

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.02.006

集成式车载充电器软启动控制策略研究

钱晓东¹, 高鹤²

(1. 安徽职业技术学院智能制造学院, 安徽合肥 230000; 2. 合肥钧联汽车电子有限公司, 安徽合肥 230000)

摘要:针对电动汽车车载充电模块后级高压 DC/DC 变换器启动时冲击电流较大、软启动控制算法过于复杂的问题, 提出将车载充电模块后级高压输出 DC/DC 变换器与低压输出双向 DC/DC 变换器集成, 共用高压侧电容、控制板和辅助电源; 同时提出采用分段式软启动策略将低压电池通过双向 DC/DC 变换器给高压侧电容反向预充电。对该电路和软启动控制策略进行软件仿真, 并搭建了一台 6.6 kW 实物验证, 结果表明: 该策略不仅能够减小启动冲击电流和开机时间, 实现起来也更为简单, 且节省了硬件电路, 降低了体积、重量和成本, 具有较好的应用前景和推广价值。

关键词:集成式车载充电器; 冲击电流; 双向 DC/DC 变换器; 软启动; 反向预充电

中图分类号:U469.72; TM910.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2023)02-0034-06

Research on Soft Start Control Strategy of Integrated On-Board Charger

QIAN Xiaodong¹, GAO He²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Anhui Vocational and Technical College, Hefei, Anhui 230000, China;
2. Hefei J-Link Automotive Electronics Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: When the rear high-voltage DC/DC converter of on-board charger in the electric vehicle is started, the inrush current is large and the soft start control algorithm is too complex. Therefore, it is proposed to integrate the rear high-voltage output DC/DC converter of the charging module with the low-voltage output bidirectional DC/DC converter, sharing high voltage capacitors, control board and auxiliary power supply. A new segmented soft start control strategy is proposed first time that the high voltage capacitors are reversely pre-charged by the low voltage battery using bidirectional DC/DC converter. A software simulation and an experiment of 6.6 kW module were built. The results show that the strategy can limit the large inrush current and reduce startup times. What's more, it was very simple to implement. Some hardware circuits are omitted which can help reduce the volumes, weights and costs of module. It has good application prospects and promotion values.

Keywords: integrated on-board charger; inrush current; bidirectional DC/DC converter; soft start; reversed pre-charge

0 引言

车载充电器和低压输出 DC/DC 变换器是大多数电动汽车标配部件, 前者通过交流电给车内动力电池充电, 后者由动力电池给低压电池(一般为 12 或 24 V)充电和车内仪表等电子设备供电。两者功能不同但又不可或缺。作为 2 个独立的模块放置车内, 会造成车内空间减小、成本提高^[1], 许多研究者将两者集成。周凯等^[2]、贾民立等^[3]、苏州博沃创新能源科技有限公司^[4]、Nam 等^[5]提出将车载充电器后级高压输出 DC/DC 变换器与低压输出 DC/DC 变

换器的变压器集成, 并共用充电器副边功率管, 由此带来的问题是变压器设计复杂度提高、磁耦合带来干扰、模式切换复杂、PWM 配置复杂, 且不利于充电器反向放电功能的实现; 上海电气集团股份有限公司^[6]为解决模式切换复杂问题提出使用继电器进行切换, 但是增加了体积, 给系统可靠性带来挑战。为此, 本文提出将两者部分集成, 保持各自核心器件独立, 即变压器、功率管、PWM 驱动分开, 共用高压电容、控制板和辅助电源。同时为了减小充电器启动冲击电流和开机时间, 规避高压 DC/DC 变换器复杂的软启动控制算法^[7-8], 充电前先让低压输出

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2020A1039)。

作者简介: 钱晓东(1987—), 男, 安徽淮北人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 数字化控制技术、电力电子技术。

DC/DC 变换器反向预充电,采用分段式软启动策略将高压电容电压缓慢提升,待软启动结束后再开始给电池充电。采用 PSIM 仿真软件对该策略进行了仿真验证,并制作一台 6.6 kW 的集成式充电模块(低压双向 DC/DC 变换器功率为 3 kW)进行实物验证,结果均表明该方法简单有效,有较强的经济性和实用性。

