

# 移相全桥 DC/DC 变换器实验装置的研制

冯学玲, 杜志强, 田茂飞, 王学华

(华中科技大学, 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**“双碳”目标驱动下新能源电动汽车迎来了新的发展机遇。为更好地帮助学生认识和理解电动汽车相关技术, 基于移相全桥软开关技术设计并研制了一套宽范围输入电压和高变换效率的车载移相全桥(PSFB)DC/DC 变换器实验装置。通过控制超前和滞后桥臂的导通相角差实现宽电压输入, 通过谐振电感和场效应管的结电容充放电实现变换器开关管的零电压导通和关断, 有效降低高频开关损耗, 大大提高变换效率, 此处通过理论分析设计了变换器的参数, 并进行了实验验证。实验结果表明所设计变换器具有效率高、输出电压稳定的特点。该实验设备能够有效支撑新工科背景下电力电子实验教学, 提高学生综合应用知识解决工程问题的能力。

**关键词:**变换器; 移相全桥; 宽范围输入电压

**中图分类号:**TM46

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-100X(2023)07-0001-04

## Development of Phase-shifted Full-bridge DC/DC Converter Experimental Device

FENG Xue-ling, DU Zhi-qiang, TIAN Mao-fei, WANG Xue-hua

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Driven by the “dual carbon” goal, new energy electric vehicles have ushered in the new development opportunities. In order to help students to understand better the related technologies of electric vehicles, a set of wide-range input voltage and high-efficiency vehicle-mounted phase-shifted full-bridge (PSFB) DC/DC converter experimental device is developed. The wide-range voltage input is realized by controlling the conduction angle difference between the leading and lagging bridge arms, the zero-voltage turn-on and turn-off of the converter switch tube is realized by the resonant inductor and the charging and discharging of the junction capacitance of the field-effect transistor. This effectively reduced the high-frequency switching loss, and therefor greatly improved the conversion efficiency. The parameters of the converter are designed through theoretical analysis, and the experimental verification is carried out. The experimental results show that the designed converter has the characteristics of high-efficiency and stable output voltage. The experimental equipment can effectively support the teaching of “power electronics experiment teaching” under the background of new engineering, and improve the ability of students to comprehensively and apply knowledge to solve engineering problems.

**Keywords:** converter; phase-shifted full-bridge; wide-range input voltage

**Foundation Project:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.52277181); Key Research Project on Laboratory Management of Ministry of Education (No.2020SYD08)

## 1 引言

传统实验中实验装置多以挂箱的形式使用<sup>[1]</sup>, 学生在实验过程中仅依靠接插线、观察波形等方式, 多强调电力变换器拓扑结构和控制技术等知识的记忆与理解以及对基本理论和现象的验证, 不利于培养学生综合利用知识解决工程实际问题的能力。针对上述问题, 结合“双碳”目标下大力发展

新能源电动汽车的背景, 研制了一套能够车载的 30~60 V 宽范围输入电压和高变换效率的 PSFB DC/DC 变换器实验装置<sup>[2]</sup>, 涵盖电力电子学科领域的 PSFB、脉冲宽度调制、磁性元件的设计和制作以及谐振软开关等技术。同时根据国家新工科建设相关要求<sup>[3]</sup>, 设计了专门综合实验进行项目驱动式教学, 通过设计电力电子分析、设计、仿真与实训等任务, 提供学生从电路原理认知到设计调试等一整套电力电子开发学习过程, 从而提升学生知识理解与综合应用等工程实践能力。

## 2 PSFB 变换器电路原理分析

### 2.1 PSFB 变换器拓扑

PSFB 变换器电路原理图如图 1 所示。其中

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52277181);教育部实验室管理研究重点项目(2020SYD08)

**定稿日期:**2023-01-13

**作者简介:**冯学玲(1987-), 女, 工程师, 研究方向为电力电子、信号与控制及教学实践。王学华(1978-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动及教学实践(通信作者)。

