

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2018.2.119

中图分类号: TM46

文献标志码: A

一种新型开关电感、开关电容的高增益 Boost 变换器

马智文, 曾怡达, 杨辉金
(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为提高 DC-DC 工作增益, 提出一种基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器。该新型变换器综合了开关电感和开关电容的优点, 降低功率元件的电压应力, 实现对导通电阻较小的功率元件的选择, 减小功率元件的导通损耗, 使得变换器能应用于增益较大、元器件电压应力较小的场合。基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的工作原理进行理论分析, 并设计制造了一台原理样机。通过和实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 高增益 Boost 变换器; DC-DC 变换器; 开关电感; 开关电容

A New High-gain Boost Converter Based on Switched Inductor/capacitance

MA Zhiwen, ZENG Yida, YANG Huijin
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To improve the DC-DC gain, a new type of high-gain Boost converter was proposed based on switched inductor/capacitance. The new converter combined the advantages of switched inductor/capacitance and reduced the voltage stress of power devices, thus realizing the selection of power devices with lower conduction resistance. Moreover, the conduction loss of power devices was reduced, so that the converter could be applied to occasions with higher-gain and smaller voltage stress of devices. The theoretical analysis and simulation of the working principle of the new type high-gain Boost converter were conducted, and a prototype was designed and manufactured. Experiments verified the theoretical analysis.

Keywords: high-gain Boost converter; DC-DC converter; switched inductor; switched capacitance

随着全球能源需求的日益加剧和传统化石能源引起的环境问题, 光伏、燃料电池等绿色能源得到不断应用和发展, 而高增益的 DC-DC 变换器也受到了广泛的研究和关注^[1], 其应用范围日益增大^[2-3]。

具有开关电感单元的 Boost 变换器^[4]与传统 Boost 变换器相比, 具有单个电感体积小、相互对称、增益提升空间大的特点, 但其输入增益有限, 且功率开

关管电压应力等于输出电压, 大功率开关管导通损耗较大, 同时输出端二极管承受的电压应力为输出电压, 反向恢复问题较为严重; 具有开关电容单元的 Boost 变换器^[5]比之传统 Boost 变换器, 具有开关管承受应力较低、输出端的二极管承受的反向电压较小的特点, 能保护元件, 但其增益只有传统 Boost 变换器的 2 倍, 且电感电流平均值等于输入电流的平均值, 使得磁性元件体积增加, 不利于变换器的拆装。文献[6]提出一种新型的多单元开关电感/开关电容有源网络变换器, 能提供一个较大的电压增益并减小电压应力, 可由多个开关电感、开关电容构成; 文献[7]提出一种基于电压升举技术的新兴开

收稿日期: 2016-01-10; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (SWJTU2011CX003EM, SWJTU2011ZT002EM)

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (SWJTU2011CX003EM, SWJTU2011ZT002EM)

关技术,达到其高增益的效果。

本文综合开关电感和开关电容的优点,提出一种基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器,降低开关管的电压应力,便于选择导通电阻较小的功率开关管,减小开关管的导通损耗。该新型变换器具有增益大、输入电压范围较宽、电感电流小、功率开关管和输出二极管承受的电压应力小、结构灵活、成本低、方便拆装等优势。通过分析基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的工作原理,得出其优点,最后通过仿真和实验验证了理论分析的正确性。

1 基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器工作原理分析

1.1 基本开关电感单元

图 1 是传统 Boost 电路,用于升压控制,其增益是 $\frac{1}{1-D}$,开关管 S 的电压应力为输出电压 V_o 。

开关电感 Boost 变换器的电路拓扑如图 2 所示。图 2 中,开关电感 Boost 单元(虚线框内)由 2 个大小相等的电感 $L_1、L_2$ 和 3 个二极管 $D_1、D_2、D_3$ 组成。当开关管 S 导通时,二极管 $D_1、D_3$ 正向导通, D_2 反向截止, $L_1、L_2$ 由输入电压 U_i 充电;当开关管 S 断开时,二极管 D_2 正向导通, $D_1、D_3$ 反向截止, $L_1、L_2$ 串联对负载放电。

