



电动汽车混合储能系统双判据多模式功率分配策略

邵雨晴 张红娟 高妍

Multi-mode Power Distribution Strategy With Dual Criteria for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles

SHAO Yuqing, ZHANG Hongjuan, GAO Yan

引用本文:

邵雨晴, 张红娟, 高妍. 电动汽车混合储能系统双判据多模式功率分配策略[J]. 现代电力, 2022, 38(0): 1-7. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0007

SHAO Yuqing, ZHANG Hongjuan, GAO Yan. Multi-mode Power Distribution Strategy With Dual Criteria for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles[J]. Modern Electric Power, 2022, 38(0): 1-7. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

计及电池寿命的电动汽车参与电网调峰策略

Strategy of Electric Vehicles Participating Peak Load Regulation of Power Grid Considering Battery Life

现代电力. 2020, 37(5): 510-517 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0060>

基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略

Hybrid Energy Storage Strategy Based on Parameter Optimized Variational Mode Decomposition

现代电力. 2021, 38(1): 51-59 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0193>

飞轮储能式电动汽车充电站的分布式协同控制策略

Research of Distributed Cooperative Control Strategy for Fast Charging Stations with Flywheel Energy Storage System

现代电力. 2020, 37(5): 526-531 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0120>

平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略

Adaptive Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Mitigating Wind Power Fluctuations

现代电力. 2020, 37(6): 646-653 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0949>

基于IBQPSO算法的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略

Coordinated Charging Strategy for Electric Vehicles in Temporal-spatial Dimension Based on IBQPSO Algorithm

现代电力. 2019, 36(6): 1-8 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/1>

计及电动汽车需求差异的智能电网调度策略

Smart Grid Dispatching Strategy Considering the Difference of Electric Vehicle Demand

现代电力. 2021, 38(2): 221-229 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0283>

电动汽车混合储能系统双判据多模式功率分配策略

邵雨晴, 张红娟, 高妍

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030024)

Multi-mode Power Distribution Strategy With Dual Criteria for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles

SHAO Yuqing, ZHANG Hongjuan, GAO Yan

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China)

摘要: 针对混合储能系统中电池和超级电容的功率分配问题, 提出双判据多模式功率分配策略。以电动汽车的动力学模型为基础, 综合直流母线功率和超级电容荷电状态两项参数, 动态调整混合储能系统的工作模式; 参考储能系统效率模型, 调整电池和超级电容的给定功率, 实现混合储能系统的功率分配。搭建混合储能系统实验平台, 开展电动汽车工况模拟和功率分配策略研究。实验结果表明: 与采用固定比例功率分配策略相比, 使用双判据多模式功率分配策略可将电池输出功率的均值和峰值分别降低16.98%和24.72%, 并且将混合储能系统的能量利用率提升5.35%。

关键词: 混合储能系统; 功率分配策略; 电动汽车; 电池; 超级电容

Abstract: To address the issue of the power distribution between battery and supercapacitor in hybrid energy storage system, a multi-mode power distribution strategy with dual criteria is proposed. Based on the electric vehicle dynamics model, the proposed strategy integrates two parameters, the power in the DC bus and the charge state of the supercapacitor, to dynamically switch the working mode of the hybrid energy storage system. The power settings of battery and supercapacitor are adjusted in accordance with the efficiency model of energy storage system. Finally, the power is distributed within hybrid energy storage system. The research on electric vehicle working condition simulation and power distribution strategy was carried out in an experimental platform of hybrid energy storage system. The experimental results indicate that, compared

with the fixed proportion distribution strategy, the multi-mode power distribution strategy with dual criteria can reduce the average and maximum power of battery by 16.98% and 24.72% respectively, and enhance the energy utilization rate of the hybrid energy storage system by 5.35% simultaneously.

