

# 基于 ARM 的新型拓扑结构的逆变电源

郑玉莲, 田晓燕, 孙频东

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了一种光伏逆变电源的新型拓扑结构, 该结构简单, 相对于单级式并网逆变器具有升、降压的特性, 能够适应较宽的电压范围. 介绍了基于 ARM 实现的数字单周期控制, 与传统的模拟单周期控制相比, 具有功耗更低、体积更小、精确度更高等优点. 最后通过仿真和实验验证了该方案的正确性与有效性.

[关键词] ARM 控制器, 逆变电源, 单周期控制, 光伏电源

[中图分类号] TM445 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2012)04-0022-05

## An Inverter With New Topology and ARM-Based Control

Zheng Yulian, Tian Xiaoyan, Sun Pindong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** A new topological structure of photovoltaic inverter is proposed. It has a simple structure and has the ability to step up/down conversion and adapt to wide voltage range compared with the one-stage PV grid-connected inverter. Then, one-cycle control based on ARM is introduced with lower power consumption, smaller size and higher accuracy compared with the traditional one-cycle control. Finally, the control strategy is confirmed to be correct and effective by the results of simulation and experiment.

**Key words:** ARM controller, inverter, one-cycle control, optical-voltage

开发、利用可再生能源是解决能源危机和环境污染的重要途径之一, 太阳能因储能丰富, 使用安全可靠、无污染、可永续利用, 已成为人们探索并得到一定发展的新能源之一. 文献[1]采用了单周期控制策略将太阳能转换为电能, 单周期控制技术<sup>[2]</sup>是 Smedley K. M. 等人于 1991 年提出的, 其具有动态响应快、输入扰动抑制能力强、通常用模拟电路来实现等特点. 考虑光伏电池在工作时, 其输出功率随光照变化的特性, 需要对输出功率和电压进行跟踪, 单用模拟电路实现比较复杂, 通常采用模拟和数字电路相结合的方法. 在这里主要解决如何用数字电路的方式实现单周期控制, 本文提出采用 ARM 作为控制器来实现全数字式的单周期控制. 同时, 还提出了逆变电源的新型拓扑结构, 即电感跨接式升、降压电路, 该电路具有升、降压的特性, 相对于单级式并网逆变器可以适应较宽的电压范围, 而且结构简单.

## 1 新型逆变电源的工作原理

### 1.1 新型逆变电源的电路结构

新型逆变电源的主电路如图 1 所示, 由光伏阵列、输入侧和输出侧的滤波电容、全桥电路和储能电感(储能电感跨接在两桥臂中间)等组成. 采用数字单周期控制策略, 使开关管的占空比随着参考电压的变化而变化, 输出频率为 50 Hz, 幅值可升可降的交流电压. 整个系统如图 2 所示.

### 1.2 开关管的工作模式

该全桥逆变电路分别工作在正半周和负半周, 每个半周都等效于 Buck-Boost 电路. 正半周时,  $T_2$ 、 $T_3$  截止, 第一阶段  $T_1$ 、 $T_4$  导通,  $T_5$  截止, 电感充电储存能量, 电容  $C$  向负载提供能量; 第二阶段  $T_1$ 、 $T_4$  截止,  $T_5$  导通, 电感释放能量, 向负载供电, 电容  $C$  储能. 负半周时,  $T_1$ 、 $T_4$  截止, 第一阶段  $T_2$ 、 $T_3$  导通,  $T_5$  截止, 电感

收稿日期: 2012-10-26.

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子与电力传动. E-mail: 61019@njnu.edu.cn

反方向充电储能,电容  $C$  向负载提供能量;第二阶段  $T_2, T_3$  截止,  $T_5$  导通,电感释放能量,向负载反向供电,电容  $C$  反向储能。

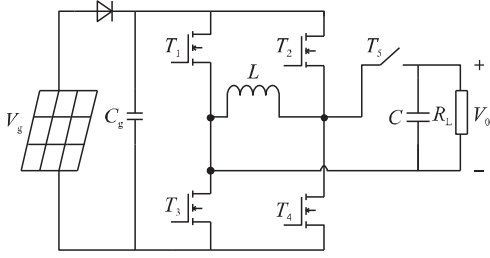


图 1 电感跨接式全桥逆变电路图

Fig. 1 Full-bridge inverter circuit with jumper inductance

由 Buck-Boost 电路的工作原理<sup>[3]</sup>可以得到:

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_g, \quad (1)$$

其中,  $V_0$  为输出电压;  $V_g$  为输入电压;  $D = \tau / T_s$  为占空比;  $T_s$  为开关管的切换周期;  $\tau$  为正半周开关管  $T_1, T_4$  或负半周  $T_2, T_3$  的导通时间。

通过调整  $D$  的大小可以使输出的交流电压  $V_0$  的幅值发生变化: 当  $0 < D < 0.5$  时, 输出电压幅值小于输入直流电压值, 为降压; 当  $0.5 < D < 1$  时, 输出电压幅值大于输入直流电压值, 为升压。当要求交流输出为 220 V 时, 可减少光伏器件的串联个数。

按上述开关模式控制时, 开关管  $T_1 \sim T_4$  及  $T_5$  的驱动脉冲波形如图 3, 其中图 3(a) 为正半周开关管驱动脉冲波形, 图 3(b) 为负半周开关管驱动脉冲波形。

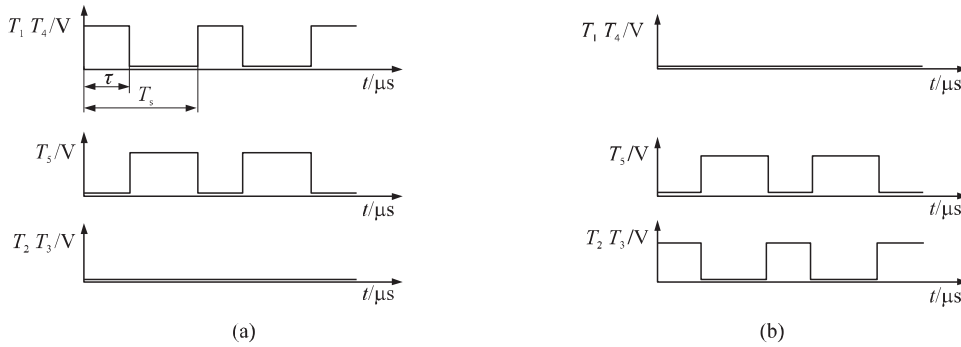


图 3  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  的触发脉冲波形图

Fig. 3  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  trigger pulse waveforms

## 2 新型逆变电源的单周期控制

### 2.1 单周期控制策略

传统的单周期控制是用模拟电路来实现的, 主要由带复位功能的积分电路、电压比较器、参考电压发生器、时钟发生器、RS 触发器等构成, 硬件电路及关键点的输出波形如图 4 所示。

单周期控制的积分电路有下列关系:

$$V_c = \frac{1}{R_2 C} \int_0^{\tau} k_{vf} V_g dt = V_{ref}, \quad (2)$$

其中  $K_{vf}$  是电压采样系数。当  $V_{ref}$  按正弦规律变化时, 输出电压并非正弦, 因此欲使输出电压为正弦值, 应满足下式:

$$\frac{D}{1-D} = k_v \sin(\omega t), \quad (3)$$

求解上式可得:

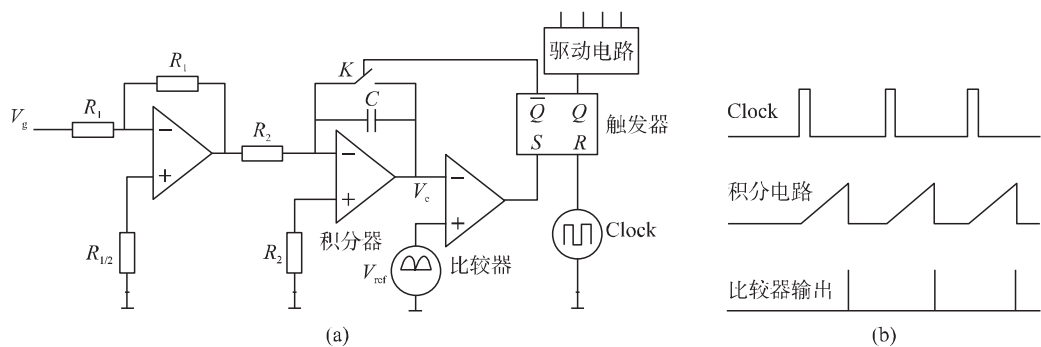


图 4 单周期控制电路及输出波形图

Fig. 4 Circuit of one-cycle control and the output waveforms

$$D = \frac{k_v \sin(wt)}{1 + k_v \sin(wt)} \tag{4}$$

若参考电压  $V_{\text{ref}}$  能够按(4)式占空比  $D$  所示的规律变化,则有:

$$V_0 = k_v V_g \sin(wt) \tag{5}$$

$V_{\text{ref}}$  的变化规律如表 1.

