

文章编号: 1006-4710(2011)01-0012-06

一种用于光伏发电系统的 Buck 和 Boost 组合变换器研究

孙向东, 张琦, 吴迎丰, 钟彦儒, 任碧莹

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为适用于光伏发电系统宽范围的光伏阵列输出电压情况, 将传统的 Buck 变换器与 Boost 变换器相结合, 采用变换器合成的方式, 研究了一种双开关 Buck 和 Boost 组合变换器。针对传统的 Buck-Boost 变换器控制比较复杂的缺点, 根据该变换器的输入输出条件提出了三种工作模式, 即 Boost 模式, Buck 模式和临界模式。分析了该变换器的工作原理及其控制策略。与传统的 Buck-Boost 变换器相比较其具有正极性的输出电压和更宽的输入电压范围。仿真与实验结果表明该电路性能优良。

关键词: 双开关 Buck 和 Boost 组合变换器; 工作模式; 光伏发电系统

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A

Study of a Cascaded Buck and Boost Converter for the Photovoltaic Power Generation System

SUN Xiangdong, ZHANG Qi, WU Yingfeng, ZHONG Yanru, REN Biying

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to meet the needs of PV array output voltage in the wider range of PV generation system, the conventional Buck converter is combined with Boost converter in this paper. The combination means of converter is adopted to study a double-switch cascaded Buck and Boost. With an aim at the complicated disadvantages of the conventional Buck-Boost converter control and based on the input and output voltage conditions of the converter, three types of operation modes are suggested: i. e. Boost-voltage mode, Buck-voltage mode and critical operation mode. The operation principle of the converter and its control strategy are analyzed. Compared with the conventional Buck-Boost converter, its output voltage is positive and the input voltage ranges are wider. The simulation and experiment results prove that the cascaded Buck and Boost converter has good performance.

Key words: double-switch cascaded Buck and Boost converter; operation mode; PV generation system

两级式光伏发电系统如图 1 所示, 前级通常是 DC-DC 变换器, 光伏阵列电压经 DC-DC 变换器升压或降压以满足后级逆变器的需要。

对于非隔离式的 DC-DC 变换器, 当光伏阵列输出电压较低时需要 Boost 电路升压; 当光伏阵列输出电压较高时需要 Buck 电路降压^[1]。

传统的 Buck-Boost 电路虽然可以升降压, 但它的输入电压范围不宽, 开关管占空比的调节范围小于 0.5, 并且输出电压与输入电压反极性, 所以该电路在

光伏发电系统中较少被使用^[2-3]。

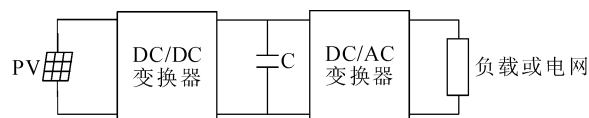


图 1 两级式光伏发电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage PV generation system

对于 Buck 和 Boost 的组合变换器已有学者做过相关研究, 但该拓扑主要应用于功率因数校正、通信

收稿日期: 2010-11-23

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金, 省自然科学基金资助项目(2009JM7008); 省教育厅专项基金资助项目(09JK651和 09JK647); 西安理工大学优秀博士基金资助项目(105-21011)。

作者简介: 孙向东(1971-), 男, 辽宁辽中人, 教授, 博士, 研究方向为现代交流调速、新型电力电子装置及新能源发电系统。
E-mail: sxd1030@163.com。

电源、燃料电池汽车等场合,较少应用于光伏发电系统,采用的控制方法也比较复杂^[4-5]。

为了使 DC-DC 变换器有更宽的电压输入范围以适应不同功率等级或光伏阵列电压变化较大的光伏发电系统,本文研究了一种双开关 Buck 和 Boost 组合变换器。可以看成是由传统的 Boost 电路与 Buck 电路级联组成的^[6-7],它的输出电压与输入电压极性相同,输入电压范围宽,能够适应多种光伏电池板的组合,开关管占空比的调节范围宽,系统有更强的调节能力。

