

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.06.004

超级电容储能系统中双向DC-DC 变换器控制策略研究

曹成琦, 王欣, 秦斌, 张凯, 梁枫

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 城市轨道交通站间距较短、运行密度大, 列车需要频繁的启动和制动, 列车在启动时需要大量能量, 导致直流牵引网电压下降; 列车在再生制动时产生大量能量, 导致直流牵引网电压升高, 严重时还会使再生制动失效。针对这一问题, 提出将双向DC-DC变换器应用于超级电容储能系统中, 并设计了电压外环、电流内环的双PI控制策略。利用Matlab/Simulink搭建了双向DC-DC变换器和超级电容储能系统的仿真模型, 分析了双向DC-DC变换器在Buck模式、Boost模式下的运行情况以及电压外环、电流内环的双PI控制策略的控制效果。仿真结果验证了双向DC-DC变换器能够实现能量的双向传输和控制策略的有效性。

关键词: 超级电容储能系统; 双向DC-DC变换器; 电压外环、电流内环的双PI控制策略; 再生制动
中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2016)06-0018-05

Research on Control Strategy for Bi-Directional DC-DC Converter in Super Capacitor Energy Storage System

CAO Chengqi, WANG Xin, QIN Bin, ZHANG Kai, LIANG Feng

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

Abstract: The short distance between urban rail transit stations and the high density of railway result in frequent start-ups and brakings of the trains, involving a large consumption of energy when starting, and a drastic drop in DC traction network voltage. A lot of energy is generated during regenerative braking, which leads to an increase of the voltage of DC traction network, and a regenerative braking failure as well. With an aim to solve this problem, a bidirectional DC-DC converter is proposed for the super capacitor energy storage system, and a dual PI control strategy is designed for the voltage outer loop and current inner loop. A simulation model of bidirectional DC-DC converter and super capacitor energy storage system has thus been established based on Matlab/Simulink, and an analysis has been made of the operation of the bi-directional DC-DC converter in Buck mode and Boost mode, and of the control effect of double PI control strategy for the voltage loop and current loop. The simulation results show that the bidirectional DC-DC converter is capable of achieving the bi-directional transmission of energy, thus verifying the effectiveness of the control strategy.

Keywords: super capacitor energy storage system; bi-directional DC-DC converter; dual PI control strategy of the voltage outer loop and current inner loop; regenerative braking

收稿日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074067, 21106036), 湖南省科技计划基金资助重点项目(2014FJ2018), 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3110), 湖南省教育厅科研基金资助重点项目(15A050), 湖南省研究生创新基金资助项目(CX2015B564)

作者简介: 曹成琦(1990-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统及其自动化,
E-mail: 602593526@qq.com

通信作者: 王欣(1971-), 女, 山东青岛人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事复杂工业过程控制, 能量管理, 机器学习方面的研究, E-mail: Wangxin97p@163.com

0 引言

当前不可再生能源越来越紧张,开发新能源和节约能源是解决能源问题的根本途径。超级电容作为一种新型的储能元器件,在列车上得到了广泛的应用。如图1所示为超级电容储能系统的控制框图,超级电容储能系统由超级电容组和双向DC-DC变换器构成。超级电容储能系统在列车再生制动时,储存再生制动产生的能量,防止直流牵引网电压过高;在列车启动或者加速时,释放储存的能量补偿下降的直流牵引网电压,这样能够极大地节约能量^[1]。

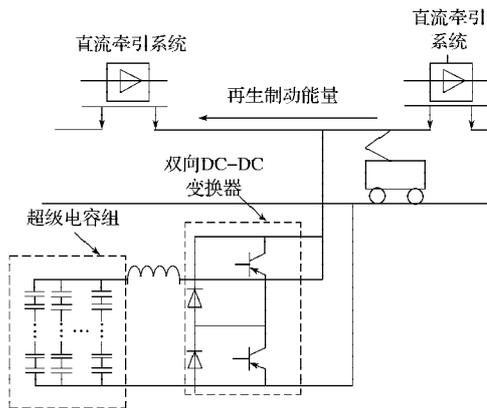


图1 超级电容储能系统框图

Fig. 1 A block diagram of super capacitor energy storage system

双向DC-DC变换器具有结构简单、效率高、系统损耗小的特点^[2],是实现能量双向传输的直流变换器,结合了Boost电路和Buck电路的升降压功能,因此广泛应用于储能系统、电动汽车、太阳能发电系统中^[3]。双向DC-DC变换器通过开关管接收系统通断的开关信号,从而组成降压斩波电路和升压斩波电路。双向DC-DC变换器可以分为隔离式和非隔离式2种。非隔离式与隔离式双向DC-DC变换器相比,具有元器件更小、效率更高、无变压器损耗等优点^[4],所以非隔离式双向DC-DC变换器应用更加广泛。

