

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180881

# 一种双不对称升压倍增单元的耦合电感 Boost 变换器

朱彦磊<sup>1</sup>, 傅亚光<sup>1</sup>, 艾建<sup>2</sup>, 周绍元<sup>1</sup>, 陈大鹏<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为了满足光伏发电并网系统对 DC/DC 变换器的要求和解决耦合电感变换器的电压尖峰, 提出一种无电压尖峰的高升压 Boost。该变换器有如下特点: 采用两组不对称倍压单元, 提高了变换器的升压能力, 同时又消除了耦合电感二次侧绕组因续流引起的高突变电压; 采用不对称倍压单元中的电容与二极管构成无源无损钳位电路, 避免额外增加钳位电路, 降低了成本; 漏感的能量得到吸收, 提高了变换器的效率; 同时, 降低了开关管和输出二极管的电压应力, 降低了变换器对器件的要求。详细分析了变换器的工作原理, 并给出了关键性的公式推论和设计依据。最后, 搭建了一台 200 W 的试验样机, 实验验证了理论的正确性, 满足了电网的需求。

**关键词:** 不对称倍压单元; 电压尖峰; DC/DC 变换器; 耦合电感; Boost 变换器

## Two asymmetric voltage multiplier cells Boost converter with coupled inductor

ZHU Yanlei<sup>1</sup>, FU Yaguang<sup>1</sup>, AI Jian<sup>2</sup>, ZHOU Shaoyuan<sup>1</sup>, CHEN Dapeng<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of DC/DC converter in photovoltaic grid-connected systems and solve voltage spike of converters with coupled inductor, a novel Boost converter with coupled inductor is proposed, which voltage spike is eliminated. The proposed converter has the following characteristics. First, two sets of asymmetric voltage multiplier cells are adopted, so its voltage gain is increased and high voltage spike introduced by flow-continued current from secondary winding of coupled inductor is eliminated. Second, clamp circuit is composed of capacitors and diodes from the cells. So that extra clamp circuit is not necessary and the cost is decreased. Moreover, leakage energy is recycled and efficiency is enhanced. Finally, devices requirements are decreased because of reduced voltage stresses of switch and output diode. The operating principle is analyzed in detail, and critical formulas and design are presented. Finally, a prototype circuit at 200 W output power is established to verify the performance of the proposed converter and the requirements of power grid are satisfied.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** asymmetric voltage multiplier cell; voltage spike; DC/DC converter; coupled-inductor; Boost converter

## 0 引言

将光伏系统输出端的电压提高到直流母线电压是实现光伏系统的并网的要求。光伏电池的输出电压低于 48 V, 距离 220 V 交流电网的并网要求甚远, 因此, 高增益、高效率升压变换器是光伏系统在并网中不可缺少的重要连接环节<sup>[1]</sup>。

在理想条件下, Boost 变换器的电压增益可以

接近无限大, 但由于寄生参数的限制, Boost 变换器难以满足光伏系统的需求<sup>[2]</sup>。要实现高的电压增益可采用开关电容技术<sup>[3-6]</sup>。通过开关电容并联充电、串联放电的特点, 实现变换器电压增益的提高, 但也由于开关电容结构的特点, 引起了电容的电流过冲。开关电感结构由于电感对电流的限制作用, 可以很好地解决开关电容电流过冲问题<sup>[7-9]</sup>。多个独立的电感需要多个磁芯, 因此, 开关电感技术相对开关电容结构成本较大、体积较大, 同时磁性材料的损耗对变换器的效率不利。通过绕组耦合形成的耦合电感技术可以有效降低磁芯的数量, 同时还

