

文章编号:1005-0523(2019)01-0033-08

# 城市轨道交通车载混合储能系统的研究

杨丰萍, 郑文奇, 刘 锋, 谢梦莎

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**针对城轨列车在起动、制动过程中对牵引网电压造成冲击从而引起网压不稳定的问题,提出一种由超级电容与钛酸锂电池组成的混合储能系统,该混合储能系统满足城轨列车对高能量和高功率的需求。以混合储能系统的整体结构为研究对象,着重介绍了预充电回路的设计与仿真验证,它能明显提升混合储能装置的性能以及延长使用寿命。针对该混合储能结构,提出采用综合控制策略,该策略通过控制主电路中两个双向DC/DC变换器的工作模态来实现储能单元工作在恒流充放电状态。最后仿真对比综合控制策略与传统电压电流双闭环控制策略,仿真波形对比分析表明:对于牵引机车等大容量负荷突增与突减造成的网压波动,综合控制策略能更有效、快速调节混合储能系统的充放电状态,确保牵引网压波动幅度较小,提高城轨列车的运行可靠性与稳定性。

**关键词:**城市轨道交通;混合储能系统;预充电回路;综合控制策略

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

近年来,城市人口的不断增加给城市交通带来了巨大的压力。为了解决交通堵塞的问题,城市轨道交通应运而生,其具有速度快、安全性能高、运输量大、无污染、准时等优点,因此得到了快速的推广与发展。截至目前,全世界已有100多个城市建设了轨道交通工程,其中包括地铁和轻轨等<sup>[1]</sup>。

城市轨道交通车辆在制动过程中产生可观的再生制动能量,如果这些能量不能通过接触网反馈至牵引变电所或者直接被邻近行驶的列车所吸收,就会产生再生失效的问题<sup>[2]</sup>。因此针对列车制动能量再生失效的这一问题,文献[3]指出能量存储装置将发挥巨大的作用。当城轨列车再生制动时,能量存储装置能够吸收制动时产生的电能;当城轨列车需要起动时,能量存储装置能够释放电能,进而保证接触网上的电压波动较小。

目前,可应用于城市轨道交通的储能装置种类有很多。文献[4]对各种储能装置的特点进行了比较,铅酸蓄电池可满足城市轨道交通车辆对能量密度的要求,但难以满足城轨车辆动态响应性能要求;超级电容具有使用寿命长、功率密度高、响应速度快的特性<sup>[4]</sup>,但其能量密度较低。钛酸锂电池能量密度大,但功率密度低、响应速度相对较慢<sup>[5]</sup>。单种储能元件无法同时满足城轨车辆对功率和能量的需求,为了满足列车对高能量和高功率的需求,城轨列车的储能装置可采用超级电容和钛酸锂电池组成的混合储能系统(hybrid energg storage system, HESS)。该混合储能系统可以结合两种储能元件的互补优势,弥补二者单独作为储能元件的不足。

本文首先介绍了车载混合储能系统的整体结构,分析了各部分子系统的功能以及相关性和相关性,在此基础上,着重设计了预充电回路,该回路主要作用是给混合储能装置进行预充电操作,使其达到安全储能的初始状态。接着提出了一种综合控制策略,并以超级电容器组储能装置为例详细介绍了其恒流充放电控制策略。利用Matlab/Simulink软件仿真对比了综合控制策略与传统电压、电流双闭环控制策略,得出相应的仿真波形。

收稿日期:2018-09-09

基金项目:江西省教育厅科技项目(GJJ160489)

作者简介:杨丰萍(1967—),女,教授,硕士研究生导师,研究方向为交通信息工程及控制、电力电子与电力传动等。

# 1 基于 HESS 的城轨列车运行系统结构

## 1.1 车载混合储能系统的整体结构

车载混合储能系统的整体结构如图 1,主要由两部分来构成:一是直交牵引传动系统,用来模拟城轨列车的运行状态;二是车载混合储能系统,它由双向 DC/DC 变换器、预充电回路、钛酸锂电池组和超级电容器组构成,主要用来仿真超级电容和钛酸锂电池充放电的过程。这两个系统之间存在密切的联系。城轨列车整个运行过程中,为了维持牵引供电网上的电压稳定,可以利用超级电容和钛酸锂电池组成的混合储能系统来抑制城轨列车加速与减速过程对直流母线造成的冲击。其中: $U_{sc}$  为超级电容器组端电压; $U_{Li}$  为钛酸锂电池组端电压; $U_{DC}$  为直流母线电压; $I_{sc}$ 、 $I_{Li}$  分别为超级电容与钛酸锂电池的输出电流; $L_1$ 、 $L_2$  都为回路储能电感; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  为全控型开关管。

