

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201266

基于模糊逻辑的电动汽车双源混合储能系统能量管理策略

安小宇, 李元丰, 孙建彬, 孙嵩楠, 申永鹏

(郑州轻工业大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对电动汽车行驶过程中电池放电电流过大导致的电池容量衰减问题, 构建了由锂离子动力电池、超级电容和多端口 DC/DC 变换器构成的全主动式混合储能系统, 其中电流环控制器和电压环控制器分别控制输出电流和直流母线电压。结合超级电容 SOC、整车需求功率和车速情况, 根据建立的 45 条模糊控制规则, 模糊逻辑控制器调节锂离子动力电池和超级电容的充放电功率, 在车辆峰值功率需求较高时避免了高频电流波动对动力电池寿命的影响。同时在功率需求较低时, 动力电池给超级电容充电。在 HWFET 工况下的实验结果表明所提出的全主动式双能量源混合储能系统和基于模糊逻辑的能量管理策略能够有效保护锂离子动力电池免受大电流波动影响, 从而达到延长电池寿命的作用。

关键词: 电动汽车; 混合储能系统; 模糊逻辑; 能量管理; 电池寿命

Energy management strategy of a dual-source hybrid energy storage system for electric vehicles based on fuzzy logic

AN Xiaoyu, LI Yuanfeng, SUN Jianbin, SUN Songnan, SHEN Yongpeng
(Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Capacity attenuation of power battery is a problem caused by excessively high discharge current during electric vehicle driving. Thus a fully active hybrid energy storage system composed of a lithium-ion power battery, a supercapacitor and multi-port DC/DC converter is constructed, where the current and voltage loop controllers are responsible for the controlling of output current and DC bus voltage, respectively. Then taking the supercapacitor SOC, vehicle demand power and vehicle speed as input variables, and lithium-ion power battery output power as the output variable, a fuzzy logic-based energy management strategy for an energy storage system is proposed by constructing 45 fuzzy rules. The charge and discharge power of the lithium-ion battery and supercapacitor are adjusted by the fuzzy logic controller, which ensures the peak power demand of the vehicle during starting and acceleration, and avoids the impact of high-frequency current fluctuations on the life attenuation of the power battery. When the power demand is low, the power battery charges the ultracapacitor. Experimental results under HWFET show that the proposed fully active dual-energy source hybrid energy storage system and the energy management strategy based on fuzzy logic can effectively protect lithium-ion power battery from large current fluctuations, thereby extending lithium-ion power battery life.

This work is supported by the Science and Technology Key Project of Henan Province (No. 202102210317) and Consulting Research Project of China Engineering Science and Technology Development Strategy — Henan Research Institute (No. 2020HENZT06).

Key words: electric vehicle; hybrid energy storage system; fuzzy logic; energy management; battery life

0 引言

由于化石能源的巨大消耗, 其全球储备量越来越少, 电动汽车相对于燃油汽车具有效率高、经济性和零排放等优点, 越来越受到世界各国的重视^[1-2]。

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(202102210317); 中国工程科技发展战略河南研究院咨询研究项目(2020HENZT06)

大量电动汽车的无序接入将会对电网的安全经济运行造成冲击, 需要合理规划^[3-6]。电动汽车储能技术日益受到关注^[7-8]。动力电池作为电动汽车的能量源, 大电流和高频充放电会导致其容量衰减和使用寿命缩短^[9-10], 而超级电容具有功率密度高和循环寿命长等优点, 可以保护动力电池免于过度快速放电, 从而延长电池使用寿命^[11-15], 以动力电池和超级电容相结合的混合储能系统能够满足电动汽车对能

量和功率的双重要求^[16-20]。文献[18]总结了四种直流侧并联混合储能拓扑结构。本文选择锂离子动力电池、超级电容通过多端口 DC/DC 变换器和负载连接的拓扑结构,该结构能够灵活控制不同电压能量源输出功率,从而可以实现复杂的控制策略。

