



城市轨道交通混合储能系统无源性协同控制方法

时珊珊¹, 王 凯², 张 宇¹, 张开宇¹, 张珂宁², 王育飞², 王雅妮²

(¹国网上海市电力公司, 上海 200031; ²上海电力大学, 上海 200090)

摘 要: 为解决城市轨道交通列车频繁启停引起的牵引网电压波动问题, 针对由超级电容和电池组成的混合储能系统, 本文提出了基于集合经验模态分解的无源性协同控制方法, 从而平抑网侧电压波动, 实现再生制动能量回收, 降低城市轨道交通能耗。利用集合经验模态分解方法求取混合储能系统多个本征模态函数, 对每个本征模态函数瞬时频率曲线进行 Hilbert 变换, 精确重构高频、低频分量, 提升超级电容和电池功率期望轨迹精度。针对混合储能系统多变量、强耦合、非线性特性, 在 dq 坐标下建立双线性模型, 实现状态变量与控制变量同步线性变换, 设计全局渐近稳定的无源性控制器, 使系统存在外部不确定性扰动情形时始终保持超级电容和锂电池功率期望轨迹同步快速跟踪, 达成协同控制目标。基于 MATLAB 的仿真结果表明, 所提方法既实现了超级电容和锂电池长寿命协同运行, 又能满足城市轨道交通再生制动能量回收利用需求, 具有响应快速、稳定性好的特点。

关键词: 城市轨道交通; 混合储能系统; 集合经验模态分解; 无源性控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0516

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2024) 11-4040-13

Collaborative passivity-based control method for hybrid energy storage systems in urban rail transit

SHI Shanshan¹, WANG Kai², ZHANG Yu¹, ZHANG Kaiyu¹, ZHANG Kening², WANG Yufei²,
WANG Yanni²

(¹State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200031, China; ²Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To regulate voltage fluctuations in urban rail transit traction systems caused by the frequent acceleration and deceleration of trains, this study proposes a passivity-based collaborative control method utilizing ensemble empirical mode decomposition for a hybrid energy storage system (HESS) composed of supercapacitors and batteries. This method enables the recovery of regenerative braking energy and reduces the overall energy consumption of urban rail transit systems. The ensemble empirical mode decomposition technique is employed to extract multiple intrinsic mode functions of the HESS, allowing precise reconstruction of high-frequency and low-frequency components through the instantaneous frequency curve of each intrinsic mode function processed by the Hilbert transform, thereby enhancing the power trajectory accuracy for both supercapacitors and

收稿日期: 2024-06-07; 修改稿日期: 2024-07-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (52207025); 国网上海市电力公司项目 (B3094023000W)。

第一作者及通信联系人: 时珊珊 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析、轨道交通混合储能技术, E-mail: evdataanalysis@163.com。

引用本文: 时珊珊, 王凯, 张宇, 等. 城市轨道交通混合储能系统无源性协同控制方法[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 4040-4052.

Citation: SHI Shanshan, WANG Kai, ZHANG Yu, et al. Collaborative passivity-based control method for hybrid energy storage systems in urban rail transit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4040-4052.

batteries. To address the multi-variable, strongly coupled, and nonlinear nature of the HESS, a bilinear model is developed in dq coordinates, facilitating synchronous linear transformation of state and control variables. A globally asymptotically stable passivity-based controller is then proposed to ensure synchronized and rapid tracking of desired power trajectories, achieving collaborative control even under external uncertainties. Simulation results using MATLAB demonstrate that the proposed method ensures long-term cooperative operation of supercapacitors and batteries, effectively meeting the demands for regenerative braking energy recovery and utilization in urban rail transit. The proposed approach offers advantages such as rapid response and robust stability.

Keywords: urban rail transit; hybrid energy storage system; ensemble empirical mode decomposition; passivity-based control

随着城市化进程稳步推进和人口数量不断增长,城市轨道交通系统发展迅速,列车频繁启停,导致能源消耗呈现快速增长趋势^[1-2]。针对城市轨道交通牵引网能耗巨大、运行电压平稳性要求高的问题,以储能形式回收列车再生制动能量,成为实现高效节能、确保牵引网电压安全的有效手段^[3]。由于单一类型储能装置系统难以同时满足高功率、大能量双重需求,因此常采用由超级电容器和电池组成的混合储能系统实现“削峰填谷”,抑制牵引网电压高频大幅波动^[4-5]。考虑各储能装置间的功率分配与协同取决于其控制方法,如何提高混合储能系统再生制动能量利用率,达到更优的稳压和节能效果,是城市轨道交通能量管理急需解决的关键技术问题之一。

城市轨道交通混合储能系统协同控制主要包括功率自适应分配和功率期望轨迹跟踪两方面^[6-7]。在混合储能系统功率自适应分配方面,通常采用滤波器控制方法,通过频率分解,易于实现超级电容器和电池高频、低频分量功率分配,但需要以混合储能系统功率平稳为前提,难以克服不确定性扰动对功率分配精度的不利影响^[8]。文献[9]采用移动平均法提取混合储能系统输出功率,通过小波包分解为低频和高频波动分量,为超级电容器和电池合理分配输出功率,满足系统功率平稳需求,但小波包分解精度与原始功率信号波动程度相关,基波的不同选择会改变分解后的信号分量,重构过程的误差使得功率分解复杂度增加。文献[10]将网侧电能质量指标约束引入小波包分解,结合混合储能系统功率期望轨迹生成目标,实现再生制动能量合理分配和利用,但未考虑频繁操作条件下的储能装置寿命问

题。文献[11]提出基于移动最小二乘法和储能装置荷电状态的轨道交通混合储能系统实时控制策略,可在线更新超级电容和电池功率期望轨迹,延长储能装置寿命,但依然存在不确定性噪声和小幅高频分量引起的模态混叠问题。文献[12]设计集合经验模态分解方法,在每次信号分析中加入不同白噪声,求取相应的本征模态函数,通过平均使本征模态函数能够自动消除模态混叠问题,但在实际工程中混合储能系统功率分频频率难以确定,导致计算精度下降。

在混合储能系统功率期望轨迹跟踪方面,通常采用传统矢量比例积分(PI)控制方法^[13]。在dq旋转坐标系下,矢量PI控制方法具有计算简单、易于处理超级电容和电池功率约束的优点,但混合储能系统是典型的多变量、强耦合、非线性对象,矢量PI控制方法设计依赖于双向变流器稳定工作点附近局部线性化为前提,稳定域窄,当系统存在外部大幅不确定性扰动或内部参数摄动时,闭环控制系统动态响应性能难以确保。文献[14]将模型预测控制与迭代学习方法相结合,能确保在列车负载突变情形下准确快速地响应混合储能系统功率期望轨迹,实现系统存在不确定性扰动情形下,各储能装置间精确的功率响应,但控制参数整定较复杂。文献[15]在混合储能系统协同控制方法中将下垂控制和预测模型控制结合,实现超级电容高频分量功率响应和电池低频分量功率响应,但未考虑储能装置荷电状态约束。文献[16]提出深度强化学习方法,设计可以实现超级电容器和电池功率实时响应的能量管理策略,在达成混合储能系统功率期望轨迹跟踪目标的同时,有效防止存储装置过充、过放,但难以确

保在列车多工况复杂运行条件下闭环控制系统全局渐近稳定。

为实现城市轨道交通混合储能系统功率精确分配与协同控制,提出改进的集合经验模态分解方法,通过对每个本征模态函数瞬时频率曲线进行Hilbert变换,得到噪声和小幅高频信号分量的标准差,在确保分解精度的前提下,减少分解次数,精确求取超级电容和电池功率期望轨迹;在 dq 旋转坐标下,定义混合储能系统电流和直流牵引网电压为状态变量,变换器开关占空比为控制量,建立混合储能系统双线性模型,准确刻画状态变量与控制变量同步线性变换关系,设计形式简单的无源性控制器,实现各储能装置同步快速跟踪功率期望轨迹,达成协同控制目标;基于Lyapunov稳定性定理,证明所提无源性闭环控制系统具有全局渐近稳定性。MATLAB/Simulink的仿真结果表明,所提方法在列车负荷突变情形下能够实现混合储能系统功率精确分配和协同,具有响应快速、同步性好、稳定域宽的特点,易于工程实现。

