

基于滑模控制的 Cuk 光伏逆变器研究^①

岳 舟^②

(湖南人文科技学院机电工程系 娄底 417001)

摘 要 针对小容量光伏发电系统发电容量较小、输出电压等级低且变化范围比较大,而传统的电压型桥式逆变器已经不能满足需要的情况,提出了一种基于滑模控制的新型双 Cuk 逆变器,并对其工作原理进行了详细的理论分析。该逆变器应用滑模控制方法实现了输出波形的正弦化,具有更好的输出特性。仿真表明该逆变器能够实现升降压逆变,可以工作在较宽的输入电压范围中,能够有效降低直流侧脉动对输出造成的影响,因此在小容量光伏发电系统中具有广泛的应用前景。

关键词 Cuk 电路, 光伏逆变器, 滑模控制, 仿真

0 引 言

为解决能源短缺和环境污染问题,人类需要寻找替代能源,走节能减排,发展低碳经济的可持续发展的道路^[1]。目前人类使用的石油、煤炭、天然气等能源的天然储量在一天天减少,有关数据显示,世界化石能源的剩余开采量已接近极限^[2,3];从另一方面看,这些能源的使用也对环境造成了严重污染。在这种情况下,研究人员的研究目标选择了太阳能。太阳能在世界范围内具有巨大的利用空间,它具有分布广泛,不污染环境等优点,是目前世界公认的最理想的替代能源^[4,5]。于是人们展开了太阳能光伏发电研究。太阳能光伏发电系统中的核心部分是光伏发电用并网逆变器,而并网逆变器可靠性的好坏和效率直接影响到整个光伏发电系统的性能和投资^[6]。因此对光伏逆变器的设计受到了足够的重视。上世纪 80 年代,美国加州理工大学的 Shobodan Cuk 提出了一种新的变换器电路(称为 Cuk 电路),此电路在设计光伏发电用并网逆变器中得到了应用。

目前,对光伏并网逆变器拓扑结构的研究向着更宽的输入输出电压范围、更加紧凑的设计以及更高效率的方向发展^[7,8]。在查阅大量国内外相关文献的基础上,基于 Cuk 电路结构,本文提出了一种

新型光伏发电用并网逆变器的拓扑结构^[9,10]。这种新型双 Cuk 逆变器采用了两组独立对称的双向 Cuk 电路,其结构紧凑,控制方法采用滑模控制策略,从而高性能地实现了交流信号功率的放大,因此适用于 AC 模块。根据系统的输入输出特性,基于滑模控制方法对新型双 Cuk 逆变器进行了 Matlab/Simulink 仿真。仿真研究结果表明:该新型光伏发电用双 Cuk 逆变器的性能指标基本达到了设计要求,验证了该拓扑结构和滑模控制方法的有效性以及理论分析的正确性,为光伏逆变器的实用化和市场化提供了理论基础。

1 拓扑结构及工作原理

Cuk 变换器的线路结构如图 1 所示。

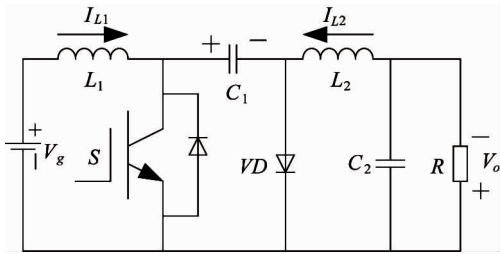


图 1 Cuk 电路

此种变换器的优点是当电路工作在连续状态下时,变换器的输入电流和输出电流脉动都较小,并且

① 湖南省自然科学基金(12JJ2040)和湖南省科研条件创新(2010TT2055)资助项目。
② 男,1982 年生,硕士,讲师;研究方向:电力电子与电力传动;联系人,E-mail: yuezhou2000@163.com
(收稿日期:2014-03-24)

