集成Y源耦合电感的高增益准Z源DC-DC变换器

荣德生， 唐文广， 孙瑄璠， 韩亚东， 李长轩
（辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院，辽宁 葫芦岛 125105）

摘 要：为了应对可再生能源发电系统中DC-DC变换器升压能力受限问题，提出一种集成Y源耦合电感与开关电容单元的新型高增益准Z源变换器。其中开关电容与Y源耦合电感融合为复合升压单元，显著提升变换器电压增益，输出端采用双电容串联分压结构降低其电压应力；无源钳位电路吸收漏感能量，有效抑制开关管电压尖峰，使开关管始终保持低电压应力。详细分析该变换器工作原理、稳态性能、效率损耗，并进行性能对比。结果表明，该变换器具有宽输入范围下输入电流连续与输入输出共地特性，可通过调整Y源耦合电感匝数比来实现低占空比下高电压增益；二极管均为零电流关断，缓解开关瞬态过程中的反向恢复，从而提升系统整体运行稳定性。最后，搭建一台400 W实验样机验证变换器正确性。

关键词：准Z源变换器；高增益；Y源耦合电感；开关电容；低占空比；零电流关断
DOI：10.15938/j.emc.2026.05.016
中图分类号：TM46 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2026)05-0189-10

High-gain quasi-Z-source DC-DC converter with integrated Y-source coupled inductor

RONG Desheng， TANG Wenguang， SUN Xuanjin， HAN Yadong， LI Changxuan
(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To address the issue of limited boost capability in DC-DC converters of renewable energy generation systems, a novel high-gain quasi-Z-source converter integrating a Y-source coupled inductor and a switched capacitor unit was proposed. In this converter, the switched capacitor and the Y-source coupled inductor were integrated into a composite boost unit, which significantly enhanced the voltage gain; a dual-capacitor series voltage-dividing structure was adopted at the output to reduce the voltage stress, and a passive clamping circuit was employed to absorb leakage inductance energy, effectively suppressing voltage spikes of the switch tube and maintaining low voltage stress on it throughout operation. The operating principle, steady-state performance, and efficiency loss of the converter were analyzed in detail, and a performance comparison was conducted. Results show that the converter features continuous input current and input-output common ground characteristics under a wide input range, and the voltage gain can be achieved by adjusting the turns ratio of the Y-source coupled inductor at a low duty cycles. All diodes achieve zero current switching, alleviating reverse recovery during switching transients, thereby enhancing the overall system operational stability. Finally, a 400 W experimental prototype was built to verify cor-

收稿日期：2025-05-27
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52477191)
作者简介：荣德生(1975—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为节能型电力电子技术及应用；
唐文广(1999—)，男，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动；
孙瑄璠(1993—)，男，博士，研究方向为电力电子磁技术；
韩亚东(1998—)，男，博士研究生，研究方向为电力电子变换器；
李长轩(2002—)，男，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。
通信作者：唐文广

rectness of the converter.

Keywords: quasi-Z-source converter; high-gain; Y-source coupled inductor; switching capacitor; low duty cycles; zero current switching

0 引 言

在“双碳”战略的引领下,绿色清洁型能源已成为能源体系变革的核心方向[1]。光伏发电作为可再生能源的重要组成部分,在能源结构优化中发挥着关键作用,然而分布式光伏与燃料电池等新型发电系统普遍存在输出电压等级偏低的问题,难以直接满足并网及直流微电网的电压需求[2-3]。为此,需要通过高电压增益 DC-DC 变换器实现电压提升,这使其成为构建新型电力系统的核心,对推动清洁能源规模化应用具有重要意义[4]。

传统升压 DC-DC 变换器依赖高占空比实现高电压增益,但在高占空比运行时,变换器效率显著降低,开关器件与二极管会承受过高的电压与电流应力,加剧系统热损耗并降低运行可靠性。为突破这些局限,Z 源网络结构应运而生,其在较低占空比下可实现较高电压增益。然而,Z 源变换器的输入电流不连续性使其难以适配光伏等敏感型能源输入[5-6]。准 Z 源(quasi-Z-source,QZS)变换器作为 Z 源的改进型,通过在输入侧嵌入电感,有效解决了输入电流断续问题,并具备公共接地的优势,使其在新能源并网和电力电子领域具有重要应用价值。但现有的准 Z 源变换器仍面临开关器件电压应力过高、二极管反向恢复损耗显著以及电压增益提升受限等问题[7-9]。

