

城市轨道交通车辆应急供电系统研究*

王 通 杨 阳 张国红 于 爽

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 城市轨道交通车辆以车载蓄电池组或新增电池箱来保障应急供电, 可有效应对供电系统的故障问题, 并实现城市轨道交通车辆自身的主动救援。分析了国内城市轨道交通线路应急供电系统的应用现状。设计了 4 种不同应用场合的应急供电系统, 并对其工作原理及特点进行了对比分析, 同时研究了其在应急供电下的整车控制逻辑。结果表明: 应急供电系统对提升车辆自我救援能力、探索新节能方式具有重要意义。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 应急供电系统

中图分类号 U231+.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.026

Research on Emergency Power Supply System of Urban Rail Transit Vehicle

WANG Tong, YANG Yang, ZHANG Guohong, YU Shuang

Abstract On-board battery or additional battery case is applied to ensure emergency power supply for urban rail transit vehicles, which can effectively deal with the power supply failure and realize the active rescue of vehicle itself. The application status of the emergency power supply system for domestic urban rail transit lines is analyzed. Four systems applicable to different scenarios are designed, and the working principle and characteristics are comparatively analyzed. Meanwhile, the vehicle control logic under emergency power supply is studied as well. Results show that emergency power supply has significant importance to elevating vehicle self-rescue ability and exploring new energy-saving methods.

Key words urban rail transit; vehicle; emergency power supply system

Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

截至 2021 年底, 中国内地累计有 50 个城市开通了城市轨道交通运营线路(共 283 条), 总长度达 9 206.8 km, 其涵盖地铁、轻轨、单轨、市域快轨、现

代有轨电车、磁浮交通、APM(自动旅客运输)系统等, 运营规模继续保持高增长势头^[1]。牵引供电系统作为城市轨道交通的重要组成部分, 其在设计、建设和运营中虽能保证足够的安全性和可靠性, 但仍无法避免由于供电系统故障、弓网故障和自然灾害等因素而造成城市轨道交通车辆供电短时中断、线路停运等问题。特别是对在隧道中运行线路而言, 应急供电对保障线路正常运营、人员及时疏散等会造成较大影响^[2]。

针对上述问题, 常规的处理方式为运营单位派出工程拖车对故障车辆进行救援, 其耗时较长, 是一种被动的应急救援方式。若城市轨道交通车辆能通过车载电池储能系统来实现应急自供电, 使迫停于区间的列车能够自行牵引, 同时保证城市轨道交通车辆应急辅助供电, 则可有效解决因列车不能受电引起的救援问题。这是一种主动的应急救援方式。与此同时, 城市轨道交通车辆应急供电系统在线路供电正常时可扩展为其他应用, 比如满足城市轨道交通车辆在车辆段、试车线和停车库内等无网区的调车需求, 从而节省了接触网或第三轨供电的建设。

1 城市轨道交通车辆应急供电系统应用现状

目前, 我国内地已有部分线路的城市轨道交通车辆逐步开始装载应急供电系统。城市轨道交通应急供电系统的应用现状统计如表 1 所示。装载该系统的城市轨道交通车辆涵盖常见的 A 型车、B 型车, 其储能形式既包括城市轨道交通车辆自带的碱性电池及铅酸电池, 还包括能量密度和功率密度均较大的锂电池^[3]。电池电压等级是根据车辆牵引供电电压的不同, 从 DC 110 V 至更高的电压不等。城市轨道交通车辆的应急供电能力与其配置的储

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201004)

能电量、功率有关。同样体积下,配置锂电池可满足城市轨道交通车辆正线牵引以及停车库内调车的较长距离需求,且具备较高的行车速度,可牵引载荷较大的城市轨道交通车辆,使用寿命也较长;

