DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.30 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器

权利敏[1]，张 民[1]，贾海涛[1]，薛鹏飞[1]，李海东[2]
(1.青岛理工大学信息与控制工程学院，青岛 266520；2.北京雷动智创科技有限公司，北京 100192)

摘要：传统 DC-DC 变换器在宽转换范围的应用中，迫切需要更高的电压增益、效率和可靠性等性能。提出并分析了 1 种基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器。该拓扑结构中的开关管电压应力低、本征占空比小，有利于减少开关损耗，继而提升变换器效率。所有开关器件均实现了电压钳位，降低了开关器件切换瞬间所产生的电压尖峰。相较于耦合绕组，单输入电感降低了变换器尺寸及输入电流纹波。输入输出端子共用接地，保证了输出可靠性。通过与其他典型变换器对比，以及结合 200 W 实验样机的性能分析，验证了基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器的可行性和有效性。

关键词：DC-DC 变换器；高效率；无源钳位；倍压单元

DC-DC Converter Based on Switching Voltage Doubling Clamping Unit

QUAN Limin[1], ZHANG Min[1], JIA Haitao[1], XUE Pengfei[1], LI Haidong[2]
(1. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2. Beijing Leigong Zhichuang Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In the wide conversion range applications of traditional DC-DC converters, there is an urgent need for higher voltage gain, efficiency and reliability. A DC-DC converter based on a switching voltage doubling clamping unit is proposed and analyzed. In this topology, the switch voltage stress is low and the inherent duty cycle is small, which helps reduce switch losses and improve the converter efficiency. All the switch devices achieve voltage clamping, thus reducing the voltage spikes generated during switch transitions. Compared with coupled windings, the single-input inductor reduces the size of the converter and the input current ripple. The shared grounding of input and output terminals ensures the output reliability. Through a comparison with other typical converters and performance analysis with a combination of a 200 W experimental prototype, the feasibility and effectiveness of the DC-DC converter based on the switching voltage doubling clamping unit were validated.

Keywords: DC-DC converter; high efficiency; passive clamp; voltage doubling unit

由于化石能源的日渐枯竭，迫切需要开发清洁能源来应对能源使用方面的挑战[1]。光伏发电作为获取清洁能源的有效途径之一，受到世界各国学者的持续关注[2-3]。由于光伏板输出电压一般低于 50 V，需要利用 DC-DC 升压技术进行升压，以满足光伏逆变并网所需的电压等级[4]。

经典 Boost 变换升压增益不足并且开关管电压应力高，所以难以应用于高增益场合[5]。为提升变换器的升压能力，各国学者构造了多种升压拓扑。例如，级联拓扑[6-8]，变换器的升压能力得到提升，

收稿日期：2023-05-18；**修回日期**：2023-08-27，2023-10-17，2023-11-21；**录用日期**：2023-11-28；**网络首发日期**：2024-04-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62541318)；山东省自然科学基金资助项目(ZR2025QC655, ZR2022ME214)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 62541318; Shandong Provincial Natural Science and Technology Foundation under the grants ZR2025 QC655 and ZR2022ME214

但因存在多个转换状态，所需器件数目多，增加了成本和复杂度；Z 源拓扑[9-11]，开关管电压应力小，但需要经过 2 个电感和电容，转换过程中有较大的能量损耗；耦合电感拓扑[12-16]，增加新的增益调节因子，升压比调制灵活，但需要使用较大的磁耦合器件，由于磁耦合的特性，耦合电感拓扑的输出电压波动较大，需要额外的滤波电路来降低波动，另外耦合电感工作时温度会影响磁耦合的效果，因此需要在设计中考虑温度补偿或保护措施。

针对上述问题，本文提出 1 种基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器，该变换器整体器件少、电压增益高、开关管应力小、实验效率较高。输入端引入的电感能够保证输入电流的稳定性；开关倍压钳位单元在提升电路增益的同时形成钳位回路，有效降低了回路中开关器件的电压尖峰。与其他典型变换器进行对比，并通过 200 W 实验样机对该变换器的性能进行了验证。

