

新型组合式 Sepic 逆变器双闭环控制研究^①

岳 舟^②

(湖南人文科技学院能源与机电工程学院 娄底 417000)

摘要 针对适用于太阳能并网发电系统的光伏并网逆变器,提出了一种电压电流双闭环控制策略,并据此建立了新型组合式 Sepic 逆变器的双闭环控制系统。利用 Matlab/Simulink 模仿工具建立了该控制系统的仿真模型,对该系统进行了稳态仿真和动态仿真,以验证此系统的可行性和有效性。仿真实验结果表明,这种新型组合式 Sepic 逆变器双闭环控制具有良好的动态和稳态性能。

关键词 Sepic 变换器,组合式,并网逆变器,双闭环控制,仿真

0 引言

随着太阳能、风能以及焊接设备的广泛应用,逆变器作为关键技术也得到广泛的应用^[1,2]。逆变器在新能源的开发利用和焊接设备应用领域具有至关重要的地位^[3,4]。研究表明,Buck 逆变器^[5]、Boost 逆变器^[6]、Buck-Boost 逆变器^[7]等各种组合式新型逆变器都具有 Cuk 逆变器的特点,其优点是能够实现较高的稳态精度和优良的动态响应速度,相较于其他类型结构的逆变器,电流纹波比较低,且两组 DC-DC 直流变换器独立工作,故系统稳定,控制简单。越来越多的专家学者对组合式新型逆变器进行了深入的设计和研究^[8,9]。其应用范围也拓展到光伏发电系统、UPS、放大器和焊接设备等领域,并具有非常重要的理论研究意义和实用价值。

太阳能利用的主要形式是太阳能光伏并网发电,目前对光伏并网逆变器拓扑结构的研究受到了重视,而且朝着更加紧凑的设计、更高的效率以及更宽的输入输出电压范围的方向发展^[10]。本研究在查阅大量国内外相关文献的基础上,基于 Sepic 电路结构,提出了一种新型光伏发电用并网逆变器的

拓扑结构^[11]。这种新型组合式 Sepic 逆变器采用了两组独立对称的双向 Sepic 电路,其结构紧凑,控制方法采用电压电流双闭环控制策略,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,本研究基于双闭环控制方法对新型组合式 Sepic 逆变器进行了 Matlab/Simulink 仿真,最后采用 TI 公司的 DSP 芯片(TMS320F2812)作为核心控制芯片,完成了一台 1kW 的原理样机。仿真和试验结果表明:该新型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双闭环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 拓扑结构与工作原理

图 1 为 Sepic 电路结构^[12]。图 1 中: U_{in} 表示输入侧电源电压, U_{out} 表示输出侧电源电压, L_1, L_2 表示电感值大小, C_{in}, C_{out} 分别表示输入侧以及输出侧电容, C_s 表示中间的转换电容,S 表示 Mosfet 开关,D 表示二极管; I_{L1}, I_{L2} 表示流过相应电感的电流平均值(相应的电流瞬时值为 i_{L1}, i_{L2}), I_{Cs} 表示流过中间

^① 湖南省科技计划(2014GK2004)资助项目。

^② 男,1982 年生,硕士,副教授;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:2016-11-09)

转换电容的电流平均值(相应的电流瞬时值为 i_{Cs}), I_s 表示流经开关 S 的电流平均值(相应的电流瞬时值为 i_s), I_{out} 表示输出端的电流平均值(相应的电流瞬时值为 i_{out})。

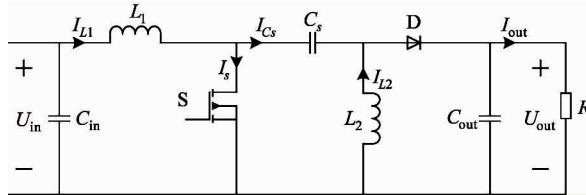


图 1 Sepic 电路结构

当 S 导通时, U_{in} 为 L_1 充电, C_s 为 L_2 充电, C_{out} 为负载供电;当 S 关断时, L_1 为 C_s 充电, 同时与 L_2 一起为负载供电。

