

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.04.004

车载超级电容在地铁制动回收能量中的应用

陈 军, 邓木生

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对地铁列车运行状态变化时引起直流电网电压出现很大波动的现象, 设计了一种基于非隔离双向 DC/DC 变换器的超级电容储能系统。采用电压电流双闭环控制方法, 建立储能系统充放电控制策略, 并搭建储能系统仿真模型。仿真结果表明: 车载超级电容储能系统能够达到稳定电网电压和节能的目的, 同时验证了控制策略的正确性。

关键词: 超级电容; 储能系统; DC/DC 变换器; 双闭环控制

中图分类号: TM53

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)04-0028-05

Application of Vehicle Super Capacitor in Metro Braking Energy Recovery

CHEN Jun, DENG Musheng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the great fluctuation in the DC grid voltage resulting from changes of the running state of subway trains, a design has been made of a super capacitor energy storage system based on non-isolated bidirectional DC/DC converter. By using voltage and current dual closed-loop control method, a charging and discharging control strategy of energy storage system is to be established, with a simulation model of energy storage system built as well. The simulation results show that the vehicle supercapacitor energy storage system helps to maintain the stability of the power grid voltage and energy saving, thus verifying the validity of the control strategy.

Keywords: supercapacitor; energy storage system; DC/DC converter; double closed-loop control

0 引言

随着城市地铁的快速发展, 人们的出行越来越快捷。地铁列车在给人们的生活带来方便的同时, 也会产生负面的影响: 列车在行驶过程中会停靠很多站点, 出现频繁地启动和制动。启动加速时, 牵引网供给机车大电流, 从而导致电网电压降低; 制动减速时, 电机电能转化的电能, 一部分能量进入电网, 使得电网电压升高^[1-2]。电网电压频繁波动, 如果波动幅值过大, 将严重影响供电质量。列车制动减速时, 也有一部分电能通过制动电阻以热能形

式释放, 使列车周围温度升高, 对空气质量产生一定污染。为了实现节能稳压, 设计一种基于非隔离双向 DC/DC 变换器的超级电容储能系统。其工作原理是: 列车减速时, 制动产生的能量被超级电容吸收, 避免进入电网, 列车加速时, 超级电容及时释放能量^[3-4]。这样电网电压就不会频繁波动, 也保证了机车短时加速的动力性能。

本文先介绍超级电容储能系统的工作原理和基本结构; 讨论 DC/DC 变换器在系统中的作用; 分析制动能量的大小, 确定电容组电压、电流、功率分别

收稿日期: 2017-09-03

作者简介: 陈 军 (1989-), 男, 河南商丘人, 湖南工业大学工程师, 硕士, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统, E-mail: 273733820@qq.com

与占空比的关系,依据结构设计出电容组其他参数^[5];采用电压电流双闭环控制方法,建立储能系统充放电控制策略;然后在 Matlab/Simulink 软件中搭建超级电容储能系统模型,进行仿真分析。

1 储能系统工作原理及结构

1.1 储能系统工作原理

地铁列车启动时从牵引电网上吸收很多能量,拉低电网电压;制动时机车电机将动能转化为电能,一部分反馈给电网,抬升电网电压幅值^[6]。不论消耗还是产生能量,都会引起电网电压波动,若超出电网电压的最大波动范围会导致电网保护动作,这种情形会严重影响供电质量^[7]。为解决上述问题,设计一种超级电容储能系统^[8],其工作原理如下:

1) 制动减速过程。牵引电机产生的能量经过变频调速系统(variable velocity variable frequency, VVVF)回馈牵引网,使电网电压升高,控制电路控制 DC/DC 变换电路工作于降压模式, PWM (pulse width modulation) 控制开关管导通,牵引网与超级电容构成连接,电容组从电网取得能量并储存,电网电压降低。

2) 启动加速过程。电机运转需要大量电能,控制电路使得 DC/DC 变换主电路工作于升压模式,此时牵引电网与超级电容导通,电容组通过升压电感对牵引电网反馈能量^[9-10],避免电网电压过低。