$U_{in}(U_o)$  为输入(输出)电压,  $R_{ld}$  为负载电阻,  $T_r$  为高频隔离变压器, 开关管  $V_1$  和  $V_2$  组成超前桥臂, 开关管  $V_3$  和  $V_4$  组成滞后桥臂,  $A$  和  $B$  分别为超前桥臂和滞后桥臂的中点,  $L_r$  为谐振电感,  $C_r$  为隔直电容, 二极管  $VD_{r1}$ ,  $VD_{r2}$  组成次级全波整流电路,  $L_f$  为滤波电感,  $C_f$  为滤波电容,  $C_1 \sim C_4$  和  $VD_1 \sim VD_4$  分别为  $V_1 \sim V_4$  的结电容和反并二极管,  $I_m$  为输入电流,  $i_{Lr}$  为变压器初级电流,  $I_{rect}$  为次级整流后电流,  $U_{rect}$  为次级整流电压。

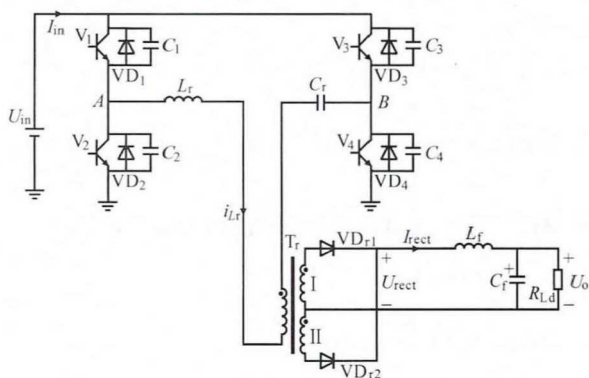


图 1 PSFB 变换器电路图

Fig. 1 Circuit diagram of PSFB converter

图 2 为 PSFB 变换器的主要波形, 其中  $u_{gV1} \sim u_{gV4}$  为开关管的驱动电压,  $u_{AB}$  为超前桥臂和滞后桥臂输出电压。

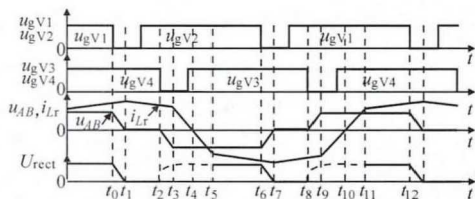


图 2 PSFB 变换器主要波形

Fig. 2 Main waveforms of PSFB converter

## 2.2 工作原理

在一个开关周期  $t_0 \sim t_{12}$  中, 该变换器有 12 种开关模式, 考虑正、负半周波形的对称性, 此处仅给出正半周期的 6 个模式。在下述分析中, 假设: ①所有器件为理想器件; ② $C_1 = C_2 = C_{lead}$ ,  $C_3 = C_4 = C_{lag}$ ; ③ $C_1 \sim C_4$  在充放电过程中, 近似认为负载电流和变压器初级电流  $i_{Lr}$  不变。

模式 0 [ $0 \sim t_0$ ] 中,  $V_1, V_4$  导通, 电源  $U_{in}$  经变压器  $T_r$ ,  $VD_{r1}$  和滤波电路向负载供电。模式 1~6 中,  $t_0$  时关断  $V_1$ ,  $C_1$  由零充电,  $V_1$  实现零电压关断;  $t_1$  时  $C_2$  两端电压放电至零,  $VD_2$  自然导通, 待  $V_2$  有驱动信号实现零电压开通;  $t_2$  时关断  $V_4$  并实现零电压关断,  $u_{AB}$  极性由零变为负,  $u_{AB}$  全部加在电感  $L_r$ ,  $C_r$  上, 电路处于谐振工作状态;  $t_3$  时  $C_3$  两端电压放