增加电感 L_1 和 L_2 的值,还可以减小纹波电流的值,如果通过耦合电感的方法,理论上可以获得输出电流零纹波^[11]。由于 Cuk 变换器的这种特性,在实际应用中常常不需要再加入输入/输出抗电磁干扰滤波器^[12]。Cuk 变换器既可以用做升压变换器也可以做降压变换器,输出电压的大小取决于开关管 S 的开关占空比 D 。

在研究 Cuk 电路的基础上,本文提出了新型双 Cuk 逆变器,其基本电路结构如图 2 所示。其中 U_{in} 为直流输入, L_3 和 L_4 为输出滤波电感, $S_1 - S_4$ 为双

向开关晶体管, C_1 和 C_4 为滤波电容,二极管 $D_1 - D_4$ 主要起到续流的作用, R 为电阻负载。该新型拓扑结构采用了两组对称的 Cuk 电路,在两组双向 Cuk 变换器的输出端跨接负载,这两组 Cuk 变换器分别放大和跟踪两个具有相同直流偏置并且相位相差 180° 的正弦波参考量,使输出的电容电压 u_1 和 u_2 随着参考电压而变化,以调节 Cuk 变换器的输出电压,从而实现 DC-AC 的变换。假设图 2 当中左半部为正组逆变器,而右半部为负组逆变器。

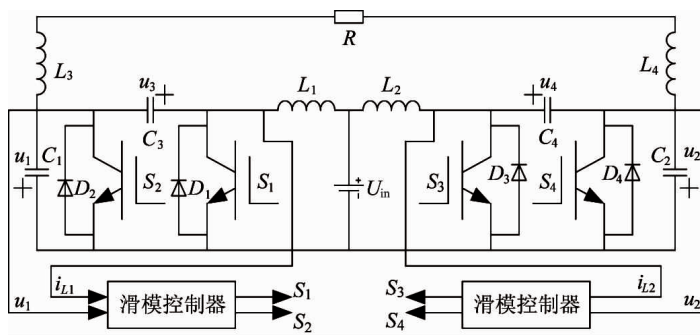


图 2 双 Cuk 逆变器基本电路结构

开关器件 $S_1 - S_4$ 由滑模控制器产生的开关信号控制,使输出的电容电压 u_1 和 u_2 随着参考电压而变化,输出的电容电压 u_1 和 u_2 是含有相同直流偏置的正弦电压波形,并且它们的相位角相差 180° ,即:

$$\begin{cases} u_1 = U_m \sin \omega t + U_{dc} \\ u_2 = U_m \sin(\omega t + \pi) + U_{dc} \\ u_0 = u_1 - u_2 = 2U_m \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

该新型双 Cuk 逆变器的输出电流是正负交变的,从而要求电路中的电流能够双向流通,这里采用两组对称的双向 Cuk 电路组成,并且各自独立工作,将其中的一组 Cuk 变换器看作是理想的电压源,即得该拓扑的等效电路如图 3 所示。

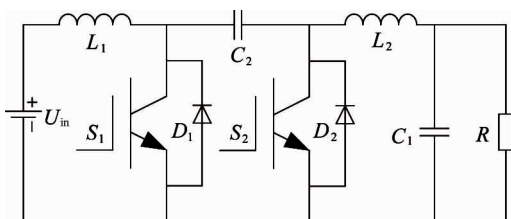


图 3 等效电路

根据状态平均原理可得

$$u_1/U_{in} = D/(1-D) \quad (2)$$

电压增益为

$$u_0 = u_1 - u_2 = \frac{2D-1}{D(1-D)} U_{in} \quad (3)$$

2 滑模控制策略

双 Cuk 型逆变器等效电路如图 3 所示,假设电感 L_1, L_2 的电流为 i_1, i_2 , 电容 C_1, C_2 的电压为 u_1, u_2 , 并且定义:

$$\gamma = \begin{cases} 1 & (S_1 \text{ 闭合}, S_2 \text{ 断开}) \\ 0 & (S_1 \text{ 断开}, S_2 \text{ 闭合}) \end{cases} \quad (4)$$

