

有轨电车制动能量回收系统控制策略的研究*

史超然 张会林 金焱飞 张松

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 针对有轨电车现有的制动方式存在能量回收利用率低、制动效果差、系统抗干扰能力差、回收方式单一等问题,通过对制动方式、能量回收、能量存储、能量传输等方面进行了研究,针对现有制动方式的缺陷进行改进,设计了有轨电车制动能量回收系统。该系统采用超级电容作为能量存储器,利用超级电容充电时间短、放电电流大的特性,从根本上克服了传统制动电阻发热量大、能效低的问题。该系统回收能量通过 DC/DC 变换器向同一线路其他有轨电车提供能量,也可通过 DC/AC 逆变器向其他辅助系统提供能量,较传统制动方式在系统的稳定性、可靠性以及回收效率有极大地提高。MATLAB/Simulink 仿真实验结果表明,此系统通过对制动能量的回收,有效提高了有轨电车的能量利用率和局部电网的负载容量及稳定性,并且该系统操作简单,寿命长,具有较好的应用和推广价值。

关键词: 制动能量回收;能量存储;能量传输;超级电容

中图分类号: TM711;TN274.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

Research on control strategy of the tram braking energy recovery system

Shi Chaoran Zhang Huilin Jin Yanfei Zhang Song

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Now that the present tramcar braking method shows out many problems, such as low energy recovery rate, poor braking effect, bad anti-jamming ability and single recovery way, we studied the braking method, energy recovery, energy transfer and storage, improved present tramcar braking method, redesigned tramcar braking energy recycling system. This system uses super capacitors as energy storage, taking advantage of short charging time and large current discharge of super capacitor, fundamentally overcoming the traditional braking resistor issues like large heat release and low energy efficiency. The recovery energy of this system can provide energy to other tramcars on the same line by DC/DC converter and can also provide energy to other auxiliary systems through DC/AC inverter, which greatly improves the stability, reliability and recovery efficiency of the system. Matlab/Simulink Simulation results show that this system through the recovery of braking energy, improving energy efficiency of the tramcars and load capacity and stability of local power grid. The system has the features of simple operation, long service life and also has a good application and popularization value.

Keywords: braking energy recovery ; energy storage ; energy transfer ; super capacitor

1 引言

欧盟委员会于 2011 年的调查统计报告指出,城市交通系统的 CO₂排放量占全球 CO₂排放总量的 25%,交通系统成为我国及至全世界能源结构低碳化、节能减排工作重心^[1]。在交通领域,有轨电车载容量大、速度快、效率高且使用电力驱动一直是节能和环保的代名词,然而由于频繁的制动导致有轨电车牵引能耗的 40%~50%被制动设备所消耗,随着大家环保意识的不断加强,绿色出行、低碳出

行的概念日益深入人心,有轨电车能量利用率真的提高已经是迫切需要解决的问题。制动能量的回收不仅提高了能量利用率,而且制动系统的可靠性和局部电网稳定性都有很大的提高^[2]。

现有多数有轨电车采用传统机械制动与制动电阻相配合的制动方式,制动能量被转化为热能降低了电车的能量利用率。而少部分具备制动能量回收能力的有轨电车也只能在同一线路中有其他有轨电车需要从线路中吸取能量时才能进行制动能量回收,不仅回收方式单一,而且容易引起

收稿日期:2016-09

* 基金项目:国家自然科学基金(60777045)、上海市第三期重点学科项目(S30502)资助

线路电压波动影响设备的正常运行。

针对上述问题,本文设计了一个以超级电容为能量存储设备制动能量回收系统,该系统不仅可以通过 DC/DC 变换器将制动能量输送至直流线路供同一线路的其他列车使用,也可通过 DC/AC 逆变设备输出 220 V AC 50 Hz 供给列车中的辅助设备如动力控制设备、监控设备、照明设备、除湿设备等^[3]。多元化的回收方式使该系统可以全时段运行,提高线路的峰谷调节能力和运载能力同时减小线路电压波动。

2 系统的整体设计方案

储能环节是该制动能量回收系统的重要环节,所以储能电容的选择要能适应各种运行情况的变化,既能在客流量增大时充分提高能量利用率,又可以在客流量减小时保证系统稳定性。有轨电车的运行电压为 550 V DC,电车辅助系统运行电压为 220 V AC,所以本文设计了如图 1 所示的制动能量回收系统。

