

文章编号:1671-251X(2019)06-0063-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019010089

应用于矿用电机车的并联交错 DC/DC 变换器研究

祝龙记¹, 吴忠岚¹, 郑昌陆²

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 上海申传电气股份有限公司, 上海 200072)

扫码移动阅读

摘要:针对目前应用于矿用电机车的非隔离型变换器转换效率低、易损坏开关器件、不适用于超级电容等问题,介绍了一种应用于矿用电机车的并联交错 DC/DC 变换器。在低压侧采用并联交错结构对电容充电,并减小电流纹波;在高压侧通过增加一个开关管使 2 个电容串联放电,以提高升降压增益。介绍了该变换器在升压驱动模式和降压充电模式下的工作过程,并设计了电压/电流双闭环升压和恒流限压充电控制器。实验结果表明,并联交错 DC/DC 变换器能够有效提高电机车在直流变换环节的性能。

关键词:矿用电机车; 并联交错 DC/DC 变换器; 超级电容; 升压驱动模式; 降压充电模式

中图分类号:TD64 文献标志码:A

Research on parallel interleaved DC/DC converter applied to mine electric locomotive

ZHU Longji¹, WU Zhonglan¹, ZHENG Changlu²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Shanghai SH-Driver Electric Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: In view of problems of low conversion efficiency, easy damage of switching devices and inapplicable to super capacitors of non-isolated converters currently used in mine electric locomotive, a parallel interleaved DC/DC converter applied to mine electric locomotive was introduced. At the low voltage side, a parallel interleaving structure is proposed to charge the capacitor and reduce current ripple; At the high voltage side, two capacitors are connected in series by adding a switch tube to increase buck-boost gain. Working process of the converter under boost drive mode and buck charging mode are described. The voltage/current double closed-loop step-up and constant current limit charging controller are designed. The experimental results show that the parallel interleaved DC/DC converter can effectively improve the performance of the electric locomotive in DC conversion.

Key words: mine electric locomotive; parallel interleaved DC/DC converter; super capacitor; boost drive mode; buck charging mode

0 引言

功率密度高、充放电时间短等优点被应用于矿用电机车中^[4-5]。

双向 DC-DC 变换器是连接矿用电机车驱动系统输入源与直流环节的最主要装置。变换器有隔离型和非隔离型两大类,目前矿用电机车主要采用非隔离型变换器,主要包括以下几种:① Cuk、Sepic/

目前我国矿用电机车大多使用铅酸蓄电池作为储能元件。铅酸蓄电池能量密度低,使用寿命短,充电过程复杂,维护成本高,在电机车上应用具有一定局限性^[1-3]。超级电容器因可以反复充电数十万次、

收稿日期:2019-01-24;修回日期:2019-05-17;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金-山西煤基低碳联合基金项目(U1610120)。

作者简介:祝龙记(1964—),男,安徽安庆人,教授,博士,研究方向为电力电子与电力传动,E-mail:ljzhu@aust.edu.cn。

引用格式:祝龙记,吴忠岚,郑昌陆. 应用于矿用电机车的并联交错 DC/DC 变换器研究[J]. 工矿自动化,2019,45(6):63-68.

ZHU Longji, WU Zhonglan, ZHENG Changlu. Research on parallel interleaved DC/DC converter applied to mine electric locomotive [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 63-68.

Zeta 变换器,其结构简单,但转换效率低^[6];② 单相 buck-boost 变换器,转换效率高^[7],但与铅酸蓄电池相比,超级电容电路中的启动电流更大,容易损坏开关器件;③ 多相变换器,虽然高效、安全,但会增加体积,控制策略也更复杂,不适用于矿区的恶劣环境^[8-11]。文献[12]中两相 buck-boost 电路所用的开关元件和二极管的电压、电流应力较小,并且只需 2 个电感就可以储存和释放能量,但其调压范围较窄,不适用于超级电容这种端电压变化范围大的储能装置。

本文介绍了一种适用于矿用机车的高升压比、高效率的新型非隔离变换器,即并联交错 DC/DC 变换器。与文献[12]中的两相升降压变换器相比,并联交错 DC/DC 变换器使有效占空比增加了 2 倍,保证在超级电容工作电压范围内都可以得到稳定的驱动系统所需电压;通过 2 个相位交错 180° 来控制电路,能够很好地抑制电流纹波;采用恒流限压法对超级电容充电,能够有效提高充电效率。

