

# 新型 Buck-Boost 逆变器及其控制策略研究

## The Study of a Control Strategy for the Buck-Boost Inverter

西南交通大学 电气工程学院 陶良慧 关振宏 陈郭霞 蒋启伟

**摘要:** 由两个完全相同的独立的 buck-boost 斩波器, 输入并联, 输出串联构成一个 DC/AC 逆变器, 该逆变器实现了单级功率变换, 双向功率流, 与传统的两级式逆变器相比, 具有拓扑结构简单, 同时工作的开关元件少, 功率密度大, 变换效率高等优点。但由于两个斩波器的输出电压要求在较宽范围内变动, 故其控制方法和单独的 buck-boost 斩波器有所不同, 本文对该电路的工作原理和控制方法进行了详细的分析, 针对输出电压范围宽的特点, 提出了改进的电流控制法, 该控制方法采用附加扰动补偿的前馈控制和反馈控制相结合, 使两个斩波器的输出电压和逆变器的输出电压都能得到准确的控制, 对外界变化能作出快速准确地反应, 提高了逆变器对输入电压和负载变化的响应能力。

**关键词:** 单级逆变 电流控制 Buck-boost 逆变器 电感电流连续模式

**Abstract:** The DC/AC buck-boost inverter consists of two DC/DC buck-boost converters which inputs connected in parallel and outputs in series. The inverter allows power flow in both directions as while as achieves in a single stage. In addition, advantageous over the traditional inverters are the simpler structure, less semiconductors, denser on power, more efficient in power transition. However the control strategy is quit different because of the two buck-boost dc/dc converters are required to work in a variable operating condition. This paper present a new control strategy to solve the problem based on a detailed analysis of the operating theory and the control strategy. It include compensation feed-forward loop and feed-backward loop that make possible a fast and accurate control of both converters' output voltage. It also had a high immunity to external perturbations such as input voltage or output load disturbances.

**Key words:** Single-stage Current control Buck-boost inverter CCM

### 1 引言

随着新能源的开发和利用领域的不断扩大, 高功率密度、高可靠性、无污染的高性能新一代高频变换技术的研究具有重要的理论价值和工程价值。新型 Buck-Boost 逆变器最大的优点是实现了功率的单级变换, 单级式逆变器较传统的两级式逆变器, 拓扑结构简单, 同时工作的开关数目少, 降低了开关损耗, 有优良的动态和静态特性, 而且实现了能量的双向流动, 提高了功率密度和变换效率, 在以蓄电池、太阳能电池和燃料电池为主直流电源的场合有着广泛的应用前景。

### 2 电路工作原理

由两个独立的 buck-boost 直流斩波器输入并联, 输

出串联, 就构成了 buck-boost 逆变器的基本拓扑。通过改变一个周期内的占空比, 使两个直流斩波器输出相位相差  $180^\circ$  的正弦波形直流电压, 从而使差动输出的逆变器输出频率和幅值可调的交流正弦电压。电路图如图 1 所示:

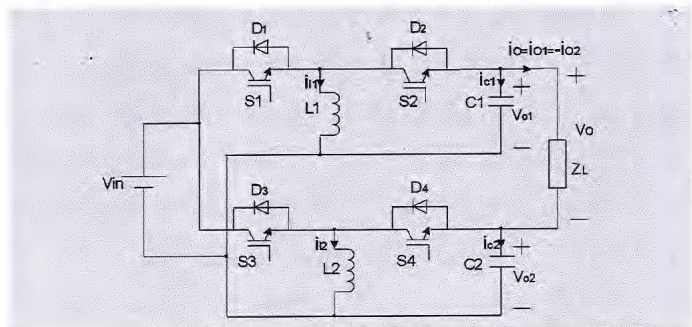


图1 buck-boost 逆变器拓扑结构图

由图1所示电路拓扑可以看出,同时由两个双向 buck-boost 斩波器输入并联,输出串联组合而成。其中  $v_{IN}$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $Z_L$  构成一个双向 buck-boost 斩波器1,  $v_{IN}$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $L_2$ ,  $C_2$ ,  $Z_L$  构成另一个双向 buck-boost 斩波器2。输出电压  $v_o = v_{o1} - v_{o2}$ ; 当  $v_{o1} > v_{o2}$  时,  $v_o > 0$ ; 当  $v_{o1} = v_{o2}$  时,  $v_o = 0$ ; 当  $v_{o1} < v_{o2}$  时,  $v_o < 0$ 。因此通过合理的控制,电路可以实现 DC/AC 变换。文中对两个 buck-boost 直流斩波器单独控制,两直流斩波器的控制方法是相同的,即通过改变一个周期内的占空比,在直流斩波器的输出端得到频率和幅值可调的正弦交流电压。同时使两个直流斩波器输出电压相位相差  $180^\circ$ , 从而使逆变器输出电压的范围是单个直流斩波器的两倍,达到充分利用器件的目的。