1　变换器拓扑结构演变及工作原理

1.1　拓扑结构演变

新型开关倍压钳位单元 DC-DC 变换器拓扑演变过程如图 1 所示。图 1(a)为经典 Boost 变换器，它的工作原理为开关管 S_1 导通时，二极管 D_o 关断，电感 L_1 储能，电容 C_o 为负载 R 提供能量；开关管 S_1 关断时，二极管 D_o 导通，电感 L_1 放能，为电容 C_o 及负载 R 提供能量。图 1(b)为新型开关倍压钳位单元，开关管 S_1、S_2 及二极管 D_3 导通状态一致，与二极管 D_1、D_2 互补导通。图 1(c)为新型开关倍压钳位单元 DC-DC 变换器，由图 1(a)与图 1(b)组合得到，包括输入电压 V_g、输入电感 L_1、功率开关管 S_1 和 S_2、电容 C_1 和 C_2、二极管 D_1~D_3、输出电容 C_o、输出二极管 D_o 及输出侧负载 R。结构单元充分利用容性回路的优势，对开关切换瞬间电路产生的电压尖峰进行储能吸收，在实现所有开关器件有源钳位的同时达到倍压效果。

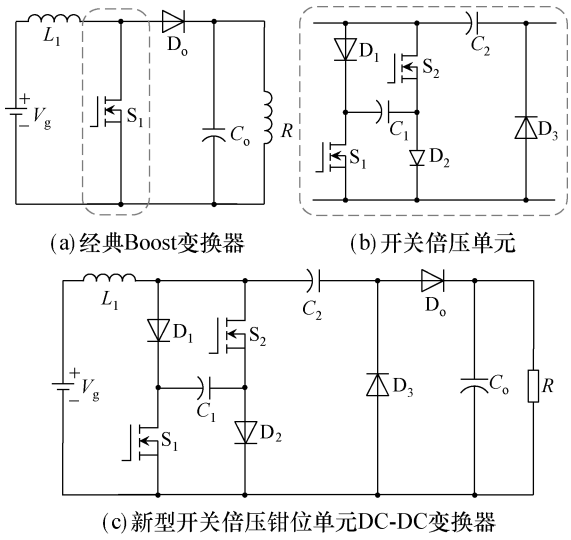


图 1　变换器拓扑的演变过程

Fig. 1 Evolution of converter topology

1.2　工作模态

在相同开关周期 T 内，新型单电感高增益直流变换器包括 2 种主要工作模态，其主体器件关键波形如图 2 所示、工作模态等效电路如图 3 所示。为简化电路分析，作如下假设：①输入电感 L_1 足够大，保证输入电流 i_{in} 连续；②所有电容满足需求，保证电容电压在周期内不变；③所有器件皆为理想器件。

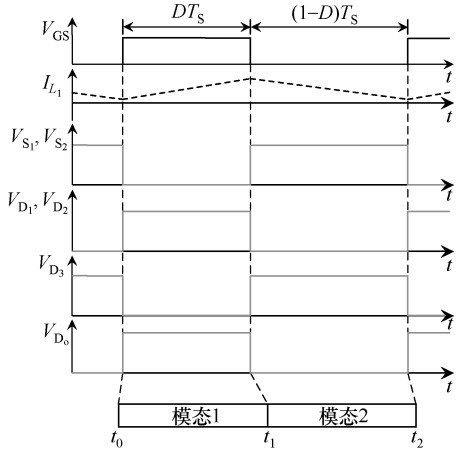


图 2　主体器件关键波形

Fig. 2 Key waveforms of main devices

模态 1 [t_0, t_1]：如图 3(a)所示，开关管 S_1、S_2 导通，二极管 D_3 导通，二极管 D_1、D_2、D_o 分别被 $-V_{C_1}$、$-V_{C_2}$ 和 V_{C_o} 反向偏置。该状态下，输入电压 V_g 通过开关管 S_1 和 S_2 为输入电感 L_1 及电容 C_1 充电，输入电流 i_{in} 处于上升阶段。此时流经二极管