电动汽车混合储能系统能量管理策略对于保护电池和提高效率具有重要意义。目前针对混合储能系统能量管理问题,基于逻辑门限值控制、全局和瞬时优化控制、神经网络、小波变换和模糊控制等能量管理策略已经得到了初步应用。文献[21-22]通过逻辑门限值控制电池提供充放电功率的期望值,而超级电容提供超出期望值的部分功率,但逻辑门限控制不能充分发挥超级电容的优势,并且该策略在选取门限值时较大程度上还依赖于人工经验。文献[23]在复合电源系统模型的基础上建立成本函数,实现对功率需求的滚动优化;文献[24]针对混合储能系统建立预测模型,定义优化指标并将其转化为二次规划问题求解;文献[25]以实时运行成本为优化目标,利用庞特里亚金最小值原理对混合储能系统的能量管理策略进行优化;文献[26]以混合储能系统最小为优化目标,采用动态规划进行求解以达到合理的功率分配效果,但是它们需要大量的计算。文献[27]在动态规划的基础上使用神经网络优化混合储能系统的功率分配,但是神经网络需要大量的数据样本进行训练和学习。文献[27-28]通过将需求功率分解为高频和低频部分并分别分配给超级电容和电池,但是它们不能根据超级电容的荷电状态调整其功率输出。

模糊逻辑控制是基于专家经验总结出来的、用自然语言表达的控制策略,具有不依赖精确模型、对系统参数不敏感、鲁棒性强的特点^[29]。本文提出了由锂离子动力电池、超级电容和多端口 DC/DC 变换器构成的全主动式双能量源混合储能系统,并以超级电容的荷电状态(State of Charge, SOC)、电动汽车的需求功率和车速为输入变量,以锂离子动力电池输出功率为输出变量,通过构造 45 条模糊规则,提出了基于模糊逻辑的储能系统能量管理策略,在保障车辆起步和加速时峰值功率需求的同时,避免了高频电流波动对动力电池寿命的影响。

1 系统结构

1.1 电动汽车双能量源动力结构

电动汽车双能量源及动力结构配置如图 1 所示,锂离子动力电池和超级电容分别通过多端口 DC/DC 变换器向直流母线提供能量输出,多端口 DC/DC 变换器的直流电能输出再经过逆变器进行

电流逆变,最后形成的交流电驱动电动汽车的牵引电机。

电动汽车的牵引电机既可以消耗电能完成驱动功能,又可以将制动电能通过多端口 DC/DC 变换器反馈给锂离子动力电池和超级电容。控制系统控制锂离子动力电池、超级电容和直流母线输出之间的功率流动。

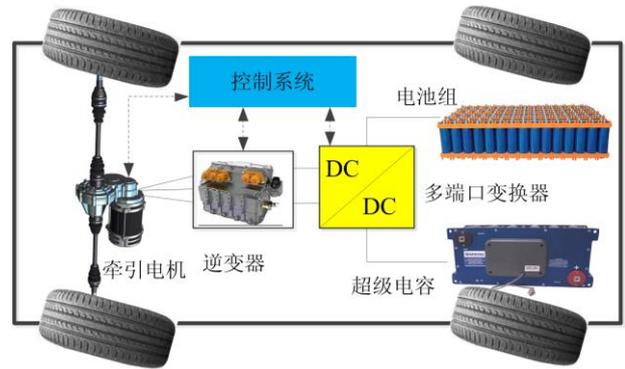


图 1 电动汽车动力结构配置

Fig. 1 Electric vehicle power structure configuration

1.2 混合储能系统结构

电动汽车双源混合储能系统结构如图 2 所示,该拓扑结构主要包含电压闭环控制器和功率电路(a)、电流闭环控制器和功率电路(b)以及输出电容和负载端断路器(c)。该全主动式混合储能系统的主要特点和新颖之处在于功率型储能装置(超级电容)由电流闭环控制器控制,能量型储能装置(锂离子动力电池)由电压闭环控制器控制,在稳定直流母线电压的基础上实现电动汽车需求功率在功率型储能装置和能量型储能装置之间的精确分配。

根据混合储能系统的结构和功能特点,输出直流母线、锂离子动力电池和超级电容之间能量流动可以是双向的,锂离子动力电池和超级电容的工作模式主要分为 3 种:放电模式、充放电模式和充电模式。

放电模式下的电流方向如图 3 所示,超级电容和锂离子动力电池共同向负载供电。此时负载端电压 V_o 、超级电容电流 i_1 和锂离子动力电池电流 i_2 为

$$\begin{cases} V_o = V_{UC} \frac{1}{1-D_{M_1}} = V_{bat} \frac{1}{1-D_{M_3}} \\ i_1(t) = \frac{1}{L_1} \int [V_{UC}(t) - V_o(t)(1-D_{M_1})] dt \\ i_2(t) = \frac{1}{L_2} \int [V_{bat}(t) - V_o(t)(1-D_{M_3})] dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{UC} 为超级电容端电压; V_{bat} 为锂离子动力电池端电压; D_{M_1} 为 M_1 占空比, D_{M_3} 为 M_3 占空比。

