

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108655

三电感单管高增益 Boost 变换器*

秦 杨¹ 许 兴² 秦 岭²

(1. 江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013; 2. 南通大学电气工程学院 南通 226019)

摘要: 燃料电池、光伏电池、蓄电池等可再生能源电池模块的电压较低,变化范围较宽,且工作效率和寿命与其输出电流纹波大小有关,因此需要接口变换器具有极强的升压能力且输入电流连续,才能满足前级的电流纹波和后级负载设备的供电电压等性能要求。针对现有非隔离型高增益变换器普遍存在的升压能力不足的问题,提出了一种结合了二次型、开关电感和电荷泵升压技术的三电感单管高增益 Boost 变换器,并通过一台 200 W/50 kHz 的原理样机进行了实验验证。实验结果表明,所提变换器的电压增益为 $2/(1-D)^2$,远高于现有方案,且具有输入电流连续,输入、输出端共地,器件数量少,控制简单等优点。

关键词: 直流变换器;高增益;Boost;三电感

中图分类号: TM461 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4030

A triple-inductor single-switch high-gain Boost converter

Qin Yang¹ Xu Xing² Qin Ling²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The renewable energy sources, such as fuel cells, photovoltaic (PV) panels, and battery pack, produce a low and variable dc output voltage, and their power generation efficiency and lifespan are affected by the output current ripple. Therefore, a high-gain converter with continuous input current is required as an interface to satisfy the requirements of front-end current ripple rate and rear-end voltage level. To address the common issue of insufficient boosting ability in the existing non-isolated high-gain converter, by combining the quadratic boosting, switched-inductor and charge pump technologies, a new triple-inductor single-switch high-gain boost converter is proposed in this paper. A 200 W/50 kHz experimental prototype is designed and manufactured to verify its feasibility. The experimental results show that the proposed converter can achieve the ultra-high voltage gain of $2/(1-D)^2$, which is much higher than the existing schemes. Moreover, it has the advantages of continuous input current, common ground, small amount of devices and ease of control.

Keywords: DC-DC converter; high gain; Boost; triple-inductor

0 引 言

燃料电池、光伏电池、蓄电池等可再生能源电池模块的电压较低,变化范围较宽,且工作效率和寿命与其输出电流纹波大小有关,因此需要接口变换器具有极强的升压能力(10倍以上)且输入电流连续,才能满足前级的电流纹波和后级负载设备的供电电压等性能要求^[1]。直流升压变换器可分为隔离型和非隔离型两类。相较于隔离型方案,非隔离型升压变换器不含有高频变压器,具有体积小、成本低、

效率高的优点,在不需要电气隔离的场合将更有性能优势^[2]。传统 Boost 变换器是应用最广泛的非隔离型升压变换器^[3-4]。其结构简单,输入电流连续,但当占空比接近于 1 时,电感和开关管的电流应力和通态损耗急剧增大,导致效率严重下降。考虑到运行效率约束,Boost 变换器的占空比不能过大,因此实际电压增益较低。为了在较低占空比下获得更高的电压增益,近年来各国学者提出了大量的非隔离型高增益 Boost 变换器拓扑。其中,耦合电感 Boost 变换器能通过增加耦合电感原、副边的匝比来获得高压

收稿日期:2021-12-22

* 基金项目:国家自然科学基金项目(62103205)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21-3088)、南通市社会民生科技计划面上项目(MS12021015)资助

能力^[5]。但是,漏感能量难以回收^[6],变换效率较低,且引起严重的电压尖峰。开关电感^[7]、开关电容^[8]、开关电感和电荷泵混合式^[9]、准 Z 源^[10]、二次型^[11]等传统的电感增益 Boost 变换器不存在漏感,因此损耗相对较低,而且电感设计相对简单。但是,其电压增益通常不超过传统 Boost 变换器的两倍。为了进一步改善升压能力,文献[12-15]分别通过增加升压模块,得到了几种具有更高增益的多电感变换器。但是,其存在如下问题:输入、输出端不共地^[12]、器件数量较多^[13-14]、实际升压能力仍然较低^[12-15]。

