

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210839

车载混合储能系统 Symlets 小波变换能量管理方法

申永鹏¹, 孙嵩楠¹, 刘东奇², 孙建彬¹, 赵俊¹

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对电动汽车锂离子动力电池承受高频功率需求造成其循环寿命衰减的问题进行了重点研究。首先, 分析了由锂离子动力电池、超级电容和多端口双向 DC/DC 变换器构成的混合储能系统工作特性, 揭示了工况周期 t_{\max} 、负载电流调节频率 f_{adj} 与小波分解阶数 θ 的关系。进而提出了车载混合储能系统 Symlets 小波变换能量管理方法, 实现了功率需求高频暂态分量和稳态分量在功率型储能装置和能量型储能装置之间的功率分流。最后, 通过实验验证了高速公路经济性测试(Highway Fuel Economy Test, HWFET)工况下的分流效果。实验结果表明, 所提出的 Symlets 小波变换能量管理方法可降低锂离子动力电池所承受的高频功率需求, 且系统输出电压的峰值波动比 Haar 小波低 51.8%。

关键词: 电动汽车; 混合储能系统; 锂离子动力电池; 超级电容; Symlets 小波变换

Symlets wavelet transform energy management method for a vehicle-mounted hybrid energy storage system

SHEN Yongpeng¹, SUN Songnan¹, LIU Dongqi², SUN Jianbin¹, ZHAO Jun¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: This paper focuses on the problem of the attenuation of cycle life caused by the high frequency power demand on the lithium ion battery of electric vehicles (EV). First, the working principle of hybrid energy storage systems (HESS) composed of a lithium ion battery, with ultra-capacitor (UC) and multi-port bidirectional DC/DC converter is analyzed, and the relationships among driving cycle t_{\max} , load current adjusting frequency f_{adj} and order of the wavelet decomposition θ are analyzed. Then an algorithm of Symlets and an Symlets wavelet transform-based power management for HESS are proposed. The proposed Symlets wavelet transform strategy is capable of identifying the high frequency transient and low frequency power demand of the EV, and allocating power components with different frequency contents to corresponding sources to achieve an optimal power splitting. Finally, experiments are performed with the HWFET driving cycle. The results show that the proposed power management method reduces high frequency loads of the lithium ion battery effectively, and decreases the peak voltage fluctuation of the HESS to 51.8% compared to that of the Haar wavelet transform-based power management strategy.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 61803345 and No. 51807013).

Key words: electric vehicle; hybrid energy storage system; lithium-ion battery; ultra-capacitor; Symlets wavelet transform

0 引言

电动汽车相对于燃油汽车具有效率高、零排放等优点, 因此受到越来越多国家的重视^[1-6]。理想的电动汽车都希望能具备长的续航里程和良好的动力性能, 这就意味着储能系统需要同时具备高能量密

度和高功率密度^[7]。锂离子动力电池具有高能量密度、低自放电效应的优点, 但是高倍率充放电会导致其容量和寿命的衰减^[8-9]。超级电容具有功率密度高、充电时间短和循环寿命高的优点, 但是能量密度较低, 难以满足车辆的续航里程需求^[10-11]。因此, 由锂离子动力电池和超级电容构成的混合储能系统兼具高能量密度和高功率密度的互补特性, 可满足电动汽车需求^[12-14]。

电动汽车的整车功率需求由高频暂态分量和稳态分量构成。实际测量表明, 电动汽车直流母线电流存在 10 Hz 到 10 kHz 的电流扰动, 并且随着电流

基金项目: 国家自然科学基金青年项目资助 (61803345, 51807013); 河南省科技攻关项目资助 (202102210303, 212102210264); 湖南省自然科学基金项目资助 (2019JJ 50669); 湖南省教育厅项目资助 (18B137)

频率的增加, 电池阻抗将会变大, 容量衰减现象也会加剧^[15]。X 射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)表明, 高频交流扰动会导致电池电极表面膜的加厚^[16]。当锂离子动力电池承受高频功率需求时, 锂离子无法在阳极和阴极之间快速地迁移, 将在电极表面以金属锂的形式沉积, 最终导致游离的锂离子减少, 形成不可逆的容量损失, 甚至导致电极短路(双层电容效应)^[17-18]。因此, 如何实现功率高频暂态分量和稳态分量在超级电容和锂离子动力电池之间的功率分流, 是混合储能系统亟待解决的问题。