下面以单个 buck-boost 直流斩波器1为例介绍其工作原理。根据 buck-boost 斩波器在电感电流连续模式下的大信号模型有电感电压开关周期平均值和电容电流开关周期平均指表达式:

$$v_{L1} = d_1 v_{IN} + d_1' v_o \quad (1)$$

$$i_{C1} = -d_1 i_{L1} \quad (2)$$

其中  $d_1$  为占空比,  $d_1' = 1 - d_1$ ;  $v_{L1}$ ,  $v_{IN}$ ,  $v_{o1}$  分别为电感电压,输入电压和输出电压;  $i_{C1}$ ,  $i_{L1}$ ,  $i_{o1}$  分别为电容电流,电感电流和输出电流。上式表明,通过占空比  $d_1$  的变化可以达到对电感电流开关周期平均值的控制。另外输入电压和输出电压也会对电感电流产生影响,在稳态时,电感电压的开关周期平均值为零,但电感电流瞬时值并不保持恒定,而是一个近似为三角波的周期函数,在一个开关周期中电感电流没有净变化。然而,在动态过程中,由于电感电压的开关周期平均值非零,因此电感电流存在净变化。在动态过程中电感电流的瞬时值不再是周期函数,它的非线性动态特性使控制变得困难。

### 3 控制策略研究

近年来,国内外学者对直流变换器型 DC/AC 逆变器已做了一些研究。文献[2]提出的 boost 变换器型单级逆变器,采用滑模控制方法,达到输出电压高于输入侧直流电压的目的,可用于 UPS。和 boost 逆变器相比, buck-boost 逆变器的另一个优点是,他的输出交流电压不仅能高于也能低于或等于输入侧直流电压值。

由于两个 buck-boost 斩波器要工作在输出电压连续变化的状态下,所以逆变器的控制方法和 DC-DC 斩波

器的控制方法有区别。开关电源常用的控制方法有电压型控制,电流型控制,滞环控制,模糊控制等,它们是以小信号模型为基础,然而,小信号模型是针对电路工作在某一点进行计算,它仅适用于对 DC-DC 斩波器在某一点小范围波动的控制。在 buck-boost 逆变器中,两个 DC-DC 斩波器的输出电压都在大范围内变化,所以这些控制方法并不能直接适用于这种电路。例如文献[3, 4]中采用小信号建模,需要先确定工作点再建立传递函数,为了抗负载波动还需采用 PID 控制器,这种控制方法需要复杂的运算,很依赖设计者的调试经验,抗负载波动能力差且不适用于非线性负载。滑模控制适用于这种电路,它可以选择双变量控制滑模面,即同时检测电感电流和输出电压进行双环控制,对外界扰动和自身参数扰动有自适应性,使得变换器在输入电压和负载变化时,具有很快的响应速度,但其电路复杂成本高,对控制参数的选择有限制,还有其变结构控制固有的抖动问题,在实际电路中难以克服<sup>[2, 5, 6]</sup>。

为了使 buck-boost 斩波器能在工作在变化的工作点上,文中提出了改进的电流控制法,在内环电感电流环中采用补偿措施,使得 buck-boost 斩波器能够在工作点变化的条件下得到快速准确的控制,另外,附加扰动的前馈环的引入提高了系统抗输入电压扰动和输出电流波动的能力。该控制方法建立在两个斩波器工作在电感电流连续模式 (CCM) 下,与传统的电流型控制不同,内环参考电流的产生不是由电压调节器的输出直接作为内环电感电流的参考值,而是考虑到斩波器工作在工作点上的特点,让电压调节器的输出作为电容电流参考值,再根据 buck-boost 斩波器的大信号模型,得出电感电流参考值作为内环给定。其中引入扰动补偿前馈环,这样实现了系统解耦,两个直流斩波器就能工作在工作点上,从而满足逆变器的要求,同时也提高了系统抗输入电压和负载变化的能力。仿真结果表明该控制方法达到了良好的控制效果,两直流斩波器的输出电压和逆变器的输出电压都得到了精确的控制,有极强的抗外部扰动能力。另外对电感电流的直接控制,提高了在负载变动及非线性负载情况下系统工作的可靠性,和前面提到的控制方法相比,该控制方法具有很多优势。