D_3的电流给电容 C_2 充电，负载 R 的能量由电容 C_o 提供。

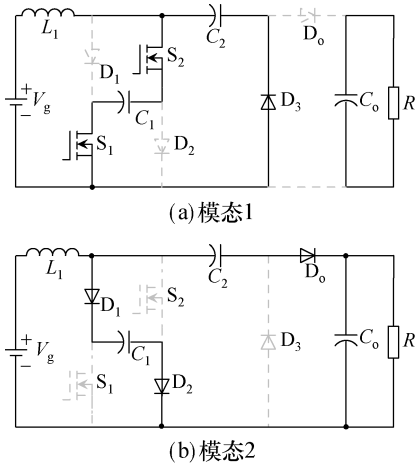


图 3 所提变换器的各工作模态等效电路

Fig. 3 Equivalent circuits of proposed converter in different operation modes

模态 2 [t_1, t_2]：如图 3(b)所示，开关管 S_1、S_2 关断，二极管 D_1、D_2、D_o 导通，二极管 D_3 被 V_{C_o} 反向偏置。该状态下，输入电流 i_{in} 处于下降阶段，输入电感 L_1 及电容 C_1、C_2 释放能量，输入电压 V_g 和 L_1 共同为负载电阻 R 及电容 C_o 提供能量。

2 变换器增益及应力分析

2.1 升压因子

根据伏秒平衡法则，电感 L_1 满足

$$\int_0^{DT} V_{L_1,\mathrm{ON}}\mathrm{d}t+\int_{DT}^{T} V_{L_1,\mathrm{OFF}}\mathrm{d}t=0 \tag{1}$$

式中：D 为开关管的占空比；$V_{L_1,\mathrm{ON}}$、$V_{L_1,\mathrm{OFF}}$ 分别为电感 L_1 导通、关断时的端电压。根据式(1)及回路电压关系，得

$$\begin{cases} V_{L_1,\mathrm{ON}}=(1-D)V_o \\ V_{L_1,\mathrm{OFF}}=DV_o \\ V_{C_1}=V_{C_2}=\dfrac{1}{1-2D}V_g=\dfrac{1}{2}V_o \\ V_{C_o}=\dfrac{2}{1-2D}V_g=V_o \end{cases} \tag{2}$$

式中，V_o 为输出电压。由式(2)得所提变换器的升压因子为

$$G=\frac{2}{1-2D} \tag{3}$$

2.2 电压应力

结合第 2.1 节求解过程及图 3，可得开关管及二极管的电压应力为

$$\begin{cases} V_{S_1}=V_{S_2}=V_{D_1}=V_{D_2}=\dfrac{1}{2}V_o \\ V_{D_3}=V_{D_o}=\dfrac{2}{1-2D}V_o \end{cases} \tag{4}$$

2.3 电流应力

稳态条件下，根据电容的安秒平衡可得

$$\int_0^{DT} i_{C_i,\mathrm{ON}}\mathrm{d}t+\int_{DT}^{T} i_{C_i,\mathrm{OFF}}\mathrm{d}t=0 \qquad i=1,\ 2,\ \mathrm{o} \tag{5}$$

式中，$i_{C_i,\mathrm{ON}}$、$i_{C_i,\mathrm{OFF}}$ 分别为电容导通、关断时的电流。由式(5)及回路电流关系得

$$\begin{cases} I_{C_1,\mathrm{ON}}=\dfrac{1}{D(1-2D)}I_o \\ I_{C_1,\mathrm{OFF}}=\dfrac{1}{(1-D)(1-2D)}I_o \\ I_{C_2,\mathrm{ON}}=\dfrac{1}{D}I_o \\ I_{C_2,\mathrm{OFF}}=\dfrac{1}{1-D}I_o \\ I_{C_o,\mathrm{ON}}=I_o \\ I_{C_o,\mathrm{OFF}}=\dfrac{D}{1-D}I_o \end{cases} \tag{6}$$

