

# 适用于氢燃料电池的双Z源DC-DC 高增益变换器研究

汤昊<sup>1,2</sup>, 姜飞<sup>1,2</sup>, 买买提艾力·吾普尔<sup>3</sup>, 华东<sup>3</sup>, 何桂雄<sup>4</sup>

- (1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 长沙市 410114; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙市 410114; 3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 乌鲁木齐市 830063;  
4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192)

**摘要:**【目的】针对传统变换器应用于氢燃料电池并网时,存在升压能力不足以及器件应力过高的问题,提出了基于双Z源网络的低电应力高增益单管升压变换器(low electric stress high-gain single-switch converter based on dual Z-source network, LEHGSSC-DZ)。【方法】该变换器将准Z源变换器中的开关管前置,减少其器件应力,同时,将变换器其中一个电感用准Z源网络进行替代,构成双Z源网络结构,以增强变换器的升压能力;分析了变换器的工作原理及输出特性,将LEHGSSC-DZ与其他多种高增益升压变换器进行综合比较,并根据其输出特性给出元器件参数设计过程。通过仿真与实验验证理论分析的正确性和LEHGSSC-DZ的可行性。【结果】LEHGSSC-DZ拓扑器件数量较少,经济性较高,且相较于传统Z源Boost变换器,输出电压提高了43.8%,相较于传统Boost变换器,输出电压提高了5.1倍,开关器件电压应力减少了30%。【结论】所提出的变换器具备低电应力、高增益、器件数量少的突出优势,且效率最高可达97.25%,有助于提高氢燃料电池并网系统的工作效率。

**关键词:**氢燃料电池;高电压增益;准Z源变换器;低电应力;双Z源网络

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)03-0146-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.03.012

## Study of Dual Z-Source DC-DC High-Gain Converter for Hydrogen Fuel Cells

TANG Hao<sup>1,2</sup>, JIANG Fei<sup>1,2</sup>, MAIMAITIALI Wufuer<sup>3</sup>, HUA Dong<sup>3</sup>, HE Guixiong<sup>4</sup>

- (1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid(Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Research Institute of Economics and Technology, State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830063, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** [Objective] In response to the insufficient boost capability and excessive device stress when conventional converters are applied to hydrogen fuel cell grid connection, a low electrical stress high-gain single-switch converter based on a dual Z-source network (LEHGSSC-DZ) is proposed. [Methods] This converter places the switching transistor in the quasi-Z source converter upfront to reduce device stress. Simultaneously, one of the inductor components is replaced with a quasi-Z source network, forming a dual-Z source network structure to enhance the converter's boost capability. The operating principle and output characteristics of the converter are analyzed, and a comprehensive comparison is made between the LEHGSSC-DZ and several other high-gain boost converters. Component parameter design is provided based on its output characteristics. The correctness of theoretical analysis and the feasibility of LEHGSSC-DZ are verified through simulations and experiments. [Results] The results demonstrate that the LEHGSSC-DZ topology employs fewer devices and offers superior cost-effectiveness. Compared to conventional Z-source boost converters, it achieves a 43.8% increase in output voltage, while delivering an output voltage that is 5.1 times higher than that of conventional boost converters. Furthermore, it reduces

switching device voltage stress by 30%. [Conclusions] The proposed converter offers the distinct advantages of low electrical stress, high gain, and minimal device count, achieving a maximum efficiency of 97.25%. This contributes to enhancing the operational efficiency of hydrogen fuel cell grid-connected systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52377166) and Zhuhai Industry-University-Research Co-operation Project (No. 2320004002712).

**KEYWORDS:** hydrogen fuel cell; high voltage gain; quasi-Z-source converter; low electrical stress; dual Z-source network

## 0 引言

近年来,在全球经济快速发展的背景下,环境污染、化石能源匮乏和气候问题日益严重,发展氢能、风能、光伏等清洁能源已成为解决能源危机和环境问题的重要途径<sup>[1-4]</sup>。为了推进节能减排和实现能源可持续发展,现有诸多研究在清洁能源并网应用方面取得了技术突破<sup>[5-9]</sup>,但在氢燃料电池并网场景下的高增益直流升压变换器方面的研究相对较少。作为实现氢能应用的关键技术之一,氢燃料电池具有输出电压低、输出电流大、功率波动范围广的特点,在并网前需要配备与其特性相匹配的电力电子变换器<sup>[9-13]</sup>,其中直流升压稳压变换器是实现氢燃料电池稳定并网的重要环节,因此,研究氢燃料电池并网场景下的高增益直流升压变换器对于推广氢能应用具有重要的理论意义<sup>[14]</sup>和工程应用价值。

实际工程中,电力电子变换器运行受功率器件与无源元件寄生参数的影响,同时变换器也存在二极管反向恢复等问题<sup>[15]</sup>。当电力电子变换器开关管的占空比过高时,传统的Boost变换器及Z源变换器的电压增益严重受限,同时也会带来不必要的损耗<sup>[16]</sup>,且开关管与二极管的电压应力均等于输出电压,导致不适用于高压场合<sup>[17]</sup>。

为了能够在提高电压增益的同时仍能实现较高的功率转换效率,现有众多研究已取得了一定研究成果<sup>[18-26]</sup>。文献[18]中提出的多相准Z源变换器利用输入并联输出串联结构提高了电压增益,文献[19-20]中提出的变换器可用于大功率系统,并具有宽输入电压范围的优点。文献[21]中提出的稳压串联混合变换器通过将输入串联,使辅助DC-DC级功率元件的电压应力低于两级级联结构,从而节省了功率元件成本。文献[18-21]所提变换器结构有效地提高了电压增益和变换器效率,以上结构都采用了变压器,在负载快速变化情况下,带变压器的DC-DC变换器可能无法像非隔离变换器那样快速响应。文献[22]中提出的串联电感级联升压DC-DC变换器能有效防止耦合电感中的漏感在主开关处产生高电压尖峰。文献[23]中提出的超高压升压DC-DC变换器由两级升压变换器、耦合电感等单元组合而成,其特点

是输入电感和耦合电感共享电流,从而使电感的功率损耗较低。文献[22-23]中提出的拓扑结构大多侧重于提高电压增益和降低开关占空比,但都采用了耦合电感,在实现高电压增益时,耦合电感的高匝数比会产生较大的漏感和绕组等效串联电阻,导致转换器效率降低。文献[24]提出的变换器在开关低占空比下电压增益具有优势,但在所需电压增益较高的场合开关占空比过高,不利于系统可靠运行。文献[25]利用3个Z源网络实现高升压比,但所需器件过多,降低了系统经济性。文献[26]基于开关电感技术,提出双输入DC/DC变换器,该变换器不仅能拓展到多输入,而且具有功率密度高、效率高的优点,但在实现高增益方面仍有局限。文献[24-26]提出的各变换器都存在所需功率器件过多以及开关器件在关断时承受较大电压应力的问题,需要使用高耐压器件,从而导致系统成本上升。

针对以上问题,本文提出基于双Z源网络的低电压应力高增益单管升压变换器(low electric stress high-gain single-switch converter based on dual Z-source network, LEHGSSC-DZ)。该变换器具备低电压应力、高电压增益、低占空比、少器件数量等优势。首先,介绍了LEHGSSC-DZ的拓扑结构、工作原理、器件应力及效率;然后,将LEHGSSC-DZ与近几年提出的应用于新能源的各类高增益DC-DC变换器进行性能对比,并给出了LEHGSSC-DZ的参数设计过程。最后,通过仿真与实验验证了理论分析的正确性和LEHGSSC-DZ的可行性。

## 1 LEHGSSC-DZ结构及输出特性

### 1.1 变换器结构

以质子交换膜燃料电池为例,其输出特性较软,且电池单片电压较低,一般为0.5~1.2 V<sup>[27-30]</sup>,氢燃料电池采用SPWM调制实现逆变并网输出,输出线电压有效值 $U_{\text{RMS}}$ 与逆变器直流侧电压 $U_{\text{dc}}$ 的关系为:

$$U_{\text{RMS}} \approx 0.612 \times m \times U_{\text{dc}} \quad (1)$$

式中: $m$ 为直流侧电压利用率,不超过100%。

考虑到实际工程应用中直流侧电压利用率难以达到100%,若 $U_{\text{RMS}}$ 取380 V,代入式(1)可得 $U_{\text{dc}} \geq 620.95$  V。假设 $U_{\text{dc}}=700$  V,采用140个电池单片组成

的氢燃料电池,输出电压约为 70~168 V,需要 4.17~10.00 倍的电压增益才能将氢燃料电池的输出电压抬升至 700 V。传统的 Boost 变换器<sup>[27]</sup>,根据其电压增益表达式  $1/(1-d)$ ,可知其占空比  $d$  范围为  $0.76 < d < 0.90$ ,而过高的占空比会导致开关损耗增加,引发开关过热或损坏元件、变换器效率下降等问题<sup>[31]</sup>。相比之下,本文所提基于双 Z 源网络的低电应力高增益单管升压变换器的电压增益为  $(1+d)/(1-2d)$ ,占空比范围为  $0.339 < d < 0.429$ 。相较于传统 Boost 变换器,所提变换器的开关占空比明显缩小,有利于降低开关损耗,实现变换器的高效稳定运行。

