

一种数字控制变匝比宽输出调压电力试验电源

廖世茜, 肖宇迪, 林健鹏, 毛行奎

福州大学电气工程与自动化学院 福建 福州 350108

摘要: 电力试验电源是电力工业中的重要设备, DC/DC模块作为电力试验电源的核心部分, 其设计合理与否影响着电源的整体性能。移相全桥变换器具有软开关、效率高等优点, 广泛应用于大功率场合。本文以ZVS移相全桥为主电路拓扑, 分析了一种数字控制电力试验电源的变匝数调压方案, 具有良好的应用前景。设计并调试了一台2.2kW, 输出电压25~220V可调的实验样机。样机输出稳定、效率高, 充分验证了设计方案的可行性。

关键词: 电力试验电源, 移相全桥, 数字控制

A Digital Controlled Test Power Supply with Wide Output Voltage Range and Changing Number of Windings

Liao Shixi, Xiao Yudi, Lin Jianpeng, Mao Xingkui

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract : Test power supply acts as an important role in electric power industry. The DC/DC modular is the core part of test power supply. It effects the overall performance of test power supply whether the DC/DC modular is reasonably designed. Phase Shifted Full Bridge converter is widely used in high power applications because of its soft switching and high efficiency. The article analyzes the design scheme of a digital controlled changing turns test power supply, taking advantage of the phase-shifted full bridge (PSFB) topology. The design scheme will have favorable application foreground. The 2.2kW experimental prototype which has stable output and high efficiency is built and verifies the design scheme.

Keywords : test power supply, PSFB, digital control

中图分类号: TN86 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2015)03-6-113

电力操作电源是用于电力系统的操作电源, 按供电电源的性质可分为直流操作电源, 交流操作电源。其中直流操作电源被广泛应用于发电厂和变电站中, 为控制负荷和动力负荷以及通信负荷等提供电源, 是当代电力系统控制、保护的基础。而交流操作电源的输入和输出都是交流电, 交流电的频率、相位及电压特性决定了其不能通过简单的并联方式来实现冗余和备份, 也就存在供电的单点故障点, 一旦出现故障无法用备用电源及时保证供电。因此, 采用

直流操作电源为电力系统二次设备提供电源具有较高的可靠性和稳定性。

随着电力电子器件和集成芯片的不断革新, 开关电源正朝着小型化、高频化发展^[1]。开关频率的提高缩小了电路中磁性元件的尺寸, 有助于实现电路的小型化, 但也造成了开关损耗的增大。传统的硬开关方式在开关管导通和关断期间会产生较大的开关损耗, 若采用合理的软开关技术, 将大大降低开关管的开关损耗, 提高转换效率。相比

模拟控制技术,数字控制技术具有控制电路简单、运行稳定、控制精度高等优点,在电源中应用越来越广泛。

ZVS 移相全桥变换器相比于简单的全桥变换器,只增加了一个谐振电感,就实现了原边侧四个开关管的 ZVS,广泛应用于中大功率开关电源场合,具有软开关、效率高等优点^[2]。本文基于移相全桥技术、数字控制技术,针对输出电压宽范围调节时移相角变化范围过宽、效率低的缺点,分析了一种数控 DC/DC 电力试验电源的变匝数调压方案。设计一台 2.2kW,电压 25V~250V_{dc} 连续可调、额定 220V_{dc}/10A 的实验样机,该样机具有输出电压宽范围可调、

效率高等特点,验证了设计方案的可行性。

1 设计分析

1.1 系统方案

普通 ZVS 移相全桥变换器的主电路原理图如图 1 所示,其实现软开关的基本思想为:通过谐振电感、变压器 T 的漏感与开关管寄生电容发生谐振,在开关管漏源极间电压下降为零后,再驱动开关管开通,实现软开关^[2]。电容 C_b 为隔直电容,防止变压器原边侧的直流分量造成变压器饱和^[3]。