式中：$I_{C_i,\mathrm{ON}}$、$I_{C_i,\mathrm{OFF}}$ 分别为电容导通、关断时的电流有效值，$i=1,2,0$；I_o 为输出电流有效值。根据功率守恒得

$$DI_{S_{1,2}}+(1-D)I_{D_o}-GI_o=0 \tag{7}$$

式中，$I_{S_{1,2}}$ 为流经开关管 S_1、S_2 的电流有效值。由式(6)和式(7)得各器件电流应力分别为

$$\begin{cases} I_{L_1}=\dfrac{2}{1-2D}I_o \\ I_{S_1}=I_{S_2}=\dfrac{1}{D(1-2D)}I_o \\ I_{D_1}=I_{D_2}=\dfrac{1}{(1-D)(1-2D)}I_o \\ I_{D_3}=\dfrac{1}{D}I_o \\ I_{D_o}=\dfrac{1}{1-D}I_o \end{cases} \tag{8}$$

3　变换器性能对比

所提变换器与其他拓扑结构的主要特性对比见表 1，包括升压因子、开关管电压应力、器件数量、是否共地、输入电流是否连续 5 个方面。由于各变换器结构各异，在对比升压因子和开关管电压应力时，选择在相同输出功率 P_o 下进行。

表 1　变换器性能对比

Tab. 1 Comparison of performance among different converters

变换器	升压因子	开关管电压应力	器件数量 (S/D/*C*/*L*)	是否共地	输入电流是否连续
所提变换器	$\frac{2}{1-2D}$	$\frac{1}{2}V_o$	2/4/3/1	是	是
文献[9]	$\frac{2}{1-2D}$	$\frac{1}{2}V_o$	1/5/6/2	是	是
文献[10]	$\frac{1-D}{1-2D}$	V_o	1/3/5/3	否	否
文献[11]	$\frac{2-D}{1-2D}$	$\frac{1}{2-D}V_o$	1/3/4/2	是	否

图 4 为升压因子及开关管电压应力对比结果，可以看出，所提变换器与其他变换器相比，在器件数目更少的同时，具有更高的电压增益，且所提变换器开关管的电压应力最低。因此，可以采用低电压等级、导通电阻小的 MOSFET 器件进行样机设计，减少开关损耗，提高变换器效率。由于所提变换器器件数目最少，所以变换器的成本更低、体积更小、功率密度更高。