清洁能源发电网络结构如图 1 所示,可见氢燃料电池需要经高增益 DC/DC 变换器方可进行逆变并网发电。

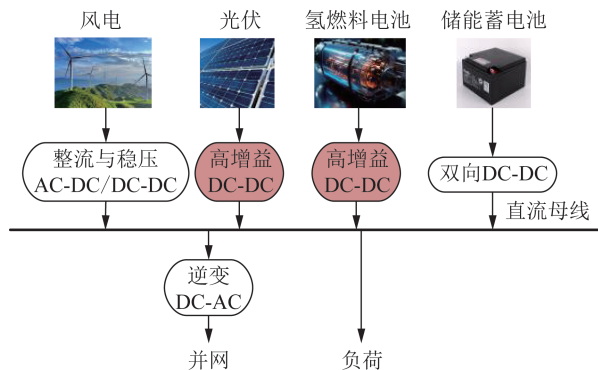


图 1 清洁能源发电示意图

Fig. 1 Schematic diagram of clean energy generation

传统准 Z 源变换器拓扑结构如图 2 所示。

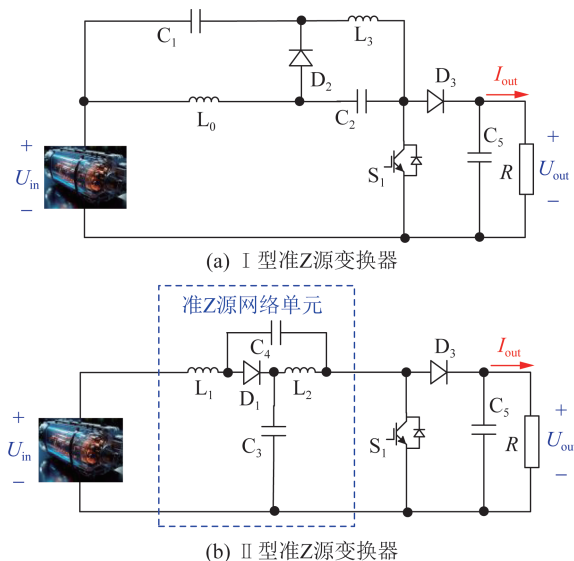


图 2 传统准 Z 源变换器拓扑结构

Fig. 2 Conventional quasi-Z source converter topology architecture

将图 2(a) 中的电感  $L_0$  替换为图 2(b) 中的准 Z 源网络单元,再将开关  $S_1$  前置,将其集电极与二极管  $D_2$

的正极相连,发射极不作调整,得到如图 3 所示的 LEHGSSC-DZ 拓扑结构。该双 Z 源网络,具体由第一级准 Z 源网络单元 ( $L_1, L_2, C_3, C_4, D_1$ )、第二级准 Z 源网络单元 ( $L_3, C_1, C_2, D_2$ )、稳压电容  $C_5$ 、开关管  $S_1$ 、二极管  $D_3$  组成。

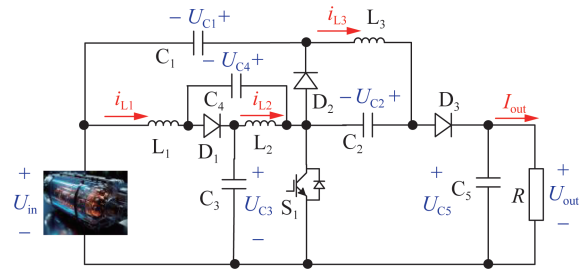


图 3 基于双 Z 源网络的低电应力高增益单管变换器

Fig. 3 Low electric stress high gain single tube converter based on dual Z-source network

为便于对所提变换器进行稳态分析,作如下基本假设:

- 1) 所有元器件均视为理想元件,暂不予考虑其寄生参数的影响。
- 2) 电容具有充足的容值,其电压纹波可忽略不计,故在本文后续的理论分析中视电容电压为恒定常量。
- 3) 开关管与二极管均为时不变器件,其特性与工作频率无关。

变换器的关键波形如图 4 所示,  $V_{GS}$  表示开关管驱动脉冲信号,  $U_{S1}$ 、 $U_{D1}$ 、 $U_{D2}$  和  $U_{D3}$  分别表示开关管  $S_1$  和二极管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  的两端电压;  $t_0$  为开关管  $S_1$  导通时间;  $t_1$  为开关管  $S_1$  关断时间;  $t_2$  为开关管  $S_1$  下一周期导通时间;  $T_s$  为开关周期。

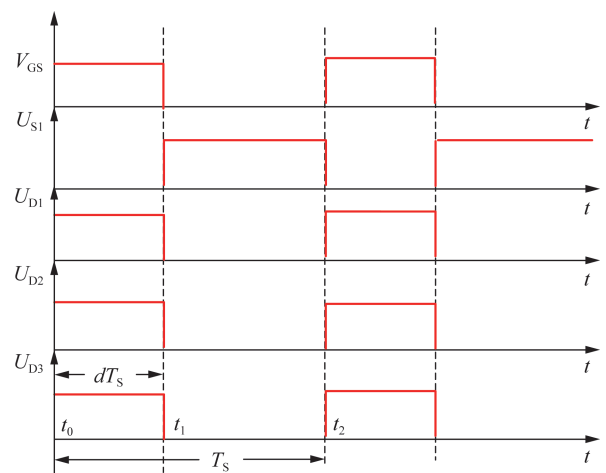


图 4 主要器件关键波形

Fig. 4 Key waveforms for major devices

变换器工模态如图 5 所示。

- 1) 模态 1 ( $t_0-t_1$ ): 如图 5(a) 所示,该模态开始时, LEHGSSC-DZ 中的开关管  $S_1$  接收到驱动脉冲信号从

而导通,二极管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  由于承受反向电压从而关断。在该模式下,输入电压  $U_{in}$  和电容  $C_1$ 、 $C_2$  给电感  $L_3$  充电,其次和电容  $C_4$  给电感  $L_1$  充电,电容  $C_3$  给电感  $L_2$  充电,电容  $C_5$  给负载供电。

2) 模态 2 ( $t_1-t_2$ ): 如图 5(b) 所示,该模态开始时,LEHGSSC-DZ 中的开关管  $S_1$  停止接受驱动脉冲信号从而关断,二极管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  承受正向电压从而导通。在该模态下,电感  $L_3$  给电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_5$  充电,电感  $L_1$  给电容  $C_4$  充电,电感  $L_2$  给电容  $C_3$  充电。

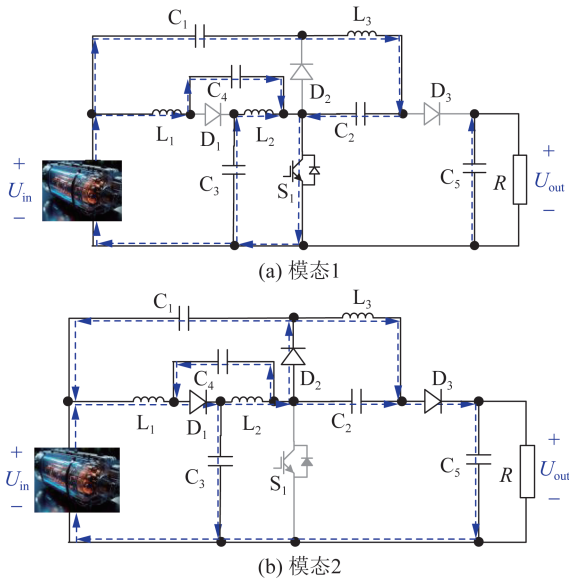


图 5 变换器工作模态

Fig. 5 Modal of converter operation

### 1.2 稳态分析

基于前述工作模态分析,在模态 1 下,电感  $L_1$  的两端电压  $U_{L1\_on}$  可表示为:

$$U_{L1\_on} = U_{in} + U_{C4} \quad (2)$$

式中:  $U_{C4}$  为电容  $C_4$  两端电压。

电感  $L_2$  的两端电压  $U_{L2\_on}$  可表示为:

$$U_{L2\_on} = U_{C3} \quad (3)$$

式中:  $U_{C3}$  为电容  $C_3$  两端电压。

电感  $L_3$  的两端电压  $U_{L3\_on}$  可表示为:

$$U_{L3\_on} = U_{in} + U_{C1} - U_{C2} \quad (4)$$

式中:  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  分别为电容  $C_1$ 、 $C_2$  两端电压。

在模态 2 下,电感  $L_1$  两端电压  $U_{L1\_off}$  可表示为:

$$U_{L1\_off} = U_{in} - U_{C3} \quad (5)$$

电感  $L_2$  的两端电压  $U_{L2\_off}$  可表示为:

$$U_{L2\_off} = -U_{C4} \quad (6)$$

电感  $L_3$  的两端电压  $U_{L3\_off}$  可表示为:

$$U_{L3\_off} = -U_{C2} \quad (7)$$

根据系统稳态下一个开关周期内的电感伏秒平衡定律,可得电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的伏秒平衡方程为:

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_1} U_{L1\_on} dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{L1\_off} dt = 0 \\ \int_{t_0}^{t_1} U_{L2\_on} dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{L2\_off} dt = 0 \\ \int_{t_0}^{t_1} U_{L3\_on} dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{L3\_off} dt = 0 \end{cases} \quad (8)$$

基于前述模态 1 和模态 2 的分析,将式(2)~(7)代入式(8),可得:

$$\begin{cases} (U_{in} + U_{C4})dT_s + (U_{in} - U_{C3})(1-d)T_s = 0 \\ U_{C3}dT_s - U_{C4}(1-d)T_s = 0 \\ (U_{in} + U_{C1} - U_{C2})dT_s - U_{C2}(1-d)T_s = 0 \end{cases} \quad (9)$$