本文根据该电路的特点提出了适用于光伏发电系统的工作模式,分别为 Boost 模式, Buck 模式和临界模式。

当光照强度变化或外界环境温度改变时根据光伏阵列输出电压所处的范围,系统会进入相应的工作模式。最后本文在 850W 的实验系统中验证了所提出的三种工作模式的正确性和可行性。

1 电路工作模式及其控制策略分析

1.1 电路工作模式

将传统的 Buck 变换器和 Boost 变换器进行级联连接,利用公共电感作为能量存储载体,得到一种双开关的 Buck 和 Boost 组合电路,如图 2 所示。该电路有 Buck 工作模式、Boost 工作模式和临界工作模式。

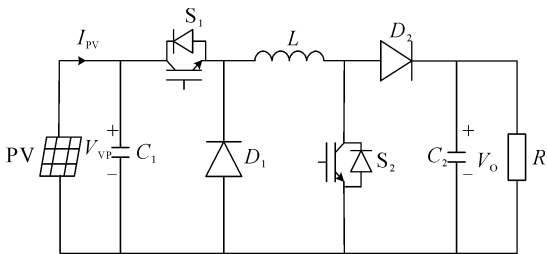


图2 Buck 和 Boost 组合变换器电路图

Fig.2 The circuit diagram of cascaded Buck and Boost converter

当光伏阵列输出电压 V_{PV} 高于变换器输出电压 V_o 时,即 $V_o < V_{opt} \cdot d_{1max}$ 时处于 Buck 工作模式,开关 S_2 一直处于断开状态,由开关 S_1 控制能量的传输,此时该电路等效为一个 Buck 电路,如图 3 所示。其中, V_o 为 Buck 和 Boost 组合变换器输出电压, V_{opt} 为光伏阵列最优工作电压, d_{1max} 为 Buck 电路最大占空比,其值在 1 附近。

同理,当光伏阵列输出电压 V_{PV} 低于变换器输出电压 V_o 时,即 $V_o > V_{opt}/(1 - d_{2min})$ 时,处于 Boost 工作模式,开关 S_1 保持导通,由开关 S_2 控制能量转换,

此时该电路等效为一个 Boost 电路,如图 4 所示。其中, d_{2min} 为 Boost 电路最小占空比,其值在 0 附近。

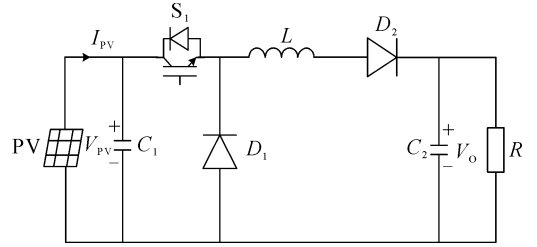


图3 等效 Buck 电路原理图

Fig.3 The schematic diagram of equivalent Buck converter

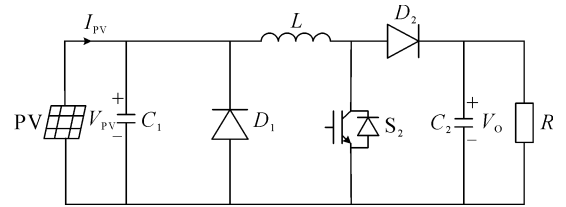


图4 等效 Boost 电路图

Fig.4 The circuit diagram of equivalent Boost converter

因此上述两种情况下,这种变换器的电压转换率为^[8]:

$$M = \frac{V_o}{V_{opt}} = \frac{d_1}{1 - d_2} \quad (1)$$

式中, d_1 , d_2 分别是等效 Buck 电路和等效 Boost 电路开关管的占空比。

当光伏阵列输出电压 V_{PV} 与变换器输出电压 V_o 相差不大,即 $d_{1max} \cdot V_{opt} \leq V_o \leq V_{opt}/(1 - d_{2min})$ 时系统处于临界工作模式。此时,开关 S_1 一直保持导通,开关 S_2 一直保持关断,系统控制完全由 DC/AC 变换器完成。等效电路如图 5 所示。