### 4 控制方案设计

改进的电流控制法采用电压外环电流内环的模式,

外环控制输出电压，内环控制电感电流，在控制环中引入前馈控制。以 buck-boost 斩波器 1 为例，控制框图如图 2 所示，外环电压基准和输出电压的差值经 PI 调节器，其输出作为电容电流参考值，再根据 buck-boost 斩波器在电感电流连续模式下的表达式 (2) 得到电感电流参考值：

$$i_{L1ref} = (-i_{O1} - C_1) / d_1' \quad (3)$$

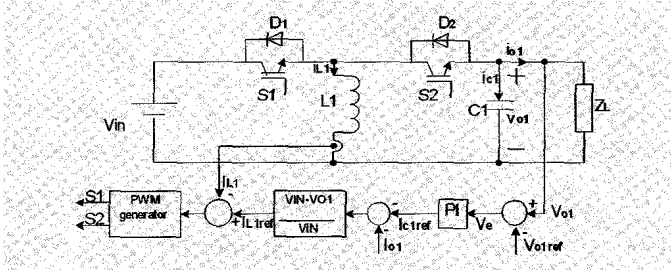


图 2 控制框图

因为  $d_1'$  是随工作点的不同而变化的，为了解决这一问题文中用  $v_{IN} / (v_{IN} - v_{O1})$  代替  $d_1'$ ，这是依据理想条件下 buck-boost 斩波器在 CCM 模式下的电感平衡方程：

$$v_{IN} d_1 T + v_{O1} d_1' T = 0 \quad (4)$$

得到的。这样占空比变化引起的系统不稳定被消除了，另外，电流  $i_{O1}$  作为一个外部扰动作用在控制环上，其实质是一个前馈控制，使系统能够预测输出随外部作用的变化规律，在偏差产生之前作出相应的控制，在负载变化的情况下准确跟踪电压参考值。这样电感电流参考值可表示为：

$$i_{L1ref} = \frac{v_{IN} - v_{O1}}{v_{IN}} (-i_{O1} - i_{C1}) \quad (5)$$

这样从电压环来看电感电流可以看成是瞬时控制的，只需以电容的转移特性

$$i_{C1} = C \frac{dv_{O1}}{dt} \quad (6)$$

(这里输出电压于电容电压相等  $v_{O1} = v_{C1}$ ) 来处理，因此可以用一个 PI 调节器来实现。内环电感电流检测值与参考值的误差经比例放大后作为调制波与三角载波进行比较，得到正弦脉宽调制信号，用来控制 buck-boost 斩波器的占空比，达到调节输出电压的目的。

该控制方法是对两个 buck-boost 斩波器分别进行控制，其关联部分就是外环参考电压的设定，为了得到一个交流输出： $v_0 = v_{O1} - v_{O2}$ ，控制两个斩波器的输出相位相差  $180^\circ$  的直流正弦电压，故两斩波器的参考电压可以这样设定：输出电压有效值为  $v_{rms}$ ，频率为  $f$ ，则参考电压  $v_{Oref}$  为：

$$v_{Oref} = \sqrt{2} v_{rms} \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

$$v_{O1ref} = v_{DC} + \frac{1}{2} v_{Oref} = v_{DC} + \frac{1}{\sqrt{2}} v_{rms} \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

$$v_{O2ref} = v_{DC} - \frac{1}{2} v_{Oref} = v_{DC} - \frac{1}{\sqrt{2}} v_{rms} \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

其中  $v_{O1ref}$ 、 $v_{O2ref}$  分别为两个斩波器的输出电压参考值，直流偏移量  $v_{DC}$  的选取要依据两斩波器的占空比允许值决定的输出电压范围来确定。即

$$V_{DC} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{rms} = V_{Omax} \leq V_{IN} \frac{d_{max}}{1-d_{max}} \quad (10)$$

$$V_{DC} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{rms} = V_{Omin} \geq V_{IN} \frac{d_{min}}{1-d_{min}} \quad (11)$$