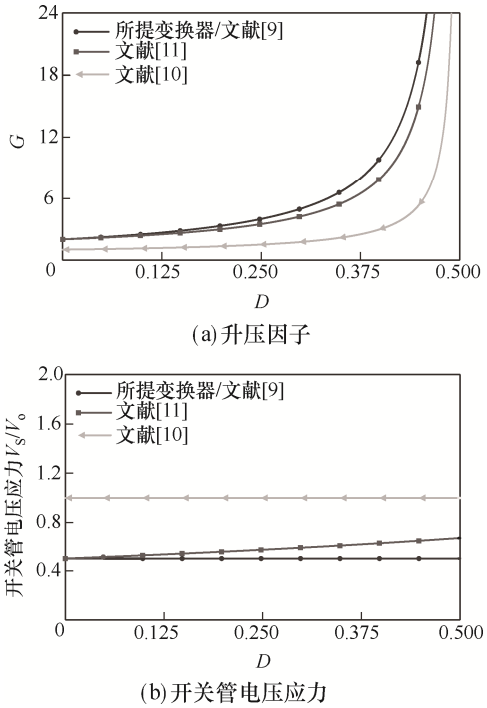


图 4　变换器性能对比曲线

Fig. 4 Comparative curves of converter performance

4　实验验证及分析

基于上述理论分析，在实验平台设计了 200 W 实验样机如图 5 所示，实验占空比 D=0.33，样机参数见表 2。

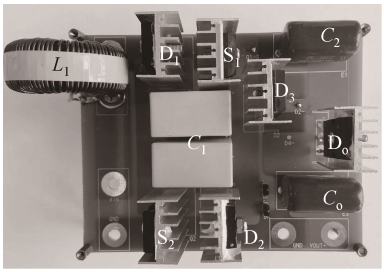


图 5　实验样机

Fig. 5 Experimental prototype

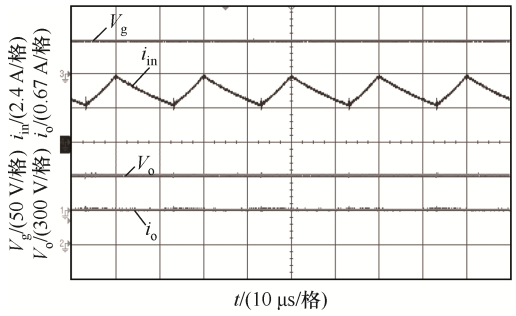
表 2　实验样机参数

Tab. 2 Parameters of experimental prototype

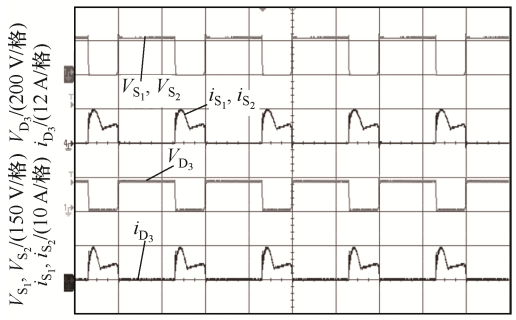
参数	数值或型号
输入电压/V	50
输出电压/V	300
输出功率/W	200
电容 C_1/μF	CBB, 20.0
电容 C_2/μF	CBB, 10.0
电容 C_o/μF	CBB, 4.7
开关管 S_1、S_2	IRFP4668PbF
开关频率/kHz	50
二极管 D_1、D_2	STTH6002CW
二极管 D_3、D_o	STTH6004W

图 6 为新型开关倍压钳位单元 DC-DC 变换器实验关键器件波形。图 6(a)为输入电压 V_g、输出电压 V_o、输入电流 i_{in} 及输出电流 i_o 实验波形，可以看出，在占空比 D=0.33 时，输入输出端电压电流波形正常，当输入电压为 50 V 时，输出电压稳定在 300 V。实验增益与带寄生参数增益中的分析保持一致，能够达到理论分析增益值。图 6(b)和(c)为各个开关器件电压电流实验波形，可以看出，开

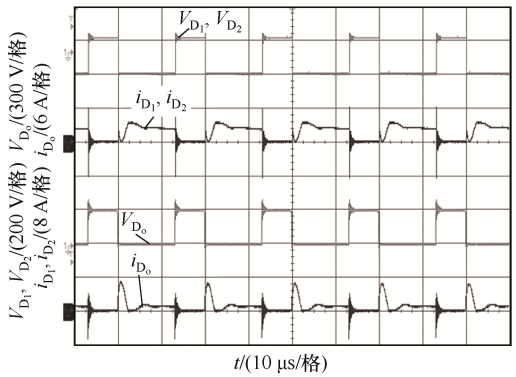
关管 S_1、S_2 关断瞬间，二极管 D_1、D_2 导通与电容 C_1 形成钳位回路吸收关断瞬间电压尖峰，二极管 D_3 关断的电压尖峰由二极管 D_o 与电容 C_o 形成的钳位电路吸收；二极管 D_1、D_2、D_o 关断瞬间，电压尖峰由电容 C_1、开关管 S_1、S_2 及电容 C_2、二极管 D_3 组成的双钳位回路吸收，所以开关管及二极管电压尖峰都较小。因此，开关器件切换瞬间所有二极管及开关管均存在有源钳位回路，有效遏制了切换瞬间的电压冲击，与第 1 节中的理论工作原理分析一致。



(a) V_g、V_o、i_{in} 及 i_o 实验波形



(b) S_1、S_2 及 D_3 的电压、电流实验波形



(c) D_1、D_2、D_o 的电压、电流实验波形

图 6 所提变换器实验关键波形(D=0.33)