1 基于集合经验模态分解的混合储能系统功率自适应分配

1.1 城市轨道交通混合储能系统模型

城市轨道交通混合储能系统模型,如图1所示。交流牵引网由三相变压器将110 kV/220 kV电压降至10 kV/35 kV,经三相桥式(交流/直流)(AC/DC)整流器获得直流牵引网750 V/1500 V电压;由超级电容器和电池组成的混合储能系统经DC/DC双向变换器与直流牵引网连接,各储能装置独立控制,有效增强复杂工况下系统运行自由度。当列车制动时,混合储能系统吸收再生制动能量,抑制牵引网电压波动;当列车加速运行时,混合储能系统释放能量,减少牵引网供能,提高再生制动能量利用率,实现节能减碳。

为实现城市轨道交通混合储能系统长寿命运行,根据各储能装置特性给予功率响应优先权。超级电容具有快速充、放电特性,因此超级电容负责释放/吸收功率波动大、变化快的列车启动/制动能量,从而避免电池高频充、放电操作,有效延长电池寿命;电池能量密度高,负责释放/吸收功率波动小、变化慢的列车启动/制动能量。因此,精确的混合储能系统功率自适应分配是实现超级电容与

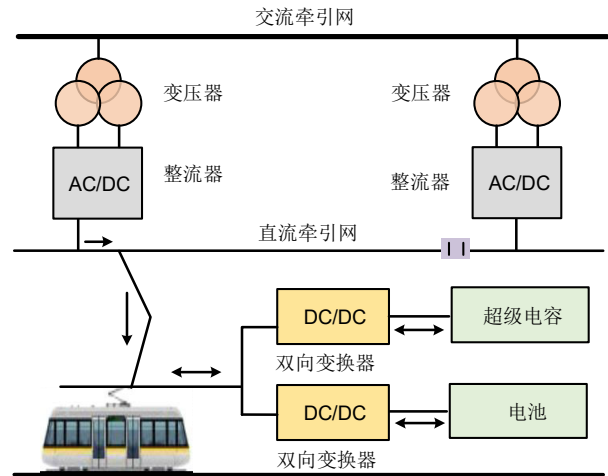


图1 城市轨道交通混合储能系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid energy storage system for urban rail transit

电池协同控制的关键所在。

1.2 混合储能系统功率的集合经验模态分解方法

传统的集合经验模态分解方法改善了混合储能系统功率本征模态函数高、低频模态混叠,需人为控制附加白噪声强度,选择不当可能造成分解精度下降的问题,为此选择具有零均值特性的高斯白噪声信号,提升混合储能系统功率集合经验模态分解精度。

由牵引网功率 $P_g(t)$ 与列车功率 $P_t(t)$ 作差,可得混合储能系统功率期望轨迹 $P_h(t)$ 。

$$P_h(t) = P_{sc}(t) + P_{bat}(t) = P_g(t) - P_t(t) \quad (1)$$

式中, $P_{sc}(t)$ 为超级电容功率期望轨迹; $P_{bat}(t)$ 为电池功率期望轨迹。

当 $P_t(t) > P_g(t)$ 时,混合储能系统吸收功率, $P_h(t) < 0$;当 $P_t(t) < P_g(t)$ 时,混合储能系统释放功率, $P_h(t) > 0$ 。

根据式(1),将一组高斯白噪声信号 $w(t)$ 叠加在混合储能系统功率期望轨迹 $P_h(t)$ 上,可得总功率期望轨迹 $P(t)$,见式(2)。

$$P(t) = P_h(t) + w(t) \quad (2)$$

对式(2)执行经验模态分解^[7],可得 n 个本征模态函数 $c_i(t)$,见式(3)。

$$P(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中, $c_i(t)$ 为第 i 个本征模态函数; $r_n(t)$ 为信号残差分量。

改变 $j(j=2, 3 \cdots N)$ 组叠加在混合储能系统功率

期望轨迹 $P_h(t)$ 上的高斯白噪声信号，则由式(3)可得到式(4)。

$$\begin{cases} P_j(t) = P_h(t) + w_j(t) \\ P_j(t) = \sum_{i=1}^n c_{ji}(t) + r_{jn}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $w_j(t)$ 为第 j 个独立白噪声信号； $P_j(t)$ 为叠加第 j 个高斯白噪声信号后的不平衡功率信号； $c_{ji}(t)$ 为第 j 次经验模态分解的第 i 个本征模态函数； $r_{jn}(t)$ 为第 j 次经验模态分解后的残差分量。

当经验模态分解次数为 N 时，由式(4)可得式(5)。

$$\begin{cases} c_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_{ji}(t) \\ r_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{jn}(t) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)，可得经集合经验模态分解重构的混合储能系统功率期望轨迹 $P_h(t)$ 。

$$P_h(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (6)$$

根据式(6)，可逐次解析出混合储能系统功率信号中的高频波动功率，实现超级电容器和电池功率自适应分配。

1.3 基于 Hilbert 变换的集合经验模态分解方法

集合经验模态分解方法可实现混合储能系统高频、低频功率信号的自适应分配，零均值噪声特性抵消了人为选择白噪声强度可能造成的集合经验模态分解误差，有效提高了混合储能系统功率期望轨迹计算精度，但依然存在不确定性噪声和大幅高频分量引起的模态混叠问题。为解决这一问题，对集合经验模态分解方法求得的本征模态函数进行 Hilbert 变换，利用 Hilbert 时间谱上本征模态函数 $c_i(t)$ 瞬时频率高于 $c_{i+1}(t)$ 瞬时频率的特性，依据模态混叠能量最小化原则，准确解析相邻瞬时频率-时间曲线的分频频率，实现模态混叠最小化，从而进一步提高模态分解精度，提升混合储能系统运行经济性。

对于式(6)，各本征模态函数 $c_i(t)$ Hilbert 变换后可得模态分量 $H[c_i(t)]$ ，见式(7)。

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (7)$$

由式(5)和式(7)，构造各模态分量的解析信号 $z_i(t)$ 。

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = a_i(t) \exp[j\phi_i(t)] \quad (8)$$

$$\text{其中， } a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]}, \phi_i(t) = \arctan \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)}, \omega_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt}$$

式中， $a_i(t)$ 为 $c_i(t)$ 瞬时振幅； $\omega_i(t)$ 为 $c_i(t)$ 瞬时相位； $\omega_i(t)$ 为各模态分量瞬时频率。

式(8)即为 Hilbert 时间谱，由式(8)可得解析信号 $z_i(t)$ 实部 $H(\omega, t)$ 。

$$H(\omega, t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp \left[j \int \omega_i(t) dt \right] \right\} \quad (9)$$

分析式(9)可知，在 Hilbert 时间谱上本征模态函数 $c_i(t)$ 瞬时频率高于 $c_{i+1}(t)$ 瞬时频率，则以满足模态混叠能量 E_{overlap} 最小为前提，依据 Hilbert 时间谱，可在 ω_i 和 ω_{i+1} 之间精确求取确定分频频率 ω_k ，模态混叠能量 E_{overlap} 计算方法见式(10)。

$$E_{\text{overlap}} = \sum_{h=1}^m |c_i(t_h)| \Delta t + \sum_{h=1}^m |c_{i+1}(t_h)| \Delta t \quad (10)$$