由于电感两端电压在一个周期内积分为零, 则有

$$\begin{cases} U_{in}D/f + (U_{in} - U_{Cs} - U_{out})(1 - D)/f = 0 \\ U_{Cs}D/f + [-U_{out}(1 - D)]/f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 表示占空比; f 表示开关 S 的工作频率。假定 C_s 两端电压不变, 则由式(1)可推得

$$\begin{cases} U_{Cs} = U_{in} \frac{1}{1 - D} - U_{out} \\ U_{Cs} = \frac{1}{1 - D} U_{out} \end{cases} \Rightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (2)$$

Sepic 主电路通过调节占空比的大小来实现电压的升降, 且输出电压与输入电压的极性相同。

1978 年, Cuk 和 Erickson 根据推挽电路的工作原理提出了一种组合式新型 Cuk 逆变器^[13]。该逆变器的结构是由两组电流能双向流动的 Cuk DC 变换器所组成, 在两组 Cuk DC 变换器的输出端跨接负载。两组相对独立的 Cuk DC 变换器按照推挽电路的工作原理对称工作, 能够实现稳定的交流电压输出。1983 年, Cuk 和 Middlebrook 总结了此类组合式新型逆变器的特点, 得到了可由任意类型的电感电流可双向流动 DC - DC 变换器组合成的新型逆变器模型^[14], 其电路框图如图 2 所示。

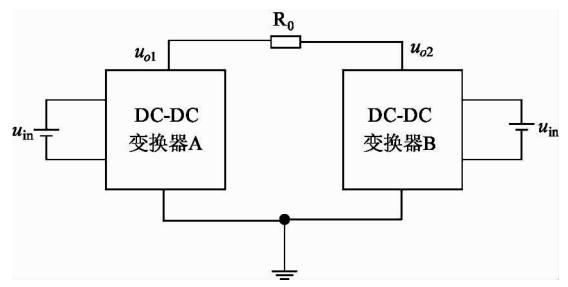


图 2 新型组合式逆变器

单相 Sepic 并网逆变器的电路图如图 3 所示。该逆变器采用了对称的两组双向 Sepic 电路, 负载连接在两组双向 Sepic 变换器的输出端, 每组 Sepic 变换器都跟踪和放大拥有相同直流偏置并且相位相差 180° 的正弦波参考信号, 使输出电容电压 u_{c1} 和 u_{c2} 随参考电压的变化而变化, 从而调节 Sepic 变换器的输出电压, 进行 DC - AC 的变换。

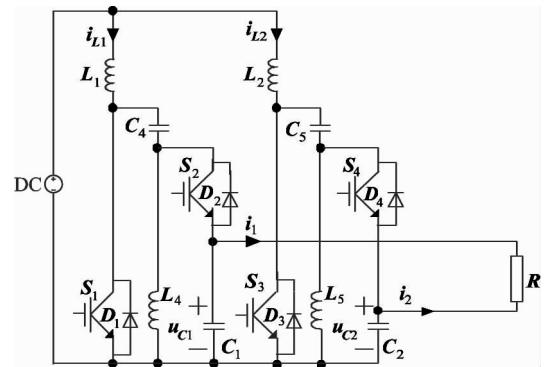


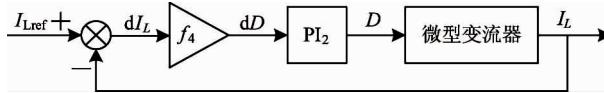
图 3 单相 Sepic 逆变器电路图

2 双闭环控制策略

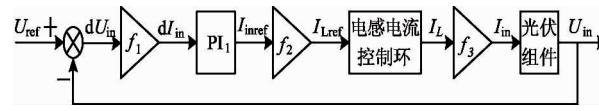
系统的控制框图如图 4 所示。针对双向 Sepic 变换器, 本文提出一种电压电流双闭环控制策略, 以实现对状态变量的解耦控制。由于电流内环控制实现了对电感电流的直接控制, 即使在负载条件突变的情况下也能快速地响应, 具有较高的可靠性, 故它对外界干扰具有较强的鲁棒性。而电压外环控制则实现了输入侧电压按照输出电压参考值变化^[15, 16]。