Keywords: hybrid energy storage system; power distribution strategy; electric vehicle; battery; supercapacitor

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0007

0 引言

为了实现碳中和目标, 需要进一步加快电力和交通领域的发展进程, 重点关注可再生能源和储能技术。电动汽车具有低碳环保的优点, 同时还可以回收制动能量, 提高能量利用率, 这对节能减排有很大帮助。然而, 在电动汽车行驶过程中, 存在大量不确定性, 峰值功率和负载波动容易对电池造成不可逆的损伤^[1-3]。如果采用超级电容辅助电池进行供电, 并回收汽车的制动能量, 不仅可以提高电动汽车的续航能力, 还可以保护电池, 从而降低维护和换电成本^[4]。因此, 许多研究采用电池和超级电容组成的混合储能系统作为电动汽车的储能系统^[5]。混合储能系统很好地弥补了单一电池储能系统的不足^[6], 对于提升电动汽车的性能起到积极作用。

在日常行驶过程中, 电动汽车需要频繁启动、制动和加减速。当汽车启动或加速时, 直流侧储能系统放电, 通过逆变器为电机提供电能, 电机工作在电动状态; 当汽车制动或减速时, 电机工作在发电状态, 电能通过逆变器回馈给直流侧, 储能系统充电^[7]。为了使储能系统有序地进行充、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775363); 山西省重点研发计划项目(201803D121124)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51775363); Key Research and Development Projects of Shanxi Province (201803D121124).

放电, 需要根据工况实时切换混合储能系统的工作模式, 实现电池和超级电容功率的合理调度和动态分配^[8], 从而保证电动汽车储能系统的节能、安全和高效^[9]。因此, 对于混合储能电动汽车, 设计合理的功率分配策略是实现工作模式快速切换、功率快速响应和能量利用率提升的关键因素^[10], 也是目前混合储能电动汽车领域最为关键的研究问题^[11]。

针对以上问题, 为了提高混合储能系统的能量利用率, 并且对电池构成一定的保护, 本文提出一种双判据多模式功率分配策略。本策略基于直流母线功率和超级电容器荷电状态 (state of charge, SOC) 切换电池和超级电容的工作模式, 参考电动汽车的动力学模型和储能系统效率模型设置电池和超级电容的功率给定, 最终通过动态工作模式调整和功率给定完成混合储能系统的功率分配。本文利用混合储能系统实验平台, 对策略的可行性和有效性进行验证。

1 混合储能系统

1.1 混合储能系统结构

图1为混合储能系统结构, 系统采用主动并联型结构^[12-13], 由电池储能系统、超级电容储能系统、电机驱动系统、传感器、制动单元以及上位机组成。其中, 电池储能系统包括电池和双向DC/DC变换器, 超级电容储能系统包括超级电容和双向DC/DC变换器, 电机驱动系统包括变频器和永磁同步电机。电池储能系统和超级电容储能系统共直流母线连接, 当电机工作在电动状态时, 储能系统通过直流母线为电机驱动系统提供电能, 当电机工作在发电状态时, 电机驱动系统产生的再生电能通过直流母线回馈给储能系统。

传感器包括电压传感器和电流传感器, 可以采集系统各处的电压和电流反馈给上位机, 上位机不仅实时监测电压和电流的情况, 还可以据此计算实时功率和SOC等参数。

1.2 储能系统效率模型

如图1所示, 电压传感器1和电流传感器1分别测量电池输出的电压 U_b 和电流 i_b , 电压传感器2和电流传感器2分别测量超级电容输出的电压 U_{SC} 和电流 i_{SC} , 电压传感器3和电流传感器3分别测量直流母线电压 U_{bus} 和电流 i_{bus} , 电流传感器4和电流传感器5分别测量双向DC/DC变换器1的高压侧输出电流 i_{bH} 和双向DC/DC变换器2的高压侧输出电流 i_{SCH} , 即电池储能系统和超级电容储能系统的输出电流。

因此, 电池的输出功率 P_b 和电池储能系统的输出功率 P_{bH} 的计算公式分别为

$$\begin{cases} P_b = U_b i_b \\ P_{bH} = U_{bus} i_{bH} \end{cases} \quad (1)$$

超级电容的输出功率 P_{SC} 和超级电容储能系统的输出功率 P_{SCH} 的计算公式分别为

$$\begin{cases} P_{SC} = U_{SC} i_{SC} \\ P_{SCH} = U_{bus} i_{SCH} \end{cases} \quad (2)$$