稳态下电容  $C_5$  两端电压不变,全控型器件  $S_1$  关断时,电容  $C_5$  两端电压  $U_{C5}$  即变换器输出电压  $U_{out}$  可表示为:

$$U_{out} = U_{C5} = U_{C1} + U_{C2} + U_{in} \quad (10)$$

结合式(2)~(10)可解得:

$$\begin{cases} U_{C1} = \frac{2d}{1-2d} U_{in} \\ U_{C2} = \frac{d}{1-2d} U_{in} \\ U_{C3} = \frac{1-d}{1-2d} U_{in} \\ U_{C4} = \frac{d}{1-2d} U_{in} \\ U_{C5} = \frac{1+d}{1-2d} U_{in} \\ U_{out} = \frac{1+d}{1-2d} U_{in} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知本文所提变换器的电压增益为:

$$M = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1+d}{1-2d} \quad (12)$$

由式(12)可知,LEHGSSC-DZ 的开关占空比始终小于 0.5,明显大于传统的 Z 源变换器<sup>[31]</sup>电压增益  $1/(1-2d)$ ,不难发现,相较于传统 Z 源变换器,本文所提 LEHGSSC-DZ 变换器显著提高了电压增益。

### 1.3 器件电压和电流应力分析

基于上述稳态工作分析,可得开关管和各二极管的电压应力分别为:

$$U_{S1} = \frac{1}{1-2d} U_{in} = \frac{1+2M}{3} U_{in} \quad (13)$$

$$U_{D1} = U_{D2} = U_{D3} = \frac{1}{1-2d} U_{in} = \frac{1+2M}{3} U_{in} \quad (14)$$

而由系统功率守恒,变换器的输入功率和输出功率相等,可得:

$$I_{in} = \frac{U_{out}}{U_{in}} I_{out} = \frac{1+d}{1-2d} I_{out} \quad (15)$$

式中:  $I_{in}$  表示变换器输入电流大小;  $I_{out}$  为变换器输出的负载电流大小。

当变换器工作于稳态时,变换器中各电容的平均电流为0,因此,稳态时,变换器等效电路如图6所示,故电感 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $L_3$ 的电流平均值大小 $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$ 、 $I_{L3}$ 可分别表示为:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{in} \quad (16)$$

$$I_{L3} = I_{out} = \frac{1-2d}{1+d} I_{in} = \frac{I_{in}}{M} \quad (17)$$

可得开关管 $S_1$ 、二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 的平均电流应力 $I_{S1}$ 、 $I_{D1}$ 、 $I_{D2}$ 、 $I_{D3}$ 为:

$$I_{S1} = I_{in} - I_{out} = \frac{3d}{1+d} I_{in} = \frac{M-1}{M} I_{in} \quad (18)$$

$$I_{D1} = I_{in} \quad (19)$$

$$I_{D2} = I_{D3} = I_{out} = \frac{1-2d}{1+d} I_{in} = \frac{I_{in}}{M} \quad (20)$$

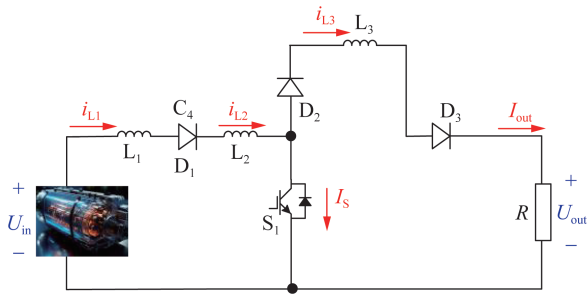


图6 所提变换器等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of the proposed converter

根据式(13)—(14)、(16)—(20)分别作各器件电压和电流应力(以 $U_{in}$ 、 $I_{in}$ 为基准值)与占空比的关系示意图,如图7、8所示。

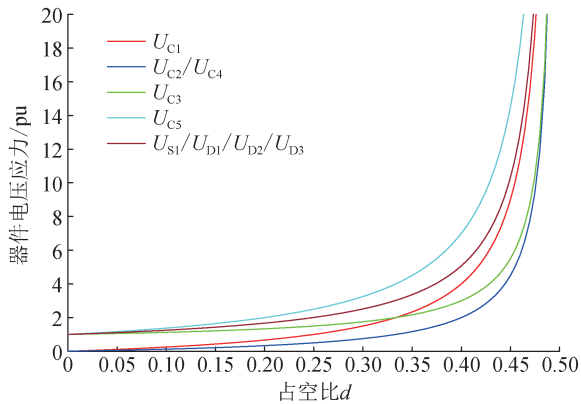


图7 电压应力随开关占空比变化曲线

Fig. 7 Normalised curve of component voltage stress as a function of duty cycle

由图7可见,随着开关管的占空比的增大,LEHGSSC-DZ各器件的电压应力逐渐增大且递增速度逐渐加快。由图8可见,LEHGSSC-DZ中开关管 $S_1$ 电流应力随占空比的增大而增大,但斜率逐渐减小,而二极管 $D_1$ 电流应力不变, $D_2$ 、 $D_3$ 的电流应力随占空

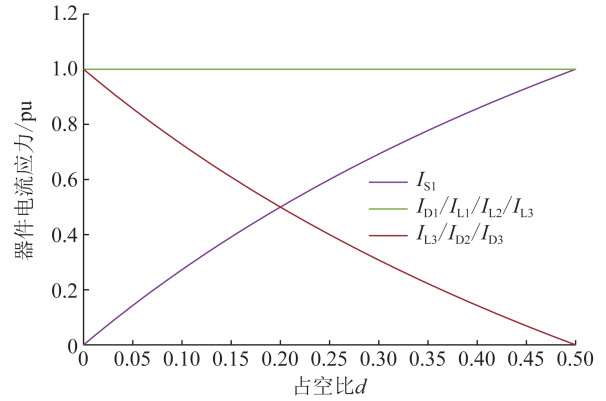


图8 电流应力随开关占空比变化曲线

Fig. 8 Normalised curves of component current stress as a function of duty cycle

比的增大而减小,但是斜率逐渐增大。从另一个角度看,由式(20)可知,随着电压增益的提高,二极管 $D_2$ 与 $D_3$ 的电流应力逐渐减小,趋近于0,由式(18)可知,随着输出电压增益的提高,开关管的电流应力逐渐增大,趋近于1。同理可得图2所示传统准Z源变换器的等效电路图,此处不再赘述,不难发现在相同电压增益下,LEHGSSC-DZ与传统准Z源变换器相比,虽然二极管和开关管的平均电流应力一致,即传统准Z源变换器开关管、二极管的电流应力的表达式与式(18)、(20)相同,但是LEHGSSC-DZ开关管的占空比更低,体现了其具备更高的电压增益。结合式(13)—(14)可知,LEHGSSC-DZ开关管和二极管的电压应力不会超过变换器输出电压增益,而传统准Z源变换器二极管和开关管的电压应力与变换器输出电压一致<sup>[31]</sup>,体现了LEHGSSC-DZ低电压应力的优势。

#### 1.4 元器件参数设计

基于对所提变换器各器件的电压电流应力分析,设计各元器件的参数取值。

##### 1.4.1 电感参数设计

电感 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $L_3$ 的电流纹波为:

$$\Delta I_{Lk} = \frac{U_{Lk,on} d}{f_s L_k}, k = 1, 2, 3 \quad (21)$$

式中: $\Delta I_{Lk}$ 表示电感 $L_k$ 的电流纹波,为输入电流平均值的 $x_L\%$ ,一般取20%~50%<sup>[32]</sup>,本文取20%; $U_{Lk,on}$ 表示在开关开通时的各电感两端电压; $f_s$ 表示开关管的开关频率; $L_k$ 为电感 $L_k$ 的电感值。

由式(21)可得各电感值的取值范围为:

$$\begin{cases} L_1 \geq \frac{100U_{L1,on}d}{x_L\%I_{in}f_s} \\ L_2 \geq \frac{100U_{L2,on}d}{x_L\%I_{in}f_s} \\ L_3 \geq \frac{100MU_{L3,on}d}{x_L\%I_{in}f_s} \end{cases} \quad (22)$$

各电感饱和电流的取值范围为:

$$\begin{cases} I_{L1sat} \geq I_{L1} + \frac{1}{2} \Delta I_{L1} \\ I_{L2sat} \geq I_{L2} + \frac{1}{2} \Delta I_{L2} \\ I_{L3sat} \geq I_{L3} + \frac{1}{2} \Delta I_{L3} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $I_{L1sat}$ 、 $I_{L2sat}$ 、 $I_{L3sat}$  分别为通过电感  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  的饱和电流。

#### 1.4.2 电容参数设计

电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  和  $C_5$  的电容纹波为:

$$\Delta U_{Cj} = \frac{dI_{Cj\_on}}{f_s C_j}, j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (24)$$

式中:  $\Delta U_{Cj}$  表示各电容的电压纹波;  $I_{Cj\_on}$  表示开关导通时各电容电流;  $C_j$  为电容  $C_j$  容值。一般情况下, 电容电压纹波取其平均电压的  $x_c\%$ , 一般尽可能地控制在  $5\% \sim 10\%$  [33], 本文取  $5\%$ 。

由式(24)可得各电容值的取值范围为:

$$\begin{cases} C_1 \geq \frac{100dI_{C1\_on}}{x_c \% U_{C1} f_s} \\ C_2 \geq \frac{100dI_{C2\_on}}{x_c \% U_{C2} f_s} \\ C_3 \geq \frac{100dI_{C3\_on}}{x_c \% U_{C3} f_s} \\ C_4 \geq \frac{100dI_{C4\_on}}{x_c \% U_{C4} f_s} \\ C_5 \geq \frac{100dI_{C5\_on}}{x_c \% U_{C5} f_s} \end{cases} \quad (25)$$