ZVS 移相全桥变换器通过改变移相角的大小来调节输

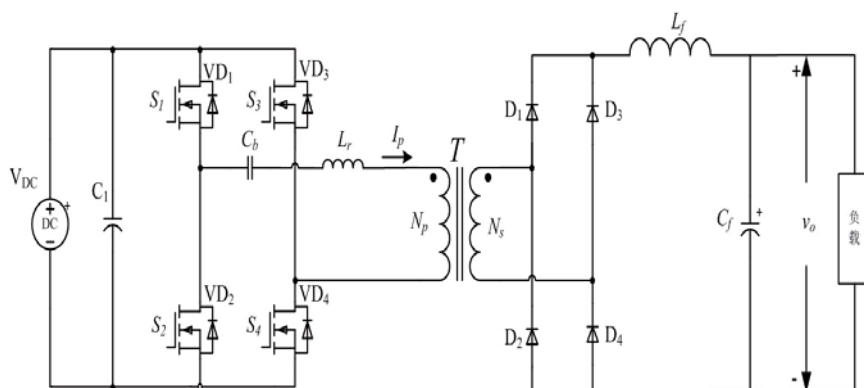


图1 普通ZVS移相全桥变换器原理图

出电压,当输出电压在宽范围调节时,移相角必然在很大的范围内变化。当输出电压较低时,移相角很大(即占空比小),变换器中的脉冲电流宽度小、峰值大,这一方面给变换器的参数设计带来困难,同时电流的变化率大,带来严重的电磁干扰^[4]。

为减小 ZVS 移相全桥变换器在输出电压宽范围调节时移相角的变化范围,提高电路特性,本文采用变压器变匝数调压方案,原理图如图 2 所示。由反向串联的 MOS 管

构成换挡开关 K_1 、 K_2 。当输出电压较低时, K_1 导通, K_2 关闭;当输出电压较高时, K_1 关闭, K_2 导通。 K_1 、 K_2 的驱动电压应当留有适当的死区,防止 K_1 、 K_2 同时导通,使变压器发生过匝间短路。

1.2 移相全桥变换器设计

来自电网的交流电经前级功率因数校正电路稳压得到 380V_{dc},作为后级 DC/DC 模块的输入电压进行输出电压调节。

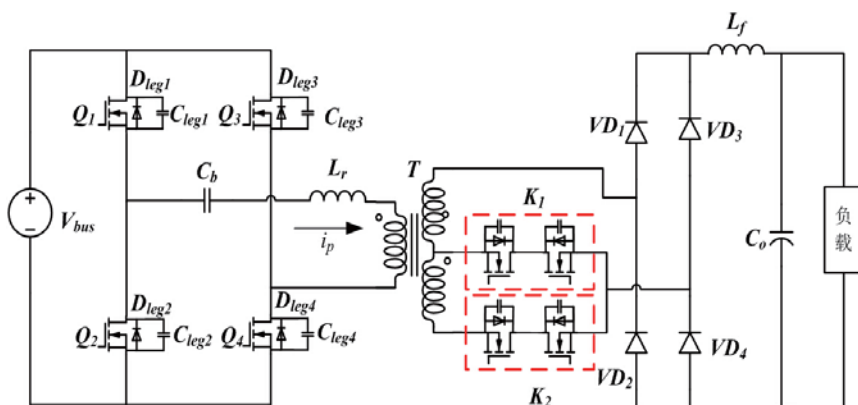


图2 变匝比调压ZVS移相全桥变换器原理图

因为本文研究的是DC/DC模块,所以输入用380V_{dc}电源代替。在大功率应用场合,移相全桥变换器因其开关管工作在软开关状态,能有效降低开关损耗,提高变换器效率而广受欢迎。

图3为移相全桥变换器的控制框图。变换器采用数字

控制策略,MCU选用Microchip公司的dsPIC33FJ32GS606。采样电路采样输出电压后送入MCU,经AD转换、程序运算后得到所需的驱动信号时序,继而通过隔离驱动电路驱动开关管,实现变换器的输出电压调节。