电至零,  $VD_3$  自然导通, 待  $V_3$  有驱动信号实现零电压开通,  $i_{Lr}$  进一步减小;  $t_4$  时  $i_{Lr}$  下降至零后并负方向增加,  $VD_2, VD_3$  自然关断, 电流流经  $V_2$  和  $V_3$ ,  $VD_{r1}$  和  $VD_{r2}$  同时导通;  $t_5$  时变压器实现初、次级耦合,  $VD_{r1}$  关断,  $VD_{r2}$  流过全部负载电源;  $t_6$  时关断  $V_3$ 。变换器开始另一半周期的工作, 此处不再赘述。

## 3 PSFB 主电路参数设计

该节主要设计 PSFB 变换器关键参数, 首先定义如下变量: 功率  $P_o = 30 \text{ W}$ ,  $U_{in}$  为  $30 \sim 60 \text{ V}$ , 开关频率  $f_s = 100 \text{ kHz}$ ,  $U_o = 14 \text{ V}$ , 开关管为金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET), 其余变量参数与上述保持一致。

### 3.1 高频变压器设计

高频变压器的设计主要考虑变比、开关频率、磁芯选择、初次级绕组匝数、绕线线径及窗口利用系数等参数。其中, 变比需考虑占空比丢失现象和宽范围输入电压范围内实现零电压开关 (ZVS) 的要求计算; 变压器磁芯参数依据面积乘法<sup>[4]</sup>选择; 绕线参数考虑导线穿透深度和经济电流密度选择线径; 验算窗口利用系数和最大磁密。最终变压器详细参数: 开关频率为  $50 \text{ kHz}$ ; 磁芯为 EE33; 匝比为 5:5; 绕线线径为  $0.31 \text{ mm}$ ; 窗口利用系数为 0.05; 并绕股数为 5 (10); 最高磁密为  $0.126 \text{ T}$ 。

### 3.2 谐振电感设计

由于 PSFB 滞后桥臂需实现零电压开关, 谐振电感储能需大于开关管结电容储能。为保证在整个输入电压范围内都能实现 ZVS, 考虑输入电压应最大 (如  $U_{in} = 60 \text{ V}$ ) 和轻载 (一般考虑 1/4 满载) 均实现 ZVS, 此处实际选取  $L_r = 4 \mu\text{H}$ 。采用均匀环形电磁芯绕制电感, 应用低磁导率闭合磁芯电感计算得到电感设计参数如下: 铁硅铝粉磁芯型号为 CS270125; 电感系数为  $157 \times 10^{-6} \text{ H/N}^2$ ; 绕线匝数为 6; 绕线线径为  $0.31 \text{ mm}$ ; 并绕股数为 5。

### 3.3 输出 LC 滤波设计

LC 滤波器的设计, 主要遵循在轻载时电感电流连续、电压脉动满足要求的原则。此处  $L_f$  设计取值为  $400 \mu\text{H}$ ,  $C_f$  选取  $100 \mu\text{F}$ 。具体电感绕制在此不赘述。最终选择铁硅铝粉磁芯 CS270125 进行绕制, 选择  $0.31 \text{ mm}$  的漆包线进行 10 股并绕。

### 3.4 电压闭环设计

为了保证输出电压稳定且无静差, 需要对输出电压进行闭环反馈控制系统设计: 在控制环路中引入电压调节器。应用平均开关模型<sup>[5]</sup>推导的 PSFB 变换器的小信号模型, 如图 3 所示。

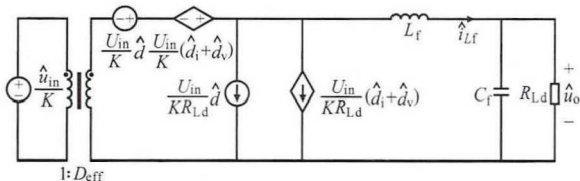


图 3 小信号模型

Fig. 3 Small-signal model

图中,  $D_{\text{eff}}$  为有效占空比,  $D_{\text{eff}} = D - D_{\text{loss}} = KU_o/U_{\text{in}}$ ,  $D$  为初级占空比;  $\hat{d}_i$  和  $\hat{d}_v$  分别为输出滤波电感电流扰动和输入电压扰动产生的占空比扰动:

$$\hat{d}_i = -\frac{KR_d}{U_{\text{in}}} \hat{i}_L \quad (1)$$

$$\hat{d}_v = \frac{4L_r f_s}{KU_{\text{in}}^2} \left[ I_o - \frac{T_s}{4} \cdot \frac{U_o}{L_r} (1-D) \right] \hat{u}_{\text{in}} \quad (2)$$