综上所述,DC/DC 变换器作为储能系统的一部分,提高了电容组对能量的利用效率,同时稳定了电网电压,在超级电容和牵引网之间发挥着重要作用。

1.2 储能系统结构

储能系统主要是由牵引电网、滤波器、DC/DC 变换器、超级电容、储能电感、VVVF 和交流电机构成。储能系统结构如图 1 所示,图中 L_1 为滤波电感、 L_2 为储能电感, R_a 为线电阻、 R_{sc} 为超级电容内阻, C_1 、 C_2 为稳压电容、 C_{sc} 为超级电容, U_{dc} 为直流电网电压、 U_{sc} 为超级电容端电压, T_1 、 T_2 为晶闸管, D_1 、 D_2 为二极管, M 为电机。

直流牵引电网主要负责给机车供电,电压等级以 750 V 和 1 500 V 居多,此储能系统应用对象为 1 500 V 直流电网。双向 DC/DC 变换器控制超级电容与牵引电网之间能量的流动,实现能量回收利用和稳定电网电压。储能电感有两个作用,一是储能滤波,二是平滑升压。当变换器处于 Buck 模式,牵引电网给电容充电,此时电感起到储能滤波的功能;处于 Boost 模式,电容给牵引电网馈电,由于电容电压最大为 1 400 V,此时需要平滑升压电感来过渡。

电容组由大量电容单体串并联组成,它具有快充快放的功能^[11]。LC 滤波器处在牵引电网和 DC/DC 变换器之间,作用是抑制牵引电网端的低频噪声,也能够抑制 DC/DC 变换器的高频扰动,具有很强的抗干扰能力。VVVF 由 6 个开关管组成,它们受 PWM 控制有序导通,整体结构可以实现变频变压的功能。

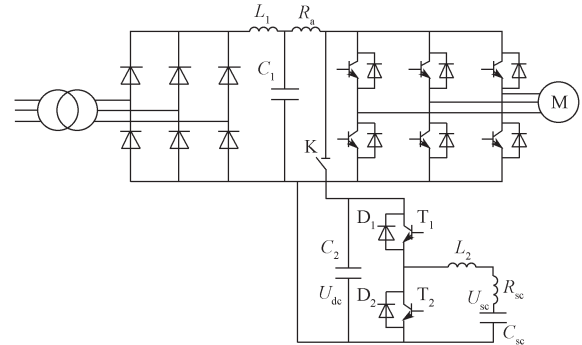


图 1 储能系统结构

Fig. 1 Energy storage system structure

2 超级电容参数

2.1 电压、电流和功率分别与导通比的关系

超级电容的端电压范围是设计储能系统的重要参数之一,只有确定了电压范围才能够选择其他参数。假设端电压在 $U_{sc\ min}$ 与 $U_{sc\ max}$ 之间,以下是超级电容充放电过程中电压、电流和功率的变化与导通比的关系^[12-14]。

1) 充电过程

超级电容充电工况如图 2 所示,图中 i_{T1} 为流过 T_1 的电流, i_{L2} 为流过储能电感 L_2 的电流, D_{buck} 为占空比, T 为开关器件开与关的周期。

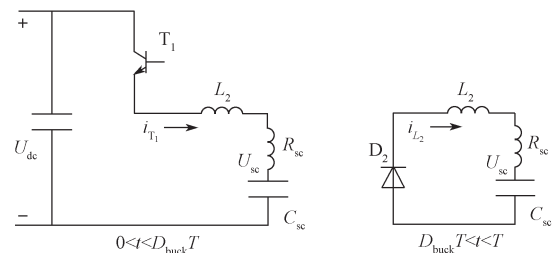


图 2 超级电容充电工况

Fig. 2 Supercapacitor charging condition

由基尔霍夫定律可得

$$i_{T1} = \frac{U_{dc} - U_{sc}}{L_2} D_{buck} T, \quad (1)$$

$$U_{sc} = D_{buck} U_{dc} \quad (2)$$

超级电容的功率

$$P_{buck} = U_{sc} i_{T1} = \frac{U_{dc}^2}{L_2} (1 - D_{buck}) D_{buck}^2 T \quad (3)$$