1 集成式充电模块

1.1 系统框图

传统的电动汽车车载电气系统简图如图 1 所

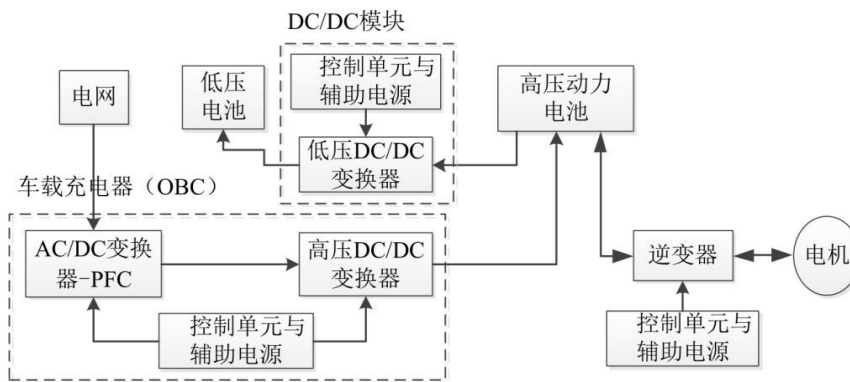


图 1 传统电气系统框图

本文将低压 DC/DC 变换器和充电器高压 DC/DC 变换器进行部分集成,共用高压电容、控制单元和辅助电源、高压动力电池开关,去除硬件缓启电

阻和继电器,其中,辅助电源从低压电池取电,简化了辅助电源设计,集成后的电气系统如图 2 所示。

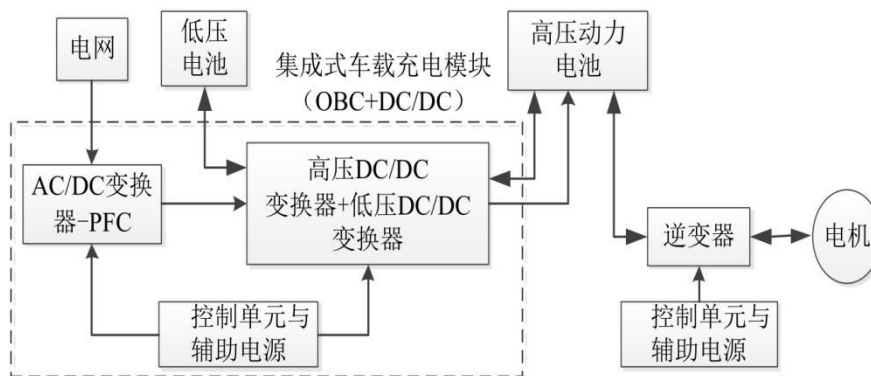


图 2 集成式电气系统框图

1.2 模块集成

忽略集成式车载充电器的前级 PFC 整流电路,后级高压 DC/DC 变换器与低压 DC/DC 变换器整合后的主电路图如图 3 所示,两者共用高压电容(C_Bus),高压电池与该电容之间串联一开关 S,整

个系统辅助电源由低压电池(Battery_Low)供电。高压 DC/DC 变换器采用双向 CLLLC 电路拓扑,可实现能量双向流动和软开关^[12]。低压 DC/DC 变换器电路拓扑变压器原边采用移相全桥电路,副边采用全波整流电路^[13-15]。正向充电时既可以实现原边软开关,副边也可以实现同步整流,提高整机效率,反向