其中， $d_{max}$ 、 $d_{min}$  表示占空比的允许最大值和最小值。

### 5 仿真分析

仿真实现 1KVA 48VDC/115V 60HzAC，开关频率  $f_s = 40\text{kHz}$ ，双向 buck-boost 斩波器的电感和电容值分别取  $L = 0.2\text{mH}$ ， $C = 80 \mu\text{F}$ ，控制环中的 PI 调节器的参数分别取 0.56 和  $2.32 \times 10^{-3}$ ， $d$  的范围取 0.05-0.85， $V_{DC} = 100\text{V}$ 。

用 Matlab/Simulink 对模型仿真，逆变器工作在额定电压下的仿真结果见图 3，取电阻负载，阻值为  $20 \Omega$ 。如图所示，该控制方法对电压和电流都能精确的控制。

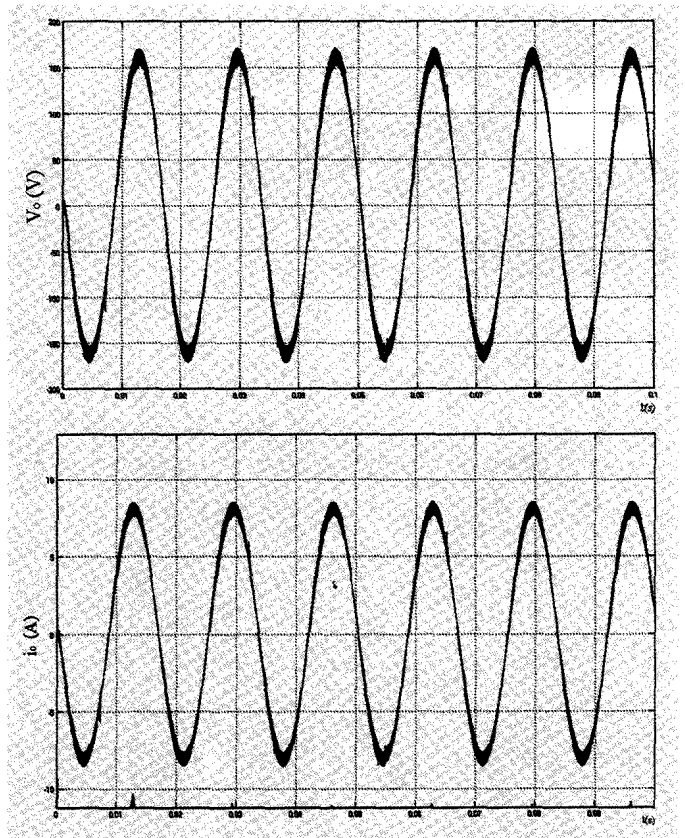


图 3 额定电压下电阻负载仿真波形图



抗输入电压扰动的仿真结果如图4所示,将一个5V(占输入电压的10%)的矩形脉冲加到输入电压上,持续两个周期,从图上可见,输出电压和电流基本没波动。

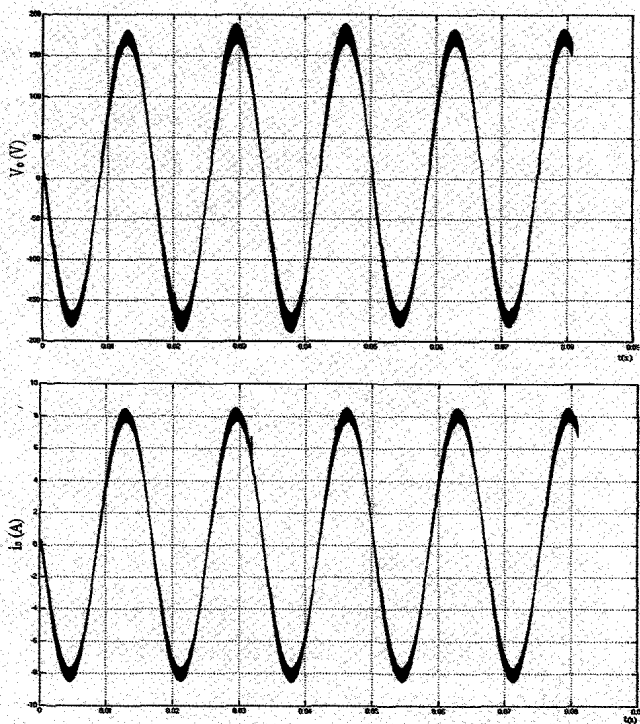


图4 输入电压加扰动仿真波形图

当负载增加到超载10%时,持续两个周期后恢复,输出电压和电流的波形如图5所示,由图可见,输出电压基本没有变化,电流增大,THD有所增大。

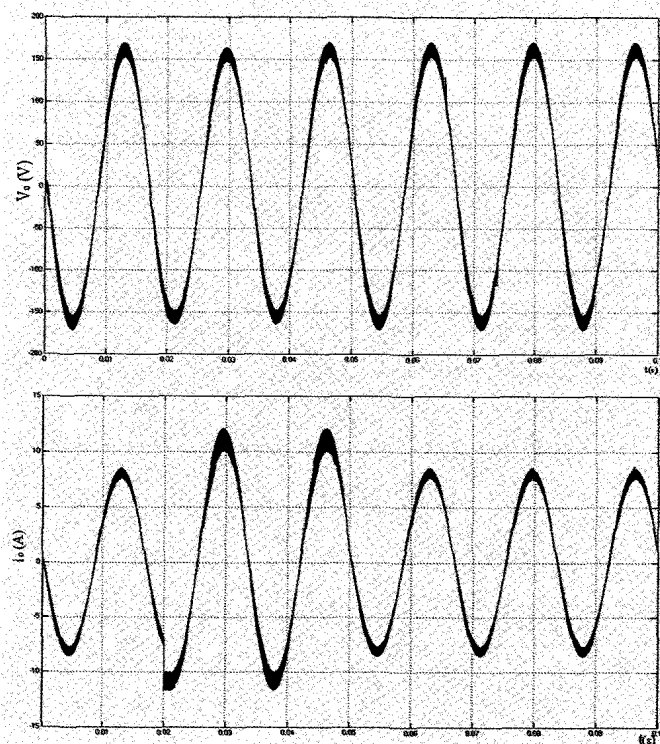


图5 负载变化情况下的仿真波形图

## 6 结论

本文研究了由两个直流斩波器构成的 buck-boost 逆变器的控制方法,提出了改进的电流控制方案,并设计了1KVA 48VDC/115V 60HzAC 实验模型。仿真结果表明该控制方案能够达到稳定准确的控制效果,在轻载、满载、负载跳变及输入电压波动条件下,均能保持较理想的输出电压波形,表现了良好的动态和稳态响应性能。

## 参考文献

- [1] 孙林, 梁永春, 龚春英, 严仰光. 基于反激变换器的单级式DC/AC逆变器[J]. 电工技术学报, 2006, 3:89-93.