Fig. 6 Key experimental waveforms of proposed converter (D=0.33)

在不同输出功率 P_o 下进行测试，得到实验样机效率 η 曲线如图 7 所示。可以看出，随着功率等级变换，样机在 80 W 时效率最高，达到 96%以上。随着功率继续加大，达到 200 W 时，样机实验效率处于 95%左右。测试过程中，新型开关倍压钳位单元 DC-DC 变换器的效率较为稳定，样机实验效率整体达到 95%以上。

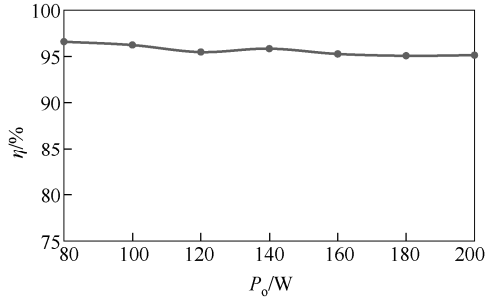


图 7 实验测得效率曲线

Fig. 7 Experimentally measured efficiency curve

对 4 个变换器的效率进行对比，对比时 4 个变换器满足：输出电压 V_o=300 V，升压因子为 6 倍，开关频率 f_s=50 kHz。4 个变换器中的电感、电容、二极管、开关管均取相同型号，以保证变换器寄生参数一致，得到的效率曲线如图 8 所示。可以看出，所提变换器在 100 W 到 1 000 W 时的理论效率均为最高，且能够达到 95%以上。

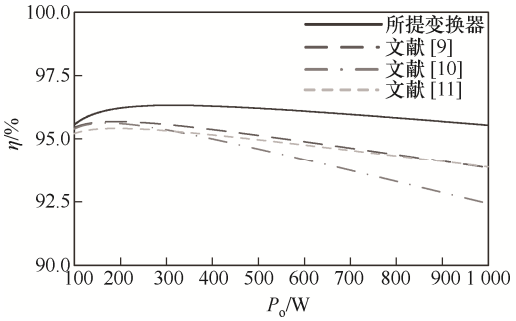


图 8 理论效率曲线对比

Fig. 8 Comparison among theoretical efficiency curves

5 结论

基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器的研究结论如下。

(1)效率高且稳定。经过理论和实验分析得出变

换器效率较高，且损耗集中在输入电感上。通过合理绕制和选型，能够进一步提升变换器的效率。

(2)低开关管电压应力。新型开关倍压钳位单元能够有效减小开关管电压应力，开关管的选择范围更宽，相较于其他电路同等条件下损耗更小，能够同时实现器件选型的高性价比和高转换效率。

(3)电压钳位。新型开关倍压单元 DC-DC 变换器在提高增益的同时，开关管与二极管通过容性回路互相钳位，有效吸收开关器件在开关切换状态时变换器产生的电压尖峰。开关器件电压尖峰低保证了变换器的可靠运行，延长了器件工作寿命。

(4)器件数目少。新型开关倍压钳位单元 DC-DC 变换器的组成简单且实用，在保证同等增益的前提下，整体器件数目较少，节约成本的同时整体体积更小，能够应用到要求变换器体积小的场合。

参考文献：

[1] 罗全明, 高伟, 吕星宇, 等. 耦合电感型高增益 Boost 变换器拓扑分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7266-7275, 7441.
Luo Quanming, Gao Wei, Lü Xingyu, et al. Topology analysis of high step-up Boost converters with coupled inductors [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7266-7275, 7441. (in Chinese)

[2] 高赟翔, 刘伟, 黄珊, 等. GaN HEMT 功率器件的改进型在线死区补偿方法研究[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 340-352.
Gao Yunxiang, Liu Wei, Huang Shan, et al. Research on improved online dead-time compensation method for GaN HEMT power devices [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 340-352. (in Chinese)

[3] Priyadarshi A, Kar P K, Karanki S B. Switched capacitor based high gain DC-DC converter topology for multiple voltage conversion ratios with reduced output impedance [J]. Journal of Power Electronics, 2019, 19(3): 676-690.

