

地铁制动能量回收的混合储能系统及其参数设计*

林仕立^{1,2,3,4} 宋文吉^{1,2,3**} 陈明彪^{1,2,3,4} 冯自平^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 510640, 广州; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 510640, 广州;

3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 510640, 广州;

4. 中国科学院大学, 100049, 北京//第一作者, 助理研究员)

摘要 混合储能技术兼具能量型器件和功率型器件的优势, 适用于地铁制动能量的回收利用。介绍了基于地面储能方式和双 DC/DC 架构的混合储能系统。研究了双向 DC/DC 变换器、锂电池组和超级电容组的参数设计方法, 并采用 MATLAB 软件搭建仿真模型, 与单一储能系统进行了控制效果、经济性的对比分析。结果表明: 所设计的混合储能系统使牵引网电压在整个制动过程中均处于安全范围, 系统投资成本和体积质量较小, 性价比优势突出, 同时实现了应急工况下备用电源的作用, 验证了混合储能系统及其参数设计的合理性。

关键词 地铁; 制动能量回收; 混合储能系统; 参数设计

中图分类号 U260.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.019

Hybrid Energy Storage System and the Parameter Design for Metro Braking Energy Recovery

LIN Shili, SONG Wenji, CHEN Mingbiao, FENG Ziping

Abstract Due to the advantages of both capacity and power devices, hybrid energy storage technology is suitable for the recovery and utilization of metro braking energy. In this paper, the hybrid energy storage system (HESS) based on ground mode and dual DC/DC architecture is introduced. With a study on the parameter design methods of the bidirectional DC/DC converter, battery and super-capacitor packs, a simulation model is built by MATLAB, and compared with the single energy storage system in terms of control effect and system economy. The results show that the designed HESS makes the traction grid voltage in safe range during the whole braking process. Because of the small investment cost and volume quality, the prominent cost-effective advantage, HESS can effectively realize the function of standby power supply under e-

mergency conditions. Hence the rationality of HESS and its parameter design are verified.

Key words metro; braking energy recovery; hybrid energy storage system; parameter design

First-author's address Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, 510640, Guangzhou, China

0 引言

地铁是当前城市公共交通的重要组成部分, 电气安全和系统节能是其运行中重点关注的问题^[1-2]。在变压变频电力传动方式下, 地铁车辆制动过程可以回馈相当于牵引能量 30% 以上的电能到直流牵引网, 以供区间内的其它车辆使用; 但再生电能应及时消耗, 否则将引起牵引网电压过高、再生制动失效等安全问题^[3-4]。采用电阻消耗多余制动能量是目前常见的保障手段, 但这导致了再生电能的浪费, 同时增加了通风散热的二次能耗, 削弱了再生制动所带来的节能减排作用。

储能是代替电阻消耗多余制动能量并实现多余制动能量再利用的有效方法。文献[5]提出了一种地面式超级电容储能系统, 以经济效益和电压补偿为目标对储能系统位置、大小进行优化, 但其超级电容组整体配置容量偏小, 需要通过电阻辅助耗能。文献[6]提出了基于钛酸锂电池的车载储能系统; 钛酸锂电池的高倍率充电特性适合地铁制动能量回收的应用场合, 但其价格昂贵, 系统成本高。文献[7]采用飞轮储能系统对地铁制动能量进行回收, 但飞轮设备复杂且能量密度低、安装要求较高,

* 国家重点研发计划 (2016YFB0901405); 广东省基础与应用基础研究基金面上项目 (2020A1515010721); 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室基金项目 (E039020101)

** 通信作者

且该技术仍处于研究阶段,暂未见成熟的商业应用。

地铁制动能量瞬时高功率和短时大能量的特点,使得单一储能系统存在储能量不足、稳压性能差或容量冗余大、体积和质量大及成本高等问题,难以大范围推广到地铁系统中。混合储能技术是解决该问题的有效方法^[8-9]。因此,本文结合锂电池和超级电容两种不同特性储能器件,提出适用于地铁制动能量回收再利用的混合储能系统。基于混合储能系统拓扑结构和地铁供电网功率波动特性,设计了变换器、锂电池组、超级电容组的电气参数及控制策略,并与单一储能系统进行了控制效果、经济性的对比分析,验证了混合储能系统及其参数设计的合理性。