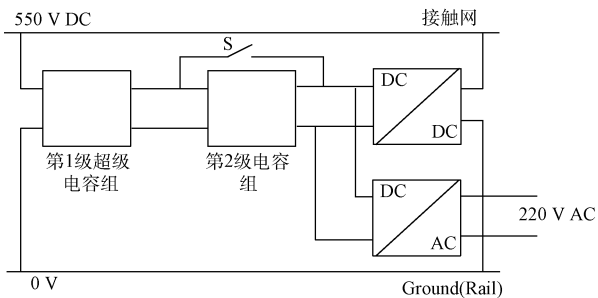


图1 制动能量回收系统结构

由于制动能量回收系统启动后输出端电压和电流会随工作环境和工作状态的改变而不断变化,为适应这种变化,将电容分为两级并使其均处于马克思发生器的工作模式^[4]。如图 2 所示,处于马克思发生器工作模式的第一级超级电容组采用并联充电、串联放电的工作方式。在充电过程中,第 1 级将 30 个工作电压 125 V 容量 63 F 的超级电容分为 6 组,吸收有轨电车的制动能量并以 600 V 直流电形式输出。在这种结构中,总的容量为 75.6 F,额定电压 600 V。

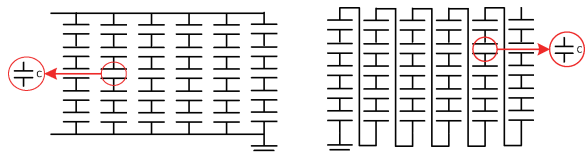


图2 超级电容充放电结构

放电环节中,第 1 级超级电容采用串联放电的工作模式,放电额定电压可达 3 600 V,为克服电容放电过程中电压不断下降的缺点,本系统中设计开关 S 可根据第 1 级超级电容的放电电压的变化改变开合状态,当电容放电电压高于额定电压的 1/3 时,开关 S 处于闭合状态,制动能量可

直接经过 DC/DC 斩波电路输送至直流架空接触网或通过 DC/AC 逆变电路向电车辅助系统提供电力。当电容放电电压低于额定电压 1/3 时,开关 S 处于断开状态,第 1 级电容将制动能量传输给第 2 级电容,第 2 级电容以马克思发生器的工作模式提高放电电压,进而通过 DC/DC 斩波电路或 DC/AC 逆变电路将制动能量以电能形式输出。

3 储能环节工作原理

当第 1 级超级电容组有充足的能量向直流畅触网提供 600 V 直流电压时,开关 S 处于闭合状态,由第 1 级超级电容组直接与 DC/DC 斩波电路或 DC/AC 逆变电路相连,为有轨电车或车辆辅助系统提供电能。

当第 1 级超级电容组储能不足以向直流畅触网提供 600 V 直流电压时,开关 S 改变为断开状态,第 2 级超级电容组可继续利用第一级剩余能量,将输出电压提高至额定电压 600 V。同一线路中有多辆电车时也可采取与第 2 级电容组相同的结构复制更多第 2 级电容组以防止第一级超级电容组过充^[5]。由式(1)可知本文中第 1 级电容组的额定储能为 13.6×10^6 J,当电压降为额定电压 1/3 时储能为 1.5×10^6 J,加上第二级电容组后总的储能为 0.38×10^6 J,所以第 2 级电容组可采用单个 120 μ F 普通电容,既能有效地控制成本也可以减小电容组的自重和体积。为保证供电的连续性及其输出滤波电容体积的小型化,应适当提高第 2 级电容组的充电频率,在本文中放电频率为 6 kHz^[6]。

$$E_{\text{stored}} = \frac{C U^2}{2} \quad (1)$$

4 硬件电路设计

4.1 DC/DC 变换器设计

如图 3 所示,本文中 DC/DC 变换器主要由 buck 电路及 LC 滤波电路组成。该电路中 $L=9$ mH、 $C=10$ μ F,工作频率为 3 kHz,其截止频率由式(2)可知为 531 Hz。该变换器的系统如图 4 所示,由 3 部分组成,分别为 PI 控制器、变换器、负载^[7]。其开环部分的传递函数如式(3)所示,PI 控制器传递函数如式(4)所示,为提高系统稳定性、消弱零点的影响,该框图中常数 $K_p=0$ 、 $K_i=0.1$ ^[8]。