为此,本文提出了一种三电感单管高增益 Boost 变换器,将其二次型、开关电感、电荷泵等升压单元电路结合在一起,因此具有较强的升压能力(为传统二次型 Boost 变换器的 2 倍)。此外,其还和文献[15]所提变换器一样,具有较少的器件数量,且实现了输入、输出端共地。本文详细分析了该变换器的工作原理和稳态特性,完成了参数设计,并通过 1 台 200 W/50 kHz 的样机验证了其可行性。

1 三电感单管高增益 Boost 变换器

1.1 工作原理

本文所提三电感高增益 Boost 变换器如图 1 所示。其包括 1 个开关管(S), 3 个电感(L_1 、 L_2 和 L_3)、5 个二极管(D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 D_5)以及 3 个电容(C_1 、 C_2 和 C_0)。其中, L_1 、 L_2 、 C_1 和 D_1 、 D_2 、 D_3 构成二次型升压网络; L_2 、 L_3 、 C_2 和 D_2 、 D_3 、 D_4 构成开关电感、电荷泵混合式升压网络。

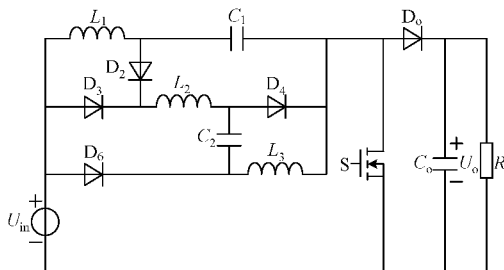


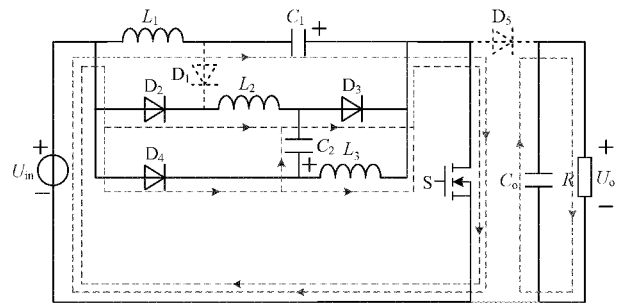
图 1 本文所提三电感高增益 Boost 变换器

为便于分析,在图 1 中标出各物理量的参考方向,并作如下假设:1)所有元器件均为理想器件;2)电容量 C_1 、 C_2 和 C_0 均足够大,可忽略各电容的端电压纹波;3)电感 L_2 、 L_3 完全相同。

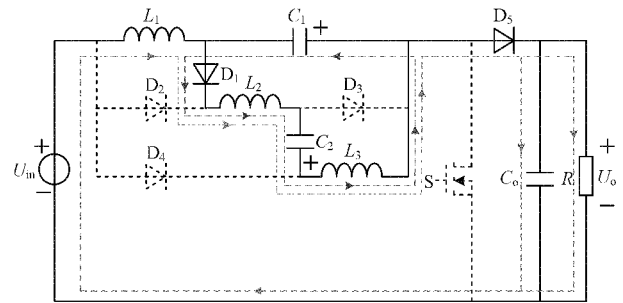
基于上述假设,本文所提高增益 Boost 变换器在电流连续模式下的稳态工作过程可以分成两个阶段。各阶段对应的等效电路如图 2 所示。其主要波形如图 3 所示。

1) 阶段 1: $[t_0 \sim t_1]$ (等效电路如图 2(a)所示)

在 t_0 时刻,开通开关管 S。该阶段中,二极管 D_1 和 D_3 反向偏置,二极管 D_2 、 D_3 和 D_4 正向偏置。输入电压源 U_{in} 通过 S 和电容 C_1 向电感 L_1 充电,通过 S、 D_2 和 D_3 向电感 L_2 充电,通过 S 和 D_4 向电感 L_3 充电,通过 S、 D_3 和 D_4 向电容 C_2 充电。同时,输出滤波电容 C_0 单独向直流负载 R 供电。此时有:



(a) 模式 1 $[t_0 \sim t_1]$



(b) 模式 2 $[t_1 \sim t_2]$

图 2 各模式的等效电路

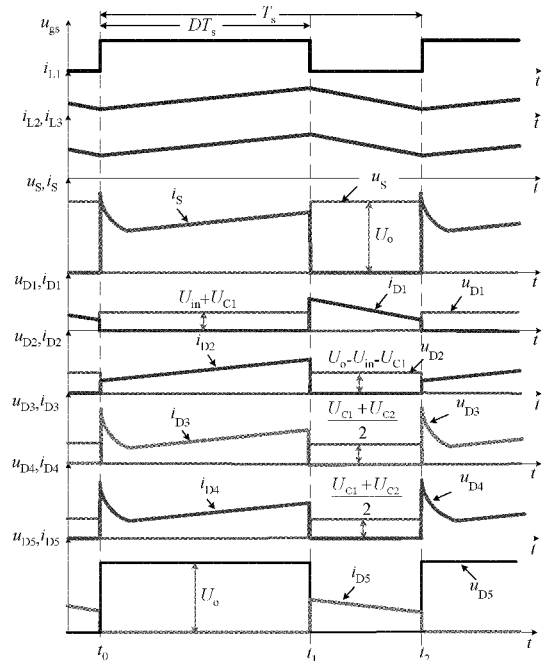


图 3 一个开关周期内的关键波形

$$\begin{cases} U_{in} + U_{C1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \\ U_{in} = U_{C2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_3 \frac{di_{L3}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{in} 为输入电压, U_{C1} 和 U_{C2} 分别为电容 C_1 和 C_2 的端电压。

在 t_1 时刻,开关管 S 关断,电感 L_1 、 L_2 和 L_3 的电流均

上升到最大值,阶段 1 结束。阶段 1 的持续时间为:

$$\Delta t_1 = DT_s \quad (2)$$

式中: D 为开关管 S 的驱动信号占空比, $T_s=1/f_s$ 为开关周期, f_s 为开关频率。

2) 阶段 2: $[t_1 \sim t_2]$ (等效电路如图 2(b)所示)

该阶段中,二极管 D_1 和 D_5 正向偏置, D_2 、 D_3 和 D_4 反向偏置。电容 C_2 、电感 L_1 、 L_2 与 L_3 均处于放电状态, C_1 处于充电状态。此时,电感 L_1 和 D_5 的电流相等,且有:

$$\begin{cases} U_{in} + U_{C1} - U_o = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{U_{C2} - U_{C1}}{2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_3 \frac{di_{L3}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_o 为输出电压。

在 t_2 时刻,电感 L_1 、 L_2 的电流下降到最小值,阶段 2 结束,开始下一个开关周期。阶段 2 的持续时间为:

$$\Delta t_2 = (1-D)T_s \quad (4)$$

1.2 稳态特性

1) 电压增益

根据电感伏秒平衡原理,可得:

$$\begin{cases} (U_{in} + U_{C1})DT_s = (U_o - U_{in} - U_{C1})(1-D)T_s \\ U_{in}DT_s = \frac{U_{C1} - U_{C2}}{2}(1-D)T_s \end{cases} \quad (5)$$

根据式(1)和(5),可得电压增益:

$$G = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{2}{(1-D)^2} \quad (6)$$

表 1 对文献[12-15]与本文所提的单管高增益 Boost 变换器的器件数量、电压增益和共地特性进行了比较。可以看出,和文献[12]和文献[15]相比,本文所提的变换器同样具有最少的器件数量,但是输入、输出端共地,因而降低了输出电压采样难度和系统成本。此外,本文所提变换器的电压增益最高,因此可在较小占空比条件下实现高电压输出。上述几种单管高增益变换器的电压增益曲线如图 4 所示。可以看出,当占空比 $D=0.8$ 时,本文所提变换器的电压增益为 50,明显高于其他几种变换器。

