

用于超级电容储能系统的三电平双向直流变换器及其控制

胡斌¹ 杨中平¹ 黄先进¹ 史京金² 赵炜²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京, 100044

2. 北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 北京, 102208)

摘要: 传统两电平 DC-DC 变换器开关器件承受电压应力高, 输出电流纹波大。本文采用一种三电平双向直流变换器控制超级电容的能量流动, 有效提高了超级电容充放电效率和输入电压等级。分析了三电平双向直流变换器的工作原理及其控制策略, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型, 验证了三电平双向直流变换器拓扑的优点, 并实现了对直流网压、飞跨电容电压以及超级电容充放电电流的控制; 样机实验表明了该变换器及其控制的合理性和有效性。

关键词: 三电平, 双向直流变换器, 飞跨电容, 超级电容, 控制策略。

Three-level bi-directional DC-DC converter and its control strategy

Used for Super-Capacitor Energy Storage System

Hu Bin¹, Yang Zhongping¹, Huang Xianjin¹, Shi Jingjin², Zhao Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Beijing Subway Technology R & D Center, Beijing 102208, China)

Abstract: The switching device voltage stress of traditional two-level DC-DC converter is high, and the output current ripple is big. Use a three-level bi-directional DC-DC converter to control Super-Capacitor energy flow, which improves the Super-Capacitor charge/discharge efficiency and input voltage level. Analyzed the three-level bi-directional DC-DC converter working principle and control strategy, a simulation platform was built by Matlab/Simulink, which verify three-level bi-directional DC-DC converter topology advantages, meanwhile realized the control of the DC net voltage, flying capacitor voltage and super capacitor charge/discharge current; finally, the prototype experiment illustrated the rationality and effectiveness of the converter and its control strategy.

Key words: three-level, bi-directional DC-DC converter, flying capacitor, super capacitor, control strategy.

1. 引言

1980 年, A. Nabae 等人提出了三电平逆变器, 有效降低了开关管电压应力, 且输出电压谐波含量小^[1]; 如今, 三电平和多电平逆变器已经广泛应用于交流调速、电能质量管理、新能源等领域。在三电平逆变器理念的基础上, 1992 年, Meynard T A 和

Foch H 提出了几种非隔离的飞跨电容型多电平直流变换器; 同年, Pinheiro J R 和 Barbi I 提出了三电平直流变换器的概念^[1]; 1999 年, 阮新波教授和他的团队开始研究三电平直流变换器及其软开关技术, 经过不懈努力, 取得了大量研究成果^{[1][3][4]}。

与三电平逆变器一样, 三电平双向直流变换器相对于传统两电平直流变换器, 其主要优势在于:

开关管承受的电压应力是两电平直流变换器的 1/2，且可以大大减小输出电感的体积、降低动态响应时间^{[1]-[4]}；正是由于这两个优点，三电平双向直流变换器在高直流电压以及低压大电流等场合应用前景广阔。

超级电容是新型储能器件的代表，并以其充放电速度快、功率密度高、无污染、寿命长等优点成为近年来各国学者的研究热点；而城市轨道交通的主要运行特点为站间距短、车辆启动和制动频繁、能量交互多、交互能量不大但功率等级高；研究表明，超级电容特性能够很好地匹配城市轨道交通的运行特点^{[5][7][8]}，所以，将超级电容储能系统应用于城市轨道交通有较高的研究价值。

目前，国内的城市轨道交通牵引供电制式分 DC750V 和 DC1500V 两种，新建线路考虑减小损耗的因素，通常选择 DC1500V 供电制式，其正常允许波动电压范围为 DC1000V~DC1800V；作为联系直流牵引网和超级电容的中间转换媒介，双向直流变换器的选择至关重要，由于城市轨道交通直流牵引网电压等级高，且输出电流大，所以，采用三电平双向直流变换器与超级电容共同构成超级电容储能系统是最为理想的选择。

本文介绍了一种带飞跨电容的输入输出共地非隔离型三电平双向直流变换器拓扑原理及其应用于超级电容储能系统中时的控制策略，并从仿真和实验两个方面对拓扑原理和控制策略进行了有效验证。