**基金项目:** 国家重点研发计划资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

可以通过匝比进一步提升变换器的电压增益。因此,许多学者对含有耦合电感技术的变换器进行了研究<sup>[10-19]</sup>。虽然耦合电感技术可以有效地改善变换器的升压能力,但由于耦合变压器的不完全耦合,漏感对变换器必然会引入高的电压尖峰,引起谐振的电流。因此,钳位电路对耦合电感变换器而言是必不可少的<sup>[10-18]</sup>。有源钳位电路的增加使得变换器控制系统复杂,系统可靠性降低,无法提升变换器的升压能力,以及系统成本的增加<sup>[19]</sup>。无源钳位技术不需要开关管,因此对变换器的驱动设计无影响<sup>[10-18]</sup>。由于钳位电路的作用是用来吸收漏感的能量,因此,钳位电路的位置较为固定,进而对提高变换器的电压增益较为有限,同时带来的成本是不可避免的。另外,虽然含有无源钳位技术的耦合电感变换器有较高的效率、较小的体积、较简单的控制方式,但由于开关管关断的瞬间漏感的能量必须同时吸收和耦合电感的电流不能突变,往往会伴随产生因续流而引起的高电压突变,造成电感电压和电路中的二极管电压应力增加。虽然这个突变的电压不会产生谐振,但是增加了变换器对器件性能的要求,这无疑也增加了变换器的成本,降低了效率<sup>[13-17,20-21]</sup>。

本文提出一种融合了两个不对称升压单元的单开关高增益 DC/DC 变换器,该变换器具有电压增益高、效率高、无电压尖峰和较低应力的开关管和输出二极管等特点,可满足光伏系统并网的需要。本文分析该变换器的工作原理,并提供了关键性的参数设计,通过实验验证了理论的正确性。

### 1 原理与设计

该变换器由 1 个开关管 S、1 个耦合电感、5 个电容和 5 个二极管组成,如图 1 所示。其中  $L_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$  构成第一组不对称倍压单元,并消除耦合电感二次侧因续流问题引起的高的突变电压,同时消除了因耦合电感二次侧续流问题增加的二极管的电压应力和二次侧电压; $L_2$  还与  $D_3$ 、 $D_4$ 、 $C_3$  和  $C_4$  构成第二组不对称倍压单元。两组不对称升压单元公用一个绕组,可以减少元件的数量,降低成本。两组中的电容采用异步充放电的方式运行,极大地提高了变换器的升压能力,同时降低变换器输出二极管的电压应力,降低变换器对器件的要求。此外,  $C_1$ 、 $C_4$  和  $D_4$  又构成由两电容组成的钳位电路不需要额外增加辅助的钳位电路,减少了变换器元件的数量,降低了成本;同时,有效地缓解耦合电感漏感引起的尖峰电压,降低了开关管的电压应力,提高了变换器效率。

为了简化分析,耦合电感的等效电路由一个  $N_1:N_2$  的理想变压器、励磁  $L_M$  和一次侧漏感  $L_K$  组成。变换器运行在连续模式下(CCM)的波形图和模态图分别如图 2 和图 3 所示。

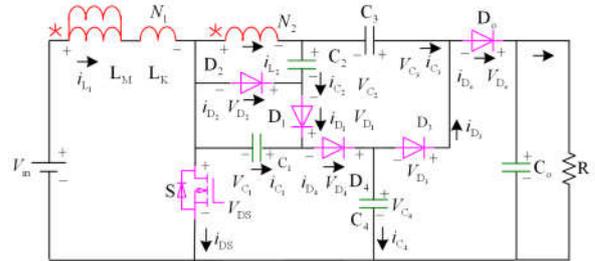


图 1 变换器拓扑

Fig. 1 Converter topology

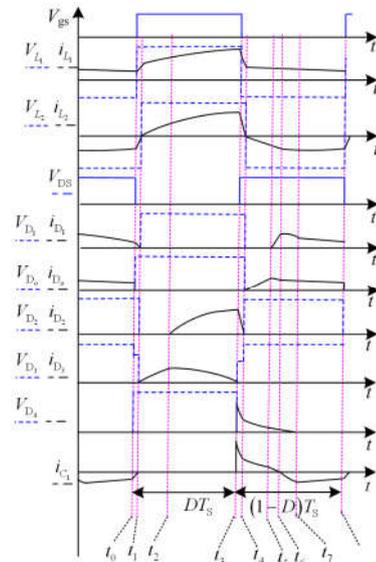


图 2 连续模式下的典型波形

Fig. 2 Classical waveforms diagram at CCM operation

模态 1 [ $t_0 \sim t_1$ ]: 在  $t=t_0$  时刻, 开关管 S 导通, 二极管  $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  和  $D_0$  关断,  $D_0$  导通。输入电源给输入电感  $L_1$  充电, 耦合电感的二次侧电感  $L_2$  与电容  $C_2$  串联, 给电容  $C_1$  充电。由于  $L_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$  谐振,  $L_2$  的电压等于  $V_{C_2} - V_{C_1}$ , 与模态 5-7 的电压相等,  $L_2$  的电压没有电压突变, 因此没有电压尖峰。当谐振电流降到零时, 二极管  $D_1$  实现零电流关断, 模态结束。

