

一种新颖的 DC/DC 变换器的设计与实现*

何瑞金, 吴庆彪, 孙培德, 冯香枝

(东华大学信息科学与技术学院, 上海, 200051)

摘要 介绍了一种新颖的具有升降压功能的 DC/DC 变换器的设计与实现, 具体地分析了该 DC/DC 变换器的设计(拓扑结构、工作模式和储能电感参数设计), 详细地阐述了该 DC/DC 变换器控制系统的原理和实现, 最后给出了测试结果。

关键词: DC/DC 变换器, 降压斩波, 升压斩波, 储能电感, 直流开关电源

中图分类号: TM 4

在具有升降压功能的非隔离式 DC/DC 变换器中, Buck-Boost 变换器和 Cuk 变换器是负极性输出, Sepic 变换器和 Zeta 变换器是正极性输出, 但这两个变换器结构复杂, 都需要两个储能电感, 这必然导致变换器的损耗增加、效率变低, 且体积和质量大^[1, 2]。

本文针对实际研究项目中提出的要求, 摒弃采用上述各种变换器, 设计了一种新颖的具有升降压功能和正极性输出的 DC/DC 变换器, 并采用该 DC/DC 变换器研制出达到技术指标要求的直流开关电源, 获得了良好的应用价值。

1 DC/DC 变换器的设计

1.1 变换器拓扑结构

图 1 所示是设计新颖的 DC/DC 变换器的拓扑结构。该 DC/DC 变换器为前后级串联结构, 前级是由 T_1 、 T_3 、 D_1 、 D_2 、 L 、 C 、 R_1 、 R_2 构成降压变换电路, 后级是由 T_2 、 D_2 、 L 、 C 构成升压变换电路, 其中 D_2 、 L 、 C 均出现在前、后级变换电路中。

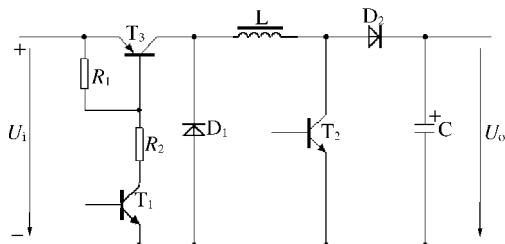


图 1 新颖的 DC/DC 变换器的原理图

从图 1 中可以看出, 采用 PWM 方式控制两个

主开关管 T_3 、 T_2 存在一定的困难, 因为它们的控制端不共地。为了实现两路控制信号共地, 也只能选用功率晶体管。为此, 在图 1 所示的主变换电路中增加了辅助开关管 T_1 , 且 T_3 由 NPN 型改为 PNP 型, 显然 T_1 、 T_2 是共地的, T_1 、 T_3 是同步开关的, 这就实现了两路控制信号的共地。这样, 原本通过控制 T_3 、 T_2 来控制电路的工作状态, 现在是通过 T_1 、 T_2 来控制, T_1 称为降压斩波辅助开关, T_2 称为升压斩波主开关、 T_3 称为降压斩波主开关。

1.2 工作模式的分析

假设所用电力电子器件理想、电感和电容均为无损耗的理想储能元件以及不计线路阻抗, 且变换器始终处于电流连续的状态。该 DC/DC 变换器有两种典型的工作模式——降压工作模式和升压工作模式, 下面分别来分析这两种工作模式^[2, 3]。

1.2.1 降压工作模式

当 T_2 截止, T_1 以 PWM 方式工作, 变换器处于降压工作模式。此时, 变换器与 Buck 变换器相比仅仅是多了一个二极管 D_2 , 而这一个二极管的加入对 Buck 变换器的工作无任何影响。因此, 处于降压工作模式的变换器等效于 Buck 变换器, 相应的电压变换关系为:

$$\frac{U_o}{U_i} = \quad (1)$$

式中: U_i ——输入电压; U_o ——输出电压; —— T_1 的占空比。

1.2.2 升压工作模式

当 T_1 全导通, T_2 以 PWM 方式工作, 变换器处于升压工作模式。此时, 变换器与 Boost 变换器相

* 收稿日期: 2003-11-19

比多了一个全导通的开关管 T_3 和一个二极管 D_1 , 而这两个器件的加入对 Boost 变换器的工作无任何影响。因此,处于升压工作模式的变换器等效于 Boost 变换器,相应的电压变换关系为:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - D_2} \quad (2)$$