当 $\gamma = 1$ 时,可得状态方程为

$$\begin{cases} du_1/dt = -i_2/C_1 \\ du_2/dt = -u_2/(RC_2) + i_2/C_2 \\ di_1/dt = U_{in}/L_1 \\ di_2/dt = u_1/L_2 - u_2/L_2 \end{cases} \quad (5)$$

当 $\gamma = 0$ 时,可得状态方程为

$$\begin{cases} du_1/dt = i_1/C_1 \\ du_2/dt = -u_2/(RC_2) + i_2/C_2 \\ di_1/dt = U_{in}/L_1 - u_1/L_1 \\ di_2/dt = -u_2/L_2 \end{cases} \quad (6)$$

选取状态量 i_1, i_2, u_1, u_2 , 并假设 $L_1 = L_2 = L, C_1$

$= C_2 = C$, 则状态方程为

$$\begin{cases} du_1/dt = i_1/C - \gamma(i_1 + i_2)/C \\ du_2/dt = -u_2/(RC) + i_2/C \\ di_1/dt = -u_1/L + \gamma u_1/L + U_{in}/L \\ di_2/dt = \gamma u_1/L - u_2/L \end{cases} \quad (7)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ du_2/dt \\ di_1/dt \\ di_2/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/C & 0 \\ 0 & -1/(RC) & 0 & 1/C \\ -1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/L & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} - (i_1 + i_2)/C \\ 0 \\ u_1/L \\ u_2/L \end{bmatrix} \gamma + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_{in}/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了实现输出电压的调节,令 u_2 为最终的控制目标,并且选取电感 L_1 、 L_2 的电流 i_1 、 i_2 之和作为直接控制对象,使 u_2 成为间接的控制对象,那么设计的滑模切换面函数为

$$S = i_1 + i_2 - i_{ref} = 0 \quad (9)$$

其中 i_{ref} 为时变的电感电流参考值。

再令下式成立:

$$\begin{cases} \dot{u}_1^* = 0 \\ \dot{u}_2^* = 0 \\ \dot{i}_1^* = 0 \\ \dot{i}_2^* = 0 \end{cases} \quad (10)$$

结合式(8)得系统的稳定点为

$$\begin{cases} i_1^* = (u_2^*)^2/(RU_{in}) \\ i_2^* = u_2^*/R \\ u_1^* = u_2^* + U_{in} \\ u_2^* = u_2^* \end{cases} \quad (11)$$

即

$$(u_1^*, u_2^*, i_1^*, i_2^*) = (u_2^* + U_{in}, u_2^*, (u_2^*)^2/(RU_{in}), u_2^*/R) \quad (12)$$

则滑模切换面函数可写成

$$S = i_1 + i_2 - u_2^*(u_2^* + U_{in})/(RU_{in}) = 0 \quad (13)$$

由式(13)可知,由于输入电源和负载电阻是时变的,因此设计的滑模切换面表现出时变的特性,从而实现了输出电压的调节。相应的滑模变结构控制为

$$\gamma = \begin{cases} 1, & S < 0 \\ 0, & S > 0 \end{cases} \quad (14)$$

令 $\dot{S} = 0$, 并假设具有很高的开关频率,即 $(u_2^*)^2/(RU_{in})$ 可以看作常量,代入式(7),得到切换面上的等效控制:

$$\gamma = \frac{u_1 + u_2 - U_{in}}{2u_1} \quad (15)$$

将式(15)和切换面等式式(13)代入式(7),得到变换器在切换面上的滑模运动方程式:

$$\begin{cases} du_1/dt = \frac{i_1}{C} - \frac{u_1 + u_2 - U_{in}}{2u_1} \cdot \frac{u_2^*(u_2^* + U_{in})}{RU_{in}} \\ di_2/dt = (u_1 - u_2 - U_{in})/2L \\ di_1/dt = (u_2 - u_1 + U_{in})/2L \\ du_2/dt = -u_2/(RC) + i_2/C \\ i_1 + i_2 = u_2^*(u_2^* + U_{in})/(RU_{in}) \end{cases} \quad (16)$$