开关电感 Boost 变换器具有以下优点: ①电感

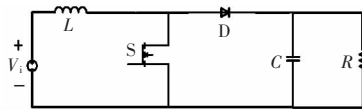


图 1 传统 Boost 电路

Fig.1 Traditional Boost circuit

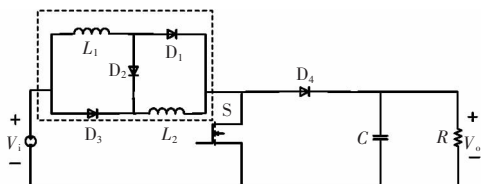


图 2 开关电感 Boost 变换器的电路拓扑

Fig.2 Circuit topology of Boost converter based on the switched inductor

的平均电流比较小;② $L_1、L_2$ 的工作模态相互对称,便于集成于同一个磁芯;③有利于提高增益。

开关电感 Boost 变换器存在以下缺点: ①增益较小; ②功率开关管承受的电压应力等于输出电压,过高的开关管电压应力使得开关管的导通电阻值增大,增加导通损耗;③输出侧二极管电压应力为输出电压,承受的电压应力大,反向恢复问题严重,增益是 $\frac{1+D}{1-D}$,开关管 S 承受的电压应力是 V_o 。

开关电容 Boost 变换器的电路拓扑如图 3 所示。图 3 中,开关电容 Boost 单元(虚线框内)由 3 个大小相等的电容 $C_1、C_2、C_3$ 和 3 个二极管 $D_1、D_2、D_3$ 组成。当开关管 S 导通时, $C_2、C_3$ 释放能量, C_1 储能;当开关管 S 关断时, C_1 释放能量, $C_2、C_3$ 储能,同时 C_1 提高输出电压,提高了增益。

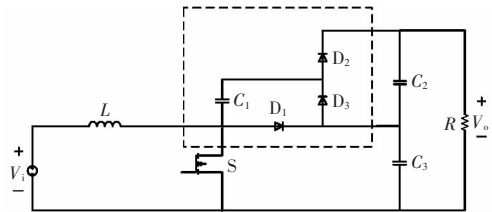


图 3 开关电容 Boost 变换器的电路拓扑

Fig.3 Circuit topology of Boost converter based on the switched capacitance

开关电容 Boost 变换器具有以下优点: 功率元件承受的电压应力较小,从而可以选择导通电阻小的功率元件,减小导通损耗。

开关电容 Boost 变换器存在的缺点是: ①增益较小,仅为传统 Boost 变换器的 2 倍;②输入电流的平均值为电感电流的平均值,增加磁性元件的体积,拆装困难。

该电路的增益是 $\frac{2}{1-D}$,开关管 S 承受的电压应力是 $1/2 V_o$,输出端二极管 D_1 承受的电压应力是 $1/2 V_o$ 。

1.2 基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的工作过程

图 4 所示是基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的原理。与传统 Boost 电路(图 1)相比,将其电感和电容分别替换为开关电感单元和开关

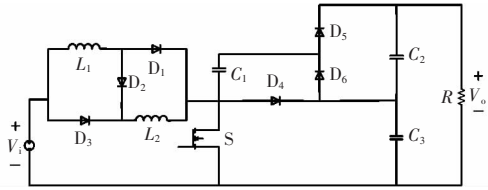


图 4 基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器

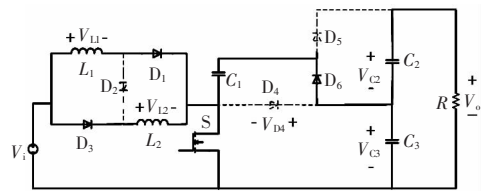
Fig.4 New high-gain Boost converter based on switched inductor/capacitance

电容单元,由电感 L_1, L_2 , 电容 C_1, C_2, C_3 , 二极管 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ 及开关管 S 构成,其中 V_i 为输入电压, R 为负载。

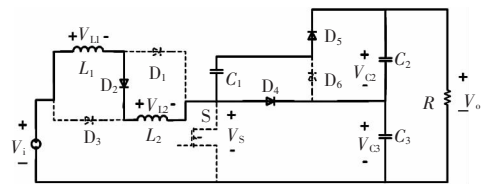
为简化分析,假设二极管、开关管、电容、电感均为理想元件,开关变换器的开关频率 f_s 远大于其最大特征频率,在一个开关周期内,输入电压保持不变, D 为开关位导通时间占空比,所有的电感均工作在电流连续 CCM(current continuous mode)状态。图 5 为基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器在一个开关周期内的开关状态。

(1)工作状态 1 ($0 \leq t \leq DT_s$)

当开关管 S 导通时,由图 5(a)可知,二极管 D_2 承受反向电压而截止, D_1, D_3 承受正向电压而导通,输入电压 U_i 通过开关管 S 为电感 L_1 和 L_2 充电,电感电流线性上升; C_2, C_3 共同释放能量给负载以维持电压稳定, C_1 通过 C_3 放电来储存能量至充满。