表 1  $V_{\text{ref}}$  的变化规律

Table 1 Change rule of  $V_{\text{ref}}$

序号	0	1	2	3	4	...	9	10	11	...	19
$\theta$	0	9°	18°	27°	36°	...	81°	90°	99°	...	180°
$\sin\theta$	0	0.156	0.309	0.454	0.588	...	0.988	1	0.988	...	0
$D(V_{\text{ref}})$	0	0.384	0.553	0.645	0.702	...	0.798	0.8	0.798	...	0

可以通过控制 Buck-Boost 电路开关管的占空比  $D$  按(4)式所示的规律变化,配合极性控制,则可输出正弦电压  $V_0$ ,调整  $k_v$  的值可以改变输出电压的幅值,达到升、降压的效果(当  $k_v = 4$  时  $D_{\text{max}} = 0.8$ ).

2.2 数字单周期控制策略

单周期控制策略的核心在于每个周期都根据采样值而改变占空比,从而实现快速跟踪,使系统具有良好的动态特性.本文采用 Arm Cortex-m3 系列处理器:STM32F103RBT6 作为主控制器来实现上述新型逆变电源的数字单周期控制,原模拟单周期控制的各个部分都用数字的方式来实现,该控制器是基于 ARM 核心的带 128 K 字节闪存的微控制器,最高工作频率为 72 MHz,集成单周期乘法和硬件除法,ADC 采样具有 1 M 的转化速率,满足逆变器控制要求.

软件设计主要是围绕控制部分展开,首先完成驱动信号的产生,通过采样光伏电池的输出电压并进行 A/D 转换,与存储器中预先设定的参考电压进行比较,从而控制占空比,实现交流输出.其设计流程如图 5 所示.图 5(a)~(c) 分别为主程序流程图、定时器 2 中断服务程序流程图、A/D 中断响应子程序流程图.

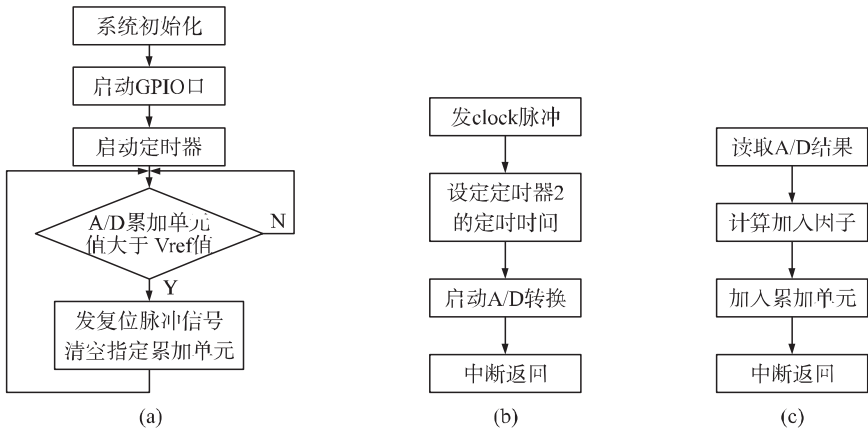


图 5 程序设计流程图

Fig. 5 Flow chart of the program

### 3 仿真与实验

#### 3.1 仿真分析

使用 Matlab Simulink 工具构建该系统的仿真模型,仿真参数为:输入电压为 100 V;开关频率为 20 kHz;储能电感  $L=0.4$  mH;电感的寄生电阻  $R_l=0.2$   $\Omega$ ;输出电容  $C=20$   $\mu$ F;负载电阻  $R_l=40$   $\Omega$   $k_v=4$ ;仿真波形如图 6 所示,图 6(a)~(c) 分别为参考电压  $V_{ref}$  的波形、积分器输出波形、输出正弦电压  $V_o$  的波形。由图可知输出电压的幅值为 390 V。

