

# 新型单级 Buck-Boost 光伏逆变器研究

岳舟

(湖南人文科技学院 通信与控制工程系, 湖南 娄底 417001)

**摘要:**提出了一种新型单级 Buck-Boost 光伏逆变器的拓扑结构。该拓扑只需要五个功率开关和两个电力二极管, 结构简单紧凑, 无需直流分裂电容, 开关频率低, 通过占空比的调节, 能在一个功率级内产生幅值高于或低于输入直流电压的交流电压, 适用于 AC 模块。详细分析了所提逆变器的工作原理, 并利用状态空间平均法建立了系统数学模型。利用串联谐振环节实现所有开关的零电流开通和辅助开关的零电流关断, 减小了开关损耗, 提高了系统效率。采用 SPWM 控制方法, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了控制系统的仿真模型。仿真结果验证了该逆变器的优点和 SPWM 控制方法的有效性。

**关键词:**逆变器; Buck-Boost; 状态空间平均法; 脉冲宽度调制; 串联谐振

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1002-087 X(2010)11-1160-03

## Study on novel single stage photovoltaic buck-boost inverter

YUE Zhou

(Department of Communication and Engineering, Hunan University of Humanities and Science and Technology, Loudi Hunan 417001, China)

**Abstract:** A novel single-stage Buck-Boost PV inverter topology was proposed, which included only five switches and two power diodes, with a compact structure and low switch frequency. It did not have a DC capacitor, could generate an AC output voltage larger or lower than the input one in a single stage, and could be used in AC module. The operation principle was analyzed in detail and the mathematics model was founded by the state-space average method. The new inverter circuit topology provided all the switches for turn-on and the auxiliary switches for turn-off at zero current switching (ZCS) by a resonant tank, so that the switching loss was reduced and the system efficiency was improved. The simulation of the control system was constructed in Matlab/Simulink by SPWM control method. The simulation results show that the validity and effectiveness of the proposed inverter is verified.

**Key words:** inverter; Buck-Boost; state-space average; SPWM; series-resonant

随着传统能源消费的增长、生态环境的日益恶化和人类可持续发展的要求, 世界各国都在积极开发无污染可再生的新能源。太阳能资源丰富、分布广泛、可以再生、不污染环境, 使得太阳能光伏发电成为新能源开发中的主流。而光伏逆变器是太阳能光伏发电系统中的核心部分, 其效率的高低、可靠性的好坏将直接影响整个光伏系统的性能和投资。本文研究了一种新型的光伏发电用单级型 Buck-Boost 逆变器。

Buck 和 Boost 电路是 DC-DC 变换中最基本的两种电路。一方面, 它们应用广泛; 另一方面, 由它们可以衍生出很多其他的电路拓扑。但是 Buck 电路只能降压, 而 Boost 电路只能升压, 应用受到一定的限制<sup>[1,2]</sup>。而在 Boost 电路结构前加上 Buck 结构, 通过简化, 则可以得到 Buck-Boost 电路, 既可升压亦可降压, 即输出电压平均值的幅度通过占空比的调节, 可以高于或低于其输入直流电压<sup>[3,4]</sup>。它广泛应用于逆变电路, 各种低压单电源输入、多电源需求的电子电路及功率因数校正

(PFC) 电路中。许多研究 DC-AC 逆变的工作者喜欢以它作为拓扑的主电路<sup>[5,6]</sup>, 本文的研究也是基于这个拓扑开展的。

目前, 光伏逆变器拓扑的研究都向着更紧凑的设计、更宽的输入输出电压范围、更高效率的方向发展。本文基于 Buck-Boost 电路结构, 并引入串联谐振环节, 提出了一种新型的光伏逆变器的拓扑结构。该逆变器结构紧凑, 适用于 AC 模块, 并且工作在谐振电感电流不连续的方式下, 因此能实现所有开关的零电流开通和辅助开关的零电流关断, 大大降低了开关损耗, 提高了系统效率。根据其输入输出特性, 基于 SPWM 方法对该逆变器的控制进行了 Matlab/Simulink 仿真。仿真结果验证了理论分析的合理性和可行性。

## 1 拓扑结构及工作原理

图 1 给出了所提出的新型单级 Buck-Boost 逆变器的电路拓扑结构。其主要部分为串联谐振功率换模块, 它由 2 个独立的桥臂构成。左桥臂由主开关  $S_1$ , 辅助开关  $S_2$ , 二极管  $D_1$  和谐振电感  $L_1$  组成, 右桥臂由主开关  $S_3$ ,  $S_4$ , 辅助开关  $S_5$ , 二极管  $D_2$  和谐振电感  $L_2$  组成。两个谐振桥臂共用一个谐振电容  $C$ ,  $L_3$  为输出滤波电感,  $R$  为负载电阻。

