

两端稳压软开关双向BUCK/BOOST变换器研究

朱成花, 张方华, 严仰光

(南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室, 南京, 210016)

摘要:研究了双向BUCK/BOOST变换器,指出通过合理设计电感与死区时间,可以使开关管零电压开通,并且其体二极管也是自然导通、关断,而无反向恢复问题,从而大大降低功率损耗。给出双向变换器两端稳压的控制方案,根据功率流的方向,自动选择工作在BUCK状态或是BOOST状态。该控制方案简单易实现,并能直接应用于其它需两端稳压的双向变换器。最后给出了24 V/48 V双向BUCK/BOOST变换器设计实例。设计结果表明,该变换器不仅体积小,重量轻,而且无论工作在BUCK状态还是工作在BOOST状态,均获得很高的效率。

关键词:变换器;双向;零电压开关;多电飞机

中图分类号:TM46

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2004)02-0226-05

Development of Dual Voltage Control Soft-Switching Bi-Directional Buck/Boost Converter

ZHU Cheng-hua, ZHANG Fang-hua, YAN Yang-guang

(Aero-Power Sci-Tech Center,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A soft-switching bi-directional Buck/Boost converter is presented. By a reasonable design of the power stage inductor and dead time, zero-voltage-switching of both switches is obtained, and the MOSFET body diodes are naturally turned on and off without the reverse recovery problem, so that the power dissipation is significantly reduced. A dual voltage control method for a bi-directional DC/DC converter is proposed. According to the direction of the power flow, the converter can automatically work in Buck mode or Boost mode. The method is simple and easy to be realized, and can also be directly applied to other bi-directional DC/DC converters which need the dual voltage control. Finally a design example of a 24 V/48 V bi-directional Buck/Boost converter is offered. The converter has a small volume and light weight. Experimental results show that the converter has a high efficiency both working in Buck mode and Boost mode.

Key words: converter; bi-directions; zero-voltage-switching; more electrical aircraft

双向DC/DC变换器具有双向功率流能力,在双向能量传输系统中能大幅度减小系统体积重量,广泛应用于多电飞机高压直流配电^[1,2]、蓄电池充/放电^[3,4]、UPS^[5,6]、太阳能发电^[7]等系统中。图1为多电飞机高压直流配电系统结构图。正常工作时,蓄电池充电,在系统中作为负载使用;起动或发电

机故障时,蓄电池给发电机提供起动能量或给关键负载供电,在系统中作为电源使用。与蓄电池相连的双向DC/DC变换器,需要根据功率流的方向来确定负载端,控制其输出电压恒定。

一般把DC-DC变换器的单向开关换成双向开关即可构成双向DC-DC变换器。现有双向功率器

收稿日期:2003-03-06;修订日期:2003-05-16

作者简介:朱成花,女,博士研究生,1976年5月生,E-mail:zhu_chenghua@hotmail.com;张方华,男,博士研究生,1976年3月生;严仰光,男,教授,博士生导师,1935年3月生。

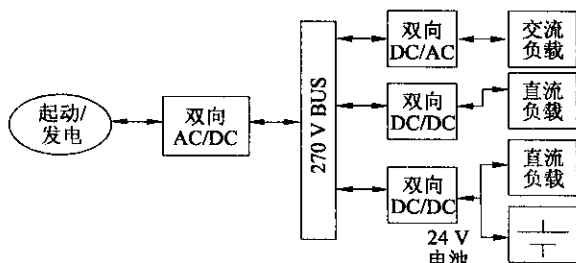


图1 多电飞机高压直流电源系统结构图

件(如Power MOSFET, IGBT等)的寄生二极管存储电荷大、反向恢复特性差,需要使用复合结构构成双向开关,增加了器件数量和成本。文[3]提出一种电感电流过零的ZVS实现策略,获得了较高的变换效率,但没有研究双向变换器两端稳压的控制方法,以及不同功率传输方向下调节器的设计等问题。

本文以双向BUCK/BOOST变换器为例,指出合理设计电感的大小及死区时间,可以实现两只MOS管零电压开通,其体二极管也是自然导通、关断,无反向恢复问题,从而降低开关损耗。研究并给出了双向变换器两端稳压的控制方案,根据变换器功率流方向的不同,自动选择工作在BUCK状态或是BOOST状态。分析了系统在不同的功率传输方向下的控制模型,给出了单闭环PID调节器的设计思路。最后进行了实验验证,结果表明两端稳压的控制方案与调节器设计方法的可行性。

