



基于双向 DC-DC 变换器的电力电子创新实验平台设计

易磊, 张蓉, 邓春花, 尹仕

(华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 传统电力电子实验以知识导向进行教学, 主要以验证性实验为主, 缺少具有工程背景的项目训练, 为此设计双向 DC-DC 变换器, 硬件上采用模块化电路和开放式接口, 控制上采用数字处理技术, 有助于培养学生应用、设计和创新能力。首先构建基于双向 DC-DC 变换器的电力电子创新实验平台; 其次完成双向 DC-DC 变换器硬件设计, 搭建变换器控制系统; 然后介绍变换器拓扑和控制策略, 详细给出硬件电路和参数设计, 之后对控制系统进行软件设计; 最后完成软硬件实验平台测试与分析。实验结果表明, 所搭建的实验平台可以实现升压放电运行和降压充电控制, 能满足创新性实验教学要求。

关键词: 双向 DC-DC 变换器; 模块化; 数字处理; 创新性实验

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220064

Design of Power Electronics Innovation Experiment Platform Based on Bidirectional DC-DC Converter

YI Lei, ZHANG Rong, DENG Chunhua, YIN Shi

(School of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Traditional power electronics experiments are knowledge-oriented for teaching, mainly based on confirmatory experiments, and lack of project training with engineering background. For this reason, the modular circuits and open interfaces in hardware, and digital processing technology in control were used in the bidirectional DC-DC converter designed in this paper. Students' application, design and innovation abilities can be cultivated by the bidirectional DC-DC converter. Firstly, the power electronics innovation experimental platform based on bidirectional DC-DC converter was built. Secondly, the hardware design of the bidirectional DC-DC converter was completed, and the converter control system was built. Then the converter topology and control strategy were introduced, the hardware circuit and parameter design were described in detail, and the software design was carried out. Finally, the test and analysis of the software and hardware experimental platform were completed. The experimental results show that the experimental platform built can realize boost discharge operation and buck charge control, which can meet the requirements of innovative experimental teaching.

Key words: bidirectional DC-DC converter; modularization; digital processing; innovative experiment

电力电子技术是电气工程及其自动化专业的专业核心课之一, 电力电子技术跨“电力”“电子”和“控制”3个领域, 是电气工程其他课程的综合应用。传统电力电子实验以知识导向进行教学, 强调器件、拓扑结构和控制技术等知识的记忆与理解, 主要以验证性实验为主, 缺少具有工程背景的项目训练, 设计、应用和创新性实验内容较少^[1]。近年来, 由于工程教育专业认证和新工

科对人才培养提出高要求, 为此传统电力电子实验平台急需升级改造。在新型电力电子实验平台建设方面, 文献 [2] 分析和比较国内外电力电子实验室建设, 介绍明尼苏达大学基于 Building Block 的模块化实验教学平台。该平台便于学生进行理论知识验证和自行设计电路, 但实验项目缺少工程应用背景, 学生难以进行工程实践和创新。文献 [3] 提出将电能变换器通用实验平台用于电力电

收稿日期: 2023-01-24; 修回日期: 2023-04-30

基金项目: 教育部 2020 年第二批新工科研究与实践项目 (E-NYDQHGC202219)。

作者简介: 易磊 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子学、自动控制原理、电机学教学与科研工作。

E-mail: yilei_hust@hust.edu.cn

子课程设计, 但所采用的控制技术先进性不足。

针对以上存在的问题, 本文设计基于双向 DC-DC 变换器的电力电子创新实验平台, 既满足实验教学, 也可开展科研与创新实践, 是开设创新与综合性实验的良好平台。双向 DC-DC 变换器相比于传统 buck 和 boost 电路, 能够实现能量的双向流动, 被广泛用于太阳能、风力发电和混动汽车等储能系统中^[4]。文献 [5-7] 对大功率双向 DC-DC 变换器进行设计与实验测试, 但是采用模拟控制芯片进行 buck 和 boost 控制, 控制器接口封闭, 难以进行扩展和开展创新性实验。文献 [8] 提出电动汽车复合储能系统用双向 DC-DC 变换器, 对双向 DC-DC 变换器进行详细分析与设计, 但是缺少模块化电路设计, 不利于电路扩展与开展创新实验。

