

地铁车辆车载超级电容储能系统的配置与经济性评估^{*}

王俭朴 李 瑞 洪 磊

(南京工程学院汽车与轨道交通学院, 211167, 南京//第一作者, 副教授)

摘 要 超级电容快速的充放电特性能够满足地铁车辆频繁启停的工作需求。利用恒压双向功率流原理,建立了地铁车辆车载超级电容储能系统模型。在满足地铁车辆制动能量回收的基础上,对超级电容器组进行优化配置。建立了车载超级电容储能系统的全寿命周期成本计算模型、超级电容寿命计算模型及经济效益计算模型。通过实际算例对车载超级电容储能系统中的超级电容进行了配置,同时对其经济性进行了评估。结果表明,系统能达到预期的经济效益。

关键词 地铁车辆; 车载储能系统; 超级电容; 系统配置; 经济性评估

中图分类号 U270.38⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.039

Configuration and Economy Evaluation Metro Vehicle of On-board Supercapacitor Energy Storage System

WANG Jianpu, LI Rui, HONG Lei

Abstract The rapid charging and discharging characteristics of supercapacitor can meet the need of metro vehicle frequent starting and stopping. Based on the principle of constant voltage bi-directional power flow, a model of metro vehicle on-board supercapacitor energy storage system is established. On the basis of satisfying the recovery of metro vehicle braking energy, the configuration of supercapacitor banks is optimized. The full life cycle cost calculation model, supercapacitor life calculation model and economic benefit calculation model of the on-board supercapacitor energy storage system are established. Through practical calculation case, the supercapacitor in the on-board system is configured, its economy is evaluated. The result shows that the system can achieve the expected economic benefit.

Key words metro vehicle; on-board energy storage system; supercapacitor; system configuration; economic evaluation

Author's address School of Automotive & Rail Transit, Nanjing Institute of Technology, 211167, Nanjing, China

在城市轨道交通系统中,车辆运行所需的能耗基本上都超过整个系统能耗的50%^[1],降低车辆运行能耗可直接影响城市轨道交通的可持续发展。地铁车辆的运行特点就是频繁起停。当车辆处于牵引工况时,牵引网的电能会通过牵引电机转化为车辆的动能;而当车辆处于制动工况时,根据能量守恒定律,车辆的动能会通过牵引电机转化为电能,回馈到DC 1 500 V或DC 750 V的电网。这些能量中的大部分将引起直流电网电压升高或者以热能的形式在电阻上散掉。近年来,再生制动能量在地铁车辆中的普遍应用,对节约能源和改善环境做出了很大贡献。

制动能量的吸收装置大致可以分为电阻能耗型、逆变回馈型及车载储能型等3种^[2-3]。电阻能耗型吸收装置造成了能量浪费和环境问题。逆变回馈型吸收装置在国外的成熟产品中较早出现,国内很多研究机构亦对其进行了相关研究。车载超级电容储能系统不仅能吸收制动能量,还能维持牵引网压的稳定性,其灵活性和方便性越来越得到行业和研究者的青睐。地铁车辆车载超级电容储能系统,具有随充随放、不受地理环境限制的优点,是一个值得不断研究的课题。

本文在考虑制动能量约束的前提下,对地铁车辆车载超级电容储能系统进行配置^[4],并从技术经济学角度对车载超级电容储能系统进行了评估。

1 地铁车辆车载超级电容储能系统的结构

地铁车辆再生制动能量的大小与运行工况密切相关。地铁车辆车载超级电容储能系统的设置应满足如下4个基本要求:

1) 根据地铁车辆的运行特点,车辆处于牵引工况时需要获取大量的能量,车辆处于制动工况时则

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(61703200);南京工程学院科研基金项目(3612411219439);南京工程学院“课程思政”示范课程项目(KCZ2021039);南京工程学院教学改革与建设项目(JXJS2021050)

产生大量能量,而储存在直流牵引网的能量则具有脉冲形式。因此,车载超级电容储能系统需具有非常大的功率密度^[5]。

2) 地铁车辆在运行过程中频繁地起停,其启动和制动时间一般在 30 s 左右。这就要求车载超级电容储能系统具有相应的充放电性能,以及较长的使用寿命和快速的充放电能力。