为了使超级电容能够及时充放电,有效地抑制直流牵引网电压的波动,本文采用电流内环控制、电压外环控制的双闭环和双PI的控制策略^[5],选取非隔离式双向DC-DC变换器。

1 非隔离式双向DC-DC变换器

1.1 拓扑结构

双向DC-DC变换器对输入和输出电压的极性并不影响,只改变电压的大小。双向DC-DC变换器通过IGBT的通断和二极管的续流来实现能量的双向传输。根据控制系统产生的脉冲来控制IGBT开关管的通断,当一个IGBT开关管导通,另一个IGBT开关管关断,

关断的IGBT中反向二极管续流进而构成回路^[6]。如图2所示为非隔离式双向DC-DC变换器的拓扑结构,其主要由2个IGBT、1个电感、2个电容构成。图中, U 为电源端电压, R 和 C 构成一个简单的超级电容^[7]。

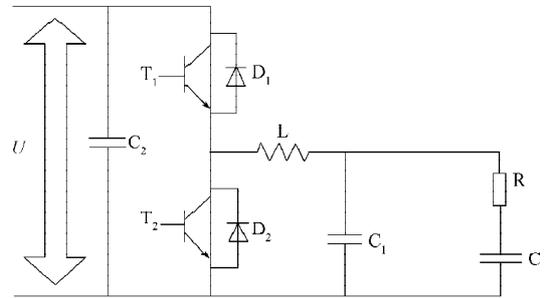


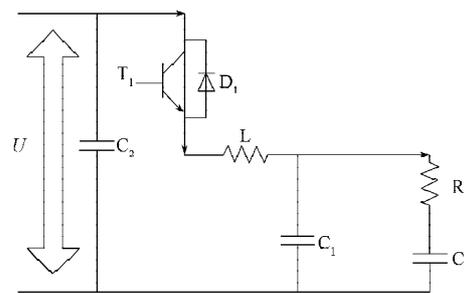
图2 双向DC-DC变换器拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of bidirectional DC-DC converter

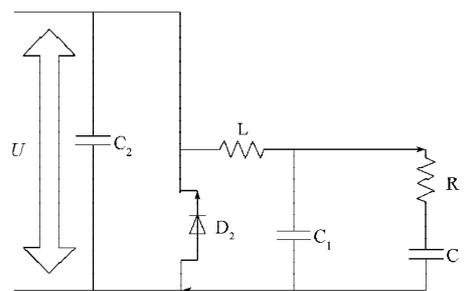
1.2 工作原理

双向DC-DC变换器应用于超级电容储能系统时,工作模式主要为Buck模式和Boost模式^[8]。当列车处于惰性运行状态时,双向DC-DC变换器停止工作,超级电容处于备用状态。

Buck工作模式的主要功能是降低输出电压,如图3所示。当列车处于再生制动和减速阶段时,会导致牵引网电压上升。此时进入Buck工作模式,IGBT1导通,IGBT2断开,超级电容吸收列车再生制动产生的能量,然后IGBT1断开,储存在电容 C_1 中的能量经过IGBT2的续流二极管继续给超级电容充电^[9]。



1) IGBT1 导通



2) IGBT2 二极管续流

图3 Buck工作模式

Fig. 3 Buck working mode

Boost 工作模式的主要功能是升高输出电压, 如图 4 所示。当列车处于启动或者加速阶段时, 会导致牵引网电压的下降。此时进入 Boost 工作模式, IGBT2 导通, IGBT1 断开, 超级电容释放能量并且储存到电容 C1 中, 然后 IGBT2 断开, 电容 C1 中的能量经过 IGBT1 的续流二极管供列车使用^[10]。