2. 三电平双向直流变换器

2.1 工作原理

如图 1 所示为三电平双向直流变换器拓扑。其中， V_H 为输入侧直流电源，对应于城市轨道交通直流牵引网； C_H 为高端支撑电容， L 为输出电感； $Q_1 \sim Q_4$ 为四支 IGBT 开关管， Q_1 和 Q_2 ， Q_3 和 Q_4 交错工作，驱动信号相差 180° ， Q_1 与 Q_4 ， Q_2 与 Q_3 互补导通； C_{fly} 为飞跨电容，工作电压 $U_{C_{fly}}=U_H/2$ 。

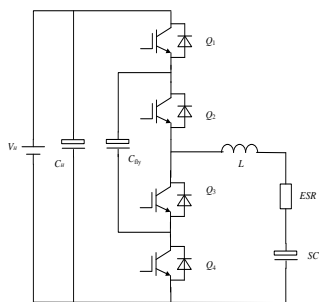


图 1 三电平双向直流变换器拓扑

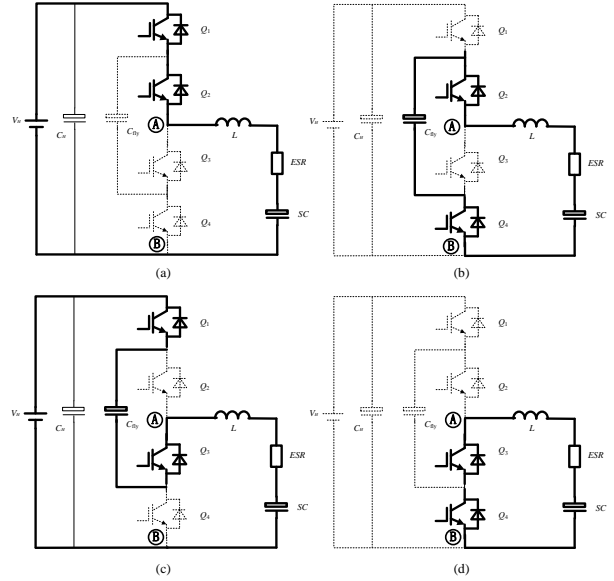


图 2 三电平双向直流变换器的工作状态

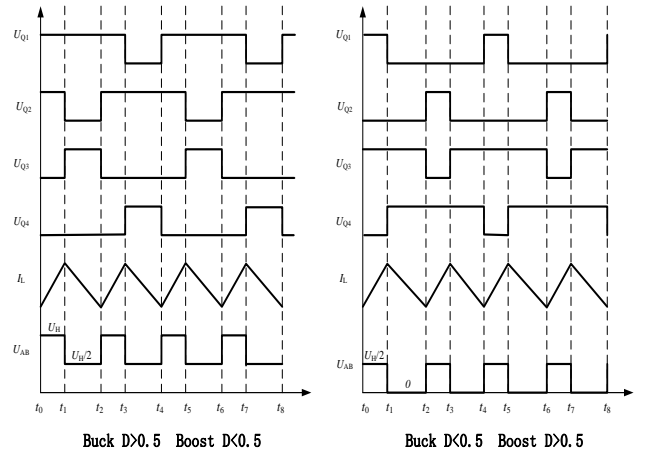


图 3 三电平双向直流变换器的主要工作波形

图 2 和图 3 分别为三电平双向变流器的工作状态和工作波形。变换器工作在 Buck 和 Boost 两种状态时，其区别仅为电感电流方向相反，以下以 Buck 工况为例，说明三电平双向直流变换器的工作原理：

Buck $D > 0.5$ 时：

- ① $t_0 \sim t_1$ 段，开关管 Q_1 和 Q_2 导通，电感电流增大， $U_{AB}=U_H$ ， C_{fly} 不动作；
- ② $t_1 \sim t_2$ 段，开关管 Q_1 和 Q_3 导通，电感电流减小， $U_{AB}=U_H/2$ ， C_{fly} 充电；
- ③ $t_3 \sim t_4$ 段，开关管 Q_2 和 Q_4 导通，电感电流减小， $U_{AB}=U_H/2$ ， C_{fly} 放电；