1 并联交错 DC/DC 变换器拓扑结构

矿用机车电气结构如图 1 所示,包括超级电容储能装置、DC/DC 变换器、驱动系统和地面充电桩 4 个部分。本文研究的是 DC/DC 变换器部分。图 1 中, L_1 和 L_2 为储能/滤波电感, T_1 — T_5 为绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT), C_1 — C_3 为储能/滤波电容。 L_1 、 T_1 和 L_2 、 T_2 相连构成低压侧并联交错结构, C_1 、 T_3 和 C_2 、 T_4 相连构成高压侧并联交错结构; T_1 和 T_2 占空比相同, T_3 和 T_4 占空比相同;控制信号之间的相位差为 180°。通过控制 C_3 和 T_5 的通断能够改变 C_2 的能量流动方向,使 C_1 、 C_2 串联,保证驱动系统的工作电压是电容电压的 2 倍。

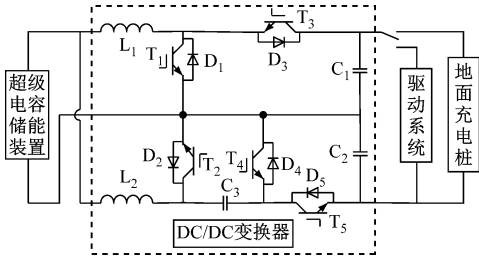


图 1 矿用机车电气结构

Fig. 1 Electrical structure of mine electric locomotive

为了简化分析,对变换器工作条件作如下假设:① 变换器的所有 IGBT、电感和电容都为理想器件;② 变换器工作在连续导通模式中;③ 所有电容都足够大,在开通和关断期间电容电压恒定不变。

2 并联交错 DC/DC 变换器工作原理

2.1 升压驱动过程

在升压驱动模式下,DC/DC 变换器等效电路如图 2 所示。其中, i_{SC} 、 U_{SC} 分别为超级电容电流和电压, i_{DC} 、 U_{DC} 分别为驱动系统高压侧电流和电压, i_{L1} 、 i_{L2} 为支路电流。当能量从低压侧超级电容流向高压侧驱动系统时, T_1 、 T_2 和二极管 D_3 、 D_4 、 D_5 组成两相升压电路,使输出电压升高。 T_1 、 T_2 的占空比 M_1 、 M_2 为

$$M_1 = M_2 = m_{\text{boost}} \tag{1}$$

式中 m_{boost} 为 IGBT 在升压时的占空比。

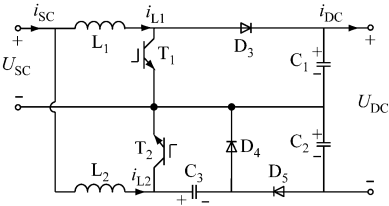


图 2 升压驱动模式下变换器等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of converter under boost drive mode

当 $0.5 < m_{\text{boost}} < 1$ 时,变换器工作波形如图 3 所示。其中, U_{T1} 、 U_{T2} 为 T_1 、 T_2 的电压, I_{SC} 为超级电容平均电流, V_{DC} 为高压侧平均输出电压, Δi_{L1} 、 Δi_{L2} 、 Δi_{SC} 分别为 L_1 、 L_2 和超级电容的纹波电流。

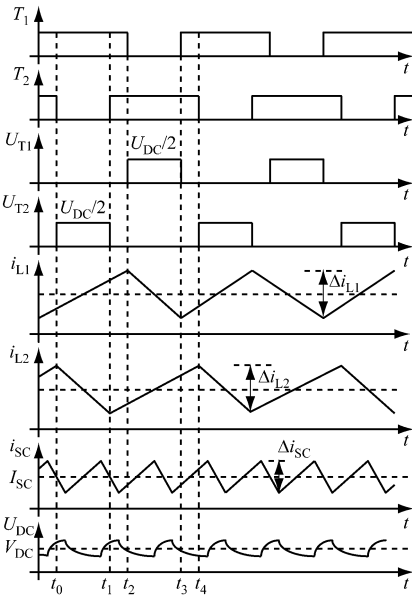


图 3 升压驱动模式下变换器工作波形
Fig. 3 Working waveforms of converter under boost drive mode

在 $t_0 \sim t_1$ 时间段内, T_1 开通, T_2 关断;超级电容给 L_1 充电, L_2 给 C_3 充电; C_1 和 C_2 串联,为驱动系统负载提供能量。在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内, T_1 和 T_2