模态 2 [ $t_1 \sim t_2$ ]: 在  $t=t_1$  时刻,  $D_1$  关断,  $L_2$  的电流开始反向增大,  $D_3$  零电流导通。  $L_1$  继续储存输入电源提供的能量; 耦合电感的二次侧绕组与电容  $C_4$  串联, 给电容  $C_3$  充电。当二极管  $D_2$  开始导通时, 模态结束。

$$i_{LM}(t) \approx I_{LM}(t_1) + V_{in}(t-t_1)/L_M \quad (1)$$

模态 3 [ $t_2 \sim t_3$ ]: 在  $t=t_2$  时刻, 二极管  $D_2$  零电流导通,  $L_2$  与  $C_2$  谐振,  $L_2$  的电压等于  $V_{C_2}$ , 剩余的保持模态 2 的工作状态, 当开关管 S 关断时, 模态结束。此外, 励磁电感的电流方程和模态 2 保持一致。

模态 4 [ $t_3 \sim t_4$ ]: 在  $t=t_3$ , 钳位电路中的二极管  $D_4$  导通,  $L_K$  与  $C_1$ 、 $C_4$  开始谐振,  $L_1$  按照  $(V_{C_4} - V_{C_1} - V_{in})/L_M$  的斜率线性减小。由于钳位电路( $C_1$ 、 $C_4$  和  $D_4$ )吸收了漏感  $L_K$  的能量, 开关管 S 的电压得到钳位, 为  $V_{C_4} - V_{C_1} - V_{in}$ 。同时,  $L_2$  和  $C_2$  发生谐振,  $L_2$  的电压保持不变。因此, 在  $L_2$  续流的过程中,  $L_2$  的电压没有改变, 不存在电压尖峰。当  $L_2$  的谐振电流等于零时,  $D_2$  实现零电流关断, 模态结束。

$$i_{L_K}(t) = I_{L_K}(t_3) - (V_{C_4} - V_{C_1} - V_{in})(t-t_3)/L_K \quad (2)$$

模态 5 [ $t_4 \sim t_5$ ]: 在  $t=t_4$ , 二极管  $D_2$  零电流关断, 输出二极管  $D_0$  零电流导通。  $L_K$  与  $C_1$ 、 $C_4$  继续谐振, 输入电源、耦合电感和  $C_3$  放电, 给负载和输出电容供电。当  $D_1$  导通时, 模态结束。

模态 6 [ $t_5 \sim t_6$ ]: 在  $t=t_5$ , 二极管  $D_1$  零电流导通,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_2$  和  $C_4$  发生谐振; 同时,  $L_1$  还与  $C_1$ 、 $C_4$  继续谐振。当  $C_1$  的谐振电流等于零时, 模态结束。

$$i_{LM}(t) = I_{LM}(t_5) - (V_{C_1} - V_{C_2})(t-t_5)/NL_M \quad (3)$$

模态 7 [ $t_6 \sim t_7$ ]: 在  $t=t_6$ , 继续、 $C_2$  和  $C_4$  继续谐振; 同时,  $L_2$  还与  $C_1$ 、 $C_2$  谐振。当  $C_4$  的谐振电流等于零时, 模态结束。

模态 8 [ $t_7 \sim t_8$ ]: 在  $t=t_7$ ,  $D_4$  零电流关断,  $L_2$  与  $C_1$ 、 $C_2$  继续谐振; 输入电源与  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_3$  串联, 给负载和输出电容供电。当下一个开关周期来临时, 模态结束。