Buck $D < 0.5$ 时：

- ④ $t_0 \sim t_1$ 段，开关管 Q_1 和 Q_3 导通，电感电流增大， $U_{AB}=U_H/2$ ， C_{fly} 充电；
- ⑤ $t_1 \sim t_2$ 段，开关管 Q_3 和 Q_4 导通，电感电流减小， $U_{AB}=0$ ， C_{fly} 不动作；

⑥ t_2-t_3 段, 开关管 Q_2 和 Q_4 导通, 电感电流增大, $U_{AB}=U_H/2$, C_{fly} 放电。

再对三电平双向直流变换器的工作波形加以分析, 可得到其外特性关系式:

Buck $D>0.5$ 时:

$$\begin{aligned} U_{SC} &= \frac{1}{T} \int_0^t U_{AB} dt \\ &= \frac{1}{T} \{U_H[(t_1-t_0)+(t_3-t_2)] \\ &\quad + \frac{U_H}{2}[(t_2-t_1)+(t_4-t_3)]\} \\ &= \frac{1}{T} [U_H(T_{on}-T_{off}) + \frac{U_H}{2} \cdot 2T_{off}] \\ &= \frac{T_{on}}{T} U_H = D \cdot U_H \end{aligned} \quad (1)$$

Buck $D<0.5$ 时:

$$\begin{aligned} U_{SC} &= \frac{1}{T} \int_0^t U_{AB} dt = \frac{1}{T} \{ \frac{U_H}{2} [(t_1-t_0)+(t_3-t_2)] \} \\ &= \frac{1}{T} \frac{U_H}{2} \cdot 2T_{on} = \frac{T_{on}}{T} U_H = D \cdot U_H \end{aligned} \quad (2)$$

在式(1)、式(2)中 U_{SC} 为超级电容端电压, T 为 IGBT 开关周期, T_{on} 、 T_{off} 分别为一个周期中的开通和关断时间; 从两式可以看出, 三电平双向直流变换器的外特性与两电平双向直流变换器相同, 但输出等效开关频率是两电平双向直流变换器的 2 倍, 所以在输出电流纹波不变的情况下, 能有效减小电感体积; 且与两电平双向直流变换器不同的是, 输出的超级电容端电压由 0、 $U_H/2$ 和 U_H 三种电平拟合而成, 从而输出电压的交流分量比两电平小很多, 提高了变换器的动态性能及效率。

2.2 控制策略

用于城市轨道交通牵引供电系统的超级电容储能系统, 主要目的是维持直流网压恒定, 防止网压过大波动; 同时吸收剩余再生制动能量, 减少再生失效的发生。因此传统两双向直流变换器采用电压电流双闭环控制策略: 外环为输入电压环, 内环为超级电容电流环, 根据输入电压误差的大小确定充放电电流的大小和方向。其控制框图如下:

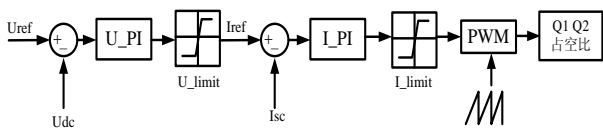


图 4 两电平双向直流变换器控制框图

对与三电平双向直流变换器而言, 除了电压电流的双闭环控制需保留外, 还需引入飞跨电容电压控制, 使得其工作电压 $U_{Cfly}=U_H/2$, 进而保证变换器在工作过程中各器件承受的电压应力始终为直流牵引网电压的 1/2。