3) 最大程度地吸收地铁车辆的制动能量,实现电能的再利用。

4) 平衡制动能量吸收系统的节能效果与投资成本之间的关系。在提高节能效果的同时,应满足经济性要求^[6]。

利用恒压双向功率流原理建立了车载超级电容储能系统,其原理如图 1 所示。车载超级电容储能装置的电气系统主要由超级电容器组、斩波器、牵引逆变器、直流辅助电源、辅助逆变器、牵引电机及辅助设备等组成。该吸收装置体积较小、质量较轻,具有较大的功率,传输线路较短,使得线路上的电能损耗较小^[7]。利用超级电容快速的充放电特性来实现地铁车辆再生电能的吸收和利用。当供电区间内有地铁车辆处于牵引工况需要电能时,该车载超级电容储能系统则释放电能以供车辆利用。这既能解决牵引网电压波动问题,又能达到节约电能的目的,亦适合作为地铁车辆的备用电源进行应急牵引。

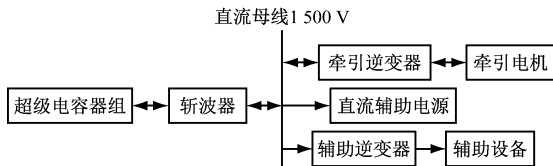


图 1 地铁车辆车载超级电容储能系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of metro vehicle on-board super capacitor energy storage system

2 车载超级电容储能系统中超级电容的配置方式

因超级电容器并无最佳的工作区域可存在较大的裕量。在设计超级电容器组时,需遵循以下两个原则:

1) 超级电容器组的最大电压应低于空载时直流母线的电压 U_d 。假设超级电容器组两端的电压介于 $U_{c,\min}$ 与 $U_{c,\max}$ 之间。通过 MATLAB 软件仿真可见,为了保证超级电容器组较大的充放电功率,

加之其充放电能量较快^[8],应将车载超级电容储能系统主电路的占空比控制在 $1/3 \sim 2/3$, 即:

$$U_{c,\min} = U_d/3 \quad (1)$$

$$U_{c,\max} = 2U_d/3 \quad (2)$$

2) 车辆制动时产生的能量为 E_{br} , 其表达式为:

$$E_{br} = (\eta_{em} \eta_{mech} \eta_{inv} \eta_{dc,dc} \eta_{sc} m v_0^2) / 2 \quad (3)$$

式中:

η_{em} ——电机效率;

η_{mech} ——齿轮箱机械效率;

η_{inv} ——牵引变流器效率;

$\eta_{dc,dc}$ ——储能变流器效率;

η_{sc} ——电容组效率;

m ——车辆质量;

v_0 ——地铁车辆制动时的初速度。

南京地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)在制动工况下反馈到电网的能量能达到电网供给列车能量 40%。车载超级电容器组的容量需满足上述所需制动能量的要求,同时要考虑车载超级电容储能系统的体积和质量。依照上述设计原则,采用制动回馈总能量的 40% 来设计超级电容器组的容量。其电容值 C 应满足下述要求:

$$C \geq 0.8 E_{br} / (U_{c,\max}^2 - U_{c,\min}^2) \quad (4)$$

超级电容器组阵列中串联的超级电容器数量 N_s 为:

$$N_s = U_{c,\max} / U_{c0} \quad (5)$$

式中:

U_{c0} ——超级电容器的单体电压。

超级电容器组阵列中并联的支数 N_p 为:

$$N_p = C N_s / C_0 \quad (6)$$

式中:

C_0 ——超级电容器的单体容量。

实际配置中 N_s 和 N_p 均需作取整处理。

3 车载超级电容储能系统成本与经济效益计算模型

对于地铁车辆车载超级电容储能系统而言,其全寿命周期过程分为两个阶段:建设阶段和运营阶段^[9]。参照已有的研究成果和全寿命周期成本理论,结合我国储能技术的实际情况,将储能全寿命周期成本分为两大类,即投资成本和运行维护成本^[10]。