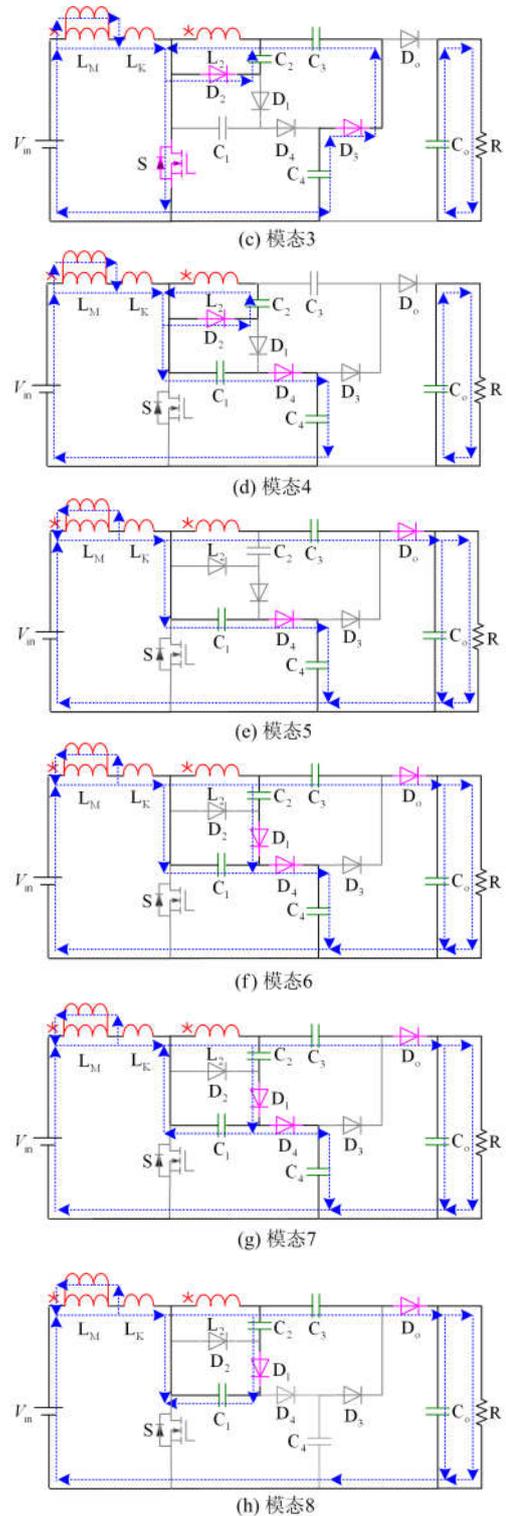
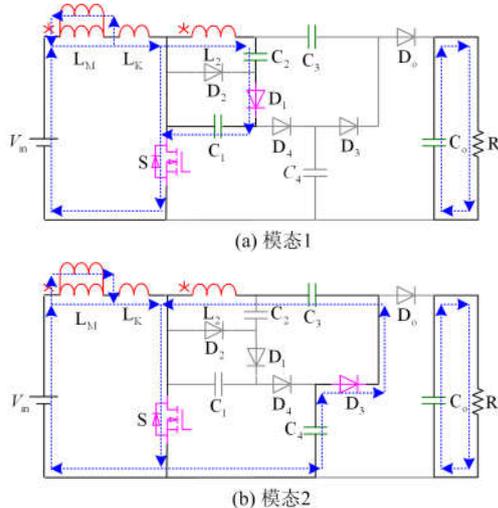


图 3 连续模式下的模态

Fig. 3 Modes under CCM

## 2 特性分析与电路设计

### 2.1 电压增益

为了简化分析过程, 忽略漏感  $L_K$  的影响, 仅考

考虑模态 2、3、5、6、7、8，同时假定所有的电容电压恒定。根据模态 2-3， $L_1$  的电压等于  $V_{in}$ ， $C_2$  的电压等于  $NV_{in}$ 。根据  $L_M$  的伏秒平衡方程，变换器的电压增益为

$$M_{CCM} = V_o / V_{in} = (2 + 2N) / (1 - D) \quad (4)$$

由方程(4)可知，选取合适的匝比，该变换器可以获得一个较高的电压增益。图 4 为文献[17,20]与所提变换器的电压增益随占空比  $D$  变化的曲线对比图。所提变换器的电压增益有优势；同时，随着占空比大于 0.5，所提变换器电压增益快速增加。