1 地铁混合储能系统

地铁储能系统有地面式和车载式两种安装形式^[10]。本文研究对象为地面式储能系统。

1.1 储能器件特性

锂电池和超级电容是能量型和功率型储能器件的典型代表,两者的主要技术参数如表 1 所示。储能系统整体性能由储能介质特性决定,因此,将锂电池和超级电容组成混合储能系统,可充分利用两种储能器件的特点,使得地铁储能系统具备高能量密度、高功率密度及低成本的性价比优势。

表 1 锂电池、超级电容技术参数表

项目	锂电池	超级电容
能量密度/(Wh/kg)	150~200	2~5
功率密度/(W/kg)	200~315	7 000~18 000
响应时间	慢	快
循环寿命/次	1 000~10 000	100 000
价格/(元/kWh)	2 000	100 000
工作电压变化	变化小	变化大

1.2 混合储能系统拓扑结构

混合储能系统拓扑结构对系统能量效率、投资运行成本等具有较大影响。根据其连接方式,可分为直接并联结构、电池-DC(直流电)/DC 结构、超级电容-DC/DC 结构及双 DC/DC 结构^[11],具体如图 1 所示。

直接并联结构为被动模式,结构简单,但功率分配取决于储能器件各自内阻,无法精确控制,不利于发挥混合储能系统性能。

电池-DC/DC 结构和超级电容-DC/DC 结构属于半主动模式。电池-DC/DC 结构中,超级电容可

快速提供系统响应以缓和尖峰功率,但变换器的传输效率受超级电容组配置影响大,而锂电池组作用有限;超级电容-DC/DC 结构中,锂电池组可提供稳定的输出电压,但变换器无法持续工作在额定区间,不同工况下系统效率差异较大。

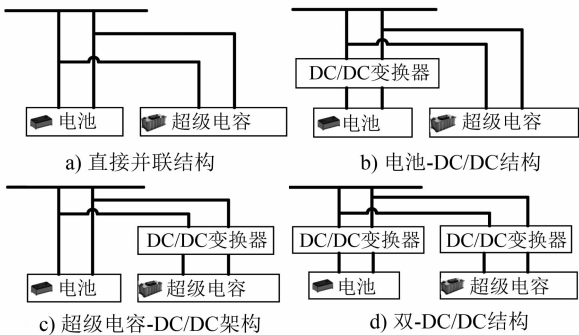


图 1 地铁混合储能系统拓扑结构

双 DC/DC 结构属于主动模式,具有良好的控制性能,但成本较高且控制电路复杂。考虑到地铁牵引网电压过高对行车安全影响较大,同时电池组和超级电容组的解耦控制在一定程度上可减少系统容量冗余,因此本文混合储能系统采用双 DC/DC 结构。

2 混合储能系统参数设计

混合储能系统由锂电池组、超级电容组及双向 DC/DC 变换器构成。该系统参数的选取与制动能量大小、系统工作模式、控制方式等有较大关系。以下将研究混合储能系统参数的设计方法。

2.1 双向 DC/DC 变换器参数设计

2.1.1 变换器拓扑结构及控制模式

双向 DC/DC 变换器可以实现电流的双向传递。其中,非隔离型双向半桥变换器不经过变压器环节且所需开关器件少、器件电压电流应力小,具有效率高、控制简单、经济性好等优势。因此,本文采用双向半桥变换器拓扑结构,并选择 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)作为主电路开关器件,以满足高电压、大功率的需求。