目前, 逻辑门限控制、模型预测控制和模糊逻辑控制等控制策略在电动汽车能量管理方面已经得到初步应用^[19]。文献[20-21]使用逻辑门限控制合理分配电池和超级电容的输出, 可满足不同功率需求下的功率输出。文献[22]利用模型预测控制, 有效减小电池电流的幅值和波动, 使电池寿命延长了 17.81%。文献[23]采用模糊逻辑控制降低了电池充放电强度, 减少了系统的能量损耗。文献[24]提出的模糊逻辑控制策略能减小锂离子动力电池的最大充放电电流, 提高电池的安全性, 延长了电池的使用寿命。文献[25]提出的非线性鲁棒分数阶控制策略能快速跟踪负荷需求变化, 提升电动汽车对需求侧的响应速度及性能。尽管以上混合储能系统能量管理方法在功率分配、续航里程提升以及降低电池放电强度等方面取得一定效果, 但是并未针对性地消除高频功率需求对锂离子动力电池性能产生的负面影响, 一定程度上限制了混合储能系统的综合

性能。

本文在分析由锂离子动力电池、超级电容和多端口双向 DC/DC 变换器构成的车载混合储能系统工作特性的基础之上, 提出了基于 Symlets 小波变换的车载混合储能系统功率分流方法, 并给出了小波分解阶数的计算方法。通过对功率需求信号进行分解与重构, 实现了高频暂态分量和稳态分量在能量型储能装置和功率型储能装置之间的分配, 由超级电容响应高频大电流分量, 锂离子动力电池响应低频功率需求, 使锂离子动力电池免受高频负载需求变化而引起的“双层电容效应”的影响, 最后通过实验验证了该方法的有效性。

1 系统架构

所研究的由锂离子动力电池、超级电容和多端口双向 DC/DC 变换器构成的车载混合储能系统如图 1 所示。该拓扑结构主要由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)以及断路器构成。功率电路(b)通过电流闭环控制器实现对锂离子动力电池输出电流的精确控制; 功率电路(a)在电流闭环控制的基础上, 通过外加电压闭环控制器构成双闭环结构, 能够维持变换器输出电压稳定, 同时还可以消除 Boost 电路右半平面零点的影响。该拓扑结构具有以下优点: (1) 能量可以在任何两端口之间进行双向流动; (2) 采用双电感结构, 能实现电源能量变换解耦; (3) 多工况运行能力, 如图 2 所示, 任意两端口之间电能可以双向变换, 满足电动汽车多工况下的功率变换需求。

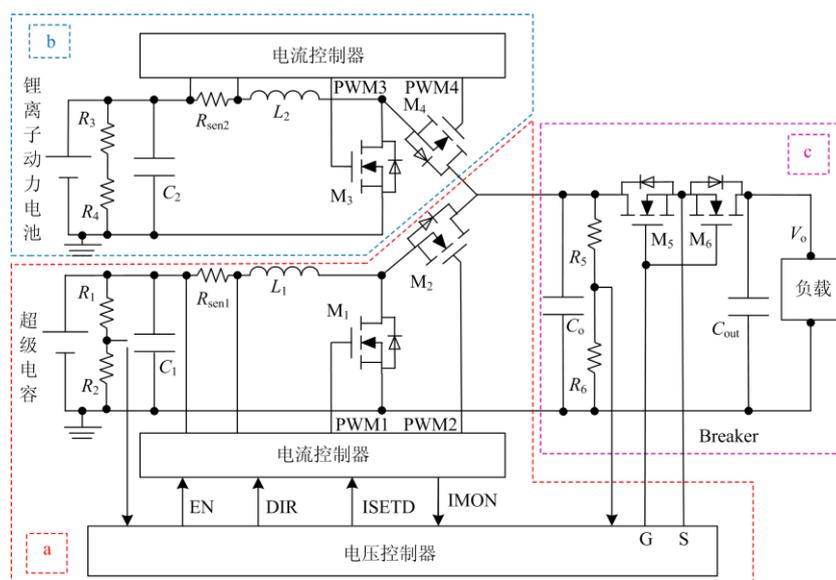


图 1 系统架构

Fig. 1 System structure

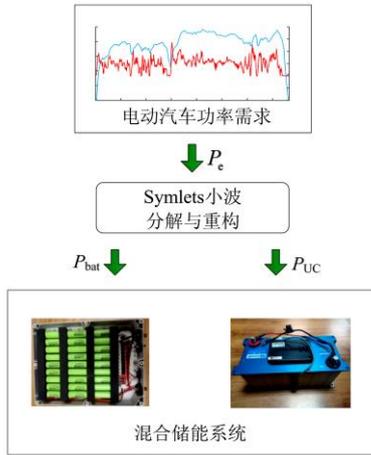


图2 Symlets小波变换混合储能系统能量管理策略
Fig.2 Power management of HESS based on Symlets wavelet transform

