

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.1.8

中图分类号:TM423

文献标志码:A

# 一种带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器的研究

曾怡达,李 宝,唐 丽,马智文

(西南交通大学电气工程学院,成都 610031)

**摘要:**光伏、燃料电池等发电系统的输出电压等级较低且输出电压不稳定,需要通过高增益 Boost 变换器把较低等级的直流电压进行升压以满足并网要求。提出一种带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器,在传统二次型 Boost 变换器的基础上引入开关电容单元,提高了变换器的升压能力,实现了以较小的占空比获得较大的电压增益,拓宽了输入电压范围。同时,该变换器改进了传统二次型 Boost 变换器开关管和二极管电压应力过大的缺点,减小了开关管的导通损耗和二极管的反向恢复损耗。另外,该变换器还有输入电流连续、输出电压纹波小的优点。分析了该变换器的工作原理及工作特性,在理论研究的基础上搭建了一台 12 V/60 V 的实验样机,实验结果证明了理论分析的正确性。

**关键词:**高增益 Boost 变换器;开关电容;宽电压输入;电压应力

## Research on Quadratic High-gain Boost Converter with a Switched-capacitor

ZENG Yida, LI Bao, TANG Li, MA Zhiwen

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The output voltage level of power generation systems including PV and fuel cell is relatively lower. Moreover, their output voltages are unstable. To meet the grid-connected requirements, high-gain Boost converters are needed to boost the lower level DC voltage. In this paper, a quadratic high-gain Boost converter with a switched-capacitor is proposed. A switched-capacitor unit is introduced on the basis of a conventional quadratic Boost converter, which improves the converter's boost capability and obtains a higher voltage gain at a smaller duty ratio, thus extending the range of input voltage. At the same time, the novel converter overcomes the shortcomings of switches and diodes (i.e., large voltage stress) in the conventional quadratic Boost converter, hence the conduction loss of switches and the reverse recovery loss of diodes are reduced. In addition, the converter proposed in this paper has the advantages of continuous input current and small output voltage ripple. The working principle and operation characteristics of the proposed converter were analyzed, based on which a prototype with 12 V input and 60 V output was built. Experimental results verified the theoretical analysis.

**Keywords:** high-gain Boost converter; switched-capacitor; wide input voltage; voltage stress

随着工农业的发展和人们生活水平的提高,传统化石能源的消耗不断增加,由此带来了能源短缺和环境污染两大世界难题。现如今太阳能光伏发

电、风能发电和燃料电池等新能源系统<sup>[1]</sup>受到广泛关注,然而光伏电池模块、燃料电池等输出直流电压较低,且易受光照强度和燃料电池的电化学特性的影响,光伏电池模块和燃料电池输出电压是不稳定的直流电,为了使这些电源满足并网和用电设备的供电要求,需要使用宽电压输入、高增益 DC/DC 变换器<sup>[2,3]</sup>。传统 Boost 变换器可以在一定程度上提

收稿日期:2016-02-28;修回日期:2017-11-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(SWJTU2011CX003EM; SWJT2011ZT002EM)

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(SWJTU2011CX003EM; SWJT2011ZT002EM)

高电压增益,但若要实现高增益<sup>[4-5]</sup>,变换器将工作在占空比  $D$  接近 1 的状态,这将导致开关管的导通损耗变大,同时也会产生较大输入和输出电流纹波,增大了开关管和输出二极管的电压应力。级联 Boost 变换器<sup>[6]</sup>能够提高电压增益,拓宽输入电压的变化范围,但主电路中有多个开关管和电感,控制电路比较复杂,开关管和输出二极管电压应力高。基于开关电容的 Boost 变换器电压增益比传统 Boost 变换器提高了 1 倍<sup>[5,7]</sup>,开关管和输出二极管的电压应力较低,但其受电压增益限制仍然无法实现宽电压输入,且输入电流较大。二次型 Boost 变换器能满足电压高增益得到要求<sup>[8,9]</sup>,拓宽了输入电压的范围,但开关管和输出二极管的电压应力为  $V_o$ ,开关管的开关和导通损耗较大,输出二极管的反向恢复损耗也较大,从而降低了变换效率。本文将开关电容和二次型 Boost 变换器的优点相结合,提出了一种带开关电容的二次型 Boost 变换器,具有电压增益高、输入电压变化范围大<sup>[2]</sup>、开关管和输出二极管的电压应力小、输入电流纹波小、变换器效率高的优点。