表 1 几种多电感单管高增益变换器的性能比较

变换器	器件数量				电压增益	共地
	S	D	L	C		
文献[12]	1	4	3	4	$(1+D)/(1-D)^2$	否
文献[13]	1	10	4	1	$(1+3D)/(1-D)$	是
文献[14]	1	9	3	3	$2(1+2D)/(1-D)$	是
文献[15]	1	5	3	3	$D^2/(1-D)^2$	是
本文	1	5	3	3	$2/(1-D)^2$	是

2) 电压应力

由式(5),可得电容 C_1 的电压应力:

$$U_{C1} = \frac{1+D}{1-D} U_{in} \quad (7)$$

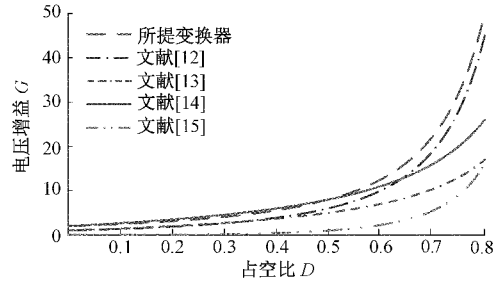


图 4 电压增益特性

由图 2 可知,功率管的电压应力分别为:

$$\begin{cases} U_S = U_{D5} = U_o \\ U_{D1} = U_{in} + U_{C1} = \frac{2}{1-D} U_{in} \\ U_{D2} = U_o - U_{in} - U_{C1} = \frac{2D}{(1-D)^2} U_{in} \\ U_{D3} = \frac{U_{C1} + U_{C2}}{2} = \frac{1}{1-D} U_{in} \\ U_{D4} = \frac{D^2 - D + 2}{(1-D)^2} U_{in} \end{cases} \quad (8)$$

3) 电流应力

所提三电感单管高增益 Boost 变换器的平均电流等效电路如图 5 所示。图中, I_s 为开关管 S 的平均电流; $I_{D1} \sim I_{D5}$ 分别为二极管 $D_1 \sim D_5$ 的平均电流; $I_{L1} \sim I_{L3}$ 分别为电感 $L_1 \sim L_3$ 的平均电流; I_{in} 和 I_o 分别为平均输入、输出电流。

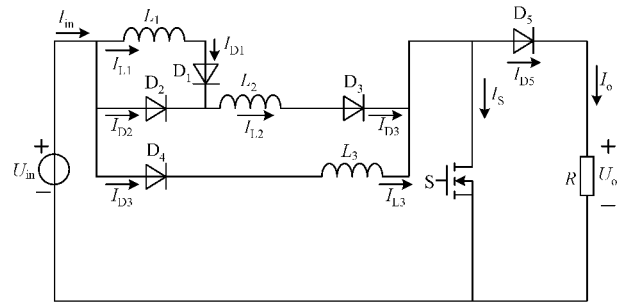


图 5 所提高增益 Boost 变换器的平均电流等效电路

由图 5,可以看出:

$$\begin{cases} I_{D3} = I_{D1} = I_{L2} = I_{L3} = 0.5 I_{in} \\ I_s = I_{in} - I_o \\ I_{D5} = I_o \end{cases} \quad (9)$$

由于 $i_{D1} + i_{D2} = i_{L2}$,且 D_1 、 D_2 互补导通,因此有:

$$\begin{cases} I_{D1} = I_{L1} = (1-D)I_{L2} \\ I_{D2} = DI_{L2} \end{cases} \quad (10)$$

忽略 C_2 的充电电流,则可得开关管 S 的电流有效值:

$$I_{s,rms} = \sqrt{D \left[\frac{1}{12} (\Delta I_{L1} + \Delta I_{L2} + \Delta I_{L3})^2 + I_{in}^2 \right]} \quad (11)$$

式中: ΔI_{L1} 、 ΔI_{L2} 、 ΔI_{L3} 分别为电感 L_1 、 L_2 、 L_3 的电流峰值。

2 参数设计

2.1 电感量设计

电感 L_1 的电流峰峰值 ΔI_{L1} 需要小于最大平均电流 $I_{L1,max}$ 的 20%，因此有：

$$L_1 = \frac{(U_{in} + U_{C1})DT_s}{\Delta I_{L1}} \geq \frac{2(U_{in} + U_{C1})D}{20\%(1-D)I_{in,max}f_s} \quad (12)$$