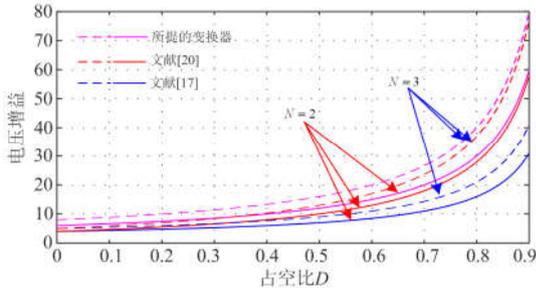


图 4 电压增益比较

Fig. 4 Voltage gain comparison

## 2.2 电压应力

根据变换器的工作模态可知，开关管  $S$  和二极管  $D_4$  的电压应力为

$$V_s = V_{D_4} = \frac{V_o}{2 + 2N} \approx 33.3 \text{ V} \quad (5)$$

二极管  $D_1$ 、 $D_2$  和电容  $C_1$  的电压应力为

$$V_{D_1} = V_{D_2} = V_{C_1} = \frac{NV_o}{2 + 2N} \approx 66.7 \text{ V} \quad (6)$$

$$V_{D_3} = V_{C_4} = \frac{(N+1)V_o}{2 + 2N} = 100 \text{ V} \quad (7)$$

输出二极管  $D_o$  的电压应力为

$$V_{D_o} = \frac{V_o}{2} = 100 \text{ V} \quad (8)$$

在输出电压为 200 V 时，不同变换器的开关管和输出二极管的电压应力比较分别如图 5 和图 6 所

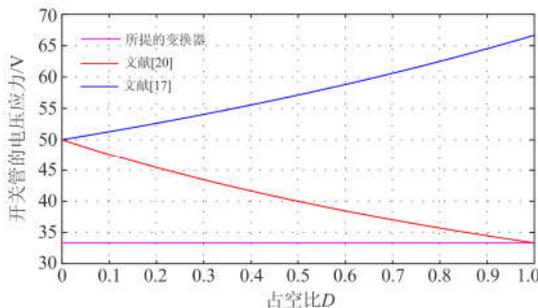


图 5 开关管的电压应力比较

Fig. 5 Voltage stress comparison of switch

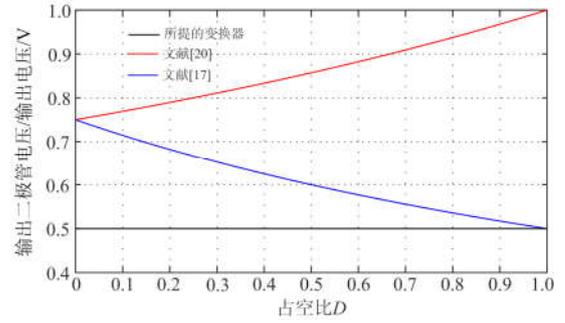


图 6 输出二极管的电压应力比较

Fig. 6 Voltage stress comparison of output diode

示。结论是所提变换器的输出二极管和开关管的电压应力更低。因此，可以采用更低额定电压等级、低额定导通电阻的器件。这对于减小变换器的成本和提高变换器的效率是有帮助的。

## 3 主要参数设计

下面给出变换器输入电压为 20~32 V，变换器额定输出电压 200 V，额定功率 200 W，变换器工作频率 50 kHz 时，变换器的主要参数设计。

### 3.1 耦合电感设计

耦合电感是变换器的主要功能部件，根据式(4)，同时选取属于 0.3~0.7 的占空比，则匝比应属于 0.5~2.5，取匝比  $N = 2$ 。选择 ETD34 磁芯，有效截面积  $A_e \approx 97.1 \text{ mm}^2$ ，在 25 °C 时，饱和磁通密度  $B_s = 510 \text{ mT}$ ，为了留一定的裕量，取  $\Delta B = 0.6B_s$ ，根据变换器运行在 CCM 模式下的约束条件可以得到磁化电感有  $L_M \geq \frac{D(1-D)^2 R}{(2N+4)(2N+2)f_s} = 12 \mu\text{H}$ ，为

