

基于双闭环控制的光伏发电用 Cuk 逆变器研究^①

岳 舟^②

(湖南人文科技学院能源与机电工程系 娄底 417001)

摘要 提出了一种用于可再生能源发电的新型 Cuk 并网逆变器,该并网逆变器应用 Cuk 电路进行输入串联、输出并联,以构成一种新型非隔离单级输出并联输入串联双 Cuk 逆变电路。该电路采用电压电流双闭环控制策略,以实现输出波型的正弦化,以及使新拓扑获得很好的自适应性和较强的鲁棒性。仿真和实验结果表明,采用双闭环控制后的新型 Cuk 并网逆变器表现出很好的动态和稳态性能,且输出电流谐波含量低,波形质量好。

关键词 Cuk 逆变器, 光伏发电, 双闭环控制, 拓扑

0 引言

近年来随着能源危机和环境污染的加剧,可再生能源得到了极大的重视,风能、太阳能、燃料电池等新能源已开始替代传统能源,逆变器作为并网运行的主要部件开始广泛应用于新能源领域。在新能源应用领域中,光伏电池、燃料电池和小型风力发电机组所提供的直流输出电压根据环境的变化会呈现出间歇性和不确定性,各个发电单元也会分开布置,因此新能源发电系统需要各个逆变单元可工作在并联和并网两种状态下,并能承受一定的输入电压波动。

并网逆变器是连接可再生能源发电系统与电网的接口单元,是可再生能源发电系统的关键设备,因此,对并网逆变器的研究成为了一个热点^[1-4]。研究重点是新型拓扑与控制方法,目的是提高输出电能的质量和转换效率^[5-7]。本文提出了一种宽输入电压范围的新型双 Cuk 逆变器。此种逆变器既可实现升压逆变也可实现降压逆变,并且具有较强的抗输入侧电压波动的能力,因而完全满足小型可再生能源发电系统的需要。本研究在查阅大量国内外

相关文献的基础上,应用 Cuk 电路进行了输入串联、输出并联,提出了一种新型非隔离单级输出并联输入串联双 Cuk 逆变电路,而且对此电路的工作原理和调制方法进行了详细的理论分析,并通过仿真研究和样机实验验证了理论的正确性。应用电压、电流双闭环控制方案实现了输出波形的正弦化。仿真和实验表明该电路能够实现升降压逆变,可以工作在较宽的输入电压范围内,能够有效降低直流侧脉动对输出造成的影响,因此在小容量可再生能源发电系统中具有广泛的应用前景。

1 拓扑结构及工作原理

19 世纪 80 年代,美国加州理工大学的 Slobodan Cuk 提出了一种新的变换器,简称 Cuk 变换器^[8],线路结构如图 1 所示。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。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。Cuk 变换器既可以用做升压变

^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:2014-12-15)

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。

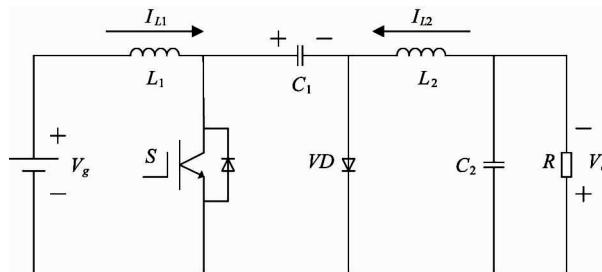


图 1 Cuk 电路

在开关管导通期间,输入与输出环路闭合,二极管 D 反偏截止,此时输入电流 i_1 使电感 L_1 储能; C_1 放电电流 i_2 使 L_2 储能,并向负载提供电能。开关管中流过的是输入电流和输出电流之和。

在开关管关断期间,二极管 D 正偏导通,将输入与输出环路闭合。此时电感 L_1 及电源向电容 C_1 释放能量,使 C_1 充电,同时负载的电能由电感 L_2 释放提供。流过二极管 D 的电流也是输入电流和输出电流之和。当电感电流保持不变时,电路则进入断续状态。

综上所述,该电路无论开关管导通还是关断,都从输入向输出传递能量。只要输入输出电感 L_1 、 L_2 足够大,则 L_1 及 L_2 中的电流基本上是恒定的。在开关管截止期间,输入电流 i_1 使 C_1 充电储能;在开关管导通期间, C_1 向负载释放能量。因此电容 C_1 是一个能量传递元件。当电路进入稳态后,电容 C_1 上的纹波与其平均值之比值是很小的,这样认为 V_{C1} 是恒定电压。