图 4 中, I_{inref} 为输入端电流的参考值, $f_1 = dI_{in}/dU_{in}$, $f_2 = I_{Lref}/I_{inref}$, $f_3 = I_{in}/I_L$, $f_4 = dD/dI_L$ 。 U_{ref} 为输出电压(即图 4 中微型变流器的输入侧电压), 其值与光伏组件的输出电压采样值 U_{in} 相减, 通过图中的

PI 调节器 PI_1 产生电感电流参考值 $I_{L\text{ref}}$, 该值与电感电流的采样值 I_L 相减, 通过 PI_2 产生占空比信号 D , 从而调节电感电流的值, 使其跟随参考值变化。通过光伏组件自身的 $U-I$ (电压-电流)特性关系, 将电流内环输出的电流信号转换成电压信号即构成电压外环, 这样就实现了微型变流器的输入侧电压能够根据输出给定值 U_{ref} 变化^[17]。



(a) 电感电流内环控制框图



(b) 电压外环控制框图

图 4 系统控制框图

由于微型变流器系统是非线性时变系统, 因此不能直接采用一般的线性理论。为了对微型变流器进行动态特性分析, 这里采用状态空间平均算法^[18]。

假定开关导通阶段的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 u \\ y = C_1 x \end{cases} \quad (3)$$

而开关关断阶段的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 u \\ y = C_2 x \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)平均计算, 可以得到

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A = A_1 d + A_2 (1 - d) \\ B = B_1 d + B_2 (1 - d) \\ C = C_1 d + C_2 (1 - d) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 是状态变量; u 是独立源; y 是输出变量; d 是占空比; A, B, A_1, A_2, B_1 及 B_2 均为系数矩阵。为方便分析系统的稳定性, 这里假设独立源、占空比、状态变量以及输出变量分别由稳态分量和扰动分量

构成, 即

$$\begin{cases} x = X + \hat{x} \\ u = U + \hat{u} \\ y = Y + \hat{y} \\ d = D + \hat{d} \end{cases} \quad (7)$$

结合式(3)~式(7), 可进一步推得

$$\begin{cases} \dot{X} + \dot{\hat{x}} = [A_1(D + \hat{d}) + A_2(1 - D - \hat{d})(X + \hat{x}) \\ \quad + [B_1(D + \hat{d}) + B_2(1 - D - \hat{d})](U + \hat{u})] \\ Y + \hat{y} = [C_1d + C_2(1 - d)](X + \hat{x}) \end{cases} \quad (8)$$

由于

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU = 0 \\ Y = CX \end{cases} \quad (9)$$

忽略扰动量的二次乘积项, 将式(9)进行化简得

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{u} + (A_1 - A_2)\hat{d}X + (B_1 - B_2)\hat{d}U \\ \dot{\hat{y}} = C\hat{x} + (C_1 - C_2)\hat{d}X \end{cases} \quad (10)$$

电流内环的开环传递函数与闭环传递函数分别为

$$\begin{cases} f_{I_o} = f_4 \cdot [k_{p2}(1 + \frac{1}{k_{i2}s})] \cdot \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \cdot H_i \\ f_{I_c} = \frac{f_4 \cdot [k_{p2}(1 + \frac{1}{k_{i2}s})] \cdot \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)}}{1 + f_4 \cdot [k_{p2}(1 + \frac{1}{k_{i2}s})] \cdot \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{i}_L(s)$ 为电感电流的扰动分量; H_i 为测流电阻值; k_{p2}, k_{i2} 为 PI_2 控制模块的比例和积分参数。添加电压外环控制后系统的控制环路传递函数为

$$f_U = f_1 [k_{p1}(1 + \frac{1}{k_{i1}s})] f_2 f_{I_c} f_3 r_{in} \quad (12)$$

式中: f_{I_c} 为电流内环闭环传递函数; r_{in} 为当前条件下组件的等效内阻; k_{p1}, k_{i1} 为 PI_1 控制模块的比例和积分参数。考虑系统的稳定性和动态性, 分别设定内环与外环的截止频率和相角裕度, 完成双闭环控制电路的设计。