放电时通过电感 LB 实现升压,扩大输出增益范围。

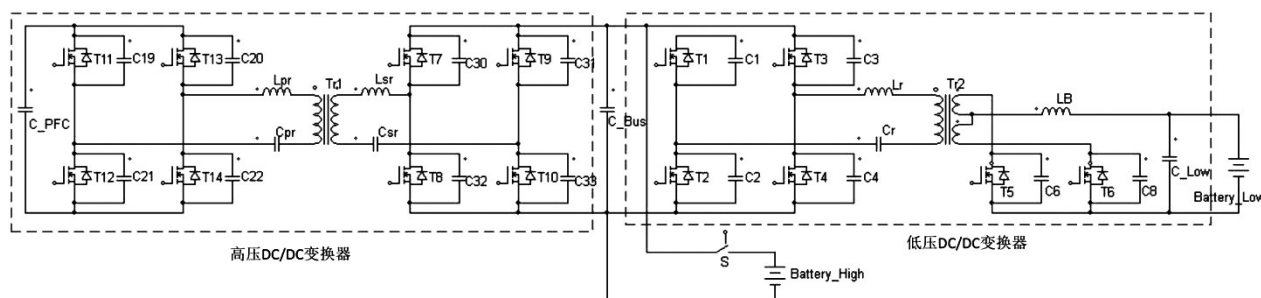
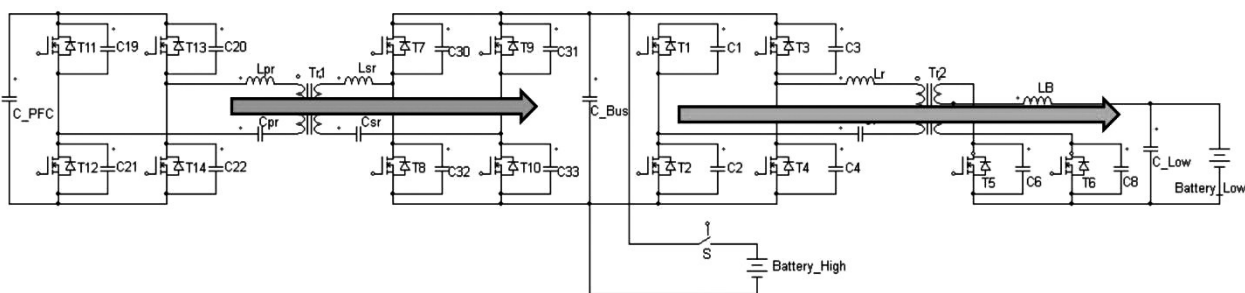


图 3 集成式变换器电路

集成后的模块根据能量流动方向不同主要分为以下 3 种工作模式。

工作模式 1:市电经 PFC 电路整流后,一方面通

过高压 DC/DC 变换器给高压动力电池充电,另一方面通过低压 DC/DC 变换器给低压电池充电。能量流动情况如图 4 所示。

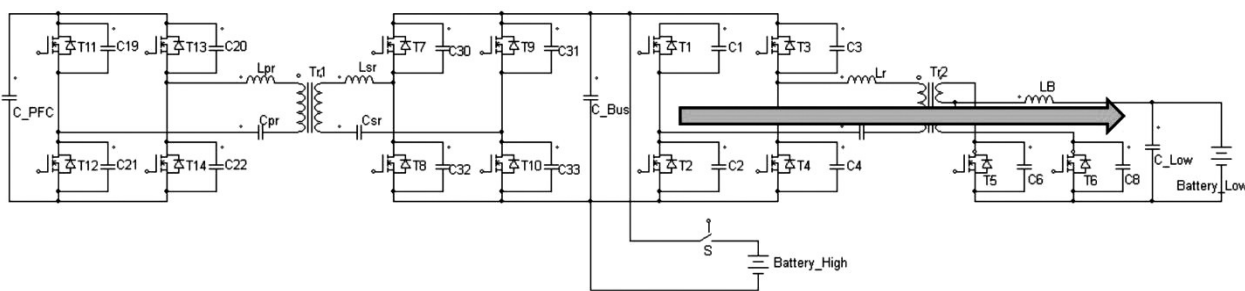


注:箭头指能量流动方向。

图 4 工作模式 1 能量流动示意图

工作模式 2:高压动力电池放电,一方面通过高压 DC/DC 变换器反向工作,然后经逆变电路(PFC 整流和逆变采用同一电路)输出交流电并网或离网工

作,另一方面经低压 DC/DC 变换器给低压电池充电。能量流动情况如图 5 所示。



注:箭头指能量流动方向。

图 5 工作模式 2 能量流动示意图

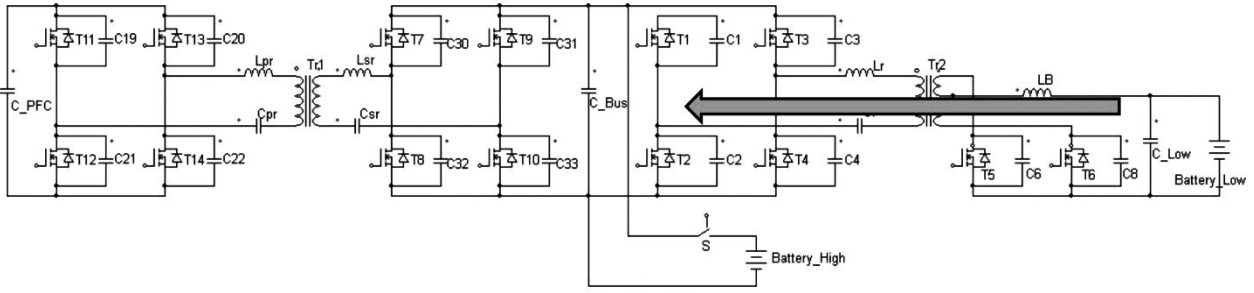
工作模式 3:低压电池放电,通过低压 DC/DC 变换器反向放电,一方面给高压电池充电,另一方面通过高压 DC/DC 变换器反向工作,然后经逆变电路输出到交流侧。能量流动情况如图 6 所示。