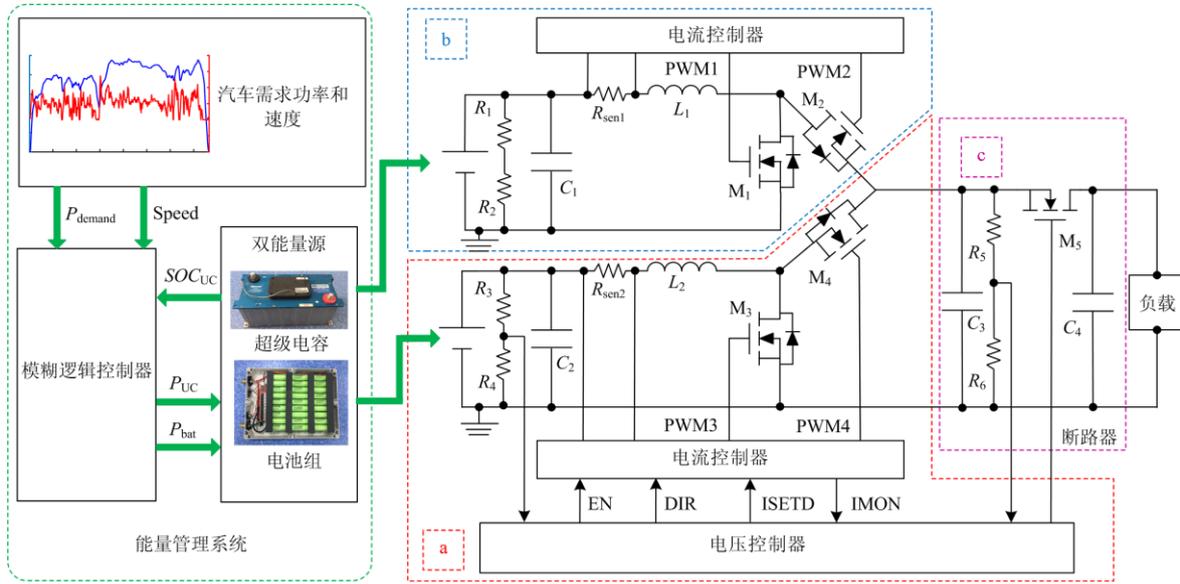


图 2 混合储能系统结构

Fig. 2 Structure of hybrid energy storage system

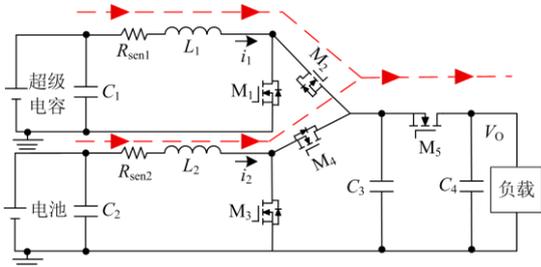


图 3 放电模式下的电流方向

Fig. 3 Current direction under discharging mode

充放电模式下的电流方向如图 4 所示，锂离子动力电池向负载和超级电容供电，此时负载端电压 V_O 、超级电容电流 i_1 和锂离子动力电池电流 i_2 为

$$\begin{cases} V_O = V_{UC} \frac{1}{1-D_{M_1}} = V_{bat} \frac{1}{1-D_{M_3}} \\ i_1(t) = \frac{1}{L_1} \int [V_O(t)(1-D_{M_1}) - V_{UC}(t)] dt \\ i_2(t) = \frac{1}{L_2} \int [V_{bat}(t) - V_O(t)(1-D_{M_3})] dt \end{cases} \quad (2)$$

