

# 一种 DC/DC 变换器的设计与实现

**摘 要:** 本文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的设计), 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

## 引言

在具有升降压功能的非隔离式 DC/DC 变换器中, 升压/降压变换器和 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, 且体积和重量大。

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。

## DC/DC 变换器的设计

### 变换器拓扑结构

图 1 所示是设计的 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,  $D_2$ 、 $L$ 、 $C$  均出现在前、后级变换电路中。

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, 现在则改为通过  $T_1$ 、 $T_2$  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。

### 工作模式的分析

假设所用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。

#### 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, 变换器与降压变换器相比仅仅

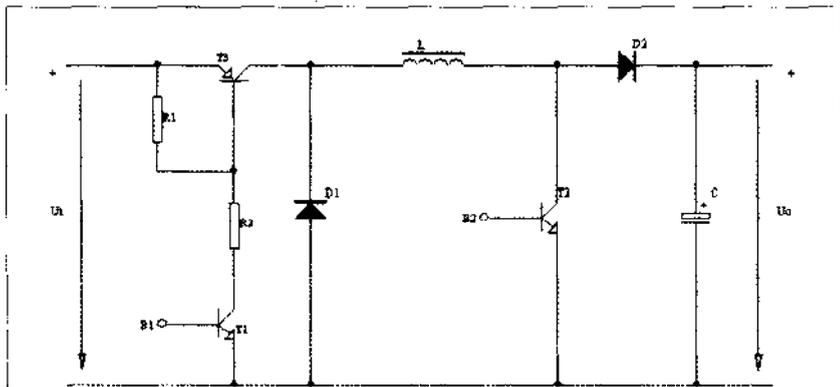


图 1 新颖的 DC/DC 变换器的拓扑结构

是多了一个二极管 $D_2$ ,而这一个二极管的加入对降压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降压变换器,相应的电压变换关系为:

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

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,变换器与升压变换器相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升压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升压变换器,相应的电压变换关系为:

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

由此可见,该DC/DC变换器是将降压和升压变换器串联起来,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。

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 $U_{i_{\min}} \sim U_{i_{\max}}$ ,且当 $U_i = U_{i_{\max}}$ 时,变换器处于降压工作模式;当 $U_i = U_{i_{\min}}$ 时,变换器处于升压

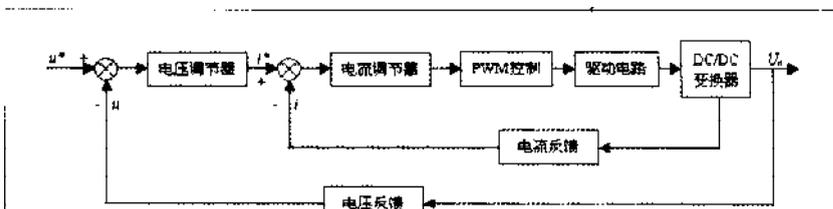


图2 控制原理框图

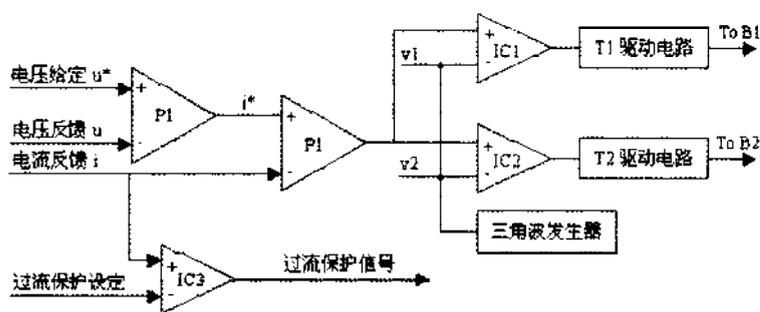


图3 控制实现框图

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 $\alpha_{\min}$ ;根据公式(2)、 $U_{\min}$ 和 $U_o$ ,可以得到 $T_2$ 的最大占空比 $\beta_{\max}$ 。由于 $\alpha_{\min}$ 、 $\beta_{\max}$ 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的电感量,并取其中的大者作为 $L$ 的设计参数,则储能电感 $L$ 就能同时满足两种工作模式的要求。

## DC/DC变换器控制系统的原理和实现

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,其应用背景是飞轮储能电力转换器的能量回馈单元的设计。

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。

以上的双闭环控制是针对工作在PWM方式下的开关管而言的。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PWM控制单元表示。

控制实现

控制系统的设计可以采用模拟控制或数字控制两种方案,本文以模拟控制方案阐述该DC/DC变换器控制系统的控制实现,如图3所示。

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,从而保证系统安全可靠。

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两个比较器的同相端,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两个比较器反相端的三角波加上不同的偏移电压 $v_1$ 和 $v_2$ 来实现。当电流调节器输出电压低于5V时,比较器1与三角波有交点,输出PWM波,该波形用于驱动降压斩波辅助开关 $T_1$ ,而比较器2与三角波没有交点,故无脉冲输出,升压斩波主开关 $T_2$ 截止;当电流调节器输出电压高于5V时,比较器2与三角波有交点,输出PWM波,该波形用于驱动升压斩波主开关 $T_2$ ,而比较器1输出高电平,

降压斩波辅助开关 $T_1$ 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。

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进行比较,一旦发生超限现象,立即产生相应的保护动作。

## 测试结果

根据上述控制原理和实现方案,研制出了采用该DC/DC变换器作为主变换电路的直流开关电源(主要参数:输入电压12~40V、输出电压28V、额定功率200W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10~40V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28.01V,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( $V_{p-p}$ ):在负载电流3.6A下, $V_{p-p}$  250mV;
6. 负载能力:当输出电流达到7.5A时,输出电压仍保持稳定,对输出功率 200W;
7. 效率:采用电阻性负载,测试效率 85%。
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。

## 结语

本文对一种新颖的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,获得良好的动态性能和较高的稳态精度。
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,具有可靠性好、效率高、体积小及重量轻等特点。
5. 适用于飞轮储能、电动机制动再生能量回馈、风力发电等直流母线电压变化范围大且需进行直流变换处理的中小功率应用场合。

## 参考文献

- 1 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,2000.1
- 2 何希才.新型开关电源设计与应用.北京:科学出版社,2001.2
- 3 张乃国.电源技术.北京:中国电力出版社,1998.9
- 4 季爱文.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

(收稿日期:2003-11-11)