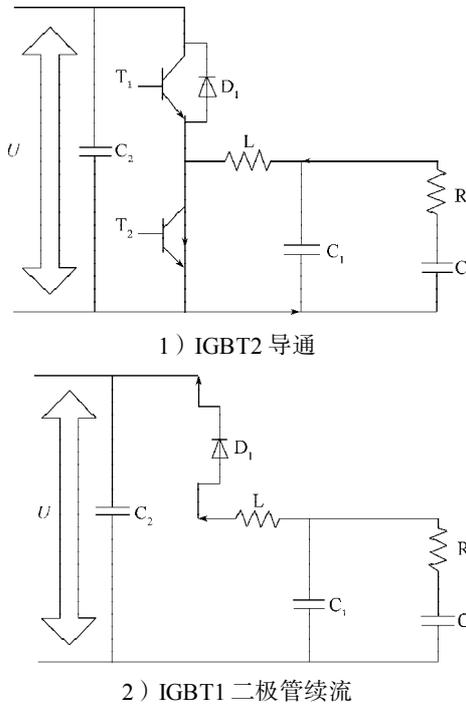


图 4 Boost 工作模式
Fig. 4 Boost working mode

2 双向 DC-DC 变换器的控制策略

双向 DC-DC 变换器控制超级电容充放电, 是一个二阶电路, 2 个变量分别是电容电压和电感电流。本文采用电压外环、电流内环的双 PI 控制策略。

直流牵引网电压给定值 U_0^* 和电感电流 I_L 的传递函数为

$$\left. \frac{I_L(s)}{U_0^*(s)} \right|_{d(s)=0} = \frac{RC_1s+1}{RLC_1s^2+Ls+R} \quad (1)$$

式中 $d(s)$ 为占空比扰动, s 为自变量。

超级电容两端的端电压 U_C 和电感电流 I_L 的传递函数为

$$\left. \frac{U_C(s)}{I_L(s)} \right|_{d(s)=0} = \frac{R}{RC_1s+1} \quad (2)$$

电压外环、电流内环的双 PI 控制策略框图如图 5 所示。图中, K_I 为电流采样系数, K_V 为电压采样系数。直流牵引网电压 U_0 与直流牵引网电压给定值 U_0^* 的差值, 经过 PI 电压调节器, 得到电感电流的给定值 I_L^* , I_L^* 与实际电感电流的差值通过 PI 电流调节器,

再经脉宽调制得到触发开关器件的控制信号 PWM^[11]。

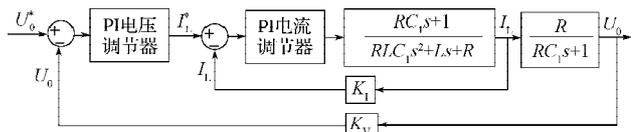


图 5 双向 DC-DC 变换器的控制框图
Fig. 5 A control block diagram of bidirectional DC-DC converter

PI 电压调节器和 PI 电流调节器的传递函数为:

$$K_{VP} + \frac{K_{VI}}{s}, K_{IP} + \frac{K_{II}}{s}$$

式中: K_{VP} , K_{VI} 分别为电压补偿环节的比例系数和积分系数;

K_{IP} , K_{II} 分别为电流补偿环节的比例系数和积分系数。

由图 5 可知, 电流开环和闭环传递函数为

$$G_{io}(s) = \frac{K_{PWM}(K_{IP}s + K_{II})(RCs + 1)}{(RLCs^2 + Ls + R)s} \quad (3)$$

$$G_i(s) = \frac{K_{PWM}(K_{IP}s + K_{II})(RCs + 1)}{RLCs^3 + K_1s^2 + K_2s + K_3} \quad (4)$$

式 (3) ~ (4) 中: K_{PWM} 为比例环节的比例系数;

$$K_1 = L + K_I K_{PWM} K_{IP} RC_1;$$

$$K_2 = K_I K_{PWM} K_{IP} + K_I K_{PWM} K_{IP} RC_1 + R;$$

$$K_3 = K_I K_{PWM} K_{II} R。$$

电流环的截止频率和时间常数非常小, 可以忽略不计。电流闭环 $G_i(s)$ 可以等效为一个常数 K 。因此电压开环和闭环的传递函数为:

$$G_{vo}(s) = \frac{K(K_{VP}s + K_{VI})R}{s(RC_1s + 1)} \quad (5)$$

$$G_v(s) = \frac{K(K_{VP}s + K_{VI})R}{RC_1s^2 + (1 + KK_V K_{VP}R)s + KK_V K_{VI}R} \quad (6)$$

电压外环、电流内环的双 PI 控制策略, 可以增强系统的稳定性, 有效地控制电流大小, 使元器件能够更少地受到电流冲击^[12], 提高系统响应速度, 使系统电压稳定^[13]。

3 仿真分析

双向 DC-DC 变换器主要有 2 种工作模式, 分别为 Buck 模式和 Boost 模式。为验证双向 DC-DC 变换器能够实现能量双向传输, 本课题组利用 Matlab/Simulink 软件分别搭建了双向 DC-DC 变换器仿真模型, 分析了其在 Buck 模式和 Boost 模式下的工作情况。为验证双向 DC-DC 变换器的控制策略能够实现超级电容储能系统的充放电, 本课题组对超级电容