从系统整体结构图中可以看出,双向 DC/DC 变换器起着连接牵引网与混合储能装置的桥梁作用。它是混合储能系统中储能元件的控制装置,也是牵引网负荷平衡调节器,能够降低牵引机车等大容量负荷突增与突减造成的网压波动。文献[6]详细介绍了四种双向 DC/DC 变换器拓扑结构的优缺点与工程应用范围,结合城轨列车起制动频繁、负荷较重的特点,本文选用由两个双向 DC/DC 变换器构成的主动式拓扑结构。此拓扑结构具有更高的灵活性和更大的电压调控范围,对钛酸锂电池组和超级电容器组具有更好的保护作用。

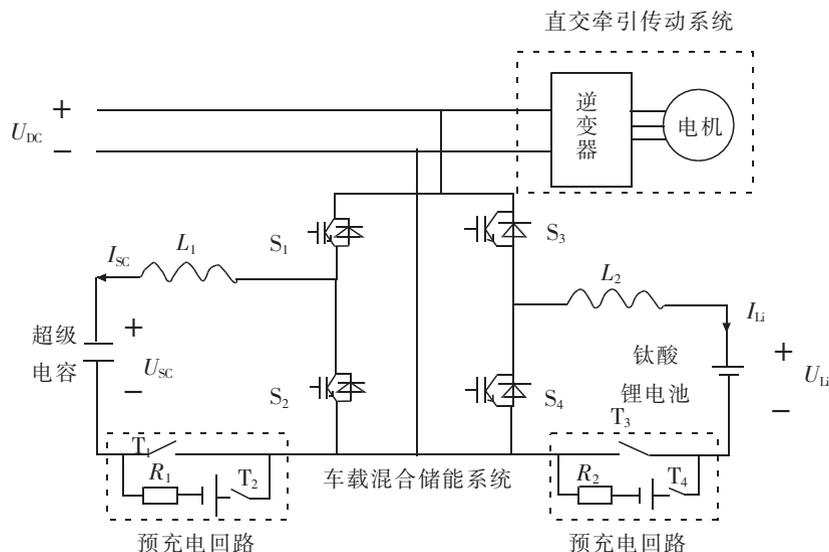


图 1 系统整体结构图

Fig.1 The overall structure of the system

## 1.2 预充电回路的原理与设计

在车载混合储能系统中,合理的预充电电路对整个电气系统的安全可靠运行至关重要,根据安全性原则,需分别给超级电容器组与钛酸锂电池组设计单独的预充电回路。该预充电回路的作用主要是给储能元件充电,使超级电容器组与钛酸锂电池组达到给定的初始状态,以降低储能元件端电压突变给其带来的电流冲击,增加安全性。钛酸锂电池组预充电过程与超级电容器组完全相同,这里仅给出超级电容器组的预充电过程。

### 1.2.1 车载混合储能系统预充电保护工作原理

预充电电路简化工作原理图如图 2 所示,其中, $U_1$  为直流电压源, $R_1$  为预充电电阻, $L_1$  为储能电感, $C$  为超级电容器组, $T_1$  与  $T_2$  为转换开关(起电路的转换作用), $VD_1$  为二极管。

图 1 中,假如缺少了预充电回路,即没有直流电压源  $U_1$ ,预充电电阻  $R_1$ ,转换开关  $T_1$ ,当由机车制动反馈给牵引网的电能再通过双向 DC/DC 变换器给超级电容器储能装置充电,此时直流母线电压经过 Buck 变换器直接给超级电容器充电,充电电压突然加到未预充电的超级电容器上,造成超级电容器端电压突变,由

超级电容的瞬态电流公式  $i=C \times \frac{du}{dt}$  可知,将产生非常高的冲击电流(约几万安培),如果不采取有效的防护措施,该冲击电流会对车载混合储能系统中的储能电感、IGBT 模块产生损伤,减小这些器件的使用寿命,严重时可直接烧坏这些器件。因此,需要在超级电容器组储能充电前对其进行预充电,使超级电容器初始端电压达到实际工程应用所要求的限定电压值。