当地铁制动电能使得牵引网电压高于设定上限时,双向 DC/DC 变换器在 buck(降压)模式下实现充电,此时 IGBT1 以一定占空比导通,IGBT2 不启动,工作过程如图 2 所示。由图 2 可知,IGBT1 导通期间,电流由高压侧流向低压侧;假定导通时长为 t_r ,则当 $t=t_r$ 时,IGBT1 关断,存储在电感线圈 L 中的能量经过 IGBT2 反并联二极管 D_2 续流,继续向储能设备充电,直至一个循环周期结束。

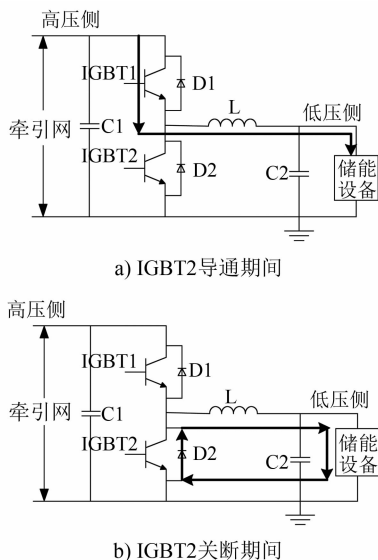


图 2 变换器在 buck 模式下工作过程示意图

当储能系统放电以释放存储空间或提供电压支撑时,双向 DC/DC 变换器工作在 boost(升压)模式下,IGBT2 以一定占空比导通,IGBT1 不启动,与 buck 模式相反,其工作过程如图 3 所示。

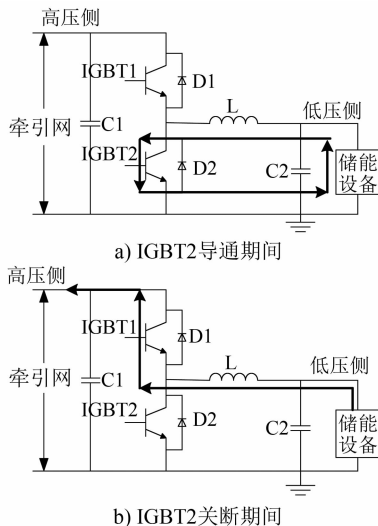


图 3 变换器在 boost 模式下工作过程示意图

2.1.2 变换器参数设计

在上述工作过程中,应保证双向 DC/DC 变换器中流经电感器的电流处于连续状态。因此, L 的取值应大于 buck、boost 模式下维持电流连续的临界电感值,其表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \geq L_{\text{buck}} = \frac{D_{\text{buck}}}{2I_{L,\text{buck}}f_{s,\text{boost}}} \times (U_{\text{in,buck}} - U_{\text{out,buck}}) \\ L \geq L_{\text{boost}} = \frac{D_{\text{boost}} \times (1 - D_{\text{boost}})^2}{2I_{L,\text{boost}}f_{s,\text{boost}}} \times U_{\text{out,boost}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$L_{\text{buck}}、L_{\text{boost}}$ ——分别为 buck 和 boost 模式下保证电流连续的临界电感值;

$I_{L,\text{buck}}、I_{L,\text{boost}}$ ——分别为 buck 和 boost 模式下 L 的平均电流值;

$D_{\text{buck}}、D_{\text{boost}}$ ——buck 模式下 IGBT1 和 boost 模式下 IGBT2 的占空比,其工作频率 $f_{s,\text{buck}}、f_{s,\text{boost}}$ 可取同一值 f_s ;

$U_{\text{in,buck}}、U_{\text{out,buck}}$ ——分别为 buck 模式下变换器的输入和输出电压;

$U_{\text{out,boost}}$ ——boost 模式下变换器的输出电压。

同时, L 还需满足输出纹波电流 Δi 的要求,一般可根据 buck 模式下理想电感器件的电压电流关系得到,如式(2)所示。

$$L \geq L_{\Delta i} = U_{c_2} \frac{dt}{di} \quad (2)$$

式中:

$L_{\Delta i}$ ——满足纹波电流要求的临界电感值;

U_{c_2} ——电容 C_2 的电压值;

di ——buck 模式下的 Δi 值;

dt ——取 $0.5 T_s$, T_s 为频率 f_s 的倒数。

根据式(1)、(2)的计算结果,得到的最大值即为双向 DC/DC 变换器的电感值。

双向 DC/DC 变换器高低压侧的电容主要起滤波作用,其必须满足输出电压的纹波要求。电容 C_2 可根据 buck 模式下低压侧输出电压的纹波要求计算得到,电容 C_1 可根据 boost 模式下高压侧输出电压的纹波要求计算得到。其计算式如式(3)、(4)所示:

$$C_2 = \frac{U_{\text{out,buck}}(1 - D_{\text{buck}})}{8L\Delta U_{\text{out,buck}}} T_s^2 \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{U_{\text{out,boost}}(1 - D_{\text{boost}})}{8L\Delta U_{\text{out,boost}}} T_s^2 \quad (4)$$

式中:

$\Delta U_{\text{out,buck}}、\Delta U_{\text{out,boost}}$ ——分别为 buck 和 boost 模式下输出电压的纹波,一般可取 1%。

2.2 储能设备

锂电池和超级电容在使用中一般以先串联、后并联的成组形式出现。对于 m 串 n 并的成组设备,其主要参数是串联总电压和并联总容量。为提高变换器的转换效率,其高低压侧的变比以不超过 3:1 为宜。正常运行时牵引网电压在 1 500~1 800 V 之间,则储能设备串联电压应达到 600 V 级别。

2.2.1 锂电池组参数设计

对于大容量电池,当成组总电压达到 600 V 时,其某一串联支路的容量已大于地铁单次制动所产生的再生电能。因此,若采用磷酸铁锂电池作为电池组基本储能器件,可仅使用其电压平台段所对应的容量区间,使锂电池更好发挥其性能并延长寿命。一般取 10%~90% 的容量范围,即当锂电池组的 S_{oc} (荷电状态)高于 90% 时,停止充电; S_{oc} 低于 10% 时,停止放电。因此,锂电池组实际容量 E_{bpack} 可由式(5)得到:

$$E_{bpack} = n_b m_b Q_{cell} V_{cell} D_{OD} \tag{5}$$

式中:

Q_{cell} 、 V_{cell} ——分别表示锂电池单体的额定容量和额定电压;

D_{OD} ——放电深度;

m_b 、 n_b ——分别表示串联个数和并联组数。

其中, m_b 由串联总电压和单体额定电压得到,如式(6)所示; n_b 可由系统所需存储的总能量确定。一般应使得 E_{bpack} 大于若干次制动过程所产生的再生电能总和,同时应能满足大电网故障时驱动车辆至临近站点所需的能量需求。

$$m_b = \frac{V_{bpack}}{V_{cell}} \tag{6}$$

式中:

V_{bpack} ——锂电池组的串联总电压。

2.2.2 超级电容组参数设计

由于超级电容端电压随 S_{oc} 降低而降低,为避免系统低效率运行,其一般工作在半电压至满电区间,此时对应容量范围为 25%~100%。则超级电容组总容量 E_{cpack} 可由式(7)得到:

$$E_{cpack} = \frac{3}{8} n_c m_c C U_c^2 \tag{7}$$

式中:

C 、 U_c ——分别表示超级电容单体的额定容量和额定电压;

m_c 、 n_c ——分别表示串联个数和并联组数。

其中,为保证双向 DC/DC 变换器一直处于高变比的运行工况, m_c 由串联总电压和单体最低工作电压值得到,而 n_c 由系统总功率得到。 E_{bpack} 应满足在锂电池组处于最大功率运行时提供剩余尖峰功率的需求。