滑模函数 S 信号加到一个滞环比较器 H_1 , 由 H_1 产生开关控制信号 γ 互补作用于功率开关器件 S_1 和 S_2 , 通过调节 i_{L1} 和 u_1 使 S 维持在零附近,从而实现了输出电压对参考电压信号的准确跟踪。另外,由于电感电流与负载情况有关,难以确定电感电流的参考值,因此在实际应用当中,将电感电流的反馈量通过一个高通滤波器,也就是取反馈量的高频分量来代替电感电流的偏差值 $i_{L1} - i_{Lref}$, 所以这里只需要对电感电流的高频分量进行控制。

3 仿真研究

为了验证所提逆变器工作原理的正确性和控制方法的有效性,在 Matlab/Simulink 环境下建立了控制系统的仿真模型,如图 4 所示。图 4 中的 Cuk 逆变器仿真模型见图 5 所示。仿真参数设置如下:输入直流电压 $U_i = 100V$; 开关频率 $f_s = 20kHz$; 负载电阻 $R = 50\Omega$; 电感 $L = 800\mu H$; 电容为 $C = 100\mu F$; 滑模控制系数 $K_1 = 0.1, K_2 = 0.144$ 。

3.1 静态仿真

为验证系统输出对参考信号的跟踪情况,仿真时任取参考信号分别为 $200V/75Hz$ 、 $100V/50Hz$ 和 $50V/25Hz$, 输出电压仿真波形如图 6 所示。图 7 是参考电压设为 $100V/50Hz$ 时的电感 L_3 的电流波形。

3.2 动态仿真

假定参考信号发生变化,而负载不变。仿真过

程中初始的参考信号设定为 220V/50Hz, 经过 0.04s 后改变为 100V/25Hz, 再经过 0.08s 又重新设定为 220V/50Hz。输出电压的仿真波形如图 8 所示。

再假定负载发生变化, 而参考信号不变。仿真

过程中参考信号设定为 220V/50Hz, 初始时负载为 50Ω , 经过 0.04s 后变化为空载状态, 再经过 0.04s 负载再次设定为 50Ω , 相应的输出电压和电流波形如图 9 所示。