大,大电压直接加载到其两端会导致冲击电流较大,严重时损坏器件,所以不管何种工作模式都要避免此情况的发生。本文提出无论进入何种工作模式,首先比较电容电压和电池电压,如果相差较大,则需要进行低压电池反向预充电,即低压电池(Battery_Low)通过低压 DC/DC 变换器反向工作,让高压电容两端的电压缓慢升高,待电压幅值升至与电池电压相近时再闭合开关 S,使高压电容与高

2 反向预充电软启动

2.1 反向预充电

高压电容(C_Bus)作为储能元件,容量相对较



注:箭头指能量流动方向。

图6 工作模式3能量流动示意图

压电池并联。如果两者电压相差不大,则直接闭合开关S。具体判断流程如图7所示。

占空比为[0, 0.5), 占空比逐渐增大,且为了保持输出电压缓慢上升,设定开关管在某个占空比下维持一段时间,流程如图8所示。

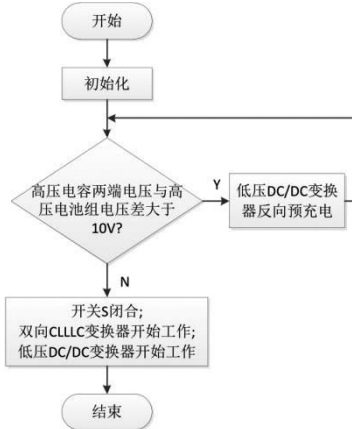


图7 反向预充电开启条件

2.2 分段式软启动

反向预充电电路中, T5 和 T6 为推挽式开关管, 两者相位差 180°, 电感 LB 此时作为一个电流源起升压作用。反向输出电压增益 G_v 如式(1)^[16]所示。

$$G_v = N \times \frac{1}{2 \times (1 - D)} \quad (1)$$

式中: N 表示变压器原边和副边匝数之比; D 表示开关管占空比。

因此, 可以通过控制 T5 和 T6 两者占空比来调节输出电压大小, 占空比越大输出增益越大。

由式(1)可知, 输出电压增益可分为2段: 当 $0 \leq D < 0.5$ 时, $G_v < N$; 当 $0.5 \leq D < 1$ 时, $G_v \geq N$ 。

正常工作时, $0.5 \leq D < 1$, 以实现扩大输出增益的目的。但是, 工作前输出电容电压一般较低, 当 $0.5 \leq D < 1$ 时, 会导致较大的输出电压加载到电容两端, 形成较大的冲击电流, 严重时可导致器件损坏。因此, 在反向充电工作之前需要先软启动, 为了减小软启动过程中的冲击电流, 实现输出电压缓慢上升, 采用2段式软启动策略。

第1阶段: 采用开环式软启动策略, 控制开关管

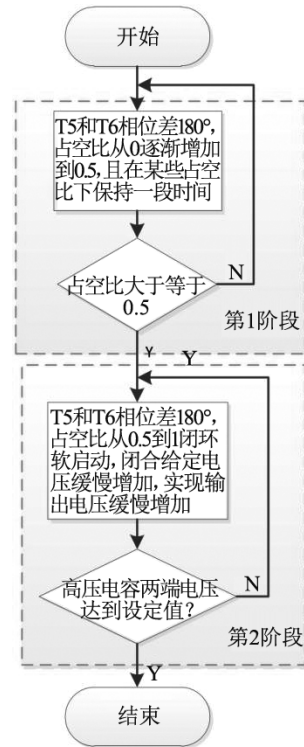


图8 软启动流程图

第2阶段: 采用输出电压闭环软启动控制策略, 控制开关管占空比为[0.5, 1), 输出电压给定值缓慢增加, 当输出电压达到设定值后退出软启动程序。

3 仿真与实验验证

3.1 软件仿真

为了验证上述方案的可行性, 使用 PSIM 仿真软件搭建电路进行仿真, 主要器件及参数如表 1 所示。

设定输出电压 400 V, 软启动过程中输出电压和输入电感电流波形如图 9 所示。第 1 阶段电压上

表 1 主要器件参数

名称	参数	单位
开关频率	100	kHz
原边谐振电感	10	μH
原边谐振电容	2	μF
变压器变比	32:1	
副边电感	3	μH
低压电池	12	V
副边电容	3.5	mF
原边电容	120	μF