2) 放电过程

超级电容放电工况如图 3 所示,图中 i_{T2} 为流过 T_2

的电流。

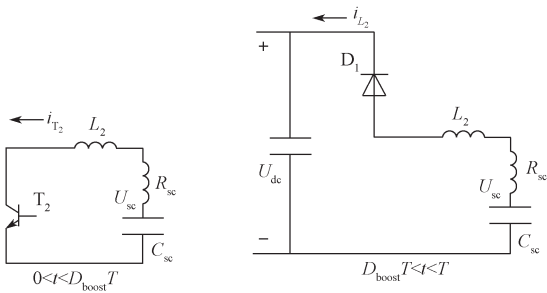


图3 超级电容放电工况

Fig. 3 Supercapacitor discharging condition

由基尔霍夫定律可得：

$$i_{T_2} = \frac{U_{sc}}{L_2} D_{boost} T, \quad (4)$$

$$U_{sc} = (1 - D_{boost}) U_{dc} \quad (5)$$

超级电容的功率为

$$P_{boost} = U_{sc} i_{T_2} = \frac{U_{dc}^2}{L_2} (1 - D_{boost})^2 D_{boost} T. \quad (6)$$

2.2 超级电容器其他参数

列车制动产生的能量可分为3部分：一是提供牵引动力给相邻车辆；二是被制动电阻以热量形式释放；三是通过超级电容储存。超级电容储能系统存储能量的多少由多方面因素决定，主要有电容、电压、储能效率等。