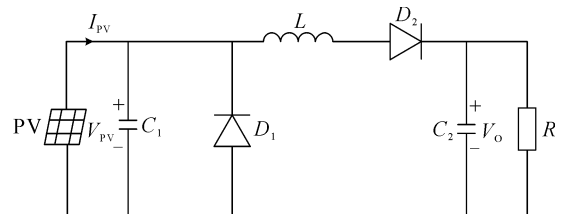


图5 临界工作模式时的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit diagram of the critical operation mode

1.2 控制策略分析

在 MPPT 控制作用下光伏阵列工作在最大功率点。根据变换器运行状态和 V_{opt} 与 V_o 的关系判断 Buck 和 Boost 组合变换器工作模式并进行相应的控制,其控制框图如图 6 所示。对于 Buck 工作模式和 Boost 工作模式,变换器输出电压 V_o 的参考信号来源于指令电压值,即 $V_{ref} = V_{dc_ref}$ 。MPPT 算法输出为开关

工作占空比 d 。

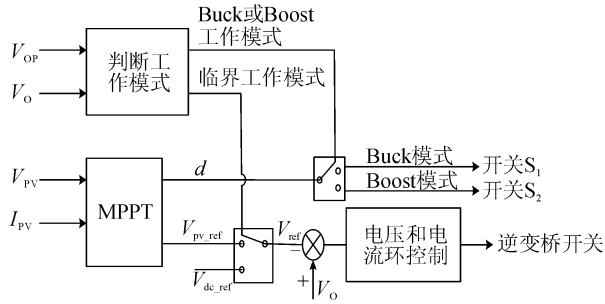


图6 Buck和Boost组合变换器控制框图^[5]

Fig.6 Control structure chart of the cascaded Buck and Boost converter

处于 Buck 工作模式,则 $d_1 = d$,在 MPPT 控制作用下调节开关 S_1 的占空比 d_1 ,使光伏阵列工作在最大功率点。同理,处于 Boost 工作模式,则 $d_2 = d$,在 MPPT 控制作用下调节开关 S_2 的占空比 d_2 ,使光伏阵列工作在最大功率点。

处于临界工作模式时,开关管 S_1 的占空比 d_1 接近 d_{1max} ,或者开关管 S_2 的占空比 d_2 接近 d_{2min} ,此时,调节 d_2 或 d_1 都无法使 Buck 和 Boost 组合变换器稳定工作在最大功率点。因此,保持 S_1 一直导通和 S_2 一直关断。MPPT 算法输出不再是开关工作占空比,而是光伏阵列的参考电压 V_{pv_ref} ,即 $V_{ref} = V_{pv_ref}$ 。对于 DC/AC 变换器部分,采用直流电压外环和注入电网电流内环的双闭环控制方式实现平滑并网。

2 滤波参数设计

2.1 输入电容 C_1

输入电容具有存储能量,减小输入电压纹波的作用。电容上的平均充电电流为:

$$\Delta i_{c_1} = \frac{\Delta i_L}{4} \quad (2)$$

电容纹波电压为:

$$\Delta V_{c_1} = \frac{1}{C_1} \int_0^T \Delta i_{c_1} dt = \frac{1}{8C_1} \Delta i_L \times T \quad (3)$$

式中, T 为开关周期, Δi_L 为电感电流在一个开关周期内的波动; ΔV_{c_1} 为电容电压在一个开关周期内的波动; C_1 为电容值。

假设极端情况下电流波动值不会超过 10 A,若开关频率为 20 kHz,即 $T = 50 \mu s$,则 C_1 取值为 500 μF ,因此在一个开关周期内输入电容的电压波动不大于 0.125 V。