Cuk 电路具有输入电流连续输出电流也连续的特点,输出电压可以比输入电压高或者低,如同 Buck/Boost 型逆变器一样,Cuk 电路组建的逆变电路如图 2 所示。

输出并联型结构本身具有公共地线,可以很容易地构造三相系统,虽然升压比例降低了一半,但由于 Cuk 电路本身具有升压能力,因此由 Cuk 电路构造的输出并联型逆变器更适合在新能源应用领域应用。

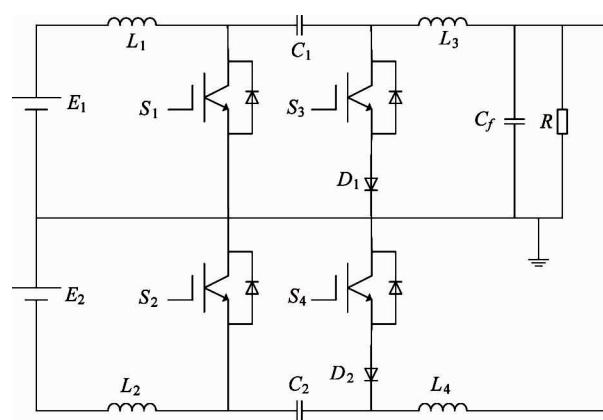


图 2 输出并联双 Cuk 逆变器

2 双闭环控制策略

采用连续时间平均模型分析电路,其中间电容电压和中间电感电流在一个脉宽调制(PWM)周期内的平均值为零,所以其中一组 Cuk 变换器的数学模型为^[8]

$$u_{L1} = d\bar{u}_{dc} - (1-d)u_1 \quad (1)$$

$$i_{C1} = (1-d)i_{L1} - i_{o1} \quad (2)$$

其中: i_{C1} 是电容 C_1 的电流, u_{L1} 是电感 L_1 的电压, i_{o1} 是输出电流,下标 1 表示第一组 Cuk 变换器。

电感 L_1 和电容 C_1 的传递函数为

$$\frac{I_{L1}(s)}{u_{L1}(s)} = \frac{1}{r_{L1} + L_1 s} \quad (3)$$

$$\frac{u_1(s)}{I_{C1}(s)} = \frac{1 + r_{C1}Cs}{Cs} \quad (4)$$

式中 r_{L1} 和 r_{C1} 分别为电感和电容的等效电阻。

在开关频率的一半范围内,该模型很好地描述了 Cuk 变换器的动态特性。在上述基础上,提出了内环以电感电流作为控制变量,而外环以电容电压作为控制变量的电压电流双闭环控制策略。

在式(1)和式(3)的基础上,提出了电感电流控制内环,控制原理框图如图 3 所示。在变工作点的情况下,这两个方程描述的是一个由输出电压 u_1 决定,而输入电压 \bar{u}_{dc} 作为外部扰动的非线性系统。假设以占空比作为控制变量,则系统的动态特性将表现为由变输出电压引起的变增益。控制内环选择电感电流为控制变量,那么内环的数学模型可简化为式(3)。

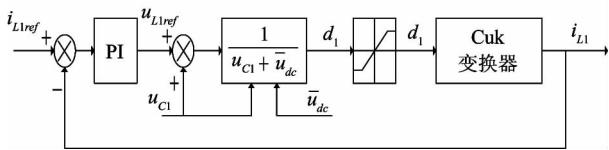


图 3 电流内环控制原理框图

从另一个方面来看, \$u_1 + \bar{u}_{dc}\$ 可以看作其倒数补偿的变增益。另外, 外部扰动 \$\bar{u}_{dc}\$ 再加在内环, 其负值形成一个前向反馈补偿。

从图 3 可以看出, 以电感电流的参考值与实际值的偏差作为 PI 控制器的输入, 其输出作为电容电压的参考值 \$u_{L1ref}\$。由式(3)有:

$$d = \frac{\bar{u}_{dc} + u_{L1ref}}{u_1 + \bar{u}_{dc}} \quad (5)$$

因此, 通过(5)式可求得占空比 \$d\$。将 \$d\$ 经过限幅后输入到信号产生器, 由信号产生器产生开关信号, 从而控制 Cuk 变换器中的功率开关 \$S_1\$ 和 \$S_2\$, 以调节电感电流使其跟随参考值的变化而变化。其中的 PI 控制器可以按照常规方法设计, 限幅环节主要是为了避免电感电流产生异常值。