3 系统仿真

利用 Matlab/Simpowersystems 模块以及编写 S 函数对图 3 所示的组合式 Sepic 逆变器进行仿真研究, 构建的系统仿真模型如图 5 所示。假定输入电源、功率开关管、电感以及电容等都为理想器件, 仿

真参数设置如下: 输入直流电压 $U_{dc} = 100V$; 开关频率 $f_s = 20\text{ kHz}$; 负载电阻 $R = 200\Omega$; 电感 $L_1 = L_2 = 130\mu\text{H}$; 电容 $C_1 = C_2 = 54\mu\text{F}$; 电压外环控制系数取 $K_{P1} = 5.538, K_{I1} = 4.99\text{e-}4$; 电感电流内环控制系数取 $K_{P2} = 80, K_{I2} = 8.44\text{e-}5$ 。为证明新型组合式 Sepic 逆变器的性能以及双闭环控制策略的优越性, 分静态仿真和动态仿真两种情形进行仿真研究。

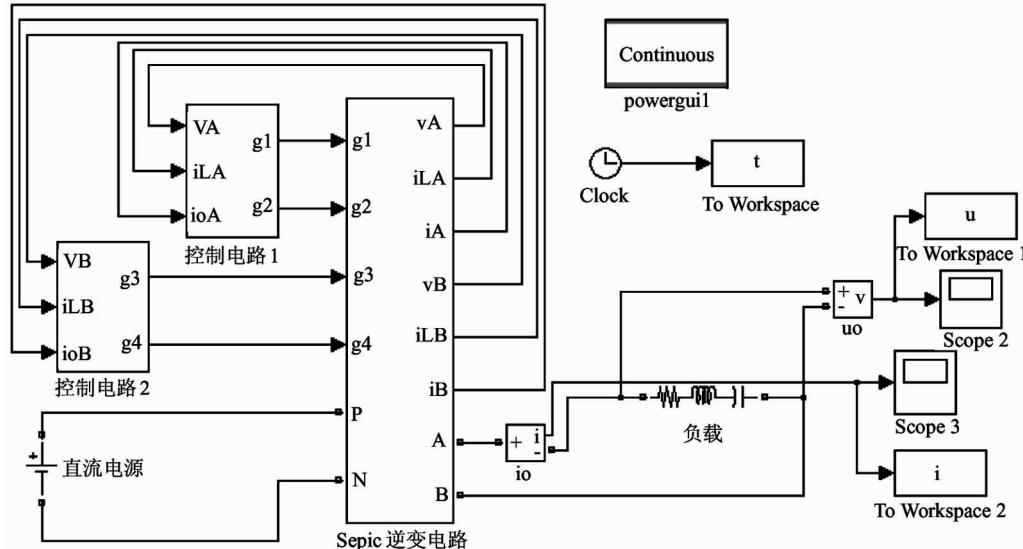


图 5 系统仿真模型

3.1 稳态仿真

稳态仿真研究的目的在于验证系统对频率和幅值固定的参考信号的跟踪性能。仿真时任取参考信号分别为 $150V/75\text{Hz}$ 、 $100V/50\text{Hz}$ 和 $200V/25\text{Hz}$ 。仿真结果见表 1。表中 THD 表示总谐波畸变率 (total harmonic distortion)。稳态情况下的输出电压仿真波形如图 6 所示。

表 1 稳态情况下输出电压仿真结果

输出电压幅值(V)	输出电压频率(Hz)	THD(%)
152	100	2.63
99.9	50	1.05
200.2	25	0.43

3.2 动态仿真

动态分析考核的是系统动态响应情况, 即在运行过程中若其参考输出电压的幅值、频率或负载发生突变时的运行情况, 这里动态仿真研究分以下两种情况进行。

(1) 当参考信号发生突变, 而负载不变的情况。这里取参考信号在 0.04s 时 ($t = 0.04\text{s}$ 时刻) 由 $100V/50\text{Hz}$ 突变至 $200V/25\text{Hz}$, 再经过 0.08s 后 ($t = 0.12\text{s}$ 时刻) 参考信号重新回到 $100V/50\text{Hz}$ 。频率与幅值变化时的输出线电压仿真波形如图 7 所示。