各电容的耐压值取值范围为:

$$\begin{cases} U_{C1sat} \geq U_{C1} + \frac{1}{2} \Delta U_{C1} \\ U_{C2sat} \geq U_{C2} + \frac{1}{2} \Delta U_{C1} \\ U_{C3sat} \geq U_{C3} + \frac{1}{2} \Delta U_{C1} \\ U_{C4sat} \geq U_{C4} + \frac{1}{2} \Delta U_{C1} \\ U_{C5sat} \geq U_{C5} + \frac{1}{2} \Delta U_{C1} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $U_{C1sat}$ 、 $U_{C2sat}$ 、 $U_{C3sat}$ 、 $U_{C4sat}$  和  $U_{C5sat}$  分别为电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  和  $C_5$  的耐压值。

若采用由 25 个电池单片组成的小功率氢燃料电池, 其输出电压为  $12.5 \sim 30.0 \text{ V}$ , 功率范围为  $0 \sim 250 \text{ W}$ 。实际应用中电感与电容需考虑留有  $20\%$  的裕量, 基于式(22)–(23)、(25)–(26)得到具体的元器件参数如表 1 所示。

#### 1.5 效率分析

在实际工程应用中, 各元件的寄生参数会对电力电子变换器的电压增益及效率产生显著影响 [34–38]。电

表 1 元器件参数取值

参数	取值
$L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 电感值/ $\mu\text{H}$	400
$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 容值/ $\mu\text{F}$	20
$C_5$ 容值/ $\mu\text{F}$	100

力电子变换器的主要功率损耗来源涵盖开关管损耗、二极管导通损耗、电感铜损与铁损以及电容等效串联电阻损耗。图 9 呈现了集成寄生参数的所提拓扑的等效电路模型。图中,  $R$  为负载电阻,  $P_{out}$  为变换器输出功率。

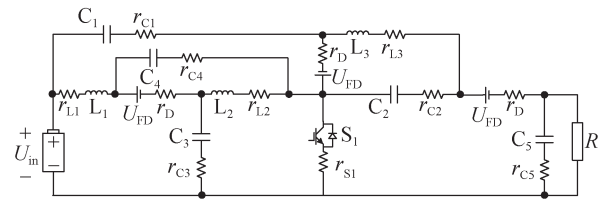


图 9 考虑寄生参数的 LEHGSSC-DZ 等效电路图

Fig. 9 Equivalent circuit diagram of LEHGSSC-DZ considering parasitic parameters

为量化变换器的导通损耗与开关损耗, 现定义如下关键寄生参数。

##### 1) 半导体器件参数:

(1) 所有二极管的正向压降定义为  $U_{FD}$ , 等效导通电阻定义为  $r_D$ ;

(2) 开关管的等效导通电阻定义为  $r_{S1}$ 。

##### 2) 无源元件参数:

(1) 电感  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  的等效串联电阻分别为  $r_{L1}$ 、 $r_{L2}$  和  $r_{L3}$ ;

(2) 电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  和  $C_5$  的等效串联电阻分别为  $r_{C1}$ 、 $r_{C2}$ 、 $r_{C3}$ 、 $r_{C4}$  和  $r_{C5}$ 。

#### 1.5.1 开关管损耗

开关管的导通损耗为:

$$P_{condS} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r_{S1} i_{S1}^2 dt = I_{S1rms}^2 r_{S1} \quad (27)$$

其开关损耗为:

$$P_{swS} = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{t_{on}} U_{S1} i_{S1} dt + \int_0^{t_{off}} U_{S1} i_{S1} dt \right) = \frac{1}{6} U_{S1} I_{S1} f_s (t_{on} + t_{off}) \quad (28)$$

则开关管总损耗为导通损耗和开关损耗之和:

$$P_{SLoss} = P_{conds} + P_{swS} \quad (29)$$

式中:  $i_{S1}$  表示开关电流;  $I_{S1rms}$  表示开关电流有效值;  $t_{on}$ 、 $t_{off}$  为开关管的开通和关断时间。

#### 1.5.2 二极管损耗

各二极管的导通损耗为:

$$P_{\text{cond}D_i} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} (U_{\text{FD}} i_{D_i} + r_{D_i} i_{D_i}^2) dt = U_{\text{FD}} I_{\text{Diave}} + I_{\text{Dirms}}^2 r_{D_i}, i = 1, 2, 3 \quad (30)$$

其开关损耗为:

$$P_{\text{SW}D_i} = \frac{1}{6} U_{D_i} I_{\text{rr}} f_s t_b, i = 1, 2, 3 \quad (31)$$

则二极管总损耗为导通损耗和开关损耗之和:

$$P_{\text{DLoss}} = \sum (P_{\text{cond}D_i} + P_{\text{SW}D_i}), i = 1, 2, 3 \quad (32)$$

式中:  $i_{D_i}$  表示二极管  $D_i$  的电流;  $I_{\text{Diave}}$  表示二极管  $D_i$  的平均电流;  $I_{\text{Dirms}}$  表示二极管  $D_i$  的电流有效值;  $U_{D_i}$  为二极管  $D_i$  的电压应力;  $I_{\text{rr}}$  为二极管  $D_i$  的反向恢复电流;  $t_b$  为反向恢复时间。

### 1.5.3 电容损耗

各电容的损耗为:

$$P_{\text{cond}C_j} = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{T_s} r_{C_j} i_{C_{\text{jon}}}^2 dt + \int_{T_s}^{T_s} r_{C_j} i_{C_{\text{joff}}}^2 dt \right) = r_{C_j} I_{\text{Cjrms}}^2, j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (33)$$

则电容的总损耗为:

$$P_{\text{CLoss}} = \sum P_{\text{cond}C_j}, j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (34)$$

式中:  $i_{C_{\text{jon}}}$  表示开关导通时电容  $C_j$  的电流;  $i_{C_{\text{joff}}}$  表示开关关断时各电容电流;  $I_{\text{Cjrms}}$  为各电容电流的有效值。

### 1.5.4 电感损耗

各电感的损耗为:

$$P_{\text{cond}L_k} = r_{L_k} I_{\text{Lkrms}}^2, k = 1, 2, 3 \quad (35)$$

则电感的总损耗为:

$$P_{\text{LLoss}} = \sum P_{\text{cond}L_k}, k = 1, 2, 3 \quad (36)$$

式中:  $I_{\text{Lkrms}}$  为各电感电流的有效值。

### 1.5.5 总损耗与效率

综上所述,所提变换器的总功率损耗可表示为:

$$P_{\text{LOSS}} = P_{\text{SLoss}} + P_{\text{DLoss}} + P_{\text{CLoss}} + P_{\text{LLoss}} \quad (37)$$

变换器效率可表示为:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{SLoss}} + P_{\text{DLoss}} + P_{\text{CLoss}} + P_{\text{LLoss}}} \quad (38)$$

参照实验元件的型号数据手册,开关频率取 80 kHz,各元器件寄生参数如下:

1) 所有二极管的正向压降  $U_{\text{FD}}=0.2 \text{ V}$ , 等效导通电阻  $r_{D_i}=1 \text{ m}\Omega$ ;

2) 开关管的等效导通电阻  $r_{S1}=1 \text{ m}\Omega$ 。

3) 电感  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  的等效串联电阻  $r_{L1}=r_{L2}=r_{L3}=2 \text{ m}\Omega$ ;

4) 电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  的等效串联电阻  $r_{C1}=r_{C2}=r_{C3}=r_{C4}=8 \text{ m}\Omega$ 、 $r_{C5}=2.5 \text{ m}\Omega$ 。

当输入电源电压为 20 V, 输出电压为 200 V, 输出功率为 200 W 时, 基于前述电压电流应力分析, 将上述参数代入损耗计算表达式, 最终可得所提变换器的功率损耗为 4.45 W, 效率  $\eta$  为 97.82%。

## 2 性能比较

为了充分展示所提基于双 Z 源网络的低电应力高增益单管升压变换器器件数量少、电应力低与电压增益高的显著优势, 本文将 LEHGSSC-DZ 与近年来提出的几种高增益 DC-DC 变换器进行了详细比较。表 2 列出了所提 LEHGSSC-DZ 与一些近年来提出的变换器的结构组成与主要输出特性, 包括元器件数量、电压增益、开关管电压应力以及二极管电压应力。相较于传统准 Z 源变换器, 所提变换器输出电压增益提高了  $d$  倍, 器件电压应力减少了  $(M-1)/3M \times 100\%$ 。各拓扑的电压增益对比情况如图 10(a) 所示。在忽略器件最大瞬时电压的前提下, 图 10(b) 和图 10(c) 分别展示了各变换器在稳态工作条件下的开关管电压应力和二极管电压应力的对比情况 (以  $U_{\text{out}}$  为基准值)。