储能系统也进行了建模仿真。

双向DC-DC变换器Buck模式下的仿真参数为： $V=1\ 500\text{ V}$, $L=380\ \mu\text{H}$, $C=0.126\ \mu\text{F}$ 。电感电流与电压波形如图6所示。

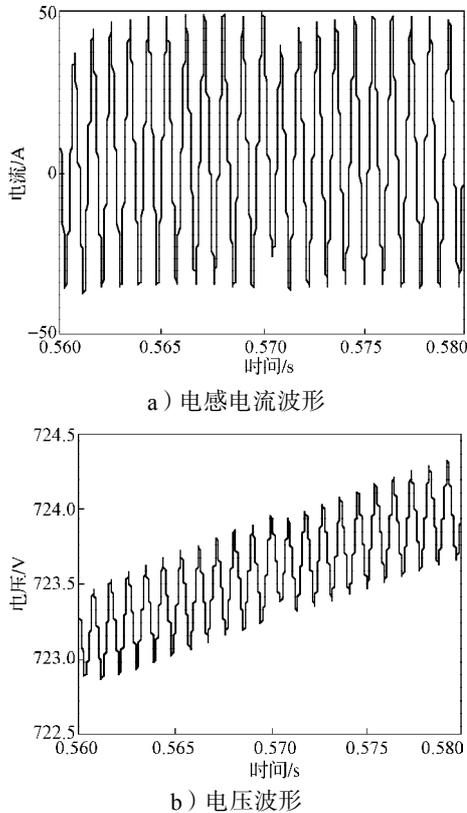


图6 Buck模式下的仿真波形图

Fig. 6 Simulation waveform in Buck mode

双向DC-DC变换器Boost模式下的仿真参数为： $V=500\text{ V}$, $L=255\ \mu\text{H}$, $C=208\ \mu\text{F}$ 。电感电流与电压波形如图7所示。

由图6~7可知：双向DC-DC变换器在Buck模式下实现了电压的降压功能；双向DC-DC变换器在Boost模式下实现了电压的升压功能。通过不同的输入信号使双向DC-DC变换器实现了升压和降压功能，验证了其能够实现双向传输能量^[14]。

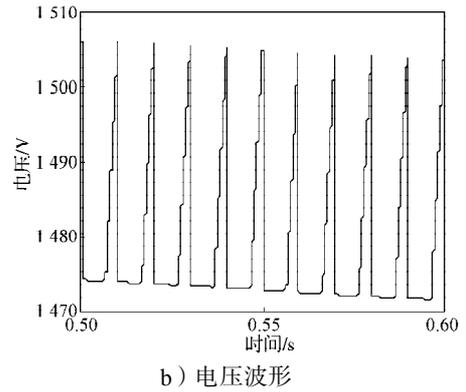
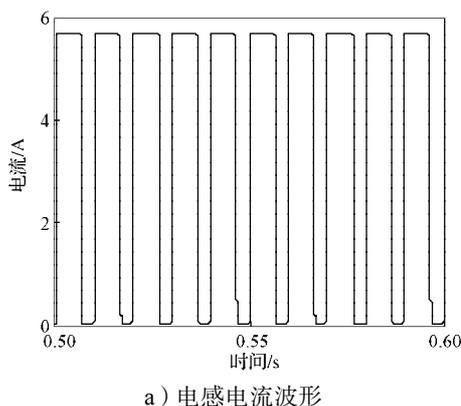


图7 Boost模式下的仿真波形图

Fig. 7 Simulation waveform in Boost mode

图8为双向DC-DC变换器采用电压外环、电流内环的双PI闭环控制策略得到的超级电容两端的电压波形。由图可知，电压外环、电流内环的双PI控制策略能够控制超级电容进行充放电，这证明了控制策略的正确性和可行性^[15]。

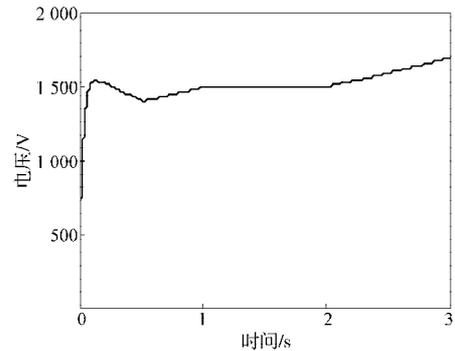


图8 超级电容两端的电压波形图

Fig. 8 Voltage waveform at both ends of the super capacitor

4 结语

本文分析了双向DC-DC变换器的拓扑结构和工作原理，设计了电压外环、电流内环的双PI控制策略来控制超级电容的充放电，仿真分析了双向DC-DC变换器在Buck模式和Boost模式下的工作情况，以及电压外环、电流内环的双PI闭环控制策略对超级电容储能系统的控制情况。仿真结果表明：双向DC-DC变换器能够实现双向传输能量，电压外环、电流内环的双PI控制策略可以有效地控制超级电容的充放电。双向DC-DC变换器能够应用到超级电容储能系统，且达到了预期控制效果。