1.2.2 预充电回路的设计与仿真验证

预充电简化电路图如图 2 所示。其工作过程如下:首先转换开关  $T_1, T_2$  都处于断开状态,超级电容器组储能装置未接入混合储能系统中,此时预充电电流为 0 (即为流经储能电感上的电流);接着转换开关  $T_2$  闭合,  $T_1$  断开,直流电源  $U_1$  对超级电容器组进行预充电,直到其两端电压达到给定值(即超级电容器组的初始端电压下限值记为  $U_{SC,min}$ ),此时电感电流先迅速增大随后在额定电流值处保持稳定(储能电感值较大,流经电感上的电流不会突变);然后转换开关  $T_2$  断开,  $T_1$  闭合,超级电容器组储能装置接入混合储能系统中,可以进行机车再生制动能量的存储,即超级电容器组完成预充电操作。

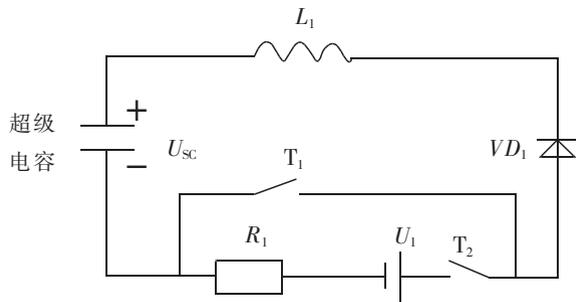


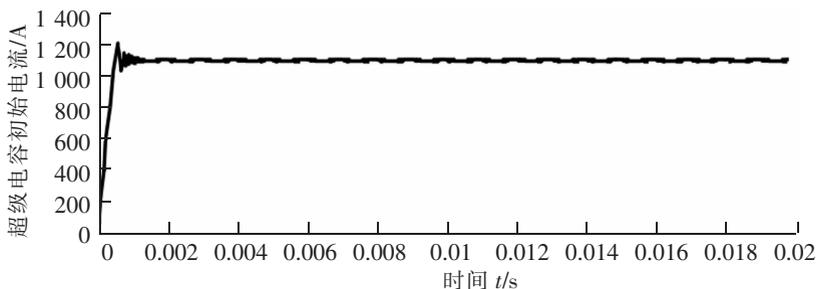
图 2 预充电电路简化工作原理图  
Fig.2 The simplified working principle diagram of precharge circuit

下面给出图 2 中预充电电阻的计算过程。对于初始电压为 0 的超级电容器,由 RC 电路的一阶电路零状态响应方程得充电公式<sup>[7]</sup>

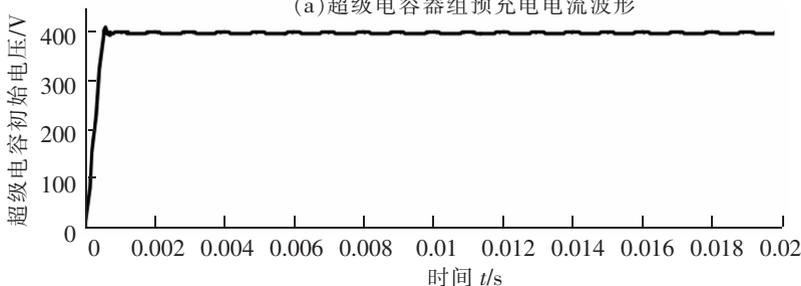
$$U_{SC,min} = U_1(1 - e^{-t/2RC}) \tag{1}$$

式中:超级电容器组的初始端电压下限值记为  $U_{SC,min}$ ;  $U_1$  为直流电源电压;  $t$  的取值标准按照预充电完成时间小于控制系统要求的预充电完成时间,此处  $t$  可取 0.02 s,满足城轨列车对于能量反馈的快速性需求。

仿真时间参数设置:  $U_{SC,min}$  为 400 V,  $U_1$  为 500 V,  $C$  为 89.5 F, 由公式 (1) 计算得出预充电电阻为  $6.94 \times 10^{-5} \Omega$ ,依据图 2 简化电路搭建 Matlab/Simulink 的仿真模型,可以得到超级电容器组预充电电流、电压波形。从仿真波形中可以看出:流经超级电容器的预充电电流迅速上升,最后趋于超级电容器组要求的初始电流 1 100 A;超级电容器组端电压从 0 增大到初始电压 400 V(即安全限定电压下限值)见图 3。