车载超级电容储能系统包括超级电容器组和 PCS(功率转换系统)。前者存储电量,后者进行功

率转换。通常两者的寿命不一致,为方便计算,将两者寿命认为一致。PCS 的成本统一采用超级电容储能系统功率成本代替。

3.1 车载超级电容储能系统全寿命周期成本计算模型

车载超级电容储能系统全寿命周期成本 W_{TOL} 见式(7)^[11]。其通常由初始投资成本(超级电容器组和功率转换系统成本)及运行维护成本组成。初始投资成本取决于回收制动容量与功率的大小,运行维护成本可以根据初始投资成本进行估算,见式(8)和式(9)。

$$W_{\text{TOL}} = W_e + W_p \quad (7)$$

$$W_e = \frac{(1+x)(1+r)^L r}{(1+r)^T - 1} m_e E \quad (8)$$

$$W_p = \frac{(1+y)(1+r)^L r}{(1+r)^T - 1} m_p P \quad (9)$$

式中:

W_e 、 W_p ——分别为车载超级电容储能系统的容量与功率成本;

x ——储能容量的运行维护成本的估算比值;

y ——储能容量与功率的运行维护成本的估算比值;

m_e ——单位储能电量的成本;

m_p ——单位功率的成本;

E ——车载超级电容储能系统的额定容量;

P ——车载超级电容储能系统的额定功率;

r ——贴现率;

L ——储能装置的全寿命周期。

超级电容器的寿命直接影响着车载超级电容储能系统的成本及经济效益,本文将详细建立车载超级电容储能系统超级电容器寿命计算模型。

3.2 车载储能系统超级电容器寿命计算模型

超级电容器的失效标准定义其容值衰减为标称值的80%。超级电容器在不同环境下工作时,其使用寿命会有所不同。超级电容器在额定电压和常温(25℃)下工作时,全寿命的循环次数可以达到100万次,而其运行年限一般为10年左右。轨道交通储能技术文献普遍认为,超级电容器的循环次数不随其放电深度而变化,其循环次数较为固定^[12]。然而超级电容器的寿命还和其工作温度和电压有关。温度越高,超级电容器的寿命越短;超级电容器施加电压要比不施加电压的寿命要短。

超级电容剩余容量的百分比 δ 是表征超级电容

退化程度的特征参数。在对超级电容单体进行性能评价时, δ 往往需要通过测量获得。将其测量值同标称值进行对比,从而判断超级电容是否失效。

在不同的电压和温度下工作时,超级电容器的寿命 t 可用下式计算得到:

$$t = \frac{1 - \delta}{K_1 A^{\frac{T_{\text{ref}} - T}{\Delta T}} B^{\frac{V_{\text{ref}} - V}{\Delta V}}} \quad (10)$$

式中:

δ ——超级电容器剩余容量的比例;

K_1 ——超级电容器容量衰减的变化率;

T_{ref} ——参考温度;

V_{ref} ——参考电压;

T ——温度;

ΔT ——温度的跳变;

V ——电压;

ΔV ——电压的跳变;

A —— ΔT 下的衰减因子;

B —— ΔV 下的衰减因子。

因此,储能超级电容器的寿命 L 应综合考虑运行年限、循环次数、工作电压及温度。 L 的计算模型为:

$$L = \min \left\{ 10, \frac{1\,000\,000}{d N_1 N_2}, \frac{1 - \delta}{365 \times 24 K_1 A^{\frac{T_{\text{ref}} - T}{\Delta T}} B^{\frac{V_{\text{ref}} - V}{\Delta V}}} \right\} \quad (11)$$

式中:

d ——列车1年的实际运行天数; d ;

N_1 ——地铁车辆运行1趟超级电容器的循环次数,次;

N_2 ——每天该列车的运行趟数,趟。

3.3 超级电容器储能经济效益计算数学模型

超级电容器车载超级电容储能系统产生的经济效益主要是节约电能。全年节约的电费主要取决于因素有: N_1 、 N_2 、 d 、电阻制动能量约为总制动能量的百分比 η_1 、超级电容器组将电阻制动能量进行回收的百分比 η_2 、在既定线路上既定车辆满载的制动能量 E 、电费的单价 ρ 。超级电容器储能经济效益计算数学模型 B_1 如式(12)所示。

$$B_1 = N_1 N_2 d \eta_1 \eta_2 E \rho \quad (12)$$

4 算例分析

本文以在1号线列车上安装的车载超级电容储

能系统为算例,对该系统的超级电容进行配置,同时对车载超级电容储能系统的经济性进行评估。列车采用 6 节编组 B 型车,最高运行速度 v_0 为 80 km/h,车辆满载制动 1 次,车载超级电容储能系统吸收的能量为 17.7 kW·h,制动功率 P 为 5 733.54 kW。