直流母线功率需求, 即混合储能系统的输出功率 P_{bus} 的计算公式为

$$P_{bus} = U_{bus} i_{bus} \quad (3)$$

定义电池储能系统的工作模式 p 和超级电容储能系统的工作模式 q 为

$$p, q = \begin{cases} 1, & \text{放电} \\ -1, & \text{充电} \end{cases} \quad (4)$$

参考经典的Rint模型, 对电池和超级电容进行建模, 电池储能系统的效率 η_b 和超级电容储能

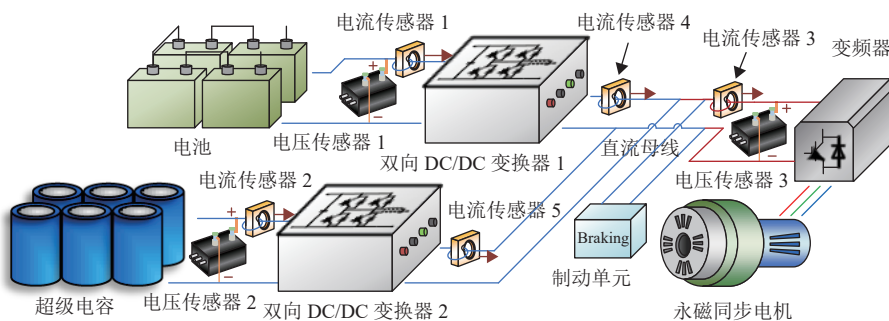


图1 混合储能系统结构

Fig. 1 Structure of hybrid energy storage system

系统的效率 η_{SC} 的计算公式^[14-15] 分别为

$$\begin{cases} \eta_b = \left(\frac{P_{bH}}{P_b + R_b i_b^2} \right)^p \\ \eta_{SC} = \left(\frac{P_{SCH}}{P_{SC} + R_{SC} i_{SC}^2} \right)^q \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_b 、 R_{SC} 分别表示电池和超级电容的等效内阻。

混合储能系统的实时能量利用率 η_{HESS} 的公式为

$$\eta_{HESS} = \begin{cases} \frac{P_{bus}}{P_b + P_{SC}}, P_{bus} \geq 0 \\ \frac{P_b + P_{SC}}{P_{bus}}, P_{bus} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

混合储能系统的平均能量利用率 H_{HESS} 的公式为

$$H_{HESS} = \frac{E_{bus}}{E_b + E_{SC}} \quad (7)$$

式中 E_b 、 E_{SC} 和 E_{bus} 分别表示电池输出的能量、超级电容输出的能量和直流母线上输出的能量。

1.3 电动汽车动力学模型

为了分析混合储能电动汽车的功率特性，对电动汽车进行建模，以获取直流母线的功率需求。假设所研究的电动汽车行驶在平坦的道路上，其动力学模型^[16] 可以表示为

$$mgfv + \frac{1}{2} C_D A \rho v^3 + mv \frac{dv}{dt} = P_{bus} (\eta_T \eta_m)^i \quad (8)$$

式中： m 为电动汽车质量，取 1700 kg； g 为重力加速度，取 9.8 m/s²； f 为滚动阻力系数，取 0.01； v 为电动汽车车速； C_D 为空气阻力系数，取 0.24； A 为电动汽车迎风面积，取 3 m²； ρ 为空气密度，取 1.2 kg/m³； η_m 、 η_T 分别为电动汽车的电机和传动效率，分别取 87.4% 和 85.8%； i 为电动汽车的运行状态，即

$$i = \begin{cases} 1, \text{ 电动} \\ -1, \text{ 制动} \end{cases} \quad (9)$$

定义 P_0 为克服外界阻力的基本功率， P_a 为电动汽车加减速时加速度产生的加速功率，由文献^[17] 可知：

$$P_{bus} = P_0 + P_a = \left[\frac{mgfv + 1/2 C_D A \rho v^3}{(\eta_T \eta_m)^i} \right] + \left[\frac{mv \cdot dv/dt}{(\eta_T \eta_m)^i} \right] \quad (10)$$

2 双判据多模式功率分配策略

本文提出的双判据多模式功率分配策略以直

流母线功率和超级电容 SOC 作为工作模式切换的 2 个判断条件，将混合储能系统划分为电源模式、回收模式、混合模式和空闲模式 4 种工作模式。

在设定判断条件时，直流母线功率和超级电容 SOC 均被划分为 3 个区间。直流母线功率的区间设定考虑了功率需求的性质和大小，即是否为制动功率或是否大于基本功率。超级电容 SOC 的区间设定则考虑了储能元件的 SOC 最优工作区间。