式中， Δt 为采样时间间隔。

根据求得的分频频率 ω_k ，对式(6)进行重构，将高于 ω_k 的本征模态函数定义为超级电容功率期望轨迹，将低于 ω_k 的本征模态函数定义为电池功率期望轨迹，得到式(11)。

$$\begin{cases} P_{\text{sc}}(t) = \sum_{i=1}^k c_i(t) \\ P_{\text{bat}}(t) = \sum_{i=k+1}^n c_i(t) + r_n(t) \end{cases} \quad (11)$$

分析式(11)可知，混合储能系统功率信号经 Hilbert 变换，根据相邻瞬时频率-时间曲线能量混叠最小原则，可确定最优分频频率，确定自适应分配高、低频波动分量，最大化降低不确定性噪声对分解精度的影响。

基于集合经验模态分解的混合储能系统功率自适应分配方法流程图，如图2所示。由改进的集合经验模态分解方法，精确求取超级电容和电池功率期望轨迹，为混合储能系统无源性协同控制器设计提供了条件。

2 基于无源性控制的混合储能系统功率期望轨迹跟踪

2.1 城市轨道交通混合储能系统双线性模型建立

为实现混合储能系统功率期望轨迹全局渐近稳定跟踪，针对系统多变量、强耦合、非线性特性，在 dq 坐标下建立双线性模型，实现状态变量与控

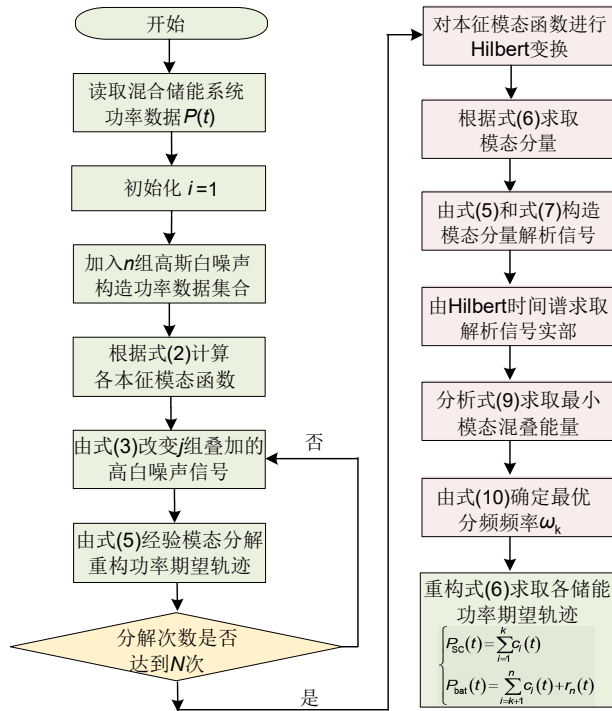


图2 基于集合经验模态分解的混合储能系统功率自适应分配方法流程图

Fig. 2 Flow chart of power adaptive allocation method for hybrid energy storage systems based on ensemble empirical mode decomposition

制变量同步线性变换, 简化无源性控制器设计。

城市轨道交通混合储能系统变换器结构, 如图3所示。图3中 e_a 、 e_b 、 e_c 分别为整流器交流侧a相、b相和c相电源电压。根据基尔霍夫电压定

理, 由图3可知, dq 坐标系下城市轨道交通混合储能系统状态空间方程可写为式(12)。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R}{L} i_d - \omega i_q + \frac{m_d V_{dc}}{L} - \frac{e_d}{L} \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R}{L} i_q + \omega i_d + \frac{m_q V_{dc}}{L} - \frac{e_q}{L} \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{m_{sc} i_{sc}}{C} + \frac{m_{bat} i_{bat}}{C} - \frac{m_d i_d}{C} - \frac{m_q i_q}{C} \\ \frac{d}{dt} i_{sc} = -\frac{m_{sc} V_{dc}}{L_{sc}} - V_{sc} \\ \frac{d}{dt} i_{bat} = -\frac{m_{bat} V_{dc}}{L_{bat}} - V_{bat} \end{cases} \quad (12)$$

式中, i_d 、 i_q 分别为AC/DC整流器交流侧 d 轴和 q 轴电流; R 、 L 分别为整流器交流侧电阻和电感; ω 为整流器交流侧电压角频率; m_d 、 m_q 分别为AC/DC整流器 d 轴和 q 轴调制系数; e_d 、 e_q 分别为整流器交流侧 d 轴和 q 轴电源电压; C 为整流器直流侧电容; V_{dc} 为直流牵引网电压; i_{sc} 、 i_{bat} 分别为超级电容和电池输出电流; V_{sc} 、 V_{bat} 分别为超级电容和电池输出电压; L_{sc} 、 L_{bat} 分别为超级电容和电池DC/DC双向变换器输入侧电感; m_{sc} 、 m_{bat} 分别为超级电容和电池双向变换器调制系数。

当 $-1 < m_{sc} < 0$ 、 $-1 < m_{bat} < 0$ 时, 表示储能装置吸收列车制动再生能量; 当 $0 < m_{sc} < 1$ 、 $0 < m_{bat} < 1$ 时, 表示储能装置向列车输送能量。

由式(12)分析可知, 混合储能系统状态变量(各变换器电流和直流牵引网电压)与输入变量(各变换器调制系数)之间存在明显的非线性、强耦合关系。传

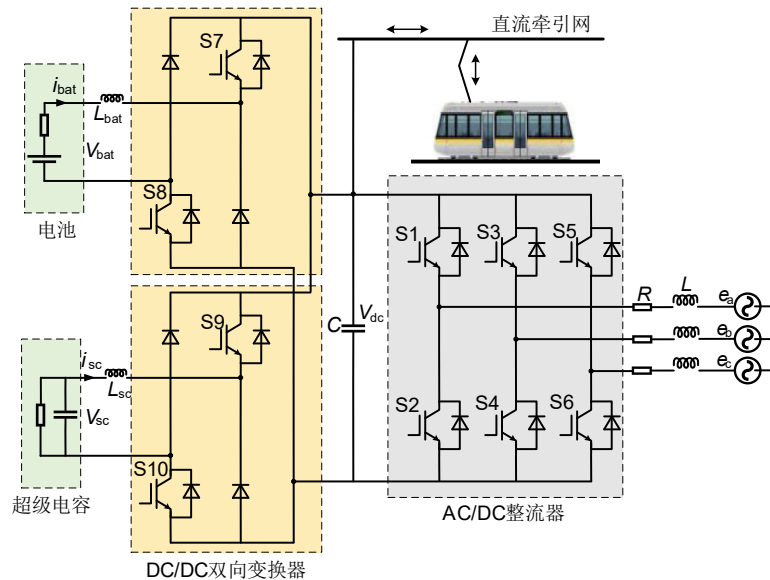


图3 城市轨道交通混合储能系统变换器结构图

Fig. 3 Conversion schematic diagram of hybrid energy storage system for urban rail transit

统矢量PI控制方法基于小信号模型,以混合储能系统稳定工作点附近局部线性化为前提,设计PI控制器,如图4所示。图4中 $1/s$ 为积分符号, K_p 、 K_i 分别为PI控制器比例系数和积分系数, u_d 、 u_q 分别为PI控制器d轴和q轴输出信号。传统矢量PI控制方法形式简单,但稳定域较窄,当系统存在外部大幅不确定性扰动时,闭环控制系统动态响应性能难以确保,易引发失稳。因此,从混合储能系统非线性本质出发,设计形式简单、响应快速的非线性控制器,实现混合储能系统宽范围内稳定控制,是提升城市轨道交通混合储能系统协调控制性能的关键步骤。