本文设计的双向半桥 DC-DC 变换器, 硬件上采用模块化电路和开放式接口, 控制上采用数字处理技术, 体积小, 便于携带, 有助于培养学生应用、设计和创新能力, 可开展光伏电池最大功率点跟踪和蓄电池储能控制等创新实验。

1 双向 DC-DC 变换器和控制系统

1.1 变换器实物及拓扑

双向半桥 DC-DC 变换器实验平台如图 1 所示, 包括主电路板和控制板。其中主电路板由双向半桥 DC-DC 模块、电压电流采样模块、驱动及辅助电源模块构成。控制板由 STM32F103 核心板、按键和液晶显示屏构成。

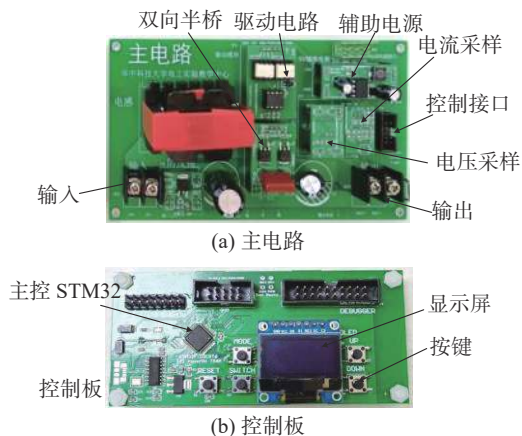


图 1 双向半桥 DC-DC 变换器实验平台

双向半桥 DC-DC 变换器可实现能量双向流动, 主电路两个开关管均为并联体二极管的 MOS 管, 通过控制不同开关管导通方式实现 buck 和

boost 工作模式。双向半桥 DC-DC 变换器拓扑如图 2 所示。

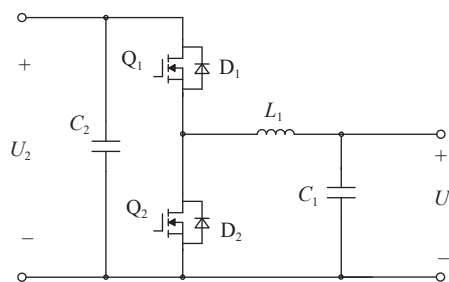


图 2 双向半桥 DC-DC 变换器拓扑图

图 2 中两种模式下变换器工作原理如下。

1) 当变换器工作在 boost 模式下, U_1 作为直流输入, U_2 作为直流输出, Q_1 替代传统二极管工作, Q_1 和 Q_2 互补导通。 Q_2 导通时, U_1 给电感 L_1 充电, 电容 C_2 给 U_2 放电。 Q_1 导通时, U_1 和电感 L_1 同时给 C_2 和 U_2 充电。电压 U_1 小于 U_2 , 能量从 U_1 流向 U_2 , 对应实际应用中蓄电池给外部电路升压放电工况。

2) 当变换器工作在 buck 模式下, U_2 作为直流输入, U_1 作为直流输出, Q_2 替代传统二极管工作, Q_1 和 Q_2 互补导通。同理, 通过控制 Q_1 和 Q_2 , 保证电压 U_2 大于 U_1 , 能量从 U_2 流向 U_1 , 对应外部电路给蓄电池充电工况。

1.2 变换器控制系统

为实现变换器升压时恒压和降压时恒流工作模式, 利用电压和电流采样模块采集电压和电流, STM32 控制器将采集到的反馈信号与给定进行闭环 PI 运算后, 利用定时器输出两路互补的 PWM (脉冲宽度调制), 通过驱动电路对控制信号放大后驱动两个开关管。控制系统结构图如图 3 所示。