式中: U_i ——输入电压; U_o ——输出电压; D_2 —— T_2 的占空比。

由此可见,该 DC/DC 变换器是将 Buck 和 Boost 两个变换器串联起来,通过对两个开关管 T_1 、 T_2 的配合控制获得降压工作模式和升压工作模式,从而实现升降压功能和正极性输出。在理想情况下,变换器的电压变换关系为:

$$\frac{U_o}{U_i} = \begin{cases} \frac{1}{1 - D_1} & \text{当处于降压工作模式} \\ \frac{1}{1 - D_2} & \text{当处于升压工作模式} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 储能电感参数的设计

由图 1 的拓扑结构可知,该 DC/DC 变换器只有一个储能元件——储能电感 L ,所以 L 必须能适应降压和升压两种不同的工作模式,以使变换器无论处于哪一种工作模式, L 都能存储足够的能量,从而在以 PWM 方式工作的斩波开关截止时能提供负载连续的电流。因此, L 是该 DC/DC 变换器的关键元件,其参数的选取直接影响到变换器能否正常工作。

考虑最典型的情况,假设输入电压的变化范围为 $U_{\min} \sim U_{\max}$,且当 $U_i = U_{\max}$ 时,变换器处于降压工作模式;当 $U_i = U_{\min}$ 时,变换器处于升压工作模式。所以,根据公式(1)、 U_{\max} 和 U_o ,可以得到 T_1 的最小占空比 D_{\min} ;根据公式(2)、 U_{\min} 和 U_o ,可以得到 T_2 的最大占空比 D_{\max} 。由于 D_{\min} 、 D_{\max} 分别代表了 L 在两种工作模式下的极端工作状态,因此可以通过分别计算这两个工作状态下的电感量,并取其中的大者作为 L 的设计参数,则 L 就能同时满足两种工作

模式的要求^[3]。具体设计步骤如下:

(1) 当处于极端降压工作状态 ($D_1 = D_{\min}$, $D_2 = 0$) 时,电感量 l_1 的计算公式:

$$l_1 = \max \left\{ \frac{U_{\max} - U_o}{i_L} \cdot D_{\min} \cdot T, \frac{U_o}{i_L} \cdot (1 - D_{\min}) \cdot T \right\} \quad (4)$$

(2) 当处于极端升压工作状态: ($D_1 = 1$, $D_2 = D_{\max}$) 时,电感量 l_2 的计算公式:

$$l_2 = \max \left\{ \frac{U_{\min}}{i_L} \cdot (1 - D_{\max}) \cdot T, \frac{U_o - U_{\min}}{i_L} \cdot D_{\max} \cdot T \right\} \quad (5)$$

(3) 取 l_1 、 l_2 中的大者作为 L 的设计电感量 l ,即:

$$l = \max(l_1, l_2) \quad (6)$$

式中: i_L ——储能电感电流允许的波动峰—峰值;
 T ——开关周期。

2 DC/DC 变换器控制系统的原理和实现

2.1 控制原理

图 2 所示是该 DC/DC 变换器控制系统的控制原理框图^[4],其应用背景是卫星储能/姿控两用飞轮能量回馈系统。

控制系统采用电压、电流双闭环串级控制结构,外环是电压环,内环是电流环。控制原理是电压给定 U^* 与电压反馈 U 进行比较,得到的电压误差经电压调节器输出作为电流给定 I^* , I^* 与电流反馈 I 进行比较,得到的电流误差经电流调节器输出对应 PWM 波的脉冲宽度,然后经 PWM 控制决定分配给哪个开关管,之后 PWM 波通过驱动电路驱动 DC/DC 变换器中相应的开关管工作。

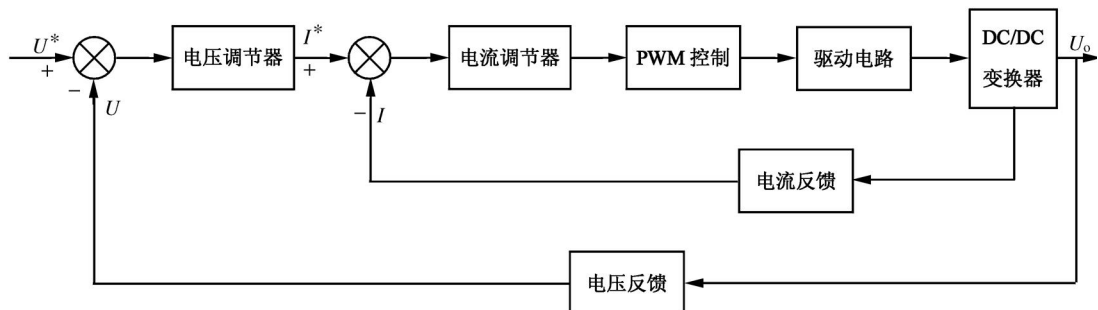


图 2 控制原理框图

以上的双闭环控制是针对工作在 PWM 方式下的开关管而言。由于变换器采用的是两个开关管的配合控制,两种不同的工作模式就对应两种不同的 PWM 开关方案,因此必须设计相应的控制逻辑分配单元来实现这两种开关方案,这在图 2 中以