图 1 所示的单级 Buck-Boost 逆变器有两个相互独立的

收稿日期: 2010-05-18

基金项目: 湖南省教育厅资助项目 (10C0832)

作者简介: 岳舟(1982—), 男, 湖南省人, 硕士, 主要研究方向为电力电子与电力传动、计算机控制。

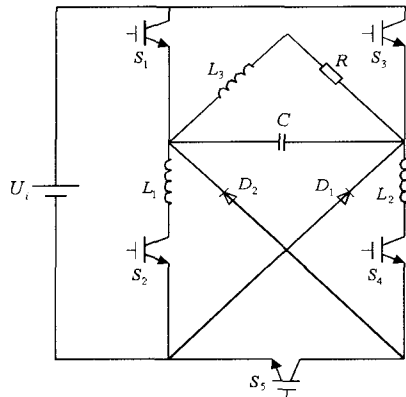


图1 新型单级 Buck-Boost 逆变器

桥臂,其输出交流电压  $u_o(t)$  的波形由每个桥臂各工作半个工频周期交替实现。也就是说,在合成输出电压波形正半周时由左桥臂上的  $S_1$  和  $S_2$  动作,而合成负半周时由右桥臂上的  $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_5$  动作。具体顺序为:在输出电压的正半周,  $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_5$  关断,辅助开关  $S_2$  导通,主开关  $S_1$  高频动作;负半周时,  $S_1$  和  $S_2$  关断,辅助开关  $S_4$  导通,主开关  $S_3$  和  $S_5$  同时高频动作。

整个功率变换过程可以等效为两个 Buck-Boost DC-DC 电路,所提逆变器电路工作于断续导电模式(DCM)。在 1 个开关周期内,存在 3 个动态过程,分别是充电阶段(I)、谐振阶段(II)和放电阶段(III),其输出交流电压正半周和负半周的 3 个阶段所对应的主要工作状态如图 2 所示。

## 2 系统分析及数学模型

为了简化分析,不妨做如下假设:所有的器件都是理想的;  $L_3$  足够大以保证在每个开关周期内的放电阶段都能提供连续的直流电流,记为  $I_{L3}$ ;电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和电容  $C$  的寄生损耗忽略不计;谐振电感  $L_1=L_2=L$ ,电感  $L_1$ 、 $L_2$  上的电流都记为

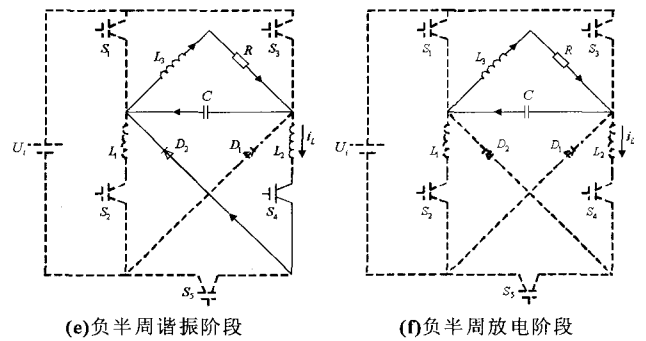


图2 主要工作状态

$i_L$ 。由于正负半周工作方式完全相同,文中只以正半周为例进行系统分析。在一个开关周期内的 3 个动态过程  $[t_0, t_1]$ 、 $[t_1, t_2]$ 、 $[t_2, t_3]$  分别对应图 2(a)、(b)、(c),并描述如下。

(1) 充电阶段 I  $[t_0, t_1]$ :  $t=t_0$  时,  $S_1, S_2$  在零电流开关状态(ZCS) 下闭合, 直流电源向  $L_1$  线性充电,  $C$  向负载放电直到  $t=t_1$  时刻。初始状态  $i_L(t_0)=0$ ,  $i_L(t)$  和  $u_C(t)$  在这期间的表达式分别为:

$$i_L(t) = (t - t_0)U_i / L \quad (1)$$

$$u_C(t) = u_C(t_0) - (t - t_0)I_{L3} / C \quad (2)$$

(2) 谐振阶段 II  $[t_1, t_2]$ :  $t=t_1$  时,  $S_1$  关断,  $S_2$  仍然保持导通, 谐振回路由  $L_1, D_1, C$  构成。储存在  $L_1$  上的电能向  $C$  转移直到  $t=t_2$  时刻。  $i_L(t)$  和  $u_C(t)$  在这期间的表达式分别为:

$$i_L(t) = I_{L3} + [i_L(t_1) - I_{L3} \cos \omega(t - t_1)] - (t - t_1) \sin \omega(t - t_1) u_C(t_1) / Z \quad (3)$$

$$u_C(t) = u_C(t_1) \cos \omega(t - t_1) + Z [i_L(t_1) - I_{L3}] \sin \omega(t - t_1) \quad (4)$$