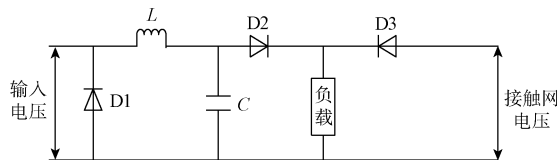


图3 DC/DC 变换器电路

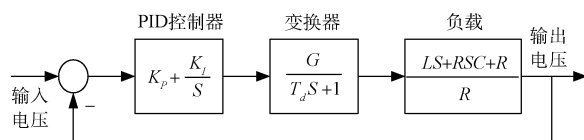


图4 变换器系统

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 531 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$G_{OL}(S) = \frac{G}{T_d S + 1} \frac{LS + RSC + R}{R} \quad (3)$$

$$G_{CL}(S) = \frac{S^2(K_f GL + K_f GRC) + S(K_f GR + K_f GL + K_f GRC) + RK_f G}{S^2(T_d R + K_f GL + K_f GRC) + S(R + K_f GR + K_f GL + K_f GRC) + RK_f G} \quad (4)$$

4.2 DC/AC 逆变器设计

DC/AC 逆变器可将电容级存储的能量转换为 220 V、50 Hz 交流电供给车辆辅助系统,不仅实现了回收方式的多元化而且提高了该系统的回收效率。如图 5 所示,该逆变器为开关频率为 6 kHz 的三相逆变器,输出端设计了电感值为 1 mH,电容值为 10 μF 的电感和电容组成的 LC 滤波电路,因其截止频率为 1 592 Hz 故可有效降低输出端高次谐波含量。

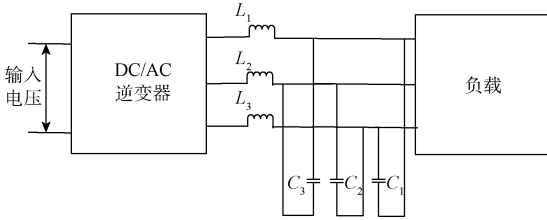


图 5 DC/AC 逆变器电路

该 DC/AC 逆变系统是基于 PWM 控制系统设计的开环系统,根据式(5)可设置在不同电压下的调制指数,如表 1 所示,较传统的 DC/AC 逆变电路基波含量提高约 15.5%,电压利用率提高至 0.906,有效降低电压波形的失真程度和谐波含量^[9]。

$$\sqrt{2}V \cos(\omega t + \varphi) = mV_{DC} |\cos(2\pi ft)| - mV_{DC} \left| \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right| \quad (5)$$

表 1 不同电压下的调制指数

V_{DC}/V	3600	3000	2500	2000	1500	1000	500
m	0.12	0.145	0.175	0.22	0.29	0.435	0.87

5 实验运行结果

为了验证所设计制动能量回收系统的合理性,文中基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了该系统仿真模型,仿真参数具体设置为制动时间 5.5 s,DC/DC 变换器工作频率 3 kHz,输出电压 600 V,最大输出电流 800 A,DC/AC 逆变器开关频率 6 kHz,输出电压 220 V,最大输出电流 10 A,接触网电压 550 V^[10]。

图 6 所示为电动机再生制动所产生的电压脉冲,可见在制动初始阶段电压迅速升高至 600 V 并保持约 5 s,之后又逐渐下降,整个过程约 5.5 s。

图 7(a)所示为 DC/DC 变换器的输出电压波形,可见在制动初始阶段由于储能环节工作方式的转变及晶体管

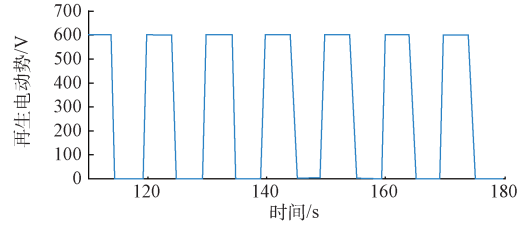


图 6 再生制动时电压波形

导通的影响出现了较高的电压脉冲,在约 0.15 s 后高次谐波经输出端 LC 滤波器被成功滤除,输出电压稳定在 600 V。图 7(b)所示为 DC/DC 变换器的输出电流波形,0.15 s 后输出电流稳定在 700 A 附近。