1 变换器工作原理

双向BUCK/BOOST变换器(BUCK/BOOST BDC)主电路拓扑如图2所示。在一个开关周期内,电感电流有3种工作模式:

- (1)电感电流恒大于零;
- (2)电感电流有正有负;
- (3)电感电流恒小于零。

(1),(3)两种工作模式对应于常规的BUCK, BOOST变换器,这两种工作模式下 Q_1, Q_2 均是硬开关,并且由于体二极管的反向恢复问题,引起较大的电流尖峰,容易损坏开关管。

第(2)种工作模式下,一个开关周期内有6个工作模式,如图3所示,实线表明电流路径。

$[t_0, t_1]$: t_0 时刻前, Q_1 导通, 电感电流 i_L 线性上升。 t_0 时刻, Q_1 关断, D_2 自然导通续流, 电感电流线性下降, 到 t_1 时刻, Q_2 零电压开通。

$[t_1, t_2]$: t_1 时刻, Q_2 零电压开通, 电流仍通过

D_2 续流, 直到 t_2 时刻, 电流下降到零, D_2 自然关断。

$[t_2, t_3]$: t_2 时刻, D_2 自然关断, 电感电流在 U_b 的作用下经 Q_2 继续线性下降, 直到 t_3 时刻 Q_2 关断, i_L 下降到最小值 i_{p-} 。

$[t_3, t_4]$: t_3 时刻, D_1 自然导通续流, 电感电流线性上升, 到 t_4 时刻, Q_1 零电压开通。

$[t_4, t_5]$: Q_1 零电压开通后, 电感电流仍经 D_1 续流, t_5 时刻续流到零, D_1 自然关断。

$[t_5, t_6]$: D_1 关断后, 电感电流在 U_a 的作用下通过 Q_1 继续线性上升, 到 t_6 时刻上升到最大值 i_{p+} 。此后, 开始下一个开关周期。

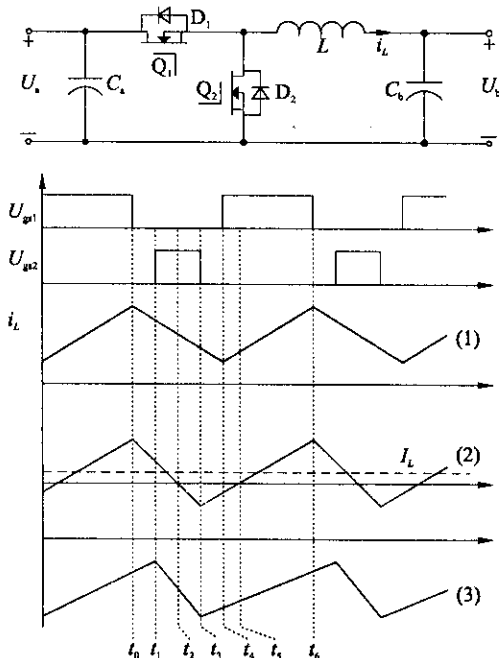


图2 BUCK/BOOST BDC 电感电流3种工作模式

由以上分析可知, 通过合理设计电感 L 的大小, 使变换器工作在第(2)种工作模式, 可以实现开关管的零电压开通, 以及体二极管的自然开通、关断, 避免其反向恢复问题。在第(2)种工作模式, 电感电流的峰峰值 i_{pp} 总是大于2倍的平均值, 由此有

$$\begin{cases} L < \frac{U_b(U_a - U_b)}{2I_L f_s U_a} \\ i_{pp} = \frac{U_b(U_a - U_b)}{L f_s U_a} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_L 为额定功率时电感电流平均值(不分方向); f_s 为开关频率。由于电感电流峰峰值大, 因此在第(2)种工作模式下, 宜采用多通道交错并联技术, 以减小输入输出电流纹波。为实现 Q_1, Q_2 的零电压开通, 要求 Q_1 必须在 $t_3 \sim t_5$ 期间开通, Q_2 在则必须 $t_0 \sim t_2$ 期间开通, 因此要求死区时间 t_d 小于 $(t_5 - t_3)$ 与 $(t_2 - t_0)$, 若取