2 基于Symlets小波变换的混合储能系统能量管理策略

如图2所示, Symlets小波变换混合储能系统能量管理策略的基本思路是: 通过 Symlets小波变换对电动汽车整车功率中的高频分量和低频分量进行分解, 并将其分别作用于超级电容和锂离子动力电池, 充分利用超级电容高功率密度、长循环寿命的特点, 降低“双层电容效应”和大电流放电对锂离子动力电池循环寿命的影响。

2.1 Symlets小波变换

Symlet小波是正交小波, 通过多分辨率分解, 任何 $x(t) \in L^2$ 都可以表征为

$$DWT_{\psi} \{x(t)_{j,k}\} = 2^{-j/2} \sum_{j,k} x(t) \psi^*(2^{-j}t - k) \quad (1)$$

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (2)$$

该空间 L^2 表示有限能量信号的矢量空间^[26]。

在实际系统中, 小波分解级数的选取要符合调节频率限制, 同时兼顾计算的简便性。因此, Symlets小波分解阶数由以下方式确定。

对于时间域连续信号 $P_{load} = P_e(t)$, $0 \leq t \leq t_{max}$, t_{max} 为工况循环周期, P_{load} 为负载功率, 假设采样频率 f_{sample} 大于尼奎斯特速率且 $f_{sample} = l/t_{max}$, 则离散信号 $P'_{load} = P_e(n)$ 包含 l 个样本。根据 Symlets小波变换机理, 如果锂离子动力电池所需的负载电流调节频率 f_{adj} 小于期望调节频率 ρ , 则 Symlets小波分解阶数 θ 应满足式(3)。

$$l/2^\theta \leq \rho t_{max} \quad (3)$$

即

$$\theta \geq \log_2\left(\frac{l}{\rho t_{max}}\right) \quad (4)$$

如图4所示, 模拟 HWFET 工况循环周期 $t_{max} = 766$ s, 采样频率为 0.5 Hz。根据锂离子动力电池和所提出的多端口 DC/DC 变换器特性, 令锂离子动力电池输出电流的期望调节周期为 16 s, 则期望调节频率 $\rho = 0.0625$ Hz, 则根据式(4)可得 θ 为

$$\theta \geq \log_2\left(\frac{383}{0.0625 \times 766}\right) = 3 \quad (5)$$

因此 Symlets小波最小分解阶数为3。

如图3所示, $H_1(x)$ 和 $H_0(x)$ 为分解滤波器, $G_1(x)$ 和 $G_0(x)$ 为重构滤波器; “ $\downarrow 2$ ”符号表示下采样运算符, 即从 $f_{l-1}(t)$ 到 $f_{l-2}(t)$ 、 $w_{l-2}(t)$, 样点数减少一半; “ $\uparrow 2$ ”符号表示上采样运算符, 即从 $f_{l-2}(t)$ 、 $w_{l-2}(t)$ 到 $f_{l-1}(t)$, 样点数增加一倍。在 Symlets小波分解与重构过程中, 只要低通滤波器 $H_0(x)$ 输出信号的长度可以除以2, 整个过程就是连续的^[26-27]。所以 $P_e(t)$ 也可表示为

$$P_e(t) = w_{l-1}(t) + w_{l-2}(t) + \dots + w_0(t) + f_0(t) \quad (6)$$

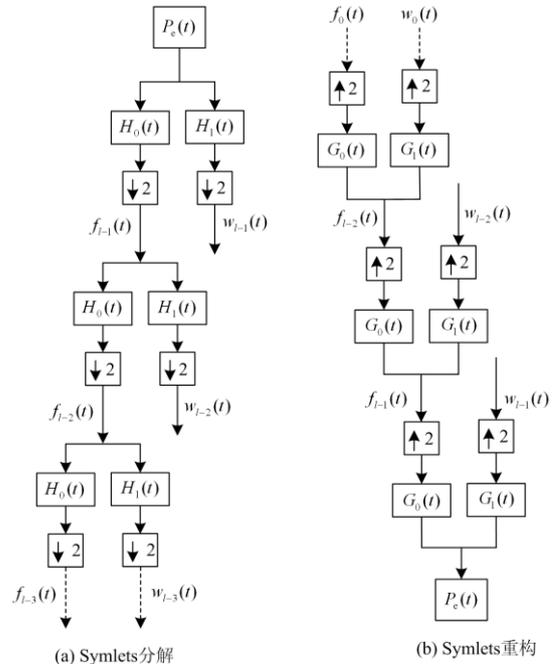


图3 Symlets3阶分解与重构示意图

Fig.3 Schematic diagram of decomposition and reconstruction of three-level Symlets