了降低变换器输入电流的纹波，耦合电感的一次侧绕组的磁化电感和漏感分别为  $L_M = 137.6 \mu\text{H}$  和  $L_K = 0.96 \mu\text{H}$ 。

### 3.2 开关管和二极管设计

由于变换器不存在高尖峰电压，因此选择适当的裕量，以满足变换器的需求。根据式(5)~(8)，同时为了保证变换器的效率，开关管 IRFP4568 ( $V_{DS} = 150 \text{ V}$ ,  $R_{DS} = 4.8 \text{ m}\Omega$ )；二极管  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_4$  选取 MBR10100 ( $V_{RRM} = 100 \text{ V}$ ,  $V_F = 0.65 \text{ V}$ )；二极管  $D_3$  和  $D_o$  选取 VF30200 ( $V_{RRM} = 200 \text{ V}$ ,  $V_F = 0.526 \text{ V}$ )。

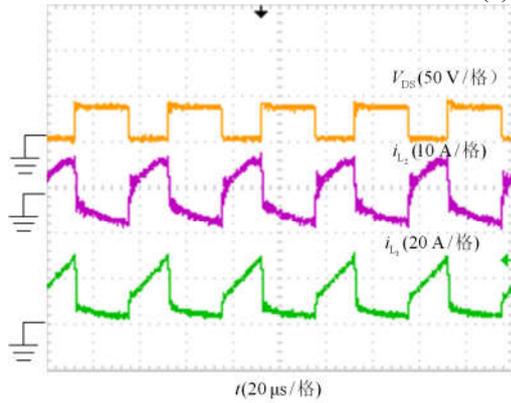
### 3.3 输出电容设计

电容值的大小对变换器的稳定输出起重要的作用。因此，根据其设计主要考虑电压纹波电压。设定纹波系数为 2%，有  $C_o \geq V_o / Rf \Delta V = 5 \mu\text{H}$ ，最终  $C_o$  取了 470  $\mu\text{H}$ 。

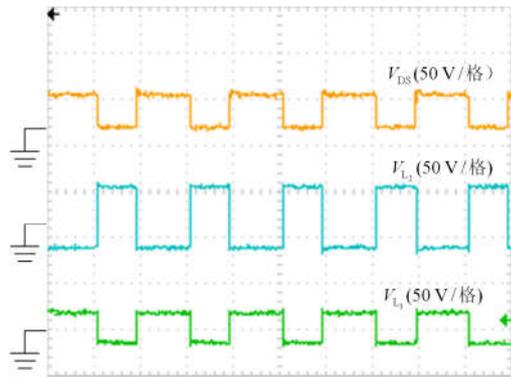
### 4 实验

根据 3.3 节的实验条件和选取的器件, 搭建了一个试验样机。除了上述的条件外,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  采用两个  $10\ \mu\text{H}$  的 CBB 电容并联, 减小损耗, 同时更好的稳压;  $C_0$  采用一个  $470\ \mu\text{H}$  电解电容和一个  $1\ \mu\text{H}$  的 CBB 电容并联。

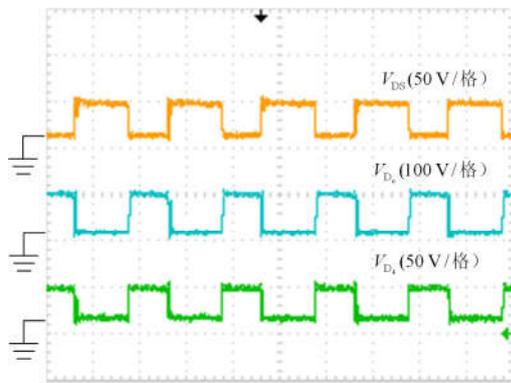
图 7(a)—图 7(c)为  $V_m = 20\ \text{V}$ ,  $V_o = 200\ \text{V}$  和  $P_o = 200\ \text{W}$  时的实验结果, 实验波形和理论波形基本吻合, 变换器的理论分析得到验证。图 7(a)为耦