本文分析了变换器的工作原理及工作特性,搭建了 1 台 12 V 输入、60 V 输出、额定功率为 20 W 的实验样机,实验结果验证了理论分析的正确性。

## 1 传统二次型 Boost 变换器

图 1 为传统二次型 Boost 变换器拓扑,它由电感  $L_1, L_2$ , 电容  $C_1, C_2$ , 二极管  $D_1, D_2, D_3$  和开关管 S 构成。图中,  $V_{in}$  为输入电压,  $V_o$  为输出电压,  $R$  为负载电阻。

图 2 为变换器稳态工作时在一个开关周期  $T_s$  内的 2 个开关模式。在稳态情况下,由电感  $L_1, L_2$  的伏秒平衡可得

$$L_1: V_{in} t_{on} + (V_{in} - V_{C_1}) t_{off} = 0 \quad (1)$$

$$L_2: V_{C_1} t_{on} + (V_{C_1} - V_o) t_{off} = 0 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得传统二次型 Boost 变换器输出电压为

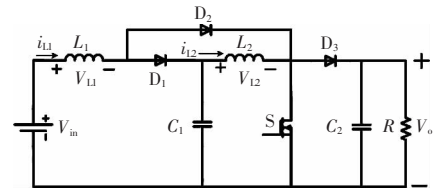
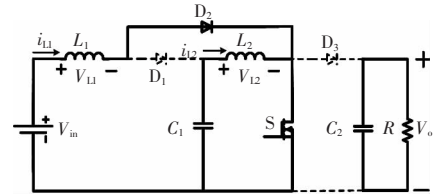
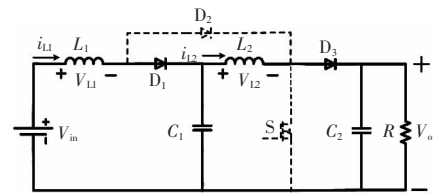


图 1 传统二次型 Boost 变换器拓扑

Fig.1 Topology of conventional quadratic Boost converter



(a) 模式 1



(b) 模式 2

图 2 传统二次型 Boost 变换器 2 个工作状态

Fig.2 Two operation states of conventional quadratic Boost converter

$$V_o = \frac{1}{(1-D)^2} V_{in} \quad (3)$$

式中,  $D$  为占空比, 表示为

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4)$$

开关管 S 和输出二极管  $D_3$  的电压应力为

$$\begin{cases} V_{S-stress} = V_o \\ V_{D_3-stress} = V_o \end{cases} \quad (5)$$

可以看出二次型 Boost 变换器的电压增益虽然比传统 Boost 变换器有较大提高,但仍然有限,功率开关管的电压应力等于输出电压,当输出电压较高时会带来很大的导通损耗。输出二极管的电压应力也等于输出电压,将引起严重的反向恢复问题。

## 2 开关电容 Boost 变换器

图 3 为传统开关电容 Boost 变换器,它由电感

$L_1$ , 电容  $C_1, C_2, C_3$ , 二极管  $D_1, D_2, D_3$  和开关管 S 构成。其中  $C_1=C_2=C_3$ 。

图 4 为变换器稳态时在一个工作周期  $T_s$  内的 2 个开关模式。在稳态情况下, 根据电感  $L$  的伏秒平衡可得

$$V_{in}t_{on} + \frac{1}{2}V_o t_{off} = 0 \quad (6)$$

由式(6)可得传统开关电容 Boost 变换器电压增益为

$$V_o = \frac{2}{1-D}V_{in} \quad D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (7)$$

开关管 S 和输出二极管  $D_1$  的电压应力为

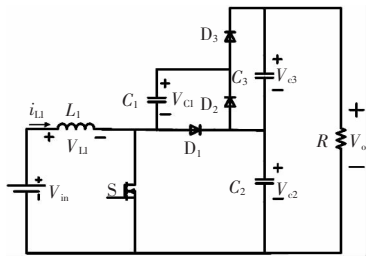
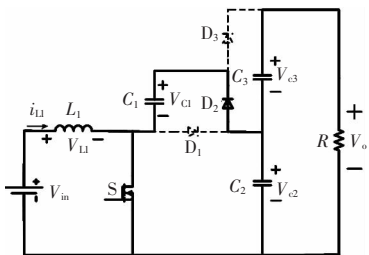
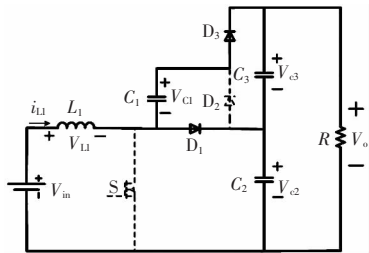