2.2 Symlets能量管理策略

HWFET 工况下的车速曲线和功率曲线 $P_e(t)$ 如

图 4 所示, 其中 $P_e(t)$ 由美国国家可再生能源实验室开发的车辆动态仿真软件 ADVISOR 根据电动汽车的参数给出。

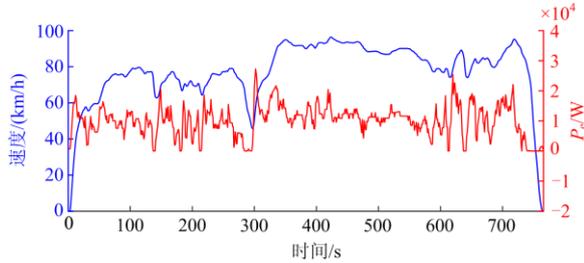


图 4 模拟高速公路经济性测试工况

Fig. 4 Simulating highway fuel economy test

图 5 为负载功率需求 $P_e(t)$ 降额后的 Symlets 小波分解结果。 $P_e(t)$ 经过三次分解操作, 最终分解为三个高频分量 $w_0(t)$ 、 $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 和一个低频分量 $f_0(t)$, 分解过程如式(7)所示。

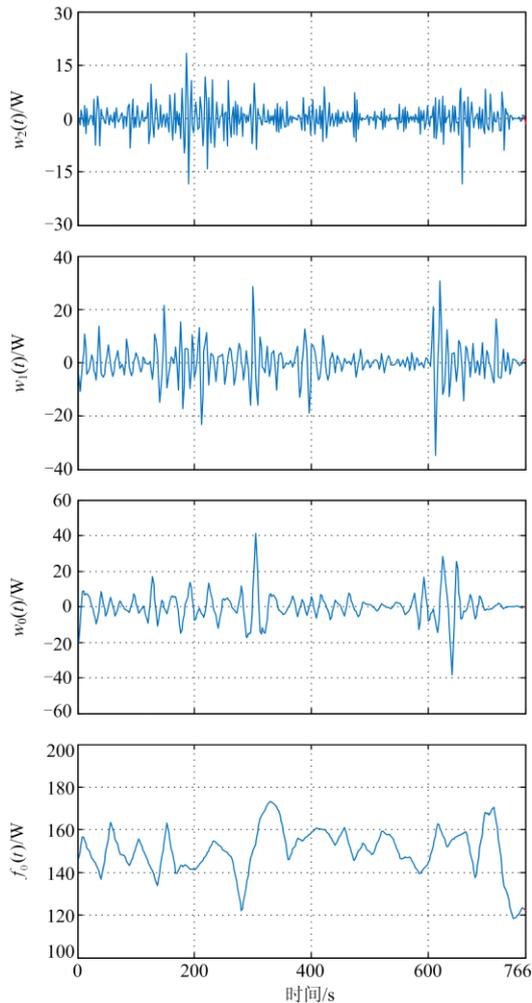


图 5 Symlets 小波分解后的功率需求

Fig. 5 Power demands of Symlets wavelet decomposition

$$P_e(t) = w_2(t) + f_2(t) = w_2(t) + w_1(t) + f_1(t) = w_2(t) + w_1(t) + w_0(t) + f_0(t) \quad (7)$$

重构得到的 $P_e(t)$ 高频分量和低频分量如图 6 所示。其中, 高频分量由 $w_0(t)$ 、 $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 重构。为了满足车辆功率需求, 车辆需求功率由锂离子动力电池和超级电容共同提供: 即 $P_e(t) = P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{UC}}(t)$ 。锂离子动力电池与超级电容功率分流表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = f_0(t) \\ P_{\text{UC}}(t) = w_3(t) + w_2(t) + w_1(t) + w_0(t) \end{cases} \quad (8)$$

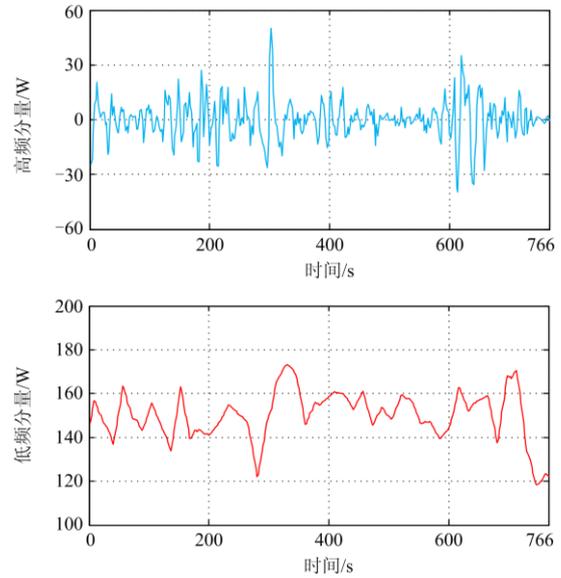


图 6 Symlets 小波重构后的功率需求

Fig. 6 Power demands of Symlets wavelet reconstruction

在车辆加速模式下, 超级电容维持负载端母线电压 V_o 稳定。通过电流闭环对多端口变换器锂离子电池对应输出端电流 I_{bat} 进行调节实现锂离子电池输出功率调整, 即 $P_{\text{bat}} = V_o I_{\text{bat}}$ 。超级电容补充车辆需求总功率与锂离子电池输出功率之差。