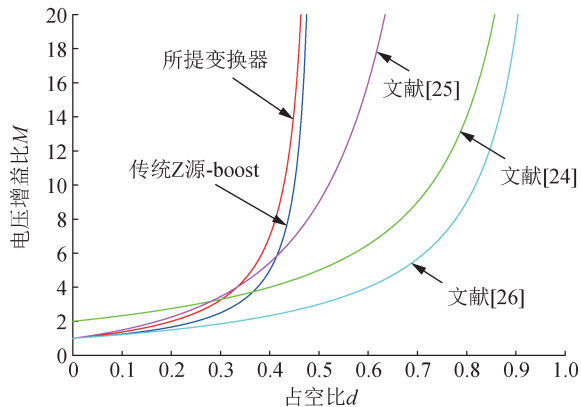
由图 10(a) 可见, 与其他 4 种升压变换器相比, LEHGSSC-DZ 在低占空比下实现了更高的电压增益。同时, 表 2 综合分析表明, LEHGSSC-DZ 在元器件数量上较文献 [24] 和文献 [25] 有所减少。此外, 文献 [26] 和传统 Z 源 Boost 变换器相较于所提变换器, 分别少了 1 个和 4 个元件, 然而, 在整个占空比范围内, 其电压增益始终低于 LEHGSSC-DZ, 且它们的功率器件电应力较高。由图 10(b) 和图 10(c) 可知, 在相同电压增益条件下, LEHGSSC-DZ 展现出最低的开关管与二极管电压应力, 而在不同占空比下, 随着开关占空比的提高, LEHGSSC-DZ 功率器件的电压应力逐渐降低, 递减速度逐渐减小。综上所述, LEHGSSC-DZ 相较于近些年提出的几类变换器, 在较少的元器件数量下实现了较高的电压增益, 并且功率元件的电

表 2 所提变换器与现有变换器比较

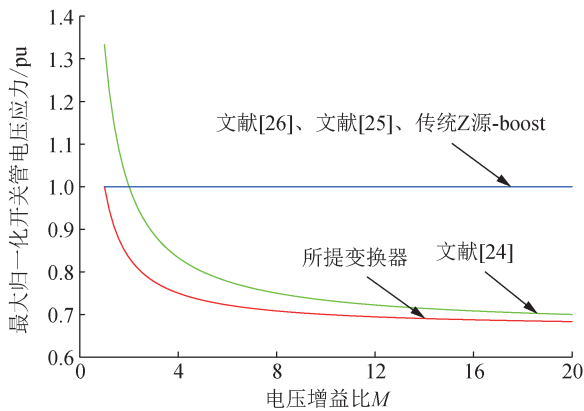
Table 2 Comparison table between the proposed converter and the existing converter

变换器	开关数/个	二极管数/个	电感数/个	电容数/个	最大开关应力	最大二极管应力	电压增益
所提变换器	1	3	3	5	$U_{\text{out}}(2M+1)/(3M)$	$U_{\text{out}}(2M+1)/(3M)$	$(1+d)/(1-2d)$
文献[24]	5	0	3	5	$U_{\text{out}}(2M+2)/(3M)$		$(2+d)/(1-d)$
文献[25]	1	9	4	2	$U_{\text{out}}$	$U_{\text{out}}$	$(1+d)^2/(1-d)^2$
文献[26]	3	5	2	1	$U_{\text{out}}$	$U_{\text{out}}$	$(1+d)/(1-d)$
传统 Z 源 Boost	1	2	2	3	$U_{\text{out}}$	$U_{\text{out}}$	$1/(1-2d)$

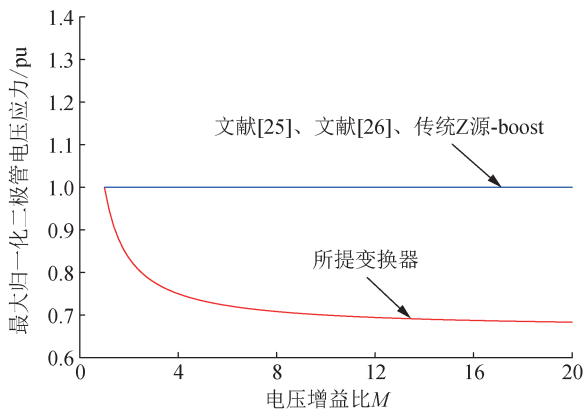
压应力相对较低,这些优点使其在氢燃料电池并网系统中具有较大的应用潜力。



(a) 不同变换器的电压增益对比



(b) 不同变换器的开关管电压应力对比



(c) 不同变换器的二极管电压应力对比

图 10 不同变换器性能比较

Fig. 10 Performance comparison of different converters

### 3 仿真分析及实验验证

#### 3.1 仿真分析

##### 3.1.1 仿真参数设置

在 Matlab/Simulink 环境下搭建算例进行仿真, LEHGSSC-DZ 元件参数基于 1.4 节设计结果,将变换器的各元件设为理想状态,即开关管、二极管无导通电压和导通电阻,电容和电感元件无寄生参数,  $x_L\%$  取 20%,  $x_C\%$  取 5%, 仿真参数如表 3 所示。

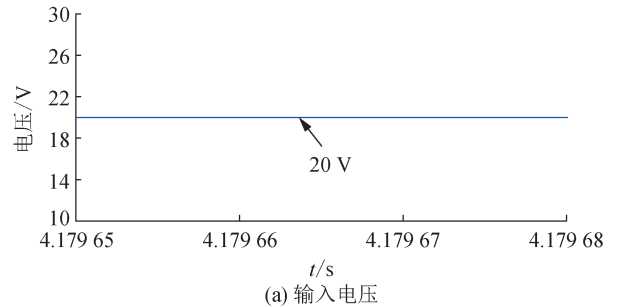
表 3 部分仿真参数

Table 3 Some simulation parameters

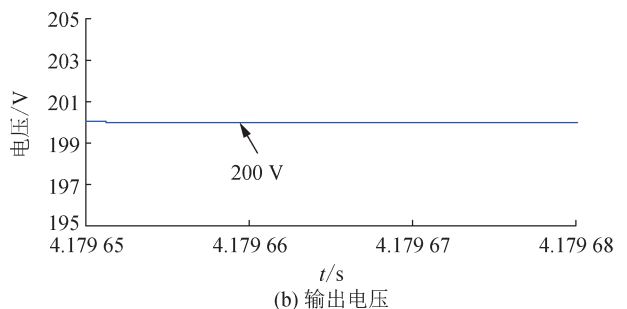
仿真参数	数值
输入电压 $U_{in}/V$	20
输出电压 $U_{out}/V$	200
额定功率 $P/W$	200
$L_1, L_2, L_3$ 电感值/ $\mu H$	400
$C_1, C_2, C_3, C_4$ 容值/ $\mu F$	20
$C_5$ 容值/ $\mu F$	100
开关频率/ $kHz$	80

##### 3.1.2 负载与输入电压不变场景仿真分析

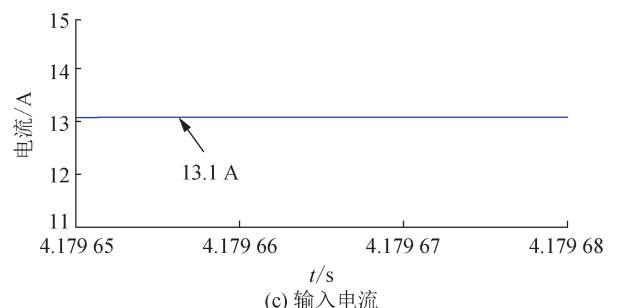
图 11 展示了输入与输出电压、电流波形,输入电压为 20 V,输入电流为 13.1 A,且输入电流是连续的,输出电压为 200 V,输出电流为 1 A。图 12 为电感  $L_1, L_2$  和  $L_3$  电流波形及电容  $C_1, C_2, C_3, C_4$  和  $C_5$  电压波形。通过电感  $L_1, L_2$  和  $L_3$  的平均电流分别为 12.7、12.7 和 0.9 A,电容  $C_1, C_2, C_3, C_4$  和  $C_5$  的平均电压分别为输出电压的 60%、30%、40%、30% 和 100%。图 13 为开关管  $S_1$  和二极管  $D_1, D_2$  和  $D_3$  的电压波形,电压应力均为 140 V,可见 LEHGSSC-DZ 在稳态下的输出结果稳定,且各器件应力大小与前述理论分析一致,证明了 LEHGSSC-DZ 的可行性与前述理论分析的正确性。