其他变量定义与上述保持一致,  $\hat{i}_L$ ,  $\hat{u}_{\text{in}}$ ,  $\hat{d}$  和  $\hat{u}_o$  分别为滤波电感电流、输入电压、占空比和输出电压的小信号扰动。

式(1)中,  $R_d = 4L_r f_s / K^2$  表征谐振电感对全桥变换器造成的占空比丢失。在电路结构上等效于在电感  $L_r$  上串联了一个  $R_d$ 。由图 4 可以进一步推导出  $\hat{d}$  到  $\hat{u}_o$  的传递函数  $G_{\text{vd}}(s)$ , 表达式为:

$$G_{\text{vd}}(s) = \frac{U_{\text{in}}/K}{s^2 L_r C_f + s(L_r/R_{Ld} + R_d C_f) + R_d/R_{Ld} + 1} \quad (3)$$

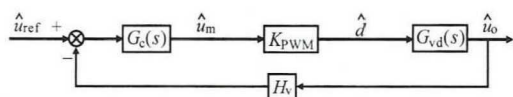


图 4 电压闭环控制框图

Fig. 4 Voltage closed-loop control block diagram

$U_o$  的采样系数  $H_v = 0.1$ , 脉宽调制器的模型可以等效为  $K_{\text{PWM}} = 1/U_m$ , 其中,  $U_m$  为锯齿载波幅值,  $U_m = 2.32 \text{ V}$ 。因此, 给出 PSFB 电压闭环控制框图<sup>[6]</sup>, 见图 4 所示, 并推导得系统环路增益  $T(s) = G_c(s) \cdot K_{\text{PWM}} G_{\text{vd}}(s) H_v$ 。其中,  $\hat{u}_m$  为调制波的小信号扰动,  $G_c(s)$  为电压补偿器传递函数。令  $G_c(s) = 1$ , 即可求得校正前系统环路增益的波特图, 同时设计 PI 控制器作为补偿器。考虑期望截止频率  $f_c$  一般设置为开关频率  $f_s$  的  $1/50 \sim 1/20$ , 相位裕度为  $45^\circ$ , 因此可以得到补偿前后的波特图, 如图 5 所示。

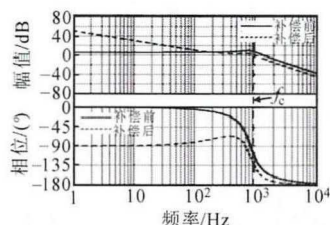


图 5 电压环补偿前后波特图

Fig. 5 Bode diagram before and after voltage loop compensation

由图 5 可见, 补偿后  $f_c = 1 \text{ kHz}$ , 相位裕度接近  $45^\circ$ , 系统的稳定性较好。

## 4 实验装置软硬件平台

根据上述设计和仿真的参数, 搭建了基于 PSFB 技术的 DC/DC 变换器实验装置。

### 4.1 硬件电路

实验装置硬件电路结构示意图如图 6 所示。其中主电路部分(虚线框内)与图 1 一致, 控制电路主要通过霍尔检测电路和信号调理电路采集装置实际的  $U_o$ ,  $I_{\text{rect}}$ ,  $U_{\text{in}}$  和  $i_L$ , 并将上述信号转换为可供单片机(灰虚线框)进行 A/D 转换的  $0 \sim 3.3 \text{ V}$  模拟量。转换后的数字量信号会经过软件保护判断、电压闭环调节、移相角控制和超前、滞后桥臂的 PWM 生成等环节; 单片机输出 4 路 PWM 信号, 通过电平转换电路、隔离驱动电路后可直接驱动开关管 (MOSFET,  $V_1 \sim V_4$ ) 导通和关断, 实现电源到负载的能量传输。