3 实验与结果分析

3.1 实验平台

为了进一步验证 Symlets 小波变换在混合储能系统能量管理中的有效性, 建立了如图 7、图 8 所示的实验平台。该实验平台由三元锂离子电池组、超级电容、多端口双向 DC/DC 变换器、可编程直流负载、示波器和监控界面组成。其中锂离子电池组共由 54 节松下 NCR 18650B 组成, 每 18 节电池并联成组, 再相互串联得到锂离子电池模组。单体电池的标称电压为 3.6 V, 充电限制

电压为 4.2 V，单体最大连续放电电流为 4.87 A，能量密度为 243 Wh/kg，其放电倍率特性如图 9 所示，放电温度特性如图 10 所示。表 1 为实验平台详细信息。

多端口双向 DC/DC 变换器采用德州仪器公司的 Piccolo32 位微控制器 TMS320F28027 搭建，功率器件、控制器、数据总线接口和外围组件集成在一个高密度的 PCB 上。多端口双向 DC/DC 转换器的详细参数如表 2 所示。

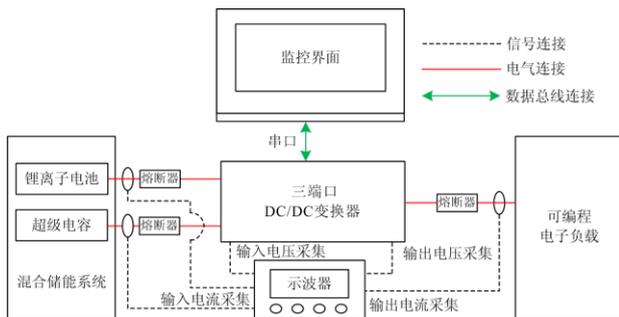


图 7 实验装置简化示意图

Fig. 7 Simplified schematic diagram of experimental equipment

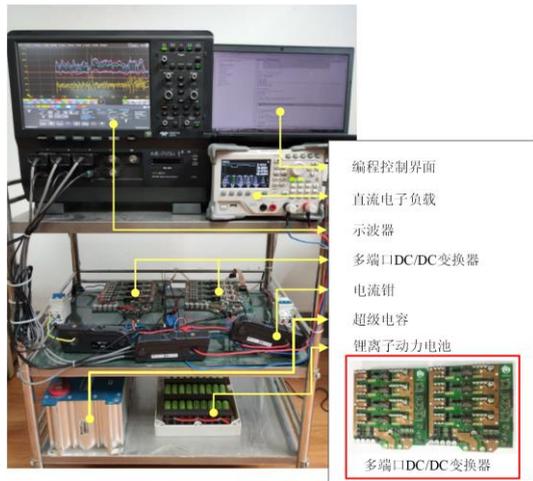


图 8 实验平台图

Fig. 8 Photo of experimental platform

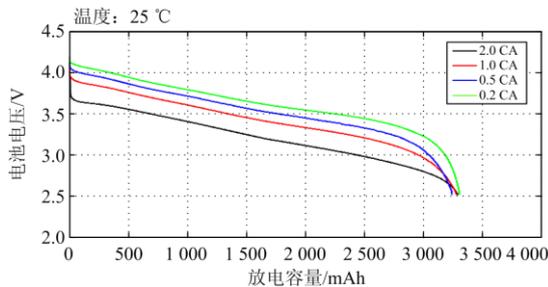


图 9 单体电池放电倍率特性

Fig. 9 Discharge rate characteristic of cell

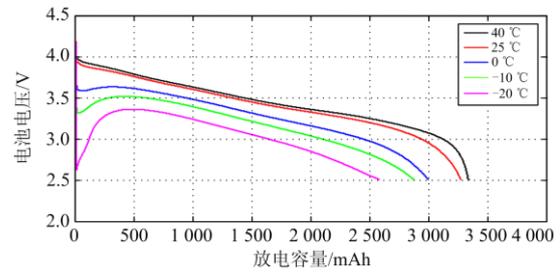


图 10 单体电池放电温度特性

Fig. 10 Discharge temperature characteristics of cell

表 1 实验平台参数表

Table 1 Parameters of the experimental facility

设备名称	参数
可编电子负载 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(48 V)
	额定电流(1 900 A)
三元锂离子动力电池组	额定电压(12.6 V)
	额定容量(51 Ah)
多端口双向 DC/DC 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)
	开关频率(100 kHz)
	MOSFET (RU1H130S)
示波器	TELEDYNE MDA805A