针对准 Z 源变换器固有的电压增益提升受限问题,研究者们通过拓扑创新与控制策略优化进行了多维度改进。文献[10-12]通过在准 Z 源网络中集成开关电容单元,使得变换器电压增益相对于基本结构有所提升,但其在拓扑中新增了开关管,导致变换器开关损耗显著增加,控制难度加大。文献[13-14]通过双绕组耦合电感与开关电容协同优化准 Z 源拓扑结构,可提升变换器电压增益并降低器件电压应力,然而双绕组耦合电感的匝数比调节受限于磁芯饱和特性,当匝数比超过 3 时电感损耗急剧上升。文献[15-18]将三绕组耦合电感与准 Z 源网络结构深度融合,既保留准 Z 源变换器输入电流连续特性,又可灵活调节匝数比提高增益,当耦合电感的漏感量超出合理范围时,开关器件会存在显著的电压尖峰。文献[19]提出一种软开关准 Z 源变换器,采用开关器件替代准 Z 源网络中的二极管元件,结合同步整流技术实现软开关功能,有效降低了系统开关损耗。然而,该结构导致开关器件的电压应力相对较高。文献[20]提出一种谐振软开关技术,将谐振电路并联至开关管两端,通过谐振技术实现零电压关断(zero voltage switching,ZVS),但是谐振参数设计使变换器升压能力下降且输出二极管电压应力较高。文献[21-22]创新性提出在准 Z 源网络结构中嵌入 Y 源耦合电感,通过 Y 源结构特有的双向电压调节能力以及合理配置各绕组匝数比实现系统电压增益的提升。尽管该拓扑结构具有简洁性,但仍面临输出二极管电压应力过高以及电压增益提升效果较有限的问题。

为提升准 Z 源变换器的升压能力,通过融合上述文献中的先进技术理念,本文提出一种具有 Y 源耦合电感的高增益准 Z 源变换器,可用于分布式光伏发电系统与储能并网等领域。在准 Z 源网络结构中引入 Y 源耦合电感与开关电容网络,实现宽输入范围下输入电流连续与输入输出共地特性,通过合理配置匝数比可实现低占空比下高电压增益。将开关电容网络与 Y 源耦合电感集成,形成新型倍压单元,使准 Z 源变换器的电压增益大幅度提高。同时,开关电容网络中的二极管-电容支路钳位至开关管两端,形成无源钳位,抑制开关管的电压尖峰,而输出端由 2 个电容串联提供输出,通过分压降低各电容的电压应力可减小所需电容的体积。此外,所有二极管均实现零电流关断(zero current switching,ZCS),显著降低开关损耗,从而提高变换器整体性能。

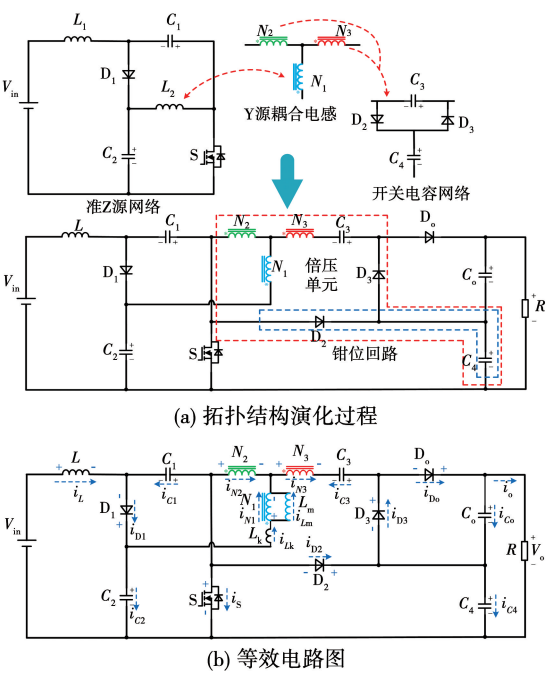
1 变换器结构及工作模态分析

1.1 拓扑结构

图 1(a)展示了具有 Y 源耦合电感的高增益准 Z 源 DC-DC 变换器拓扑演化过程。在准 Z 源网络结构基础上,通过将准 Z 源中电感 L_2 替换为 Y 源原边绕组 N_1。再将开关电容网络与 Y 源耦合电感中