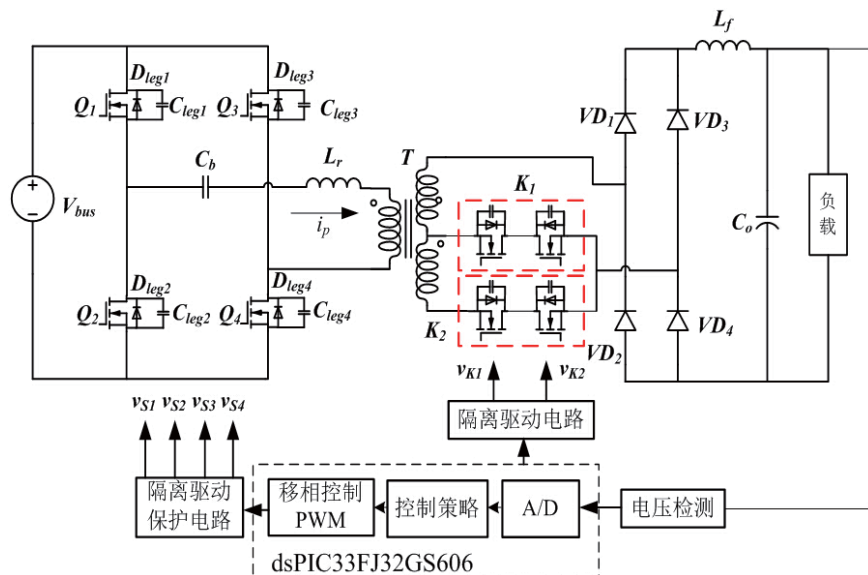


图3 移相全桥变换器控制框图

图4为移相全桥变换器的主要工作波形（具体工作原理可参考如^[2]等相关参考文献）。同一桥臂的两个开关管互补导通，不同桥臂的开关管错开一定的相位角开通。利用谐振电感 L_r 、变压器 T 的漏感与开关管DS间寄生电容的谐振，实现开关管的零电压开通与零电压关断，能有效提高变换器的效率和可靠性。

谐振参数的设定对变换器的软开关效果至关重要。若选用开关管漏源间电容 C_{oss} 作为谐振电容,则谐振电感的

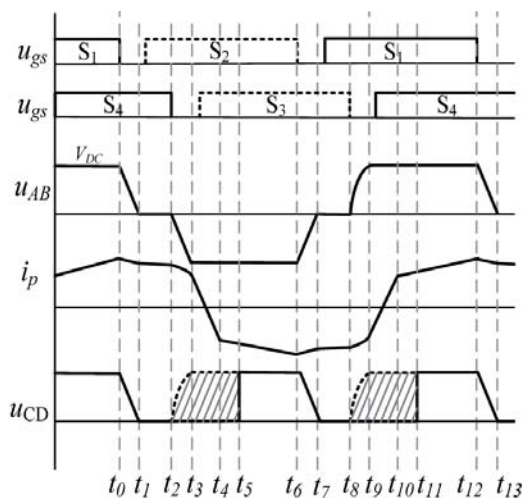


图4 移相全桥变换器主要工作原理波形

电感值 L_r 应当满足下列条件：

$$L_r \geq 2C_{oss} \times \left(\frac{V_{in}}{i_{p_pk(min)}} \right)^2 \quad (1)$$