2.2 输出电容 C_2

输出电容需要从能量解耦的角度来设计。馈入电网的功率是一个频率为 100 Hz 的波动功率,即

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V \sin \omega t \cdot I \sin \omega t = VI/2 - VI \cos 2\omega t/2 = \bar{p} + \tilde{p}(t) \quad (4)$$

其中, $v(t)$ 、 $i(t)$ 分别表示电网电压、注入电网电流的瞬时值; V 、 I 分别表示交流电压、电流的峰值; ω 为电网角频率; \bar{p} 和 \tilde{p} 分别表示直流功率和波动功率。

因此,电容电压波动为:

$$\Delta V_{c_2} = \frac{1}{C_2} \int \tilde{p}(t) dt \quad (5)$$

于是得:

$$\Delta V_{c_2} = \frac{1}{C_2} \int \frac{\tilde{p}(t)}{V_o} dt = \frac{VI}{2\omega V_o C_2} \sin 2\omega t = \frac{\tilde{p}}{\omega V_o C_2} \sin 2\omega t \quad (6)$$

由式(6)可得输出电容值满足下面条件时输出纹波电压较小,即:

$$C_2 \geq \frac{\tilde{p}}{\omega V_o \Delta V_{c_2}} \quad (7)$$

其中, C_2 为输出电容; ΔV_{c_2} 表示电容电压波动。

假设最大功率为 3.4 kW, V_o 最小值为 300 V,取 ΔV_{c_2} 为 10 V,则计算得 C_2 为 3600 μF 。

2.3 电感 L

该电路一直工作在电感电流连续的情况下。工作在 Buck 模式时,电感值满足式(8)^[9-10],即:

$$\frac{L}{RT} \geq \frac{1-d_1}{2} \quad (8)$$

工作在 Boost 模式时,电感值满足:

$$\frac{L}{RT} \geq \frac{d_2(1-d_2)^2}{2} \quad (9)$$

当 $d_2(1-d_2)^2$ 取得最大值时, $d_2 = d'_2 = 1/3$ 。

由式(8)和(9)可得:

$$L \geq \max\left(\frac{RT(1-d_{1min})}{2}, \frac{d'_2 RT(1-d'_2)^2}{2}\right) \quad (10)$$

当输出功率为最大功率的 6%,即约 200 W 时,对应负载电阻 $R = 800 \Omega$,取 $T = 50 \mu s$,Buck 电路最小占空比 $d_{1min} = 0.1$,则由式(10)可以计算出 L 取值为 18 mH。

3 仿真与实验分析

3.1 仿真分析

利用 PSIM 软件对三种不同光伏阵列配置的 Buck 和 Boost 组合变换器在单相系统情况下进行了仿真。

假设 V_{dc_ref} 为 400 V,不同数量的光伏电池板串联使其开路电压处于(100~900) V 范围内,系统根据该光伏阵列的工作电压自动实现升降压等工作模式。

仿真时选择了三种典型的光伏电池板配置。假定光伏阵列最优工作电压小于 380 V 时系统处于 Boost 工作模式,大于 450 V 时系统处于 Buck 工作模式,大于 380 V 且小于 450 V 时系统处于临界工作模式,有:

① Boost 工作模式:开路电压 222 V,最优工作电压约 178 V,功率 850 W;

② Buck 工作模式:开路电压 900 V,最优工作电压约 720 V,功率 3.4 kW;