表 2 多端口双向 DC/DC 变换器详细信息

Table 2 Details information of the multi-port bidirectional DC/DC converters

元件	参数	型号
L ₁	4.7 μH	SER2915L-472KL
L ₂	4.7 μH	SER2915L-472KL
C ₁	1 408 μF	EEEFK1K330P, CS1J221M-CRI13
C ₂	1 408 μF	EEEFK1K330P, CS1J221M-CRI13
C _o	1 584 μF	EEEFK1K330P
M ₁ —M ₅	100 V/130 A	RU1H130S

3.2 实验结果

在实验的初始阶段，锂离子动力电池已充满至 100% SOC，由于多端口双向 DC/DC 变换器的输入电压为 6~20 V，因此超级电容充至 18 V，变换器的输出电压设为 40 V，整个实验持续 766 s。

使用 Symlets 小波变换将 HWFET 工况下负载功率进行分解并分配给锂离子动力电池和超级电容，其结果如图 11 所示。通过图 11(b)、图 11(c)可

以看出锂离子动力电池输出功率仅包含稳态分量。模拟 HWFET 工况功率需求的低频分量由锂离子动力电池提供, 超级电容对负载实时功率需求做出快速响应, 并吸收高频扰动, 与图 6 所示的理论结果一致。

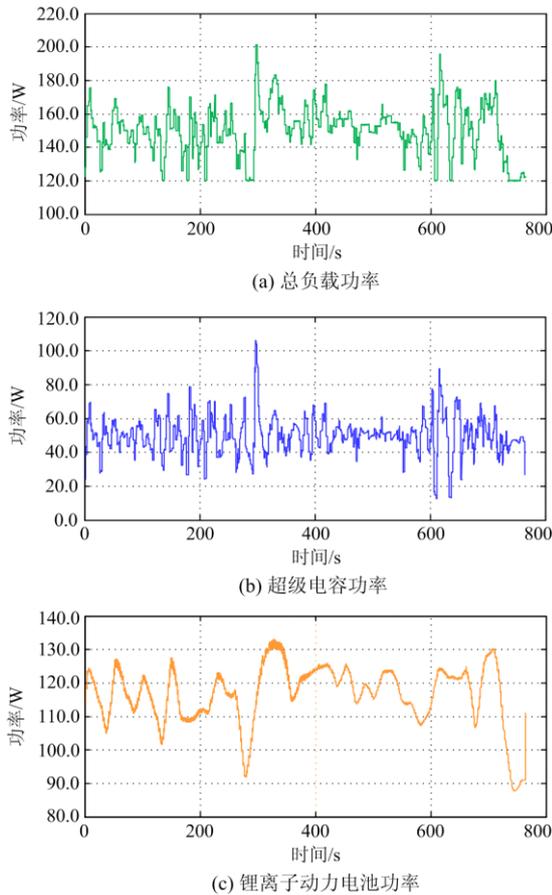


图 11 HWFET 循环工况的总负载功率及其在超级电容和锂离子动力电池之间的分配

Fig. 11 Total load power of HWFET driving cycle and its distribution between UC and lithium-ion battery

图 12 为锂离子动力电池在实验过程中的端电压和端电流。由图 12 可知, 在整个 HWFET 工况中, 锂离子动力电池的最大输出电流为 14.2 A, 由于电池内阻分压机制, 其电压随电流反方向波动。

如图 13 所示, 尽管锂离子动力电池的端电压会随其电流而波动, 但是在整个 HWFET 驱动周期中, 混合储能系统的输出电压仍具有良好的稳定性, 其实际电压与理想电压之间的最大偏差为 0.25%。

与文献[28]中采用 Haar 小波变换策略(4 阶分解和重构)时锂离子动力电池功率的输出功率曲线对比结果如图 14 所示, 可知使用 Symlets 小波变换策略后锂离子动力电池的功率需求变化更为平稳, 并