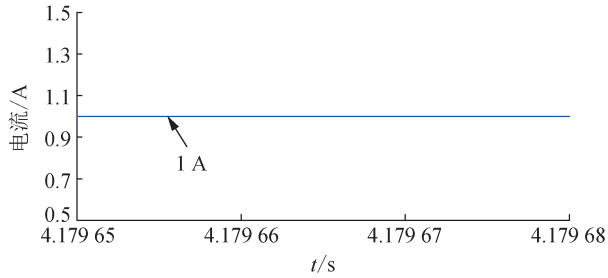
(a) 输入电压



(b) 输出电压



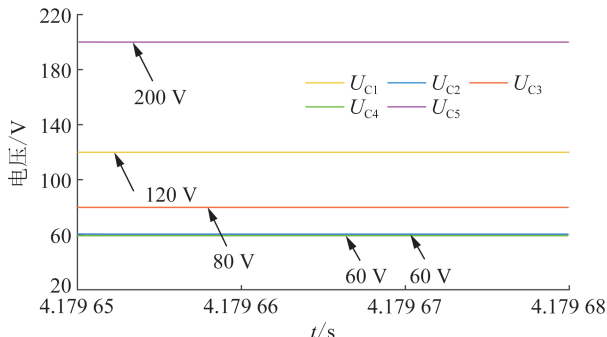
(c) 输入电流



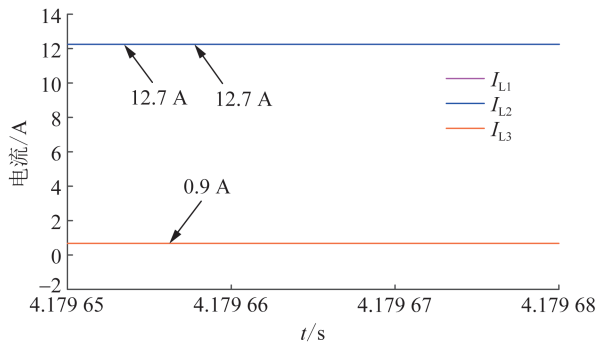
(d) 输出电流

图 11 输入与输出电压、电流波形

Fig. 11 Input and output voltage and current waveforms



(a) 电容电压



(b) 电感电流

图 12 电感电流、电容电压

Fig. 12 Inductance current, capacitance voltage

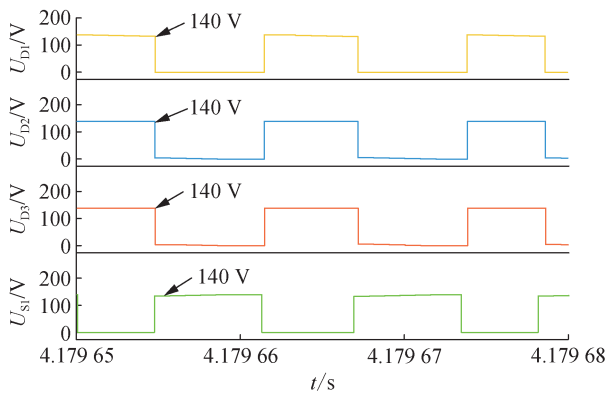


图 13 开关管、二极管电压

Fig. 13 Switching tube and diode voltage

### 3.1.3 负载与输入电压变化场景仿真分析

基于表 3 部分仿真参数,设置输入电压变化和参考输出电压变化,模拟氢燃料电池电压宽范围波动以及负载需求变化的场景。

图 14 为 LEHGSSC-DZ 在输入电压  $U_{in}$  变化条件下的输出电压  $U_{out}$  波形。可见,输入电压在 15~23 V 的波动范围内,LEHGSSC-DZ 的输出电压波动范围小于 5%,输出结果稳定,说明 LEHGSSC-DZ 可适应宽范围氢燃料电池电压进行稳定输出。

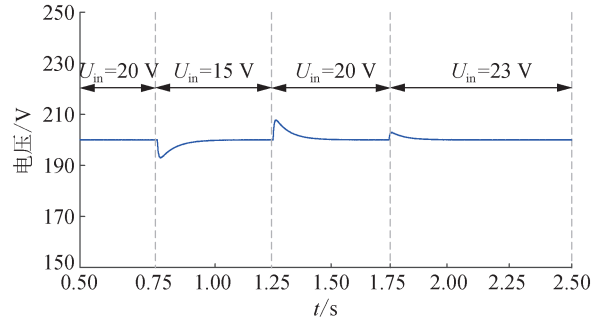
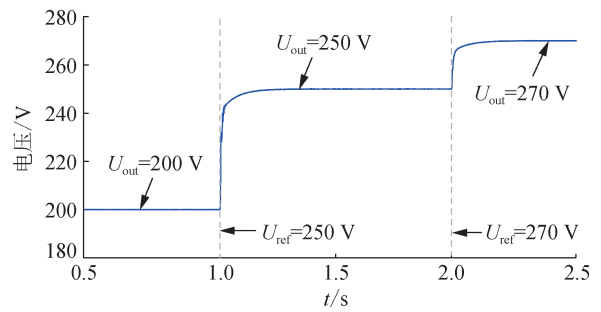


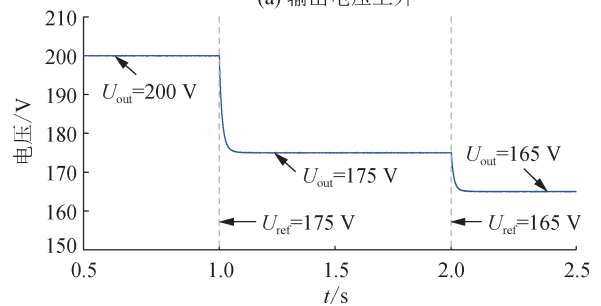
图 14 输入电压变化下的输出电压

Fig. 14 Output voltage of the reference input voltage variation

图 15 为 LEHGSSC-DZ 在参考输出电压  $U_{ref}$  变化下的输出电压波形。由图 15(a)可知,当负载需求增大,变换器需要提高输出电压时,LEHGSSC-DZ 能及时响应负载需求抬高输出电压,由图 15(b)可知,当负载需求减小,变换器需要减小输出电压时,LEHGSSC-DZ 也能响应负载需求,减小输出电压。



(a) 输出电压上升



(a) 输出电压上升

图 15 参考输出电压变化下的输出电压

Fig. 15 Output voltage when the reference output voltage variation

图 16 为 LEHGSSC-DZ 的输入电压与参考输出电压同时变化下的输出电压波形。可见,当输入电压在 15~23 V 的范围波动时,无论是负载需求增大还是减小,LEHGSSC-DZ 均能及时响应负载需求,调整输

出电压,达到输出结果稳定的效果。

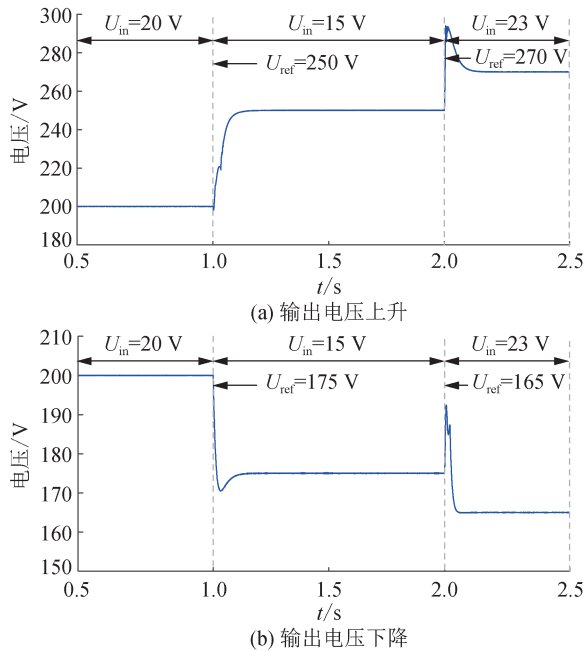


图 16 参考输出电压及输入电压同时变化下的输出电压  
Fig. 16 Output voltage when both the reference output voltage and the input voltage change simultaneously

综上所述,无论是 LEHGSSC-DZ 的输入电压变化还是负载需求变化,LEHGSSC-DZ 的输出结果始终稳定,体现了 LEHGSSC-DZ 适用于氢燃料电池并网系统的特点。

### 3.1.4 变换器仿真输出对比

将 LEHGSSC-DZ 与传统 Boost 变换器、传统 Z 源 Boost 变换器进行对比分析,仿真结果如图 17 和图 18 所示。

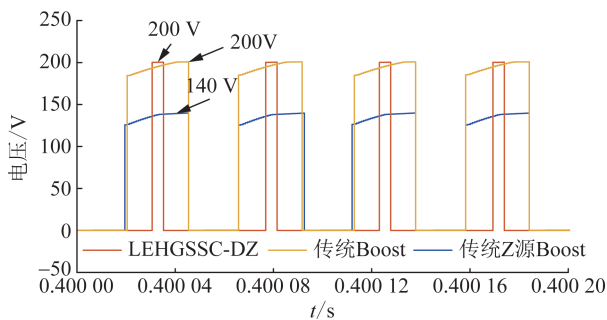


图 17 开关器件电压波形对比  
Fig. 17 Switching device voltage waveform comparison

由图 17 可知,传统变换器开关器件的电压应力为 200 V 左右,而 LEHGSSC-DZ 开关器件的电压应力为 140 V 左右,相较于传统变换器,开关器件电压应力降低了 30% 左右,证明了 LEHGSSC-DZ 在高电压增益下具备器件低电压应力的优势。

由图 18 可知,在开关占空比相同的情况下,LEHGSSC-DZ 的输出电压为 220 V 左右,传统 Boost

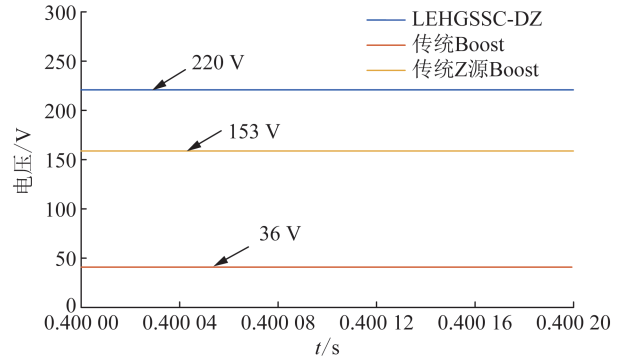


图 18 输出电压波形对比  
Fig. 18 Output voltage waveform comparison

变换器的输出电压为 36 V 左右,传统 Z 源 Boost 变换器的输出电压为 153 V 左右。可见,LEHGSSC-DZ 的输出电压较传统 Z 源 Boost 变换器的输出电压提高了 43.8%,相较于传统 Boost 变换器的输出电压提高了 5.1 倍,证明了 LEHGSSC-DZ 的强升压能力。

### 3.2 实验验证

为验证 LEHGSSC-DZ 的性能,本文基于所提变换器搭建实验平台,基本参数与仿真保持一致,开关管  $S_1$  采用 IRFP4868PBF 管;二极管  $D_1$  采用 SBR60A30 OPT 管; $D_2$ 、 $D_3$  采用 VS-30CPH03-N3 管。图 19—22 给出了 LEHGSSC-DZ 在输入电压为 20 V,占空比  $d=0.429$  条件下的实验波形。