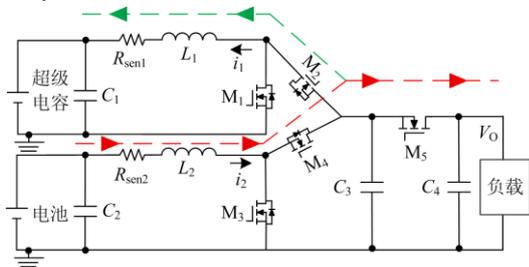


图 4 充放电模式下的电流方向

Fig. 4 Current direction under charging/discharging mode

充电模式下的电流方向如图 5 所示，负载输出端的制动电能通过多端口 DC/DC 变换器向锂离子动力电池和超级电容进行回馈充电。此时负载端电压 V_O 、超级电容电流 i_1 和锂离子动力电池电流 i_2 为

$$\begin{cases} V_O = V_{UC} \frac{1}{1-D_{M_1}} = V_{bat} \frac{1}{1-D_{M_3}} \\ i_1(t) = \frac{1}{L_1} \int [V_O(t)(1-D_{M_1}) - V_{UC}(t)] dt \\ i_2(t) = \frac{1}{L_2} \int [V_O(t)(1-D_{M_3}) - V_{bat}(t)] dt \end{cases} \quad (3)$$

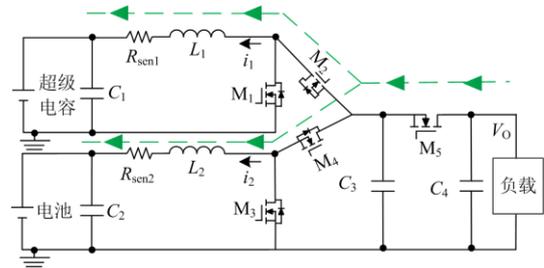


图 5 充电模式下的电流方向

Fig. 5 Current direction under charging mode

2 能量管理策略

如图 6 所示，能量管理策略中的模糊逻辑控制器主要包含模糊化、模糊推理和解模糊三个部分，模糊逻辑控制器的输入为超级电容 SOC、整车需求功率和速度，输出为锂离子动力电池功率。首先需要将模糊逻辑控制器的三个输入的精确值进行模糊

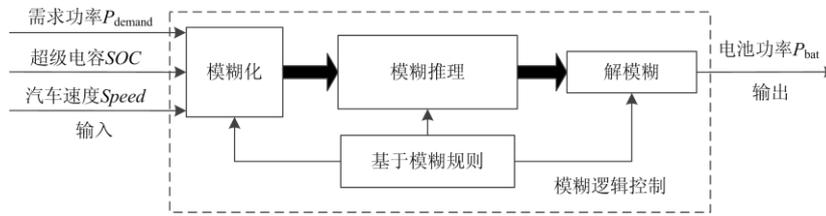


图 6 模糊逻辑控制方案

Fig. 6 Fuzzy logic control scheme

化,再将模糊化的输入通过模糊推理得出模糊结果,最后模糊结果经过解模糊转化为准确的模糊逻辑输出。锂离子动力电池功率、超级电容功率和电动汽车需求功率的关系为

$$P_{demand} = P_{bat} + P_{SC} \quad (4)$$

式中: P_{demand} 为电动汽车的需求功率; P_{bat} 为锂离子动力电池功率; P_{SC} 为超级电容的功率。

所设计的模糊控制器的输入输出子集如表1所示。

表 1 模糊控制器的输入输出子集

Table 1 Input and output subsets of fuzzy controller

变量	模糊子集
输入量 P_{demand}	VL、L、M、H、VH
输入量 $Speed$	L、M、H
输入量 SOC_{SC}	L、M、H
输出量 P_{bat}	VL、L、M、H、VH