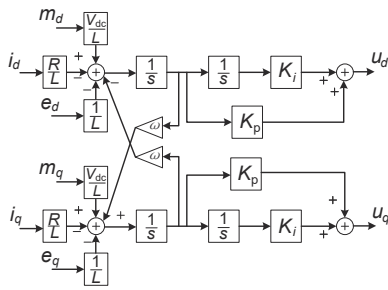


图4 传统矢量PI控制方法结构框图

Fig. 4 Schematic diagram of traditional vector PI control method

根据式(12),定义状态变量 $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ V_{dc} \ i_{sc}]^T$,输入变量 $\mathbf{u} = [m_d \ m_q \ 0 \ m_{sc} \ m_{bat}]^T$,可得城市轨道交通混合储能系统双线性模型,见式(13)。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \sum_{i=1}^5 u_i \mathbf{B}_i \mathbf{x} + \mathbf{d} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ \omega & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_{sc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_{bat}} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} -\frac{e_d}{L} & -\frac{e_q}{L} & 0 & -V_{sc} & -V_{bat} \end{bmatrix}^T$$

式中, $\dot{\mathbf{x}}$ 为 \mathbf{x} 导数。

由式(13)分析可知,通过构建城市轨道交通混合储能系统双线性模型交互矩阵 $\mathbf{B}_i(i=1,2,3,4,5)$,可准确刻画非线性状态变量 \mathbf{x} 和控制变量 \mathbf{u} 的同步线性映射关系,避免了非线性系统稳定工作点局部线性化带来的宽范围运行模型偏差问题,同时也为无源性控制器简化设计做准备。

2.2 基于双线性模型的混合储能系统无源性协同控制

定义 \mathbf{x}^* 为状态变量期望轨迹, \mathbf{u}^* 为输入变量期望轨迹,则由城市轨道交通混合储能系统双线性模型式(13)可知, \mathbf{x}^* 、 \mathbf{u}^* 满足式(14)。

$$\dot{\mathbf{x}}^* = \mathbf{A}\mathbf{x}^* + \sum_{i=1}^5 u_i^* \mathbf{B}_i \mathbf{x}^* + \mathbf{d} \quad (14)$$

式中: $\dot{\mathbf{x}}^*$ 为 \mathbf{x}^* 导数。

根据超级电容器和电池功率期望轨迹式(11),可得知超级电容器和电池输出电流期望轨迹 i_{sc}^* 、 i_{bat}^* ,见式(15)。

$$i_{sc}^* = \frac{P_{sc}}{V_{sc}}, i_{bat}^* = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (15)$$

式中: V_{sc} 、 V_{bat} 分别为超级电容和电池输出电压。

由式(11),定义AC/DC整流器交流侧牵引网有功功率、无功功率期望轨迹分别为 $P_g^* = P_g^{nom}$ 、 $Q_g^* = Q_g^{nom}$,则由 $P_g^* = i_d^* e_d + i_q^* e_q$, $Q_g^* = i_q^* e_d - i_d^* e_q$,可得AC/DC整流器交流侧电流期望轨迹 i_d^* 、 i_q^* ,见式(16)。

$$i_d^* = \frac{e_d P_g^* - e_q Q_g^*}{e_d^2 + e_q^2}, i_q^* = \frac{e_q P_g^* + e_d Q_g^*}{e_d^2 + e_q^2} \quad (16)$$

当直流牵引网电压维持额定值 V_{dc}^{nom} ,即满足直流牵引网电压期望轨迹 $V_{dc}^* = V_{dc}^{nom}$,则由式(12)、式(15)~式(16)可得控制变量期望轨迹 \mathbf{u}^* ,见式(17)。

$$\begin{cases} \dot{m}_d = \frac{Li_d^* + L\omega i_q^* + e_d + Ri_d^*}{V_{dc}^*} \\ \dot{m}_q = \frac{Li_q^* - L\omega i_d^* + e_q + Ri_q^*}{V_{dc}^*} \\ \dot{m}_{sc} = \frac{C\dot{V}_{dc}^* + m_d^* i_d^* + m_q^* i_q^* - m_{bat}^* i_{bat}^*}{i_{sc}^*} \\ \dot{m}_{bat} = \frac{C\dot{V}_{dc}^* + m_d^* i_d^* + m_q^* i_q^* - m_{sc}^* i_{sc}^*}{i_{bat}^*} \end{cases} \quad (17)$$

式中: \dot{V}_{dc}^* 为 V_{dc}^* 导数。

定义状态变量期望轨迹跟踪误差 $\Delta \mathbf{x}^* = \mathbf{x} - \mathbf{x}^*$, 输入变量期望轨迹跟踪误差 $\Delta \mathbf{u}^* = \mathbf{u} - \mathbf{u}^*$, 则由式(13)~式(14)可得城市轨道交通混合储能系统双线性增量模型见式(18)。

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}^* = \left(\mathbf{A} + \sum_{i=1}^5 \mathbf{u}_i \mathbf{B}_i \right) \Delta \mathbf{x} + \sum_{i=1}^5 \Delta \mathbf{u}_i^* \mathbf{B}_i \mathbf{x}^* \quad (18)$$

式中: $\Delta \dot{\mathbf{x}}^*$ 为 $\Delta \mathbf{x}^*$ 导数。

取正定对角矩阵 $\mathbf{P} = \text{diag}\{L, L, C, L_{sc}, L_{bat}\}$, 由式(18), 设计形式简单的无源性控制律见式(19)。

$$\mathbf{u} = -k(\mathbf{x}^T \mathbf{B}_1^T \quad \mathbf{x}^T \mathbf{B}_2^T \quad \mathbf{x}^T \mathbf{B}_3^T \quad \mathbf{x}^T \mathbf{B}_4^T \quad \mathbf{x}^T \mathbf{B}_5^T)^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{u}^* \quad (19)$$

式中, k 为无源性控制器增益系数。

适当调节控制器参数 k 可实现状态变量期望轨迹快速跟踪, 达成超级电容和电池协同运行控制目标。

为延长超级电容和电池运行寿命, 无源性控制律式(19)需满足的约束条件见式(20)。

$$\begin{cases} \text{SOC}_{sc}^{\text{low}} < \text{SOC}_{sc}(t) \leq \text{SOC}_{sc}^{\text{high}} \\ \text{SOC}_{bat}^{\text{low}} < \text{SOC}_{bat}(t) \leq \text{SOC}_{bat}^{\text{high}} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\text{SOC}_{sc}^{\text{low}}$ 、 $\text{SOC}_{sc}^{\text{high}}$ 分别为超级电容荷电状态 SOC_{sc} 上、下限; $\text{SOC}_{bat}^{\text{low}}$ 、 $\text{SOC}_{bat}^{\text{high}}$ 分别为电池荷电状态 SOC_{bat} 上、下限。

2.3 稳定性分析

利用 Lyapunov 稳定性定理, 证明所提城市轨道交通混合储能无源性闭环控制系统具有全局渐近稳定性。

根据式(18), 建立 Lyapunov 函数[式(21)]。

$$V(\Delta \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{P} \Delta \mathbf{x}^T \quad (21)$$

对式(21)求导可得式(22)。

$$\begin{aligned} \dot{V}(\Delta \mathbf{x}) &= \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \Delta \mathbf{x} \\ &= \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{P} \left[\left(\mathbf{A} + \sum_{i=1}^5 \mathbf{u}_i \mathbf{B}_i \right) \Delta \mathbf{x} + \sum_{i=1}^5 \mathbf{u}_i \mathbf{B}_i \mathbf{x}^* \right] \\ &= \sum_{i=1}^5 \Delta \mathbf{u}_i \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_i \mathbf{x}^* \\ &= \mathbf{y}^T \Delta \mathbf{u} < 0 \end{aligned} \quad (22)$$

分析式(22)可知, 不等式左侧为系统能量增量, 右侧为随控制误差由外部注入系统的能量供给量, 系统能量增量总和小于等于外部输入的能量总和, 根据无源性控制理论^[18], 所提无源性闭环控制系统为耗散系统, $\Delta \mathbf{u} \rightarrow \mathbf{y}$ 是严格无源的。根据 Lyapunov 稳定性定理, 分析式(21)~式(22)可知, 所提无源性闭环控制系统全局渐近稳定, 能够渐近收敛至期望工作点 \mathbf{x}^* 。