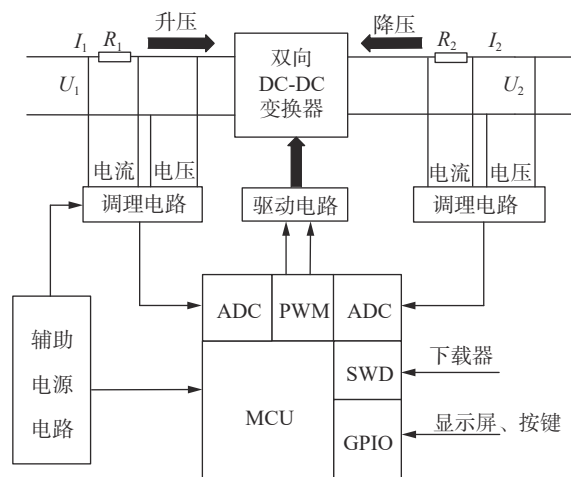


图 3 双向半桥 DC-DC 变换器控制系统结构图

图 3 中, 采用微处理器实现升压时恒压和降压时恒流数字控制, 电压和电流反馈信号通过采样电路得到, 辅助电源提供 5 V 和 15 V 电压给相应芯片工作, 按键作为外部给定信号输入, 液晶显示屏显示电压电流信号。

2 双向半桥 DC-DC 变换器控制策略

变换器控制策略分为两部分: boost 采用恒压控制, buck 采用恒流控制。其中由蓄电池 U_1 经过 boost 电路后给外部负载 U_2 恒压放电, boost 电压闭环控制如图 4 所示。将给定电压 U_{2-ref} 与反馈电压 U_2 作差后经过电压 PI(比例积分)运算得到比较值, 将比较值与三角载波进行比较后产生互补的脉宽调制 PWM 信号, 最后经过驱动电路放大后控制主电路开关管占空比。

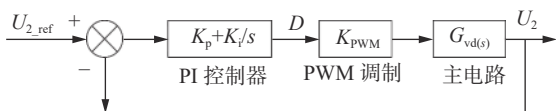


图 4 Boost 电压闭环控制策略图

图 4 中, PI 控制器采用数字算法实现, 调节系统输出精度和动态响应。根据小信号交流模型^[9], 得到 PWM 调制器模型:

$$K_{PWM} = \frac{1}{V_M} \quad (1)$$

式中: V_M 为三角载波幅值。

根据平均开关模型^[9], 确定双向 DC-DC 变换器 boost 模式下控制与输出电压的传递函数:

$$G_{vd1(s)} = \frac{U_1 \left[1 - \frac{sL}{(1-D)^2 R} \right]}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-D)^2} \quad (2)$$

式中: U_1 为 boost 输入电压, 单位 V; L 为电感, 单位 μH ; C 为 boost 输出电容 C_2 , 单位 μF ; R 为负载电阻, 单位 Ω ; D 为占空比。

Boost 开环传递函数为:

$$K_{pwm} G_{vd1(s)} = \frac{1}{V_M} \frac{U_1 \left(1 - \frac{sL}{(1-D)^2 R} \right)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-D)^2} \quad (3)$$

根据 boost 开环传递函数下的幅频和相频曲线, 选取穿越频率为开关频率的 1/10, 并保证足够的相位裕度和增益裕度, 从而确定 PI 参数。

Buck 模式采用电流闭环控制, 由直流电源 U_2 经过 buck 电路后给蓄电池 U_1 恒流充电, 控制策略如图 5 所示。将给定电流 I_{1-ref} 与反馈电流 I_1 作差后经过电流 PI 控制器, 最后产生 PWM 信号, 经驱动电路放大后控制主电路开关管。在 buck 模式下当检测到蓄电池电压超过阈值时即停机保护。