(2) 当负载发生突变, 而参考信号不变的情况。这里取参考信号为 $100V/50\text{Hz}$, 负载在 0.04s ($t = 0.04\text{s}$ 时刻) 时由 200Ω 突变至空载, 再经过 0.04s ($t = 0.08\text{s}$ 时刻) 后负载重新变回 200Ω , 负载变化时的输出电流仿真波形如图 8 所示。

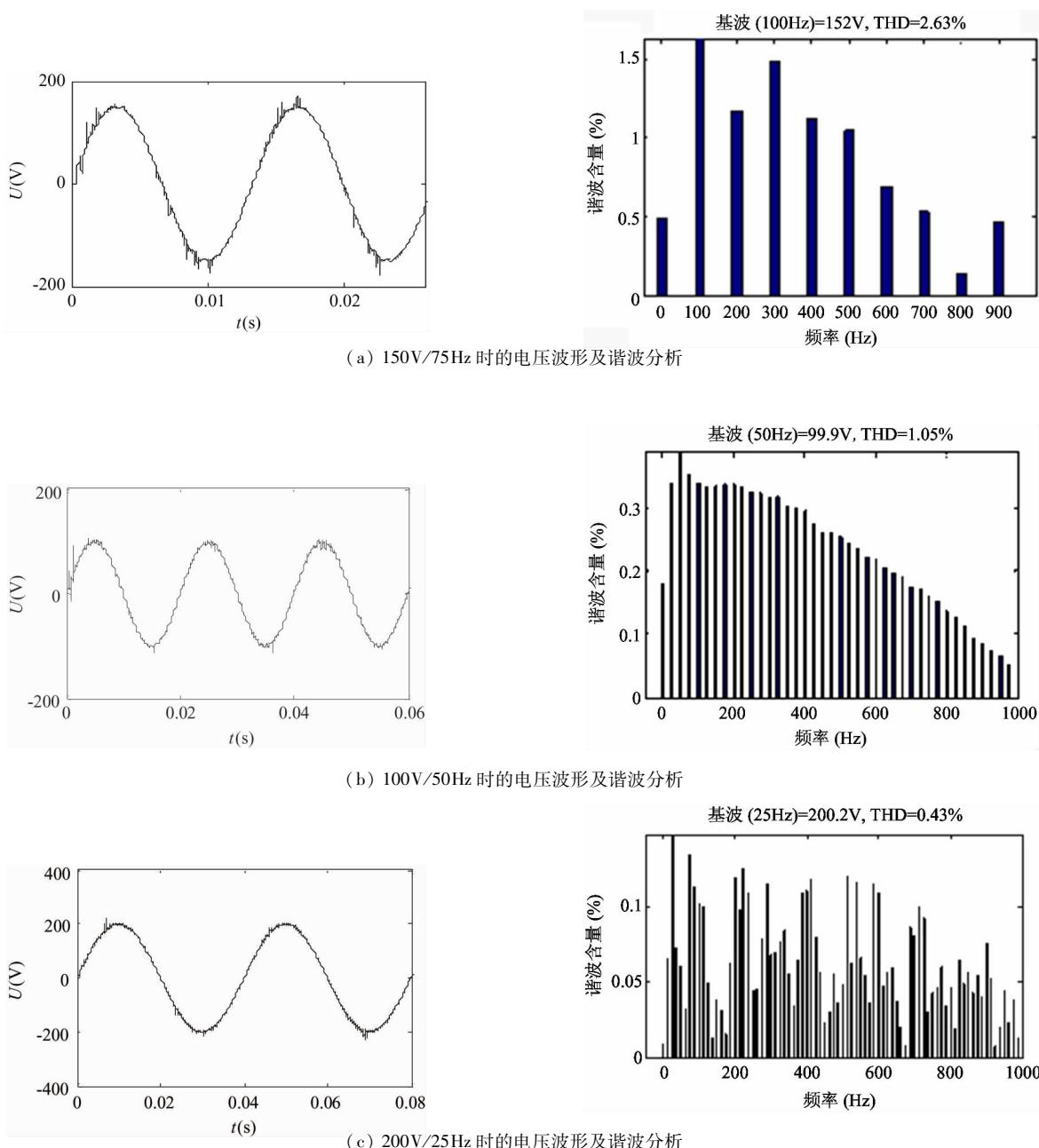


图 6 稳态时输出电压仿真波形及谐波分析

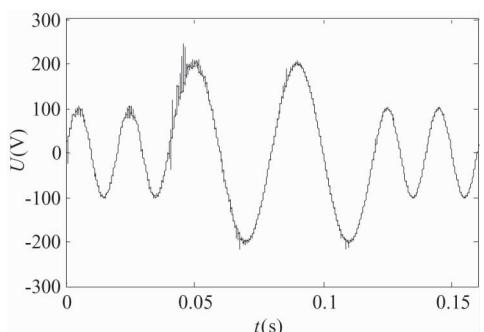


图 7 输出电压仿真波形

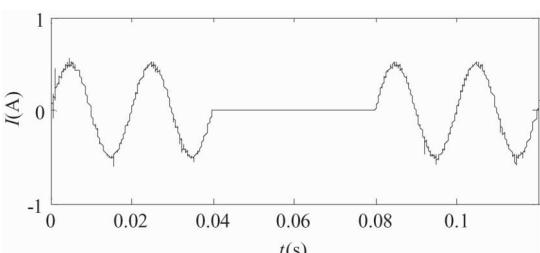


图 8 输出电流仿真波形

由表 1 及各种情况下的仿真结果可以看出该新型组合式 Sepic 逆变器具有以下特点：

(1) 该组合式 Sepic 逆变器实现了输出电压幅值和频率的任意调节,且输出电压的幅值和频率能够准确地跟踪参考值的变化,说明该系统是正确有效的;

(2) 该组合式 Sepic 逆变器可直接输出高品质的正弦波而无需滤波环节,波形失真度小,总谐波畸变率(THD)均小于 5%;

(3) 从动态仿真研究可以看出,系统在运行过程中,如果参考信号发生变化,系统可迅速进入新的稳态,过渡过程很短;当负载发生变化时,在空载情况下的输出电流为零,负载由 200Ω 变化至空载输出电流自然过渡,可见系统具有良好的动态性能。

4 样机实验

为进一步验证所提拓扑结构的正确性和控制方法的有效性,采用 TI 公司的 DSP 芯片(TMS320F2812)作为核心控制芯片,完成了一台 1kW 的原理样机。

一个周期功率开关 S_1 和 S_2 的驱动信号波形如图 9 所示。图 10 是在参考电压设为 100V/50Hz 的情况下,输出电压的实验波形。从初步试验结果可以看出:输出电压为正弦波,电压峰值达到 100V 左右,输出波形质量较好。试验波形和仿真波形基本吻合,从而更进一步地验证了所提拓扑结构的正确性及控制方法的有效性。

