

机车牵引系统高压直流电源的研究

李辉, 李宏

(西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对传统机车直流牵引电源存在的稳压效果差、电压响应速度慢以及线路压降大等问题, 设计了一种2 700 V/400 A连续可调、最大输出功率为1 080 kW的高压直流电源。该电源功率部分采用三相桥式整流结合降压斩波的方式, 减小输出电压电流纹波, 提高电源稳定性, 降低线路压降。控制部分采用DSP作为系统控制核心, 加快电压响应速度, 增加电源的灵活性, 而驱动部分采用2SD315A-33模块放大驱动IGBT。Matlab仿真结果和理论分析表明了系统设计方案的正确性及可行性。

关键词: 直流斩波电源; DSP控制; Matlab仿真

Research on high voltage DC power supply in locomotive traction system

LI Hui, LI Hong

(School Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor voltage stabilization effect, slow voltage response speed and large line voltage drop of traditional locomotive DC traction power supply, a high-voltage DC power supply with 2 700 V / 400 A continuously adjustable and maximum output power of 1 080 kW is designed. The power part of the power supply uses three-phase bridge rectification combined with step-down chopping to reduce the output voltage and current ripple, improve power supply stability, and reduce line voltage drop. The control part uses DSP as the system control core to speed up the voltage response speed and increase the flexibility of the power supply, while the driving part uses the 2SD315A-33 module to drive the IGBT. Matlab simulation results and theoretical analysis show the correctness and feasibility of the system design scheme.

Key words: DC chopper power supply; DSP control; Matlab simulation

0 引言

传统的机车牵引供电主要由三相交流电源、电动调压器、变压器和不可控三相整流桥四部分组成。该电源在实际应用中主要存在以下问题: ①输出电压由不可控整流桥直接提供, 电压波动较大, 电源稳定性差; ②线路损耗大, 有可能导致电动机达不到工作电压而发生堵转, 产生很大的电枢电流烧坏电动机; ③不同

等级直流电压是通过调压器调节得到的, 其响应速度慢^[1]。本文针对传统机车牵引电源所存在的问题, 利用PWM控制电路, 通过“斩波”将输入电压斩成方波, 其幅值可以通过控制电路来控制, 并能够保证输出电压的稳定性^[2]。采用数字信号处理(DSP)技术使得电源系统设计更加容易方便, 易于控制算法的实现, 加快了响应速度, 并且输出更加稳定。

1 高压直流电源主电路研究与设计

1.1 总体框图设计

本文设计的高压直流电源用于电力机车中电动机的驱动。以直流电动机为控制对象，为其电枢回路提供2 700 V/400 A的电压和电流。图1为高压直流电源的总体设计框图。其工作原理可简述为：输入的交流电先经过EMI滤波，抑制从交流电源线上引入的外部电磁干扰，避免斩波电源本身运行时向外部发出噪声干扰；然后经隔离变压器降压输入整流滤波电路，滤除输出直流波形内部的交流成分，使得输出直流电变得更加平直^[3-4]；再经降压斩波电路将恒定的直流电压变换成负载所需的可变直流电压。当负载发生变化时，控制电路要使直流电源输出稳定，需要对输出电压和电流进行采样，并将采样信号送往DSP控制器，通过控制电路闭环调节器的处理，输出含有调控信息的脉宽调制PWM信号，再通过驱动电路控制电力电子器件的开关，起到反馈调节的作用，使电源的输出特性更加稳定。

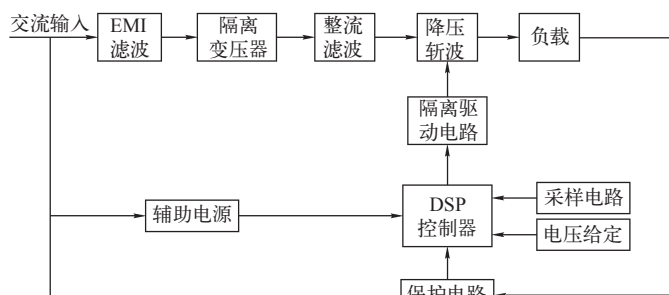


图1 电源总体设计框图

Fig. 1 Overall design diagram of power supply

1.2 Buck电路设计

为了便于对高压直流电源输出电压进行调制，主电路中引入了Buck电路^[3]。Buck电路拓扑结构如图2所示。其工作原理可描述为：当IGBT在控制脉冲的作用下导通时，电容C两端的电压开始升高，电感L内的电流逐渐增加，负载 R_L 两端有电压输出。在IGBT导通阶段，储存在电感中的磁能也不断增加，此时，续流二极管VD因承受反压而截止。经过时间

t_{on} 后，当控制信号使IGBT截止时，L中的电流逐渐下降，电感L两端产生感应电动势使VD导通，电感中储存的磁场能量便通过续流二极管VD传递给负载。当负载电压低于电容C两端的电压时，C向负载放电。经过时间 t_{off} 后，控制脉冲又使IGBT导通，上述过程重复发生。