二次绕组 N_2、三次绕组 N_3 融合,形成新型集成倍压单元,并将开关电容网络中电容 C_4 与输出电容 C_o 串联接至负载两端,共同提供输出电压,从而得到所提集成 Y 源耦合电感的高增益准 Z 源 DC-DC(Y-source quasi-Z-source,YSQZS)变换器。该拓扑结构能在宽输入范围与低占空比条件下大幅度提升电压增益且输入输出共地。同时,二极管 D_2 与电容 C_o 形成无源钳位回路,钳位至开关管 S 两端以吸收漏感能量,降低开关管的电压尖峰。

为便于后续性能分析,将 Y 源耦合电感等效为各个绕组匝数为 N_1、N_2 和 N_3、漏感为 L_k、励磁电感为 L_m、匝数比为 1∶n_2∶n_3 的三绕组理想变压器模型,其中匝数比定义为 $n_2 = N_2/N_1$、$n_3 = N_3/N_1$,YSQZS 变换器等效电路如图 1(b)所示。此外,YSQZS 变换器还包括 1 个输入电感 L、1 个开关管 S、4 个二极管 D_1、D_2、D_3 与 D_o 以及 5 个电容 C_1、C_2、C_3、C_4 与 C_o。



(a) 拓扑结构演化过程

(b) 等效电路图

图 1　拓扑结构演化过程与等效电路图

Fig. 1　Topological structure evolution process and equivalent circuit diagram

1.2　工作模态分析

为简化所提变换器模态分析,作如下假设:

1)开关器件为理想器件,忽略其导通压降、寄生电阻及反向恢复特性,仅考虑开关状态的瞬时切换特性。

2)电容为理想器件,忽略寄生参数,其电压在稳态工作条件下保持恒定。

3)输入电感与耦合电感为理想器件,无寄生电阻和寄生电感,使电路保持在连续导通模式的工作状态。

图 2 为 YSQZS 变换器工作波形。一个工作周期内等效电路如图 3 所示。

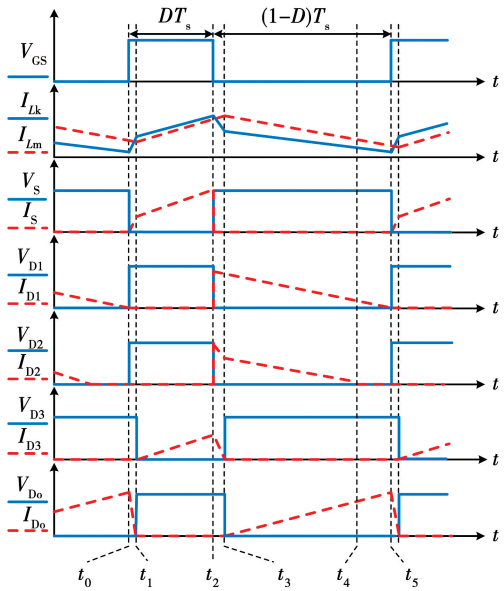


图 2　YSQZS 变换器工作波形

Fig. 2　Working waveforms of the YSQZS converter

模态 1[t_0 – t_1]:当 t_0 时刻驱动信号作用于开关管 S 时,其开始导通。二极管 D_2 导通,其余二极管关断。电源 V_{in} 与电容 C_1 通过开关管 S 向输入电感 L 输送能量,导致电感电流 i_L 呈线性上升趋势。电容 C_2 经过 Y 源中二次绕组 N_2 与开关管 S 向原边绕组 N_1 释放能量,电容 C_3 经过二极管 D_o 向三次绕组 N_3 释放能量。负载 R 由输出电容 C_o 与 C_4 供电。

模态 2[t_1 – t_2]:此模态运行过程中,开关管 S 与二极管 D_3 导通,二极管 D_o 在 t_1 时刻完成零电流关断,其余二极管维持关断状态。电感 L 继续吸收电源 V_{in} 与电容 C_1 释放的能量,原边绕组 N_1 由电容 C_2 供能,励磁电流 i_{Lm} 和漏感电流 i_{Lk} 线性上升。电容 C_o 与 C_4 向负载 R 提供能量。