在式(2)和式(4)的基础上, 提出了电容电压控制外环, 其控制原理框图如图 4 所示。根据电感电流控制内环同样的分析方法可得, 电容电压控制外环选择电容电压作为控制变量。

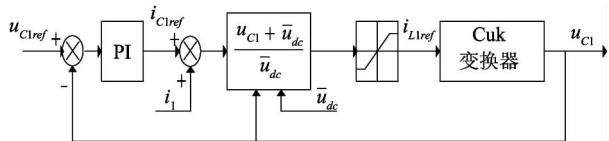


图 4 电压外环控制原理框图

理论上, 电感电流的参考值由式(4)得出, 而该模型中是采用占空比来计算。在这种情况下, 系统的动态性能以及电感电流内环参考值的计算都会使系统失去稳定。为了解决这个问题, 这里用下式近似计算占空比 \$d\$:

$$d \approx \frac{\bar{u}_{dc}}{\bar{u}_{dc} + u_1} \quad (6)$$

从图 4 可以看出, 电容电压外环是以电容电压的参考值与实际值的偏差作为 PI 控制器的输入, PI 控制器的输出作为电容电流的参考值 \$i_{C1ref}\$。由式(2)可得

$$i_{L1ref} = \frac{i_{C1ref} + i_1}{1 - d} \quad (7)$$

通过(7)式可以求出控制内环电感电流的参考值, 并作用于控制外环, 再通过改变占空比 \$d\$ 来调节电感电流和电容电压, 从而使电容电压按设定的参考值变化, 进而达到控制输出电压的目的。

3 仿真研究

图 5 为双闭环控制仿真模型。本研究针对所采取的电压电流双闭环控制策略, 应用 Matlab/Simulink 对 Cuk 逆变器的独立控制策略进行了仿真。其中直流侧输入电压 \$V_{in} = 50V\$, 直流侧电感 \$L_1 = L_2 = 100\mu H\$, 直流侧电容 \$C_1 = C_2 = 100\mu F\$, 滤波电感 \$L_3 = L_4 = 100\mu H\$, 滤波电容 \$C_3 = C_5 = 60\mu F\$, 电阻负载 \$R_0 = 100\Omega\$, 电压外环控制系数取 \$P_u = 5.538, I_u = 4.99e-4\$, 电

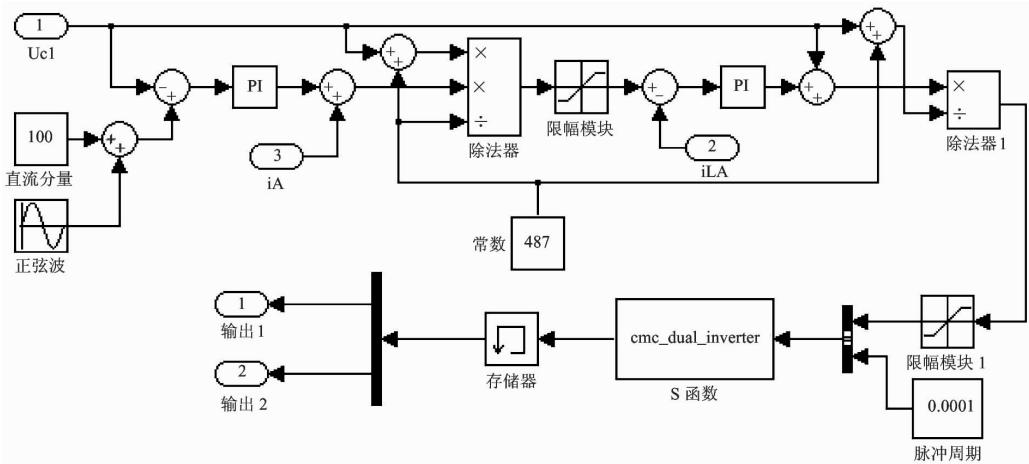


图 5 双闭环控制仿真模型

流内环控制系数取 $P_i = 80$, $I_i = 8.44e-5$, 开关频率 $f_s = 20\text{kHz}$ 。

在频率和幅值都固定不变时, 为验证系统对参考信号的跟踪情况, 系统仿真时任取参考信号分别为 100V/75Hz、50V/50Hz 和 30V/25Hz。输出电压仿真波形及频谱分析如图 6~图 8 所示。