3 仿真结果分析

在 MATLAB/Simulink 仿真平台, 建立第1节所提城市轨道交通混合储能系统, 验证所提基于集合经验模态分解的无源性协同控制方法可行性与正确性。牵引系统和列车仿真参数, 如表1所示。混合储能系统仿真参数, 如表2所示^[16]。

表1 牵引系统和列车仿真参数

Table 1 Simulation parameters of traction system and train

参数	数值
交流牵引网额定电压/kV	35
直流牵引网额定电压/V	1500
直流牵引网电压允许波动范围/V	1000~1800
列车最高运行速度 v /(km/h)	80
列车平均加速度 a /(m/s ²)	$\geq 1.0, v \in [0, 40]$ $\geq 0.6, v \in [0, 80]$
列车单位阻力/(N/t)	$1.1064 + 0.0295v + 0.000248v^2$
列车运行阻力/(N/t)	$2340.9 + 62.42v + 0.525v^2$

仿真设置: 列车从A站出发运行至B站, 在 $t=0$ s时加速牵引, 在 $t=0.68$ s时达到最高运行速度 80 km/h, 保持速度行驶, 在 $t=2.68$ s时减速制动进入B站, 采用“恒加速启动-恒功率牵引-惰性制动”运行方式。列车速度和加速度波形, 如图5所示。列车电机转速和负载功率波形, 如图6所示。分析图5~图6可知, 列车负载最大启动功率需求约为 310 kW, 最大制动功率需求约为 -587.8 kW, 通过超级电容和电池协同控制, 抑制列车负载波动引起的牵引网电压波动, 提高再生制动能量利用率, 比较传统矢量PI控制方法^[13]、基于低通滤波的深度强化学习控制方法^[16]和所提的基于集合经验模态分解的无源性控制方法实现的混合储能系统协同的控制性能。

3.1 直流牵引网电压波动抑制性能分析

在无混合储能系统、制动电阻控制、传统矢量

表 2 混合储能系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of hybrid energy storage system

参数	数值	参数	数值
锂电池单体额定电压/V	2.7	超级电容器单体额定电压/V	2.7
锂电池单体额定容量/Ah	20	超级电容器单体额定容量/F	3000
锂电池串联数量	185	超级电容器串联数量	223
锂电池并联数量	6	超级电容器并联数量	5
锂电池初始荷电状态/%	85	超级电容器初始荷电状态/%	100
锂电池荷电状态安全范围/%	20~85	超级电容器荷电状态安全范围/%	15~100
锂电池额定电压/V	499.5	超级电容器额定电压/V	594

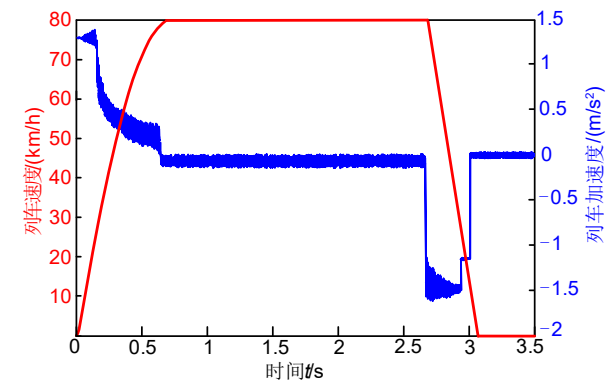


图 5 列车速度和加速度波形

Fig. 5 Waveforms of train speed and acceleration

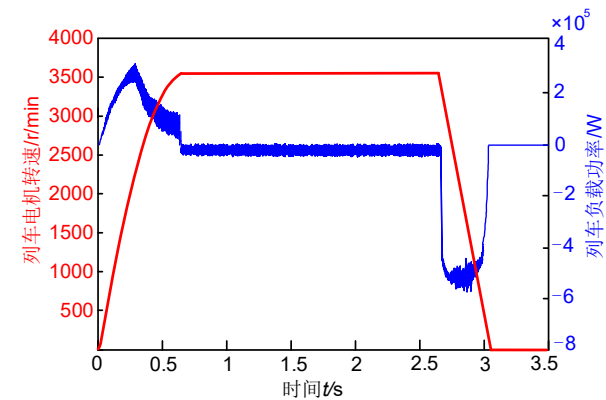


图 6 列车电机转速和负载功率波形

Fig. 6 Waveforms of motor speed and train power

PI 控制、基于低通滤波的深度强化学习控制和基于集合经验模态分解的无源性控制等方法下的直流牵引网电压波形，如图 7 所示。波动抑制性能量化比较，如表 3 所示。

分析图 7 和表 3 可知，城市轨道交通未配置混合储能系统时，列车加速牵引和减速制动过程，负载功率需求波动明显，未采用制动电阻和混合储能装置，导致直流牵引网电压谷值为 1055 V，峰值为 1898 V，波动剧烈，幅度达到了 843 V，再生制

动能未能回收利用，且可能造成安全隐患。

采用制动电阻控制方法，列车加速牵引时制动电阻不启动，因此直流牵引网电压谷值依然为 1055 V；列车减速制动时启动制动电阻，能够消耗部分再生制动能量，抑制反馈至直流牵引网的再生制动能量造成的电压抬升，电压峰值降为 1731 V，波动幅度减小至 676 V，但由于列车在加速牵引过程中制动电阻并无作用，这限制了制动电阻控制方法的电压波动抑制性能，且依然未实现再生制动能量的回收利用。

针对城市轨道交通配置的混合储能系统，采用传统矢量 PI 控制方法，在列车加速牵引过程中实现混合储能系统释放能量，在列车减速制动过程中实现吸收再生制动能量，能够有效抑制直流牵引网电压波动，电压峰、谷值分别下降至 1552 V 和 1422 V，但由于矢量 PI 控制参数在列车牵引恒功率工况下整定，当列车功率发生突增或突降时，矢量 PI 控制超调较大，调节时间较长，不利于列车在运行高峰情形下达成牵引电力快速响应的需求，未能充分发挥混合储能系统快速响应特性。

采用基于低通滤波的深度强化学习控制方法，通过设定低通滤波器阈值，将混合储能系统功率划分为高频分量和低频分量，分别分配给超级电容和电池，深度强化学习控制方法通过对列车不同运行模式的特征捕捉和特性拟合，快速响应列车负载需求，超调较小，调节时间较短，能将直流牵引网电压波动限制在 55 V 范围内，但直流牵引网电压动态跟踪过程中存在小幅振荡。

采用基于集合经验模态分解的无源性控制方法，超级电容和电池的分频阈值根据列车负荷需求在线动态调整，提升了频率分解精度，充分发挥了超级电容和电池响应特性，基于集合经验模态分解的无源性控制方法，动态过程中虽然直流牵引网电

压期望轨迹跟踪上升速度较慢，但电压输出控制平稳，振荡小，电压波动范围小，动静态综合性能较优，在最大化提高再生制动能量利用率的前提下，实现了直流牵引网电压平稳控制，消除安全隐患。