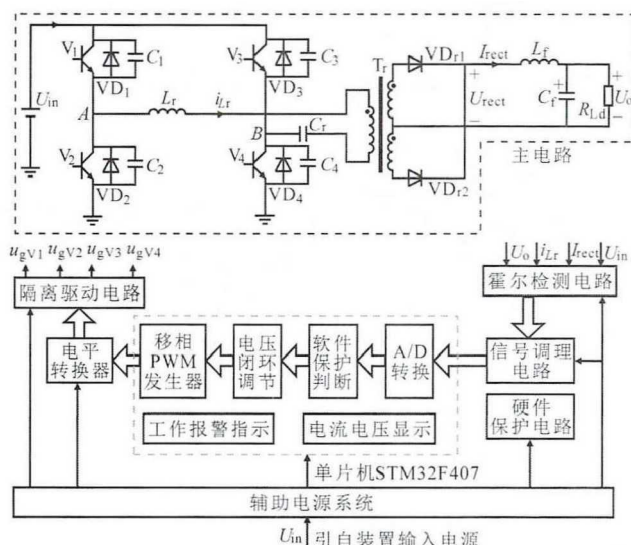


图 6 电路结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of circuit structure

实验装置硬件电路结构中还包含辅助电源系统, 主要给上述控制电路、驱动电路和单片机提供工作电源。辅助电源系统为一体化电源设计模式, 电源引自实验装置输入电源  $U_{\text{in}}$ , 通过数个高品质 DC/DC 电源模块实现了宽范围输入的辅助稳压电源系统:  $24 \text{ V}$ ,  $\pm 15 \text{ V}$ ,  $-9 \text{ V}$ ,  $5 \text{ V}$ ,  $3.3 \text{ V}$  等, 具体型号和技术参数详见第 4.2 节。

### 4.2 硬件平台元器件清单

此处单片机 STM32F407 实现实验装置数字控制, 控制流程如图 7 所示。该实验装置中全桥开关采用 MOSFET、次级整流二极管选用肖特基二极管、驱动电路采用驱动芯片+外围电路的实现方



式。装置所需元器件:MOSFET 型号IRFB4410ZPbF,  $U_{DS}$  为 100 V,  $I_D$  为 75 A, 代号为  $V_1 \sim V_4$ , 数量为 4 只; 二极管型号为 VBT3080S,  $U_{RM}$  为 80 V,  $I_{FM}$  为 30 A, 代号为  $VD_{r1}$ ,  $VD_{r2}$ , 数量为 2 只; 驱动芯片型号为 1EDI20I12AF, 输入电压范围 3~15 V, 数量为 4 只; 电流霍尔型号为 LA25\_NP/1:100, 电流变比 1:100, 数量为 2 只; 电压霍尔型号为 LV 25-P,  $I_{PN}$  为 10 mA,  $I_{SN}$  为 25 mA, 数量为 2 只; 辅助电源模块型号 URB2405S-6WR3, 输入输出电压为 24 V/5 V, 数量为 1 只; 电源芯片型号为 BL1085-3.3, 输入输出电压为 5 V/3.3 V, 数量为 1 只; 驱动电源芯片型号为 QA03, 输入输出电压为 24 V/15 V (-9 V) 数量为 4 只; 以及磁芯材料、漆包线、电阻电容和安装材料若干。