2.3 控制策略

结合上述混合储能系统设计参数,采用协同控

制器对牵引网电压以及储能设备 S_{oc} 进行实时监控,并设定变换器电压阈值为 1 700 V,即当牵引网电压超过 1 700 V 时,锂电池组和超级电容组同时充电以吸收制动能量。受运行时段、载客量等影响,不同工况下制动能量波动较大,为减少锂电池组功率冲击,其充电倍率由超级电容组 S_{oc} 以及制动功率共同确定:当超级电容组 S_{oc} 较低时,锂电池组的充电倍率以额定倍率(C)的 1/3 进行充电;当超级电容组 S_{oc} 较高时,锂电池组充电倍率取额定倍率;当制动功率较大时,锂电池组以最大倍率充电。剩余制动能量全部由超级电容组吸收,直至 100% 满电状态。

3 地铁混合储能系统仿真分析

本文以广州地铁 4 号线为例,设计混合储能系统并搭建 MATLAB/Simulink 模型。由文献[12]可知,高峰时段制动功率最大值和平均值分别约为 500 kW 和 380 kW,平峰时段分别约为 2 210 kW 和 1 400 kW,单次制动能量约 7.5 kWh。同时,若采用储能系统提供动力,在列车运行速度为 20 km/h、运行距离为 2.5 km 的工况下需消耗 10 kWh 的电能。

根据上述功率/能量需求可知,双向 DC/DC 变换器中 L 、 C_1 、 C_2 分别取 14.7 mH、350 μ F、283.6 μ F。锂电池组和超级电容组参数如表 2 所示。

表 2 地铁混合储能系统参数

储能器件	单体	串联个数/个	并联组数/组	储能量/kWh	最大电流/A
锂电池	3.2 V/20 Ah	192	8	98.30	5C
超级电容	2.7 V/650 F	384	5	1.26	3 400

3.1 稳压性能及经济性分析

设置锂电池组和超级电容组的初始 S_{oc} 均为 50%。高峰时段的仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,车辆制动瞬间牵引网电压迅速上升并超过 1 700 V,超级电容组和锂电池组同时启动,超级电容组响应速度较快,充电电流大;锂电池组响应速度相对较慢,由于充电初期超级电容组 S_{oc} 较低,锂电池组以 0.33 C 进行充电,其充电电流约为 60 A。整个制动过程中,牵引网电压稳定在 1 700 V 的安全范围,超级电容组承担了制动能量波动频率较大的部分,锂电池组承担了较平缓的部分,并在后期提供了足够的存储容量,使得混合储能系统发挥了超级电容响应快、倍率高及锂电池能量密度大的优势。

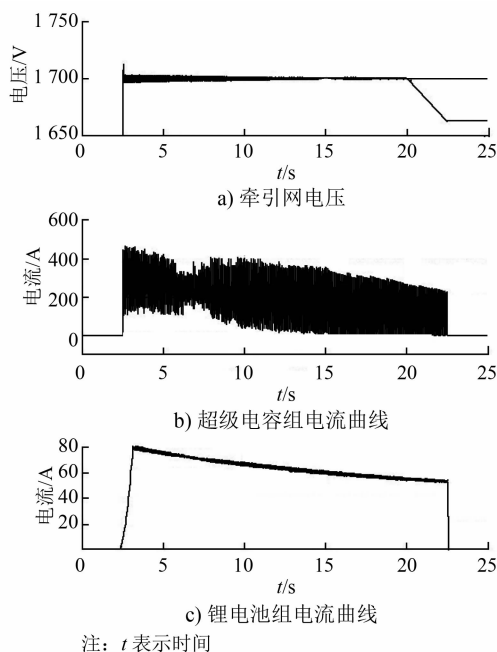


图4 高峰时段牵引网电压及混合储能系统电流曲线

与单一锂电池储能系统相比,混合储能系统中超级电容可提供快速响应和大倍率支撑,因此保证了牵引网良好的稳压性能。若采用单一锂电池组并以 $2.5C$ 的高倍率进行充电,经计算可知仍需20组锂电池并联才能满足瞬时功率需求,储能系统体积、质量将显著增加。同时,如图5所示,由于锂电池响应速度较慢,在起始时刻牵引网电压瞬时值接近 $2200V$,无法保证牵引网电压全程处于安全范围,故整体控制性能较差,长期运行将对供电安全和供电质量造成影响。