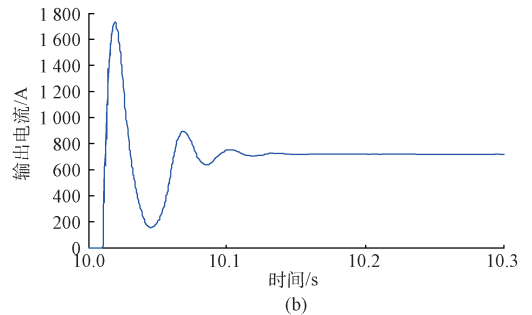
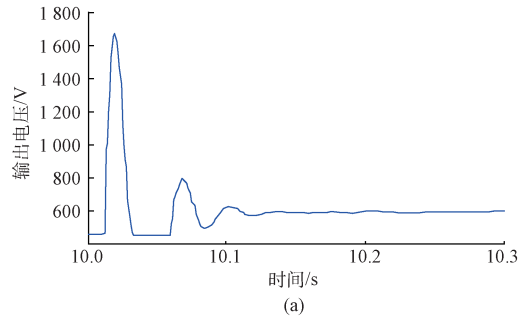
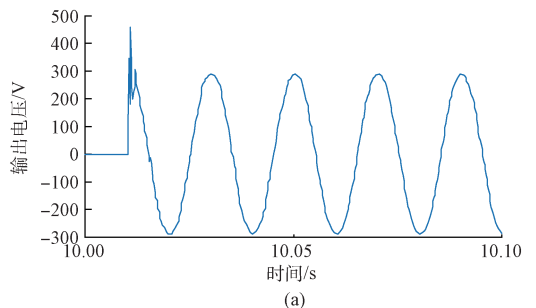


图 7 (a) DC/DC 变换器输出电压波形;
(b)DC/DC 变换器输出电流波形

图 8(a)所示为 DC/AC 逆变器的输出电压波形,因为该逆变器采用了 PWM 控制系统,所以在功率晶体管导通



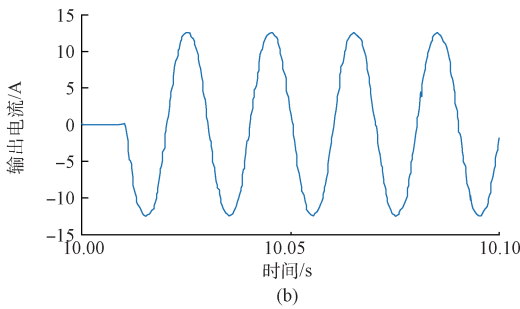


图8 (a)DC/AC逆变器输出电压波形;
(b)DC/AC逆变器输出电流波形

期间会出现短暂的电压脉动,在0.01 s后输出电压波形基本稳定。图8(b)所示为逆变器输出电流波形,由于LC低通滤波器的过滤作用,输出电流没有明显的电流脉动,稳定在10 A附近。

6 结 论

本文针对用于有轨电车的制动能量回收的问题,对传统回收系统的能量存储和回收方式进行改进,设计了一种结构简单、操作方便制动能量回收系统。MATLAB/Simulink仿真结果表明,该系统较传统制动方式在能量回收利用率及制动安全性方面有较大提高且能够满足有轨电车及其辅助系统的运行条件,保障局部电网及其他设备的正常运行,并且该系统的两种回收方式输出电压电流非常稳定验证了其稳定性和可靠性。当今我国对能量回收的研究和利用日益兴起,有轨电车制动能量回收系统尤为重要,因为该系统必将具有良好的市场前景。

参考文献

[1] 刘宝林. 地铁列车能耗分析[J]. 电力机车与城轨车

辆,2007(4):65-70.

- [2] LU W, LIU X D. The PID controller based on the artificial neural network and the differential evolution algorithm[J]. Journal of Computers, 2012, 7(10): 2368-2375.
- [3] 张国安. 锂电池特性研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10):41-45.
- [4] 吴红斌,顾湘,赵波,等. 蓄电池充放电的全过程仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 843-849.
- [5] 张博,郑贺悦,王成. 可外接充电混合动力汽车能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2011(8):113-120.
- [6] 聚焦汽车电子测试[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(5):1-4.
- [7] 郭金刚,王军平,曹秉刚. 电动车最大化能量回收制动力分配策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5):608-611.
- [8] 刘凌,李雪峰,汪伟,等. 串联式混合动力客车制动能量回收的研究[J]. 交流技术与电力牵引, 2007(3): 45-48.
- [9] 王保华,郁俊杰. 混合动力客车制动能量回馈及控制仿真研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2008, 22(4): 1-5.
- [10] 李孟良,朱西产. 典型城市车辆行驶工况构成的研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(5):557-560.

作者简介

史超然,在读硕士,研究方向为电力电子与电力传动。
E-mail:491721454@qq.com