其中 $i_{p_pk(min)}$ 为超前臂实现ZVS时的最小原边电流峰值^[5-7]。

图5为移相全桥变换器数字控制程序流程图。采样电路将输出电压采样量送入MCU,经AD转换、PI运算后

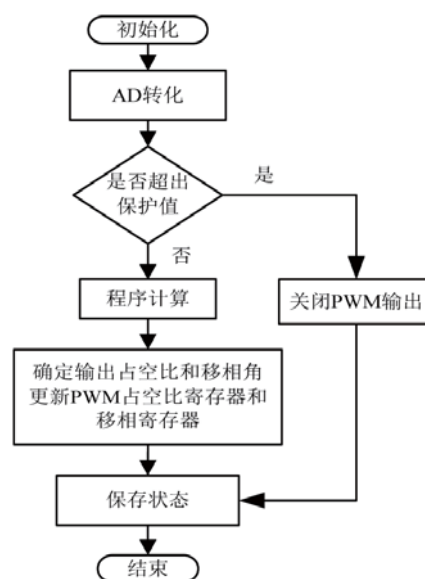


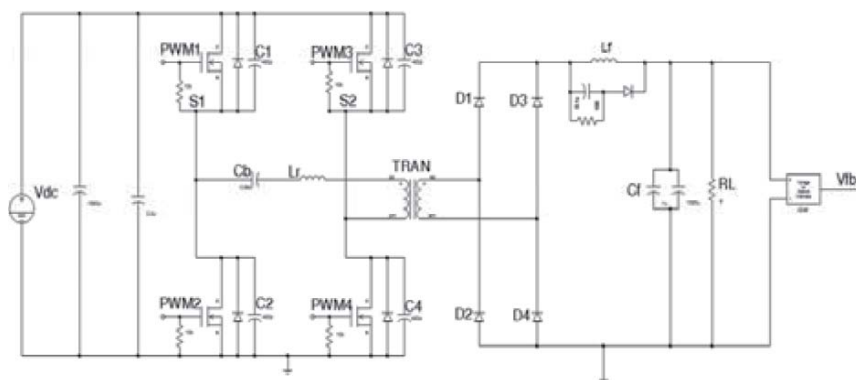
图5 移相全桥数字控制程序流程图

得到所需的驱动信号时序，继而通过隔离驱动电路驱动开关管，实现变换器的输出电压调节。

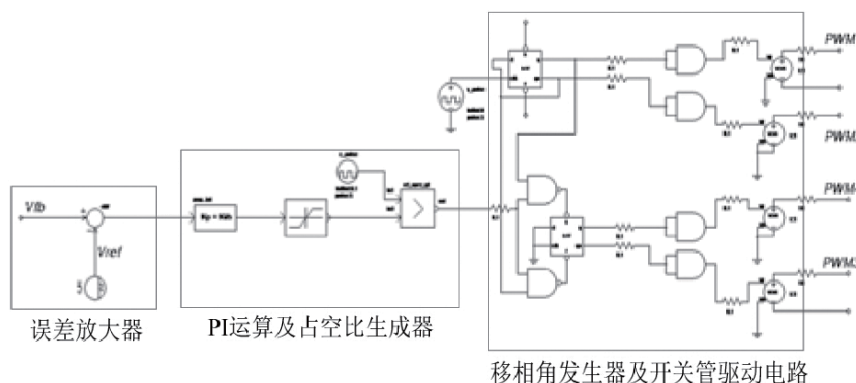
2 仿真分析

为了初步验证电路的工作原理及电路参数设计的合理性，使用 Saber 仿真软件进行闭环仿真分析。其仿真电路

如图 6 所示。图 6(a) 为变换器主电路拓扑，假设开关管为理想开关，在理想开关管的两端并联二极管和电容，用于模拟实际器件。因为使用了理想开关管，因此直接采用芯片的图腾柱输出来驱动开关管；变压器选用理想变压器。仿真参数为：输入电压 $380V_{dc}$ ，移相全桥变换器开关频率 $65kHz$ ，谐振电感 $20\mu H$ ，隔直电容 $0.66\mu F/630V$ ，变压器原



(a) 主电路



(b) 控制电路

图 6 Saber 仿真电路图

副边变比 30:24。图 6(b) 为变换器控制电路。在误差放大器中，输出电压采样量与基准比较得到误差信号，经 PI 运算后得到占空比，移相角生成器根据占空比得到变换器所需移相角，并驱动主电路中四个开关管，实现输出电压调节。