而配置碱性电池、铅酸电池则由于能量密度和功率密度均偏低,使用寿命较短^[4],一般仅适用于停车库内调车的平直道工况,且车速较慢、可牵引的车辆载荷较小^[5]。

表 1 我国内地城市轨道交通应急供电系统的应用现状统计

线路名称	车辆编组	储能形式	电池电压	应急供电能力
天津地铁 2 号线	6B	锂电池	DC 750 V	正线 AW3 载荷,平直道运行 500 m,20‰坡道运行 325 m,最高速度为 5 km/h; 停车库内 AW0 载荷,平直道运行 1 000 m,最高速度 15 km/h
天津地铁 5 号线	6B	锂电池	DC 288 V	正线 AW3 载荷,平直道运行 800 m,30‰坡道运行 800 m,最高速度为 5 km/h
青岛地铁 11 号线	4B	碱性电池	DC 110 V	停车库内 AW0 载荷,平直道运行 500 m,最高速度为 5 km/h
上海轨道交通 16 号线	3A	碱性电池	DC 110 V	停车库内 AW0 载荷,平直道运行 800 m,最高速度为 3.5 km/h
上海轨道交通 13 号线	6A	碱性电池	DC 110 V	停车库内 AW0 载荷,平直道运行 1 000 m,最高速度为 4 km/h
常州地铁 1 号线	6B	碱性电池	DC 110 V	停车库内 AW0 载荷,平直道运行 2 000 m,最高速度为 7 km/h
深圳地铁 3 号线	6B	铅酸电池	DC 1 200 V	停车库内 AW0 载荷,平直道运行 375 m,最高速度为 5 km/h

注: AW3 为超常载荷;AW0 为空载。

2 城市轨道交通车辆应急供电系统设计

基于城市轨道交通牵引供电系统的供电制式,即 DC 750 V / 1 500 V 供电电压等级^[6],设计了以下 4 种应急供电系统,并进行了对比分析。

2.1 采用 110 V 电池的应急供电系统

如图 1 所示,对城市轨道交通车辆车载 110 V 蓄电池箱的应急供电系统进行改造。在城市轨道交通车辆正常运行时,断开开关 K,蓄电池处于浮充状态,并保持满电;在城市轨道交通车辆需要应急供电时,闭合开关 K,蓄电池接入牵引主回路。该设计的供电电压等级低,电池组输出电流大,致使电机处于低压下发热严重,进而造成牵引效率较低;同时,受限于电池组(镍镉电池、铅酸电池)的化学特性,一方面放电倍率不足,无法提供持续大功率输出,另一方面循环寿命短,经多次较大倍率放电后寿命衰减明显,因此适用于牵引距离短、

牵引功率小、牵引速度慢、应急供电使用不频繁的场所。

2.2 采用电池和充电机的应急供电系统

如图 2 所示,车辆增加电池箱和专用充电机,在车辆正常运行时,断开开关 K,充电机给电池箱补电;在需要应急供电时,闭合开关 K,电池箱接入牵引主回路。该设计与图 1 对比不同的是电池箱电压可进行配置提升,以满足 DC 750 V / 1 500 V 的供电电压等级。考虑到电池组的耐压安全性,一般配置电压为 DC 300 ~ 800 V。选择能量密度与功率密度较大的锂电池,可满足较远距离的应急牵引,并可以频繁使用,牵引效率得以大大提高。由于此种应急供电系统的电压等级提升,无法借助车上原有的 110 V 充电机进行充电,须配置专用充电机,增加了一定的空间与成本。

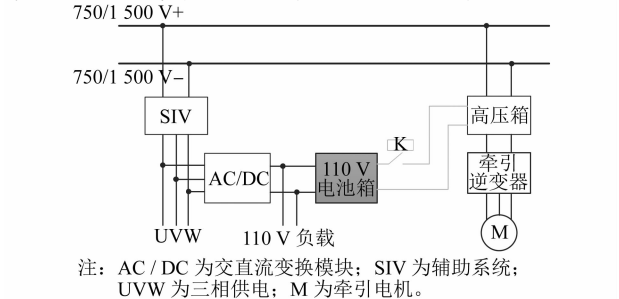


图 1 城市轨道交通车辆车载 110 V 蓄电池箱的应急供电系统改造
Fig. 1 Emergency power supply system reconstruction of urban rail transit vehicle on-board 110 V battery

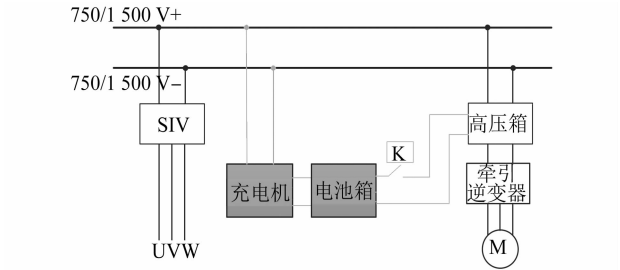


图 2 采用电池和专用充电机的应急供电系统
Fig. 2 Emergency power supply system adopting battery and special charger