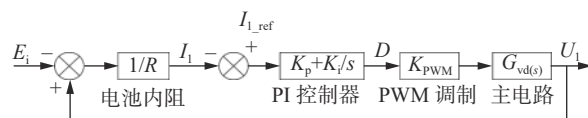


图 5 Buck 电流闭环控制策略图

图 5 中, 根据平均开关模型, 确定 buck 模式下控制与输出电压的传递函数:

$$G_{vd2(s)} = \frac{U_2}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (4)$$

式中: U_2 为 buck 输入电压, 单位 V; L 为电感, 单位 μH ; C 为 buck 输出电容 C_1 , 单位 μF ; R 为负载电阻, 单位 Ω ; D 为占空比。PI 参数计算原理与 boost 方式相同, 故不再赘述。

3 双向 DC-DC 变换器硬件设计

3.1 变换器电感电容设计

双向 DC-DC 变换器指标要求如表 1 所示。

表 1 双向 DC-DC 变换器指标要求

符号	含义	数值	单位
U_{ins}	Boost输入电压	10~18	V
U_{os}	Boost输出电压	24	V
I_{os}	Boost额定输出电流	1	A
I_{osmin}	Boost最小输出电流	0.2	A
f	开关频率	20	kHz
U_{inj}	Buck输入电压	20~28	V
U_{oj}	Buck输出电压	12	V
I_{oj}	Buck额定输出电流	2	A
I_{ojmin}	Buck最小输出电流	0.5	A

当变换器工作在电感电流连续的模式下, 可以计算得到升压和降压工作时电感和电容参数^[10]。

1) 升压模式电感 L_1

电感电流连续时, 临界负载电流为:

$$I_{OB} = \frac{U_{os}}{2Lf} D(1-D)^2 \quad (5)$$

当占空比 D 取值为 $1/3$ 时, 临界电流最大。

令最小输出电流大于临界电流, 可得电感计算公式为:

$$L_1 \geq \frac{U_{os}}{2f \times I_{osmin}} D(1-D)^2 \quad (6)$$

将表 1 中参数及占空比 $D=1/3$ 代入式(6)得:

$$L_1 \geq \frac{24}{2 \times 20 \times 10^3 \times 0.2} \times \frac{1}{3} \times \frac{4}{9} = 444 (\mu\text{H}) \quad (7)$$

2) 降压模式电感 L_1

电感电流连续时, 输入电压为 20 V, 输出电压为 12 V, 占空比 $D=12/20=0.6$; 输入电压为 28 V, 输出电压为 12 V, 占空比 $D=12/28=0.428$;

电感计算公式为:

$$L_1 \geq \frac{U_{oj}}{2fI_{ojmin}}(1-D_{min}) \quad (8)$$

将表 1 中参数及占空比 $D_{min}=0.428$ 代入式(8)得:

$$L_1 \geq \frac{12 \times (1-0.428)}{2 \times 20 \times 10^3 \times 0.5} = 343 (\mu\text{H}) \quad (9)$$

综合式(7)和式(9)计算方法, 并取一定裕度, 电感 L_1 实际选取为 500 μH 。

3) 升压模式电容 C_2

升压时输出电压纹波要求小于 0.5%, 电压纹波计算公式为:

$$\frac{\Delta U_o}{U_o} = \frac{D}{RCf} \leq 0.5\% \quad (10)$$

负载电阻 R 计算公式为:

$$R = \frac{U_{os}}{I_{os}} = \frac{24}{1} = 24 (\Omega) \quad (11)$$

占空比 D 取最大值, 计算公式为:

$$D = 1 - \frac{U_{ins}}{U_{os}} = 1 - \frac{10}{24} = 0.584 \quad (12)$$

将开关频率 f 、电感 L_1 及占空比 D 代入式(10)得:

$$C_2 \geq \frac{D}{0.5\% R f} = \frac{0.584}{0.5\% \times 24 \times 20 \times 10^3} = 243 (\mu\text{F}) \quad (13)$$