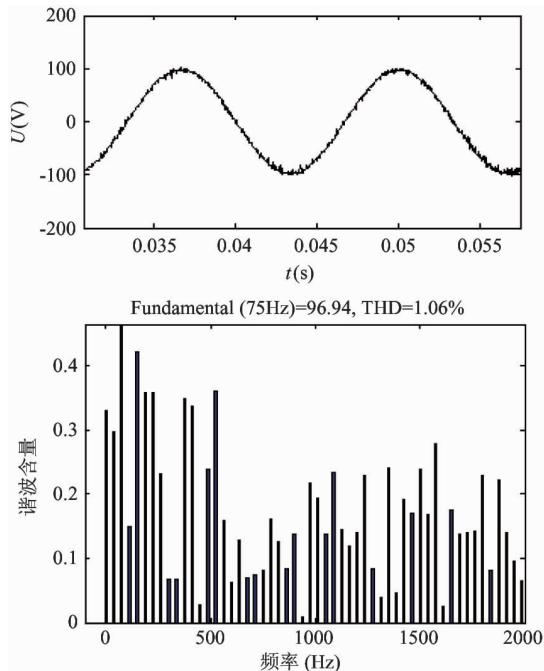


图 6 输出设为 100V/75Hz 的输出波形及频谱分析

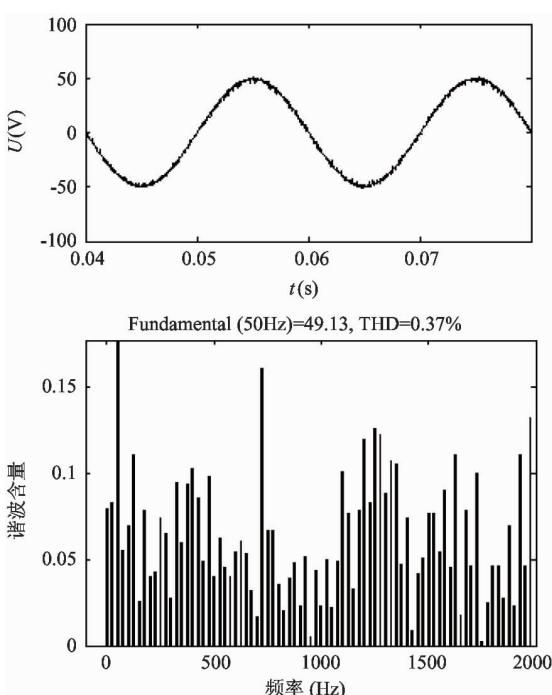


图 7 输出设为 50V/50Hz 的输出波形及频谱分析

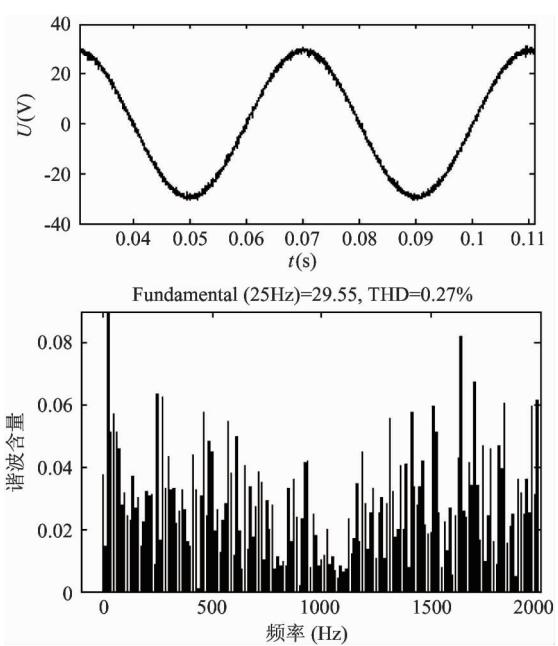
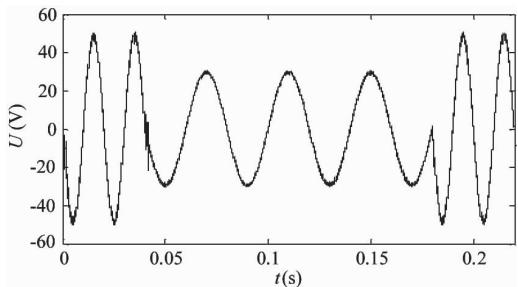
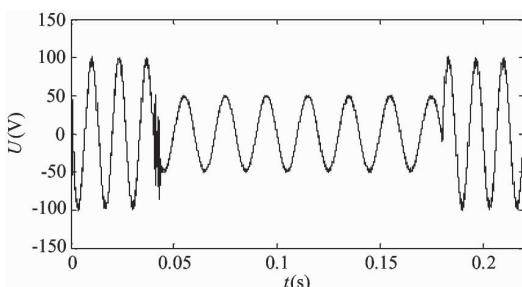