图 7 为 ZVS 移相全桥变换器输出电压 $220V_{dc}$ ，带载 $2.2kW$ 时的仿真波形。可以看出，各个开关管在漏源极间电压降为零以后才开通，因此实现了零电压开通。

仿真结果初步证明参数设计的合理性。

3 实验结果分析

基于以上分析，设计了一台实验样机。样机参数如下：输入电压 $380V_{dc}$ ，输出直流电压 $25V \sim 250V_{dc}$ 连续可

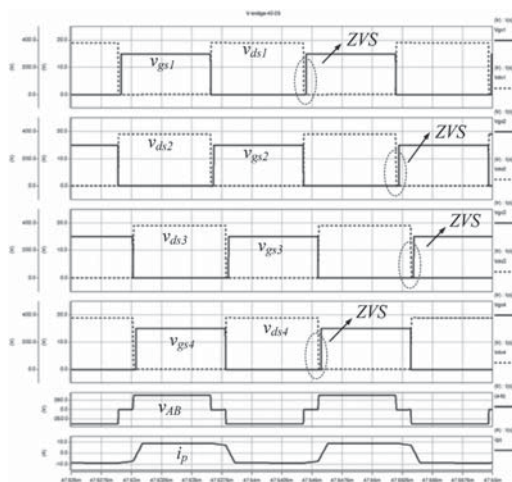


图 7 ZVS 移相全桥变换器 Saber 仿真波形图

调, 输出电流最大 10A, 额定 $220V_{dc}/10A$ 。移相全桥变换器开关频率 65kHz, 开关管选用 IRFP460, 其漏源极间电容 $C_{oss}=480pF$, 谐振电感 $20\mu H$, 隔直电容 $0.66\mu F/600V$, 当输出电压低于 (或等于) $110V_{dc}$ 时, K_1 导通, K_2 关断, 变压器原副边变比 30 : 12, 而输出电压高于 $110V_{dc}$ 时, K_2 导通, K_1 关断, 变压器原副边变比 30 : 24。实验样机如图 8 所示。

移相全桥变换器工作波形如图 9~11 所示: 图 9 则为不同输出电压、输出电流等于 10A 时 Q_1 、 Q_4 的驱动电压、两桥臂中点电压 v_{AB} 及原边电流波形 i_p , 可以看出变换器在不同的输出电压条件下, 都可以很好地工作; 图 10 为输出电压 $220V_{dc}$ 、不同带载情况下超前臂开关管 Q_1 的驱动电压 v_{gs} 、漏源极电压 v_{ds} 以及谐振电感电流 i_p 波形, 在很宽

的负载范围, Q_1 均可以实现 ZVS; 图 11 为滞后臂开关管 Q_4 的驱动电压 v_{gs} 、漏源极电压 v_{ds} 以及谐振电感电流 i_p 波形, 当带载 50% 以上, Q_4 实现 ZVS。

为对比固定匝数与变匝数调压时变换器的电路特性, 先固定变压器副边绕组为 24 匝, 在输入电压 $380V_{dc}$ 条件下, 各输出电压下测得实验样机效率数据如表 1 所示。当输出电压分高于 (或等于) $110V$ 时, 效率在大部分负载条件下均大于 90%, 最大为 95.47%。而输出电压低于 $110V_{dc}$ 时, 变换器效率较低, 最低达 74.05%。

表 1 固定副边绕组为 24 匝时变换器效率的测试数据

	25V	75V	110V	220V	250V
1/4 载	74.05	87.46	91.20	94.69	93.12
1/2 载	75.87	90.40	92.36	95.47	94.97
3/4 载	75.45	89.43	91.25	94.93	94.66
额定载	74.09	88.18	89.72	94.24	94.39

采用变匝比调压方案, 当输出电压低于 (或等于) $110V_{dc}$ 时, K_1 导通, K_2 关断, 变压器副边绕组为 12 匝; 当输出电压高于 $110V_{dc}$ 时, K_1 关断, K_2 导通, 变压器副边绕组为 24 匝。测得输出电压低于 (或高于) $110V_{dc}$ 时的效率如表 2 所示。