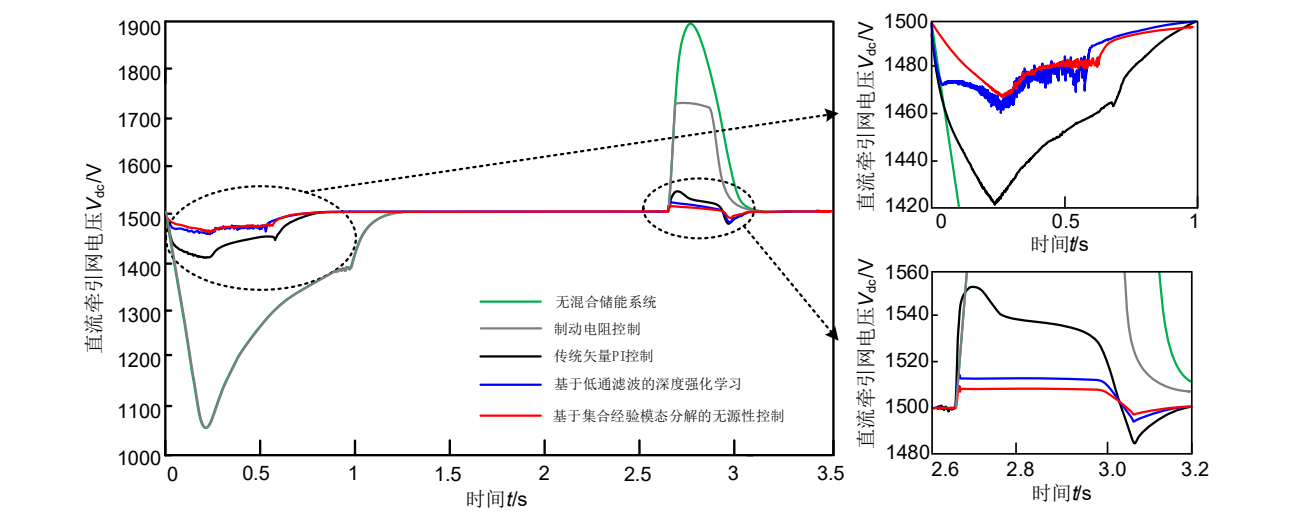


图7 不同控制方式下直流牵引网电压波形
Fig. 7 Waveforms of DC traction voltage with different control methods

表3 不同控制方式下直流牵引网电压波动抑制性能比较

Table 3 Comparison of voltage fluctuation regulation performance of DC traction voltage with different control methods			
控制方式	波动电压谷值/V	波动电压峰值/V	电压波动幅度/V
无混合储能系统	1055	1898	843
制动电阻控制	1055	1731	676
传统矢量PI控制	1422	1552	130
基于低通滤波的深度强化学习控制	1460	1515	55
基于集合经验模态分解的无源性控制	1464	1509	45

为比较混合储能系统不同控制方法的稳压效果与节能效果，定义稳压效果量化指标 f 为配置混合储能系统前、后直流牵引网电压 $V_{dc,hessless}$ 、 $V_{dc,hess}$ 超出或低于额定值部分积分的百分比，节能效果量化指标 s 为配置混合储能系统后列车负载 Z_{train} 能耗变化占未配置混合储能系统能耗的百分比，即式(23)~式(24)^[16]。

$$f = \left| 1 - \frac{\int_0^T (V_{dc,hessless} - V_{dc,hess}) dt}{\int_0^T (V_{dc,hessless} - V_{dc}^{norm}) dt} \right| \times 100\% \quad (23)$$

$$s = \left| 1 - \frac{\int_0^T V_{dc,hess}^2 / Z_{train} dt}{\int_0^T V_{dc,hessless}^2 / Z_{train} dt} \right| \times 100\% \quad (24)$$

根据式(23)~式(24)，与未配置混合储能系统情形下的直流牵引网电压和能耗比较，可得配置混合储能系统后采用传统矢量PI控制、基于低通滤波的

深度强化学习控制、基于集合经验模态分解的无源性控制方法的稳压效果和节能效果，如图8所示。量化指标比较结果，如表4所示。

分析图8和表4可知，传统矢量PI控制方法虽利用混合储能系统实现了列车减速制动时的能量回收和列车加速牵引时的能量再利用，改善了节能效果，但未充分利用超级电容和电池的响应特性，稳压效果和节能效果受限，列车加速牵引时仅为72.3%和71.1%，列车减速制动时仅为88.3%和40.3%。基于低通滤波的深度强化学习控制方法和基于集合经验模态分解的无源性控制方法具有更优的节能、稳压效果，动态响应快速，分别跟踪超级电容和电池功率期望轨迹，可实现功率高、低频分量的准确分配和协同控制。较基于低通滤波的深度强化学习控制方法，本文所提控制方法将直流牵引网电压作为混合储能系统双线性模型状态变量，通

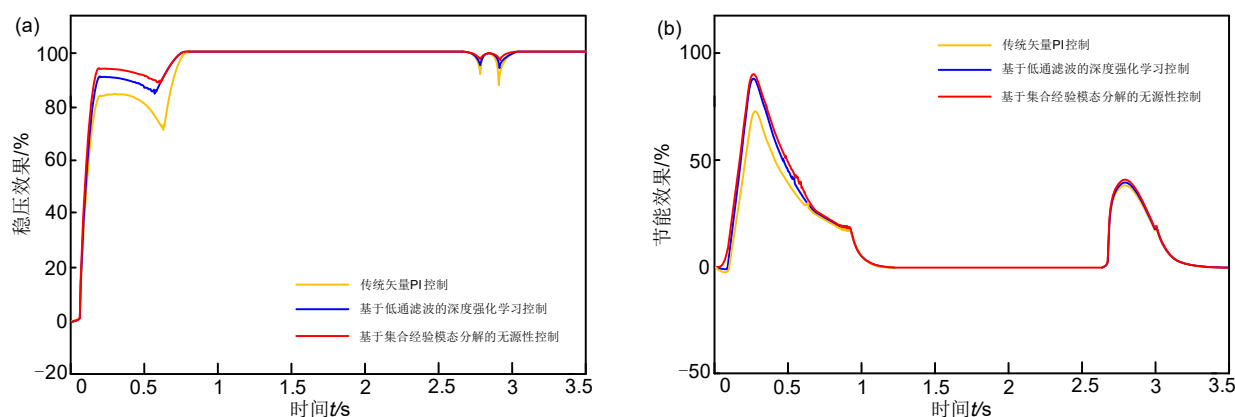


图8 与未配置混合储能系统情形比较不同控制方法的 (a) 稳压效果和 (b) 节能效果

Fig. 8 (a) Voltage regulation and (b) energy-saving efficiencies of different control methods compared with unconfigured hybrid energy storage system

表4 不同控制方法稳压效果和节能效果量化指标比较

Table 4 Comparison of quantitative indicators for voltage regulation and energy-saving efficiencies with different control methods

控制方式	稳压效果/%		节能效果/%	
	加速牵引过程	减速制动过程	加速牵引过程	减速制动过程
传统矢量PI控制	72.3	88.3	71.1	40.3
基于低通滤波的深度强化学习控制	86.2	92.5	83.2	41.6
基于集合经验模态分解的 无源性控制	93.5	95.7	86.1	42.2

过实时控制AC/DC整流器和DC/DC双向变换器调制系数,实现列车负载功率大幅波动时直流牵引网电压平稳控制,列车加速牵引时稳压效果达93.5%,列车减速制动时达95.7%;加速牵引时节能效果达86.1%,列车减速制动时达42.2%,稳压和节能效果提升显著。

3.2 混合储能系统功率响应性能分析

传统矢量PI控制、基于低通滤波的深度强化学习控制、基于集合经验模态分解的无源性控制方法的超级电容器和电池功率响应波形,如图9所示。超级电容器和电池的荷电状态波形如图10所示。

分析图9(a)和图10(a)可知,在列车加速牵引和减速制动过程中,3种控制方法都能利用超级电容器快速充放电特性,有效响应列车负载功率突变需求。传统矢量PI控制方法因未采用分频机制,超级电容器充放电程度最浅;基于低通滤波的深度强化学习控制方法采用定阈值分频方式,使超级电容器承担更多列车负载功率高频分量,充放电程度较传统矢量PI控制方法有所加深;本文所提基于集合经验模态分解的无源性控制引入Hilbert变换,以模