同理，可得：

$$L_2 = L_3 = \frac{U_m DT_s}{\Delta I_{L2}} \geq \frac{U_m D}{20\%I_{L2,max}f_s} = \frac{2U_m D}{20\%I_{in,max}f_s} \quad (13)$$

2.2 电容量设计

通常要求满载条件下的电容电压纹波率低于 1%，从而有：

$$C_1 \geq \frac{\left(\frac{I_{D1}}{1-D} - I_{L1}\right)_{max} (1-D)T_s}{\Delta U_{C1}} = \frac{D(1-D)P_{o,max}}{0.02U_{C1}U_{in}f_s} \quad (14)$$

$$C_2 \geq \frac{\left(\frac{I_{D3}}{D} - I_{L2}\right)_{max} DT_s}{\Delta U_{C2}} = \frac{(1-D)P_{o,max}}{0.02U_{C1}U_{in}f_s} \quad (15)$$

$$C_o \geq \frac{\left(\frac{I_o}{1-D} - I_o\right)_{max} (1-D)T_s}{\Delta U_{C_o}} = \frac{DP_{o,max}}{0.01U_o^2 f_s} \quad (16)$$

3 实验验证

为了验证本文所提三电感高增益 Boost 变换器的可行性，设计并制作一台 200 W/50 kHz 的实验样机，如图 6 所示。样机设计指标如表 2 所示。根据表 3 和式(12)~(16)，可得样机主电路参数，如表 3 所示。

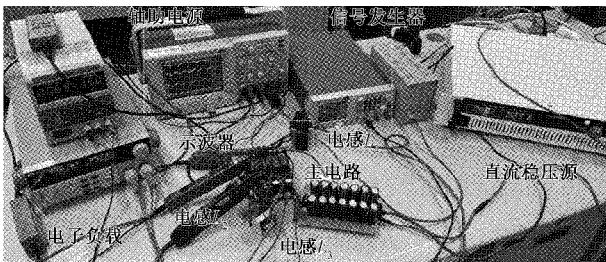


图 6 所提高增益 Boost 变换器实验样机

表 2 实验样机设计指标

设计指标	参数值
输入电压 U_{in}	25 V
输出电压 U_o	400 V
最大功率 $P_{o,max}$	200 W
开关频率 f_s	50 kHz

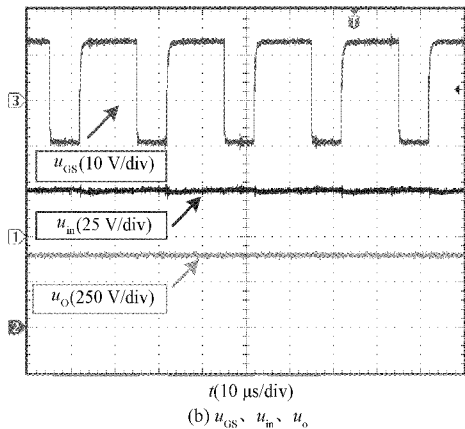
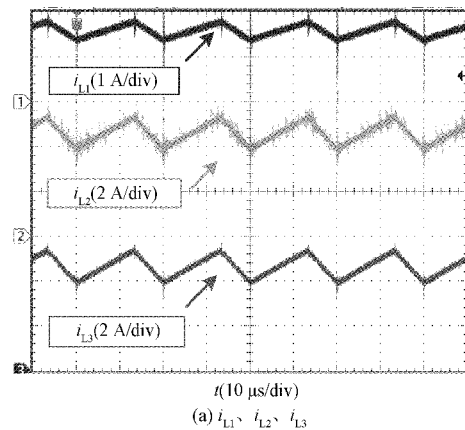
图 7 所示为所提高增益 Boost 变换器在 $U_{in} = 25$ V、 $U_o = 400$ V 且满载时的实验波形。由图 7(a)可以看出，电