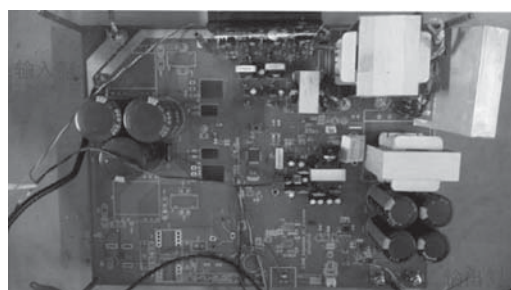


图 8 样机实物图

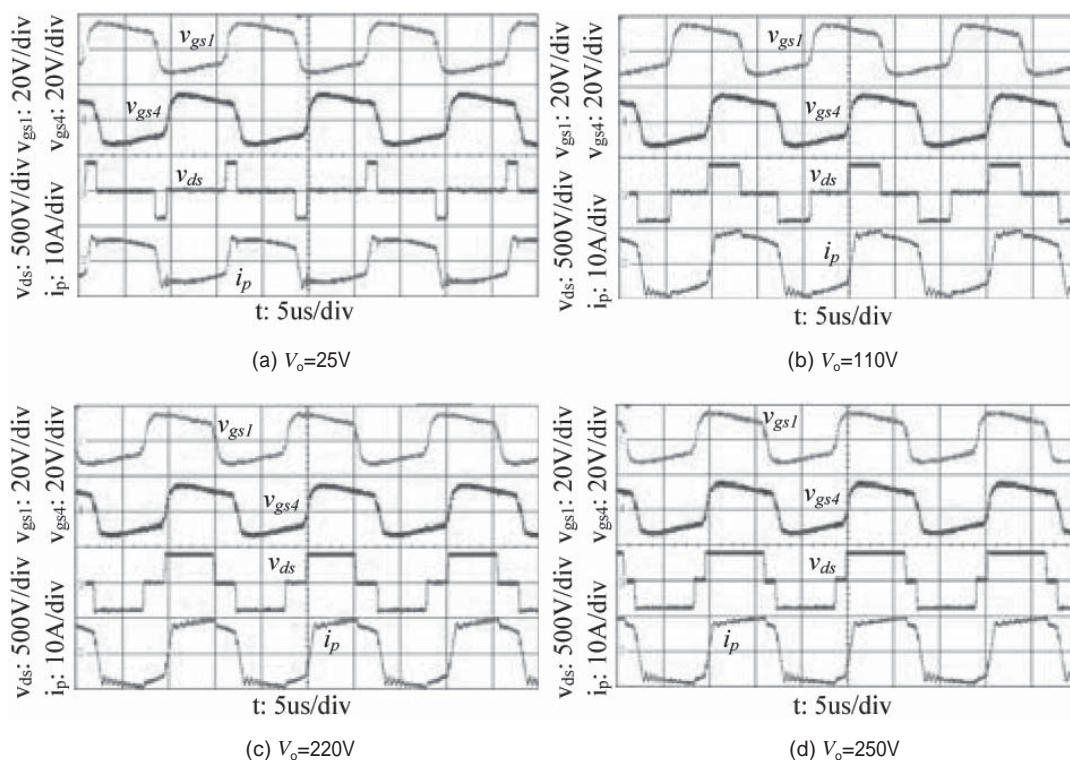


图 9 不同输出电压、输出电流等于 10A 时 Q_1 、 Q_4 的驱动电压、两桥臂中点电压 v_{AB} 及原边电流波形 i_p

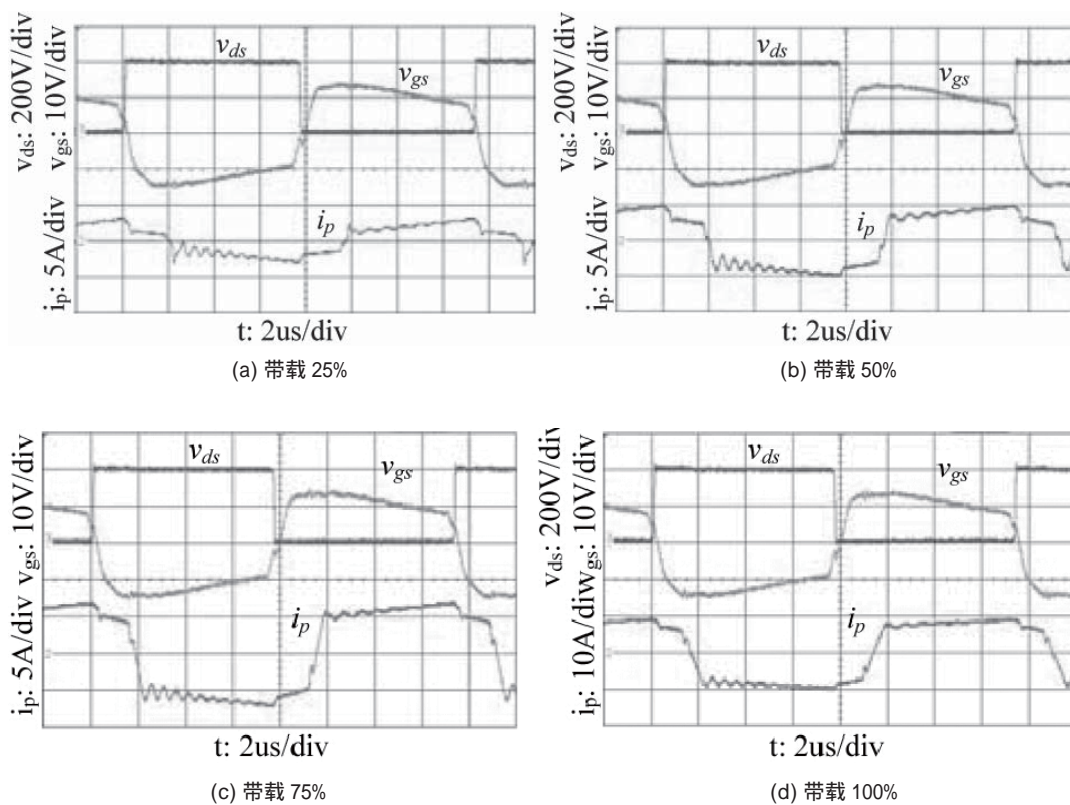


图 10 输出 $220V_{dc}$ 不同带载情况下, Q_1 驱动电压 v_{gs} 、漏源间电压 v_{ds} 、谐振电流 i_p

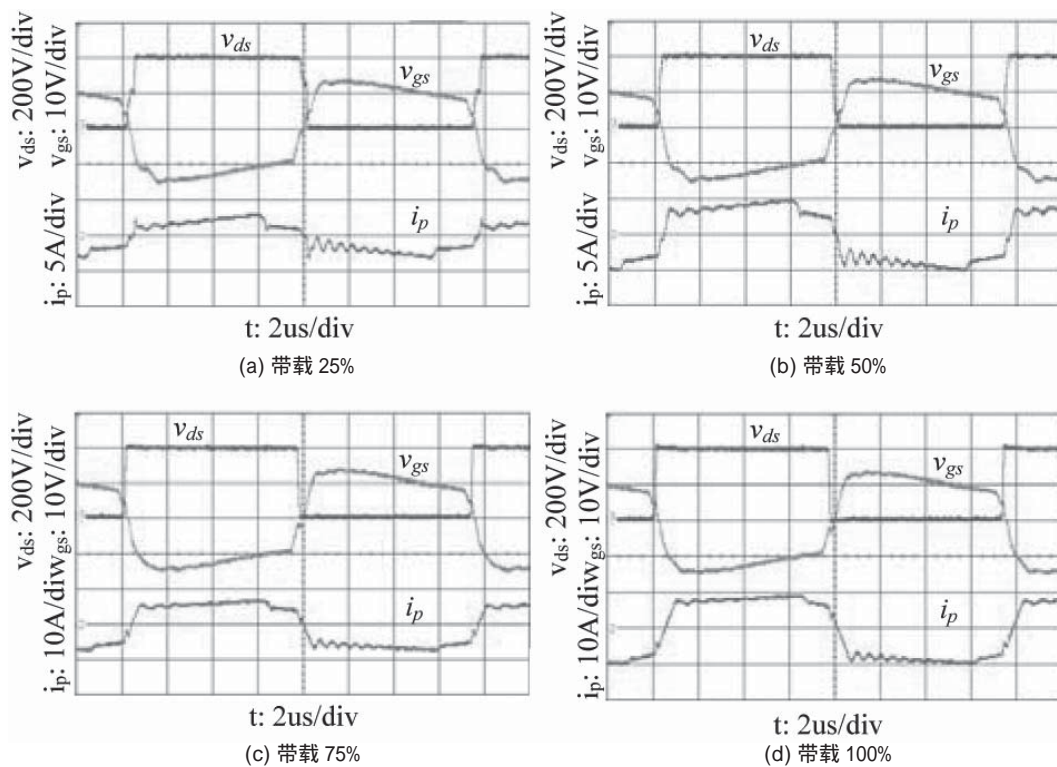


图 11 输出 $220V_{dc}$ 不同带载情况下, Q_4 驱动电压 v_{gs} 、漏源间电压 v_{ds} 、谐振电流 i_p

表 2 副边绕组为 12 匝、 V_o 110V 时的测试数据

	25V	75V	110V
1/4 载	80.25	89.92	92.54
1/2 载	83.16	92.54	94.47
