

## 基于 Buck 变换的新型逆变器及其稳定性分析\*

谢运祥 邱添泉

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提出一种基于 Buck 变换的新型逆变器, 通过建立电路的低频平均模型, 用经典控制理论分析了该逆变器在各种经典控制方式下的稳态响应性能和暂态稳定性能, 从而得到最优的控制策略——PD 控制策略. 实验结果表明该逆变器具有良好的暂态稳定性能和鲁棒性, 从而验证了理论分析的正确性.

**关键词:** 逆变器; Buck 变换; 稳定性; 暂态响应

**中图分类号:** TM93

**文献标识码:** A

电力电子逆变电源已经获得了广泛应用, 为了研制高性能的逆变器, 人们不断在拓扑结构和控制策略上进行尝试. 近年来提出了一种基于 DC-DC 变换的新型逆变器<sup>[1-7]</sup>, 其原理是对 DC-DC 变换电路的占空比进行控制, 使变换电路输出电压呈正弦半波或带有直流偏置电压的正弦全波, 再经过后级电压极性变换电路将其变换为双向正负对称的正弦波; 与传统桥式逆变器相比有总开关损耗低、无需交流电容等优点. 其中, 基于 Buck 变换的逆变器以其拓扑结构简单、输出端电压与高频开关占空比之间存在线性关系、容易控制等优点而备受重视.

本文中以基于 Buck 变换的新型逆变器为对象, 用经典控制理论对其控制策略以及系统稳定性进行分析, 从而得到最优的控制策略, 并以此为依据制作实验样机, 验证了该理论分析的正确性.

## 1 电路工作原理

### 1.1 电路结构

图 1(a) 是基于 Buck 变换的逆变器主电路. 通过控制高频开关  $S$  的占空比使电容端电压  $u_c$  呈正弦半波, 再通过换向电路将其转换为正弦波电压. 但是, 该电路只能单向传输能量, 而负载端的能量无法

回馈到直流输入端, 因此只能带阻性负载, 而带感性或者容性负载将使输出电压波形严重失真.

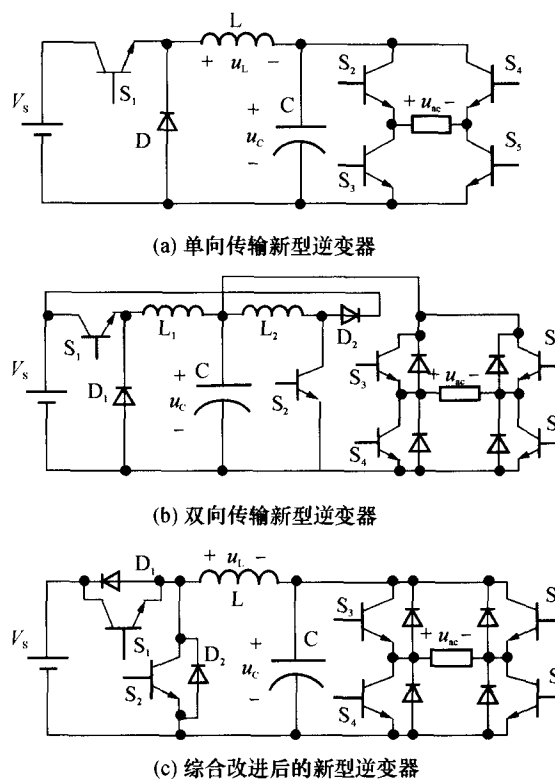


图 1 逆变器电路

Fig. 1 Circuit of the inverter

图 1(b) 所示电路是实现能量回馈的逆变器, 即在图 1(a) 所示电路的电容端并联上一个 Boost 环节, 当电容电压高于参考电压时 Boost 电路启动, 将

收稿日期: 2005-10-13

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(05006521)

作者简介: 谢运祥(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力电子变流技术研究. E-mail: drxyx@sohu.com

多余能量送回直流输入端<sup>[8]</sup>. 该逆变器结构比较复杂,且 $S_1, S_2$ 分别单独采用闭环控制,控制电路过于繁杂. 图1(c)所示电路是综合上述电路的优点得到的新型逆变电路,当 $S_2$ 关闭而主开关 $S_1$ 受控通断,电路相当于Buck变换器,将能量从输入端送到负载端;反之,当 $S_1$ 关闭而 $S_2$ 受控通断,电路就相当于Boost变换器,将能量从负载端回馈到输入端,从而实现了能量的双向传输.

## 1.2 电路平均值模型分析

对图1(c)电路中的 $S_1, S_2$ 采用互补控制,则当 $S_1$ 导通 $S_2$ 关断时,不管电感电流流向如何,续流二极管 $D_2$ 两端电压都为 $V_s$ ;反之,当 $S_1$ 关断 $S_2$ 导通, $D_2$ 两端电压都为零(假设 $D_1, D_2$ 为理想器件);由此建立电路的低频平均值模型如图2所示.