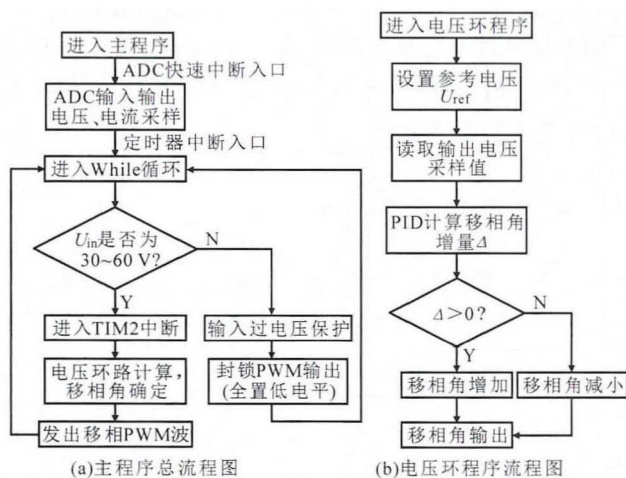


图 7 实验装置软件控制流程图

Fig. 7 Software control flowcharts of experimental device

## 5 实验结果

所设计的实验装置平台实物包含输入侧, 电压霍尔采样  $U_{in}$ , 辅助电源, 保护电路,  $V_1 \sim V_2$  驱动,  $V_3 \sim V_4$  驱动, 电平转换, 控制接口,  $V_1 \sim V_4$ , 谐振电感, 隔离变压器, 电流霍尔采样  $i_L$ , 电压霍尔采样  $U_o$ , 滤波电感, 电流霍尔采样  $i_o$ , EMI 滤波电感, 输出侧。完成了额定工况下装置的闭环测试, 测得电源转换效率 (含辅助电源及控制电源) 为 92.3%, 桥臂中点电压  $u_{AB}$ ,  $V_1$  和  $V_4$  的驱动电压  $u_{V1\_PWM}$ ,  $u_{V4\_PWM}$  以及  $i_L$  波形如图 8 所示。闭环调节时,  $u_{AB}$  的波形会随着  $U_{in}$  的变化而改变:  $U_{in}$  增大时,  $u_{AB}$  的正半周和负半周幅值会随着增大, 但持续时间会变短, 移相角  $\alpha$  相应增大,  $V_1$  和  $V_4$  同时导通时间变短;  $U_{in}$  减小时,  $u_{AB}$  的正半周和负半周幅值会随着减小, 但持续时间会变长,  $\alpha$  相应减小,  $V_1$  和

$V_4$  同时导通时间变长, 以此保证输出电压的稳定。测试结果表明: 所研制的实验装置具有转换效率高和输出电压稳定的特点, 能较好满足电力电子实验教学需求。

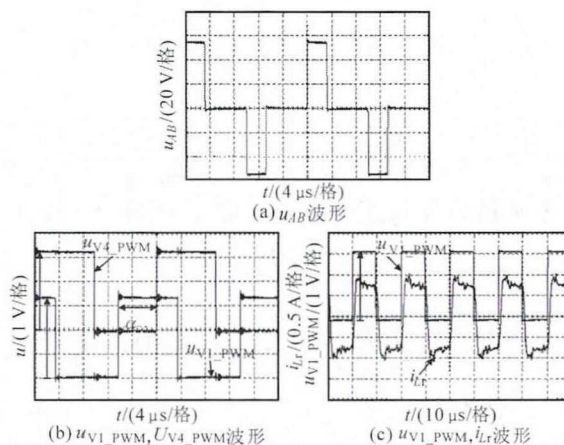


图 8 PSFB 实验装置实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms of PSFB experimental device

## 6 结论

在新工科和“双碳”大力发展新能源汽车背景下, 此处研制一套用于电力电子实验教学的车载移相全桥 DC/DC 变换器实验装置。基于小信号模型设计电压控制器, 并应用单片机 STM32F407 实现该装置的数字控制, 该装置采用一体化电源设计, 即输入电源同时为辅助电源与主电路供电, 实验结果表明装置具有效率高和输出电压稳定的特点, 能够满足实验教学需求。基于该实验装置能够设计基于项目驱动的综合实验任务, 同时可通过模块化设计灵活调节实验难度, 能够有效激发学生主动利用所学理论知识进行工程实践的兴趣, 改善教学效果和提升学生的学习体验。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 张方禹. 电动汽车高性能车载 DC/DC 变换器研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [3] 李志义. 对毕业要求及其制定的再认识—工程教育专业认证视角[J]. 高等工程教育研究, 2020(5): 1-10.
- [4] 赵修科. 开关电源中的磁性元件[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.
- [5] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.