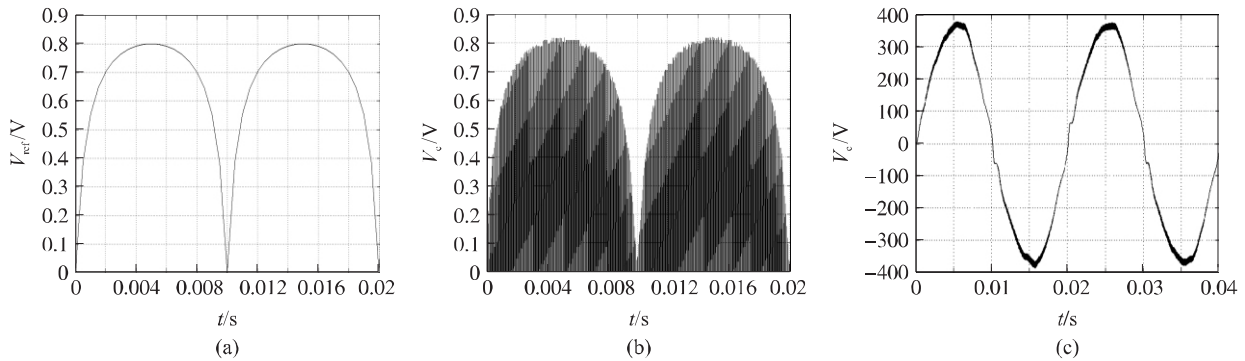


图 6 单周期控制 Simulink 仿真关键波形图

Fig. 6 Key waveforms of simulink model of one-cycle control

从图 6 可以看出,积分器的输出每个周期都按参考电压变化,而参考电压按图 6(a),即按公式(4) 占空比  $D$  所示的规律变化,调整  $k_v$  的值可以改变输出电压的幅值,实现升降压控制。本次仿真取  $k_v=4$ ,则  $D_{max}=0.8$ ,所以为升压。由图 6(c) 可以看出输出电压为正弦波,畸变小。图 7 给出了输出正弦电压的频谱含量波形,从图中可以看出谐波失真  $THD=4.09\%$ ,说明输出的交流电压的谐波分量很小,电网的波形质量好,满足要求。

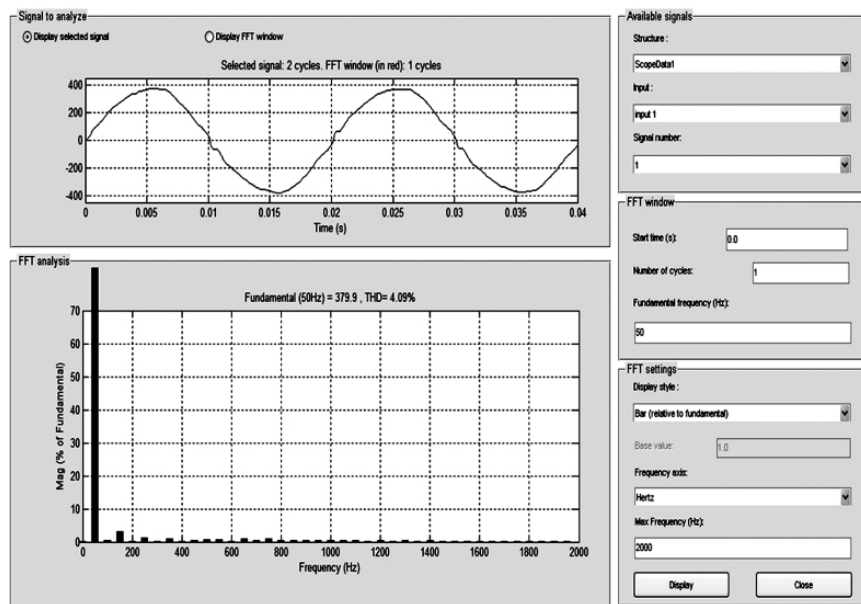


图 7 输出正弦电压的 FFT 分析

Fig. 7 FFT sine analysis of output voltage

#### 3.2 实验结果

本文搭建的模拟全桥逆变电路,在采用 ARM 控制的基础上进行了原理性验证实验,输入直流电压为 80 V,开关管的工作频率为 20 kHz,最大占空比为  $D_{max}=0.8$  (升压),由 ARM 单周期控制产生的驱动信号波形如图 8(a)~(c) 所示,其中图 8(a) 为开关管  $T_1$ 、 $T_4$  的驱动信号, $T_2$ 、 $T_3$  的驱动信号与  $T_1$ 、 $T_4$  互补,如图 8(b),图 8(c) 为开关管  $T_5$  的驱动信号,该驱动信号分别与  $T_1$ 、 $T_4$  和  $T_2$ 、 $T_3$  的驱动信号互补,输出的交流电压波形如图 8(d) 所示,该波形畸变很小,与理论分析相一致。