其中，超级电容的 SOC 的计算公式^[18-19] 为

$$\begin{cases} SOC_{SC} = SOC_{SC0} - \frac{\int i_{SC} dt}{C U_{SCN}} \\ SOC_{SC0} = \frac{U_{SC0}^2}{U_{SCN}^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中： SOC_{SC} 、 SOC_{SC0} 分别为超级电容的 SOC 和 SOC 的初始值； C 为超级电容的额定容量； U_{SCN} 、 U_{SC0} 分别为超级电容的额定电压和电压初始值。

双判据多模式功率分配策略以超级电容作为回收制动能量的主要元件。当存在制动功率时，超级电容优先充电，直至充满才考虑给电池充电。因此，在回收模式中不包括电池和超级电容同时充电的情况。此外，考虑到超级电容的能量密度较低，在混合模式中并未设计由超级电容向电池充电的情况，避免了由于储能系统互相充电而产生额外的能量损耗。

综合以上两点，双判据多模式功率分配策略共包含 7 种具体的工作模式，具体内容如图 2 和表 1 所示，图 2 为模式判断流程图，表 1 列出各种模式下电池和超级电容的功率给定，表 1 中 P_{bg} 、 P_{SCg} 分别表示分配给电池和超级电容的功率^[20]。

3 实验结果与分析

搭建图 3 所示混合储能系统实验平台，开展

表 1 电池和超级电容的功率给定

Table 1 Power setting of battery and supercapacitor

模式	充放电方式	P_{bg}	P_{SCg}
电源模式	电池放电	P_{bus}/η_b	0
	超级电容放电	0	P_{bus}/η_{SC}
	电池放电+超级电容放电	P_0/η_b	P_a/η_{SC}
回收模式	电池充电	$P_{bus} \times \eta_b$	0
	超级电容充电	0	$P_{bus} \times \eta_{SC}$
混合模式	电池放电+超级电容充电	P_0/η_b	$P_a \times \eta_{SC}$
空闲模式	—	0	0

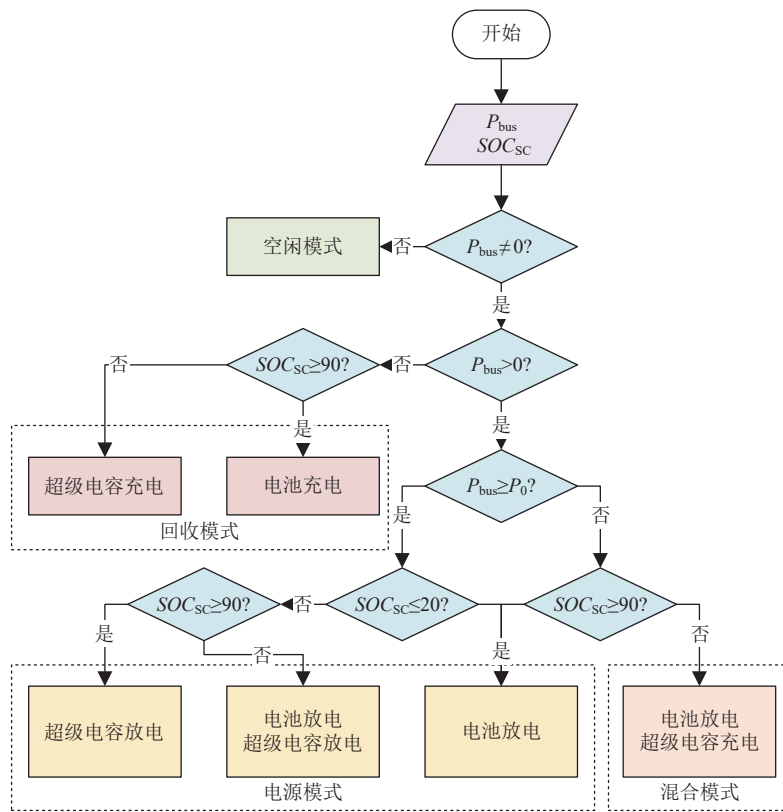


图 2 双判据多模式功率分配策略的模式判断流程图

Fig. 2 Flow chart of mode judgment in multi-mode power distribution strategy with dual criteria