(a) 超级电容器组预充电电流波形



(b) 超级电容器组预充电电压波形

图 3 预充电仿真结果

Fig.3 Results of precharge simulation

## 2 混合储能系统的综合控制策略

在城市轨道交通领域内,混合储能系统需要根据城轨列车的运行特性来输出指定的功率或电流<sup>[8-9]</sup>,常在恒流充电或恒流放电模式下工作,钛酸锂电池恒流充电和恒流放电的变换器控制策略与超级电容完全相同。因此下面仅给出超级电容的恒流充放电的变换器控制策略。

当城轨车辆起动或制动时,超级电容在恒流放电或充电模式工作。由于直流母线电压等级高于超级电容的额定电压,若超级电容充电,双向 DC/DC 变换器相当于一个 Buck 电路,控制电感的电流实现恒流充电<sup>[10]</sup>(以图 1 中标注的电流方向为参考方向)。通过对 Buck 电路数学模型进行分析,超级电容恒流充电时,上半桥臂开关管占空比计算方程为

$$D_{pwm1} = \frac{-K_{PI}(I_{sc}^* - I_{sc}) + U_{sc}}{U_{DC}} \quad (2)$$

式中: $D_{pwm1}$  为开关器件  $S_1$  的占空比; $K_{PI}$  表示比例积分函数; $I_{sc}^*$  为超级电容输出电流给定值。当城轨列车制动时,牵引网上的电压将急剧抬升,此时超级电容需要恒流充电以保持直流网压波动幅度较小<sup>[11]</sup>,即使使上半桥臂开关管以一个恰当的占空比导通,而下半桥臂开关管  $S_2$  一直处于断开状态,超级电容恒流充电控制框图见图 4,其中 PI 为比例积分控制器(proportion integral controller)。

当城轨列车起动时,牵引网上的电压将急剧下降,为了保持直流网压波动幅度较小,超级电容需要以恒流放电模式工作,双向 DC/DC 变换器相当于 Boost 电路,通过控制下半桥臂的开关管实现恒流放电,恒流放电时下半桥臂开关管占空比计算方程为

$$D_{pwm2} = \frac{K_{PI}(I_{sc}^* - I_{sc}) + U_{DC} - U_{sc}}{U_{DC}} \quad (3)$$

此时上半桥臂开关管一直处于断开状态。超级电容恒流放电的控制框图如图 5 所示。

然后综合以上不同阶段的超级电容控制策略,可以得到整个储能系统的控制策略,其框图如图 6 所示。

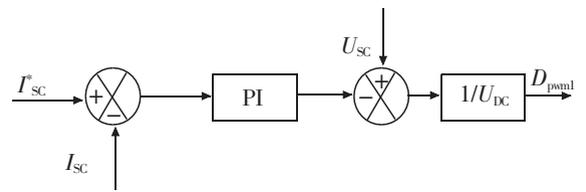


图 4 超级电容恒流充电控制框图  
Fig.4 Control block diagram of supercapacitor constant current charging

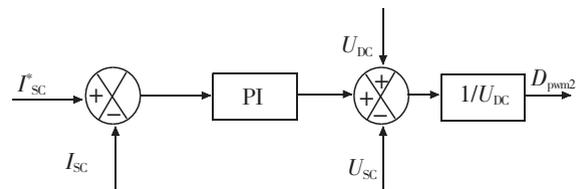


图 5 超级电容恒流放电的控制框图  
Fig.5 Control block diagram of supercapacitor constant current discharging

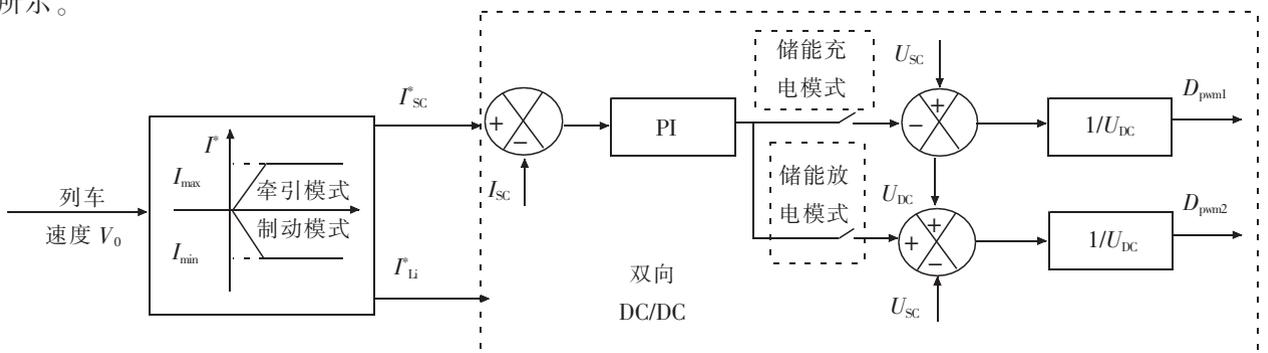


图 6 整体储能系统的综合控制策略  
Fig.6 Integrated control strategy for the overall energy storage system

