

锂电池轻轨列车牵引系统性能验证

马乐庭

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春//高级工程师)

摘 要 介绍了采用钛酸锂电池供电的低地板轻轨车系统的主要参数及锂电池供电系统组成。根据整车需求,完成了电池组主要参数计算,搭建了车载储能系统仿真模型,采用双闭环控制方法对储能供电系统进行了仿真验证,分析了有接触网和储能供电两种典型工况下牵引系统的工作模式。在长春轻轨 4 号线上进行了线路实测。实测结果验证了该车牵引系统设计的合理性和稳定性。

关键词 低地板轻轨车; 牵引系统; 锂电池

中图分类号 U260.13+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.047

Performance Verification of Traction System of Lithium Battery Light Rail Vehicles

MA Leting

Abstract The main parameters of the low floor LRV system powered by lithium titanate batteries and the composition of lithium battery power supply system were introduced. The calculation of the main parameters of the battery pack according to the needs of the completed vehicles was completed. The simulation model of on-board energy storage system was established, and double closed-loop control method was used to carry out simulation verification on the energy storage power supply system. The working mode of the traction system under two typical working conditions, that is, the contact lines and energy storage power supply, is analyzed. The actual measurement of the line was carried out on Changchun Light Rail Line 4, and the rationality and stability of the vehicle's traction system design was verified by the actual measurement results.

Key words low floor LRV; traction system; lithium battery

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

低地板轻轨车以其独特的人性化、环境友好、建设周期短与成本低等方面的优势,在一些中小城市得以推广应用和发展。传统的轻轨车采用受电弓从接触网受流的模式进行供电,虽然整体建造成本具有一定的优势,但是最大问题在于接触网带来的视觉上的阻碍,尤其在一些景点和交叉路口,带

来的“视觉污染”更加明显。在此情形下,无网供电模式被提出并被逐步广泛应用。其中:ALSTOM 和 CAF 公司提出的第三轨供电或者磁吸式供电的技术方式^[1-3],因存在建造、维护成本高等问题而难于推广;而另外一种基于车载储能的无网供电模式却得以推广发展,其中的储能系统可以采用超级电容、锂电池、燃料电池等^[4-6]。

本文介绍了采用车载锂电池供电的低地板轻轨车系统,给出了系统的基本原理、组成以及关键系统选型,并搭建仿真模型进行仿真验证,最后给出了实车在线路上实测的关键波形。

1 低地板轻轨车系统概述

低地板轻轨整车主要参数如表 1 所示。

表 1 低地板轻轨整车主要参数

参数名称	参数指标
列车总重/t	55
轴数/根	4(动车)、2(拖车)
最高运行速度/(km/h)	50
平均减速度/(m/s ²)	1.0
平均站间距/km	1
电池放电深度	50% 以上
车辆铰接方式	Mc + F + Tp + F + Mc
电机数量/台	4
0 ~ 30 km/h 平均加速度/(m/s ²)	0.8
0 ~ 50 km/h 平均加速度/(m/s ²)	0.6
续航里程/km	10 ~ 15
充电时间/min	3 ~ 6

注:Mc 为动车;Tp 为拖车;F 为悬浮车

动力电池(本文采用锂电池作为动力电池)供电变流系统如图 1 所示:整车有前后 2 个动车组成,每个动车的驱动系统由 2 个动力电池箱和 1 个变流系统箱组成。其中,变流系统包括通用的牵引逆变器和中频隔离辅助逆变器。为了给动力电池供电,车上高压能量母线处保留了一个小比例的车载充

电受流器,到充电站后可以通过升弓从 DC 750 V 接触网为动力电池充电。为了实现良好的充电控制和电池充放电谐波控制,牵引逆变器和动力电池通过不隔离的双向 DC/DC 变换器连接^[5]。

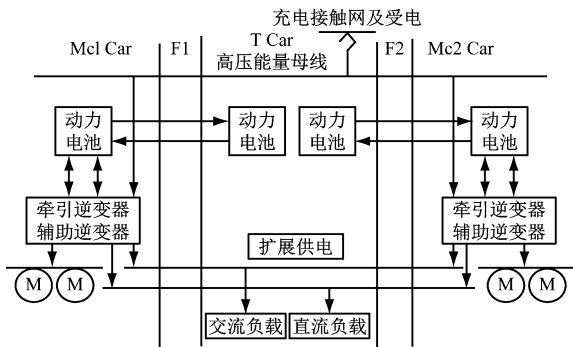


图1 动力电池供电变流系统示意图

2 动力电池系统

2.1 动力电池选型

由于钛酸锂电池具有功率密度高、循环次数多、温度适应性好、安全等优势^[7],因此该项目低地板轻轨车采用钛酸锂电池作为储能元件。依据整车主要参数,计算出的动力电池参数如表 2 所示。一列车由 2 组动力电池并联到直流母线分别给放置