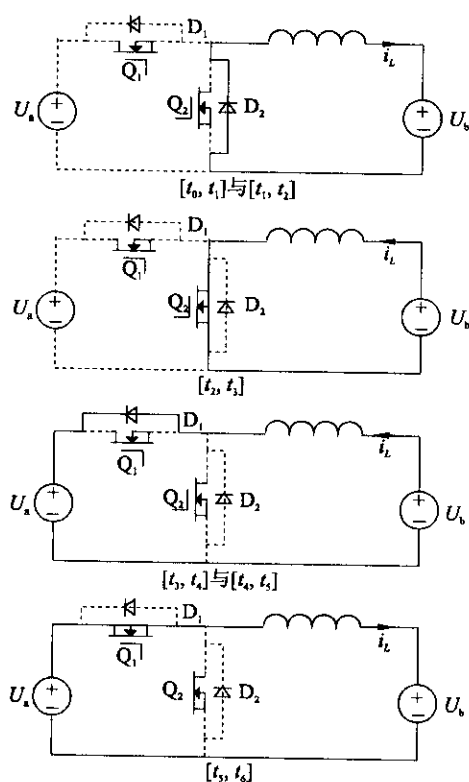


图3 BUCK/BOOST BDC第(2)种工作模式下工作模式

$$t_d = \frac{1}{2} \min[(t_2 - t_0), (t_3 - t_1)]$$

则有

$$t_d = \min \left[\frac{L \left(\frac{1}{2} i_{pp} + I_L \right)}{2U_b}, \frac{L \left(\frac{1}{2} i_{pp} - I_L \right)}{2(U_a - U_b)} \right] \quad (2)$$

2 两端稳压控制方案

以单通道 BUCK/BOOST BDC 变换器为例, 给出两端稳压控制方案如图4所示。分别检测变换器两端电压 U_a, U_b 送到二选一模拟开关, 模拟开关的使能端(Enable)为高时, 选通 U_b , 否则选通 U_a 。反馈量 U_i 经电压调节器后, 其输出与锯齿波相比较得到 PWM+ 信号。此时 PWM+ 信号不能直接送去驱动 Q_1, Q_2 , 因为变换器工作在 BUCK 状态时, 受控开关为 Q_1 , 而变换器工作在 BOOST 状态时, 受控开关则为 Q_2 。PWM+ 信号要用来控制相应的受控开关, 否则其中一路控制回路为正反馈, 系统不可控。因此将 PWM+ 经过反相后得到一路互补的 PWM- 信号, 两路互补信号同样通过一个二选一模拟开关, 当 Enable 为高时, 选通 PWM+, 否则选通 PWM-。经过模拟开关后所得到的 PWM 信号, 可直接经过驱动电路来驱动 Q_1, Q_2 。Enable 信

号是由电感电流的平均值决定的, 检测电感电流 i_L 经平均值电路, 得到电感电流的平均值 I_L , I_L 经过零比较器后, 得到 Enable 信号: $I_L > 0$, Enable 为高; $I_L < 0$, Enable 为低。

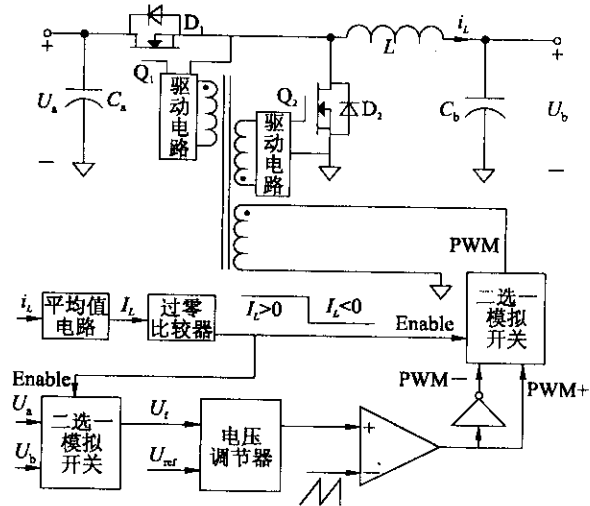


图4 两端稳压 BUCK/BOOST BDC 控制方案

该控制方案的突出特点是利用同一电压调节器和同一套驱动电路实现了双向 BUCK/BOOST 变换器两端稳压, 并根据功率流的方向, 自动选择受控对象 (U_a 或 U_b)。

3 变换器设计与实验结果

根据以上分析, 设计一 200 W, 24 V/48 V 的双向 BUCK/BOOST 变换器(单通道)参数如下: $L=10 \mu\text{H}$, $C_a=2000 \mu\text{F}$, $C_b=2000 \mu\text{F}$, $f_s=60 \text{ kHz}$ 。