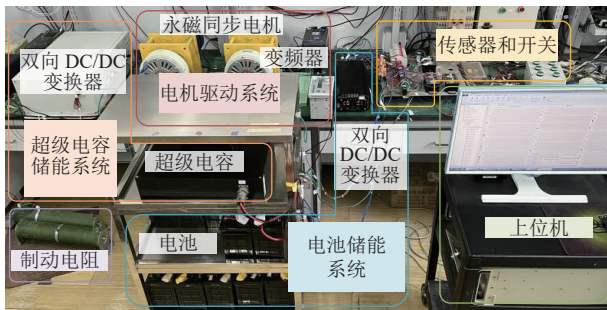


图 3 混合储能系统实验平台

Fig. 3 Experimental platform of hybrid energy storage system

双判据多模式功率分配策略的实验研究，表 2 为实验平台参数。

本文采用电动汽车的全球统一轻型车辆测试循环 (worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC) 工况验证混合储能系统的功率分配策略，通过式 (6) 可以计算得到此工况下的功率需求。

表 2 实验平台参数

Table 2 Parameters of experimental platform

参数	储能系统 电压/V	电池 容量/Ah	超级电容 容量/F	电机 功率/kW	电机额定转速 (r/min)
额定值	200	36	1.6	1.1	1500

WLTC 工况包括 4 个阶段，分别模拟了城市、城郊、乡村和高速公路 4 种常见的驾驶工况，共计 1800 s。

图 4(a) 为电动汽车 WLTC 工况的车速和功率需求曲线。针对本实验平台，设计电机 WLTC 工况以对应电动汽车 WLTC 工况。图 4(b) 为电机 WLTC 工况的转速和功率需求曲线。对图 4(b) 中电机功率需求曲线的功率轴正负半轴分别积分，由图 4 可知，在整个工况中，直流母线需要约 135.98 kW 的电动能量，并产生约 19.99 kW 的制动能量。

分别采用固定比例功率分配策略和所提出的双判据多模式功率分配策略，对混合储能系统进行控制，完成电机 WLTC 工况实验，图 5 为 2 次实验过程中电池和超级电容的功率波形。图 6 为 2 次实验过程中混合储能系统的工作模式。

如图 5(a) 所示，采用固定比例功率分配策略时，电池仍然承担大部分功率冲击，且在整个工况期间，电池功率的波动较大，不仅折损电池寿命，甚至可能引发安全问题。然而，如图 5(b) 所示，采用双判据多模式功率分配策略时，冲击功