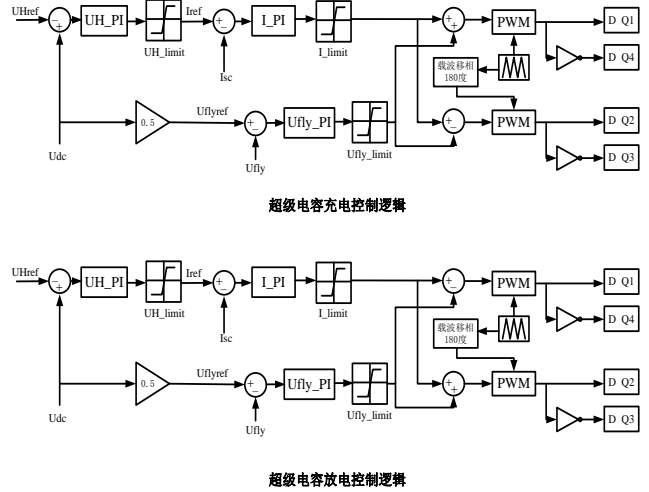


图 5 三电平双向直流变换器控制框图

图 5 所示为三电平双向直流变换器控制框图, 通过 2.1 的分析可知:

在超级电容充电过程中, 开关管 Q_1 导通时飞跨电容充电, 开关管 Q_2 导通时飞跨电容放电。所以, 当 $U_{Cfly}<U_H/2$ 时, 应在控制中使 Q_1 占空比增大、 Q_2 占空比减小来提升飞跨电容电压; 而 $U_{Cfly}>U_H/2$ 时, 应在控制中使 Q_2 占空比增大、 Q_1 占空比减小来降低飞跨电容电压。

同样地, 在超级电容放电过程中, 开关管 Q_1 导通时飞跨电容放电, 开关管 Q_2 导通时飞跨电容充电。所以, 当 $U_{Cfly}<U_H/2$ 时, 应在控制中使 Q_2 占空比增大、 Q_1 占空比减小来提升飞跨电容电压; 而 $U_{Cfly}>U_H/2$ 时, 应在控制中使 Q_1 占空比增大、 Q_2 占空比减小来降低飞跨电容电压。

3. 仿真实验

根据 2.1 和 2.2 中介绍的三电平双向直流变换器工作原理和控制策略, 在 Matlab/Simulink 平台搭建了三电平超级电容储能系统仿真模型, 仿真目的如下:

- ① 通过对比器件电压应力、输出电感电流纹波等, 验证三电平双向直流变换器的优点;
- ② 通过控制直流网压、超级电容充放电电流和飞跨电容电压, 验证三环控制策略的可行性和合理性。

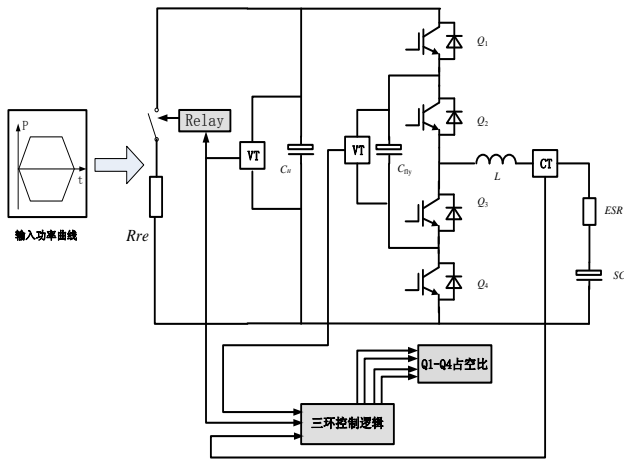


图6 三电平超级电容储能系统仿真模型

图6所示为仿真中采用的三电平超级电容储能系统主电路拓扑：在输入侧采用功率曲线的方式，模拟城市轨道交通车辆的牵引和制动能量； R_{re} 为泄放电阻，当输入功率大于超级电容所能承受的最大功率时用以吸收剩余能量，将直流母线电压保持在给定值，防止其抬升过高； C_T 和 V_T 分别为电流电压传感器，采集直流母线电压、飞跨电容电压以及输出电感电流并通过2.2中的控制逻辑使整个系统正常工作，表1给出了仿真模型中的主要参数：

参数名称	数值	单位
最大输入功率	± 50	kW
充电电压指令	750	V
放电电压指令	850	V
最高母线电压	900	V
支撑电容	1100	uF
飞跨电容	3400	uF
超级电容	31.5	F
输出电感	2	mH
开关频率	5	kHz
最大充放电电流	200	A