式混叠能量最小化为原则,实现超级电容器和电池功率期望轨迹精确分配,最大化利用超级电容器快速放电能力,在确保直流牵引网电压平稳的前提下,降低电池充放电功率,提升系统运行经济性。

分析图9(b)和图10(b)可知,在列车加速牵引和减速制动过程中,3种控制方法都能实现利用电池释放或吸收再生制动能量,维持直流牵引网电压平稳。采用传统PI控制方法,电池充放电功率峰值最高,荷电状态变化幅度大,未能充分利用超级电容器分担负载功率高频分量,混合储能系统整体经济性不高;基于低通滤波的深度强化学习控制方法和本文所提控制方法显著降低了电池功率需求和荷电状态变化幅度,虽然基于低通滤波的深度强化学习控制方法具有更快的响应速度和更短的暂态过程,但本文所提控制方法实现了更优的电池能量管理,电池功率波动小,可以在安全运行范围内达到更小的充放电深度,延长电池使用寿命,综合性能较优。

不同控制方法的超级电容器和电池功率及荷电状态变化范围比较,如表5所示。分析表5可知,

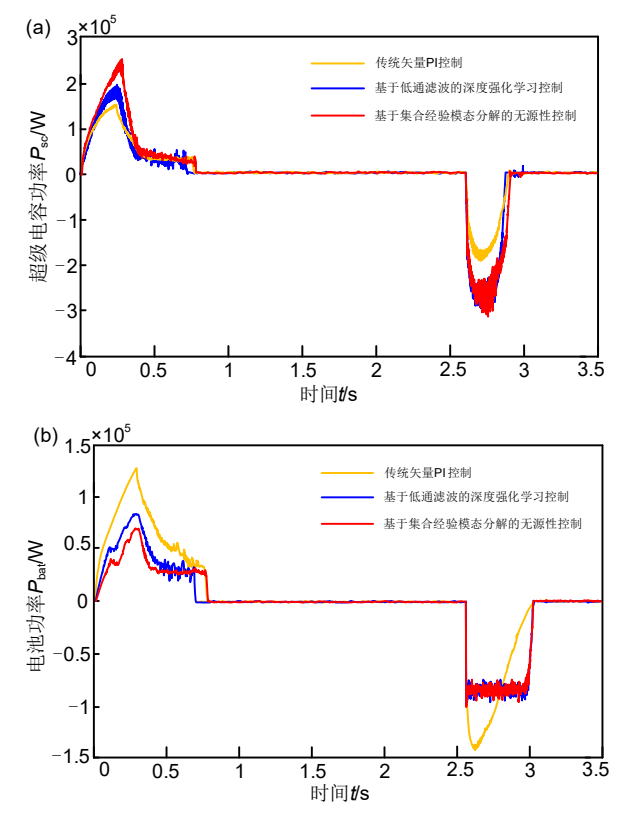


图9 (a) 超级电容器和 (b) 电池功率响应波形
Fig. 9 Power response waveforms of (a) supercapacitor and (b) battery

较传统矢量PI控制、基于低通滤波的深度强化学习控制方法，本文所提基于集合经验模态分解的无源性控制方法兼顾了直流牵引网电压平稳和混合储能系统能量优化的双目标，能够根据列车负荷实时功率在线求解最优分频频率，精确求取超级电容器和电池功率期望轨迹，最大化降低模式混叠对分频精度的影响，超级电容器快速响应列车负荷高频分量，扩大功率变化范围，达到了-315.2~263.8 kW，荷电状态变化为15.2%~50.1%，而传统矢量PI控

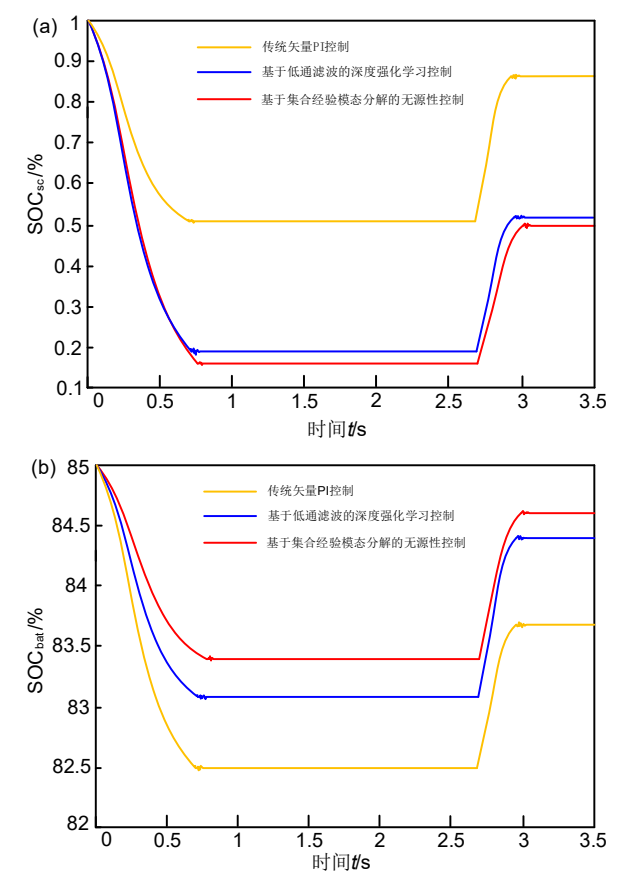


图10 (a) 超级电容器和 (b) 电池荷电状态响应波形
Fig. 10 State of charge response waveforms of (a) supercapacitor and (b) battery

制和基于低通滤波的深度强化学习控制方法超级电容器功率及荷电状态变化范围分别为-195.1~154.5 kW、50.7%~87.1%和-298.3~195.2 kW、19.6%~52.5%；采用本文所提无源性控制方法，可实现超级电容器和电池功率期望轨迹的快速跟踪，电池仅需响应列车负荷低频分量，有效降低了电池功率需求，功率和荷电状态变化范围仅为-93.5~69.3 kW和83.4%~84.6%，能量损耗小。

表5 不同控制方法超级电容和电池功率及荷电状态变化范围比较				
Table 5 Comparison of power and state of charge changes of supercapacitor and battery with different control methods				
控制方式	P_{sc}/kW	P_{bat}/kW	$SOC_{sc}/\%$	$SOC_{bat}/\%$
传统矢量PI控制	-195.1~154.5	-144.8~130.0	50.7~87.1	82.5~83.7
基于低通滤波的深度强化学习控制	-298.3~195.2	-95.3~80.5	19.6~52.5	83.1~84.4
基于集合经验模态分解的无源性控制	-315.2~263.8	-93.5~69.3	15.2~50.1	83.4~84.6

3.3 混合储能系统输出电压响应性能分析

传统矢量PI控制、基于低通滤波的深度强化学习

控制、基于集合经验模态分解的无源性控制方法的超级电容器和电池输出电压响应波形，如图11所示。超

级电容器和电池输出电压变化范围比较,如表6所示。

分析图 11 和表 6 可知,对于充放电功率突变,超级电容器输出电压暂态响应较平稳,电池输出电压暂态响应波动明显,说明电池对充放电功率突变更敏感,维持电池输出电压平稳,对电池稳定运行和寿命延长十分重要。采用本文所提基于集合经验模态分解的无源性控制方法,虽然电池暂态过渡时间稍长,但输出电压波动更小,电池输出电压波动幅度仅 15.6 V,传统矢量 PI 控制和基于低通滤波的深度强化学习控制方法的电池输出电压波动幅度分别为 21 V 和 18.8 V。因此,对于列车负载不确定性功率扰动,本文所提控制方法具有更优的稳定性,可以减小电池输出电压波动,有利于降低电池充放电率和峰值充放电电流,最小化列车负载突变对电池寿命的影响,具有较优的工程适应能力。