③ 临界工作模式:开路电压 550 V,最优工作电压约 440 V,功率 2.1 kW。

从图 7 可以看出,低压时系统最终工作在最大功率点,平均最优工作电压约为 178 V,平均最优工作电流为 4.7 A。

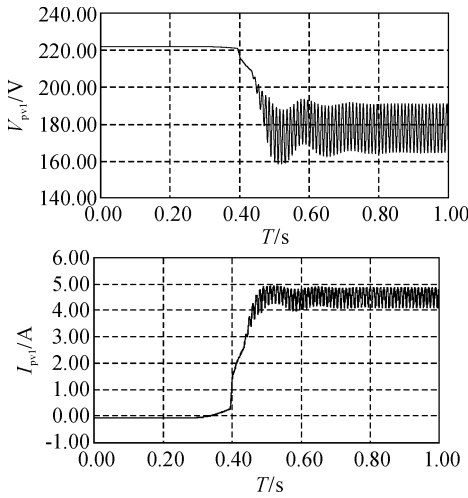


图 7 低压时光伏阵列的输出电压与电流
Fig. 7 Output voltage and current of PV array under the condition of low voltage

从图 8 可以看出,直流母线平均电压最终稳定工作在 400 V。由于最优工作电压值小于直流母线电压值,所以系统处于 Boost 工作模式。

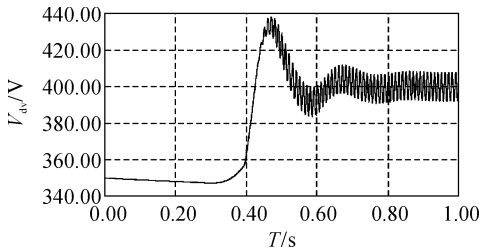


图 8 低压时 Buck 和 Boost 组合变换器的输出电压
Fig. 8 Output voltage of the cascaded Buck and Boost converter under the condition of low voltage

从图 9 和图 10 可以看出,0.5 s 时 DC/AC 变换器开始并网工作,其输出电流正弦度好,且与电网电压同频同相。

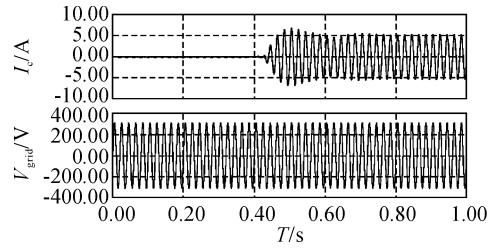


图 9 低压时 DC/AC 变换器的输出电流和电网电压
Fig. 9 Output current of the inverter and grid voltage under the condition of low voltage

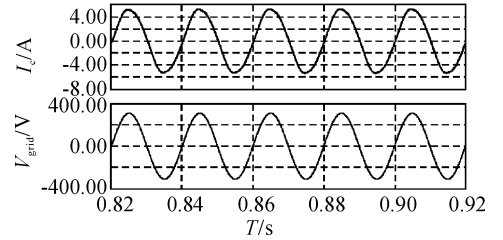


图 10 DC/AC 变换器输出电流和电网电压的稳态放大波形
Fig. 10 The steady-state amplified waveforms of output current for the inverter and grid voltage

从图 11 可以看出,高压时系统最终工作在最大功率点,最优工作电压为 720 V,最优工作电流为 4.7 A。

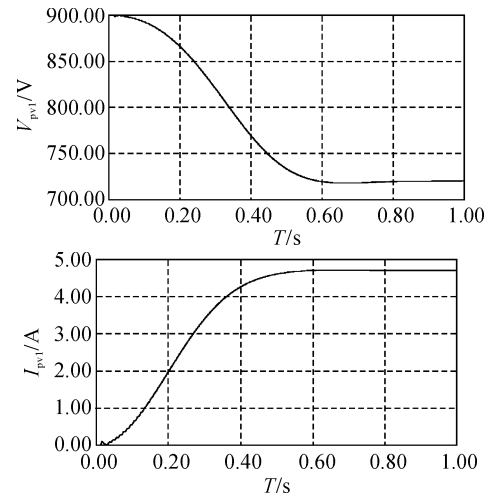


图 11 高压时光伏阵列的输出电压与电流
Fig. 11 Output voltage and current of PV array under the condition of high voltage