2.3 采用电池和双向 AC/DC 的应急供电系统

如图 3 所示,车辆增加电池箱和 AC/DC 双向变流模块,在车辆正常运行时,断开开关 K,电池箱

借助车辆 AC 380 V 通过 AC/DC 模块实现补电;在需应急供电时,闭合开关 K,电池箱接入牵引主回路,同时通过 AC/DC 模块实现逆变提供 AC 380 V。该设计可在应急牵引供电时提供整车的交流用电,以满足通风、空调、冷却等客室紧急用电。其电池箱电压等级一般为 DC 600~800 V,具备较高的牵引效率。由于该应急供电系统配置了 AC/DC 双向变流模块,也增加了一定的体积和成本。

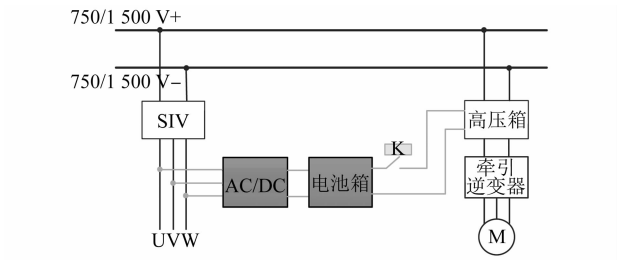


图 3 采用电池和 AC/DC 的应急供电系统
Fig. 3 Emergency power supply system adopting battery and AC/DC

2.4 采用电池和双向 DC/DC 的应急供电系统

如图 4 所示,车辆增加电池箱和 DC/DC 双向变流模块。在车辆正常运行时闭合开关 K,电池箱通过 DC/DC 模块降压充电,同时实现制动能量回

收,存储的电能在车辆牵引时通过 DC/DC 模块升压放出,实现节能效果;在需要应急供电时,闭合开关 K,电池箱通过 DC/DC 模块升压放电,电压等级达到车辆额定供电电压,牵引效率高,车辆辅助系统也可以正常工作。该设计既可提供应急牵引和辅助供电,也可实现制动能量的回收利用,大大提升了系统使用率,但也增加了一定的体积和成本。

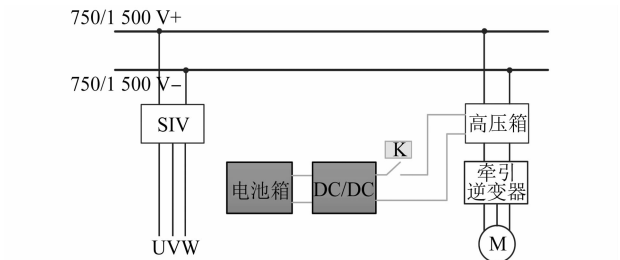


图 4 采用电池和 DC/DC 的应急供电系统
Fig. 4 Emergency power supply system adopting battery and DC/DC

2.5 各种应急供电系统对比

对上述 4 种应急供电系统进行对比,如表 2 所示。实际情况下,应基于应用场合的不同,兼顾成本、改造难易等因素来选择合适的改造方案。

表 2 城市轨道交通车辆应急供电系统对比						
Tab. 2 Comparison of urban rail transit emergency power supply system						
系统类型	适用场合	车辆增重的影响程度	改造成本	改造难易程度	利用率	
采用 110 V 电池的应急供电系统	平直道牵引	可忽略	低	易	低	
采用电池和充电机的应急供电系统	停车库内调车,正线牵引	较小	较低	较易	较高	
采用电池和双向 AC / DC 的应急供电系统	停车库内调车,正线牵引,辅助供电	较小	较高	较难	较高	
采用电池和双向 DC / DC 的应急供电系统	停车库内调车,正线牵引,辅助供电,制动能量回收	较小	较高	较难	高	

3 城市轨道交通车辆应急供电的整车配合

城市轨道交通车辆在应急供电工况下,需要整车多个系统设备的协调配合,其基本控制逻辑如图 5 所示。

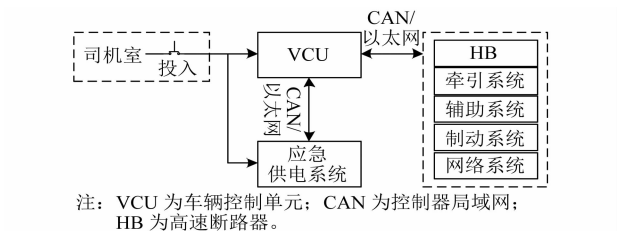


图 5 城市轨道交通车辆应急供电控制逻辑
Fig. 5 Control logic for urban rail transit vehicle emergency power supply

- 1) 司机室确认车辆完全停车、车况信息正常后,按下应急供电投入按钮,VCU 进入应急供电控制模式。
- 2) VCU 确认 HB 处于断开位置后,向应急供电系统下发开关闭合命令。
- 3) VCU 调整牵引为电池牵引特性,调整制动为纯空气制动,调整辅助系统降载,网络系统保持与 VCU 的实时信息交换。
- 4) 车辆到达指定位置后停车,司机室退出应急供电按钮,VCU 退出应急供电控制模式,应急供电系统开关断开。

