

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314279

一种高精度宽范围的大功率开关电源设计*

魏沁成 曾敏

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510610)

摘要:为满足精密测量测试设备对电源高精度、高效率和高稳定的要求,设计了输出电压0~80 V、输出电流0~100 A、输出功率6 kW的开关电源。电源前级采用单相桥式半控整流滤波电路调节直流母线电压以改善电源在轻载时的输出表现,后级采用移相全桥电路实现大功率的电能变换。介绍了电源的组成结构和工作原理,详细描述了电源主电路中关键元器件的计算与选型。研制了一台样机,并进行了实验验证,实验结果表明:电源实际输出电压能够跟随设定电压,且在负载变化时仍能满足0.5%的精度要求,最高效率可达87.4%。

关键词: 开关电源;大功率;高精度;宽范围输出

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of high-power switching power supplies with high precision and wide output range

Wei Qincheng Zeng Min

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high precision, high efficiency and high stability of the precision measure and test appliances, the switching power supply with 0~80 V output voltage, 0~100 A output current and 6 kW output power is designed. The single-phase bridge semi-controlled rectifier filter is adopted as the former stage of the power supply, and the phase-shifted full-bridge converter is applied in the latter stage. The structure of the switching power supply and the working principles are introduced, and the calculation and selection of the key components in the main circuit are given. A prototype is developed, the experiments are carried out and the experiment results show that, the actual output voltage can track the reference voltage and meet the accuracy of 0.5% when the loads change, and the working efficiency can reach up to 87.4%.

Keywords: switching power supply; high power; high precision; wide output range

0 引言

开关电源工作效率高、功率密度大和输出范围广等特点,使其在通信、航空航天、仪器仪表和新能源等领域得到了广泛的应用^[1-5]。随着电子技术的高速发展,各种精密测量测试设备对电源的精度、可靠性和工作效率等性能指标提出了更高的要求,大功率开关电源常用的移相全桥拓扑在轻载时存在输出不稳定、电流应力大和效率较低等问题^[6-8],因此传统大功率开关电源已无法满足其要求。在大功率输出的前提下,为满足在复杂工况下正常工作的要求,实现高精度输出和宽输出范围等功能成为了大功率开关电源亟需解决的问题。

文献[9]利用遗传算法优化分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器,以获

得移相全桥变换器更好的动态特性;文献[10]采用利用与门信号并延长死区时间的控制策略,提高了移相全桥变换器轻载时的工作效率;文献[11-13]采用了新型移相全桥拓扑,在拓扑中添加辅助电路,以降低电源在轻载时的关断损耗并扩大零电压开关的范围,改善电源的输出表现。目前文献基本通过采用新型控制策略或新型拓扑结构来提高电源在全输出范围的输出表现,但是上述方法均存在电路复杂和设计困难等不足,本文通过在不同负载情况下调节直流母线电压,以提高电源轻载时的输出表现,具有逻辑清晰和实现简单等特点。

本文前级用单相桥式半控整流滤波电路替代全波整流滤波电路,后级采用移相全桥拓扑结构,研制了一台可用于高精密度测量测试设备的高精度、宽输出范围的大功率开关

收稿日期:2023-08-01

* 基金项目:广东省自然科学基金(2021A1515011773)、广州市科技计划项目(2023B03J1329)资助

电源,输入为单相 220 V 交流电,输出电压为 0~80 V,输出电流为 0~100 A,最大输出功率为 6 kW,输出精度为 0.5%±30 mV。

1 大功率开关电源主电路设计

1.1 大功率开关电源组成及工作原理

所设计的大功率开关电源结构框图如图 1 所示,包括主电路和控制电路,其中主电路由单相桥式半控整流滤波电路、移相全桥逆变电路、变压器和全波整流滤波电路等组成;控制电路以 ARM 处理器为核心,负责信号给定、输出电压电流采样、以及产生可控硅触发信号和 IGBT 驱动信号。

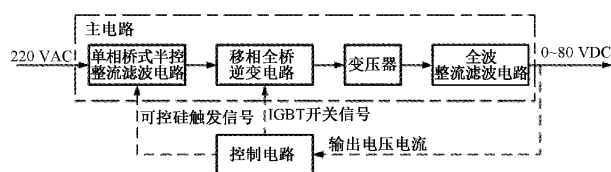


图 1 大功率开关电源结构框图

220 V 交流电通过单相桥式半控整流滤波电路后得到 150~300 V 的直流母线电压,再经过移相全桥逆变电路得到 20 kHz 的高频交流电,通过变压器降压隔离后,最后经过全波整流滤波电路输出 0~80 V 的直流电。桥式半控整流滤波电路通过控制可控硅的触发时间调整直流母线电压的大小,移相全桥逆变电路通过控制 IGBT 的开关时间调整电源输出电压,可控硅的触发信号和 IGBT 的开关信号均由控制电路给出,输出的电压电流采样后输入到控制电路调整控制信号,以实现高精度输出。