3/4 载	83.25	92.29	93.88
额定载	80.74	91.31	93.66

对比表 1 和表 2，可以明显看出：采用变压器变匝比调压方案以后，当输出电压较低时，变换器效率有了显著的提高。这是由于副边绕组减半后，变压器原副边变比变为原来的两倍，这带来两个方面的好处：一方面，同样负载条件下，原边电流减小，开关管的电流峰值降低，通态损耗下降；另一方面，变压器匝比增加，占空比丢失现象得到很大改善，减小了占空比丢失期间原边电流在变压器原边循环造成的无功能量损失。

结论

本文针对目前可调直流电源的市场需求，分析了一种数控可调直流开关电源模块的设计方法。采用全桥变换拓扑和移相控制方案，在大功率场合有良好的应用前景。研制出一

台额定功率 2.2kW 的实验样机。实验结果表明，样机输出效率高、输出电压可调范围宽，充分验证了设计方案的可行性。

参考文献

- [1] Sanjaya Maniktala. 开关电源设计与优化 [M]. 北京：电子工业出版社，2004.
- [2] 周玉飞. 大功率移相全桥变换器若干关键技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007.
- [3] 沈燕群，姚刚，何湘宁. 带隔直电容的移相全桥 DC/DC 变换器特性分析 [J]. 电力电子技术，2005，39（3）：11-13.
- [4] 严家耀. 宽调节开关电源可选择的一种电路结构 [J]. 电子设计应用，2003（6）：81-84.
- [5] 杨旭，赵志伟，王兆安. 移相全桥型零电压软开关电路谐振过程的研究 [J]. 电力电子技术，1998，32（3）：36-39.
- [6] 阮新波. 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术（第二版）[M]. 北京：科学出版社，2013.
- [7] 王敏. 3kW 移相全桥软开关充电机的设计与研究 [D]. 大连：大连理工大学，2013.

作者简介

廖世茜（1991-），男，福建三明人，本科，电气工程及其自动化专业，主要研究开关电源设计与制作，联系邮箱 595113723@qq.com。