留一定裕度, 电容 C_2 选取为 300 $\mu\text{F}/50 \text{ V}$ 。

4) 降压模式电容 C_1

降压时输出电压纹波要求小于 0.5%, 电压纹波计算公式为:

$$\frac{\Delta U_o}{U_o} = \frac{1-D_{min}}{8LCf^2} \leq 0.5\% \quad (14)$$

将表 1 中参数、电感 L_1 及占空比 D_{min} 代入式(14)得:

$$C_1 \geq \frac{1-D_{min}}{0.5\% \times 8Lf^2} = \frac{1-0.428}{0.5\% \times 8 \times 0.5 \times 20^2 \times 10^3} = 71.5 (\mu\text{F}) \quad (15)$$

留一定裕度, 电容 C_1 选取为 100 $\mu\text{F}/50 \text{ V}$ 。

对于电感电流断续时参数计算, 可根据文献 [10] 中变压比 M 、占空比 D , 电压 V_o 、电流 I_o 及 f 计算确定。

3.2 变换器电路设计

变换器电路包括驱动电路、半桥电路、采样电路及控制电路。

3.2.1 驱动电路

驱动电路作为双向半桥 DC-DC 主电路与控制电路之间的接口, 作用是将 STM32 主控板输出的互补 PWM 信号经过放大后施加到开关管控制端与公共端之间, 用于开通或关断 MOS 管。本文设计的驱动电路如图 6 所示。

图 6 中, 驱动电路采用 IR 公司的半桥驱动芯片 IRS2186, 一片驱动芯片可同时驱动一个半桥, 高压侧电源采用自举电路给自举电容充电得到, 只需要一路 15 V 控制电源。HIN 和 LIN 为两路输入信号, HO 和 VS 为高端输出, LO 和 GND 为低端输出。D₁ 为自举二极管, C₂ 为自举电容, D₂ 和 D₃ 用于提供 MOS 管关断时栅源电容放电回路。

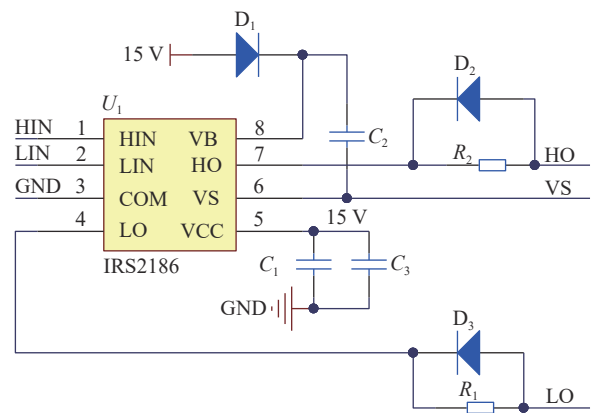


图 6 驱动电路图

3.2.2 半桥电路

半桥电路由两个 N 沟道 MOS 管构成, MOS 通断控制信号由驱动电路输出, 通过 MOS 管实现电流的双向流动和升压、降压工作模式。根据表 1 中设计指标, 并留有裕度后, 开关管选型为

IRF540, 最大耐压 100 V, 最大电流 23 A, 具体电路如图 7 所示。

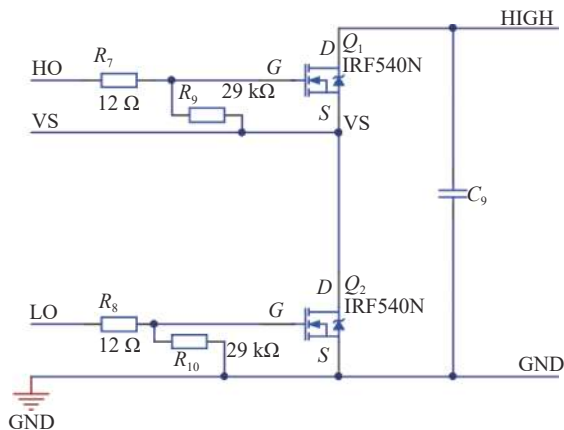


图 7 半桥电路图

图 7 中, 栅极电阻 R_7 和 R_8 用于调节开关速度和消除栅极振荡, R_9 和 R_{10} 用于提供 MOS 关断时栅源极间电容放电回路。电容 C_9 为 CBB 电容, 用于吸收开关管关断时电压尖峰。