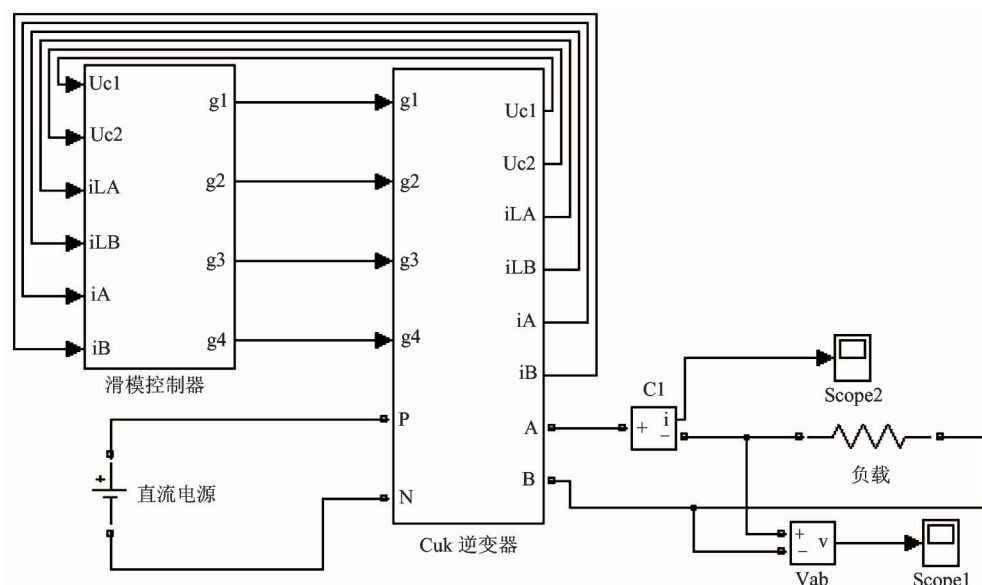


图 4 系统仿真模型

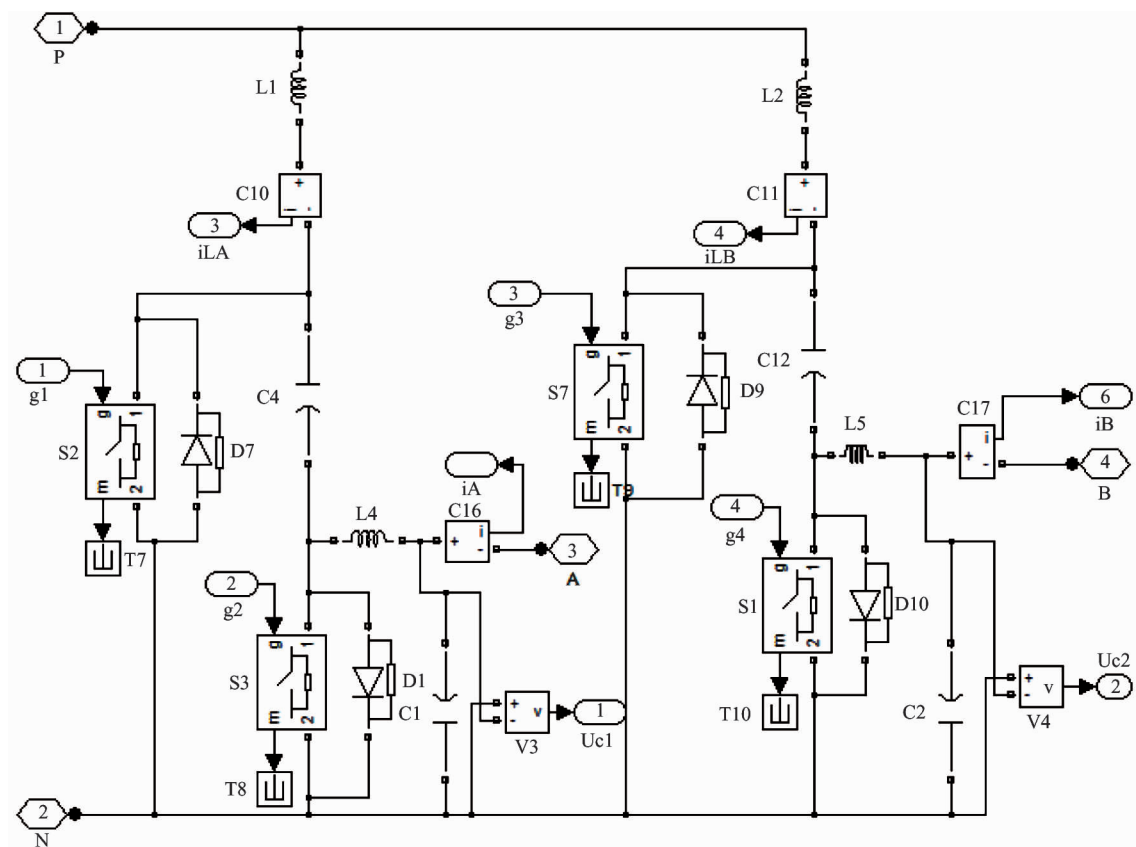
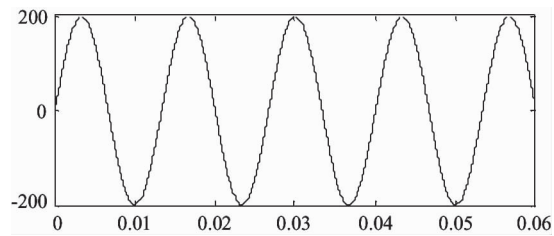
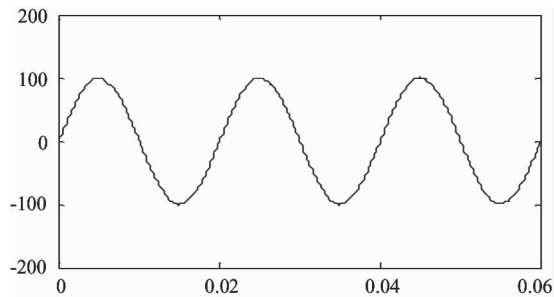