式中:  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  为谐振角频率;  $Z = \sqrt{LC}$  为特征阻抗。

(3) 放电阶段 III  $[t_2, t_3]$ :  $t=t_2$  时,  $L_1$  上储存的能量变为 0,  $D_1$  截止,  $C$  向负载放电直到  $t=t_3$  时刻, 下一个开关周期的驱动脉冲到达。  $i_L(t)$  和  $u_C(t)$  在这期间的表达式分别为:

$$i_L(t) = 0 \quad (5)$$

$$u_C(t) = u_C(t_2) - (t - t_2)I_{L3} / C \quad (6)$$

在 Buck-Boost 逆变器中,  $i_L(t)$  不连续,  $i_{L3}(t)$  连续, 在一个开关周期内的稳态分析可由状态空间平均法描述。对一个开关周期内的 3 个动态状态, 都存在着不同的开关矩阵, 用相应的状态空间表达式描述如下。

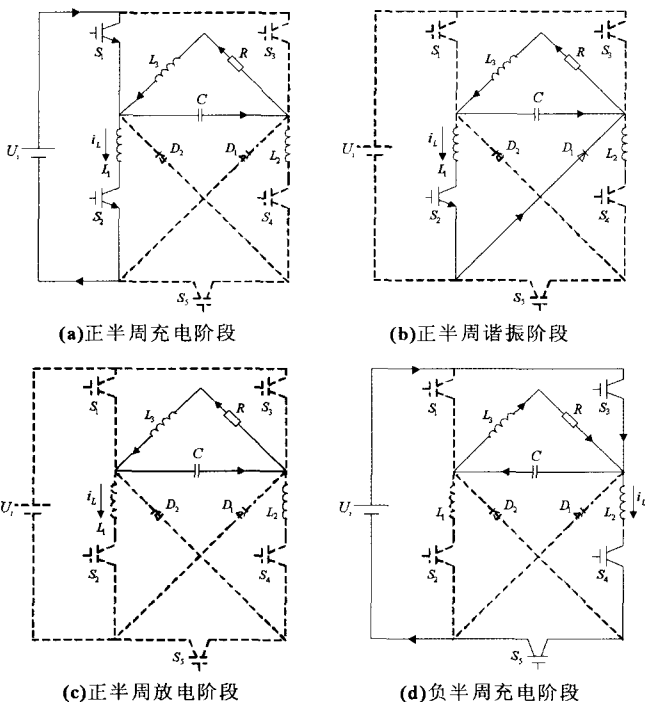
在充电阶段 I, 即时间间隔  $dT_s$  内  $[t_0, t_1]$ , 这里  $d = (t_0 - t_1) / T_s$ , 有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_C(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/C & 0 \\ 0 & 1/L_3 & 0 & -1/L_3 \\ 0 & 0 & -1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_C(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_i \quad (7)$$

在谐振阶段 II, 即时间间隔  $d'T_s$  内  $[t_1, t_2]$ , 这里  $d' = (t_2 - t_1) / T_s$ , 有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_C(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/C & 0 & 0 \\ 1/C & 0 & -1/C & 0 \\ 0 & -1/L_3 & 0 & -1/L_3 \\ 0 & 0 & -1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_C(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

在放电阶段 III, 即时间间隔  $(1-d-d')T_s$  内  $[t_2, t_3]$ , 有:



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_c(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/C & 0 \\ 0 & 1/L_3 & 0 & -1/L_3 \\ 0 & 0 & -1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_c(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据状态空间平均法,由式(7)~(9)可得到 1 个开关周期内各个平均电流及平均电压的表达式,即该逆变器状态空间法的数学模型为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_c(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -d'/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/C & 0 \\ 0 & 1/L_3 & 0 & -1/L_3 \\ 0 & 0 & 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_c(t) \\ i_{L3}(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_i \quad (10)$$

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真模型

为了验证所提逆变器的工作原理和 SPWM 控制方法的效果,在 Matlab/Simulink 环境下建立了控制系统的仿真模型,仿真模型如图 3 所示。SPWM 控制方法利用 S- 函数实现,产生开关  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  的驱动信号。作为调制波的正弦波和作为载波的锯齿波相比较,它们的交点决定了导通角和脉冲宽度。当正弦波幅值大于锯齿波幅值时,输出高电平;反之,则输出低电平。

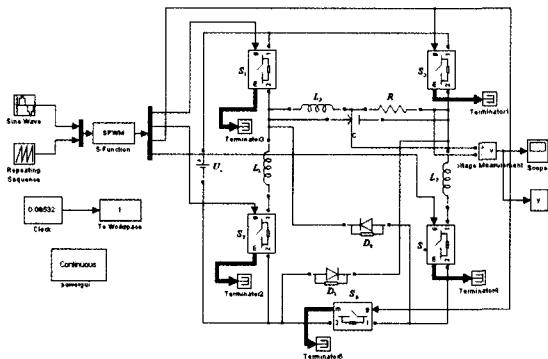


图 3 系统仿真模型

仿真参数设置如下:输入直流电压  $U_i=50\text{ V}$ ;开关频率  $f_s=10\text{ kHz}$ ;负载电阻  $R=5\ \Omega$ ;谐振电感  $L=13.5\ \mu\text{H}$ ;谐振电容为  $C=47\ \mu\text{F}$ ;滤波电感  $L_f=1\text{ mH}$ 。