从图 12 可以看出,直流母线电压最终也稳定工作在 400 V。由于最优工作电压值大于直流母线电压值,所以系统处于 Buck 工作模式。

从图 13、14 可见,中压时系统工作 0.5 s 后,从 Buck 工作模式进入临界工作模式,此时平均最优工作电压为 440 V。系统工作模式改变后光伏阵列的最大功率点没有改变,直流母线电压参考值由原来的设定值 400 V 变为光伏阵列的最优工作电压。

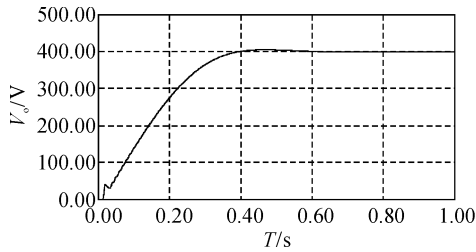


图12 高压时 Buck 和 Boost 组合变换器的输出电压
Fig. 12 Output voltage of the cascaded Buck and Boost converter under the condition of high voltage

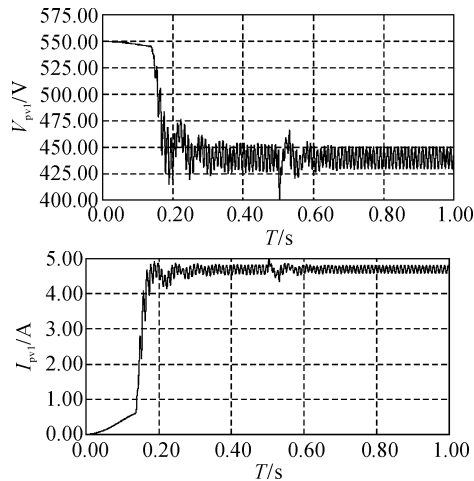


图13 中压时光伏阵列的输出电压与电流
Fig. 13 Output voltage and current of PV array under the condition of medium voltage

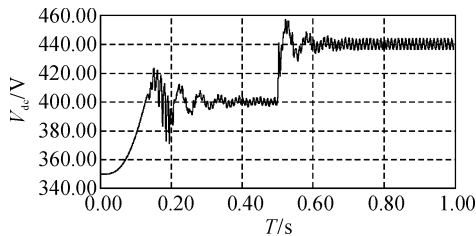


图14 中压时 Buck 和 Boost 组合变换器的输出电压
Fig. 14 Output voltage of the cascaded Buck and Boost converter under the condition of medium voltage

3.2 实验分析

光伏电池板的参数标准条件下,其最大功率为 85 W,开路电压为 22.2 V,短路电流为 5.15 A,最大功率点下最优工作电压为 17.8 V,最优工作电流为 4.8 A。

实验中将 10 块光伏电池板进行串联,对应的最大功率为 850 W。下面给出了 Boost 模式、Buck 模式和临界模式下的实验波形,Boost 工作模式下 Buck 和 Boost 组合变换器连接并网 DC/AC 变换器及本地负载电阻(100 Ω),Buck 工作模式下 Buck 和 Boost 组合变换器连接离网 DC/AC 变换器及本地负载电阻(35 Ω),临界模式下 Buck 和 Boost 组合变换器连接并网

DC/AC 变换器并不带本地负载。

图 15 为 Boost 模式下电阻负载时的实验波形。其中,CH1 为 Buck 和 Boost 组合变换器输出电压,CH2 为光伏阵列输出电压,CH3 为开关管 S_2 的驱动信号,CH4 为光伏阵列输出电流。