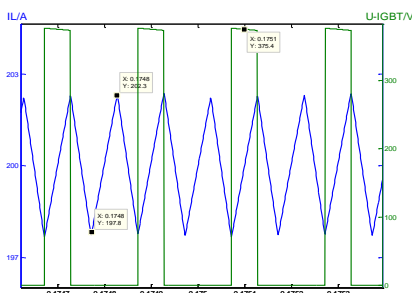


图7 电流纹波和电压应力的仿真验证

首先对三电平双向变换器原理、即输出电感电流纹波和器件承受电压应力的仿真结果进行分析，如图7所示：

① 根据DC-DC变换器电流纹波的计算公式：

$$\Delta I = \frac{U_H D(1-D)}{f_s L} \quad (3)$$

对于传统两电平双向变流器而言，当 $U_H=750V$ 、 $D=0.25$ 时，带入表1参数可得，电流纹波 $\Delta I=14A$ ；而图7中由于等效开关频率的提升，可使变换器的电流纹波明显减小， $\Delta I'=4.5A$ 。

② 在 $U_H=750V$ 的前提下，从图7可见，开关管在关断过程中承受的电压应力为375V，实现了降低器件关断电压应力到输入电压1/2的目标。

在仿真模型中也对三环控制策略的控制效果进行了分析，图8给出了控制系统的工作流程：

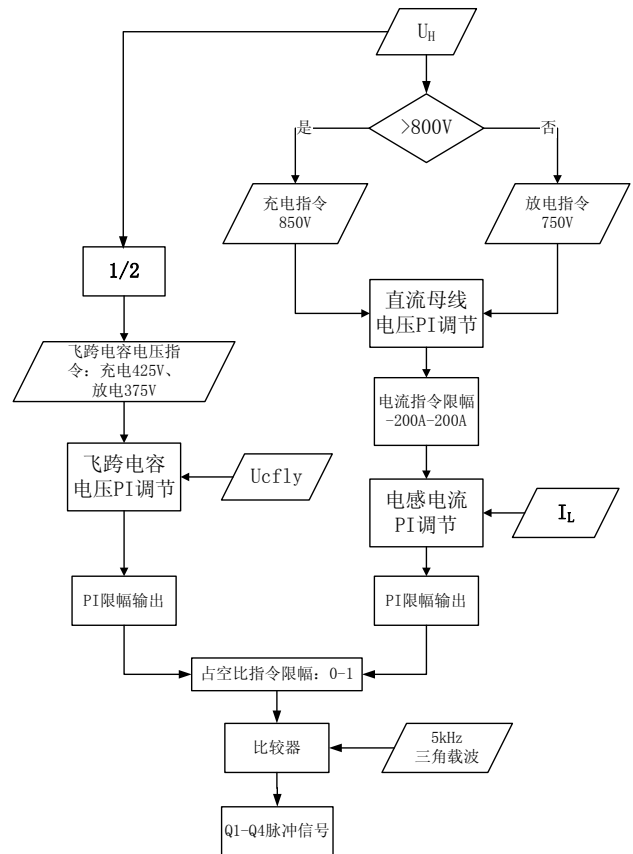


图8 仿真模型控制系统工作流程

依据图8中的控制思想，运行仿真模型可得到各个控制闭环的仿真效果如下所示：

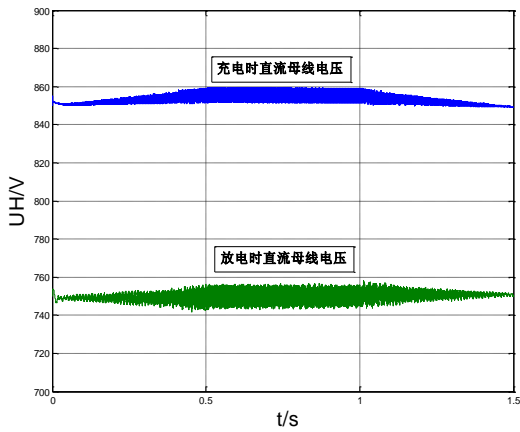


图 9 直流母线电压控制效果

图 9 所示为直流母线电压的闭环控制效果：当网压过高时，超级电容开始充电，直流母线电压被抑制在 850V 不再上升；而当网压过低时，超级电容开始放电，直流母线电压被钳位在 750V 不再下降；充放电过程中直流母线电压很好地跟随电压指令。