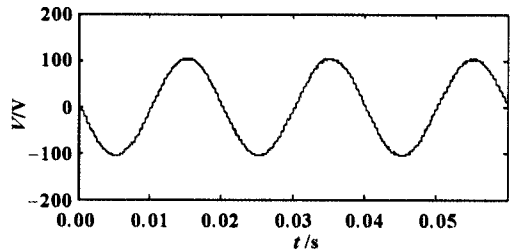
#### 3.2 仿真结果及分析

基于 SPWM 控制方法的输出电压和电流波形及其 FFT 分析的仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

由仿真结果可以看出,采用 SPWM 控制方法,输出逆变电压的波形接近于纯正弦,质量良好,输出逆变电压总谐波畸变率 (THD) 很小,仅为 0.51%。验证了该变换器的优点和 SPWM 控制方法的有效性。

### 4 结论

太阳能作为一种无污染的可再生能源将是下世纪人类能源利用的重要来源。作为太阳能光伏应用的光伏逆变器的研究越来越受到人们的重视。正是基于此思想,本文从光伏逆变器拓扑结构入手,提出的新型结构为单级型串联谐振 Buck-Boost 逆变器,只需要五个功率开关和两个电力二极管,较之双级型逆变器,其结构简单紧凑,通过占空比的调节能直接得到高于或低于输入电压的输出电压,并且控制方法简单。



基波(50 Hz)=104.8, THD=0.51%

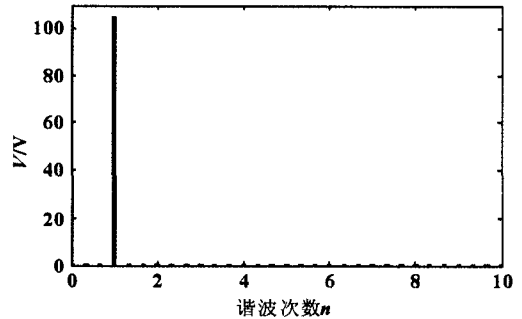
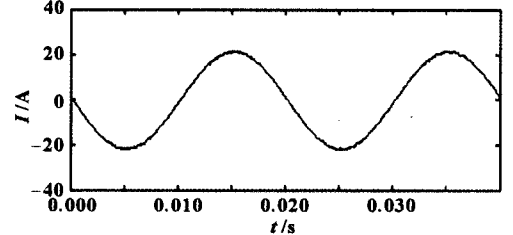


图 4 输出电压波形及 FFT 分析



基波(50 Hz)=21.42, THD=0.43%

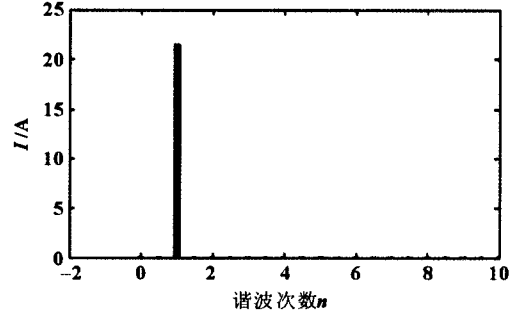


图 5 输出电流波形及 FFT 分析

所有功率开关均能实现零电流开通,辅助开关能实现零电流关断,大大降低了开关损耗,提高了开关频率。仿真结果表明输出逆变电压波形质量良好,谐波分量少,大大改善了该逆变器的性能。

### 参考文献:

- [1] AXELROD B, BERKOVICH Y, IOINOVICI A. A cascade boost-switched capacitor-converter-two level inverter with an optimized multilevel output waveform[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005, 52(12): 2763-2770.
- [2] 吴卫民, 顾斌, 钱照明, 等. 可升压自然软开关变流器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 62-66.
- [3] 朱成花, 严仰光. 一种新颖的串/并联输出双 Buck 逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 12-15.
- [4] 刘健, 刘树林, 杨银玲, 等. Buck 变换器的输出本质安全性分析及优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 52-57.
- [5] BOUTOT T, CHANG L. Development of a single-phase inverter for small wind turbines [C] // Proc IEEE CCECE. Waterloo, Canada: IEEE, 1998: 305-308.
- [6] 梁斌, 瞿文龙. 一种新型单相 DC/AC 逆变器的并联控制方法[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 58-62.