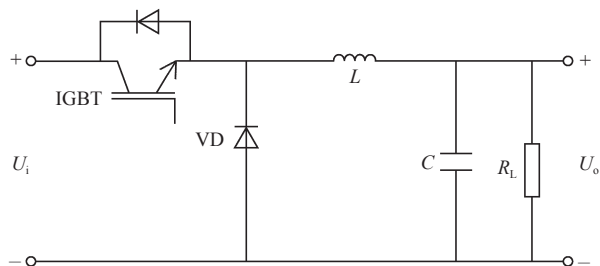


图2 Buck电路拓扑结构

Fig. 2 Buck circuit topology

根据其工作原理可以得到以下关系

$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = U_i \frac{t_{on}}{T} = DU_i \quad (1)$$

式中， t_{on} 为开关管的导通时间； t_{off} 为开关管的截止时间； T 为开关管的工作周期； D 为开关管的占空比。

由式(1)可以看出，输出电压的大小可以通过改变占空比 D 的值来控制。

在实际设计中，为了保证Buck电路安全稳定工作，需要对电路中的元器件进行合理选取^[4]，其具体计算过程如下。

(1) 高压开关管IGBT的选取

电网波动最大情况下，三相整流滤波输出的最大直流电压 U_{d-max} 为

$$U_{d-max} = 2.34U_{in}(1+10\%) = 3\,326.4\text{ V} \quad (2)$$

由于IGBT在关断过程中产生了较大的尖峰电压，为安全起见，取2倍的安全裕量，即6 652.8 V。

在最低电网输入情况下，三相整流滤波输出的最大平均电流 I_{d-max} 为

$$I_{d-max} = \frac{P_o}{\eta U_{d-min}} = 487.6\text{ A} \quad (3)$$

取2倍安全裕量选择IGBT额定电流，即975 A。综上所述，选择12个英飞凌公司1 200 V/600 A型号为FF600R12IE4的IGBT模块，通过6串2并的

方式构成斩波电路。

(2) 电感的选择

电感作为Buck型DC/DC开关电源中的储能元件,它决定着系统的带载能力、纹波率、纹波电压和外围元器件体积等性能参数,它是Buck型DC-DC开关电源设计中最重要元件之一。Buck型拓扑的电感设计公式为^[5]

$$L = \frac{(U_{in} - U_{out})U_{out}}{U_{in} I_o f_{sw}} \quad (4)$$

式中, r 为系统的电流纹波率; f_{sw} 为系统的开关频率; I_o 为系统的输出电流。

在开关电源中,考虑整体应力和外围元器件的面积,电流纹波率 r 一般取最优值,即 $r=0.4$ 。在最大输入电压、最小开关频率来选取电感值,以保证设计的性能参数满足设计需求。将 $U_{inmax}=3\,326.4\text{ V}$ 、 $U_{out}=2\,700\text{ V}$ 、 $I_o=400\text{ A}$ 和 $f_{sw}=20\,000\text{ Hz}$ 代入式(4)可得 $L=160\text{ }\mu\text{H}$ 。在实际应用中,一般会留取2~3倍的裕量,因此取 $L=480\text{ }\mu\text{H}$ 。

(3) 输出电容的选择

降压斩波电源中,纹波电压 ΔU_o 的大小主要由输出滤波电容 C 的值来决定,在设计降压型开关电源时,本文根据式(5)来选取滤波电容,即

$$C = \frac{U_o(1 - \frac{U_o}{U_{in}})}{8Lf^2\Delta U_o} \quad (5)$$

本文要求输出电压的纹波量为1%,因此 $\Delta U_o=27\text{ V}$,通过式(5)计算可得电容 $C=7\text{ }\mu\text{F}$ 。

2 控制电路

选用TMS320F2812 DSP芯片作为整个系统的控制核心,它具有集成度高、处理速度快和结构简单等特点,而且其拥有快速指令处理能力,可以实现大量控制算法和高速采样。控制电路是用于形成相应的控制信号,通过驱动电路对主电路开关器件的通断进行控制,从而实现设备的相关功能。控制部分主要实现PWM