3.2.3 采样电路

采样电路包括电压采样和电流采样电路, 其中电压采样直接为电阻分压。电流采样为霍尔电流采样芯片 ACS712, 采样电流范围为 $-5\sim 5$ A, 灵敏度为 185 mV/A 。采样输出电压经过运算电路处理后送入单片机 ADC 外设接口, 电流采样如图 8 所示。

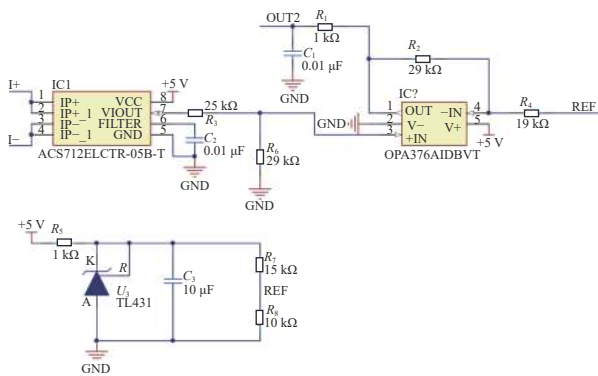


图 8 电流采样电路图

4 系统软件设计

4.1 程序设计

程序初始化完成后, 首先获取采样信号, 当电路工作在升压放电模式下时, 系统开启电压反馈调节, 通过采集到的电压值与设定的电压值比较进行 PI 调节。当电路工作在充电模式下时, 系

统开启电流反馈调节, 通过采集到的电流值与设定的电流值比较进行 PI 调节, 最后调节 PWM 占空比。具体程序流程图如图 9 所示。

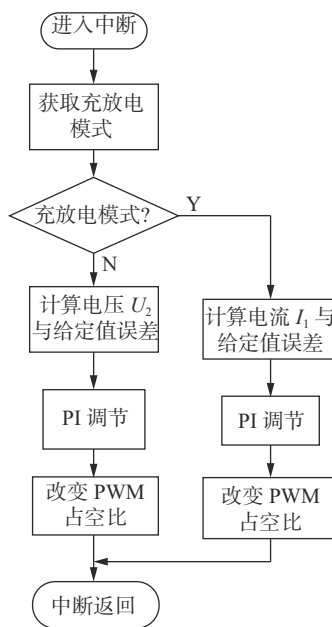


图 9 程序流程图

5 实验测试与结果分析

5.1 驱动电路测试

单片机输出的两路自带死区的互补 PWM 波形, 经过驱动电路后得到对应的 PWM 波, 从而控制开关管通断, 驱动电路输入和输出波形如图 10 所示。

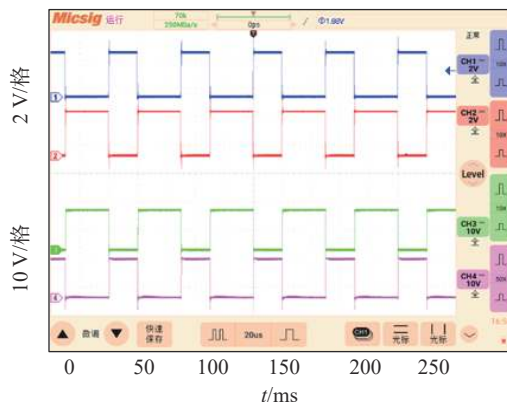


图 10 驱动电路输入和输出 PWM 波形

图 10 中上半部分为两路输入的 PWM 信号, 高电平为 3.3 V , 经过驱动电路后输出两路 PWM 信号如图 10 下半部分所示, 高电平为 13 V 左右, 一部分压降为自举二极管产生。从图 10 可知, 对