图 3 传统开关电容 Boost 变换器

Fig.3 Conventional Boost converter with a switched-capacitor



(a) 模式 1



(b) 模式 2

图 4 开关电容 Boost 变换器 2 个工作状态

Fig.4 Two operation states of Boost converter with a switched-capacitor

$$\begin{cases} V_{S-stress} = \frac{1}{2}V_o \\ V_{D1-stress} = \frac{1}{2}V_o \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 该变换器的电压增益有限, 开关管和输出二极管的电压应力只有输出电压的一半, 有利于减小开关管的导通损耗和二极管的反向恢复损耗。另外, 电路中电感电流和纹波电流都较大, 对器件要求较高。

### 3 带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器工作原理分析

#### 3.1 变换器拓扑

本文结合传统二次型 Boost 变换器电压增益高和开关电容 Boost 开关管及输出二极管电压应力低的优点, 提出一种带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器拓扑, 如图 5 所示。它由电感  $L_1, L_2$ , 二极管  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$ , 电容  $C_1, C_2, C_3, C_4$  和开关管 S 组成。其中电容  $C_2=C_3=C_4$ 。

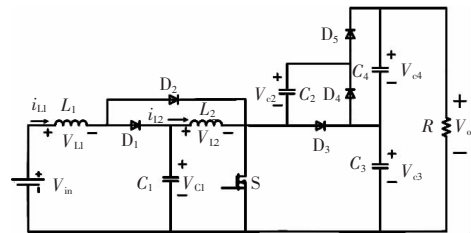


图 5 带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器拓扑

Fig.5 Topology of a quadratic high-gain Boost converter with a switched-capacitor

#### 3.2 工作原理分析

为简化分析, 假设: ①所有器件均是理想器件; ②电容足够大, 在一个开关周期  $T_s$  内, 输出电压和电容电压保持恒定不变; ③所有电感电流连续。

当变换器工作在稳态时, 在一个开关周期  $T_s$  内共有 2 个工作模式, 如图 6 所示, 其主要工作波形如图 7 所示。

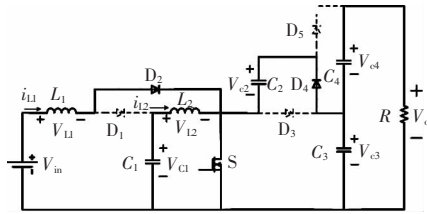
工作模式 1 [ $t_0-t_1$ ]: 如图 6(a)所示, 开关 S 导通,

输入电压为电感  $L_1$  充电,电感电流  $i_{L1}$  线性上升,二极管  $D_1$  因承受反向电压而关断, $D_2$  承受正向电压导通,同时储能电容  $C_1$  为电感  $L_2$  充电,电感电流  $i_{L2}$  线性上升,二极管  $D_3$ 、 $D_5$  承受反向电压关断, $D_4$  承受正向电压导通,电容  $C_3$ 、 $C_4$  向负载释放能量,同时电容  $C_4$  通过  $D_4$  向电容  $C_2$  放电,电容  $C_2$  储能。在此工作模式中,电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电压分别为

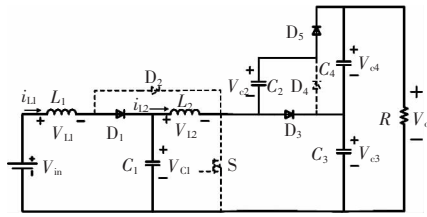
$$V_{L1} = V_{in} \quad (9)$$

$$V_{L2} = V_{C1} \quad (10)$$

工作模式 2  $[t_1-t_2]$ :如图 6(b)所示,开关 S 断开,



(a)工作模式 1



(b)工作模式 2

图 6 工作模式等效电路

Fig.6 Equivalent circuits in different operation modes

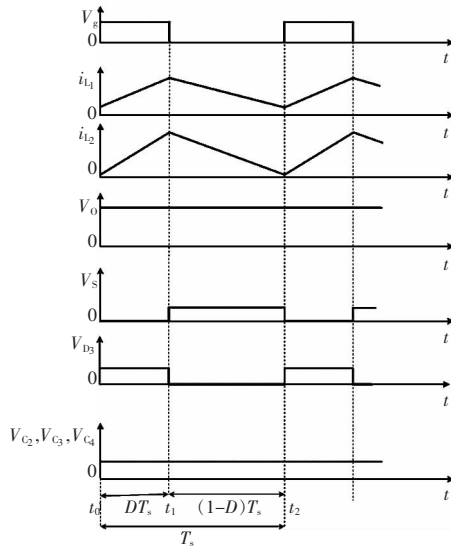


图 7 主要工作波形

Fig.7 Main operation waveforms

二极管  $D_2$  承受反向电压关断, $D_1$  承受正向电压导通,电感  $L_1$  通过  $D_1$  向电容  $C_1$  和电感  $L_2$  放电,电感电流  $i_{L1}$  线性下降,电感  $L_2$  和电容  $C_2$  向电容  $C_3$ 、 $C_4$  及负载放电,二极管  $D_3$ 、 $D_5$  承受正向电压导通。此过程中电感  $L_1$ 、 $L_2$  电压分别为