生成、PWM调节、过电流和过电压检测与保护、输出电压/电流显示以及人机交互等功能。其控制电路框图如图3所示。

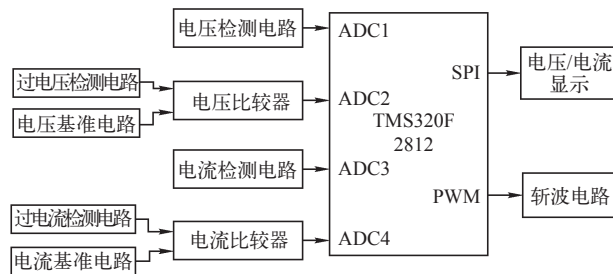


图3 控制电路框图

Fig. 3 Control circuit block diagram

3 驱动电路

斩波电源选用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为开关管,IGBT是由双极型电力晶体管和MOSFET复合而成的器件。其具备输入阻抗高、快速性好、热稳定性高及驱动电路简单等特点,而且导通压降低,能够承受更大的电压和电流。因此,在电力电子技术中得到了越来越广泛的应用。

本文中驱动电路选用2SD315A-33模块驱动IGBT。2SD315A-33可以驱动两路IGBT,有高达4 kV的隔离电压,每路输出的平均功率为3 W,具有-18~18 A的峰值输出电流,保护功能完备,同时也具备安全性、智能性和易用性等特点。2SD315AI-33模块内部结构框图如图4所示。内部电路可以分为三大功能模块:LDI模块既可以接收并处理来自控制电路的信号,并将此信号送往下一级IGD,也可以处理IGD经隔离变压器传送过来的过电流、短路等信号,并将其送给控制电路;IGD模块主要接收来自LDI的控制信号并输出驱动脉冲,同时,它还负责检测过电流、短路等故障^[7];DC/DC模块的主要作用是为IGD提供两路隔离电源。

4 仿真分析

为了验证系统设计方案的正确性及可行

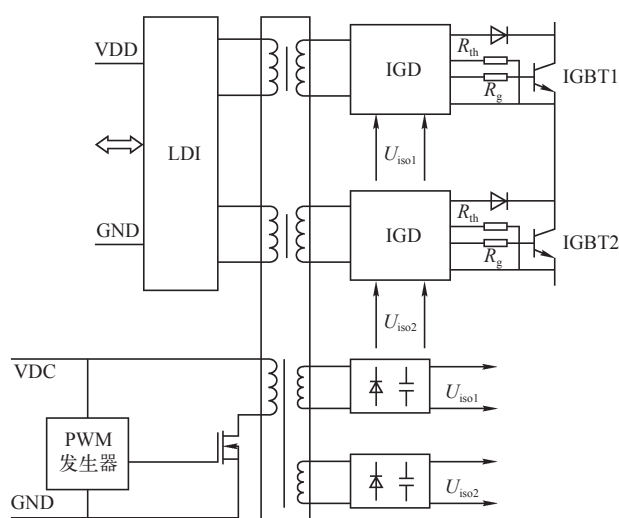
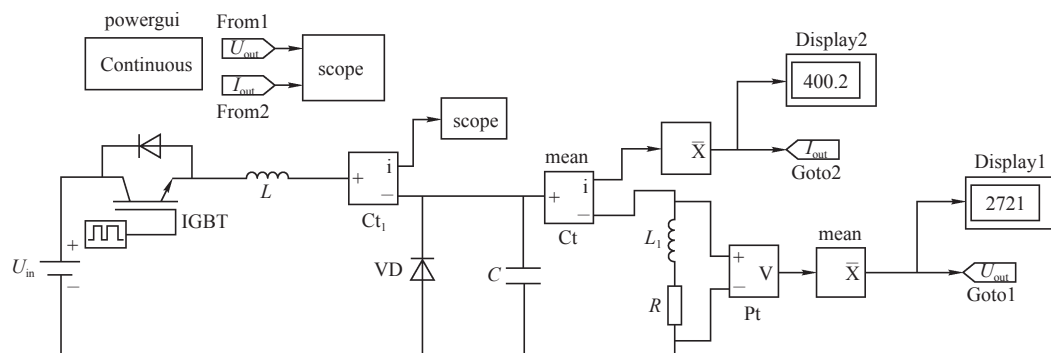
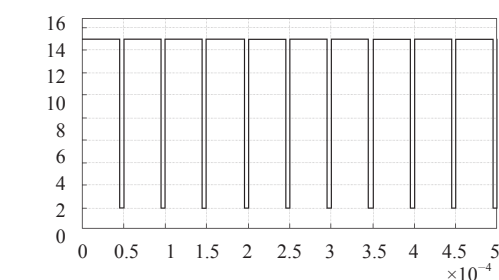