且峰值电流低于使用 Haar 小波变换策略, 避免了锂离子动力电池大电流放电。

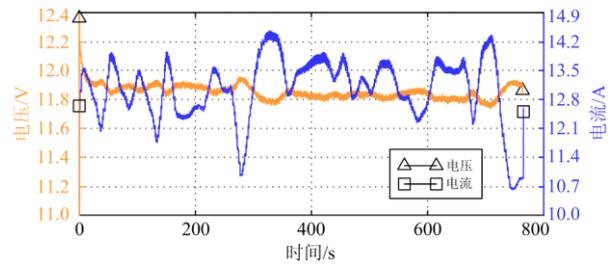


图 12 锂离子动力电池实际电压和电流

Fig. 12 Actual voltage and current of lithium-ion battery

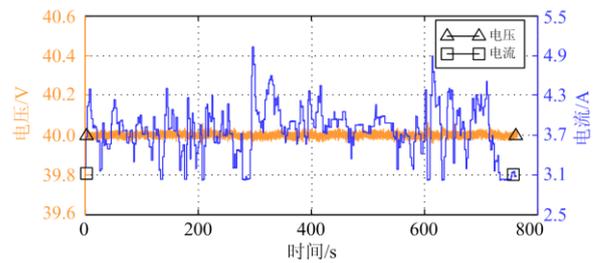


图 13 混合储能系统的输出电压和电流

Fig.13 Output voltage and current of the HESS

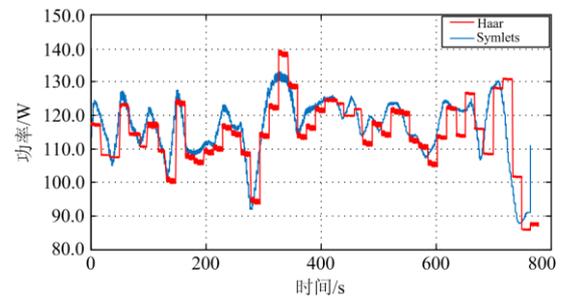


图 14 不同策略下锂离子动力电池输出功率比较

Fig. 14 Comparison of lithium-ion battery output power under different strategies

图 15 为混合储能系统使用 Symlets 小波变换策略和 Haar 小波变换策略后的输出电压, 其中使用 Haar 小波变换策略后的实际电压与理想电压之间的最大偏差为 0.2076 V, 而使用本文所提的 Symlets 小波变换策略的实际电压与理想电压之间的最大偏差为 0.1 V, 所以其峰值波动比 Haar 小波低 $(0.2076 - 0.1) / 0.2076 \approx 51.8\%$ 。在整个 HWFET 循环工况中, 混合储能系统使用 Symlets 小波变换策略和 Haar 小波变换策略的输出电压精度与理论电压基本一致, 但由于采用 Symlets 小波变换策略时, 动力电池的输出电流更为平滑, 更有利于系统输出电压的稳定。

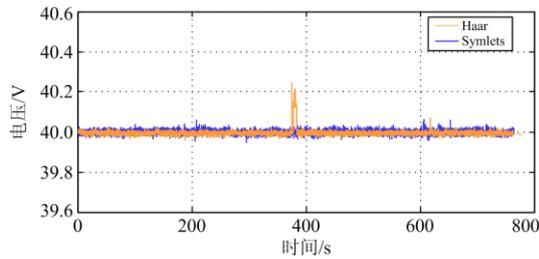


图 15 不同策略混合储能系统输出电压的精度比较

Fig. 15 Comparison of output voltage accuracy of HESS under different strategies

4 总结

针对电动汽车高频负载波动加速锂离子电池寿命衰退问题,本文提出一种基于 Symlets 小波变换的车载混合储能系统能量管理方法。实验结果表明:

1) 该方法可以对整个 HWFET 工况下的负载功率需求进行分解,将分解得到的高频分量和低频分量分别作用于超级电容和锂离子动力电池,降低锂离子动力电池所承受的浪涌电流,有效克服了“双层电容效应”对锂离子动力电池寿命的影响。

2) 通过与 Haar 小波变换策略对比, Symlets 小波变换可以使锂离子动力电池的输出功率变化更平稳、峰值功率需求和系统输出电压的峰值波动更低。

参考文献

- [1] 李景丽, 时永凯, 张琳娟, 等. 考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 94-102.
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [2] 刘东奇, 王耀南, 袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 18-26.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large-scale electric vehicles with wind-thermal power generating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 18-26.
- [3] 陈明庆, 李建林. 基于局部电压幅值与云边协同的分散式充电桩充电协调方法[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 60-68.
CHEN Mingqing, LI Jianlin. A charging coordination method for distributed charging piles considering local voltage amplitude and cloud-edge collaboration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 60-68.
- [4] 冷祥彪, 孙成龙, 袁太平, 等. 电动汽车有序充放电的

控制与关键问题综述[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 34-43.

LENG Xiangbiao, SUN Chenglong, YUAN Taiping, et al. Review on control strategies and key problems of coordinated charging and discharging of electric vehicles[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 34-43.