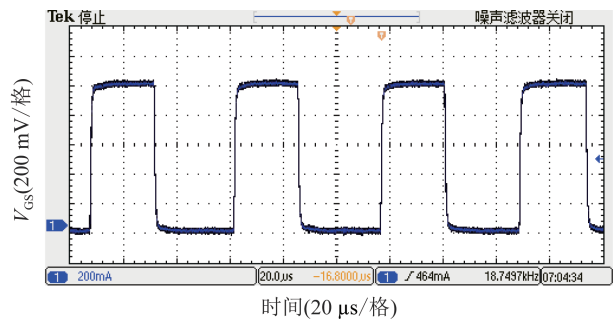


图 19 开关管驱动信号实验波形  
Fig. 19 Experimental waveform of switching tube driving signal

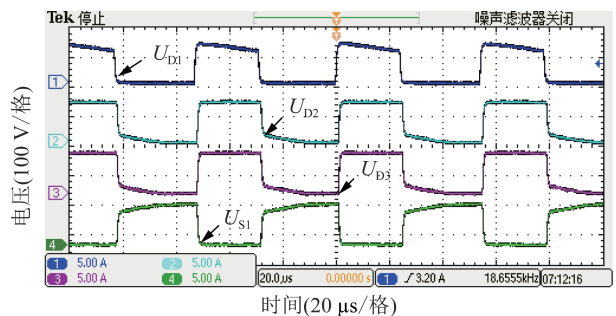


图 20 开关管与二极管电压实验波形  
Fig. 20 Experimental waveforms of switching tube and diode voltage

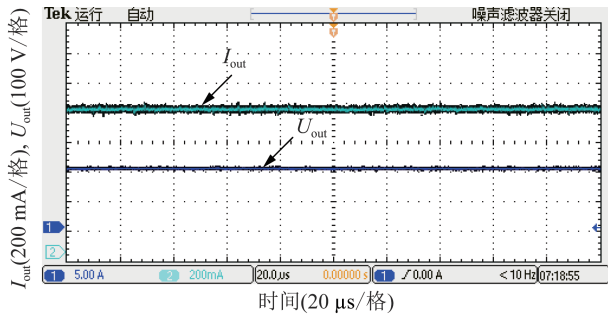
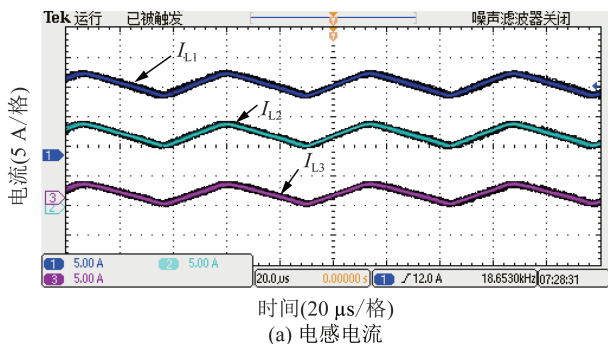
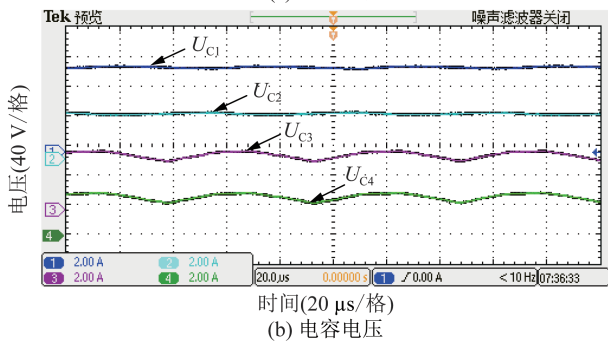


图 21 输出电压和电流实验波形

Fig. 21 Experimental waveforms of output voltage and current



(a) 电感电流



(b) 电容电压

图 22 电感电流、电容电压实验波形

Fig. 22 Experimental waveforms of inductor current and capacitor voltage

由图 19、20 可知, LEHGSSC-DZ 所有元器件的电压应力与前述理论分析一致, 开关管和二极管的电压值均为输出电压的 65% 左右, 可见 LEHGSSC-DZ 的开关电压应力较低, 与 3.1 节仿真结果接近。

图 21 给出了所提拓扑输出电压和输出电流的实验波形, 输出电压值约为 198.5 V, 与理论值相近, 这是由于寄生参数的影响造成理论值与实验值存在偏差, 效率约 97.25%, 输出电流约 0.98 A。

图 22(a) 给出了电感  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  电流的实验波形, 其中通过  $L_1$  和  $L_2$  的平均电流均为 11.8 A, 通过  $L_3$  的平均电流为 0.88 A, 图 22(b) 给出了电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  电压波形, 其平均电压分别约为输出电压的 58.6%、28.9%、38.7% 和 29.1%, 均与理论计算值相近。

图 23 给出了不同输出功率下的效率曲线。可以

看出所提变换器在不同输出功率下可以高效运行, 最大效率为 97.25%, 最低效率为 93.1%。

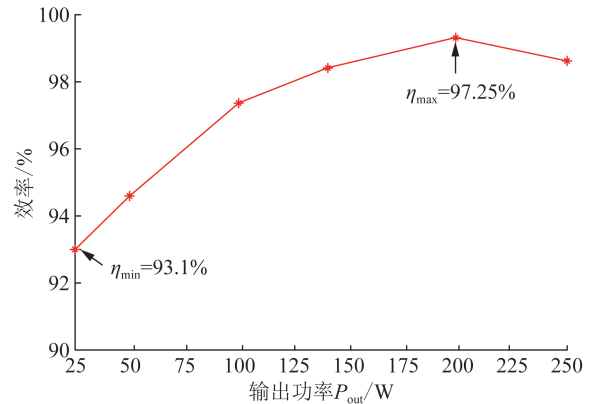


图 23 效率曲线

Fig. 23 Efficiency curve

上述实验结果均验证了前述理论分析的正确性。

## 4 结论

针对传统变换器应用于氢燃料电池并网时, 存在升压能力不足以及器件电应力过高的问题, 本文从减少器件数量、器件电应力、提高电压增益三方面综合考虑, 提出基于双 Z 源网络的低电应力高增益单管升压变换器, 并对所提拓扑进行了理论分析与实验验证, 其结果表明所提变换器具有如下优点:

1) LEHGSSC-DZ 具有拓扑器件数量较少的优势。较文献 [24] 和文献 [25] 这类传统变换器分别减少了 1 个器件和 4 个器件。

2) LEHGSSC-DZ 具有高输出电压增益的优势, 能在低开关占空比下将氢燃料电池的低输出电压转化为高电压输出。相较于传统 Z 源 Boost 变换器输出电压提高了 43.8%, 相较于传统 Boost 变换器输出电压提高了 5.1 倍。