模糊逻辑控制器选择具有计算简单和控制性能良好等特点的三角形、梯形函数作为隶属度函数的一部分,输入输出变量的隶属度函数如图 7 所示。

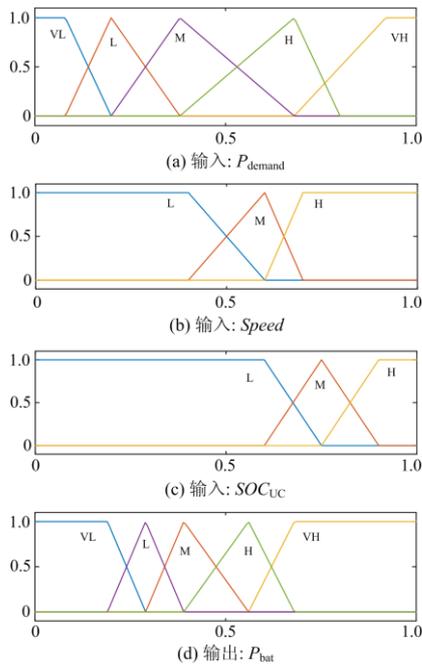


图 7 模糊控制器变量隶属度函数

Fig. 7 Fuzzy controller variable membership function

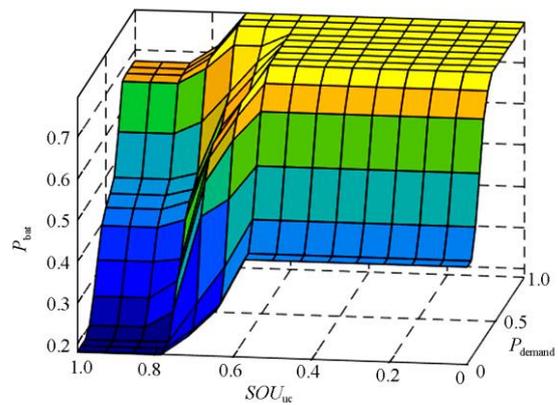
P_{demand} 有五个子集, $Speed$ 和 SOC_{UC} 各有三个子集,根据专家经验,所定义的 45 条模糊控制器的模糊控制规则如表 2 所示。

模糊控制器的逻辑控制规则输出界面如图 8 所示,当超级电容 SOC 比较充足时,锂离子动力电池输出功率相对较小,反之当超级电容 SOC 较低时,锂离子动力电池输出功率相对较大。当电动汽车转速较低时,锂离子动力电池输出功率相对较小。

表 2 模糊控制器的逻辑控制规则

Table 2 Logic control rules of fuzzy controller

	P_{bat}	P_{demand}				
		VL	L	M	H	VH
$Speed(SOC_{SC}=L)$	L	M	H	VH	VH	VH
	M	M	H	VH	VH	VH
	H	M	H	VH	VH	VH
$Speed(SOC_{SC}=M)$	L	VL	L	M	H	VH
	M	L	L	M	H	VH
	H	L	M	M	H	VH
$Speed(SOC_{SC}=H)$	L	VL	VL	L	M	M
	M	L	L	M	H	VH
	H	M	M	H	VH	VH



(a)

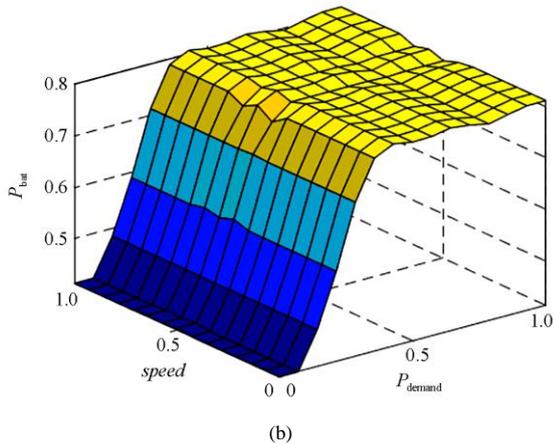


图 8 模糊控制器的逻辑控制规则输出界面

Fig. 8 Logic control rules output interface of fuzzy controller

3 实验及结果分析

3.1 实验装置

为了验证提出的全主动式双能量源混合储能系统和基于模糊逻辑的能量管理策略的有效性, 搭建了如图 9 和图 10 所示的实验平台, 实验设备具体参数如表 3 所示。

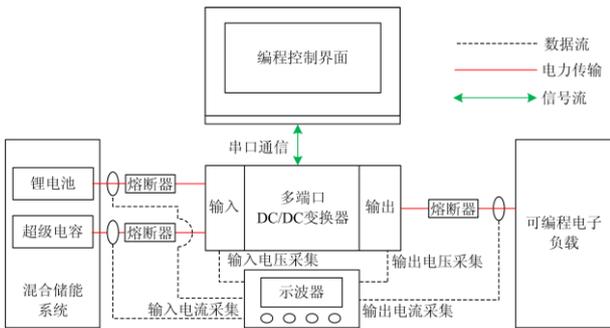


图 9 实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental equipment

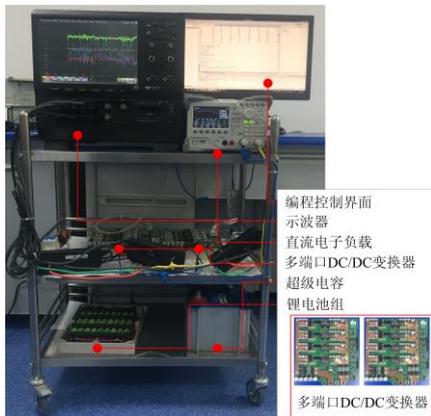


图 10 实验装置

Fig. 10 Photo of experimental equipment

3.2 实验过程及结果分析

实验流程如下:

- 1) 将模拟高速公路燃油经济性测试(Highway Fuel Economy Test, HWFET)工况一个循环周期车辆运行功率需求数据导入可编程电子负载 DL3021;
- 2) 设置输出端直流母线电压 40 V, 锂离子动力电池、超级电容与可编程电子负载连接至多端口变换器相应位置;
- 3) 使用示波器探头分别测量锂离子动力电池、超级电容与负载端电压和端电流;
- 4) 启动可编程电子负载, 记录模拟 HWFET 工况下实验数据, 如表 3。

图 11 为 HWFET 工况下的车速和功率需求曲线, 整个工况总计 766 s; 图 12 为实验过程中的直流母线电压和电流, 可见直流母线电流总体跟随整车功率需求, 直流母线电压除在个别电流跳变点出现较大波动外, 总体保持稳定。

表 3 实验平台参数表

Table 3 Parameters of the experimental facility

设备名称	参数(数值)
可编程电子负载 RIGOL	额定功率(200 W)
	额定电压(150 V)
	额定电流(40 A)
Maxwell 超级电容	额定电压(48V)
	额定电流(1 900 A)
锂离子动力电池组	额定电压(48 V)
	额定容量(51 AH)
多端口功率变换器	额定功率(1 kW)
	高压侧额定电流(20 A)
	低压侧电压(6~20 V)
	高压侧电压(20~55 V)
示波器	开关频率(100 kHz)
	MOSFET(RU1H130S)
	TELEDYNE MDA805A

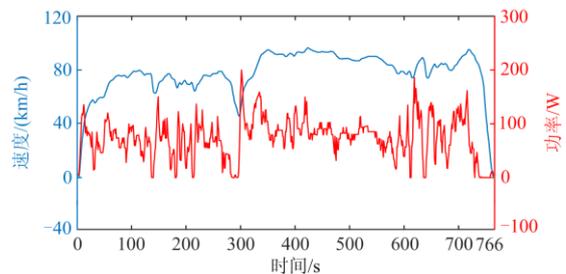


图 11 HWFET 工况车速和功率需求曲线

Fig. 11 Speed and power curves of HWFET driving cycle

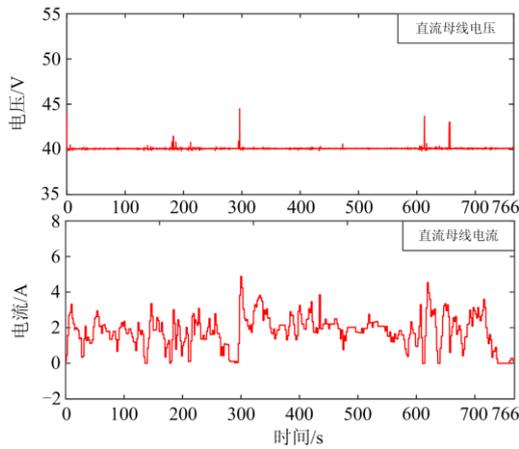


图 12 直流母线电压电流

Fig. 12 Voltage and current of DC bus

图 13 为锂离子动力电池和超级电容在实验过程中的电流波形,图 14 为实验过程中锂离子动力电池、超级电容和电子负载的功率曲线。由图 13 和图 14 可以看出:锂离子动力电池向电子负载提供相对稳定的功率,超级电容作为辅助能量源向电子负载