列车制动能量为

$$E_b = \frac{1}{2} M v_{max}^2 \eta, \quad (7)$$

式中： M 为载荷质量；

v_{max} 为列车的最高速度；

η 为系统的效率。

超级电容所吸收的制动能量 E_c 为制动回馈总能量 E_b 的40%左右。

将超级电容看做一个理想电容和一个等效内阻串联。选择同一型号的单体电容进行串并联组合才能满足稳定直流电压和存储能量的目的。

超级电容理想电容公式为

$$C_{sc} = \frac{C_{cell} \times m}{n}, \quad (8)$$

式中： C_{cell} 为单体电容量；

m 为电容并联个数；

n 为电容串联个数。

超级电容中串联的等效内阻

$$r = \frac{r_{cell} \times n}{m}, \quad (9)$$

式中 r_{cell} 为单体电容电阻。

超级电容端电压

$$U_{sc} = n \times U_{cell}, \quad (10)$$

式中 U_{cell} 为单体电容端电压。

因此，所得到的超级电容吸收制动能量公式为

$$E_c = \frac{1}{2} C_{sc} (U_{sc \max}^2 - U_{sc \min}^2), \quad (11)$$

理想电容的容量为

$$C_{sc} = \frac{2E_c}{U_{sc \max}^2 - U_{sc \min}^2}. \quad (12)$$

3 储能系统控制策略

为保证车载超级电容储能系统在牵引或制动时能平稳释放或吸收能量，采用如图4所示的控制策略。

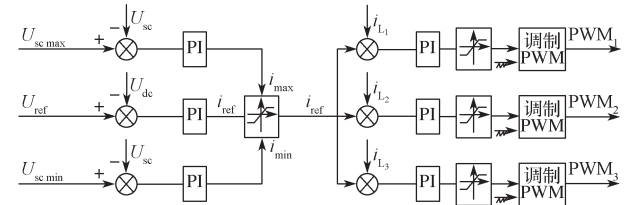


图4 储能系统控制策略

Fig. 4 Control strategy of the energy storage system

控制策略采用电压、电流双环反馈控制模式。

电压环作为外环用于减小制动时牵引网电压的波动，电压环的电压误差经过PI控制器输出后作为电流环的给定参考值。电流环作为内环，电流参考值与反馈值比较产生误差值，再通过PI控制器，经载波和相位差三相PWM调制，可输出PWM波^[15]，PWM控制双向DC/DC变换器中IGBT (insulated gate bipolar transistor) 的占空比。为保证超级电容有一定的空间吸收能量，由电机转速和转矩确定参考电压 U_{ref} 。机车牵引或加速运行时，会给出放电时的参考电压。牵引时给定参考电压为1400V，即当牵引网电压低于1400V时，超级电容迅速释放电能。如果超级电容的电压 U_{sc} 达到其最小限定电压 $U_{sc \min}$ ，则电容不能继续放电；机车处于制动模式时，会给出充电时的参考电压。制动时给定参考电压为1550V，即当牵引网电压高于1550V时，超级电容吸收能量。如果超级电容的电压 U_{sc} 达到其最大限定电压 $U_{sc \max}$ ，则电容不能继续充电。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

在Matlab/Simulink仿真平台上建立超级电容储能装置仿真模型。该模型基于1500V牵引网电压，主要由DC/DC变换器、制动电阻、超级电容组、变流器等构成。系统中，超级电容和DC/DC变换器并联在牵引网上，电机加速运转时，由超级电容提供瞬时峰值功率；恒定转动时，由牵引网供给电能；电机

制动时, 动能转换为电能, 电能经过VVVF大量储存在超级电容中, 很少一部分回馈电网。系统建立的目的是限制较大电流的干扰, 维持电网电压稳定, 同时在列车快速启动和平稳制动中发挥重要作用。图5是主电路结构图。

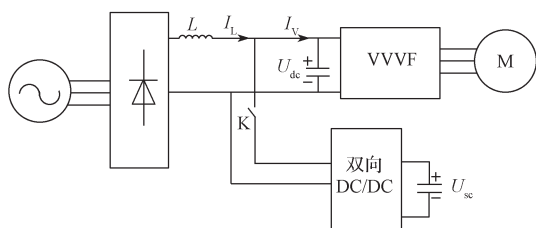
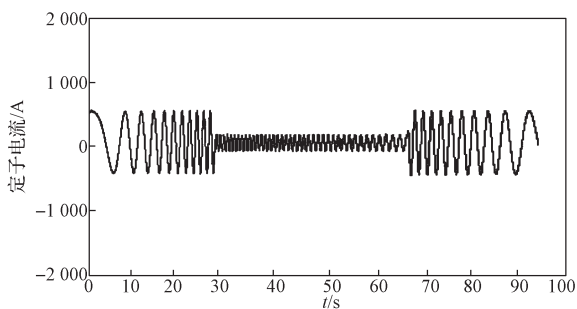


图5 主电路结构

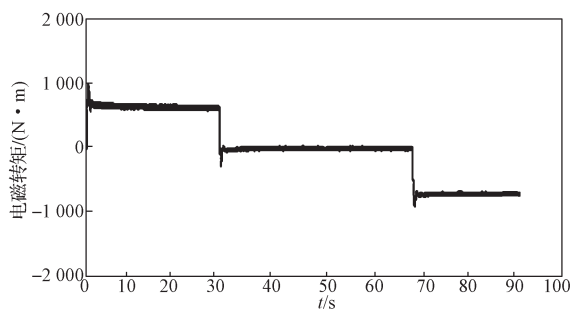
Fig. 5 Main circuit structure

4.2 仿真结果

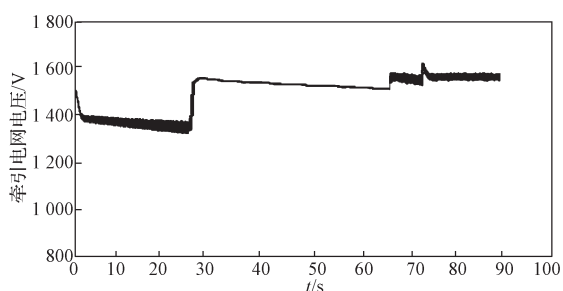
建立系统模型, 应用储能装置控制策略进行仿真验证, 储能系统仿真波形如图6所示。仿真波形显示了列车在启动、巡航、制动过程中电机定子电流、电磁转矩、牵引电网电压和超级电容端电压的变化, 这便于对系统结构与参数进行适当调整, 从而达到预期结果。