图4 2SD315AI-33驱动模块内部结构

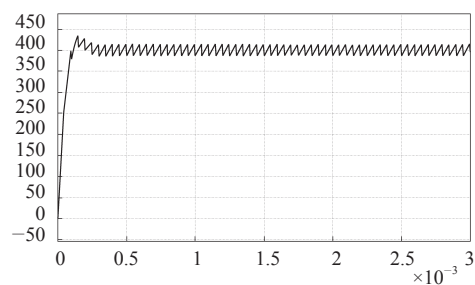
Fig. 4 Internal structure of 2SD315AI-33 driver module



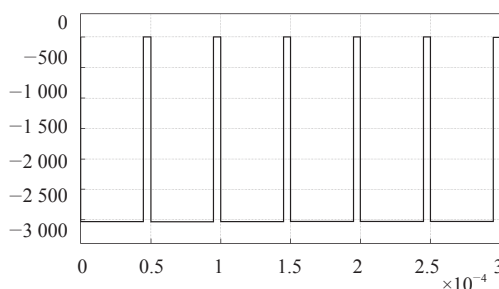
(a) Buck电路仿真模型



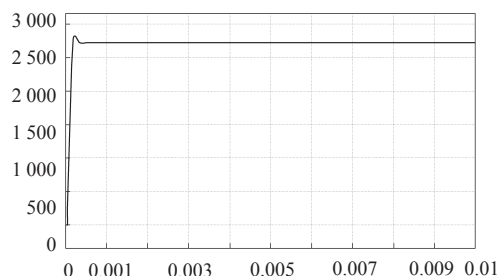
(b) 驱动波形



(c) 电感L电流波形



(d) 二极管电压波形



(e) Buck电路输出电压波形

图5 Buck电路仿真

Fig. 5 Simulation diagram of Buck circuit

性, 本文利用Matlab/Simulink仿真软件对斩波电路进行建模与仿真。仿真斩波电源参数 $U_{in}=3\ 024\text{ V}$, $L=480\ \mu\text{H}$, $C=7\ \mu\text{F}$, $R=6.8\ \Omega$, $f_{sw}=20\ 000\text{ Hz}$, $U_{out}=2\ 700\text{ V}$, $U_{ref}=2\ 700\text{ V}$, $L_1=0.1\text{ mH}$ 。仿真结果如图5所示。由图5可知, 输出电压在0.000 4 s后逐渐趋于稳定, 因此, 该Buck电路具有良好的快速性。系统稳定后输出电压平均值稳定在2 721 V, 误差在1%以内, 满足系统稳定性与准确性要求。在系统稳定后输出电流的纹波比较小, 其平均值在400.2 A左右, 误差在1%以内, 满足输出电流的要求。由此可知, 系统具有很好的快速性、准确性和稳定性, 且总体满足要求。

5 结束语

本文设计了一款基于DSP为控制核心的高压直流牵引电源。该电源在0.000 4 s后能够输出稳定的直流高电压,满足电源对快速性的要求;在系统稳定后,输出电流的纹波比较小,输出电流的平均值在400.2 A左右,满足输出电流的要求;采用三相桥式整流结合降压斩波的方案,稳压效果良好(误差在1%以内),解决了传统高压直流牵引电源存在的电路稳压效果差、线路压降大的问题。并且通过DSP可以对电路各个参数实现实时监控,还可利用通信功能对参数进行修正,极大地提高了电源灵活性。

参考文献

- [1] 邓景新,郭小定,陈晓可,等.矿用机车直流斩波电源研究与开发[J].矿业工程研究,2011,26(2):53-56.
- [2] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 高艳丽,孙阳,刘迪.基于DSP的直流斩波电

源的设计[J].自动化与仪器仪表,2012(4):82-84.

- [4] 高本友,张卫平,张晓强.基于Buck电路的双闭环控制系统设计的仿真研究[J].电子世界,2017(3):125-127.
- [5] Sanjaya Maniktala.精通开关电源设计[M].北京:人民邮电出版社,2008.
- [6] 史栋毅.应用DSP为控制核心的多路电弧电源[D].西安:西安石油大学,2019.
- [7] 蒋晓春,陈洛忠.高压IGBT集成驱动模块2SD315AI-33的应用研究[J].国外电子元器件,2003(11):41-44.

作者简介



李辉

李辉(1993-),男,硕士研究生,研究方向为大功率电力电子变换设备。

(收稿日期:2020-01-02) **EA**



典藏技术 革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展

《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自1982年创刊至今,已走过三十多年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋,也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱,在众多电类专业科技期刊中颇具影响力。



国内统一刊号: CN11-5249/TM 国际标准刊号: ISSN1672-9560 国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409