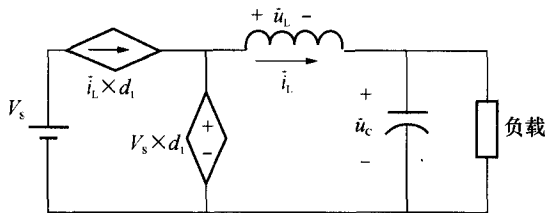


图2 逆变器低频电路平均值模型

Fig.2 Low-frequency mean-value circuit model of the inverter

根据电路平均值模型,由电路网孔电压方程可得:

$$d_1 V_s = \bar{u}_L + \bar{u}_C \quad (1)$$

式中: $V_s$ 为一个周期内的平均直流输入电压; $d_1$ 为主开关管 $S_1$ 的占空比; $\bar{u}_L$ 为一个周期内电感两端的平均电压; $\bar{u}_C$ 为一个周期内电容两端的平均电压.

对上式作拉氏变换得:

$$d_1(s) V_s = u_L(s) + u_C(s) \quad (2)$$

假设电路带阻性负载 $R$ ,可得

$$u_L(s) = sL(sC + \frac{1}{R})u_C(s) \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得输出电压对占空比的开环传递函数为

$$\frac{u_C(s)}{d_1(s)} = \frac{V_s R}{s^2 RLC + sL + R} \quad (4)$$

## 2 电路稳定性分析

从可靠性与实用性考虑,对上述逆变器电路采用技术上和应用上都非常成熟的传统电压型控制. 电压型控制原理如下:将逆变器输出电压反馈信号与基准参考电压信号进行比较得到误差信号,再经误差放大器(P,PI,PD或PID调节器)调节后与载

波信号交截,经适当的逻辑交换电路得到控制信号来控制逆变器电路的开关管. 下面分析在各种控制方式下系统的稳定性,以此确定最优的控制策略. 为研究方便,先假设电路带阻性负载.

### 2.1 比例(P)控制

假设载波信号的幅值与直流输入电压相等,则可得比例控制下开关管的占空比为

$$d_1 = \frac{k_p(u_r - u_C)}{V_s} \quad (5)$$

式中: $k_p$ 为比例控制系数, $u_r$ 为参考电压. 作拉氏变换得

$$d_1(s) = \frac{k_p(u_r(s) - u_C(s))}{V_s} \quad (6)$$

则由式(4)、(6)可得输出电压对参考电压的闭环传递函数为

$$\frac{u_C(s)}{u_r(s)} = \frac{Rk_p}{s^2 RLC + sL + R(k_p + 1)} \quad (7)$$

这是一个典型的二阶系统,由控制理论可知系统对输入的稳态响应和暂态响应都是稳定的;设逆变器的电路参数为: $L = 1.7 \text{ mH}$ , $C = 100 \mu\text{F}$ ,比例控制系数 $k_p = 12$ ,得其波特图如图3(a)所示. 可见比例控制下系统能保持稳定,但其相位裕量不足,容易失稳. 由式(7)令 $s \rightarrow 0$ ,可得系统稳态输出的闭环传递函数为

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{u_C}{u_r} = \frac{k_p}{(k_p + 1)} \quad (8)$$

可见稳定输出时输出电压只由参考电压决定,并且与参考电压成线性比例关系.

### 2.2 比例微分(PD)控制

当系统采用比例微分控制时其闭环控制占空比为

$$d_1 = \frac{k_p(u_r - u_C) + k_d \frac{d}{dt}(u_r - u_C)}{V_s} \quad (9)$$

进行拉氏变换得

$$d_1(s) = \frac{(k_p + k_d s)(u_r(s) - u_C(s))}{u_r} \quad (10)$$

则由式(4)、(10)可得 $u_C$ 对 $u_r$ 的闭环传递函数为

$$\frac{u_C(s)}{u_r(s)} = \frac{R(k_p + sk_d)}{s^2 RLC + s(L + Rk_d) + R(1 + k_p)} \quad (11)$$

这也是一个二阶系统,由经典控制理论可知系统同样能达到稳定;与比例控制相比,传递函数增加了一个一阶超前环节,可得其当 $L = 1.7 \text{ mH}$ , $C =$

$100 \mu\text{F}$ , 比例控制系数  $k_p = 12$ , 微分控制系数  $k_d = 0.0026$  时的波特图如图 3(b) 所示. 由图可见系统增益保持不变, 但其幅频特性以  $-20 \text{ dB/dec}$  的斜率通过剪切点, 并且相位裕量增大到接近  $90^\circ$ , 大大提高了系统的稳定性, 也满足工程设计上的要求<sup>[9]</sup>.