在 Mc 车上的牵引逆变器提供能量,每组动力电池采用单体 10 Ah 钛酸锂电池 8 并 264 串成组。

表 2 地板轻轨车钛酸锂电池主要参数

参数分类	参数名称	参数指标
单体参数	电芯型号	(钛酸锂电池) MV06203127NTPCA
	单体额定电压/V	2.3
	工作电压/V	1.8~2.7
	单体标称容量/(Ah)	10
	单体额定能量/(Wh)	23
电池组参数	电池组电压/V	607
	整车电池组容量/(Ah)	160(97.2 kWh)
	整车电池箱数量/个	4
电池箱安装位置	电池箱安装位置	Mc 车各 1 个、T 车 2 个
	运行温度范围/℃	-20~+60

2.2 动力电池 DC/DC 控制仿真

图 2 为低地板轻轨车车载储能系统仿真模型。仿真模型中,牵引负载由可控功率源代替,中间直流电容为 3 400 μ F,电容初始电压为 750 V,辅助负载由 18.75 Ω 电阻代替,电感为 1 mH,电池额定容量为 80 Ah,电池初始荷电状态为 50%。

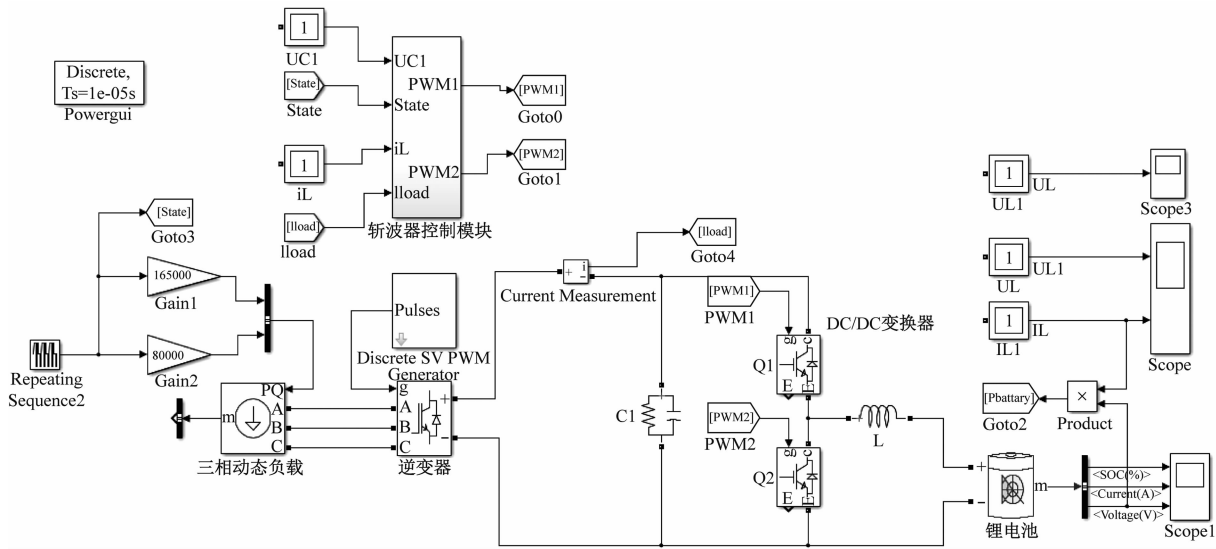
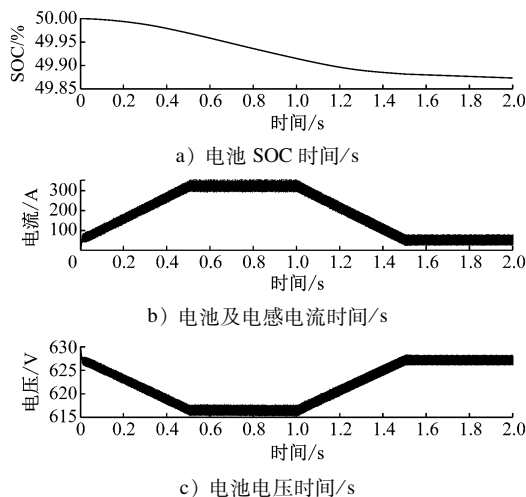


图2 低地板轻轨车车载储能系统仿真模型

采用直流电压外环与电感电流内环的双闭环控制策略,列车牵引和惰行时,设置中间直流电压给定为 750 V;列车最大制动功率时,设置中间直流电压给定为 950 V。仿真中采用离散的 PI(比例积分)控制器,PI 控制器的采样时间为 2×10^{-3} s,设置开关频率为 2 kHz。