### 3 车载混合储能系统仿真

为了验证混合储能综合控制策略的有效性,以单个超级电容器组储能装置的完整充放电周期为例进行仿真,在 Matlab/Simulink 中建立了系统仿真模型,系统仿真结构如图 7 所示。

具体参数如下:

- 1) 牵引网电压参数: $U_{DC}=1\ 500\text{ V}$ ;
- 2) 双向 DC/DC 变换器参数: 储能电感  $L=3.86\text{ mH}$ , 滤波电容  $C=0.415\text{ mF}$ ;
- 3) PI 控制器参数: 超级电容电流 PI 控制器比例系数  $K_{pi}=450$ , 积分系数  $K_{ii}=0.36$ ;
- 4) 开关管 IGBT 模块的额定值:  $3\ 300\text{ V}/2\ 400\text{ A}$ ;
- 5) 混合储能系统参数: 超级电容  $C=89.5\text{ F}$ , 等效串联电阻  $R_{EF}=7.5\text{ m}\Omega$ , 预充电结束其初始状态  $U=400\text{ V}, I=1\ 100\text{ A}$ , 其端电压设定的安全范围  $400\sim 500\text{ V}$ 。

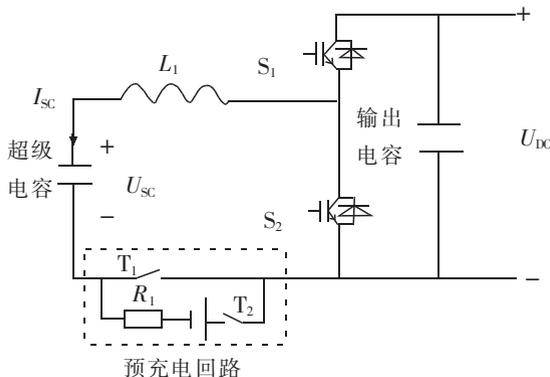
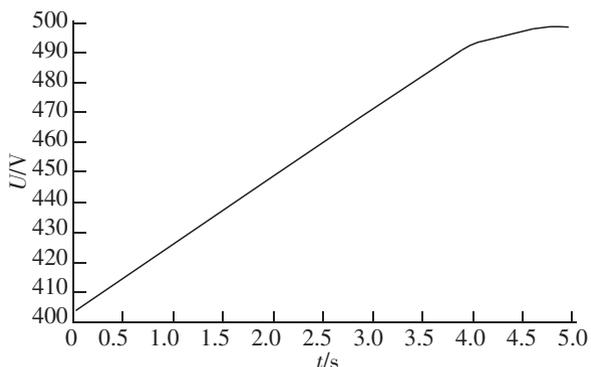
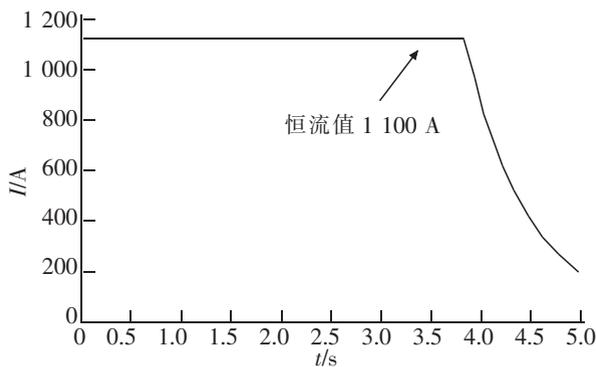


图 7 车载超级电容装置电路原理图  
Fig.7 Circuit schematic diagram of vehicle supercapacitor device