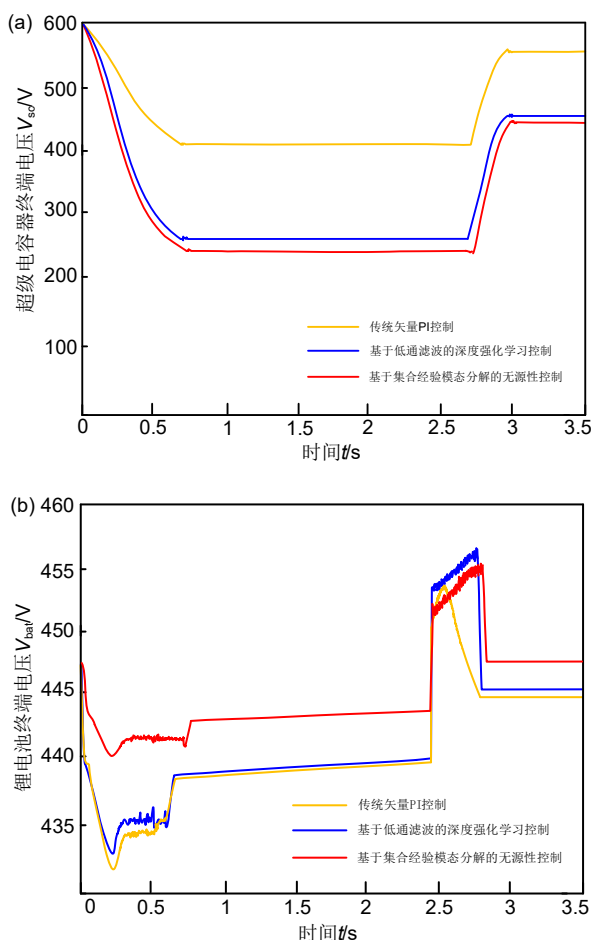


图 11 (a) 超级电容器和 (b) 电池输出电压响应波形
Fig. 11 Output voltage response waveforms of (a) supercapacitor and (b) battery

表 6 不同控制方法超级电容器和电池功率及荷电状态变化范围比较

Table 6 Comparison of output voltage changes of supercapacitor and battery with different control methods

控制方式	V_{sc}/V	V_{bat}/V
传统矢量PI控制	410.1~563.1	432.5~453.5
基于低通滤波的深度强化学习控制	261.6~461.2	438.5~457.3
基于集合经验模态分解的无源性控制	242.3~445.5	440.6~456.2

4 结 论

针对城市轨道交通列车频繁启停引起的牵引网电压大幅波动问题,本文提出基于集合经验模态分解的无源性控制方法,利用混合储能系统,实现直流牵引网电压波动平抑,提升再生制动能量回收利用率,降低城市轨道交通能耗。与传统矢量 PI 控制和基于低通滤波的深度强化学习控制方法相比,本文所提控制方法在集合经验模态分解中引入 Hilbert 变换,精确求取分频频率,实时更新超级电容器和锂电池功率期望轨迹;设计形式简单的无源性控制器,实现超级电容器和锂电池功率期望轨迹同步快速跟踪,在满足混合储能系统协同控制需求的同时,最大化利用超级电容器快速充放电特性,抑制电池过充过放,有效延长电池寿命,提升系统整体经济效益。

参 考 文 献

- [1] 金勇,黄先进,石春珉,等.城市轨道交通地面储能技术应用综述[J].电工技术学报,2024,39(15):4568-4582,4642. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231712.
- [2] JIN Y, HUANG X J, SHI C M, et al. Review on wayside energy storage technology for urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231712.
- [3] HUANG Y, HU H T, GE Y B, et al. Joint sizing optimization method of PVs, hybrid energy storage systems, and power flow controllers for flexible traction substations in electric railways[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1210-1223. DOI: 10.1109/TSTE.2023.3331346.
- [4] 滕世平.基于车载超级电容储能系统在城市轨道交通的应用[J].储能科学与技术,2022,11(7):2398-2399.
- TENG S P. Application of energy storage system based on vehicle-mounted supercapacitor in urban rail transit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2398-2399.
- [4] 宋元明,刘亚杰,金光,等.锂离子电池/超级电容器混合储能系统能量管理方法综述[J].储能科学与技术,2024,13(2):652-668. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0568.

- SONG Y M, LIU Y J, JIN G, et al. Review of energy management methods for lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 652-668. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0568.
- [5] DONG H Z, TIAN Z B, SPENCER J W, et al. Bi-level optimization of sizing and control strategy of hybrid energy storage system in urban rail transit considering substation operation stability[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, PP (99): 1. DOI: 10.1109/TTE.2024.3385821.
- [6] CHEN M W, LV Y B, LU W J, et al. Train-network-HESS integrated optimization for long-distance AC urban rail transit to minimize the comprehensive cost[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 54-67. DOI: 10.1109/TITS.2022.3218639.
- [7] FEDELE E, IANNUZZI D, TRICOLI P, et al. NPC-based multi-source inverters for multimode DC rail traction systems[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 1289-1299. DOI: 10.1109/TTE.2022.3175097.
- [8] DA SILVA MORAES C G, BROCKVELD S L, HELDWEIN M L, et al. Power conversion technologies for a hybrid energy storage system in diesel-electric locomotives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 9081-9091. DOI: 10.1109/TIE.2020.3021643.
- [9] SUN Y S, TANG X S, SUN X Z, et al. Model predictive control and improved low-pass filtering strategies based on wind power fluctuation mitigation[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(3): 512-524. DOI: 10.1007/s40565-018-0474-5.
- [10] WANG B Y, SANIIE J. Massive ultrasonic data compression using wavelet packet transformation optimized by convolutional autoencoders[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 34(3): 1395-1405. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3105367.
- [11] WANG T H, LI Q, YIN L Z, et al. Hierarchical power allocation method based on online extremum seeking algorithm for dual-PEMFC/battery hybrid locomotive[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 5679-5692. DOI: 10.1109/TVT.2021.3078752.
- [12] 魏震波, 姚怡欣, 张雯雯, 等. 基于完备集合经验模态分解的含抽蓄微电网混合储能容量优化配置[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(11): 3414-3424. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0432.
- WEI Z B, YAO Y X, ZHANG W W, et al. Capacity-based optimal configuration of microgrid hybrid energy-storage system with pumped storage based on CEEMDAN[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(11): 3414-3424. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0432.
- [13] ZAHEDI B, NORUM L E. Modeling and simulation of all-electric ships with low-voltage DC hybrid power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(10): 4525-4537. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2231884.
- [14] ZHANG X B, WANG B F, GAMAGE D, et al. Model predictive and iterative learning control based hybrid control method for hybrid energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 2146-2158. DOI: 10.1109/TSTE.2021.3083902.
- [15] ZHANG M F, XU Q W, ZHANG C L, et al. Decentralized coordination and stabilization of hybrid energy storage systems in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1751-1761. DOI: 10.1109/TSG.2022.3143111.
- [16] WANG X, LUO Y B, QIN B, et al. Power allocation strategy for urban rail HESS based on deep reinforcement learning sequential decision optimization[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(2): 2693-2710. DOI: 10.1109/TTE.2022.3227900.
- [17] 钱玉村, 杨博, 郑如意, 等. 基于经验模态分解-灰色关联度分析-蒲公英优化器改进Elman网络的锂离子电池健康状态估计[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3695-3704. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0409.
- QIAN Y C, YANG B, ZHENG R Y, et al. State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on EMD-DO-Elman and GRA[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3695-3704. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0409.
- [18] ZHOU Y J, JI C, DONG Z H, et al. Cooperative control of SFCL and SMES-battery HESS for mitigating effect of ground faults in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(8): 5403305. DOI: 10.1109/TASC.2021.3103720.