仿真时,设置牵引负荷为:0~0.5 s 牵引负荷由 0 线性增加到最大;0.5~1.0 s 维持最大牵引负荷;1.0~1.5 s 牵引负荷由最大线性减小到 0;1.5~2.0 s 牵引负荷为零。仿真结果如图 3 所示。由图 3 可见,电池及电感电流连续,且电流和电压波形较好,纹波系数较小。



注: SOC 为荷电状态

图3 牵引工况下动力电池性能仿真波形

3 低地板轻轨列车供电运行模式

接触网供电模式下,牵引工况时,牵引逆变器和辅助逆变器的能量都由接触网提供,DC/DC 变换器利用接触网为动力电池组充电;制动工况时,电机制动产生的能量经过牵引逆变器回到直流侧。制动产生的能量有3个去向:辅助逆变器供电;经过DC/DC 变换器为电池充电,反馈到电网。接触网供电模式牵引能量流向示意图如图4所示。

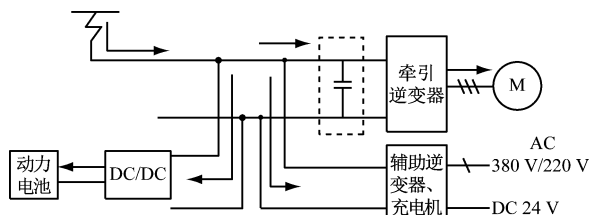


图4 接触网供电模式下牵引能量流向示意图

动力供电模式下,能量由动力电池提供。牵引工况下,牵引逆变器和辅助逆变器的能量都由动力电池提供,动力电池通过DC/DC 进行放电控制;制动工况下,电机制动产生的能量经过牵引逆变器回到直流侧,给辅助逆变器供电,并通过DC/DC 为动力电池充电。

4 线路实测验证

在长春轻轨4号线进行了低地板轻轨车的线路测试。动力电池的SOC(荷电状态)至90%。低地板轻轨车在线路上正常运行,站站正常停车。图5为虚拟示波器记录的列车运行过程中的关键指标波形。由图5可见:列车运行稳定,速度平滑;牵引

制动工况下,直流电压控制在正常范围,充放电电流基本稳定。线路实测结果很好地验证了牵引系统设计的合理性。

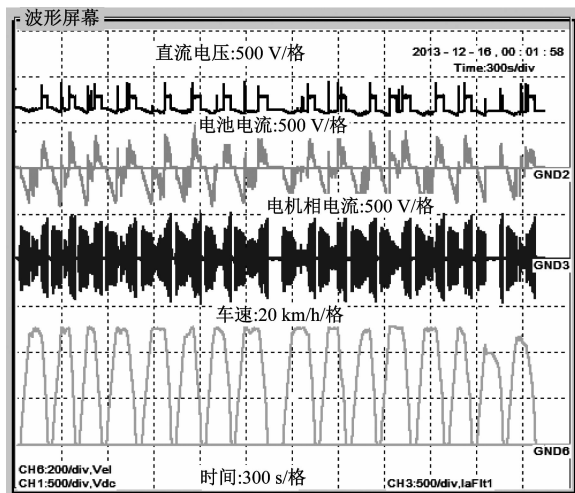


图5 低地板轻轨车线路实测运行关键指标波形截图

5 结语

本文介绍了采用钛酸锂电池供电的低地板轻轨车系统的主要参数、动力电池供电系统组成;搭建了低地板轻轨车车载储能系统仿真模型,采用双闭环控制方法对储能供电系统进行了仿真验证;分析了有接触网和动力电池两种供电模式下牵引能量的流向。在长春轻轨4号线上进行了低地板轻轨车的线路实测,验证了采用动力电池供电的低地板轻轨车牵引系统设计的合理性和稳定性。

参考文献

- [1] 北京首条现代有轨电车线试运行[J]. 城市公共交通,2017(11):10.
- [2] 马颖涛. 城市轨道交通车辆辅助逆变电源的发展趋势[J]. 城市轨道交通研究,2017(7):90.
- [3] 李雪松,景海林,李鹤群,等. 现代有轨电车新型地面供电方式分析[J]. 机车电传动,2018(2):94.
- [4] 朱一迪. 我国首列超级电容储能低地板有轨电车下线[J]. 机车电传动,2016(5):50.
- [5] 何文辉. 轨道交通列车车载动力电池储能系统关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [6] 雒焕骥,李伟宏,李向庆. XQG45-600P 新能源燃料电池轻轨车[J]. 铁道机车车辆,2011,31(3):53.
- [7] KIM M Y, CHOI S W, KIM D H, et al. Electrochemical characteristics of all-solid lithium ion battery with lithium titanate/lithium lanthanum zirconium oxide composite electrode. [J]. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2019, 19(10):6565.

(收稿日期:2020-01-10)