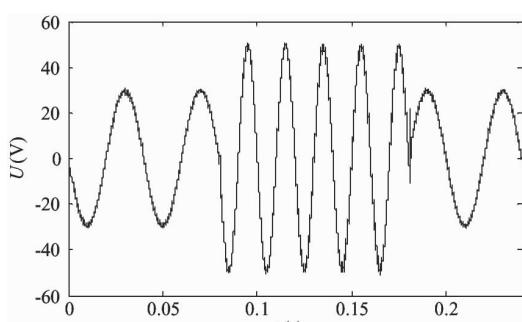
图 8 输出设为 30V/25Hz 的输出波形及频谱分析



(a) 情况 1



(b) 情况 2



(c) 情况 3

图 9 输出电压仿真波形

在参考信号发生突变,负载不变的情况下,这里分三种情况对系统进行动态仿真研究。(1)取参考信号由 50V/50Hz 突变至 30V/25Hz,又回到 50V/50Hz,系统输出电压波形如图 9(a)所示。(2)取参考信号由 100V/75Hz 突变至 50V/50Hz,又回到 100V/75Hz,系统输出电压波形如图 9(b)所示。(3)取参考信号由 30V/25Hz 突变至 50V/50Hz,又回到 30V/25Hz,系统输出电压波形如图 9(c)所示。

在负载发生突变,参考信号不变的情况下,也分三种情况对系统进行动态仿真研究。(1)取参考信号为 50V/50Hz,负载由 100Ω 突变至空载又回到 100Ω ,系统电流波形如图 10(a)所示。(2)取参考

信号为 100V/75Hz,负载由 100Ω 突变至空载又回到 100Ω ,系统电流波形如图 10(b)所示。(3)取参考信号为 30V/25Hz,负载由 100Ω 突变至空载又回到 100Ω ,系统电流波形如图 10(c)所示。

从静态仿真波形可以看出,Cuk 光伏逆变器实现了输出电压幅值和频率的任意调节,系统稳定可靠;Cuk 光伏逆变器不需要滤波环节就可以直接输出高品质的正弦波,波形失真度小,总谐波畸变率(THD)均小于 5%。从动态仿真研究可以看出,系统在运行过程中,如果参考信号或者负载发生变化,系统可迅速进入新的稳态,过渡过程很短,系统具有良好的动态性能。

4 样机实验

为进一步验证所提 Cuk 光伏逆变器基本原理的正确性以及双闭环控制策略的有效性,采用 TI 公司的 DSP 芯片(TMS320F2812)作为控制核心芯片,完成了一台 1kW 的原理样机。

图 11 是参考电压设为 100V/50Hz 的输出电压实验波形,从实验结果可以看出:输出电压为正弦波,电压峰值达到 100V 左右,实现了升压逆变,且逆变器输出波形质量较好。实验波形和仿真波形基本吻合,因此,验证了双闭环控制策略应用于 Cuk 光伏逆变器的正确性和有效性。