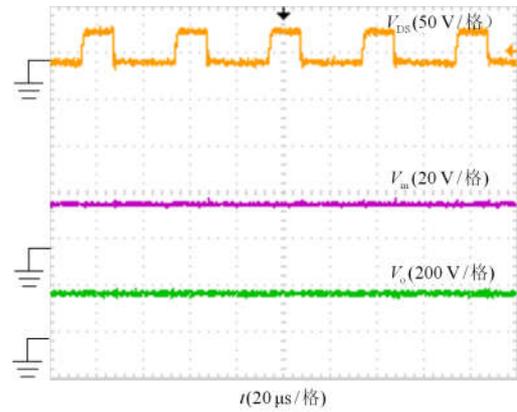
(a)  $V_{DS}$ ,  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  波形



(b)  $V_{DS}$ ,  $V_{L1}$  和  $V_{L2}$  波形



(c)  $V_{DS}$ ,  $V_{D1}$  和  $V_{D2}$  波形



(d)  $V_{DS}$ ,  $V_{Lm}$  和  $V_{Lo}$  波形

图 7 实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms

合电感原边、副边的电流。图 7(b)为耦合电感原副电压, 耦合电感二次侧绕组电压不存在突变的电压尖峰。在图 7(c)中, 为二极管  $D_4$  和  $D_0$  的电压应力, 分别为  $32\ \text{V}$  和  $98\ \text{V}$ , 和理论一致。另外两个二极管的电压应力也不存在突变的电压尖峰。图 7(a)为输入输出电压波形, 输入  $20\ \text{V}$ , 输出  $197\ \text{V}$ , 和理论一致。同时可以得出结论: 所提的变换器能消除变换器的耦合电感二次侧绕组因续流引起的电压尖峰。

变换器的效率如图 8 所示, 变换器的效率先增大再减小。在  $80\ \text{W}$  时, 变换器达到最高效率为  $95.4\%$ 。此外, 在  $200\ \text{W}$  时, 变换器效率约为  $94.4\%$ 。可以看出该变换器具有高的效率。

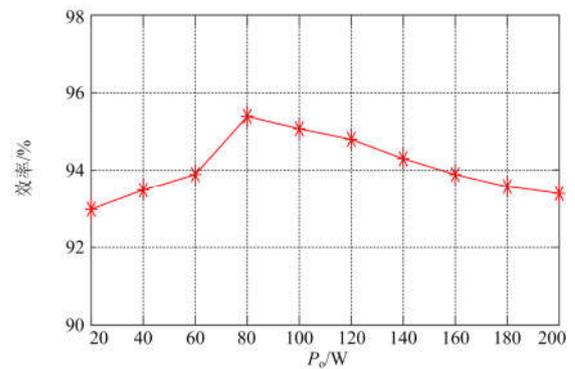


图 8 变换器的效率

Fig. 8 Efficiency of converter

### 5 结论

针对光伏并网的需求, 研究了一种双不对称倍压单元的高增益 DC/DC 变换器。与其他变换器相比, 所提变换器和其他变换器最大的区别: 1) 本变换器采用交错充放电运行的倍压单元, 随着占空比的增加, 升压能力迅速增加; 2) 钳位电路由不对称

倍压单元部分电容和二极管组成, 没有增加额外的成本, 同时漏感的能量也得到吸收, 变换器的效率得到提高, 成本没有增加。

此外, 分析其运行原理, 根据实验证明了所提的变换器无电压尖峰。同时变换器的电压增益得到提高, 开关管的电压应力和输出二极管的电压应力较低, 可以采用更低额定的 MOSFET。有利于节省成本和变换器效率的提高, 因此, 所提的变换器适用于光伏发电系统。