(a)工作状态 1 ($0 \leq t \leq DT_s$)



(b)工作状态 2 ($DT_s \leq t \leq T_s$)

图 5 基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的开关工作状态

Fig.5 Two operation states of a new high-gain Boost converter based on switched inductor/capacitance

D_4, D_5 承受反向电压而截止, D_6 承受正向电压导通,且 C_2 与串联构成回路。

在该工作阶段,各个元器件的电压分别为

$$V_{L_1} = V_i \tag{1}$$

$$V_{L_2} = V_i \tag{2}$$

$$V_{C_1} = V_{C_3} \tag{3}$$

$$V_{C_2} + V_{C_3} = V_o \tag{4}$$

$$V_{D_4} = V_{C_3} \tag{5}$$

(2)工作状态 2 ($DT_s \leq t \leq T_s$)

当开关管 S 关断时,由图 5(b)可知,二极管 D_1, D_3 承受反向电压而截止, D_2 承受正向电压而导通,电感 L_1 和 L_2 串联释放能量,给负载端放电,电感 L_1 和 L_2 的电流线性下降; D_6 承受反向电压反向截止, D_4, D_5 承受正向电压导通, C_1 释放能量给 C_2, C_3 储存能量,当 C_1 上的电压和 C_2 上的电压相等时, C_2 又开始和 C_1 一起放电给 C_3 充电至充满。 C_1 释放的能量能提高输出电压,且使得 C_2, C_3 能具有自均压能力。

在该工作阶段,各个元器件的电压分别为

$$V_{L_1} + V_{L_2} + V_{C_3} = V_i \tag{6}$$

$$V_{L_1} = V_{L_2} \tag{7}$$

$$V_{C_2} + V_{C_3} = V_o \tag{8}$$

$$V_{C_1} = V_{C_2} \tag{9}$$

$$V_S = V_{C_2} \tag{10}$$

根据式(6)~式(9),有

$$V_{L_1} = \frac{1}{2} V_i - \frac{1}{4} V_o \tag{11}$$

1.3 对工作状态分析得出的结论

根据电感伏秒(磁链)平衡原理——一个稳定运周期内,电感电流的净变化量为零,结合式(1)和式(11),得出伏秒平衡公式

$$V_i DT_s + (\frac{1}{2} V_i - \frac{1}{4} V_o)(1-D)T_s = 0 \tag{12}$$

增益 α 的表达式为

$$\alpha = \frac{V_o}{V_i} = \frac{2+2D}{1-D} \tag{13}$$

$$V_o = \frac{2+2D}{1-D} V_i \tag{14}$$

根据式(3)~式(5),功率开关管电压应力表达式为

$$V_{S-S_{\max}} = \frac{1}{2}V_o \quad (15)$$

根据式(8)~式(10),输出侧的二极管的电压应力表达式为

$$V_{D_4-S_{\max}} = \frac{1}{2}V_o \quad (16)$$

2 稳态特性分析

采用时间平均等效原理对所提出的基于开关电感/开关电容的高增益 Boost 变换器进行直流稳态分析,其直流稳态等效电路如图 6 所示。

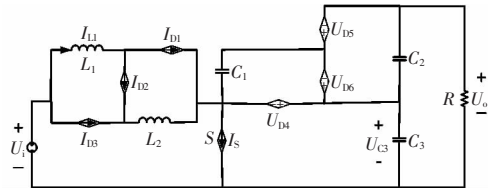


图 6 基于开关电感/开关电容的新型高增益 Boost 变换器直流稳态等效电路

Fig.6 Stable DC equivalent circuit of a new high-gain Boost converter based on switched inductor/capacitance

图 6 中

$$I_S = (1+D)I_{L1} \quad (17)$$

$$V_{D4} = DV_{C3} \quad (18)$$

当电路工作在直流稳态,电感可以看作短路,电容可以看作开路,可得基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的电压传输比和变量关系,即

$$\alpha = \frac{V_o}{V_i} = \frac{2+2D}{1-D} \quad (19)$$

$$V_{C3} = \frac{1+D}{1-D}V_i \quad (20)$$

$$I_{L1} = \frac{2V_o}{(1-D)R} \quad (21)$$

功率元件的电压应力为

$$V_{S-S_{\max}} = \frac{1}{2}V_o \quad (22)$$

$$V_{D_4-S_{\max}} = \frac{1}{2}V_o \quad (23)$$

3 实验论证

本文设计了一台规格为输入电压 12 V、输出电压 72 V、输出电流 1.97 A、输出功率为 20 W 的实验样机,如图 7 所示,验证本文提出变换器的工作原理。