- [2] Ramon O. Caceres and Ivo Barbi, A Boost DC-AC Converter: Analysis, Design, and Experimentation[J], IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL.14, NO.1, JANUARY 1999:134-141.
- [3] Ramon O. Caceres, Winston M. Garcia and Oscar E. Camacho, A BUCK-BOOST DC-AC CONVERTER: OPERATION, ANALYSIS, AND CONTROL[R], IEEE CIEP98:126-131.
- [4] Ramon Caceres, Ruben Rojas and Oscar Camacho, Robust PID Control of a Buck-Boost DC-AC Converter[J], IEEE 11-2 1998:180-185
- [5] Ramon Caceres and Ivo Barbi, SLIDING MODE CONTROLLER FOR THE BOOST INVERTER[R], IEEE MEXICO October 14-17 CIEP96:247-252
- [6] 马浩, 韩思亮. 新型功率放大器时变滑模控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 6: 55-58.
- [7] 张昌盛, 段善旭, 康勇. 基于电流内环的一种逆变器控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2005, 9: 14-16.

(上接第61页)

材料的工艺、改善功能和影响环境的工艺、不使用或少使用有害物质或元素为产品的原料。有环保意识地进行生产制造,从最简单的污染防治方法到为环境和环保效益技术设计基本理念,走企业可持续发展道路。

## 参考文献(略)

## 作者简介

张卫平(1957-) 男 博士/教授/博士生导师 主要研究领域: 电力电子技术及应用。

肖实生(1981-) 男 硕士研究生 主要从事电力电子系统集成理论及技术的研究。