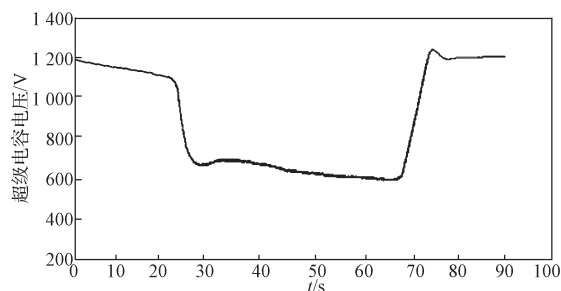
a) 定子电流



b) 电磁转矩



c) 牵引电网电压



d) 超级电容电压

图6 储能系统仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of the energy storage system

由图6可知: 0~30 s, 列车处于启动加速阶段, 牵引电机转速持续增长, 牵引电网电压从1500 V逐渐下降到1350 V。此过程又可分为两个控制阶段: 0~26 s, 电机以速度与频率恒定比(v/f)控制的方式加速运行, 定子电流为600 A, 输出转矩恒定在800 N·m; 26~30 s, 转矩与车速成反比, 速度上升, 转矩却急剧下降, 短时间内下降到0 N·m。

30~68 s, 机车处于惰行阶段, 变流器和双向DC/DC变换器中的IGBT管都处于关断状态。列车前行中受到阻力影响, 转速略有下降, 转矩在零左右浮动, 牵引电网电压稳定在1500 V。

68~90 s, 列车处于制动阶段, 此过程, 牵引电机将动能转换为电能经VVVF输送到直流电网。此时电机定子电流增加到600 A, 转矩则负向快速增加到800 N·m。牵引电网电压略微上升, 大小为1550 V。当电容组储存能量时, 电网电压会浮动在1500 V。其中86~90 s, 车速很低, 控制系统将电制动转换为空气制动^[16], 直到列车停在指定位置。

5 结语

本文针对列车制动过程中电阻吸收制动能量的缺点, 引入超级电容储能装置。该装置将电容组存储制动时产生的能量供列车加速使用, 这样不仅节约能源、减少污染, 还能改善电网供电品质。值得注意的是, 每周周期电容组能量需要通过牵引网或制动电阻释放一部分, 以备下一周期存储能量。总的来说, 将超级电容储能系统应用到城市交通车辆上, 这对节能和环保具有重要意义。

参考文献:

[1] 曾建军, 林知明, 张建德. 地铁制动能量分析及再生技术研究 [J]. 电气化铁道, 2006(6): 33-36.
ZENG Jianjun, LIN Zhiming, ZHANG Jiande. Analysis of Braking Energy and Study on Energy Regeneration