应输入和输出信号同相且无延时，输出互补信号存在死区，可以可靠关断开关管，说明驱动电路工作正常。

5.2 升压电路稳态测试

升压电路输入电压为 12 V，给定输出电压为 24 V，输出电压由采样电路反馈，经过数字处理后输出 PWM 信号控制占空比，占空比限幅为 0.2~0.8，负载电阻为 24 Ω，最后升压电路输出电压波形如图 11 所示。

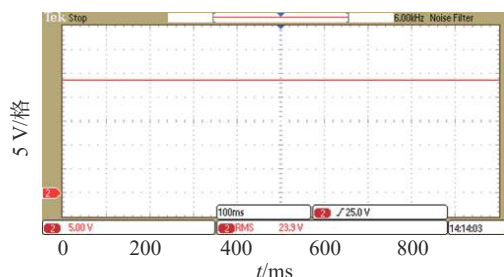


图 11 Boost 升压电路输出电压波形

从图 11 可知，升压电路输出电压有效值为 23.9 V，满足设计指标要求。

5.3 升压电路负载测试

在负载条件下，升压电路输入电压为 12 V，测试输出电压随负载变化情况，对应输出电流和电压关系如表 2 所示。

表 2 升压电路输出电压和电流关系

输出电流/A	输出电压/V
1.0	23.99
0.8	24.06
0.6	24.07
0.4	24.03
0.2	24.06

从表 2 可知，改变负载情况下，输出电压满足负载调整率范围，说明升压电路工作正常。

5.4 降压电路充电测试

在降压模式下，降压电路输入电压为 24 V，设置充电电流给定值在 1~2 A 内变化，测量充电电流，计算电流控制精度，如表 3 所示。

表 3 降压电路输出电流设定值与实测值

参数	数值					
设定值/A	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
实际值/A	1.110	1.201	1.296	1.501	1.708	1.896
电流控制精度/%	0.91	0.08	0.30	0.07	0.47	0.21

从表 3 可知，改变电流给定值，对应输出电流满足设计指标，说明降压充电电路工作正常，可实现对电池充电。

6 结束语

通过实验结果可得以下结论：所设计的双向 DC-DC 变换器系统可实现升压负载运行和降压充电，达到能量双向流动的目的，能满足新能源发电等创新性实验教学要求。

参考文献

- [1] 李然, 于乐, 杨光仪, 等. 面向工程教育专业认证背景下的《电力电子技术》课程教学模式改革与思考[J]. 高教学刊, 2019(12): 135-137.
- [2] 关晓菡, 张卫平, 张东彦. 国内外高校电力电子技术教育现状综述[J]. 电气电子教学学报, 2006(2): 4-8.
- [3] 李久胜, 王明彦, 孙铁城. 电力电子技术课程设计的探索与实践[J]. 电气电子教学学报, 2008(S1): 81-84.
- [4] 严仰光. 双向直流变换器[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2004.
- [5] 陆婷, 杜月林, 杨飞, 等. 大功率双向DC-DC电源变换器实验装置设计[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(9): 100-105.
- [6] 徐波, 刘军, 朱润卿. 一种用于轻度混合动力汽车的高效双向DC/DC的研制[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 30-36.
- [7] 黄海宏, 杜少武, 张毅. 现代电源技术实验平台研制[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(6): 66-70.
- [8] 周美兰, 刘洋, 黄锋涛, 等. 电动汽车辅助动力系统双向DC/DC变换器[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(11): 73-81.
- [9] 徐德鸿. 电力电子系统建模与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

编辑 钟晓