参考文献：

- [1] 张慧研, 韦统展, 齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 92-96.
ZHANG Huiyan, WEI Tongzhan, QI Zhiping. Study on

- Ultra-Capacitor Energy Storage[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 92-96.
- [2] 刘冠男, 张相军. 基于超级电容储能双向DC/DC变换器控制模型分析[J]. 电力电子技术, 2013, 47(10): 81-83.
LIU Guannan, ZHANG Xiangjun. Bi-Directional DC/DC Converter Control Model Analysis Based on Super Capacitor Energy Storage[J]. Power Electronics, 2013, 47(10): 81-83.
- [3] HASE S, KONISHI T, OKUI A, et al. Fundamental Study on Energy Storage System for DC Electric Railway System [C]//2002 Power Conversion Conference. [S. l.]: IEEE, 2002, 3: 1456-1459.
- [4] 赵深, 徐卓农, 龚固丰. 城轨列车超级电容储能系统仿真分析[J]. 电子世界, 2014(2): 43-44.
ZHAO Shen, XU Zhuonong, GONG Gufeng. The Simulation Analysis of the Super Capacitor Energy Storage System for Urban Trains[J]. Electronic World, 2014(2): 43-44.
- [5] 王艳, 陈进军, 纪志成. 基于SG的Buck变换器自适应反步法控制[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 662-665.
WANG Yan, CHEN Jinjun, JI Zhicheng. Adaptive Backstepping Control for Buck Converter via System Generator[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(6): 662-665.
- [6] 徐令宇. 电流源型双向DC-DC变换器的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
XU Lingyu. Research on Current-Fed Bidirectional DC-DC Converter [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [7] 张相军, 刘冠男, 王懿杰, 等. 软开关双向DC-DC变换器控制模型[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(11): 89-96.
ZHANG Xiangjun, LIU Guannan, WANG Yijie, et al. Bidirectional DC/DC Converter Control Model Analysis Based on Super Capacitor[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(11): 89-96.
- [8] 高明远. 双向DC-DC变换器基于切换系统的建模与储能控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 129-134.
GAO Mingyuan. Modeling and Energy Storage Control for Bi-Directional DC-DC Converter Based on Switching System[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 129-134.
- [9] 张秋瑞. 城市轨道交通再生制动能量利用技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHANG Qiurui. Research on Regenerating Energy Utilization Technique in Urban Rail System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [10] 孙佳, 田勇. 一种新颖控制模式的双向DC/DC变换器研究及设计[J]. 电气自动化, 2012, 34(5): 26-28.
SUN Jia, TIAN Yong. Research and Design of Bidirectional DC/DC Converter with an Novel Control Mode[J]. Electric Automation, 2012, 34(5): 26-28.
- [11] 冯晶晶. 基于超级电容的再生制动能量吸收利用技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
FENG JingJing. Research on Absorbing and Utilizing Technology for Regenerating Energy Based on Ultra-Capacitor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [12] 许爱国, 谢少军, 姚远, 等. 基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J]. 电工技术学报, 2010(3): 117-123.
XU Aiguo, XIE Shaojun, YAO Yuan, et al. Regenerating Energy Storage System Based on Ultra-Capacitor for Urban Railway Vehicles[J]. Journal of Electrical Engineering, 2010(3): 117-123.
- [13] 王楷榕. 城市轨道交通车载超级电容储能系统实验平台开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
WANG Shenrong. Experimental Platform Development of Railway On-Board Supercapacitor Energy Storage System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [14] 张慧妍, 程楠, 景阳. 超级电容器储能系统的应用研究综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(12): 51-53.
ZHANG Huiyan, CHENG Nan, JING Yang. A Review of Super Capacitor Energy Storage System Application Research[J]. Power Electronic Technology, 2011, 45(12): 51-53.
- [15] 陈德锋, 肖强晖. 一种Buck型恒流源的输入特性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(6): 49-51.
CHEN Defeng, XIAO Qianghui. Research on the Input Characteristics of a BUCK-Type Constant-Current Power [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(6): 49-51.

(责任编辑: 邓彬)