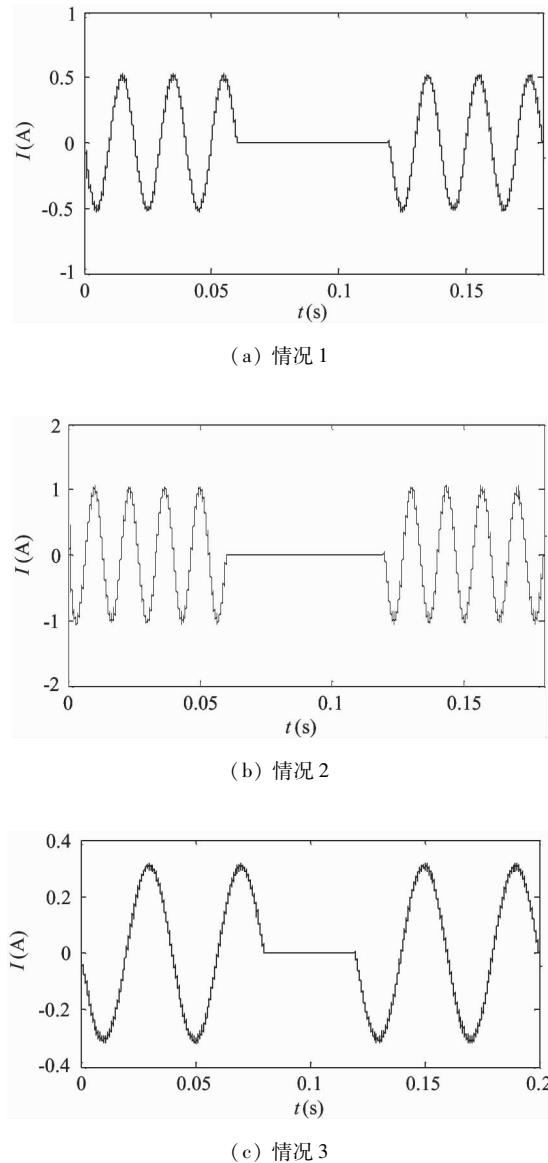


图 10 输出电流仿真波形

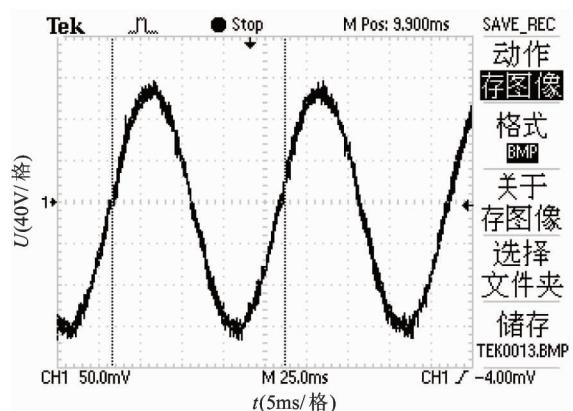


图 11 输出电压实验波形

5 结 论

本文提出了一种用于可再生能源发电的新型 Cuk 逆变器,在分析拓扑结构和工作原理的基础上研究了电压、电流双闭环控制。仿真研究和实验结果表明,采用双闭环控制后,该拓扑获得很好的动态和稳态性能,其输出电压和电流的 THD 小,输出为良好的正弦波,并且在各种常见扰动下基本不受影响,依然能输出高质量的波形。该新型 Cuk 逆变器提高了效率,在可再生能源发电并网中有一定的实用价值。

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] Ahmed K H, Massoud A M, Finney S J, et al. Sensor less current control of three-phase inverter-based distributed

generation. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2009, 24 (2) :

919-929

- [3] 李立, 刘刚. 多电池组储能系统双向 DC-DC 变换器的研制. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3):90-94
- [4] 高明远. 双向 DC-DC 变换器基于切换系统的建模与储能控制. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3):129-134
- [5] 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
- [6] 黄尧, 贾鹏宇, 刘建强等. 基于高频隔离的级联型 H 桥补偿器的仿真. 电工技术学报, 2011, 26 (5) : 108-112
- [7] 张晓峰, 吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向 DC-DC 变换器. 电工技术学报, 2009, 24(8):84-89
- [8] Kolar J W, Schafmeister F. Novel modulation schemes minimizing the switching losses of sparse matrix converter. In: Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003. 2085-2090

Research on a photovoltaic Cuk inverter based on double-loop control

Yue Zhou

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

Abstract

A new kind of Cuk grid-connecting inverter was proposed for renewable energy power generation. The grid-connecting inverter uses the Cuk circuits to achieve input series and output parallel to form a new type of non isolated single stage output parallel and input series double Cuk inverter circuit. The inverter circuit adopts the double-loop control strategy to realize the sine pattern of its output waveform and enhance its topologies' adaptability and robustness. The simulation results showed that the proposed inverter with double-loop control had the better dynamic and static performance in grid connecting, with less output current harmonics and the better waveform.

Key words: Cuk inverter, photovoltaic power generation, double-loop control, topologies