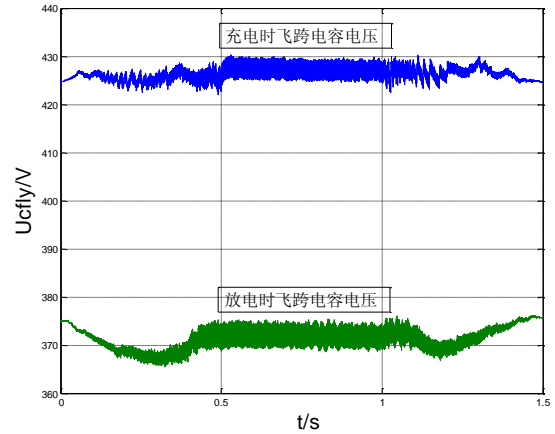


图 11 飞跨电容电压控制效果

图 11 所示为飞跨电容电压闭环控制效果，在控制中实时采集直流母线电压，取 1/2 后送给飞跨电容电压环，作为飞跨电容电压指令，从而使得充电时 $U_{cfly}=1/2U_H=425V$ ，放电时 $U_{cfly}=1/2U_H=375V$ 。

4. 样机实验

为了进一步验证三电平双向直流变换器的工作原理和控制策略，开发了三电平超级电容储能系统样机，并完成了 5kW 功率等级下的直流母线电压控制型超级电容充放电实验，图 12 为三电平双向直流变换器外观图：

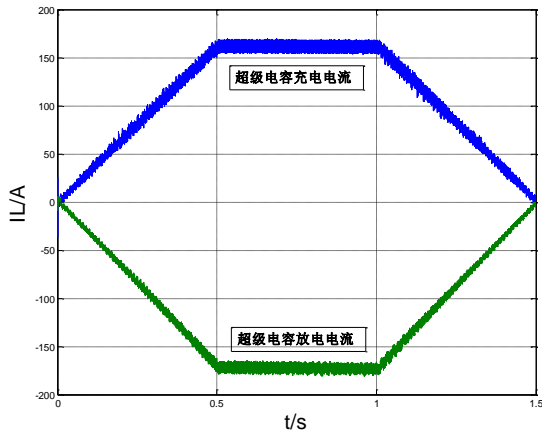


图 10 超级电容充放电电流控制效果

图 10 所示为超级电容充放电电流的控制效果，由于仿真时间较短（1.5s），所以整个仿真过程中超级电容的电压基本维持不变，令 $U_{sc}=300V$ ，在仿真中 $I_{LMAX}=\pm 167A$ ，且由表 1 可知， $P_{MAX}=\pm 50kW$ ；对比可知：在输入功率曲线不超过超级电容能够吸收的最大功率的前提下，三电平双向变换器的两端可达到良好的功率平衡。