4 结语

本文分析了我国内地城市轨道交通车辆应急供电系统的应用情况,设计研究了4种不同应急供电系统,对比分析了不同系统的原理特点,并考虑了应急供电下的整车控制配合。随着标准化地铁列车、智慧化城市轨道交通车辆的设计推广,应急供电系统对提升车辆应急救援能力、探索新节能方式具有重要意义。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2021 年度统计和分析报告 [EB/OL]. (2022-04-22) [2020-6-20]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/9944>.
China Association of Metros. Statistics and analysis report of urban rail transit in 2021 [EB/OL]. (2022-04-22) [2020-6-20]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/9944>.
- [2] 沈涛,周巧莲. 城市轨道交通车辆电池应急牵引功能的实现 [J]. 城市轨道交通研究,2016(7):110.
SHEN Tao, ZHOU Qiaolian. Implementation of rail transit vehicle emergency battery traction [J]. Urban Mass Transit, 2016 (7):110.
- [6] 徐瑞华,罗钦,高鹏. 基于多路径的城市轨道交通网络客流分布模型及算法研究 [J]. 铁道学报,2009(2):110.
XU Ruihua, LUO Qin, GAO Peng. Passenger flow distribution model and algorithm for urban rail transit network based on multi-route choice [J]. Journal of the China Railway Society, 2009(2):110.
- [7] 刘剑锋,四兵锋,刘新华,等. 基于乘客类别的城市轨道交通流量分配模型研究 [J]. 物流技术,2011(23):101.
LIU Jianfeng, SI Bingfeng, LIU Xinhua, et al. Model of urban rail transit flow allotment based on passenger classification [J]. Logistics Technology, 2011(23):101.
- [8] 江志彬,刘伟,韩彦钊,等. 城市轨道交通网络客流大数据可视化 [J]. 城市交通,2018(2):70.
JIANG Zhibin, LIU Wei, HAN Yanzhao, et al. Big passenger flow data visualization for urban rail transit network [J]. Urban Transport of China, 2018(2):70.
- [9] 黄晓冰,陈忠暖. 基于信息熵的地铁站点商圈零售业种结构的研究——以广州 15 个地铁站点商圈为例 [J]. 经济地理,

- [3] 赵宇,王志,陆阳,等. 动车组应急供电问题分析及应急自牵引技术方案 [J]. 铁道机车车辆,2018(5):1.
ZHAO Yu, WANG Zhi, LU Yang, et al. Analysis of emergency power supply problems for EMU and technical solutions for emergency self-traction [J]. Railway Locomotive & Car, 2018 (5):1.
- [4] 龙源. 钛酸锂电池在蓄电池电力工程车的应用 [J]. 电力机车与城市轨道交通车辆,2018(6):10.
LONG Yuan. Application of LTO battery on battery-electric locomotive [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2018(6):10.
- [5] 王虎高,屈海洋,陈中杰. 储能电源应用于地铁车辆应急牵引的设计研究 [J]. 电力机车与城市轨道交通车辆,2016(1):69.
WANG Hugao, QU Haiyang, CHEN Zhongjie. Design and research on energy storage power supply used on metro vehicle emergency traction [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016(1):69.
- [6] 宋奇吼,李学武. 城市轨道交通供电 [M]. 北京:中国铁道出版社,2015:8.
SONG Qihou, LI Xuewu. Urban rail transit power supply [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015:8.

(收稿日期:2020-07-08)

(上接第 131 页)

- [6] 2014(3):38.
HUANG Xiaobing, CHEN Zhongnuan. The retail business structure of the metro site based on the information entropy—a case study of the 15 subway site in Guangzhou [J]. Economic Geography, 2014(3):38.
- [10] ZHAO J, QU Q, ZHANG F, et al. Spatio-temporal analysis of passenger travel patterns in massive smart card data [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18 (11):3135.
- [11] MAHRISI M K E, CÔME E, BARO J, et al. Understanding passenger patterns in public transit through smart card and socioeconomic data [C] // Bloomberg The 3rd International Workshop on Urban Computing (UrbComp'14). New York: Bloomberg, 2014.
- [12] XU X, XIE L, LI H, et al. Learning the route choice behavior of subway passengers from AFC data [J]. Expert Systems with Applications, 2018, 95:324.

(收稿日期:2020-07-06)