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (11)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - \frac{1}{2}V_o \quad (12)$$

### 3.3 变换器工作特性分析

根据对图 6 变换器的工作模式分析和电感  $L_1$ 、 $L_2$  的伏秒平衡,可得

$$L_1: \int_0^{DT_s} V_{in} dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_{in} - V_{C1}) dt = 0 \quad (13)$$

$$L_2: \int_0^{DT_s} V_{C1} dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_{C1} - \frac{1}{2}V_o) dt = 0 \quad (14)$$

则输出电压的表达式为

$$V_o = \frac{2}{(1-D)^2} V_{in} \quad (15)$$

即变换器的电压增益为

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D)^2} \quad (16)$$

由工作模式波形可得开关管和输出二极管的电压应力为

$$\begin{cases} V_{S-stress} = \frac{1}{2}V_o \\ V_{D3-stress} = \frac{1}{2}V_o \end{cases} \quad (17)$$

### 3.4 比较分析

工作特性对比分析如表 1 所示。通过对表 1 中的电压增益和开关管及二极管的电压应力比较分析可以看出,本文提出的新型高增益变换器的开关

表 1 工作特性对比分析

Tab.1 Comparative analysis of operation characteristics

变换器	$M$	$V_{S-stress}$	$V_{D-stress}$
传统 Boost 变换器	$\frac{1}{1-D}$	$V_o$	$V_o$
二次型 Boost 变换器	$\frac{2-D}{(1-D)^2}$	$V_o$	$V_o$
开关电容 Boost 变换器	$\frac{2}{1-D}$	$\frac{1}{2}V_o$	$\frac{1}{2}V_o$
本文所提高增益 Boost 变换器	$\frac{2}{(1-D)^2}$	$\frac{1}{2}V_o$	$\frac{1}{2}V_o$

管电压应力和输出二极管的电压应力比 Boost 变换器和二次型变换器的开关管的电压应力及输出二极管的电压应力有所减小,因此,就可以选择电压等级较小的开关管和二极管。另外,本文提出的新型高增益变换器的电压增益比其他三种变换器的电压增益都要高,可以避免开关管发生直通的现象。电压增益曲线如图 8 所示。

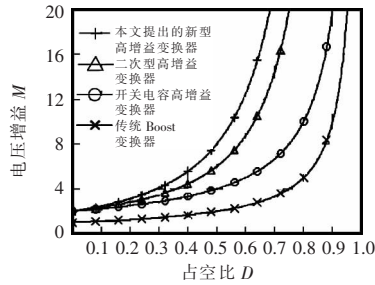


图 8 电压增益的比较

Fig.8 Comparison of voltage gains

### 4 实验验证

为了验证以上理论分析的正确性,搭建了 1 台 20 W 的原理样机,变换器主要参数为:输入电压  $V_{in}=12\text{ V}$ ;输出电压  $V_o=60\text{ V}$ ;开关管工作频率  $f=50\text{ kHz}$ ;输出功率  $P_o=20\text{ W}$ ;电感  $L_1=170\text{ }\mu\text{H}$ ,  $L_2=120\text{ }\mu\text{H}$ ;电容  $C_1=100\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2=C_3=C_4=470\text{ }\mu\text{F}$ ;负载电阻  $R=180\text{ }\Omega$ 。功率开关管 S 为 IRF540N,二极管为 MBR1045。

图 9~图 13 为本文提出的新型高增益变换器在占空比为 0.38 时的实验波形。由图 9 可以看出,当输入电压 12 V 时,得到输出电压为 60 V,实现了小占空比条件下的高增益变换,且输出电压纹波较小。由图 11 可以看出,开关管的电压应力  $V_{S-stress}$