都开通;超级电容给 L_1 和 L_2 充电, C_1 和 C_2 串联, 为驱动系统负载提供能量。在 $t_2 \sim t_3$ 时间段内, T_1 关断, T_2 开通; L_1 给 C_1 充电, C_3 给 C_2 充电, 超级电容、 L_1 和 C_3 为驱动系统负载提供能量。

驱动系统高压侧电压 U_{DC} 与超级电容电压 U_{SC} 的关系为

$$U_{DC} = \frac{2}{1 - m_{boost}} U_{SC} \tag{2}$$

电容 C_1 、 C_2 、 C_3 的电压 U_{C1} 、 U_{C2} 、 U_{C3} 和 T_1 、 T_2 的电压 U_{T1} 、 U_{T2} 分别为

$$\begin{cases} U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = \frac{1}{1 - m_{boost}} U_{SC} \\ U_{T1} = U_{T2} = \frac{U_{DC}}{2} \end{cases} \tag{3}$$

电路的纹波电流为

$$\begin{cases} \Delta i_{L1} = \Delta i_{L2} = \frac{m_{boost}(1 - m_{boost})f_s U_{DC}}{L_1 + L_2} \\ \Delta i_{SC} = \frac{(2m_{boost} - 1)(1 - m_{boost})f_s U_{DC}}{L_1 + L_2} \end{cases} \tag{4}$$

式中 f_s 为 IGBT 的开关频率。

2.2 降压充电过程

在降压充电模式下,DC/DC 变换器等效电路如图 4 所示。当能量从高压侧地面充电桩流向低压侧超级电容时,通过 T_3 、 T_4 、 T_5 和 D_1 、 D_2 组成降压电路,对超级电容充电,其中 T_3 、 T_4 、 T_5 的占空比 M_3 、 M_4 和 M_5 为

$$\begin{cases} M_3 = M_4 = m_{buck} \\ M_5 = 1 - m_{buck} \end{cases} \tag{5}$$

式中 m_{buck} 为 IGBT 在降压时的占空比。

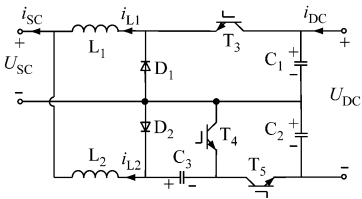


图 4 降压充电模式下变换器等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit of converter under buck charging mode

降压充电模式下 IGBT 开关状态见表 1。

表 1 降压充电模式下 IGBT 开关状态

Table 1 IGBT switch status under buck charging mode

时间段	开关状态		
	T_3	T_4	T_5
$t_0 \sim t_1$	1	0	1
$t_1 \sim t_2$	1	1	0
$t_2 \sim t_3$	0	1	0
$t_3 \sim t_4$	1	1	0

在 $t_0 \sim t_1$ 时间段内, T_3 、 T_5 开通, T_4 关闭;地面充电桩、 L_2 、 C_1 为超级电容充电提供能量,地面充电桩、 C_1 为 L_1 提供能量,地面充电桩、 C_2 为 C_3 提供能量。在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内, T_3 、 T_4 开通, T_5 关闭;地面充电桩、 C_1 、 C_3 为超级电容充电提供能量,地面充电桩、 C_1 为 L_1 提供能量,地面充电桩为 C_2 提供能量, C_3 为 L_2 提供能量。在 $t_2 \sim t_3$ 时间段内, T_4 开通, T_3 、 T_5 关闭; L_1 、 L_2 、 C_3 为超级电容充电提供能量,地面充电桩为 C_1 和 C_2 提供能量。

超级电容电压 U_{SC} 与地面充电桩高压侧电压 U_{DC} 的关系为

$$U_{SC} = \frac{m_{buck}}{2} U_{DC} \tag{6}$$

电容 C_1 、 C_2 、 C_3 的电压 U_{C1} 、 U_{C2} 、 U_{C3} 和 T_3 、 T_4 、 T_5 的电压 U_{T3} 、 U_{T4} 、 U_{T5} 分别为

$$\begin{cases} U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{DC}/2 \\ U_{T3} = U_{T4} = U_{T5} = U_{DC}/2 \end{cases} \tag{7}$$