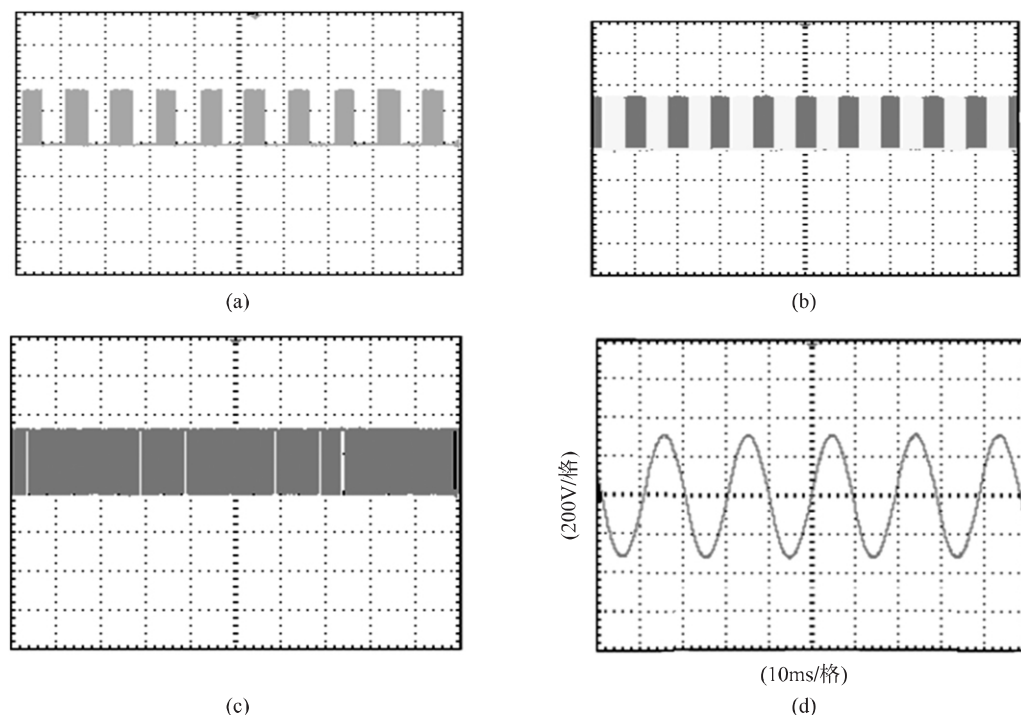


图8 输出波形图

Fig.8 Output waveforms

## 4 结论

本文主电路采用新型拓扑逆变结构,将储能电感跨接在全桥逆变电路两桥臂的中间,通过对开关管导通顺序的控制来实现光伏电池的升、降压功能,解决了单级式并网逆变器对输入电压要求高的问题;控制电路采用 ARM 来实现全数字式的单周期控制,相对于传统的模拟单周期控制,其控制电路结构简单、设计方便、精确度高,是一种高性价比的控制方案;最后通过仿真分析和实验验证了该新型拓扑结构逆变器在全数字式单周期的控制下的准确性与有效性。

## [参考文献](References)

- [1] Smedley K M. One-cycle controller for renewable energy conversion systems [C]//Industrial Electronics ,IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE( IECON 2008) . Orlando ,Florida 2008: 13-16.
- [2] Smedley K M ,Cuk S. One-cycle control of switching converters[C]//Power Electronics Specialists Conference ,PESC'91 Record. 22nd Annual IEEE. Massachusetts Institute of Technology ,Massachusetts ,1991: 888-896.
- [3] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社 2004.  
Chen Jian. Power Electronics [M]. Beijing: Higher Education Press 2004. ( in Chinese)
- [4] Smedley K M ,Cuk S. Dynamics of one-cycle controlled cuk converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 1995 ,10 ( 6) : 634-639.
- [5] Santi E ,Cuk S. Modeling of one-cycle controlled switching converters [C]//Telecommunications Energy Conference , INTELEC'92. 14th International. Washington ,DC ,1992: 131-138.
- [6] Lai Z R ,Smedley K M. A new extension of one-cycle control and its application to switching power amplifiers[J]. IEEE Trans on Power Electronics ,1996 ,11 ( 1) : 99-105.
- [7] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社 2005.  
Xu Dehong. Power Electronic System Modeling and Control [M]. Beijing: Machine Industry Press 2005. ( in Chinese)
- [8] 李飞亮 张琳洁. 基于 DSP 的大功率数字开关电源设计[J]. 电子技术 2011 ,38( 12) : 32-33.  
Li Feiliang Zhang Linjie. The design of the high power digital switch power based on DSP [J]. Electronic Technology 2011 , 38( 12) : 32-33. ( in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]