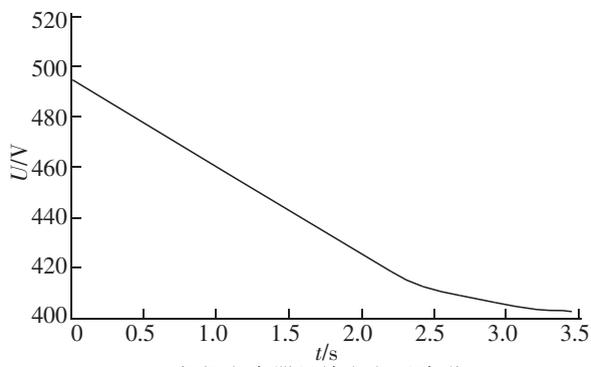
超级电容器组储能装置在综合控制策略下开始储能充电与放电,图 8(a),图 8(b)分别为超级电容器组充电电压与充电电流变化,在 0~3.7 s,用 1 100 A 的恒定电流给超级电容器组充电,其端电压迅速从初始电压 400 V 上升到 490 V,3.7 s 时端电压接近其最大限定电压 500 V,为了延长超级电容器组的使用寿命,宜采用限压稳流措施,故 3.7 s 以后用小电流对超级电容器充电。图 8(c),图 8(d)分别为超级电容器组放电时的电压、电流波形,在 0~2.3 s,超级电容器以 1 700 A 的恒定电流给城轨车辆进行供电,其端电压由 500 V 跌落至 415 V,而超级电容器的最小限定电压为 400 V,故 2.3 s 以后超级电容器以较小电流放电。



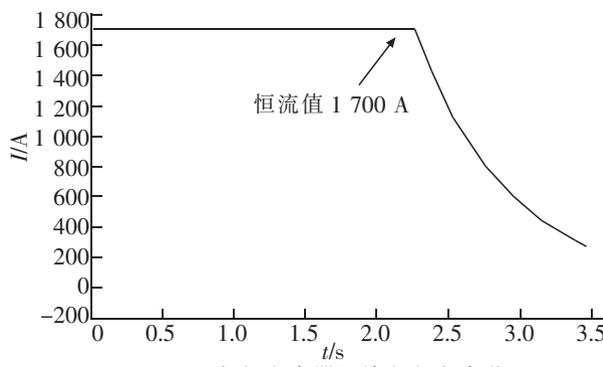
(a) 超级电容器组充电电压波形



(b) 超级电容器组充电电流波形



(c) 超级电容器组放电电压波形



(d) 超级电容器组放电电流波形

图 8 综合控制策略在城轨列车加速与减速状态下的仿真结果

Fig.8 Simulation results of integrated control strategy in urban rail train acceleration and deceleration

超级电容器组储能装置在传统电压、电流双闭环控制策略下开始储能充电与放电,图9为超级电容器充放电时的工作波形。通过与图8进行对比,发现在相同的负载、相同的起始条件下,综合控制策略用更短的时间完成了超级电容器的储能与释能过程,说明综合控制策略能更有效、快速调节混合储能系统的充放电状态,满足了城轨车辆动态响应的要求。