模态 3[t_2 – t_3]:此模态中开关管 S 在 t_2 时刻关断,且两端电压被钳位至 V_{C4}。二极管 D_o 处于关断,二极管 D_1、D_2 与 D_3 处于导通状态。输入电感 L 对电容 C_2 充电,原边绕组 N_1 与二次绕组 N_2 对电容 C_1 进行充电,电容 C_3 由绕组 N_2、N_3 充电,电容 C_o 与 C_4 对负载 R 供能。

模态 4[t_3 – t_4]:在此阶段,开关管 S 处于关

断,二极管 D_3 实现 ZCS 关断,其余二极管处于导通。电容 C_1 与 C_2 维持充电状态,电源 V_{in}、输入电感 L、绕组 N_1、N_3 与电容 C_3、C_o、C_4 共同形成串联回路持续为负载 R 提供能量。

模态 5[t_4 – t_5]:在 t_4 时刻,开关管 S 仍保持关断,二极管 D_2 实现 ZCS 关断,二极管 D_3 保持关断,二极管 D_1 与 D_o 保持开通。电容 C_2 由电感 L 进行充电,电源 V_{in}、输入电感 L、绕组 N_2、N_3 与电容 C_3、C_o、C_4 共同形成串联回路持续为负载 R 提供能量。该变换器一个工作周期结束,当来到下一周期 t_0 时刻,二极管 D_1 实现 ZCS 关断。

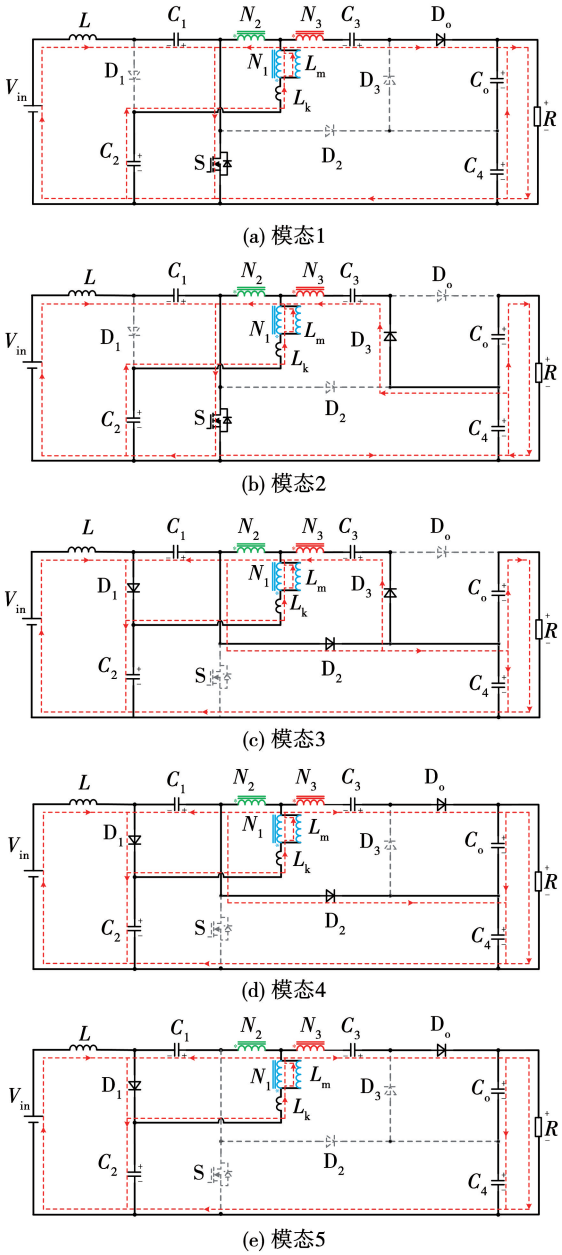


图 3 YSQZS 变换器工作模态

Fig. 3 Operating modes of the YSQZS converter

2 YSQZS 变换器稳态性能分析

2.1 电压增益

定义 Y 源耦合电感绕组的匝数比关系为 $V_{N1} = V_{Lm}$,$V_{N2} = n_2V_{Lm}$,$V_{N3} = n_3V_{Lm}$,其漏感系数为 $k = L_m/(L_m + L_k)$。

模态 1、3 为暂态,在电路稳态性能分析中可忽略。模态 2、4 与 5 工作时间较长,但模态 4 已经包含模态 5 中所有回路,所以选取模态 2 与 4 为主模态。