### 参考文献

- [1] 辛德锋, 安昱, 郜亚秋, 等. 适用于 ISOS 拓扑的高压 DC/DC 变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 64-70.  
XIN Defeng, AN Yu, GAO Yaqiu, et al. Study on high voltage DC/DC converter based on ISOS topology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 64-70.
- [2] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 146-154.  
WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Design and implementation of hardware in-the-loop simulation system for DC microgrid with multiple DG units[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 146-154.
- [3] 李瑞生, 徐军, 翟登辉, 等. 三电平 DC/DC 电源转换技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 73-80.  
LI Ruisheng, XU Jun, ZHAI Denghui, et al. Research of three-level DC/DC conversion technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 73-80.
- [4] 孙孝峰, 袁野, 王宝诚, 等. 零电压开关三电平 Buck-Boost 双向变换器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 293-300.  
SUN Xiaofeng, YUAN Ye, WANG Baocheng, et al. Zero-voltage switching three-level Buck-Boost bidirectional converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 293-300.
- [5] 赵晋斌, 刘金彪, 梁晓霞, 等. 一种新型交错式反激变换器分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 129-137.  
ZHAO Jinbin, LIU Jinbiao, LIANG Xiaoxia, et al. Analysis and design of a new interleaved flyback converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 129-137.
- [6] 侯世英, 陈剑飞, 孙韬, 等. 基于开关电容网络并联的单开关升压变换器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 242-248.  
HOU Shiyong, CHEN Jianfei, SUN Tao, et al. A single-switch step-up converter based on switched-capacitor networks in parallel[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 242-248.
- [7] 王挺, 汤雨. 基于开关电感的有源网络升压变换器的研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 73-79.  
WANG Ting, TANG Yu. Study of active network DC-DC boost converter based on switched-inductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 73-79.
- [8] 樊晨曦, 李海峰, AZEDDINE H, 等. 三相逆变器并联系统中环流抑制的研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 15-21.  
FAN Chenxi, LI Haifeng, AZEDDINE H, et al. Study on circulating current suppression in three-phase inverter parallel system[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 15-21.
- [9] ABDEL-RAHIM O, FUNATO H. Switched inductor quadratic boosting ratio inverter with proportional resonant controller for grid-tie PV applications[C] // International Conference on IEEE Industrial Electronics, October 29-November 1, 2014, Dallas, TX, USA: 5606-5611.
- [10] SATHYAN S, SURYAWANSHI H M, BALLAL M S, et al. Soft switching DC-DC converter for distributed energy sources with high step up voltage capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7039-7050.
- [11] HSIEH Y P, CHEN J F, YANG L S, et al. Novel high step-up DC-DC converter with coupled-inductor and switched-capacitor techniques for a sustainable energy system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3481-3490.
- [12] HSIEH Y P, CHEN J F, YANG L S, et al. High conversion ratio bidirectional DC-DC converter with coupled inductor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 210-222.
- [13] HSIEH Y P, CHEN J F, LIANG T J, et al. Novel high step-up DC-DC converter with coupled-inductor and switched-capacitor techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 998-1007.
- [14] MODEER T, NORRGA S, NEE H P. High voltage tapped inductor buck converter utilizing an autonomous high

- side switch[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2868-2878.
- [15] YAO J, ABRAMOVITZ A, SMEDLEY K M. Analysis and design of charge pump-assisted high step-up tapped inductor SEPIC converter with an “inductorless” regenerative snubber[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 30(10): 5565-5580.
- [16] FREITAS A A A, TOFOLI F L, JUNIOR S E M, et al. High-voltage gain DC-DC boost converter with coupled inductors for photovoltaic systems[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(10): 1885-1892.
- [17] AI Jian, LIN Mingyao. Ultralarge gain step-up coupled-inductor dc-dc converter with an asymmetric voltage multiplier network for a sustainable energy system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6896-6903.
- [18] CHEN Manxin, LI Kerui, HU Jiefeng, et al. Generation of a family of very high dc gain power electronics circuits based on switched-capacitor-inductor cells starting from a simple graph[J]. IEEE Transactions on Circuits Systems, 2016, 63(12): 2381-2392.
- [19] HWU K I, YAU Y T. High step-up converter based on coupling inductor and bootstrap capacitors with active clamping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2655-2600.
- [20] CHEN S M, LAO M L, HSIEH Y H, et al. A novel switched-coupled-inductor DC-DC step-up converter and its derivatives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 309-314.
- [21] FOROUZESH M, SHEN Y f, YARI K, et al. High-efficiency high step-up DC-DC converter with dual coupled inductors for grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5967-5982.

---

收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2018-09-10

作者简介:

朱彦磊(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力电子装置与电力传动;

傅亚光(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高压直流控制保护产品平台研发; E-mail: sck100@126.com

艾建(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子拓扑与控制。E-mail: 230179190@seu.edu.cn

(编辑 姜新丽)