计算时所需的地铁车辆的基本参数见表 1。

表 1 1 号线地铁车辆的基本参数

Tab.1 Basic parameters of Line 1 metro vehicle	
参数	取值
动车质量/t	39
AW2 时的负载质量/t	18.60
制动减速度/(m/s ²)	1.00
v_0 /(km/h)	80
η_{mech}	0.97
η_{em}	0.94
η_{inv}	0.95

注:AW2 为地铁车辆定员载荷工况。

车载能量存储系统中 BCAP3000P27 型超级电容器的参数见表 2。

表 2 BCAP3000P270 型超级电容器的参数

Tab.2 Model BCAP3000P270 supercapacitor parameters	
参数	取值
额定电压/V	2.7
额定容量/F	3 000
短路电流/A	4 800
等值的串联电阻/mΩ	0.290
存储能量/(W·h)	3.036
模块质量/kg	0.550

4.1 车载超级电容储能系统中超级电容的配置

车载超级电容储能系统中超级电容器组的容量 $C \geq 67.968 \text{ F}$ 。

超级电容的工作电压一般取 $2.5 \text{ V}^{[12]}$ 。根据式(5)、式(6),计算得到 N_s 为 400; N_p 为 9.06,取 9。

4.2 车载超级电容储能系统的全寿命周期成本

基于上述分析,车载超级电容储能系统的全寿命周期主要包括初始投资(超级电容器组和功率转换系统成本)及运行维护成本。计算所需的参数取值为: $x = y = 2\%$, $m_e = 160\,000 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $m_p = 2\,400 \text{ 元}/\text{kW}$, $r = 0.05$, $T = 6.1 \text{ 年}$ 。根据式(7)一式(9),计算得到 W_{tol} 为 3 222 496.54 元。

4.3 超级电容储能系统的经济性评估

1 号线共设置 32 座车站,每天开行 15 趟,则全天列车的制动次数为 480 次。全年的运行天数按照 340 d 进行估算,则全年列车的制动次数为 163 200 次。在满载工况下,超级电容器组全年储存电能约 2 889 MW·h;根据 1 号线的测试分析,电阻制动能量约为总制动能量的 40%,采用超级电容器组将电阻制动能量的 80% 进行回收,按照 0.9 元/(kW·h)计算,全年可节约电费 83.19 万元。1 号线地铁列车车载超级电容储能系统的投资成本约为 322.25 万元,电费按 0.9 元/(kW·h)进行估算时,大概需 3.9 年可利用节省的电能收回设备投资,未超过超级电容器等设备主要元件的使用寿命,在其设备使用寿命期间可节约电费约 185.21 万元,具有一定的经济效益。

5 结语

在地铁车辆上安装车载超级电容储能系统,符合国家节能政策。制动电流的通路比在地面安装的储能系统的电流通路要短得多,它可有效减少电能损耗和二氧化碳排放量。车载超级电容储能系统,在节能、稳定接触网电压及减少电网峰值功率等方面均具有明显的优点。该系统的配置应根据线路情况、行车组织、车辆形式及供电方案等进行模拟计算,同时结合投资、电费等经济因素进行综合分析。通过实际算例分析,在地铁车辆上安装车载超级电容储能系统具有良好的节能效果和投资回报率。

参考文献

[1] DAVIS T C, RADEMAKER A, BAILEY S C, et al. Contrasts in rural and urban barriers to colorectal cancer screening[J]. American Journal of Health Behavior, 2013, 37(3): 289.

[2] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013(9): 224.

XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013(9): 224.

[3] 胡敏, 黄嘉烨, 王婷. 锂离子超级电容器在轨交能量回收系统中的应用[J]. 电器与能效管理技术, 2016(14): 85.

HU Min, HUANG Jiaye, WANG Ting. Research on the application of Lithium-ion super capacitor in urban rail transit energy recovery system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(14): 85.