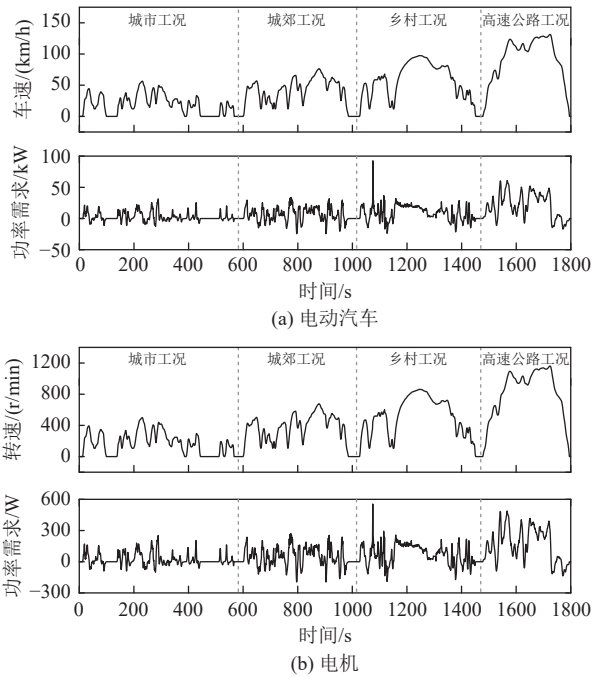


图 4 WLTC 工况的转速和功率需求曲线

Fig. 4 Speed and power demand curve under WLTC operating condition

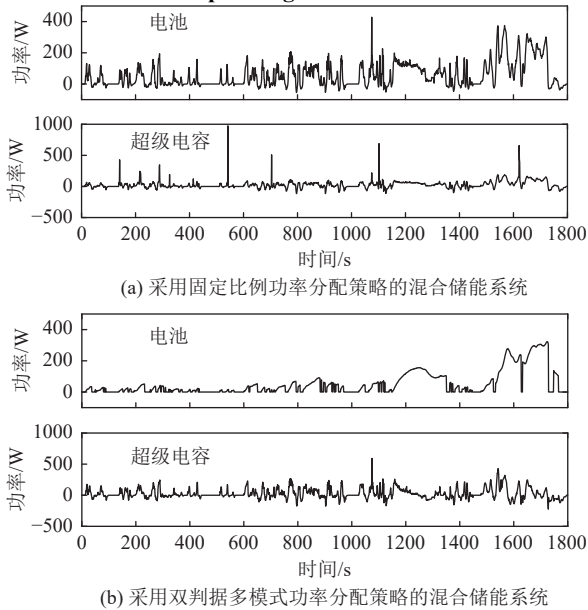


图 5 电池和超级电容的功率波形

Fig. 5 Power waveforms of battery and supercapacitor

率全部由超级电容承担，电池功率的幅值和波动明显减小。

如图 6(a) 所示，采用固定比例功率分配策略时，混合储能系统仅在放电模式和充电模式间切换。然而，如图 6(b) 所示，采用双判据多模式功率分配策略时，混合储能系统在 4 种工作模式间灵活切换。

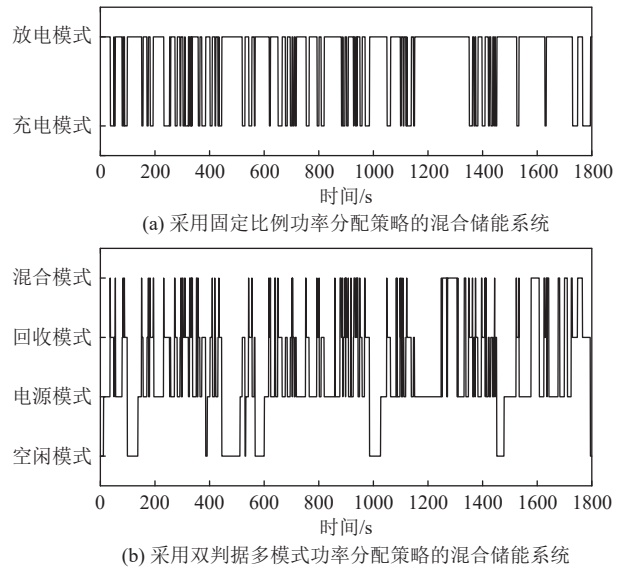


图 6 混合储能系统的工作模式

Fig. 6 Working mode of hybrid energy storage system

采用固定比例功率分配策略和双判据多模式功率分配策略时，电池功率的均值分别为 61.56 W 和 51.11 W，电池功率的峰值分别为 428.50 W 和 322.58 W。在电池储能系统输出更多能量的前提下，所提分配策略将电池功率的均值和峰值分别降低了 16.98% 和 24.72%。这对电池起到了很好的保护作用，有利于提升电动汽车的经济性和安全性。

采用固定比例功率分配策略和双判据多模式功率分配策略时，电池的 SOC 降分别为 0.36 和 0.33，电池的安时通量分别为 0.15 和 0.12。SOC 降和安时通量分别减小了 8.33% 和 20.00%，说明采用所提分配策略可以减少电池电量消耗，从而增加一定的续航里程并适当延长电池寿命。

利用式 (6) 分别计算 2 次实验过程中混合储能系统的实时能量利用率，绘制曲线参见图 7。如图 7(a) 所示，采用固定比例功率分配策略时，混合储能系统能量利用率的平均值在 84% 左右。如图 7(b) 所示，采用双判据多模式功率分配策略时，能量利用率的平均值达到了 88%。以上数据说明，所提分配策略有效提高了混合储能系统的实时能量利用率。