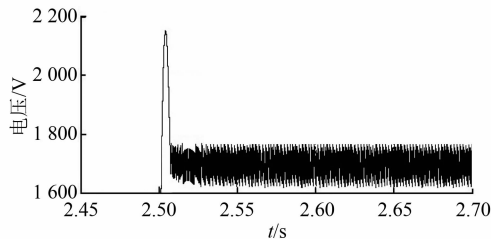


图5 单一锂电池储能系统电压控制效果图

3.2 应急需要分析

混合储能系统可作为地铁列车的备用电能,在大电网故障等极端运行环境下,提供正在两站间运行的列车正常驶入临近站点的电能需求。若上述混合储能系统处于满电状态,则仅需约总剩余电量的10%即可驱动地铁车辆安全行驶至邻近站点。由于锂电池组仅采用10%~90%的容量区间,因此可确保紧急工况下的备用电能需求;同时,如图6所

示,超级电容组可提高储能系统的整体输出功率,在车辆启动和加速时提供足够的功率支撑,保证应急工况下锂电池组的电能得到较好的利用。

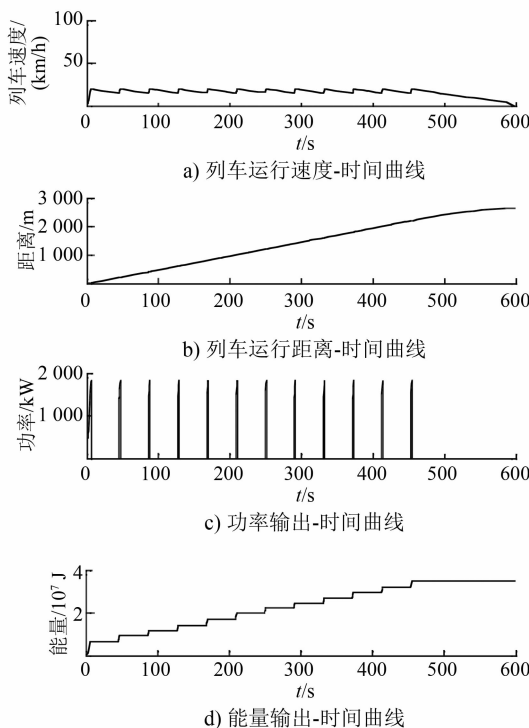


图6 应急工况下混合储能系统的功率/能量输出图

4 结语

地铁制动能量的回收利用是实现地铁供电系统节能的有效手段。基于地面储能方式和双DC/DC架构的混合储能技术,可应用于现有地铁线路的改造和新建线路的安装。本文研究了列车制动能量回收再利用的混合储能系统参数设计方法,并搭建模型进行仿真分析。结果表明:混合储能系统可以发挥锂电池高能量密度、价格低的特点和超级电容高功率密度、快速响应的特点,在整个制动过程中可有效实现牵引网电压的稳定;其投资成本及体积和质量较小,性价比优势突出;可作为备用电源使用以保障应急工况下地铁车辆安全行驶至临近站点。这是一种适用于地铁制动能量回收利用的有效方法。

参考文献

- [1] 彭其渊,李文新,王艺儒,等. 基于再生制动的地铁列车开行策略研究[J]. 铁道学报, 2017(3): 7.
- [2] ARTURO G, ROBERTO P, PAUL B. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 374.

