie, Zhou Yangzhong. Model predictive instantaneous torque control of permanent magnet synchronous motor based on finite voltage vector set optimization [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 213-223. (in Chinese)



朱志莹

作者简介：

朱志莹(1984—　)，男，博士，教授。研究方向：新能源汽车驱动电机，电能存储与节电技术。E-mail：zyzhu@njit.edu.cn。

安聪(1996—　)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：飞轮储能充放电控制。E-mail：ancong@njit.edu.cn。

丛冰玉(1998—　)，女，硕士研究生。研究方向：车载轴向分相永磁式 BFM 飞轮转子的稳定悬浮控制。E-mail：2689613712@qq.com。

孟凡浩(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：飞轮储能电机多物理场耦合分析。E-mail：mengfh@njit.edu.cn。

焦金帅(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：飞轮储能电机优化设计。E-mail：jsjiao@njit.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)