表 3 实验样机主电路参数

器件名称	参数值或型号
开关管 S	IPW65R019C7
二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 (D_4)、 D_5	MBR40250CT、FFSB1065B
电容 C_1 、 C_2 、 C_o	20 μ F/200 V、200 μ F/36 V、10 μ F/450 V
电感 L_1 、 L_2 (L_3)	2.6 mH/2 Ω 、170 μ H/5 Ω

感电流 i_{L1} 、 i_{L2} 和 i_{L3} 均连续，且 $i_{L2} = i_{L3}$ 。由图 7(b)可以看出， $U_{in} = 25$ V、 $U_o = 400$ V，因此电压增益为 $G = U_o/U_{in} = 16$ ，对应的占空比理论值为 0.65，而实测值为： $D \approx 0.66$ ，二者基本吻合。由图 7(c)和(d)可以看出，功率管和电容的实测电压应力为 $U_s = 400$ V、 $U_{C1} = 119$ V、 $U_{C2} = 23$ V、 $U_{D1} = 140$ V、 $U_{D2} = 260$ V、 $U_{D3} = 75$ V、 $U_{D4} = 350$ V、 $U_{D5} = 400$ V，均与理论计算值基本一致，从而验证了理论分析的正确性。

图 8 所示为本文所提高增益 Boost 变换器在 $U_{in} = 25$ V、 $U_o = 400$ V 时的实测效率曲线。可以看出，实测满载效率为 86.7%，最大效率为 87.4%。表 4 对本文和文献[13-15]所提的几种单管多电感高增益变换器的满载效率进行了对比(文献[12]未给出实测效率)。可以看出，在相近的输入电压和开关频率且更高的输出电压条件下，本文所提方案的满载效率高于文献[13]和文献[15]。虽然文献[14]所提变换器的效率更高，但该结果是在采用昂贵的高性能 SiC



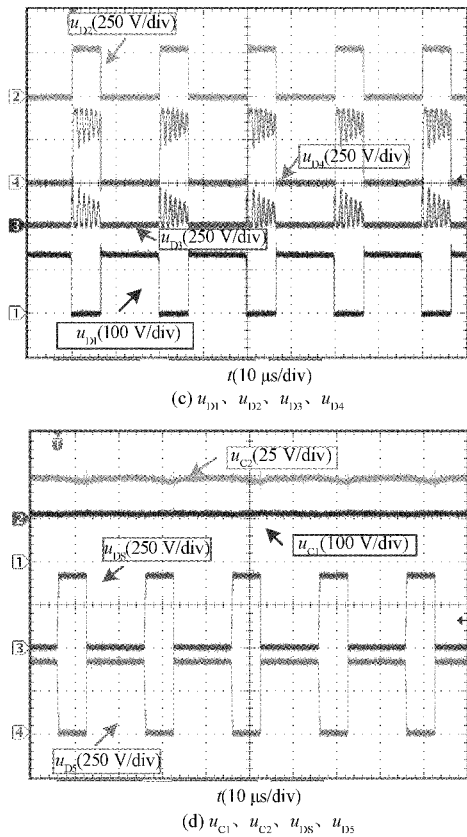
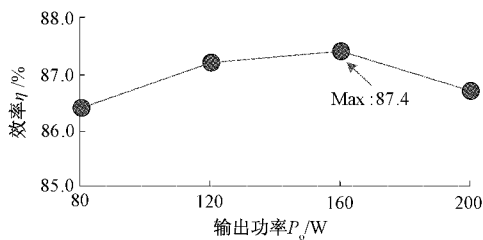
图 7 $U_{in}=25\text{ V}$ 、 $U_o=400\text{ V}$ 且满载时的实验波形