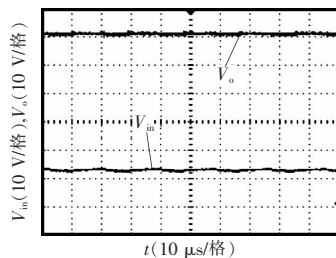


图 9 输入输出电压波形

Fig.9 Waveforms of input and output voltages

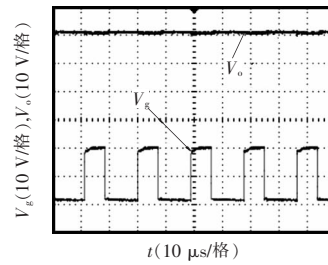


图 10 驱动信号和输出电压波形

Fig.10 Waveforms of drive signal and output voltage

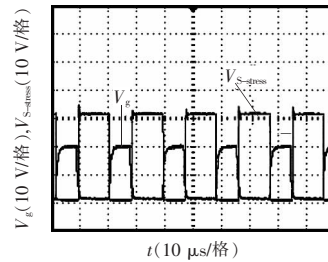


图 11 驱动信号和开关管电压应力波形

Fig.11 Waveforms of drive signal and voltage stress of switch

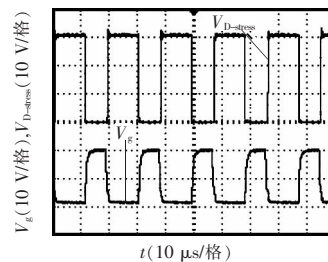


图 12 驱动信号和二极管电压应力波形

Fig.12 Waveforms of drive signal and voltage stress of diode

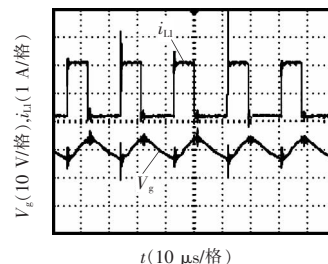


图 13 驱动信号和电感电流波形

Fig.13 Waveforms of drive signal and inductor current

为 30 V,是输出电压的一半,与理论分析符合。由图 12 可以看出,输出二极管的电压应力  $V_{D3-stress}$  为 30 V,是输出电压的一半,与理论分析符合。由图 13 可以看出,输入电流  $i_{L1}$  连续,且纹波较小。实验

波形验证了理论分析的正确性。

## 5 结语

本文提出了一种带开关电容的二次型高增益 Boost 变换器,在传统二次型 Boost 变换器的基础上引入开关电容单元,电压增益得到了进一步提高,输入电压范围进一步变宽。同时,该变换器的开关管电压应力和输出二极管电压应力都很小,降低了开关管的导通损耗和输出二极管的反向恢复损耗。另外,该变换器的输入电流连续,输出电压纹波较小。最后通过实验验证了理论分析的正确性。

### 参考文献:

- [1] 苏剑,周莉梅,李蕊.分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J].中国电机工程学报,2013,33(34):50-56.  
Su Jian, Zhou Limei, Li Rui. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (34):50-56 (in Chinese).
- [2] Zhao Qun, Lee F C. High performance coupled inductor DC-DC converters[C]. IEEE Applied Power Electronics and Exposition Conference, 2003: 109-113.
- [3] Li Wuhua, Liu Jun, Wu Jiande, et al. Design and analysis of isolated ZVT Boost converters for high-efficiency and high-step-up applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6):2363-2374.
- [4] Li Wuhua, Fan Lingli, Zhao Yi, et al. High-step-up and high-efficiency fuel-cell power-generation system with active-clamp flyback-forward converter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2012, 59(1):599-610.
- [5] Rosas-Caro J C, Ramirez J M, Peng F Z, et al. A DC-DC multilevel Boost converter[J]. IET Power Electronics, 2009, 59(1):129-137.
- [6] Huber L, Jovanovic M M. A design approach for server power supplies for networking applications[C]. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000(2):1163-1169.
- [7] 王挺,汤雨,何耀华,等.多单元开关电感/开关电容有源网络变换器[J].中国电机工程学报,2014,34(6):832-838.  
Wang Ting, Tang Yu, He Yaohua, et al. Multicell switched-inductor/switched-capacitor active-network converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):832-838(in Chinese).
- [8] Maksimovic D, Cuk S. Switching converters with wide DC onversion range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(1):151-157.
- [9] Yang Ping, Xu Jianping, Zhou Guohua, et al. A new quadratic Boost converter with high voltage step-up ratio and reduced voltage stress[C]. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012:1164-1168.



曾怡达

### 作者简介:

曾怡达(1973-),男,博士,副教授,研究方向:功率开关变换器、软开关技术和电力系统信号分析,E-mail:yidaz@126.com。

李宝(1989-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑与控制技术,E-mail:lb1206941022@163.com。

唐丽(1992-),女,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑与控制技术,E-mail:1710076656@qq.com。

马智文(1992-),女,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑与控制技术,E-mail:120898376@qq.com。