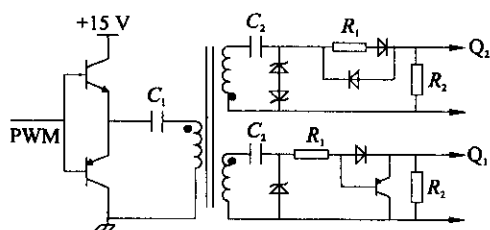
3.1 驱动电路

驱动电路如图5(a)所示。PWM 信号经电容耦合到变压器原边, 在变压器副边得到两路互补的驱动信号, 如图5(b)所示。两路驱动信号都具有缓慢的上升沿以及快速的下降沿, 从而形成死区。调整图中电阻 R_1 大小, 便可以调整死区时间的大小。两路驱动信号中, 其中一路具有负压, 另一路没有负压, 却有很快的下降沿。其优点在于既能防止两只开关管直通, 又能使其快速关断。

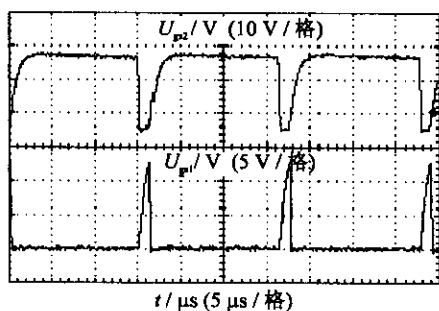
3.2 电压调节器

电压调节器如图6(a)所示。对于 BOOST 变换器而言, 存在一个右半平面的开环零点 ω_z

$$\omega_z = \frac{R_L(1-D)^2}{2L} \quad (3)$$

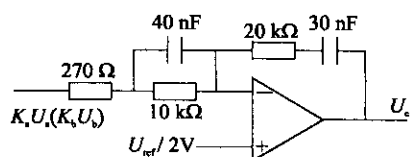


(a) 驱动电路

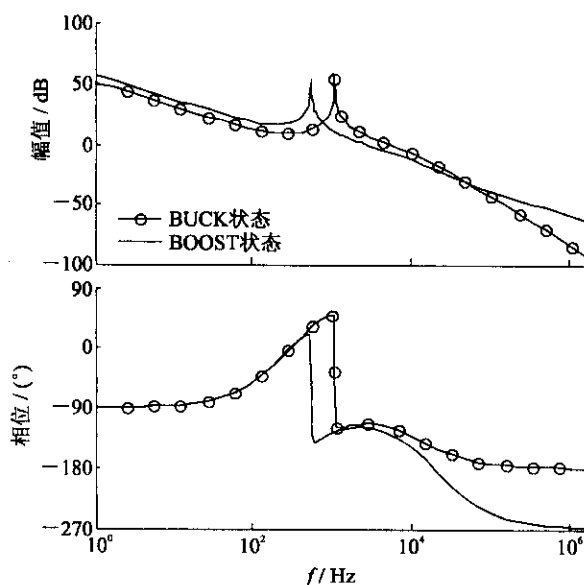


(b) 驱动信号

图5 驱动电路与驱动信号



(a) 电压调节器



(b) BUCK状态和BOOST状态时电压环开环传递函数

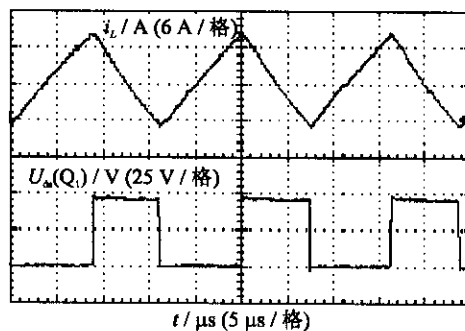
图6 电压调节器设计

对于常规的BOOST变换器,由于右半平面零点的限制,电压环难以得到较高的带宽,系统输出

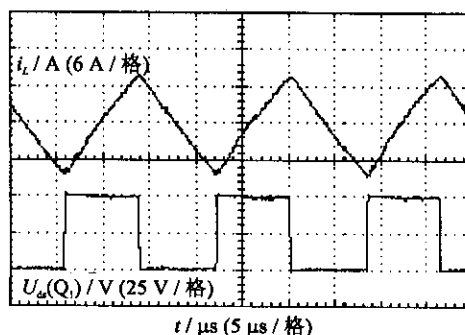
阻抗高,动态性能差。本文所研究的BUCK/BOOST BDC,变换器工作在BOOST状态时,由于电感值较小,系统右半平面的零点位于高频区,因此既能保证足够的稳定裕度,又能获得较高的带宽。电压环开环频率特性如图6(b)所示,由图可见,当变换器工作在BUCK状态时,开环截止频率为 1.94×10^4 rad/s,相位裕度为 67° ;变换器工作在BOOST状态时,开环截止频率为 1.02×10^4 rad/s,相位裕度为 55° ,系统具有很好的稳定性和动态性能。