升较慢,输入电流较小,且开关管工作瞬间冲击电流小于 20 A;第 2 阶段切换瞬间冲击电流较大,但是在可接受范围内。最终输出电压缓慢上升到设定电压,冲击电流远远小于开关管额定电流,退出软启动程序。

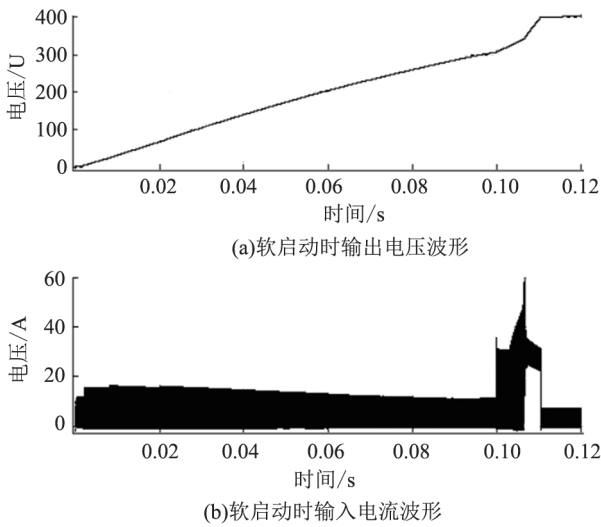


图 9 软启动时电压电流波形

分别对比了 2 个阶段变压器副边开关管驱动和输入电感电流波形,结果如图 10 ~ 11 所示。 $0 \leq D < 0.5$ 时输出电压增益小,可用于电压软启动,减小冲击电流; $0.5 \leq D < 1$ 时输出电压增益更大,实现更高电压的调节,可用于加快软启动进度,减少开机时间。

3.2 实验验证

图 12 是搭建的 6.6 kW 集成式充电器样机与实测波形。样机包含单相 PFC、高压 DC/DC 变换器以及 3 kW 双向低压 DC/DC 变换器、辅助电源、控制单元、采样电路、驱动电路及保护电路。波形包含电流与原边同步整流管驱动,从电流波形可以看出,