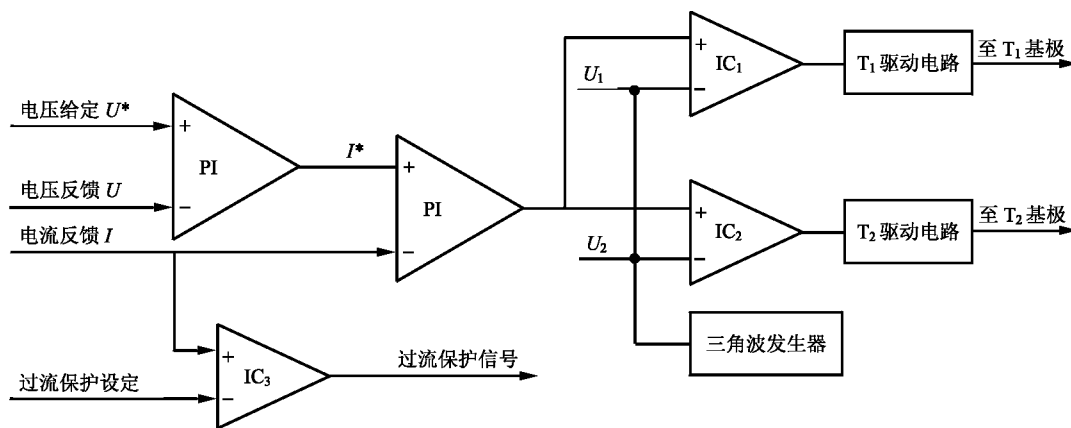


图 3 控制实现框图

控制电路由两级 PI 调节器、PWM 波产生电路、驱动电路、故障检测与保护电路等组成。

两级 PI 调节器是控制电路的核心控制单元,两级均为带限幅输出的 PI 调节器,前级是电压调节器,后级是电流调节器,前后级串联构成了以输出电压为主控制对象、输出电流为副控制对象的双闭环控制系统。电压环的作用是稳定输出电压,在输入电压或负载扰动作用下保证输出稳定。电流环是在稳态时跟随电压环,从而使系统动态响应快,调节性能好,也易于实现限流和过流保护。由于电压调节器的输出作为电流调节器的给定,故电压调节器的限幅值决定了电流调节器的最大输出电流。此外,电流调节器的限幅值限制了最大输出电压,防止了输出电压过高的非正常状态,从而保证了系统的安全可靠^[5]。

PWM 波产生电路负责两种 PWM 开关方案的实现,以满足变换器降压工作模式和升压工作模式的要求。由于需要产生两路控制信号,因此必须配合主变换电路进行特殊的电路设计,以解决控制逻辑的分配问题。如图 3 所示,电流调节器输出送到比较器 IC₁、IC₂ 同相端,由一个三角波发生器产生的三角波送到反相端,两路信号相比较叠加获得 PWM 波。分析可知,两种不同的 PWM 开关方案可以通过对送到比较器 IC₁、IC₂ 反相端的三角波加上不同的偏移电压 U_1 和 U_2 来实现。当电流调节器输出电压低于 5 V 时,比较器 IC₁ 与三角波有交点,输出 PWM 波,该波形用于驱动 T₁,而比较器 IC₂ 与

PWM 控制单元表示。

2.2 控制实现

控制系统的设计可以采用模拟控制方案和数字控制方案,这里以模拟控制方案阐述该 DC/DC 变换器控制系统的实现,如图 3 所示。

三角波没有交点,故无脉冲输出, T₂ 截止;当电流调节器输出电压高于 5 V 时,比较器 IC₂ 与三角波有交点,输出 PWM 波,该波形用于驱动 T₂,而比较器 IC₁ 输出高电平, T₁ 处于全导通状态;而且,降压工作模式和升压工作模式的切换是平滑过渡的。这样,就得到了逻辑上合乎要求的两路控制信号,然后再经驱动电路去驱动两个开关管 T₁ 和 T₂。