图 12 三电平双向变流器外观图

利用三相调压器和二极管不控整流桥构成可调直流电压源，用以模拟地铁直流牵引网的网压波动，整个系统的组成如图 13 所示：

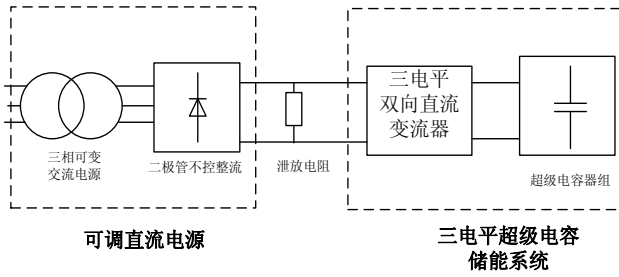


图 13 系统组成示意图

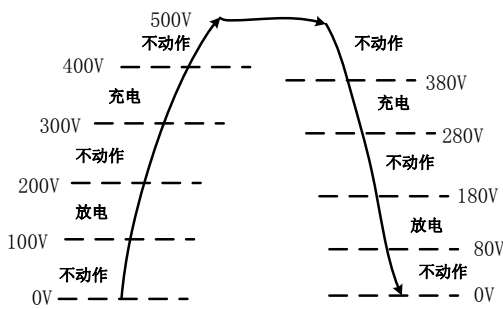


图 14 带滞环逻辑的电压控制原理

图 14 所示为通过母线电压判断并控制超级电容充放电的原理示意图。可见，当 $100V < U_H < 200V$ 时，超级电容放电；当 $300V < U_H < 400V$ 时，超级电容充电；其他情况超级电容不动作。为了保证在阈值电压处超级电容状态的可靠切换，在控制中加入了 20V 的滞环冗余。

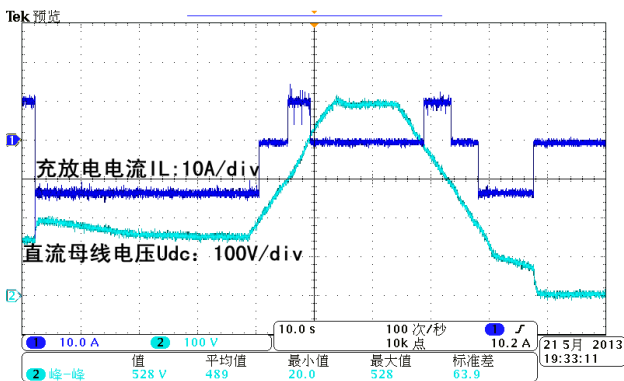


图 15 三电平超级电容储能系统实验结果

从图 15 中的实验结果可以看出，随着直流母线电压的变化，超级电容在充电、放电和备用三种状态间自由切换，且充放电电流恒定；从而证明了三电平超级电容储能系统主电路及控制系统工作稳定、可靠。

5. 结论

从理论分析、仿真验证和样机实验三个方面说明了应用于超级电容储能系统的三电平双向直流变换器及其控制的合理性和有效性。

① 采用三电平双向直流变换器可使各个开关管承受的电压应力变为传统两电平双向直流变换器的 1/2，更适合高输入电压的应用场合；

② 三电平双向直流变换器等效开关频率高，相对于传统两电平双向直流变换器可有效降低电流纹波，提高了变换器效率，对于高输出电流的应用场合优势明显；

③ 应用于城市轨道交通的三电平超级电容储能系统采用直流母线电压、超级电容电流、飞跨电容电压三环控制策略，以达到抑制直流母线波动、控制超级电容充放电功率、保证飞跨电容电压为输入电压 1/2 的目的。

参考文献

- [1] 阮新波. 三电平直流变换器及其软开关技术. 北京, 科学出版社, 2006 年 12 月。
- [2] 张杰. 直流变换器储能系统在载运工具中的应用. 北京交通大学硕士学位论文, 2011 年 6 月。
- [3] 杨孟雄. 基于燃料电池供电系统的三电平双向变换器研究. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2008 年 3 月。
- [4] 金科, 杨孟雄, 阮新波. 三电平双向变换器. 中国电机工程学报, 2006, 26 (18): 41-46。
- [5] 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. 电气传动, 2009, 39 (3): 77-80。
- [6] 马奎安, 陈敏. 超级电容储能系统纯充电模式控制设计. 机电工程, 2010, 27 (7): 85-88。
- [7] Huang Xianjin, Zhang Jie, Zhang Liwei, Zheng T.Q, Igarashi S. Energy Saving System Based on Bidirectional Three-Level DC-DC Converter with Super Capacitor Used in Vehicle. ICIEA (IEEE). July 2012, Singapore, 2049-2053.
- [8] Petar J. Grbovic, Philippe Le Moigne. A Bidirectional Three-Level DC-DC Converter for the Ultracapacitor Applications. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010, 57(10): 3415-3429.