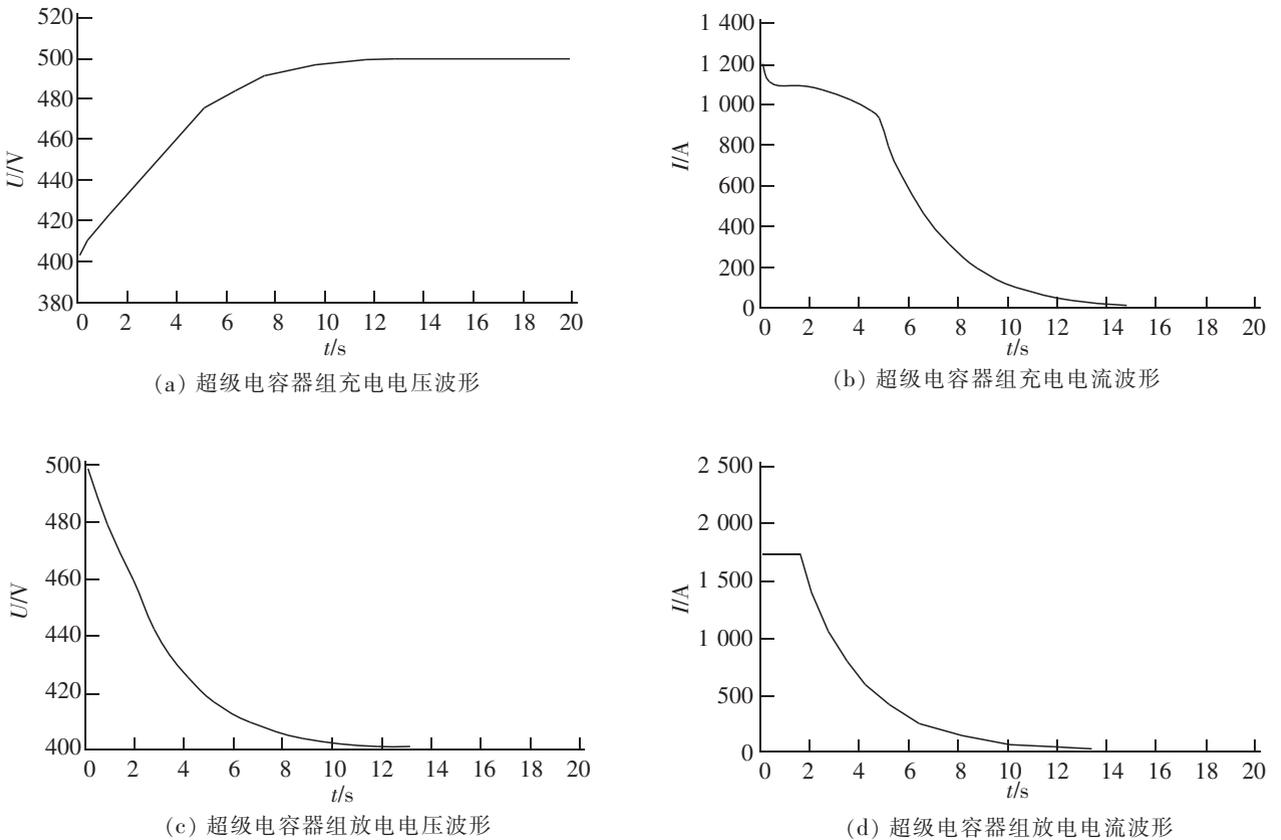


图9 传统控制策略在城轨列车加速与减速状态下的仿真结果

Fig.9 Simulation results of traditional control strategy in urban rail train acceleration and deceleration

图10是根据综合控制策略所得到的直流侧网压波动曲线,从图中可以看出:在0~10s时间段内,城轨车辆运行在恒速阶段,牵引网上的电压在小范围波动中保持稳定;在10~40s时间段内,城轨车辆运行在加速阶段,牵引网上的电压急剧下降,此时混合储能装置工作在放电模式,牵引网电压 $U_{DC}$ 在储能装置的作用下迅速恢复到稳态值;在50~80s时间段内,城轨车辆运行在减速阶段,牵引网上的电压迅速抬升,此时储能装置吸收再生能量,牵引网上的电压波动得到很好的抑制。而图11是混合储能装置在传统电压电流双闭环控制策略下得到的牵引网压波动曲线,对比这两个仿真波形可知:综合控制策略更好地实现较小的牵引网压波动幅度,提高了城轨列车的运行可靠性与稳定性。

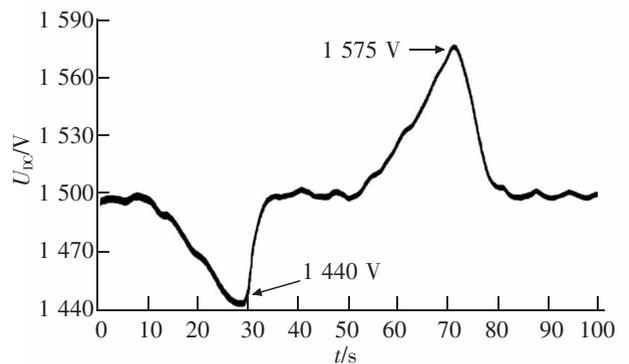


图10 混合储能装置在综合控制策略下的牵引网压波动曲线

Fig.10 Traction network pressure fluctuation curve of hybrid energy storage device by use of the proposed control strategy

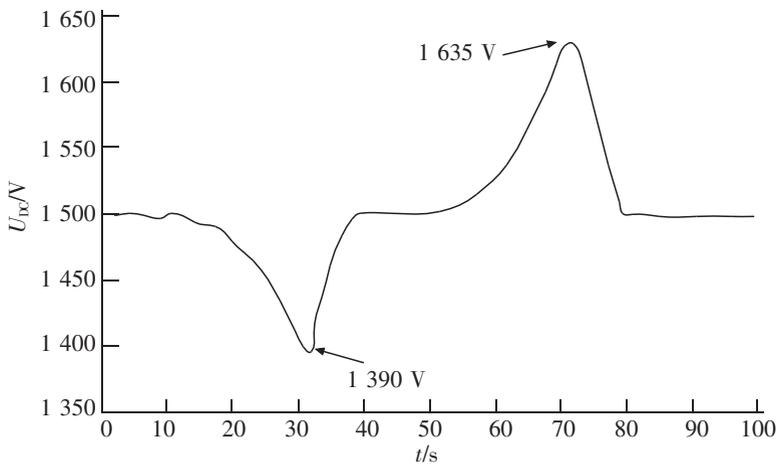


图 11 混合储能装置在传统控制策略下的牵引网压波动曲线

Fig.11 Traction network pressure fluctuation curve of hybrid energy storage device by use of traditional control strategy