- Technology in Subway[J]. Electrified Railway, 2006(6): 33-36.
- [2] 段明民, 汪伟. 浅谈地铁制动控制与列车冲动[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(6): 63-65.
DUAN Mingmin, WANG Wei. A Brief Discussion for Brake Control and Impact of Metro[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(6): 63-65.
- [3] 佚名. 国产地铁列车用超级电容储能装置在广州运行[J]. 军民两用技术与产品, 2017(1): 21.
Anon. Super-Capacitor Energy Storage Device for Domestic Subway Trains Operating in Guangzhou[J]. Military and Civilian Dual-Use Technology and Products, 2017(1): 21.
- [4] 张一, 成建国, 吴松荣, 等. 基于超级电容的地铁列车再生制动能量利用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016(9): 56-60, 65.
ZHANG Yi, CHENG Jianguo, WU Songrong, et al. Analysis of Regenerating Energy Utilization Based on Metro Vehicle Super Capacitor[J]. Urban Mass Transit, 2016(9): 56-60, 65.
- [5] 马耀东, 刘晓晖, 陆学文. 一种基于超级电容的新型再生制动能量回收装置在地铁牵引供电系统中的应用[J]. 机电信息, 2017(18): 30-31.
MA Yaodong, LIU Xiaohui, LU Xuwen. Application of a Novel Regenerative Braking Energy Recovery Device Based on Supercapacitor in Subway Traction Power Supply System[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(18): 30-31.
- [6] 高喆, 袁登科, 项安, 等. 基于车载超级电容的地铁列车节能策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013(11): 75-79.
GAO Zhe, YUAN Dengke, XIANG An, et al. Energy-Saving Strategy for Subway Train Installed with Onboard Super Capacitors[J]. Urban Mass Transit, 2013(11): 75-79.
- [7] 王雪迪, 杨中平. 超级电容在城市轨道交通中改善电网电压的研究[J]. 电气传动, 2009, 39(3): 77-80.
WANG Xuedi, YANG Zhongping. Study of Electric Double Layer Capacitors to Improve Electric Network Voltage Fluctuation for Urban Railway Transit[J]. Electric Drive, 2009, 39(3): 77-80.
- [8] 黄厚明, 杨俭, 宋瑞刚, 等. 超级电容在城市轨道交通车辆中的节能应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2008, 22(2): 117-120, 124.
HUANG Houming, YANG Jian, SONG Ruigang, et al. Application of Energy-Saving On-Board Supercapacitor in Urban Railway Vehicle[J]. Journal Shanghai University of Engineering Science, 2008, 22(2): 117-120, 124.
- [9] 王俭朴, 任成龙. 考虑电流约束的轨道车辆车载超级电容优化配置[J]. 机车电传动, 2016(6): 92-94.
WANG Jianpu, REN Chenglong. Optimization Configuration for On-Board Super Capacitor of Railway Transit Considering the Current Constraint[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(6): 92-94.
- [10] 缪晓宇, 曾之煜, 方雨菡. 基于超级电容的再生制动能量吸收装置分析[J]. 电气化铁道, 2012(4): 44-47.
MIAO Xiaoyu, ZENG Zhiyu, FANG Yuhan. Analysis of Supercapacitor-Based Regenerative Braking Energy Absorption Device[J]. Electric Railway, 2012(4): 44-47.
- [11] 张秋瑞, 葛宝明, 毕大强. 超级电容在地铁制动能量回收中的应用研究[J]. 电气化铁道, 2012(2), 40-43.
ZHANG Qiurui, GE Baoming, BI Daqiang. Research of Application of Super-Capacitance for Energy Recovery of Subway Braking Energy[J]. Electric Railway, 2012(2), 40-43.
- [12] 邓文豪, 肖彦君, 吴茂杉. 基于列车制动的超级电容型储能系统的参数设计与控制[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(4): 58-62.
DENG Wenhao, XIAO Yanjun, WU Maoshan. Design and Control of Super-Capacitor Energy Storage System Based on Train Braking[J]. Railway Locomotive & Car, 2010, 30(4): 58-62.
- [13] 陈裕楠, 童翔, 金雪丰. 2 MW 城轨交通再生制动能量存储装置设计与实现[J]. 船电技术, 2016, 36(3): 32-36, 40.
CHEN Yunan, TONG Xiang, JIN Xuefeng. Design and Implementation of 2 MW Regenerative Braking Energy Storing Device of Urban Subway System[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2016, 36(3): 32-36, 40.
- [14] 杨莹, 李夏青. 地铁再生制动储能装置参数设计[J]. 北京石油化工学院学报, 2016, 24(1): 52-58.
YANG Ying, LI Xiaqing. Design of Metro Regenerative Braking Energy Storage Device[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2016, 24(1): 52-58.
- [15] 杨丰萍, 史陆星, 鲍丙东, 等. 地铁制动控制装置测试系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2016(2): 58-61.
YANG Fengping, SHI Luxing, BAO Bingdong, et al. Design of Test Platform for Braking Control Units of Subway[J]. Automation and Instrumentation, 2016(2): 58-61.
- [16] 左建勇, 王宗明, 吴萌岭. 地铁列车空气制动系统仿真模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(2): 42-47.
ZUO Jianyong, WANG Zongming, WU Mengling. Simulation Model of Air Braking System for Subway Train[J]. Journal of Traffic Transportation Engineering, 2013, 13(2): 42-47.

(责任编辑: 邓光辉)