- [4] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015(4): 265.
LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015(4): 265.
- [5] 陈怀鑫, 杨中平, 林飞, 等. 基于遗传算法的城轨交通超级电容储能装置能量管理和容量配置优化研究[J]. 铁道学报, 2019(9): 59.
CHEN Huaixin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Management and configuration for stationary super-capacitor energy storage system applied in urban rail transit based on genetic algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2019(9): 59.
- [6] 熊雄, 袁铁江. 基于电压稳定与限值的风/储系统容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2012(4): 63.
XIONG Xiong, YUAN Tiejia. Based on the voltage stability and limit wind-energy storage system capacity configuration[J]. Power System and Clean Energy, 2012(4): 63.
- [7] 杨裕生, 程杰, 曹高萍. 规模储能装置经济效益的判据[J]. 电池, 2001(1): 19.
YANG Yusheng, CHENG Jie, CAO Gaoping. A gauge for direct economic benefits of energy storage devices[J]. Battery Bimonthly, 2001(1): 19.
- [8] FRÖHLICH M, KLOHR M, PAGIELA S, 等. 基于车载超级电容的铁路车辆储能系统[J]. 国外铁道机车与动车, 2014

(6): 30.

FRÖHLICH M, KLOHR M, PAGIELA S, et al. Railway vehicle energy storage system based on on-board supercapacitor[J]. Foreign Railway Locomotives and Motor Car, 2014(6): 30.

- [9] 曾桂珍, 曾润忠. 沈阳浑南现代有轨电车超级电容器储能装置的设计及验证[J]. 城市轨道交通研究, 2016(5): 74.
ZENG Guizhen, ZENG Runzhong. Design and validation of light rail vehicle with energy storage system in Shenyang Hunnan district[J]. Urban Mass Transit, 2016(5): 74.
- [10] 李娜, 刘喜梅, 白恺, 等. 梯次利用电池储能电站经济性评估方法研究[J]. 可再生能源, 2017(6): 926.
LI Na, LIU Ximei, BAI Kai, et al. Research on the economic evaluation method of secondary battery energy storage power station[J]. Renewable Energy Resources, 2017(6): 926.
- [11] RATNIYOMCHAI T, HILLMANSEN S, TRICOLI P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2014, 4(1): 9.
- [12] 吴立锋, 单金生, 关永, 等. 一种考虑温度和电压的超级电容寿命预测方法[J]. 电源技术, 2008(1): 90.
WU Lifeng, SHAN Jinsheng, GUAN Yong, et al. Life prediction method of supercapacitor for considering temperature and voltage[J]. Power Technology, 2008(1): 90.

(收稿日期: 2020-07-24)

(上接第200页)

互影响。但同一乘客却不能在多个 APP 上开通人脸识别过闸业务, 只能在唯一一个 APP 上开通, 而其他 APP 都必须关闭, 否则所有开通的 APP 都将扣取过闸乘车费用。

3) 匹配复杂性。如果采取人脸识别和二维码过闸混合模式过闸, 地铁公司需制定一个详细的混合业务结算规则, 规范降级模式下单边和混合模式时乘客进出行程匹配归属和计费问题。

4) 信息安全。人脸属于生物终身隐私, 在图片和特征值管理中, 必须保障用户个人信息安全。建议人脸识别系统需通过国家信息安全等级保护三级认证, 人脸终端识别后的数据在中心系统传输中需加密个人信息, 加密人脸过闸图片并设定定期自动删除。

5 结语

人脸识别过闸业务作为城市轨道交通 AFC 系统的有益补充, 已在国内很多地铁公司试点和应

用。该业务能够给乘客提供差异化服务, 一定程度上提升了轨道交通的服务品质和品牌形象。人脸识别过闸业务进一步优化和发展后, 亦将像二维码过闸业务一样井喷式推广和应用到国内各地铁公司。

参考文献

- [1] 王琮, 韩骁. 基于百度云 AI 的自动售检票系统人脸识别应用可行性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020(3): 148.
WANG Cong, HAN Xiao. Feasibility analysis of face recognition applied in automatic fare collect system based on Baidu Cloud AI[J]. Urban Mass Transit, 2020(3): 148.
- [2] LI X. Application of face recognition in network learning system[J]. International Journal of Computational and Engineering, 2020(1): 119.
- [3] 陶克. 二维码技术在 AFC 系统中的应用研究[J]. 都市快轨交通, 2020(1): 123.
TAO Ke. Application of two-dimensional code technology in an automatic fare collection system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020(1): 123.

(收稿日期: 2020-07-23)