3) LEHGSSC-DZ 具备器件电应力较低的特点, 相较于传统 Z 源 Boost 和传统 Boost 变换器的开关电压应力减小了 30%。

4) LEHGSSC-DZ 具有较高的工作效率, 最高效率可达 97.25%, 有助于提高氢燃料电池并网系统的工作效率。

### 利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献声明 (Authors' Contributions):

汤昊进行了论文写、与仿真与实验分析, 姜飞完成了论文写作指导, 买买提艾力·吾普尔、华东、何桂

雄完成了论文的资料查找。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

## 5 参考文献

- [1] 杨家辉,史超凡,李佳玮,等. 计及动态定价策略的电-氢综合能源站经济运行[J]. 电力建设, 2025, 46(6): 13-23.  
YANG Jiahui, SHI Chaofan, LI Jiawei, et al. Economic operation of electric-hydrogen integrated energy station with dynamic pricing strategy[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 13-23.
- [2] 蒋明轩,卞艺衡,李更丰,等. 面向能源互联网的电-碳-氢耦合交易市场研究综述[J]. 电力建设, 2025, 46(8): 150-165.  
JIANG Mingxuan, BIAN Yiheng, LI Gengfeng, et al. Review of the research on the electricity-carbon-hydrogen coupling trading market under the energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(8): 150-165.
- [3] 张文轩,苏珈,杜欣慧,等. 计及需求响应的电-氢-气综合能源系统分布式鲁棒规划[J]. 电力建设, 2025, 46(7): 108-122.  
ZHANG Wenxuan, SU Jia, DU Xinhui, et al. Research on distributed robust planning of electric-hydrogen-gas integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(7): 108-122.
- [4] 翁幸,王继慷,王一,等. 基于多端口直流变压器的氢燃料电池-储能协调控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 98-111.  
WENG Xing, WANG Jikang, WANG Yi, et al. Coordinated control strategy of hydrogen fuel cell-energy storage based on multi-port DC transformer[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 98-111.
- [5] 宋国兵,李唯嘉,常仲学,等. 光伏直流汇集系统MPPT控制环节载波频率特征分析及单极接地故障选线方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(10): 79-86.  
SONG Guobing, LI Weijia, CHANG Zhongxue, et al. Analysis of carrier frequency characteristics in MPPT control of PV DC collection systems and a method for single-pole ground fault line selection[J]. Smart Power, 2025, 53(10): 79-86.
- [6] 唐欣,王帅,李珍,等. 基于虚拟电阻的独立直流微电网有源阻尼控制[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 192-199, 210.  
TANG Xin, WANG Shuai, LI Zhen, et al. Active damping control based on virtual resistance for stand-alone DC microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 192-199, 210.
- [7] 刘春喜,王涛,田迎澳. 双有源桥变换器的新型双重移相电流应力优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 88-98.  
LIU Chunxi, WANG Tao, TIAN Ying'ao. A novel dual-phase-shift current stress optimization control strategy for dual-active-bridge converters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 88-98.
- [8] 陈景文,王媛,王福强,等. 光储直流微电网多运行工况稳定性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 15-23.  
CHEN Jingwen, WANG Yuan, WANG Fuqiang, et al. Stability analysis of optical storage DC microgrid under multiple operating conditions[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 15-23.
- [9] 郝玢鑫,周丽娟,赵孟浩,等. 一种可拓展双输入高增益DC/DC变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 148-158.  
ZHU Fenxin, ZHOU Lijuan, ZHAO Menghao, et al. A scalable dual-input high step-up DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 148-158.
- [10] 李建林,郭来欣,韩鹏辉. 超扭曲滑模方法的DAB变换器输出电压鲁棒控制[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(4): 233-246.  
LI Jianlin, GUO Laixin, HAN Penghui. Robust control of output voltage of DAB converter by super-twisted sliding mode method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4): 233-246.
- [11] 马智,蔺红,樊艳芳. 基于模型预测控制的输入并联输出串联双有源桥变换器均压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 12-21.  
MA Zhi, LIN Hong, FAN Yanfang. Model predictive control-based voltage equalization control strategy for an input-parallel output-series dual active bridge converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 12-21.
- [12] 龚春阳,夏潇,包俊,等. 宽增益高效谐振型直流变换器技术[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 133-144.  
GONG Chunyang, XIA Xiao, BAO Jun, et al. Wide gain and high efficiency resonant DC-DC converter technology[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 133-144.
- [13] 马小勇,王议锋,王萍,等. 燃料电池用交错并联型Boost变换器参数综合设计方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 397-408.  
MA Xiaoyong, WANG Yifeng, WANG Ping, et al. Comprehensive parameter design method of interleaved boost converter for fuel cell applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 397-408.
- [14] 刘庆雪,陈恺. 基于改进协同控制的双向直流变换器控制策略研究[J]. 电气应用, 2023, 42(12): 89-97.  
LIU Qingxue, CHEN Kai. Research on control strategy of bidirectional DC-DC converter based on improved synergetic control[J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(12): 89-97.
- [15] 石稀元,曹凯鸿,郗伟东,等. 三相准单级充电系统中LLC变换器的最优效率追踪与纹波抑制策略[J/OL]. 电工技术学报, 1-18(2025-06-23)[2025-08-11]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250302>. 11. 2188. tm. 20250508. 1810. 003.  
SHI Xiuyan, CAO Kaihong, QIE Weidong, et al. Optimal efficiency tracking and ripple suppression strategy of LLC converter in three-phase quasi-single-stage charging system[J/OL]. Journal of Electrotechnology, 1-18(2025-06-23)[2025-08-11]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250302>. 11. 2188. tm. 20250508. 1810. 003.
- [16] 王党树,吴光楨,李农柯,等. 交错并联Boost集成型全桥LLC谐振变换器的损耗分析[J/OL]. 高电压技术, 1-13(2025-10-27)[2025-11-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve>.

20250927. 42. 1239. tm. 20251017. 1143. 006.
- WANG Dangshu, WU Guangzhen, LI Nongke, et al. Loss analysis of interleaved parallel boost integrated full-bridge LLC resonant converter [J/OL]. High Voltage Technology, 1-13 (2025-10-27) [2025-11-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250927.42.1239.tm.20251017.1143.006>.
- [17] 李洪珠, 尹彦东, 李超, 等. 脉冲宽度-频率混合控制的器件复用型准单级 Buck-LLC 变换器 [J/OL]. 电工技术学报, 1-12 (2025-10-27) [2025-11-01]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.251189>.
- Li Hongzhu, Yin Yandong, Li Chao, et al. Pulse width-frequency modulation hybrid-controlled component-reused quasi-single-stage Buck-LLC converter [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-122 (2025-10-27) [2025-11-01]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.251189>.
- [18] 薛鹏飞, 张民, 赵振伟, 等. 新型高升压耦合电感 DC-DC 变换器 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 215-223.
- XUE Pengfei, ZHANG Min, ZHAO Zhenwei, et al. Novel DC-DC converter with high boost coupling inductor [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 215-223.
- [19] GOYAL V K, SHUKLA A. Two-stage hybrid isolated DC - DC boost converter for high power and wide input voltage range applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 6751-6763.
- [20] GOYAL V K, SHUKLA A. Isolated DC - DC boost converter for wide input voltage range and wide load range applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9527-9539.
- [21] GU R N, DUAN J P, ZHANG D L, et al. Regulated series hybrid converter with DC transformer (DCX) for step-up power conversion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8961-8971.
- [22] 郭庆明, 毛玉蓉, 陈文辉, 等. 基于三绕组耦合电感的高增益三端口变换器 [J/OL]. 电子测量技术, 1-12 (2025-10-22) [2025-11-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20251022.0930.004.html>.
- GUO Qingming, MAO Yurong, CHEN Wenhui, et al. High-gain three-port converter based on three-winding coupled inductor [J/OL]. Electronic Measurement Technology, 1-12 (2025-10-22) [2025-11-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20251022.0930.004.html>.
- [23] REZAIE M, ABBASI V. Ultrahigh step-up DC - DC converter composed of two stages boost converter, coupled inductor, and multiplier cell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5867-5878.
- [24] WANG Z S, WANG P, LI B, et al. A bidirectional DC - DC converter with high voltage conversion ratio and zero ripple current for battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8012-8027.
- [25] ZHANG G D, ZHANG B, LI Z, et al. A 3-Z-network boost converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 278-288.
- [26] ATHIKKAL S, CHOKKALINGAM B, GANESAN S I, et al. Performance evaluation of a dual-input hybrid step-up DC - DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 3769-3782.
- [27] 董加霖. 氢燃料电池交错并联 Boost 型 DC-DC 变换器的研究 [D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2024.
- DONG Jialin. Research on interleaved parallel Boost-type DC-DC converter for hydrogen fuel cell [D]. Yueyang: Hunan Institute of Science and Technology, 2024.
- [28] 张琦. 氢燃料电池 DC-DC 变换器控制策略研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- ZHANG Qi. Research on control strategies for hydrogen fuel cell DC-DC converters [D]. Beijing: North China University of Technology, 2024.
- [29] 周轩浩, 戚志东, 唐飞, 等. 双开关准 Z 源耦合电感高增益 DC/DC 变换器 [J]. 太阳能学报, 2025, 46(8): 491-497.
- ZHOU Xuanhao, QI Zhidong, TANG Fei, et al. High gain quasi-Z-source DC/DC converter with double-switch and coupled inductor [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(8): 491-497.
- [30] 赵巍, 钟善林, 孙孝峰, 等. 多态能源单级并网逆变器及其控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(24): 160-170.
- ZHAO Wei, ZHONG Shanlin, SUN Xiaofeng, et al. Single-stage grid-connected inverter with polymorphic energy and its control strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(24): 160-170.
- [31] 张涛, 李云飞, 张丽, 等. 一种新型交错并联准 Z 源高增益变换器 [J]. 太阳能学报, 2025, 46(3): 272-279.
- ZHANG Tao, LI Yunfei, ZHANG Li, et al. A novel interleaved parallel quasi-Z source high gain converter [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(3): 272-279.
- [32] 蒋文超. 基于电流模式的 Buck 型 DCDC 转换器的研究与设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- JIANG Wenchao. Research and design of buck-type DCDC converter based on current mode [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [33] 杨伸. 基于电流模式的 Boost 型 DCDC 转换器的研究与设计 [D]. 武汉: 湖北大学, 2024.
- YANG Shen. Research and design of Boost-type DCDC converter based on current mode [D]. Wuhan: Hubei University, 2024.
- [34] 魏业文, 宁鑫森, 李明, 等. 一种适用于燃料电池的新型高升压 DC-DC 变换器 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 92-101.
- WEI Yewen, NING Ximmiao, LI Ming, et al. A novel high step-up DC-DC converter for a fuel cell [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 92-101.
- [35] 王九龙, 吴晓刚. 燃料电池汽车用宽升降压范围准 Z 源 DC-DC 变换器 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 325-341.
- WANG Jiulong, WU Xiaogang. Quasi-Z source DC-DC converter with wide step-up/step-down range for fuel cell vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(16): 325-341.

- [36] 王士博,孔令国,蔡国伟,等. 电力系统氢储能关键应用技术现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6660-6680.  
WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Current status, challenges and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6680.
- [37] 岳舟,刘小荻,姚绍华,等. 一种输入电流连续的新型高增益DC-DC升压变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 125-134.  
YUE Zhou, LIU Xiaodi, YAO Shaohua, et al. A novel high gain DC-DC boost converter with continuous input current [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 125-134.
- [38] 唐钧涛,戚志东,裴进,等. 基于电荷泵的燃料电池有源网络升压变换器[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 905-917.  
TANG Juntao, QI Zhidong, PEI Jin, et al. An active network DC-DC boost converter with a charge pump employed in fuel cells [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4):

905-917.

收稿日期: 2025-09-15 修回日期: 2025-12-03



汤昊

## 作者简介:

汤昊(2001),男,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用, E-mail: 2592016037@qq.com;

姜飞(1985),男,博士,教授,博士生导师,通信作者,研究方向为电力电子在电力系统中的应用、综合能源系统规划运行, E-mail: ji-amg85521@126.com;

买买提艾力·吾普尔(1971),男,博士,高级工程师,研究方向为新型电力系统运行与控制技术, E-mail: 2139209964@qq.com;

华东(1989),男,硕士,工程师,研究方向为新型电力系统运行与控制技术;

何桂雄(1984),男,博士,正高级工程师,研究方向为负荷管理、综合能源与电氢耦合新技术。

(编辑 张小飞)