3.3 实验结果

图7给出了电感电流为7A时的实验波形。图7(a)为变换器工作在BUCK状态时,电感电流 i_L 与开关管 Q_1 漏源间电压 $U_{ds}(Q_1)$ 的波形;图7(b)则为变换器工作在BOOST状态时,电感电流 i_L 与开关管 Q_2 漏源间电压 $U_{ds}(Q_2)$ 的波形。由图可见,无论变换器工作BUCK状态还是工作在BOOST状态,电感电流始终过零,提供了MOS管零电压开通的条件。同时调整死区时间到合适大小,使 Q_1, Q_2 工作在零电压开通状态,其体二极管也是自然导通、关断,而无反向恢复问题。因此所有的波形都很干净,没有传统硬开关变换器所出现的开通电流尖峰。



(a) BUCK状态时电感电流与漏源电压



(b) BOOST状态时电感电流与漏源电压

图7 电感电流为7A时实验波形

图8分别给出变换器工作在BUCK状态与BOOST状态时的效率曲线(不包括控制电路)。由图可见,变换器工作在BUCK状态时,在输出电流为7A时变换效率最高,接近为0.971;工作在BOOST状态时,在输出电流为3.5A时变换器效率最高,达到0.965。可见,由于双向BUCK/BOOST变换器工作在第二种工作模式下,实现了开关管的零电压开通,并且不存在其体二极管的反向恢复问题,从而减小了开关损耗,大大提高了变换器效率。

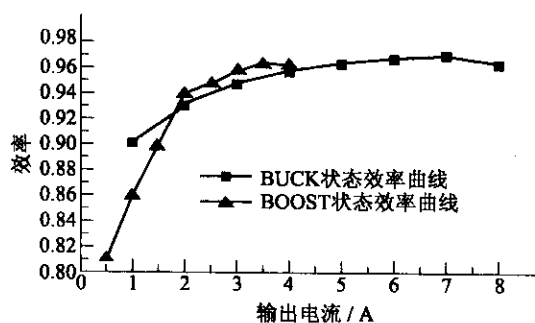


图8 变换器效率曲线

4 结束语

双向BUCK/BOOST变换器工作在电感电流过零状态时可以实现开关管的ZVS开关,并且其反并二极管无反向恢复问题,大大提高变换器效率。分析了双向DC-DC变换器的控制模型,给出了两端稳压双向BUCK/BOOST变换器的控制方案。该方案根据电感电流的方向不同,确定变换器是工作在BUCK状态还是BOOST状态,从而自动控制负载端电压恒定。该控制方案的优点在于只利用一套控制电路和驱动电路,就自动实现了变换器的两

端稳压,并且简单易实现,能直接应用于其他需两端稳压的双向变换器。最后设计了一台24V/48V的原理样机,验证了控制方案的可行性。

参考文献:

- [1] Louganski K P. Modeling and analysis of a DC power distribution system in 21st century airlifters [D]. Blacksburg, VA: Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech, 1999.
- [2] Chandrasekaran S. Subsystem design in aircraft power distribution systems using optimization [D]. Blacksburg, VA: Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech, 2000.
- [3] Sable D M, Lee F C. A zero-voltage-switching Bi-directional battery charger/discharger for the NASA EOS satellite[A]. Proc. of APEC'92[C]. 1992. 614~621.
- [4] Bojrup M, Karlsson P, Alakula M. A dual-purpose battery charger for electric vehicles [A]. Proc of PESC'98[C]. 1998. 565~570.
- [5] Jain M, Danielle M, Jain K. A bi-directional DC-DC converter topology for low power application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 595~606.
- [6] Stojic G, Sable D M, Cho B H. A soft-switching bidirectional converter for the space station uninterrupted power supply[A]. Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference[C]. 1993. 1. 267~1. 272.
- [7] Matsuo H, Kurkawa F. New solar cell power supply system using a boost type bidirectional DC-DC converter[A]. Record of PESC'82[C]. 1982. 14~19.