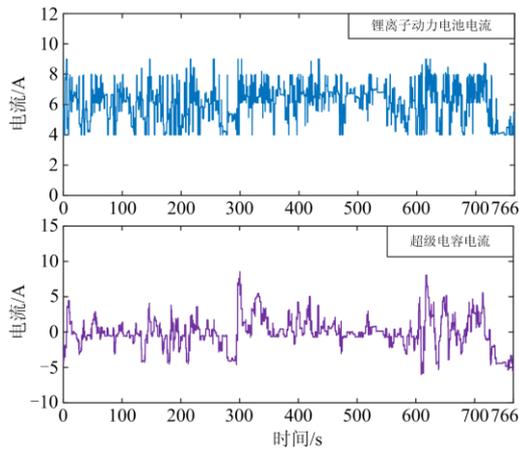


图 13 锂离子动力电池和超级电容输出电流

Fig. 13 Output currents of lithium-ion power battery and supercapacitor

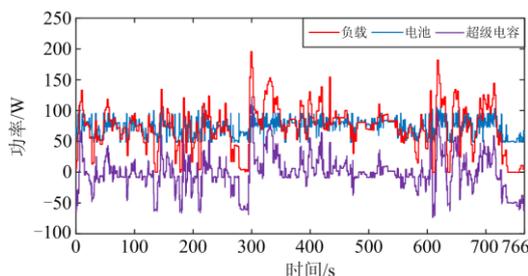


图 14 锂离子动力电池、超级电容和负载功率

Fig. 14 Power curves of lithium-ion power battery, super capacitor and load

提供峰值功率;在负载功率相对较小时,锂离子动力电池对超级电容进行充电。实验过程中,超级电容发挥出了削峰填谷的作用,避免锂离子动力电池大电流放电,达到了保护电池的作用。

为了凸显构建的混合储能装置和提出的基于模糊逻辑能量管理策略的有效性,增加了对比实验,即在相同的 HWFET 工况下使单独的锂离子动力电池通过直流变换器给直流母线供电,图 15 为两种不同策略下的电池电流变化曲线。电池电流的均方根值可以作为衡量电池老化影响的指标^[30],电池电流的均方根值表达式为

$$I_{bat}^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |I_{bat,n}|^2} \quad (5)$$

经过计算,基于混合储能的电池电流的均方根值比纯电池电流的均方根值减小 18.68%,而且电池的电流峰值也减小了 50.96%。

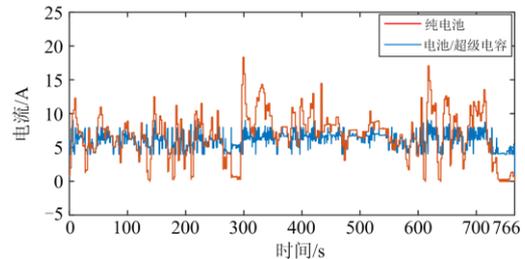


图 15 基于不同策略的电池电流

Fig. 15 Battery currents based on different strategies

4 总结

本文提出了全主动式双能量源混合储能系统结构和基于模糊逻辑的能量管理策略,并在 HWFET 工况下进行了实验,实验结果表明:

1) 所提出的多端口直流变换器可以灵活控制各输入输出端口的电流且允许输入输出端口电压不同,其中功率型储能装置(超级电容)由电流环控制,能量型储能装置(锂离子动力电池)由电压环控制,在稳定直流母线电压的基础上实现能量型储能装置和功率型储能装置之间的功率分配。

2) 所提出的能量管理策略综合考虑超级电容 SOC、整车需求功率和车速因素,为超级电容和锂离子动力电池提供了一个合理的功率分配方案。实验过程中,锂离子动力电池输出电流幅度保持在合理范围内,超级电容作为辅助能源发挥出了削峰填谷的作用。实验结果表明:和纯电池储能系统相比,电池电流的均方根值减小 18.68%,而且电池的电流峰值也减小了 50.96%,从而保护了锂离子动力电池免受大电流影响,达到延长电池寿命的目的。