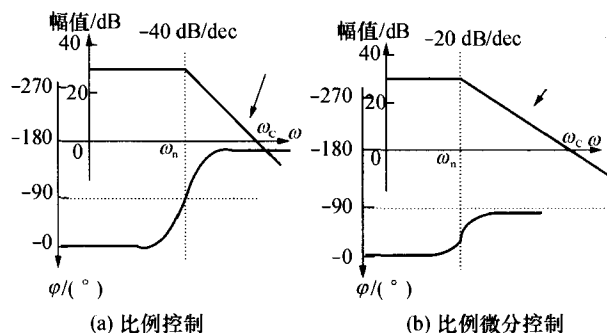


图 3 系统 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of the system

$\omega_n$  为二阶系统自然振荡角频率;  $\omega_c$  为二阶系统剪切频率

### 2.3 比例积分 (PI) 控制和比例积分微分 (PID) 控制

用同样的分析方法可知在 PI 控制和 PID 控制下系统也能保持稳定, 而且系统增益提高了, 但其稳定裕量不足, 容易失稳. 这是因为积分控制的引入可以很大程度消除系统的稳态误差, 但对系统的稳定性和稳定裕量几乎不产生任何明显的影响, 并且会在低频段引起附加的相位滞后量, 这会降低系统的暂态响应性能, 这是控制上所不希望的.

## 3 实验验证

从上面的分析可见, 与其它经典控制方式相比, PD 控制是该逆变器的最优控制方式, 可以使系统具有良好的稳态响应和暂态响应性能, 并使系统具有更好的稳定性和鲁棒性. 为了验证上述理论分析, 按照图 1(c) 研制了低压试验电路, 其主电路的参数如下: 输入电压  $V_s = 30 \text{ V}$ , 输出交流电压峰值为  $3 \sim 27 \text{ V}$ , 额定功率为  $100 \text{ W}$ , 滤波电感  $L = 1700 \mu\text{H}$ , 滤波电容  $C = 100 \mu\text{F}$ ; 控制电路参数: 参考电压为正弦半波, 由  $0 \sim 30 |\sin(314t)| \text{ V}$  动态可调, 比例控制系数  $k_p = 12$ , 微分控制系数  $k_d = 0.0026$ ; 实验开关频率为  $30 \text{ kHz}$ . 预期输出电压将是  $50 \text{ Hz}$  的正弦波. 该试验电路具有能量双向传输的功能, 可以工作在阻性、感性和容性负载以及空载条件下.

图 4(a)、(b)、(c) 分别是逆变器带感性负载、

容性负载和空载情况下输出的电压、电流波形. 由图可见该逆变器在 PD 控制方式下可以输出品质优良的交流电压; 而且该新型电路拓扑的具有双向传输功能的逆变器在阻感负载、阻容负载以及空载情况下输出电压波形都基本不会失真.

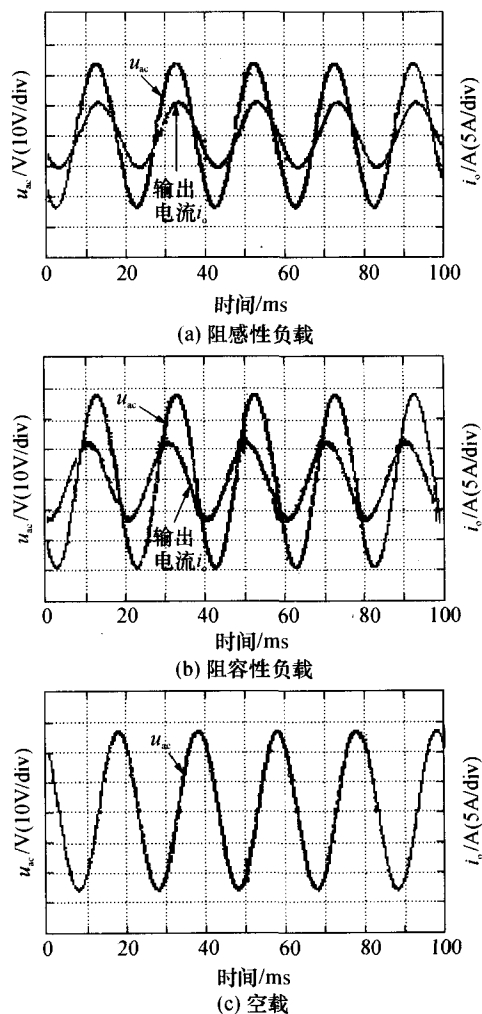


图 4 不同负载下的输出电压、电流波形

Fig. 4 Output voltage and current waves with different loads

图 5(a) 是逆变器带阻性负载、参考电压发生突变时的输出电压波形. 图 5(b) 是逆变器由空载突然带上阻性负载时的负载电压与负载电流波形. 可见, 逆变器的输出电压只决定于参考电压, 不受负载情况影响; 系统的动态响应速度快, 具有良好的暂态响应性能和鲁棒性, 并且在工况出现大扰动时能保持良好的稳定性.