图 8 实测效率曲线

表 4 多电感高增益变换器的样机效率对比

变换器	运行条件	满载效率/%
文献[13]	$U_{in}=20\text{ V}$, $U_o=230\text{ V}$, $P_{o,max}=340\text{ W}$, $f_s=50\text{ kHz}$	83.2
文献[14]	$U_{in}=24\text{ V}$, $U_o=350\text{ V}$, $P_{o,max}=500\text{ W}$, $f_s=50\text{ kHz}$	92.1
文献[15]	$U_{in}=25\text{ V}$, $U_o=50\text{ V}$, $P_{o,max}=400\text{ W}$, $f_s=40\text{ kHz}$	85.7
本文	$U_{in}=25\text{ V}$, $U_o=400\text{ V}$, $P_{o,max}=200\text{ W}$, $f_s=50\text{ kHz}$	86.7

功率器件的前提下取得的。该变换器具有大量的二极管(9个),全部采用 SiC 器件,固然避免了反向恢复损耗,改善了变换效率,但系统成本急剧上升。与之相比,本文所提

方案在采用普通硅基功率器件的条件下仍取得较高的效率,且升压能力远强于上述三种变换器,因而更具有应用价值。

4 结 论

本文提出了一种单开关管三电感高增益 Boost 变换器,并通过一台 200 W/50 kHz 的样机实验验证了该方案的可行性。研究表明,该高增益 Boost 变换器具有如下特点:升压能力极强,电压增益为 $2/(1-D)^2$;输入、输出端共地,且只采用 1 个开关管,3 个电感,5 个二极管和 3 个电容,器件数量较少,结构和控制相对简单;电感 L_2 和 L_3 均分输入电流 I_{in} ,故可以选用相同磁芯,便于批量化生产。

参考文献

- [1] 刘郑心,杜玖玉,于渤海.三开关双 Boost 高增益 DC/DC 变换器研究[J].电源技术,2021,45(8):1082-1086.
- [2] 周磊,张宇妍,秦岭,等.低电应力无变压器单管高增益 Boost 变换器族[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7036-7046.
- [3] 卢自宝,龚莉,赵传超,等.直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J].仪器仪表学报,2021,42(8):202-209.
- [4] 叶尚斌,刘帅,韦莉,等.电能存储装置测试系统中 Boost 软开关变换器研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):629-637.
- [5] 段玉波,伍旭灿,闫俊泉,等.耦合电感低电压应力 Boost 变换器[J].国外电子测量技术,2020,36(9):17-20.
- [6] 刘文琪,丁稳房.适用于光伏发电系统的新型高增益 DC/DC 变换器[J].电源技术,2021,45(10):1330-1332.
- [7] 高嵩,宋鹤,陈超波,等.开关电感 Boost 变换器建模与仿真分析[J].电源学报,2015,13(4):77-84.
- [8] 吴志东.一种新型的高升压 Boost 变换器研究[J].电子测量技术,2017,40(3):59-62.
- [9] HWU I K, YAU T Y. High step-up converter based on charge pump and boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2484-2494.
- [10] 雷适,郭小定,韦文祥,等.一种新型准 Z 源直流变换器的研究[J].国外电子测量技术,2020,39(11):61-65.
- [11] LI G L, JIN X, CHEN X Y, et al. A novel quadratic boost converter with low inductor currents[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(1): 1-10.
- [12] 朱高中,刘树林,王成.一种改进高增益二次型 Boost 变换器[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(5):46-52.
- [13] ZHANG G D, WANG Z Y, IU H Q, et al. Unique

- modular structure of multicell high-boost converters with reduced component currents [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7795-7804.
- [14] SHANTHI T, PRABHA S U, SUNDARAMOORTHY K. Non-isolated n-stage high step-up DC-DC converter for low voltage DC source integration [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1625-1634.
- [15] ZHANG N, ZHANG G D, SEE K W, et al. A single-switch quadratic buck-boost converter with continuous input port current and continuous output port current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4157-4166.

作者简介

秦杨,本科,主要研究方向为无变压器高增益直流变换技术。

许兴,硕士研究生,主要研究方向为无变压器高增益直流变换器的软开关技术。

秦岭(通信作者),博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为高效功率变换技术、光伏发电技术、系统建模与控制等。

E-mail:qin.l@ntu.edu.cn