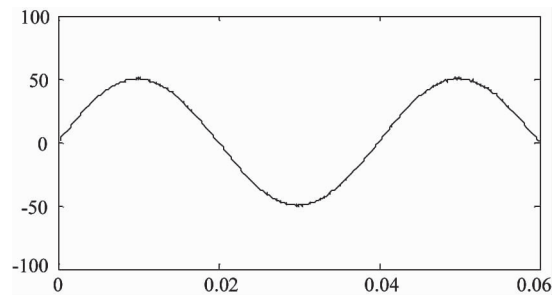
图 5 Cuk 逆变器仿真模型



(a) 输出设为 200V/75Hz 的输出波形



(b) 输出设为 100V/50Hz 的输出波形



(c) 输出设为 50V/25Hz 的输出波形

图 6 输出电压仿真波形

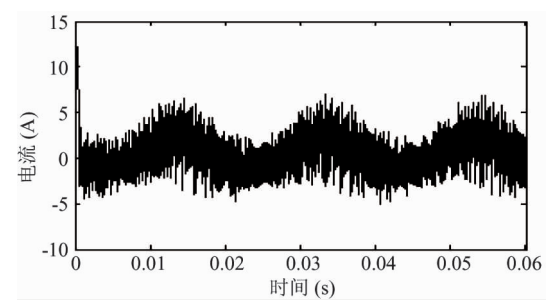


图 7 电感 L_3 的电流波形

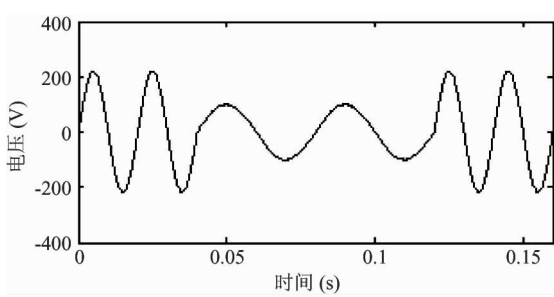
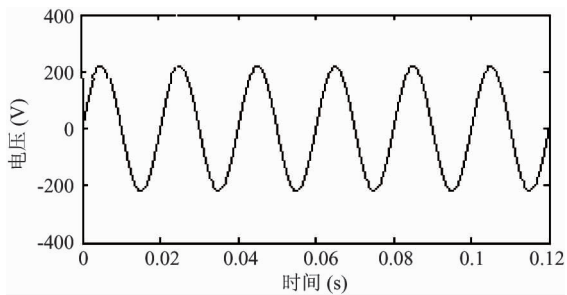
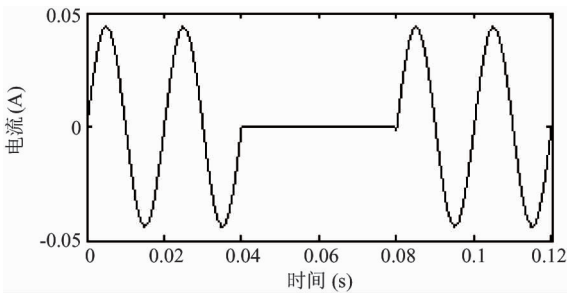


图 8 参考电压频率与幅值发生突变时的电压波形



(a) 输出电压波形



(b) 输出电流波形

图 9 负载由 50Ω 突变至空载又回到 50Ω 的仿真波形

从仿真结果可以看出,此逆变器具有以下优点:

(1)可以升降压逆变,对输入较低或变化范围较大的直流电压,此逆变器仍能正常完成逆变功能。

(2)电路的能量转换由电容实现。由于电容电压不能突变,因此此种逆变器具有较强的抑制电源电压脉动的能力。

(3)高频调制工作的开关管由于和电感串联,无桥臂直通问题,可靠性高;续流电流通过单独的二极管,使功率开关管和功率二极管可以分别优化设计。

(4)如果将 S_3 和 S_4 变成具有单向阻断能力的开关,该新型逆变器则变成电流单向流动的逆变器,可适用于并联或者并网等场合而无环流和均流问题。

4 结 论

太阳能是一种无污染的可再生能源,是 21 世纪人类可利用的重要能源。太阳能光伏应用的光伏并网逆变器的研究正越来越受到方泛重视。基于此认识,本文从光伏发电用逆变器的拓扑结构入手进行了研究,将一种新型的双 Cuk 逆变器拓扑结构成功应用在 AC 模块光伏发电用逆变器当中。本文详细介绍了该新型双 Cuk 逆变器的拓扑结构和工作原理。该逆变器克服了传统电压源型逆变器的诸多缺

点,使逆变器结构更加紧凑,具有更高的效率,通过控制可以使其交流侧输出电压低于或者高于直流侧电压。当逆变器独立运行时,采用了一种新型的滑模控制方法,具有更好的输出特性,大大改善了逆变器性能,具有较好的应用价值。

参考文献

- [1] 张斐,许建平,舒立三等. 低输出电压纹波三态 PCC-MCUPFC 变换器. 电力自动化设备, 2014,34(1): 80-84
- [2] Corzine K, Familant Y. A New Cascaded Multilevel H-Bridge Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(1):125-131
- [3] 希望,阿不都瓦依提,晁勤. 基于 Cuk 变换器风光联合发电分时 MPPT 系统研究. 可再生能源, 2014,32(2):163-167
- [4] Lo'pez O S, Freijedo F D, Yepes A G, et al. Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(1):140-147
- [5] Shyu K K, Yang M J, Wang T W, et al. T-S fuzzy controller design based on LMI for a shunt active power filter system. In: Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, China, 2007. 620-625
- [6] Jain S, Agarwal V. A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(5):1928-1940
- [7] 文雪峰, 佃松宜, 邓翔等. 一种针对隔离 Cuk 的新型 PFC 数字控制算法. 电力电子技术, 2013,47(11):30-32
- [8] Gubía E, Sanchis P, Ursúa A, et al. Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2007, 15(17):629-650
- [9] Zhang L H, Yang X, Yao X F. An isolated single stage buck-boost inverter. In: Proceedings of the 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 2008. 2389-2395
- [10] 王立乔, 王欣, 仇雷. 一种新型单级非隔离双 Cuk 逆变器. 中国电机工程学报, 2014,34(6):846-854
- [11] 张鹏, 肖岚. 单初级绕组双输入 Cuk 全桥变换器软开关研究. 电力电子技术, 2013,47(4):46-48
- [12] Prasad B S, Jain S, Agarwal V. Universal single-stage grid-connected inverter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008,23(1):128-133

Research on a Cuk photovoltaic inverter based on sliding mode control

Yue Zhou

(Department of Electrical and Mechanical Engineering, Hunan University of Humanities and Science and Technology, Loudi 417001)

Abstract

Aiming at the fact a traditional voltage bridge inverter can not meet the requirements of a small photovoltaic power generation system with a smaller power generating capacity, a lower output voltage level, and a wider transformation range, a novel dual Cuk inverter based on sliding mode control is proposed, ant its working principle and modulalion are theoretically analyzed in detail. The inverter uses a sliding mode control method to achieve its sine output waveform and better output property. The simulation of the control system was constructed in Matlab/Simulink. The results of the simulation and experiment on the inverter shows that its circuit works in boost mode or buck mode, adapts to the large range of input voltage, and has a strong ability to reduce input voltage ripple to affect on the output, so it has extensive applications in small photovoltaic power generation systems.

Key words: Cuk circuit, photovoltaic inverter, slide mode control, simulation