实验发现, 电路中的续流二极管可以由开关管的特二极管代替, 从而可以进一步简化电路, 节约成本, 但必须考虑晶体二极管的反向恢复问题对开关损耗和开关性能的影响.

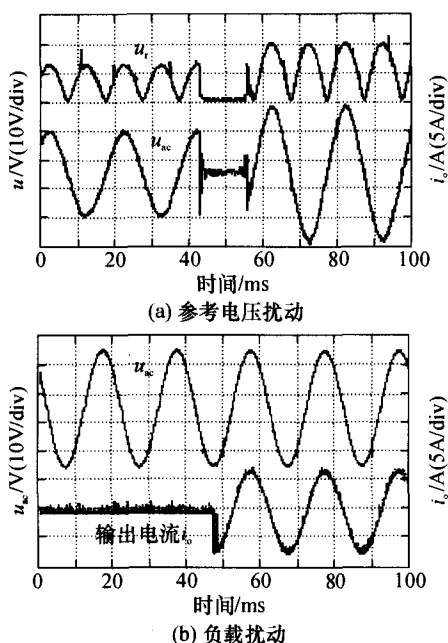


图5 参考电压和负载突变时的输出电压波形

Fig.5 Output voltage waves when there are large disturbances in reference voltage or load

#### 4 结论

这是一种基于 Buck 变换的新型逆变器,其拓扑结构具有一定的新颖性和实用性.实验样机的结果验证了平均值模型和稳定性分析的正确性,也证明了采用 PD 控制方式时该逆变器在各种负载情况下都能输出品质良好的正弦电压波形,出现各种外在因素扰动时具有良好的暂态响应性能和稳定性.

#### 参考文献:

- [1] Yang Zao-hong. A novel switch-mode dc-to-ac inverter with nonlinear robust control [J]. IEEE Transactions on Indus-
- [2] 洪峰,刘军. 滞环电流控制型双 Buck 逆变器 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 73-77, 87.  
Hong Feng, Liu Jun. Hysteresis current controlled dual buck half bridge inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 73-77, 87.
- [3] 黄赋光,谢运祥,杨苹. 新型 Boost 逆变器的积分滑模控制 [J]. 电力电子技术, 2004, 38(1): 7-9.  
Huang Fu-guang, Xie Yun-xiang, Yang Ping. Integral sliding mode control in a novel Boost inverter [J]. Power Electronics, 2004, 38(1): 7-9.
- [4] Ramon Cacerse, Ruben Rojas, Oscar Camacho. Robust PID control of a buck-boost DC-AC converter [C]// Telecommunications Energy Conference. [s. l.]: [s. n.], 2000: 180-185.
- [5] Jalade J, Marpinard J, Valentin M. DC/AC high power cell structure improves sine generator performance [J]. IEEE Trans Aerospace Electron Syst, 1981, 17: 373-378.
- [6] Hsu C Y. Stability analysis of a switched mode inverter using Cuk converters [C]// IEEE PESC'94. [s. l.]: [s. n.], 1994: 785-795.
- [7] 谢运祥,邱添泉. 一种基于 Buck 变换的新型逆变器 [J]. 通信电源技术, 2005, 22(5): 8-11.  
Xie Yun-xiang, Qiu Tian-quan. A novel inverter based on Buck converter [J]. Telecom Power Technologies, 2005, 22(5): 8-11.
- [8] Xie Shao-jun, Fan Ying, Zhou Dake. Research on a novel inverter based on DC/DC converter topology [C]// The 29th Annual conference of the IEEE. [s. l.]: [s. n.], 2003: 647-651.
- [9] 顾树生,王建辉. 自动控制理论 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.

## A Novel Inverter Based on Buck Conversion and Its Stability Analysis

Xie Yun-xiang Qiu Tian-quan

(School of Electric Power, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** A novel inverter based on the Buck conversion is presented. Then, a low-frequency mean-value model of the inverter circuit is established to analyze the steady and transient responses of the converter with different classic control methods by means of the classic control theory. The best control method named PD control is finally achieved. Experimental results show that the presented inverter is of good transient response and robustness, thus validating the correctness of theoretical analysis.

**Key words:** inverter; Buck conversion; stability; transient response