(下转第83页)

4 结论

1) 由于碰撞刚度不匹配,有轨电车在碰撞过程中不产生碰撞变形,所有的碰撞内能都由汽车变形吸收,有轨电车与汽车在碰撞内能和碰撞变形上严重不协调,有轨电车对汽车及其乘员有很大的攻击性,两者存在严重的碰撞兼容性问题。因此,解决有轨电车与汽车碰撞兼容性问题的关键是合理地匹配两者的碰撞刚度。

2) 当碰撞速度大于 30 km/h 时,汽车乘员的头部和胸部损伤指标将超过其损伤阈值,其乘员会有受重伤乃至危及生命的危险。因此,建议有轨电车司机在碰撞事故频繁地段(如平交道口),控制其运行速度,以小于 30 km/h 或更小的速度运行。

3) 当碰撞速度较高时(大于 25 km/h),45°侧面碰撞比 90°侧面碰撞更加危险。

参考文献

- [1] 明瑞利. 有轨电车系统安全性分析[J]. 城市交通, 2016(4): 59.
- [2] 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] 水野辛治, 韩勇, 陈一唯. 汽车碰撞安全[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [4] KIRKPATRICK S W, SCHROEDER M P, SALAZAR J C V. Developing Guidelines for Crashworthiness of Light Rail Vehicles in Mixed Fleet Operations[C]//ASME 2002 International

Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, Louisiana, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2002: 129-137.

- [5] KIRKPATRICK S W, MACNEILL R A, GOUGH G, et al. Development of Crash Energy Management for Light Rail Vehicles[C]//ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference. Pueblo, Colorado, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2007: 215-223.
- [6] BOCCHIERI R T, KIRKPATRICK S W, NAVARRO-NORTHROP C, et al. Collision safety improvements for light rail vehicles operating in shared right of way street environments[C]//ASME 2009 Rail Transportation Division fall technical conference. Fort Worth, Texas, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2009: 61-70.
- [7] MACNEILL R A, KIRKPATRICK S W, BOCCHIERI R T, et al. Development of a Prototype Retrofit Bumper for Improved Light Rail Vehicle Safety[C]//2015 Joint Rail Conference. San Jose, California, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [8] KOVANDOVÁ H, VÁLKA R. Experimental study of non-compatible collision of Rail and road vehicle[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2014, 26(6): 459.
- [9] T GIBSON, B FILDES, H DEERY, et al. Improved Side Impact Protection: A Review of Injury Patterns, Injury Tolerance and Dummy Measurement Capabilities[R]. Melbourne, Australia: Monash University Accident Research Centre, 2001.
- [10] KAHANE C J. Evaluation of FMVSS 214—Side Impact Protection Dynamic[R]. Washington, D.C., U.S.: NHTSA, 2006.

(收稿日期: 2019-01-02)

(上接第 79 页)

- [3] 张一, 成建国, 吴松荣, 等. 基于超级电容的地铁列车再生制动能量利用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016(9): 56.
- [4] FLAVIO C, DIEGO I, DAVIDE L, et al. Optimal control of stationary lithium-ion capacitor-based storage device for light electrical transportation network[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(3): 618.
- [5] XIA H, CHEN H, YANG Z P, et al. Optimal energy management, location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm[J]. Energies, 2015, 8: 11618.
- [6] 王子超, 高硕通. 地铁钛酸锂电池车载储能系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(10): 36.
- [7] 毕文骏. 基于飞轮储能的地铁再生制动能量利用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [8] 郑财晖. 轨道交通混合储能系统的研究与实现[J]. 机械与电子, 2016(11): 44.

- [9] 陈怀鑫, 王似玉. 城市轨道交通车载混合储能装置新型控制方案及策略研究[J]. 电气化铁道, 2018(1): 65.
- [10] BARRERO R, TACKOEN X, CA J V. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224: 207.
- [11] XIONG R, DUAN Y, CA J Y, et al. Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle[J]. Applied Energy, 2018, 217: 153.
- [12] LIN S, SONG W, LUO L, et al. Simulation research on voltage stabilization control strategy for rail transportation traction grid based on HESS[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, 377: 65.

(收稿日期: 2018-12-18)