通过对功率曲线积分完成实验过程中的能量消耗统计，表 3 中列出了混合储能系统的输出能量。根据式 (7) 以及表 3 中的数据，计算混合储能系统的平均能量利用率，如表 4 所示。

与采用固定比例功率分配策略相比，采用双

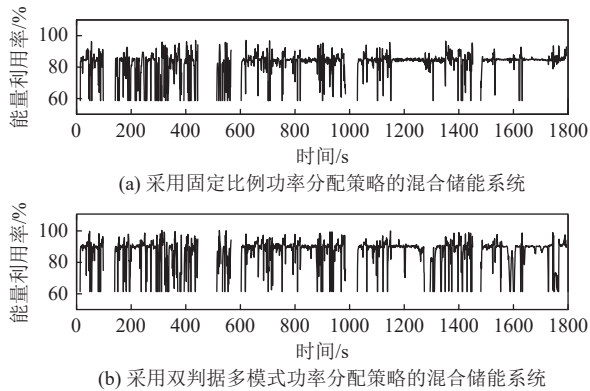


图7 实时能量利用率曲线

Fig. 7 Real time energy utilization curves

表3 混合储能系统输出能量

Table 3 Output of hybrid energy storage system kJ

功率分配策略	电池输出能量	电池储能系统输出能量	超级电容输出能量	超级电容储能系统输出能量	混合储能系统输出能量
固定比例	99.48	81.39	47.97	34.60	147.36
双判据多模式	92.05	81.60	45.93	34.39	137.98

表4 混合储能系统平均能量利用率

Table 4 Average energy utilization efficiency of hybrid energy storage system %

功率分配策略	电池能量利用率	超级电容能量利用率	混合储能系统能量利用率
固定比例	81.82	72.13	78.71
双判据多模式	88.65	74.87	84.06

判据多模式功率分配策略将电池和超级电容的能量利用率分别提高了6.83%和2.74%。这是因为，当采用固定比例功率分配策略时，电池频繁地在充电和放电模式之间切换，然而电池的充放电响应不够快速，不仅对于制动能量的回收不够及时，还消耗了更多的电动能量。采用双判据多模式功率分配策略充分考虑了电池和超级电容的特性，以此为依据划分功率给定，快速响应直流母线的功率需求，实现了对于制动能量的充分回收和再次利用，因此有效提升了混合储能系统的能量利用率。最终，混合储能系统的能量利用率提高了5.35%。

综上所述，在实验过程中，本文提出的适用于混合储能系统的双判据多模式功率分配策略有效保护了电池免受突变功率和大功率的冲击，减少了电池电量消耗，并且提高了混合储能系统的能量利用率。

4 结论

本文针对混合储能电动汽车中电池和超级电容的功率分配问题，提出了双判据多模式功率分配策略。搭建了混合储能系统实验平台，完成了电动汽车WLTC工况的电机模拟实验。

1) 双判据多模式功率分配策略同时考虑功率给定和模式给定。功率需求由电动汽车的动力学模型和混合储能系统的效率模型确定，工作模式根据混合储能系统的特点分为电源模式、回收模式、混合模式和空闲模式4种。

2) 双判据多模式功率分配策略充分发挥了混合储能系统的优势，能够快速响应母线功率需求，降低对电池的冲击和消耗，有效提高了系统能量利用率。实现了电动汽车在节能环保、经济性和安全性等方面一定的性能提升。

参考文献

- [1] 申永鹏, 孙建彬, 王延峰, 等. 电动汽车混合储能装置小波功率分流方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4636-4646.
SHEN Yongpeng, SUN Jianbin, WANG Yanfeng, *et al.* Power distribution method of wavelet for hybrid energy storage systems in an electric vehicle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4636-4646 (in Chinese).
- [2] 尚彤, 崔学深, 徐明荣, 等. 蓄电池-超级电容混合储能系统放电控制策略[J]. 电源技术, 2017, 41(4): 595-597.
SHANG Tong, CUI Xueshen, XU Mingrong, *et al.* Discharge control strategies of supercapacitor-battery hybrid energy storage system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(4): 595-597 (in Chinese).
- [3] WANG Yujie, WANG Li, LI Mince, *et al.* A review of key issues for control and management in battery and ultra-capacitor hybrid energy storage systems[J]. *eTransportation*, 2020(4): 100064.
- [4] SONG Ziyou, HOFMANN H, LI Jianqiu, *et al.* A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 274: 400-411.
- [5] GOLCHOUBIAN P, AZAD N L. Real-time nonlinear model predictive control of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(11): 9678-9688.
- [6] XIONG Rui, CHEN Huan, WANG Chun, *et al.* Towards a

- smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1228–1240.
- [7] 刘新天, 葛德顺, 何耀, 等. 基于电池 SOC 的永磁同步电机能量回馈策略研究 [J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(11): 46–52.
LIU Xintian, GE Deshun, HE Yao, *et al.* Energy feedback strategy of permanent magnet synchronous motor based on battery SOC[J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(11): 46–52(in Chinese).
- [8] LI Yunwu, HUANG Xueyan, LIU Dexiong, *et al.* Hybrid energy storage system and energy distribution strategy for four-wheel independent-drive electric vehicles[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 220(20): 756–770.
- [9] 刘畅. 锂电池与超级电容混合储能系统的优化配置与能量管理 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
LIU Chang. The configuration optimization and energy management for Li-ion battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [10] 王晓姬, 张红娟, 孙世镇, 等. 混合储能系统动态功率控制策略 [J]. *电源技术*, 2022, 46(9): 1062–1065.
WANG Xiaoji, ZHANG Hongjuan, SUN Shizhen, *et al.* Dynamic power control strategy for hybrid energy storage system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2022, 46(9): 1062–1065(in Chinese).
- [11] LU Xiaoying, WANG Haoyu. Optimal sizing and energy management for cost-effective PEV hybrid energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3407–3416.
- [12] PODDER A K, CHAKRABORTY O, ISLAM S, *et al.* Control strategies of different hybrid energy storage systems for electric vehicles applications[J]. *IEEE Access*, 2021(9): 51865–51895.
- [13] BABU T S, VASUDEVAN K R, RAMACHANDARAMURTHY V K, *et al.* A comprehensive review of hybrid energy storage systems: converter topologies, control strategies and future prospects[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 148702–148721.
- [14] 林泓涛, 姜久春, 贾志东, 等. 权重系数自适应调整的混合储能系统多目标模型预测控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5538–5547.
LIN Hongtao, JIANG Jiuchun, JIA Zhidong, *et al.* Multi-objective model predictive control for hybrid energy storage system with adaptive adjustment of weight coefficients[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5538–5547(in Chinese).
- [15] 张卫, 杨珏, 张文明, 等. 纯电动汽车蓄电池-超级电容复合能源系统研究 [J]. *电测与仪表*, 2019, 56(3): 82–90.
ZHANG Wei, YANG Jue, ZHANG Wenming, *et al.* Research on battery-supercapacitor hybrid energy system for pure electric vehicle[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2019, 56(3): 82–90(in Chinese).
- [16] 赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车的跟车控制与能量管理 [J]. *自动化学报*, 2022, 48(1): 162–170.
ZHAO Xiuchun, GUO Ge. Tracking control and energy management of hybrid electric vehicles[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(1): 162–170(in Chinese).
- [17] ZHANG Lijun, YE Xianming, XIA Xiaohua, *et al.* A real-time energy management and speed controller for an electric vehicle powered by a hybrid energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(10): 6272–6280.
- [18] WANG Li, LI Mince, WANG Yujie, *et al.* Energy management strategy and optimal sizing for hybrid energy storage systems using an evolutionary algorithm[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 14283–14293.
- [19] FU Zhumu, LI Zhenhui, SI Pengju, *et al.* A hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid electric vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(39): 22146–22159.
- [20] LIU Yanwei, LI Zhenye, LIN Ziyue, *et al.* Multi-objective optimization of energy management strategy on hybrid energy storage system based on Radau Pseudospectral method[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 112483–112493.

收稿日期: 2023-01-06

作者简介:

邵雨晴 (1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为混合储能技术, E-mail: shaoyuqing0346@163.com;

张红娟 (1974), 女, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为电气节能技术、电气检测技术和电力电子新技术, E-mail: zhanghongjuan@tyut.edu.cn;

高妍 (1969), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电气检测技术和自动控制技术, E-mail: gaoyantylg@163.com。