#### 4 结语

储能系统对于维持城轨车辆运行过程所造成的牵引网压波动幅度具有重要的作用,本文使用由钛酸锂电池和超级电容组成的混合储能系统来减小网压波动幅度,接着给混合储能装置设计了预充电回路,该回路能降低储能元件端电压突变给其带来的电流冲击,延长混合储能装置的使用寿命,增加城轨列车运行系统的安全性。针对该混合储能结构,采用综合控制策略。该混合储能综合控制策略比传统电压电流双闭环控制策略具有更快的响应速度,更好地抑制了直流母线电压的波动,最后进行了仿真验证。

#### 参考文献:

- [1] 张弛. 现代有轨电车车载混合储能系统能量管理优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2018:15-20.
- [2] 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,2018,29(1):65-71.
- [3] 陈怀鑫,杨中平,林飞,等. 应用于城轨交通供电系统的超级电容储能装置稳定性研究[J]. 铁道学报,2016,38(3):59-65.
- [4] 王俭朴,任成龙. 城市轨道交通车辆储能技术研究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(1):124-127.
- [5] 王子超,高硕遥. 地铁钛酸锂电池车载储能系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(10):36-39.
- [6] 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.
- [7] 陈培哲,王薪强. 动力电池预充电电阻选型设计[J]. 客车技术与研究,2018,40(1):30-33.
- [8] 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+637.
- [9] 王伟,谢少军,张翌,等. 基于组合型双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J]. 电源学报,2016,14(3):83-93.
- [10] 程志江,李永东,谢永流,等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术,2015,39(10):2739-2745.
- [11] 彭云华. 超级电容储能型有轨电车用大电流快速充电系统研究[D]. 广州:华南理工大学,2017:28-32.

# Research on Vehicle-Mounted Hybrid Energy Storage System for Urban Rail Transit

Yang Fengping, Zheng Wenqi, Liu Feng, Xie Mengsha

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Given the fact that urban rail train impacts the traction network voltage during the starting and braking and brings about the negative impact of the grid voltage instability, this paper proposes a hybrid energy storage system composed of a super capacitor and a lithium titanate battery, which meets the demand of urban rail trains for high energy and high power. Taking the overall structure of the hybrid energy storage system as the research object, the design and simulation verification of the precharging circuit were introduced, which may significantly improve the performance of the hybrid energy storage device and prolong the service life. Based on the structure, an integrated control strategy was proposed, which realized the operation of the energy storage unit in the constant current charge and discharge state by controlling the working modes of the two bidirectional DC/DC converters in the main circuit. Finally, the simulation compared the proposed control strategy with the traditional voltage-current double closed-loop control strategy. The simulation waveform comparison analysis shows that the control strategy proposed in this paper can be more effective for the fluctuation of the network voltage caused by the sudden increase and decrease of large-capacity load such as traction locomotive. The rapid adjustment of the charging and discharging state of the hybrid energy storage system ensures that the fluctuation of the traction network pressure is small, and the operational reliability and stability of the urban rail train are improved.

**Key words:** urban rail transit; hybrid energy storage system; precharge loop; integrated control strategy

---

(上接第 32 页)

## Review on the Dynamics Research of Maglev Train

Xiao Qian, Xu Xu, Chen Guangyuan

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In the field of rail transit today, maglev trains are no longer limited by the traditional wheel-rail contact mode of travel, which uses electromagnetic force to overcome gravity and escapes from the ground. By way of maglev technology in railway transportation, the maglev train, as the most advanced mode of transportation, has undoubtedly become an important scientific and technological object on which all countries are competing for research. In order to improve driving safety and ride comfort, scholars at home and abroad have carried out a lot of researches on the dynamic problems related to maglev trains, and have obtained important results in theoretical analysis, numerical simulation and so on. This paper reviews the existing achievements in dynamic modeling, dynamic characteristics and suspension control of maglev train, and then puts forward some suggestions and prospects for further research.

**Key words:** maglev train; dynamic modeling; research of dynamics; suspension control