电路的纹波电流为

$$\begin{cases} \Delta i_{L1} = \Delta i_{L2} = \frac{m_{buck}(1 - m_{buck})f_s U_{DC}}{L_1 + L_2} \\ \Delta i_{SC} = \frac{(2m_{buck} - 1)(1 - m_{buck})f_s U_{DC}}{L_1 + L_2} \end{cases} \tag{8}$$

3 并联交错 DC/DC 变换器控制策略

3.1 boost 模式下控制器设计

因超级电容的自身特性,端电压会随电池容量的下降而下降,为了使驱动系统能够得到稳定的输入电压,需要不断调节 DC/DC 变换器占空比。本文采用 PWM 电压电流双闭环控制,电压环是外环,电流环是内环。为实现 DC/DC 变换器两支路的均流,对 2 路电感分别独立控制,通过移相技术(控制信号间隔半个周期)来减小输出电流纹波。boost 模式下变换器 PI 控制框图如图 5 所示。其中, U_{ref} 为外部给定电压, I_{L1ref} 、 I_{L2ref} 为电路反馈电流, PI 为比例积分调节器, $G_{id}(s)$ 为占空比扰动对电感电流的影响, $G_{ui}(s)$ 为电感电流扰动对超级电容电压的影响, K_1 为电流比例系数, K_v 为电压比例系数。

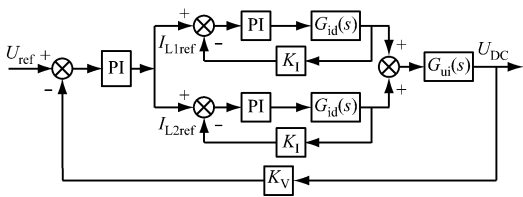


图 5 Boost 模式下变换器控制框图
Fig. 5 Control block diagram of converter under boost mode
占空比扰动对电感电流扰动的传递函数为

$$G_{id}(s) = \frac{U_{DC} C_{SC} s}{L_1 C_{SC} s^2 + R_{es} C_{SC} s + 1} \tag{9}$$

式中： C_{SC} 为超级电容组容量； R_{es} 为超级电容组等效电阻。

电感电流扰动对超级电容电压扰动的传递函数为

$$G_{ui}(s) = \frac{1 + R_{es} C_{SC} s}{C_{SC} s} \tag{10}$$

3.2 buck 模式下控制器设计

当前超级电容充电方法主要包括恒定电压充电法、恒定电流充电法和恒定功率充电法。恒定功率充电法控制复杂,不适用于工作在恶劣环境中的矿用机车。本文采用恒流限压法对超级电容充电:以恒定大电流对超级电容充电,以缩短充电时间;在超级电容快要达到额定电压时,切换成恒压充电,以避免充电结束时大电流对超级电容的损害^[13]。

在切换瞬间,充电电压会发生变化,导致充电电流瞬间增大,对超级电容和 DC/DC 变换器造成冲击。为避免这种情况,设计了一种新的控制及切换方案,如图 6 所示。其中,SOC 表示超级电容荷电状态, I_{SCref} 、 U_{SCref} 为外部给定电流和电压, i_{2e} 、 u_{2e} 为降压充电模式下电流环产生的误差电流和电压环产生的误差电压。

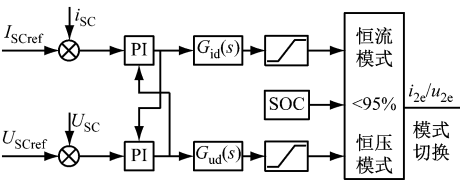


图 6 buck 模式下变换器控制及切换框图
Fig. 6 Control and switching block diagram of converter under buck mode

在切换瞬间,将恒流模式下 PI 输出值作为恒压模式下 PI 的积分初始值,将恒压模式下 PI 的输出值作为恒流模式下 PI 的积分初始值,这样恒压模式中给出的控制信号能够无缝对接上一时间段的恒流控制模式的输出量,而后按照切换后的恒压控制模式控制电路^[14]。

3.3 PWM 信号的产生

通过调制法产生 PWM 信号,以控制 IGBT 的开通和关断。PWM 信号产生逻辑如图 7 所示。其中 i_{1e} 为升压驱动模式下电压/电流双闭环产生的误差电流。

以频率为 f_s 的三角波为载波,误差电流 i_{1e} 、 i_{2e} 和误差电压 u_{2e} 为信号波,经调制电路调节得到 PWM₁—PWM₅,分别用于控制 T₁—T₅ 的通断。PWM₁ 和 PWM₂ 相位相差半个周期, PWM₃ 和