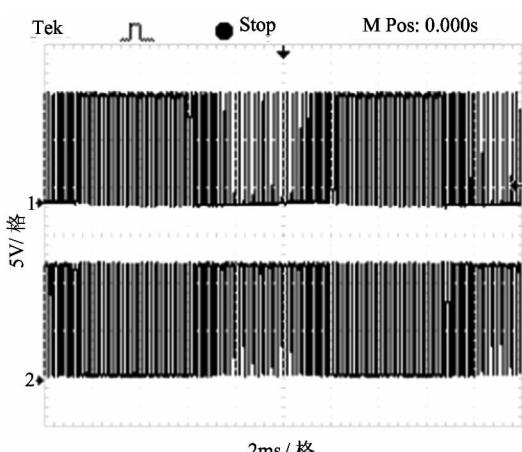


图 9 S_1 和 S_2 的驱动信号波形

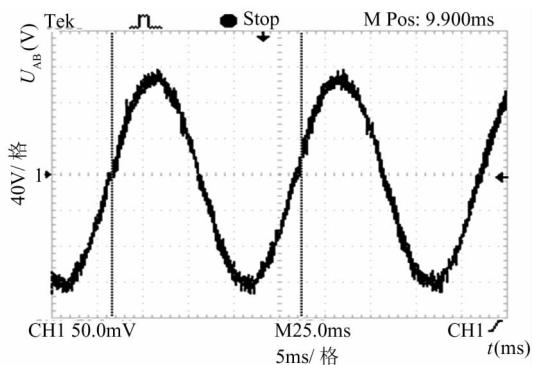


图 10 输出电压实验波形

5 结 论

作为太阳能光伏发电并网逆变器的研究越来越受到人们的重视。本文针对既可独立运行又可并网运行的组合式 Sepic 逆变器进行了研究。阐述了其拓扑的基本构成及其工作原理,以及采用的双闭环控制策略基本设计方法,并通过仿真验证了其有效性和可行性。采用该组合式逆变器结构和双闭环控制方法可有效降低光伏系统成本,提高光伏发电效率。仿真和样机实验结果表明:基于双闭环控制的组合式 Sepic 逆变器具有良好的动态和稳态性能,在一定范围内能实现输出电压幅值和频率的任意调节,且直接输出了高品质的正弦波而无需滤波环节,谐波含量低,具有较好的应用价值。

参考文献

- [1] Prasad B S, Jain S, Agarwal V. Universal single-stage grid-connected inverter. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2008, 23(1):128-137
- [2] 于慎航,孙莹,牛晓娜等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108
- [3] 杨勇,阮毅,汤燕燕等. 不连续空间 PWM 的无电网电压传感器的三相并网逆变器. 电力自动化设备,2009,29(11):92-97
- [4] Moreno J C, Huerta J M E, Gil R G, et al. A robust predictive current control for three-phase grid-connected inverters. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2009, 56(6):1993-2004

- [5] Prasad B S, Jain S, Agarwal V. Universal single-stage grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(1):128-137
- [6] 韩思亮, 马皓. 新型 Boost 逆变器滑模控制策略. 江南大学学报(自然科学版), 2004, 3(5):475-481
- [7] 岳舟. 离散滑模控制的 Buck-Boost 光伏逆变器研究. 太阳能学报, 2013, 34(2):233-238
- [8] 孙孝峰, 邬伟扬. 高效率并网太阳能逆变器研究. 电力电子技术, 2003, 37(2):49-52
- [9] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术研究. 中国电机工程学报, 2007, 27(16):60-64
- [10] 陈江, 马皓, 徐德鸿. 一种基于滑模控制的正弦波逆变器. 电源技术应用, 2002, 5(6):5-8
- [11] Sanchis P, Ursúa A, Gubía E, et al. Boost DC-AC inverter: a new control strategy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, 20(2):343-353
- [12] Vazquez N, Cortes D, Hernandez C, et al. A new nonlinear control strategy for the boost inverter. In: Proceedings of the IEEE International Power Electronics Conference, Mexico, Mexico, 2003, 5:1403-1407
- [13] 岳舟. 基于 Zeta 电路的光伏逆变器双闭环控制研究. 太阳能学报, 2014, 35(10):1994-1998
- [14] Sanchis P, Ursúa A, Gubía E, et al. Buck-Boost DC-AC inverter: proposal for a new control strategy. In: Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Santa Catarina, Brazil, 2004, 10: 3994-3998
- [15] 谭光慧, 陈溪, 魏晓霞等. 基于改进 SPWM 控制的新型单级 Buck-Boost 逆变器. 中国电机工程学报, 2007, 27(16):65-71
- [16] 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
- [17] Zhang L H, Yang X, Yao X F. An isolated single stage buck-boost inverter. In: Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 2008, 2389-2395
- [18] 王立乔. 正弦波逆变器 PWM 技术的调制模型分析. 电力系统自动化, 2008, 32(17):45-49

Research on double-loop control of a novel combined Sepic inverter

Yue Zhou

(Department of Energy, Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000)

Abstract

For the photovoltaic grid-connected inverters applicable to the solar photovoltaic grid-connected power generation, a voltage-current double-loop control strategy was proposed, and based on it, a system for double-loop control of combined Sepic inverters was designed. A simulation model of the system was constructed by using the Matlab/Simulink to conduct the system's steady-state simulation and dynamic simulation to verify its feasibility and effectiveness. The simulation results show the system's good dynamic performance and steady performance.

Key words: Sepic converter, combination, grid-connected inverter, double-loop control, simulation