[4] Hu Xuefeng, Liang Wenjuan, Liu Xing, et al. A hybrid interleaved DC-DC converter with a wide step-up regulation range and ultralow voltage stress [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5479-5489.

[5] Haji-Esmaeili M M, Babaei E, Sabahi M. High step-up quasi-Z source DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10563-10571.

[6] Qin Yaxiao, Yang Yun, Li Sinan, et al. A high-efficiency DC/DC converter for high-voltage-gain, high-current applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2812-2823.

[7] Meraj M, Bhaskar M S, Iqbal A, et al. Interleaved multilevel Boost converter with minimal voltage multiplier components for high-voltage step-up applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35 (12): 12816-12833.

[8] Mayer R, El Kattel M B, Oliveira S V G. Multiphase interleaved bidirectional DC/DC converter with coupled inductor for electrified-vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2533-2547.

[9] Zhang Yun, Fu Chuanzhi, Sumner M, et al. A wide input-voltage range quasi-Z-source Boost DC-DC converter with high-voltage gain for fuel cell vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5201-5212.

[10] Shindo Y, Yamanaka M, Koizumi H. Z-source DC-DC converter with cascade switched capacitor [C]// IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC, Australia, 2012: 1665-1670.

[11] Rostami S, Abbasi V, Blaabjerg F. Implementation of a common grounded Z-source DC-DC converter with improved operation factors [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(9): 2245-2255.

[12] Zhang Xiangjun, Sun Lei, Guan Yueshi, et al. Novel high step-up soft-switching DC-DC converter based on switched capacitor and coupled inductor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9471-9481.

[13] He Liangzong, Zeng Tao. Interleaved parallel high step-up DC-DC converter with cross-coupled inductors for low current/voltage ripple and auto-current sharing [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Enginee-

ring, 2021, 16(5): 787-797.

[14] 包鹏, 刘雪山, 多佳琦, 等. 基于 Cockcroft-Walton 倍压网络的隔离型高升压比 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 27-35.
Bao Peng, Liu Xueshan, Duo Jiaqi, et al. Isolated DC-DC converter with high step-up ratio based on Cockcroft-Walton voltage multiplier network [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 27-35. (in Chinese)

[15] 刘海军, 张理, 张乔根, 等. 基于堆叠滤波结构的高电压比低纹波隔离型 DC-DC 制氢变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5755-5767.
Liu Haijun, Zhang Li, Zhang Qiaogen, et al. High-conversion-ratio low-ripple isolated DC-DC hydrogen converter based on stacked filter structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5755-5767. (in Chinese)

[16] Saadatizadeh Z, Babaei E, Blaabjerg F, et al. Three-port high step-up and high step-down DC-DC converter with zero input current ripple [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1804-1813.

[17] Zhang Min, Wei Zhengyi, Zhou Mingzhu, et al. A high step-up DC-DC converter with switched-capacitor and coupled-inductor techniques [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 3(4): 1067-1076.

[18] 张民, 袁成功, 薛鹏飞, 等. 超高倍压耦合电感 Boost 变换器[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1263-1272.
Zhang Min, Yuan Chenggong, Xue Pengfei, et al. Ultra-high voltage coupled inductor Boost converter [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1263-1272. (in Chinese)

[19] Zhang Min, Xue Pengfei, Yuan Chenggong, et al. A high step-up, high efficiency, and low switch voltage stress coupled-inductor DC-DC converter with switched-capacitor and coupled-inductor techniques [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 2326-2339.



权利敏

作者简介：

权利敏(1989—)，女，博士，副教授。研究方向：数据驱动建模，电力电子与电力传动。E-mail：quanlimin@qut.edu.cn。

张民(1964—)，女，通信作者，硕士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：zhangmin@qut.edu.cn。

贾海涛(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：m15615521623@163.com。

薛鹏飞(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：xuepengfei0415@163.com。

李海东(1977—)，男，博士。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：18910760829@189.cn。

(责任编辑：郭凯凯)