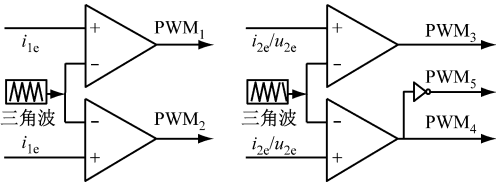


图 7 PWM 信号产生逻辑
Fig. 7 PWM signal generation logic

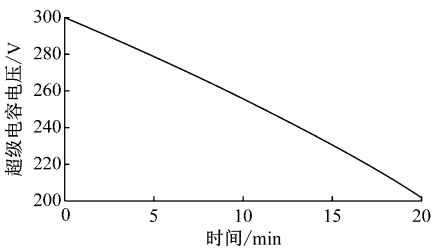
PWM₄ 相位也相差半个周期,而 PWM₅ 相位和 PWM₄ 正好完全相反。

4 实验结果与分析

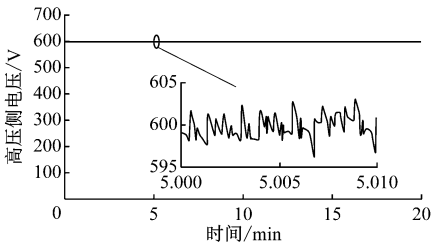
采用文献[15]中的升压驱动和降压充电控制系统实验模型进行实验。根据实际需求,为了减少实验时间,适当降低超级电容容量,取为 100 F,端电压取 300 V,最小工作电压是端电压的 50%(150 V)。设置电感 L_1 、 L_2 为 0.45 mH,电容 C_1 、 C_2 、 C_3 为 0.75 mF,开关频率 f_s 为 20 kHz,驱动系统需要的直流电压为 600 V。

4.1 升压驱动模式

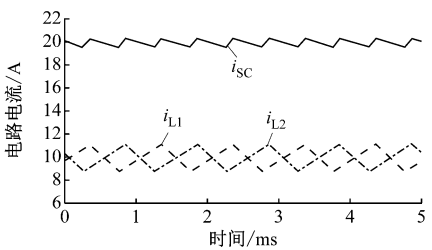
在升压驱动模式下,超级电容通过 DC/DC 变换器为驱动系统提供稳定的直流电压,实验波形如图 8 所示。



(a) 超级电容电压



(b) 高压侧电压



(c) 电路电流

图 8 升压驱动模式下实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms under boost drive mode

图 8(a)中,随着驱动时间增大,超级电容消耗能量,端电压下降。图 8 (b)中,经过 DC/DC 变换器升压得到的高压侧直流电压始终稳定在 600 V,其波动在 0.83%以内,并不会随着超级电容端电压的降低而发生变化。图 8 (c)中,支路电流 i_{L1} 、 i_{L2} 相位相差半个开关周期,超级电容电流 i_{SC} 等于 i_{L1} 、 i_{L2} 之和,其电流波动幅度为支路电流波动幅度的一半。

4.2 降压充电模式

在降压充电模式下,地面充电桩通过 DC/DC 变换器为超级电容提供能量,形成的波形如图 9 所示。

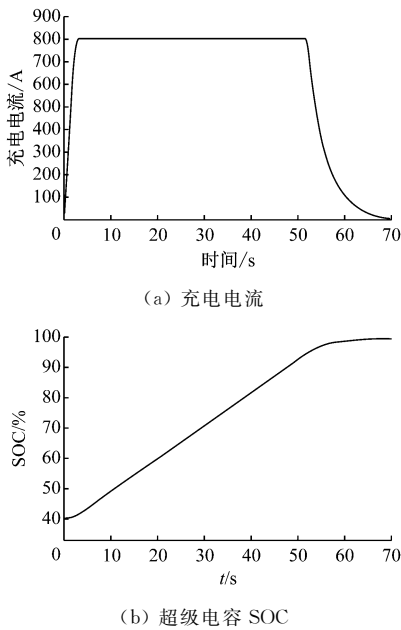


图 9 降压充电模式下实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms under buck charging mode