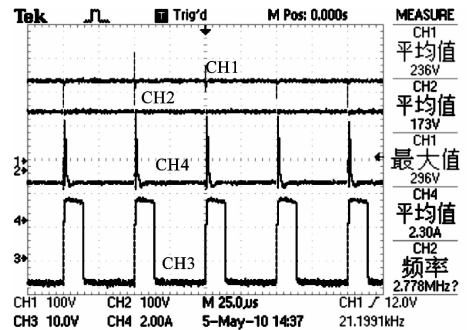


图15 Boost 模式下 Buck 和 Boost 组合变换器的输入与输出波形

Fig. 15 Input and output waveforms of the cascaded Buck and Boost converter in the Boost-voltage mode

从图 15 可以看出,Buck 和 Boost 组合变换器带电阻负载时,光伏阵列输出电压 173 V,输出电流 2.3 A,光伏阵列接近最大功率点处。Buck 和 Boost 组合变换器输出电压为 236 V,大于光伏阵列输出电压 173 V,所以 Buck 和 Boost 组合变换器工作在 Boost 模式下。

图 16 为 Boost 模式下带并网 DC/AC 变换器时的实验波形。其中,CH1 是光伏阵列输出电压,CH2 为 Buck 和 Boost 组合变换器输出电压,CH3 为 DC/AC 变换器输出电流,CH4 为电网电压。

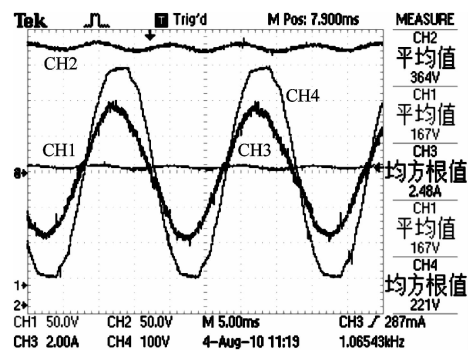


图16 Boost 模式下 DC/AC 变换器的输出电流和电网电压波形

Fig. 16 Output current of the inverter and grid voltage in the Boost-voltage mode

从图 16 可以看出,Buck 和 Boost 组合变换器连接 DC/AC 变换器时,由于电网的影响光伏阵列输出电压与 Buck 和 Boost 组合变换器输出电压都出现了 100 Hz 脉动,光伏阵列输出平均电压为 167 V,Buck 和 Boost 组合变换器输出平均电压为 364 V,所以

Buck 和 Boost 组合变换器工作在 Boost 模式。同时可见 DC/AC 变换器输出电流正弦度较好,与电网电压间相位差不大。

图 17 为 Buck 模式下电阻负载时的实验波形。其中,CH1 为 Buck 和 Boost 组合变换器输出电压,CH2 为光伏阵列输出电压,CH3 为开关管 S_1 的驱动信号,CH4 为光伏阵列输出电流。

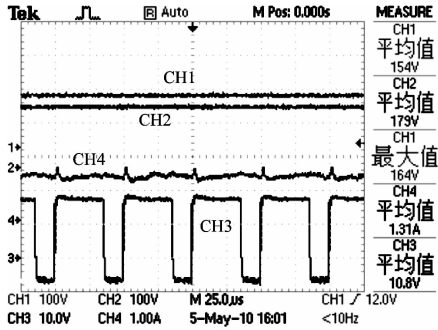


图 17 Buck 模式下 Buck 和 Boost 组合变换器的输入输出波形

Fig. 17 Input and output waveforms of the cascaded Buck and Boost converter in the Buck-voltage mode

从图 17 可以看出,光伏阵列输出电压为 179 V,输出电流为 1.31 A。Buck 和 Boost 组合变换器输出电压为 154 V,小于光伏阵列输出电压,所以 Buck 和 Boost 组合变换器工作在 Buck 模式下。

临界模式时由于直流母线电压小于电网电压峰值,所以逆变器的输出通过工频变压器升压并网。临界模式下 Buck 和 Boost 组合变换器的输入输出波形如图 18 所示。其中,CH1 为光伏阵列输出电压 195 V,CH2 为直流母线电压 189 V,CH3 为光伏阵列输出电流为 1.59 A。可见,临界模式时阵列输出电压与直流母线电压相差不大,阵列电压略高于直流母线电压,这是由于开关 S_1 、电感 L 和二二极管 D_2 上存在压降造成的。