1.2 直流母线电压切换方案

为了增大大功率精密开关电源的输出范围、提高其轻载时的输出质量,电源一次整流部分用两个可控硅替代二极管组成桥式半控整流电路,通过控制可控硅的触发角调整直流母线电压。

根据电源后级移相全桥电路的输入与输出之间的关系,可将其简化为采用 PWM 的 Buck 变换器。由此可得电源的输出电压 V_o 与直流母线电压 V_{bus} 之间的关系为:

$$V_o = \frac{D_{eff}}{n} V_{bus} \quad (1)$$

当电源低电压输出时,移相全桥变换器中开关管的占空比很小,在实际应用中会导致电源输出不稳。如果降低直流母线电压,要达到相同的输出电压,就需要更大的占空比,使得电源在全输出范围内的输出更稳定。

由流经输出电感的电流纹波和输出电压纹波的表达式:

$$\begin{cases} \Delta I_L = \frac{(V_o + V_{DR})(V_{bus} - nV_o)}{L_o f_s (V_{bus} + nV_{DR})} \\ \Delta V_o = \frac{\Delta I_L}{8C_o f_s} \end{cases} \quad (2)$$

可知,轻载时降低直流母线电压,可减小流经输出电感的电流,进而减小输出纹波。因此,推迟可控硅的触发时间,会改善电源在轻载时的输出质量。

直流母线电压的切换逻辑如图 2 所示,当时输出功率 $P_o \geq$ 设定功率 P_{ref1} 、输出电压 $v_o \geq$ 设定电压 V_{ref} 或输出电流 $i_o \geq$ 设定电流 I_{ref} 时,可控硅触发时间提前,增大直流母线电压;当 $P_o <$ 设定功率 P_{ref2} 、且 v_o 和 i_o 分别 $< V_{ref}$ 和 I_{ref} 时,系统工况从重载切换到轻载,延迟可控硅的触发时间,降低直流母线电压。为了避免 P_o 在临界值附近波动导致电源对轻重载工况判断的频繁切换,令 $P_{ref1} > P_{ref2}$ 。

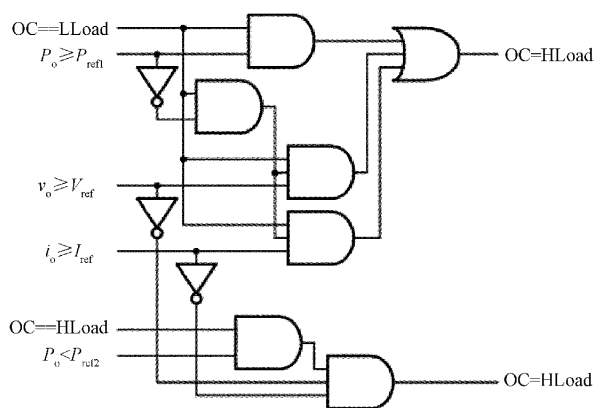


图 2 直流母线电压切换逻辑图

1.3 桥式半控电路设计

桥式半控整流滤波电路如图 3 所示,输入为 220 V 电网交流电 V_{ac} ,输出为 150~300 V 的直流母线电压 V_{bus} ,包括单相桥式半控整流电路和 LC 滤波电路。

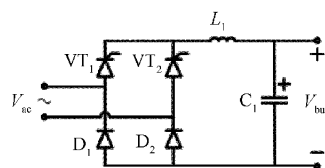


图 3 桥式半控整流滤波电路

假设电网电压有 10% 的波动,可得输入电压的最大值和最小值分别为:

$$\begin{cases} V_{ac(max)} = \sqrt{2} \times (1 + 10\%) \times V_{ac} \approx 342.24 \text{ V} \\ V_{ac(min)} = \sqrt{2} \times (1 - 10\%) \times V_{ac} \approx 280.01 \text{ V} \end{cases} \quad (3)$$

设电源的工作效率为 85%,由最大输出功率 $P_{o(max)} = 6 \text{ kW}$,可得电源的最大输入功率为 $P_{i(max)} = \frac{P_{o(max)}}{85\%} \approx 7058.82 \text{ W}$ 。流经整流桥的电流在输出功率最大且输入电压最低时达到最大值,即:

$$I_{BR(max)} = \frac{P_{i(max)}}{V_{ac(min)}} \approx 25.21 \text{ A} \quad (4)$$

根据输入电压的最大值 $V_{ac(max)}$ 和流经整流桥的最大电流 $I_{BR(max)}$,选择型号为 MFQ60A600V 的单相半控整流模块,其最大直流输出电流为 60 A,反向耐压值为 600 V。