从图 9 可以看出,当地面充电桩向超级电容充电时,充电电流快速增大,此时超级电容 SOC 小幅上涨;当达到设定的大电流时,进行恒定大电流充电,SOC 不断增大;当 SOC 达到 95%时,充电模式由恒流限压模式转换为恒压模式,此时电流没有出现尖峰,而是快速平稳下降,实现了 2 种充电模式的无缝切换,此时 SOC 增加速度减缓;当 SOC 达到 100%时,停止充电。

超级电容 SOC 从 40%到 100%只需要 70 s 左右时间,充电时间远远小于其他储能装置,体现了超级电容在充电速度方面的优越性。

5 结语

介绍了一种适用于矿用电机车的并联交错 DC/DC 变换器拓扑结构,该变换器能够有效解决高压侧电压随超级电容容量下降而达不到驱动系统所

需电压的问题,并能够减小电流纹波和充电时间。双向 DC/DC 变换器是超级电容在工业生产中应用时不可或缺的重要部分,其针对超级电容的拓扑结构应能够继续扩大调压范围,提高超级电容的利用效率;控制策略应尽可能减小电压、电流对开关器件的冲击,降低电路中的能量损耗和器件损耗,从而推动超级电容快速发展。

参考文献(References):

[1] 张全柱,邓永红,黄成玉. 矿用电机车铅酸蓄电池智能充电器的研究[J]. 工矿自动化,2009,35(10):8-11.
ZHANG Quanzhu, DENG Yonghong, HUANG Chengyu. Research of intelligent charger for lead-acid battery of mine-used electric locomotive[J]. Industry and Mine Automation,2009,35(10):8-11.

[2] 王栋梁,温灿国. 锂离子蓄电池在矿用电机车上的应用[J]. 矿山机械,2011,39(4):40-43.
WANG Dongliang, WEN Canguo. Application of lithiumion batteries to mining electric locomotives[J]. Mining & Processing Equipment,2011,39(4):40-43.

[3] 杨金鑫,祝龙记. 矿用电机车车载充电系统研究[J]. 工矿自动化,2019,45(1):104-108.
YANG Jinxin, ZHU Longji. Research on on-board charging system of mine-used electric locomotive[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45 (1): 104-108.

[4] FRIESKE B, KLOETZKE M, MAUSER F. Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles [J]. World Electric Vehicle Journal,2013, 6(1):9-20.

[5] 宋永华,田岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状 & 发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology,2011,35(4):1-7.

[6] 曹秉刚,曹建波,李军伟,等. 超级电容在电动车中的应用研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(11):1317-1322.
CAO Binggang, CAO Jianbo, LI Junwei, et al. Ultracapacitor with applications to electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11):1317-1322.

[7] CORNEA O, ANDREESCU G D, MUNTEAN N, et al. Bidirectional power flow control in a DC microgrid through a switched-capacitor cell hybrid

- DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4):3012-3022.
- [8] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12):39-46.
- LU Zhiguo, ZHU Wanping, LIU Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12):39-46.
- [9] WANG Yifeng, XUE Likun, WANG Chengshan, et al. Interleaved high-conversion-ratio bidirectional DC/DC converter for distributed energy-storage systems-circuit generation, analysis and design [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(8): 5547-5552.
- [10] WANG P, ZHAO C, ZHANG Y, et al. A bidirectional three-level DC-DC converter with a wide voltage conversion range for hybrid energy source electric vehicles [J]. Journal of power electronics, 2017, 17(2): 334-345.
- [11] YANG M K, LEE S J, CHOI W Y. High efficiency non-isolated dynamic voltage restorer using soft switching DC-DC converter for parallel-voltage compensation [C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015.
- [12] 周美兰, 田小晨. 用于电动汽车的交错并联软开关双向 DC/DC 变换器 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4):83-89.
- ZHOU Meilan, TIAN Xiaochen. An interleaved soft-switching bidirectional DC/DC converter in electric vehicles [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(4):83-89.
- [13] 马奎安. 超级电容器储能系统中双向 DC/DC 变流器设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [14] 田炜, 常鹏飞, 潘文霞. 有轨电车超级电容的充电方式转换技术研究 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 102-106.
- TIAN Wei, CHANG Pengfei, PAN Wenxia. Research on the power supply system for the super capacitor tramcar [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):102-106.
- [15] 冯兴田, 张磊, 高春侠. 带超级电容储能的双向 DC/DC 变换器实验平台 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8):145-150.
- FENG Xingtian, ZHANG Lei, GAO Chunxia. Experimental platform of bidirectional DC/DC converter with super-capacitor energy storage [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 145-150.