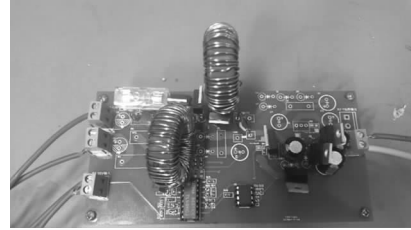


图 7 主电路实验样机

Fig.7 Experiment prototype of main circuit

采用如表 1 所示的主电路参数对本文提出的基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器进行实验,验证理论分析结果。

表 1 基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器主电路参数

Tab.1 Main circuit parameters of a new high gain Boost converter based on switched inductor/capacitance

变量	数值	变量	数值
输入电压 V_i/V	12	储能电容 $C_3/\mu F$	300
储能电感 L_1/mH	0.5	负载电阻 R/Ω	245
储能电感 L_2/mH	0.5	开关周期 $T_s/\mu s$	20
储能电容 $C_1/\mu F$	100	占空比 D	0.5
储能电容 $C_2/\mu F$	100	输出电压 V_o/V	72

如图 8 所示为基于开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器的实验波形。图 8(a)中,当输入电压为 12 V,输出电压为 72 V,与式(14)、式(19)结果相符。图 8(d)中,当输出电压为 72 V,功率开关管 S 承受的电压应力为 36 V,与式(15)、(22)相符。如图 8(e)所示,当输出电压为 72 V,输出端二极管 D_4 承受的电压应力为 36 V,与式(16)、(23)相符。如图 8(b)和图 8(c)所示,输入电流为 1.97 A,效率为 85%。表 2 为工作特性对比分析,表 2 进一步说明了本电路的优越性。

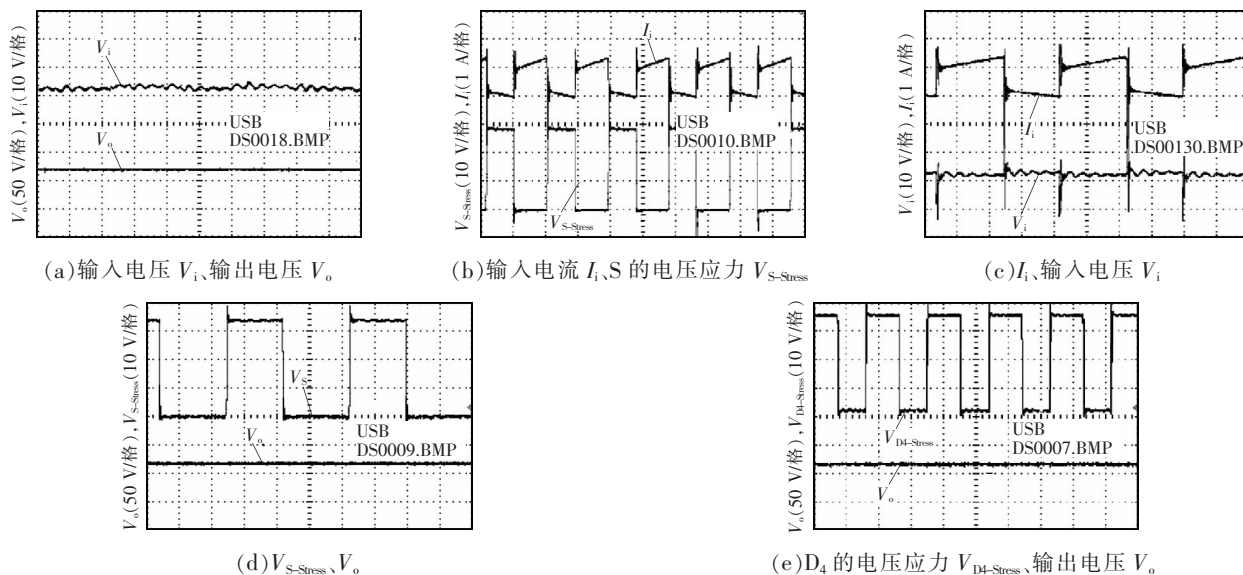


图 8 基于开关电感/电容新型高增益 Boost 变换器实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of a new high-gain Boost converter based on switched inductor/ capacitance