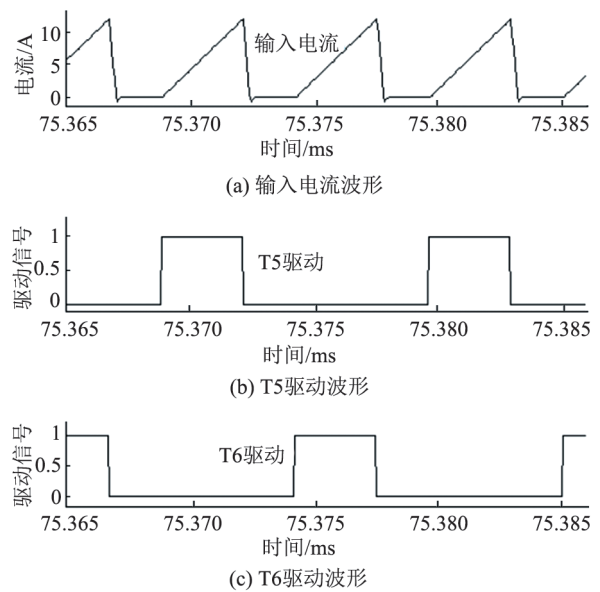


图 10 第 1 阶段 ($0 \leq D < 0.5$) 驱动与电流波形

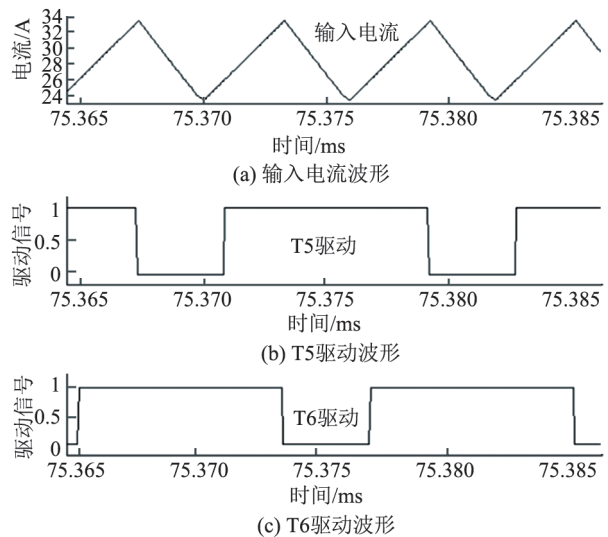
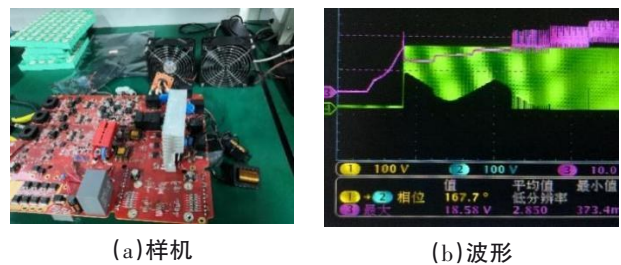


图 11 第 2 阶段 ($0.5 \leq D < 1$) 驱动与电流波形

在软启动过程中冲击电流较小,符合设计要求。



(a) 样机 (b) 波形

图 12 集成式车载充电器样机与波形

4 结语

将车载充电器后级高压 DC/DC 变换器与低压

输出DC/DC变换器集成,共用部分器件,可以节省空间、重量和成本;在正式工作之前首先使用低压DC/DC反向预充电功能给高压电容充电,可以避免高压DC/DC变换器复杂的软启动控制算法,减小开

发难度;反向预充电采用分段式软启动策略,可以进一步降低冲击电流,增加系统可靠性。仿真和实验结果表明,该方案简单有效,具有很好的实用和推广价值。

参考文献:

- [1] CAROLINE A S, JEGATHESAN V. Bidi-rectional Integrated On-Board Chargers for Electric Vehicles-A Review [J]. Sādhanā, 2021, 46: 26.
- [2] 周凯,顾福森,杨嵇森. 双输出端口 LLC 电路及其控制技术研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(1): 17-26.
- [3] 贾民立,孙浩. 一种双向三端口车载充电机拓扑的调制及仿真[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 83-92.
- [4] 苏州博沃创新能源科技有限公司. 大功率集成式车载充电机与车载DC/DC电路: 2109578809[P]. 2020-07-07.
- [5] NAM V H, TINH D V, CHOI W. A novel hybrid LDC converter topology for integrated on-board charger of electric vehicles [J]. Energies, 2021, 14: 3603.
- [6] 上海电气集团股份有限公司. 车载充电机和车载DC/DC的集成电路、电动汽车: 111404387[P]. 2020-07-10.
- [7] 田锐,凌跃胜,酉家伟. 直流充电桩后级变换器软启动控制策略研究[J]. 电源技术, 2021, 45(6): 809-813.
- [8] TANG Y, GONG S C, XIE S J. Research on open-loop soft-start strategy of CLLC bi-directional resonant converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 18(6): 6054-6059.
- [9] 宋建国,谢敏波,张斌. 基于大功率车载DC/DC移相全桥变换器的研究[J]. 电力电子技术, 2019, 12(5): 23-27.
- [10] 贺洪波. 用于车载双电源系统的双向DC/DC变换器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [11] 陶海军,秦熙东,郑征. 电动汽车车载充电DC/DC变换器研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2019, 3(8): 312-319.
- [12] 廖嘉睿,杭丽君,但志敏. 宽范围 CLLC 双向同步整流数字控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3632-3642.
- [13] 金宁治,俄立明,马腾. 电动汽车车载移相全桥变换器改进研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 9(8): 70-77.
- [14] ZONG S, FAN G X, YANG X B. Double Voltage rectification modulation for bidirectional DC/DC resonant converters for wide voltage range operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6510-6521.
- [15] ASHRAFINIA B, ROBRECHT R, DAHM A, et al. Development of bi-directional isolated DC-DC converter for battery test equipment[C]//PCIM Europe 2019, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany: VDE, 2019: 1-8.
- [16] 赵策. 用于储能的高增益隔离推挽式双向DC/DC变换器[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.