为了提高系统的可靠性,还设计了故障检测与保护电路,包括过流保护、过压保护、过热保护等。这主要利用比较器对电流、电压、温度等的检测值与设定的保护值比较,一旦发生超限现象,立即产生相应的保护动作。

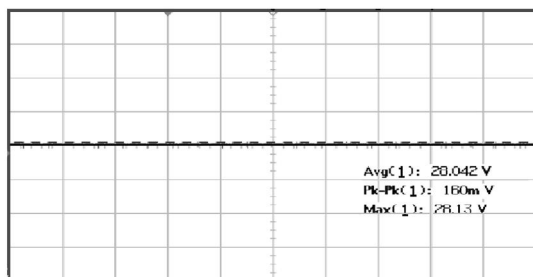
3 测试结果

根据上述控制原理和实现方案,研制出采用该 DC/DC 变换器作为主变换电路的直流开关电源(主要设计条件与要求:输入电压 12 ~ 40 V、输出电压 28 V、额定功率 200 W 及效率 85 %等)。该直流开关电源主要指标的测试结果如下:

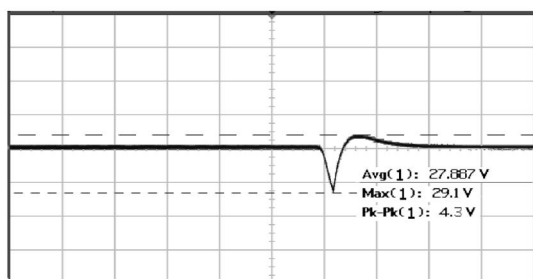
- (1) 输入电压允许范围:在输入电压为 10 ~ 40 V 的范围内,输出电压保持稳定;
- (2) 输出电压:在 50 % 负载条件下,平均输出电压为 28.01 V,输出电压稳定度 0.04 %;
- (3) 电压调整率:在各种负载条件下,电源电压调整率 0.18 %;
- (4) 负载调整率:以 50 % 负载为基准,负载电

压调整率 0.14 %;

(5) 输出电压纹波:当负载电流为 3.6 A 时,输出电压纹波峰—峰值(U_{p-p}) 250 mV,如图 4(a);



(a) 输出电压与纹波波形



(b) 负载突变时的动态响应波形

图 4 实测波形图

(6) 负载能力:当输出电流达到 7.5 A 时,输出电压仍保持稳定,对应功率 200 W;

(7) 效率:采用电阻性负载时,测试效率为 87 %;

(8) 动态响应:系统对输入电压和负载的突变能及时快速地响应,图 4(b)所示为负载突变时的动态响应波形。

测试结果表明,该直流开关电源具有良好的稳态性能和动态特性,各项主要技术指标达到或超过

卫星储能/姿控两用飞轮能量回馈系统研制项目所规定的指标要求。

4 结论

这里对一种新颖的 DC/DC 变换器的设计和实现进行了论述,采用该 DC/DC 变换器作为主变换电路的直流开关电源具有以下特点:

(1) 变换电路拓扑结构简单,具有明确的工作模式,易于实现模拟或数字控制。

(2) 采用电压、电流双闭环控制方式,获得较高的稳态精度和良好的动态性能。

(3) 具有升降压功能,正极性输出,源效应好,能适应大范围的输入电压变化。

(4) 仅有一个储能电感,具有可靠性高、效率高、体积小及质量轻等特点。

(5) 功率容量 500 W 以下,尤其适合作为卫星储能/姿控两用飞轮能量回馈系统、电动机制动再生能量回馈系统、风力发电系统和太阳能发电系统等电能变换系统的直流变换环节。

参 考 文 献

- [1] 张乃国. 电源技术. 北京: 中国电力出版社, 1998
- [2] 何希才. 新型开关电源设计与应用. 北京: 科学出版社, 2001
- [3] 阮新波, 严仰光. 直流开关电源的软开关技术. 北京: 科学出版社, 2000
- [4] 李爱文. 现代通信基础开关电源的原理和设计. 北京: 科学出版社, 2001
- [5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1997

Design and Implementation of a Novel DC/DC Converter

HE Rui-jin, WU Qing-biao, SUN Pei-de, FENG Xiang-zhi

(College of Information Science & Technology, Donghua University, Shanghai, 200051)

Abstract Design and Implementation of a novel boost-buck DC/DC converter are presented in this paper. Topology structure, work mode and dumping inductor parameter of this DC/DC converter are analyzed specifically. Principle and implementation of its control system are expounded in detail, with testing results given eventually.

Keywords: DC/DC converter, buck chopping, boost chopping, dumping inductor, DC switching power supply