LC 滤波电路选取 50 mH 的电感和 4700 $\mu\text{F}/450\text{ V}$ 的电解电容。

1.4 移相全桥电路设计

由于所设计的电源为大功率低压大电流输出,因此采用以 IGBT 为主功率器件的移相全桥逆变电路,输出整流滤波电路为全波整流滤波电路^[14],整个移相全桥电路如图 4 所示。

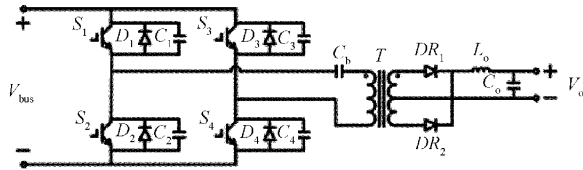


图 4 移相全桥电路

平衡体积与效率后选择移相全桥电路的开关频率 $f_s = 20\text{ kHz}$ 。

首先是变压器的设计^[15]。取输出滤波电感和整流二极管两端压降 $V_{L_o} + V_{DR} = 1\text{ V}$, 变压器副边最大占空比 $D_{s(\max)} = 0.8$, 根据移相全桥电路的输入输出和最大占空比等条件可得变压器的变比为:

$$k \leq \frac{V_{i(\min)}}{V_{o(\max)} + V_{L_o} + V_{DR}} \approx 2.6 \quad (5)$$

根据 A_p 法的计算结果,选择 EE85B 规格的铁氧体作为磁芯材料。由于电源的最大输出电流为 100 A,为降低铜损,变压器副边匝数选为 10,原边匝数则为 26。

其次是 IGBT 的选型。设变压器原边最大占空比 $D_{p(\max)} = 0.9$,则流经 IGBT 的峰值电压和峰值电流分别为:

$$\begin{cases} V_s = \sqrt{2} \times (1 + 10\%) \times V_{ac} \approx 342.24\text{ V} \\ I_s = \frac{P_{i(\max)}}{D_{p(\max)} \times \sqrt{2} \times (1 - 10\%) \times V_{ac}} \approx 28.01\text{ A} \end{cases} \quad (6)$$

根据上式选择型号为 FF100R12RT4 的 IGBT 模块,其额定电流为 100 A,额定电压为 1 200 V。

为避免变压器偏磁问题,在变压器原边串联隔直电容。由最大输出电流和变压器匝数比可得变压器原边电流有效值 $I_p = \frac{I_{o(\max)}}{k} \approx 38.46\text{ A}$ 。隔直电容的值由经验公式可得 $C_b \approx 30.90\ \mu\text{F}$ 。选用 6 个并联的 4.7 $\mu\text{F}/400\text{ V}$ 电容。

全波整流滤波部分选择型号为 MMF2X100J040 D 的整流模块,输出滤波电感的值为 38.8 μH ,输出滤波电容实际为 8 个 2 700 $\mu\text{F}/1\ 600\text{ V}$ 的电解电容并联。

在上述基础上,设计并制作了一台电源样机,如图 5 所示。

2 实验结果分析

2.1 负载变化时的电源输出响应

图 6 为负载变化时电源的输出电压和电流波形图,恒

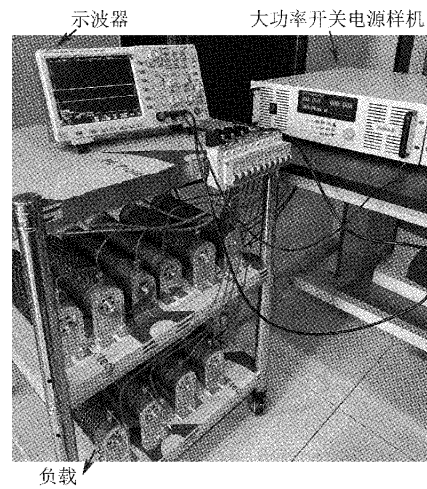


图 5 实验平台现场图

压输出 40 V,输出电流由 0 到 19 A 再到 38 A 最后到 57 A。由图 6 可知,随着输出电流的增大,输出电压基本维持在 39.85 V,满足电源的稳压和输出精度要求。

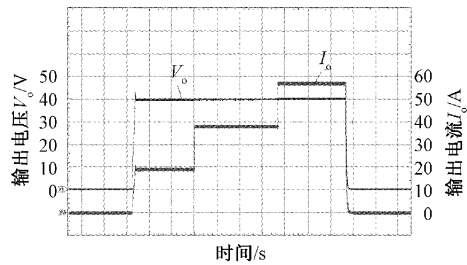


图 6 负载变化时电源的输出电压电流波形图

2.2 设定电压变化时的电源输出响应

图 7 为设定电压变化时电源的输出电压和电流波形图,设定电压由 0 到 20 V 再到 40 V 再回到 20 V 最后到 0 V,负载为 0.8 Ω 。通过图 7 可以得到,当设定电压为 20 V 时,电源实际输出电压为 19.96 V;当设定电压为 40 V 时,电源实际输出电压为 39.93 V。电源输出在不同设定电压时,其输出精度均控制在 0.5% 以内,满足输出精度要求。