- [5] 颜湘武, 赵帅帅, 董清, 等. 电动汽车充电机性能综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 164-171.
YAN Xiangwu, ZHAO Shuishuai, DONG Qing, et al. Comprehensive evaluation of electric vehicle charger performance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 164-171.
- [6] 李航, 李国杰, 汪可友. 基于深度强化学习的电动汽车实时调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 161-167.
LI Hang, LI Guojie, WANG Keyou. Real-time dispatch strategy for electric vehicles based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 161-167.
- [7] AKAR F, TAVLASOGLU Y, UGUR E, et al. A bidirectional nonisolated multi-input DC-DC converter for hybrid energy storage systems in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7944-7955.
- [8] 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.
- [9] GAO Y Z, ZHANG X, GUO B, et al. Health-aware multiobjective optimal charging strategy with coupled electrochemical-thermal-aging model for lithium-ion battery[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3417-3429.
- [10] 窦晓波, 全相军, 陈峰, 等. 应用于超级电容双向 DC/DC 变换器的鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 223-231, 359.
DOU Xiaobo, QUAN Xiangjun, CHEN Feng, et al. Robust control of bidirectional DC/DC convert for super capacitor application[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 223-231, 359.
- [11] LAGO L F R, FACEROLI S T, FERREIRA R A F, et al. Power demand prediction based on mixed driving cycle applied to electric vehicle hybrid energy storage system[C] // 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), December 1-4, 2019, Santos,

- Brazil: 1-6.
- [12] HREDZAK B, AGELIDIS V G, JANG M. A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1469-1479.
- [13] 吴鸣, 李振伟, 孙丽敬. 一种混合储能变换器的模型预测整体控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 84-91.
- WU Ming, LI Zhenwei, SUN Lijing. A model predictive overall control method for a hybrid energy storage converter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 84-91.
- [14] SHEN J Y, 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.
- [15] UDDIN K, MOORE A D, BARAI A, et al. The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance[J]. Applied Energy, 2016, 178: 142-154.
- [16] UDDIN K, SOMERVILLE L, BARAI A, et al. The impact of high-frequency-high-current perturbations on film formation at the negative electro de-electrolyte interface[J]. Electrochimica Acta, 2017, 233: 1-12.
- [17] BRAND M J, HOFMANN M H, SCHUSTER S S, et al. The influence of current ripples on the lifetime of lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10438-10445.
- [18] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力锂电池荷电状态估计研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 58-61, 92.
- GAO Jinhui, ZHU Yingzheng. Study on state estimation of power lithium battery based on new power supply model[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 58-61, 92.
- [19] LI H, RAVEY A, N'DIAYE A, DJERDIR A. A review of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle[C] // 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), December 11-14, 2017, Belfort, France: 1-6.
- [20] GUAN Z, JIAO J, MENG R, et al. Research on hybrid power system of electric vehicle and energy management strategy[C] // 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), November 22-24, 2019, Shenyang, China: 1-5.
- [21] ZHAO Y L, WANG W D, XIANG C L, et al. Research and bench test of nonlinear model predictive control-based power allocation strategy for hybrid energy storage system[J]. IEEE Access, 2018, 10(6): 70770-70787.
- [22] HU Y Y, CHEN C L, HE T, et al. Proactive power management scheme for hybrid electric storage system in EVs: an MPC method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(12): 5246-5257.
- [23] GU B, CHA S W. A study of energy consumption in battery/super capacitor hybrid system based on optimized driving strategy[C] // 2017 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA), October 12-14, 2017, Surabaya, Indonesia: 52-55.
- [24] 宋绍剑, 魏泽, 刘延扬, 等. 锂电池和超级电容混合动力汽车的能量管理[J]. 控制工程, 2019, 26(12): 2272-2277.
- SONG Shaojian, WEI Ze, LIU Yanyang, et al. Research on energy management for ultracapacitor/lithium battery hybrid electric vehicles[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(12): 2272-2277.
- [25] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
- SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [26] BOGGE S S, NARCOWICH F J, DONOHO D L, et al. A first course in wavelets with Fourier analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 144-167.
- [27] YEH H G, SIM S, BRAVO R. Symlets techniques for real time detection of transients generated by HIF in the 12 kV distribution circuits[C] // 2018 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), October 29-30, 2018, Long Beach, CA, USA: 1-6.
- [28] 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.

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-11-07

作者简介:

申永鹏(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电驱动系统能量管理、控制与优化; E-mail: shenyongpeng@zzuli.edu.cn

孙嵩楠(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电驱动系统能量管理与优化; E-mail: sunsongnan_zzuli@163.com

刘东奇(1986—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电动汽车 V2G 控制与优化。E-mail: liudongqi@csust.edu.cn

(编辑 魏小丽)