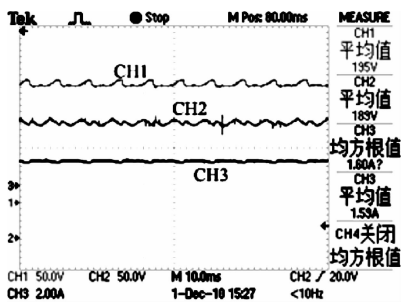


图 18 临界模式下 Buck 和 Boost 组合变换器的输入输出波形

Fig. 18 Input and output waveforms of the cascaded Buck and Boost converter in the critical operation mode

4 结论

双开关 Buck 和 Boost 组合变换器有较宽的电压

输入范围,可以适应不同功率等级或光伏阵列电压变化较大的光伏发电系统。与传统的 Buck-Boost 电路相比较,该电路的占空比变化范围宽,且输出电压和输入电压极性相同。通过仿真和实验验证了所提出的三种工作模式的正确性和可行性。该电路非常适用于非隔离型光伏发电系统,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 李鹏飞, 蒋赢, 陈宗祥, 等. 一种新型 Boost 变换器[J]. 电力电子技术, 2008, 42(11): 37-39. Li Pengfei, Jiang Ying, Chen Zongxiang, et al. A novel Boost converter[J]. Power Electronics, 2008, 42(11): 37-39.
- [2] 王云亮, 李景隆. 基于能量控制策略的直-交变换器的研究[J]. 电气自动化, 2008, 30(6): 153-155. Wang Yunliang, Li Jinglong. The research of DC-AC converter based on energy control strategy[J]. Electrical Automation, 2008, 30(6): 153-155.
- [3] 徐静平, 陈亮亮, 程姝娜, 等. Buck/Boost 转换器小信号建模与稳定性分析[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(6): 97-100. Xu Jingping, Chen Liangliang, Cheng Shuna, et al. The stability and AC model of Buck/Boost converter[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, 37(6): 97-100.
- [4] 肖华锋, 谢少军. 用于光伏并网的交错型双管 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 7-12. Xiao Huafeng, Xie Shaojun. An interleaving double-switch Buck-Boost converter for PV grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 7-12.
- [5] 钱浩. 电压宽范围输入 PFC 电路的分析与仿真[J]. 佳木斯大学学报, 2009, 27(4): 498-501. Qian Hao. Analysis and simulation of a correction circuit for wide input power factor[J]. Journal of Jiamusi University, 2009, 27(4): 498-501.
- [6] 朱继承, 蔡丽娟. 几种新型的 Buck-Boost 变换器的合成[J]. 通信电源技术, 2008, 25(2): 37-40. Zhu Jicheng, Cai Lijuan. Synthesis of several novel Buck-Boost converters[J]. Telecom Power Technologies, 2008, 25(2): 37-40.
- [7] 朱成花, 张方华, 严仰光. 两端稳压软开关双向 Buck/Boost 变换器研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 226-230. Zhu Chenghua, Zhang Fanghua, Yan Yangguang. Development of dual voltage control soft-switching bi-directional Buck/Boost converter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 226-230.
- [8] 任小永, 阮新波, 李明秋, 等. 双沿调制的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 16-23. Ren Xiaoyong, Ruan Xinbo, Li Mingqiu, et al. Dual edge modulated four-switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 16-23.
- [9] 杨旭. 开关电源技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [10] 刘树林, 刘健, 钟久明. 输出本质安全性 Buck-Boost DC-DC 变换器的分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 60-65. Liu Shulin, Liu Jian, Zhong Jiuming. Analysis and design of output intrinsically safe Buck-Boost DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 60-65.

(责任编辑 李虹燕)