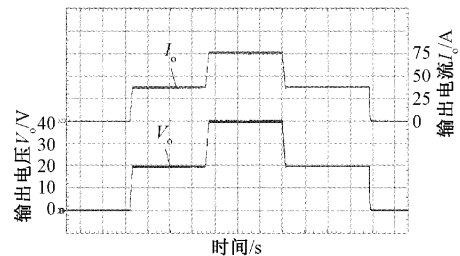


图 7 设定电压变化时电源的输出电压和电流波形图

2.3 电源工作效率

图 8 为电源从 350~5 500 W 的工作效率图。从图 8 可以看出,随着输出功率的增大,电源工作效率随之增大,

在输出功率为 5 500 W 时工作效率达到最大,为 87.4%。

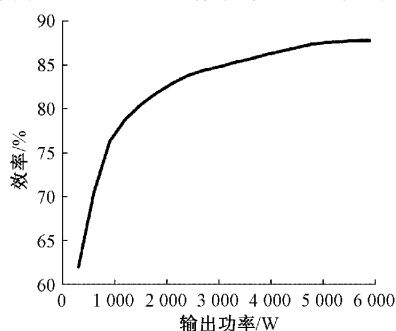


图8 电源工作效率图

3 结 论

本文设计了一款可用于不同高精度测量测试场景的大功率电源,前级采用单相桥式半控整流滤波电路以改善电源在轻载时的输出表现,后级采用移相全桥电路实现大功率输出;分析了切换直流母线电压的特点和逻辑,并给出了电源主电路中关键元器件的计算与选型。实验表明:电源在负载变化时的输出电压维持稳定;实际输出电压能够跟随设定电压变化,满足 0.5% 的精度要求;电源效率最高可达 87.4%。为进一步提高电源工作效率,可采用同步整流技术,后期将对相关方面内容进行研究。

参考文献

- [1] 姜月明, 俞洋, 彭喜元. 基于关键特征提取和 Elman 神经网络的开关电源多参数辨识[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 11-19.
- [2] 王瑶, 祝波, 杨德鑫, 等. 电压控制二次型 Buck 变换器实验装置设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(11): 88-93.
- [3] 郭文君, 姜帆, 贾立明, 等. 基于 FPGA 的开关电源数字控制技术[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 172-176.
- [4] 莫恭防, 韩鹏, 玉升灿, 等. 基于同步整流技术的高效率恒压恒流电源[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 102-107.
- [5] 郜纳馨, 于占东, 金鑫池, 等. 一种可切换工作模式的反激开关电源[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 29-35.
- [6] 王林艳, 岳秀梅, 许许. 电容滤波型移相全桥变换器拓扑优化与设计[J]. 电力电子技术, 2022, 56(4): 125-129.
- [7] 冷丽英, 莫瑞瑞, 姜新生, 等. 一种新型城轨车辆移相全桥变换电路研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 74-79.
- [8] SHIH L C, LIU Y H, CHIU H J. A novel hybrid mode control for phase-shift full bridge converter featuring high efficiency over full load range[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2019, 34(3): 2794-2804.
- [9] 黄永健, 刘毅力, 马龙涛, 等. 基于分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制的移相全桥 ZVZCS 变换器的研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 81-85.
- [10] KIM J W, KIM D Y, KIM C E, et al. A simple switching control technique for improving light load efficiency in a phase-shifted full bridge converter with a server power system [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29(4): 1562-1566.
- [11] BAKAN A F, ALTINTAS N, AKSOY İ. An improved PSFB PWM DC-DC converter for high-power and frequency applications [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2013, 28(1): 64-74.
- [12] CHEN J, LIU C, LIU H, LI G. Zero-voltage switching full-bridge converter with reduced filter requirement and wide ZVS range for variable output application[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2022, 69(7): 6805-6816.
- [13] ZHAO L, LI H Y, WU X, et al. An improved phase-shifted full-bridge converter with wide-range ZVS and reduced filter requirement [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2018, 65(3): 2167-2176.
- [14] 吴世杰. 移相全桥 ZVS AC-DC 变换器的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [15] 余颖, 肖静, 刘花香. 基于交错式 PFC 的高效率开关电源设计[J]. 电力电子技术, 2022, 56(11): 80-83.

作者简介

魏沁成, 硕士, 主要研究方向为大功率开关电源及其控制技术。

E-mail: yxwqcl23@163.com