表 2 工作特性对比分析

Tab.2 Comparative analysis of operating characteristics

变换器	电路增益	开关管 S 的电压应力	输出端二极管电压应力
图 1	$\frac{1}{1-D}$	V_o	-
图 2	$\frac{1+D}{1-D}$	V_o	-
图 3	$\frac{2}{1-D}$	$\frac{1}{2}V_o$	$\frac{1}{2}V_o$
本文	$\frac{2+2D}{1-D}$	$\frac{1}{2}V_o$	$\frac{1}{2}V_o$

从表 2 能直观看出,本文提到的新型变换器的优势,主要是能够增大电路增益,减小元器件电压应力。

因此,实验结果验证了理论分析的正确性。

4 结语

基于开关电感/电容单元的特点,提出了一种新型的高增益 Boost 变换器,它结合了开关电感、开关电容的优点,降低功率器件承受的电压应力,为传统拓扑的一半,所以开关管的导通损耗和二极管的反向恢复损耗直流降低,增益较高。使得这种新型开关电感/电容的新型高增益 Boost 变换器能够

应用于直流增益较大、功率元件承受的电压应力较低、输入电流连续、输入电压范围宽的场所,且通过实验验证了理论分析。

参考文献:

- [1] Li Wuhua, Zhao Yi, Wu Jiande, et al. Interleaved high step-up converter with winding-cross-coupled inductors and voltage multiplier cells[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 27(1): 33-143.
- [2] Li Wuhua, Fan Lingli, Zhao Yi, et al. High-step-up and high-efficiency fuel-cell power-generation system with ctive-clamp flyback-forward converter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2012, 59(1):599-610.
- [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] Axelrod B, Berkovich Y, Ioinovici A. Switched-capacitor/switched-inductor structures for getting transformerless hybrid DC-DC PWM converters[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2008, 55(2):687-696.
- [5] Rosas-Caro J C, Ramirez J M, Peng F Z, et al. A DC-DC multilevel Boost converter[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(1):129-137.

(下转第 177 页)

- battery applications[J]. AICHE Journal, 1975, 21 (1): 25-41.
- [5] Hu Y, Yurkovich S, Guezennec Y, et al. Electro-thermal battery model identification for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 449-457.
- [6] Esfahanian V, Ansari A B, Torabi F. Simulation of lead-acid battery using model order reduction[J]. Journal of Power Sources, 2015, 279: 294-305.
- [7] Gu W B, Wang C Y, Liaw B Y. Numerical modeling of coupled electrochemical and transport processes in lead-acid batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(6): 2053-2061.
- [8] Rahn C D, Wang Chaoyang. Battery systems engineering [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [9] Gu W B, Wang G Q, Wang C Y. Modeling the overcharge process of VRLA batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 108(1): 174-184.
- [10] Cugnet M, Laruelle S, Grugeon S, et al. A mathematical model for the simulation of new and aged automotive lead-acid batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156 (12): A974-A985.
- [11] 老大中. 变分法基础[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [12] Shi Ying, Prasad G, Shen Zheng, et al. Discretization methods for battery systems modeling[C]//American Control Conference (ACC), 2011. San Francisco,CA, USA, 2011: 356-361.
- [13] Zhang Liqiang, Wang Lixin, Hinds G, et al. Multi-objective optimization of lithium-ion battery model using genetic algorithm approach[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270(3): 367-378.
- [14] Blaifi S, Moulahoum S, Colak I, et al. An enhanced dynamic model of battery using genetic algorithm suitable for photovoltaic applications[J]. Applied Energy, 2016, 169: 888-898.



吕超

作者简介:

吕超(1978-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授,研究方向:系统故障预测与健康管管理,E-mail:lu_chao@hit.edu.cn。

葛腾飞(1992-),男,硕士,研究方向:电池建模与管理,E-mail:wufazhuce101@163.com。

丛巍(1991-),男,硕士,研究方向:电池阻抗谱,E-mail:773721730@qq.com。

于洪海(1978-),男,高级工程师,研究方向:电力系统运行与检修,E-mail:95611@qq.com。

赖庆智(1990-),男,硕士,研究方向:电池管理系统,E-mail:952079678@qq.com。

(上接第 123 页)

- [6] 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)
- [7] 张士宇,许建平,杨平.新型单开关高增益 boost 变换器研究[J].电工电能新技术,2013,32(3):12-15.
Zhang Shiyu, Xu Jianping, Yang Ping. Research on a new single-switch high gain Boost converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 12-15(in Chinese).



马智文

作者简介:

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

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:hsqwenster@126.com。

杨辉金(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子拓扑和控制研究,E-mail:407251545@qq.com。