参考文献

- [1] SU W, EICHI H R, ZENG W, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 1-10.
- [2] BARRERO R, MIERLO J V, TACKOEN X. Energy savings in public transport[J]. *Vehicular Technology Magazine IEEE*, 2008, 3(3): 26-36.
- [3] 官嘉玉, 江修波, 刘丽军. 考虑电动汽车随机充电行为及低碳效益的充电站规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(4): 93-100.
- GUAN Jiayu, JIANG Xiubo, LIU Lijun. Optimal allocation of charging stations considering stochastic charging behavior and low carbon efficiency of electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(4): 93-100.
- [4] 程杉, 许林峰, 孙伟斌, 等. 基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4): 3-12.
- CHENG Shan, XU Linfeng, SUN Weibin, et al. Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability of distribution system[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 3-12.
- [5] 张娅婷, 陈中, 段然, 等. 考虑主动响应的电动汽车充电站-配电网协同规划[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5): 71-77.
- ZHANG Yating, CHEN Zhong, DUAN Ran, et al. Collaborative planning of electric vehicle charging station-distribution network considering active response [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5): 71-77.
- [6] ZHANG J, LIU C, YUAN R, et al. Design scheme for fast charging station for electric vehicles with distributed photovoltaic power generation[J]. *Global Energy Interconnection*, 2019, 2(2): 150-159.
- [7] 刘坚. 电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 44-50.
- LIU Jian. An analysis on the application potential and position of electric vehicle energy storage[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 44-50.
- [8] 胡胜, 卢铃, 罗勇, 等. 电池储能变电站噪声特性及控制技术[J]. *高压电器*, 2019, 55(11): 283-289.
- HU Sheng, LU Ling, LUO Yong, et al. Research on noise characteristics and control technology of battery energy storage substation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(11): 283-289.
- [9] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [10] 黄浩伟. 电动汽车, 任重而道远[J]. *新能源汽车供能技术*, 2018, 2(4): 23-27.
- HUANG Haowei. Electric vehicle still have a long way to go[J]. *Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles*, 2018, 2(4): 23-27.
- [11] SENER A S. Improving the life-cycle and SOC of the battery of a modular electric vehicle using ultra-capacitor[C] // 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 3-6, 2019, Brasov, Romania: 611-614.
- [12] 张宁, 杨洪明, 徐岩, 等. 局部阴影条件下太阳能电池-超级电容器件的充放电控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 72-79.
- ZHANG Ning, YANG Hongming, XU Yan, et al. Charge and discharge control method of solar cell-supercapacitor under partial shading condition[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 72-79.
- [13] KHALIGH A, LI Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [14] SHEN J, DUSMEZ S, KHALIGH A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(4): 2112-2121.
- [15] FENG L, ZHANG J, LI G, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [16] DEZZA F C, MUSOLINO V, PIEGARI L, et al. Hybrid battery-supercapacitor system for full electric forklifts[J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2019, 9(1): 16-23.
- [17] MAMUN A A, LIU Z, RIZZO D M, et al. An integrated design and control optimization framework for hybrid military vehicle using lithium-ion battery and supercapacitor as energy storage devices[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(1): 239-251.
- [18] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*,

- 2014, 42(2): 1-6.
- SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [19] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
- ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [20] LU X, WANG H. Optimal sizing and energy management for cost-effective PEV hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3407-3416.
- [21] 专祥涛, 崔婷婷. 电动汽车复合电源系统能量管理研究[J]. 电源技术, 2020, 44(4): 549-606.
- ZHUAN Xiangtao, CUI Tingting. Research on energy management of composite power system for electric vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(4): 549-606.
- [22] 齐宏芳, 罗文广, 于静美. 电动汽车复合电源控制策略及其实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(10): 195-199.
- QI Hongfang, LUO Wenguang, YU Jingmei. Study on hybrid energy storage system control strategy and its testing[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(10): 195-199.
- [23] 尹炳琪, 马彬, 杨朝红, 等. 融合路况信息的复合电源模型预测控制方法[J]. 电源技术, 2020, 44(4): 557-561.
- YIN Bingqi, MA Bin, YANG Chaohong, et al. Model predictive control method of hybrid energy storage system based on route information[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(4): 557-561.
- [24] 杜祥伟, 沈艳霞, 李静. 基于模型预测控制的直流微网混合储能能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 69-75.
- DU Xiangwei, SHEN Yanxia, LI Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 69-75.
- [25] 李峰, 王中平, 王珂, 等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合储能有轨电车能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊): 752-759.
- LI Feng, WANG Zhongping, WANG Yu, et al. Energy management strategy of tram with hybrid energy storage system based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 752-759.
- [26] SHEN J, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 223-231.
- [27] 卢芸, 徐骏. 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 149-154.
- LU Yun, XU Jun. Wind power hybrid energy storage capacity configuration based on wavelet packet decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 149-154.
- [28] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58-65.
- LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65.
- [29] 赵国柱, 黄相, 孙琼琼, 等. 模糊控制的电动车复合电源能量管理研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(1): 48-55.
- ZHAO Guozhu, HUANG Xiang, SUN Qionqiong, et al. Study on hybrid power energy management of electric vehicles based on fuzzy control[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(1): 48-55.
- [30] TROVO J P F, ROUX M A, MÉNARD R, et al. Energy- and power-split management of dual energy storage system for a three-wheel electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 5540-5550.

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2021-02-23

作者简介:

安小宇(1979—), 男, 副教授, 研究方向为系统控制与优化; E-mail: anxyu@zzuli.edu.cn

李元丰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合储能装置能量管理与优化. E-mail: lyf_zzuli@163.com

(编辑 葛艳娜)