根据电感与耦合电感的伏秒平衡与基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law,KVL)可得:

$$\left.\begin{aligned}&(V_{in} + V_{C1})DT + (V_{in} - V_{C2})(1 - D)T = 0;\\&\frac{kV_{C2}}{1 - kn_2}DT - \frac{kV_{C1}}{1 - kn_2}(1 - D)T = 0。\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

工作模态 2 时,列写 KVL 方程为

$$V_{C3} = \frac{k(n_2 + n_3)}{1 - kn_2}V_{C2} + V_{C4}。 \tag{2}$$

工作模态 4 时,列写 KVL 方程为:

$$\left.\begin{aligned}&V_o = \frac{kV_{C1}}{1 - kn_2} + V_{C2} + V_{C3};\\&V_{C4} = V_{C1} + V_{C2}。\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

由式(1)~式(3)可得电压增益 G_k 和各电容电压应力。电容电压应力为:

$$\left.\begin{aligned}V_{C1} &= \frac{D}{1 - 2D}V_{in};\\V_{C2} &= \frac{1 - D}{1 - 2D}V_{in};\\V_{C3} &= \frac{1 - kn_2D + (1 - D)kn_3}{(1 - 2D)(1 - kn_2)}V_{in};\\V_{C4} &= \frac{V_{in}}{1 - 2D};\\V_{Co} &= \frac{1 + kn_3}{(1 - 2D)(1 - kn_2)}V_{in}。\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

YSQZS 变换器电压增益 G_k 为

$$G_k = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2 - kn_2 + kn_3}{(1 - 2D)(1 - kn_2)}。 \tag{5}$$

根据式(5),当匝数比为确定值时可看出漏感系数 k 对电压增益 G_k 的影响。

图 4 为当匝数比 $n_2 = 0.5$、$n_3 = 1.5$ 时,不同漏感系数下电压增益与占空比关系。由图 4 可知,漏感系数 k 对电压增益 G_k 的影响很小,此时漏感效应可忽略不计。因此,可令 $k = 1$,即不再考虑漏感的影响,据此推导出理想电路模型中电压增益 G 表达式为

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2 - n_2 + n_3}{(1 - 2D)(1 - n_2)}。 \tag{6}$$

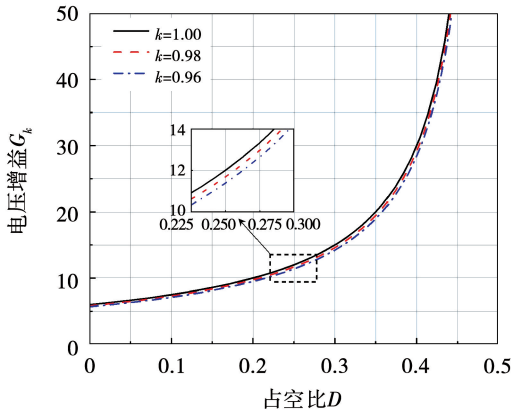
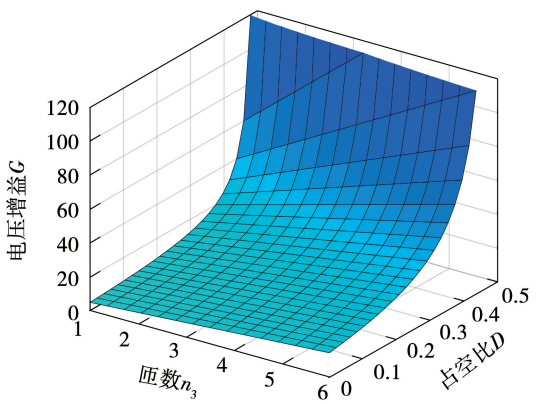


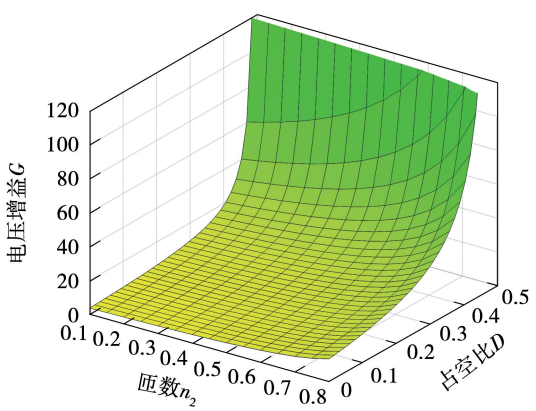
图 4　不同漏感系数下电压增益与占空比关系

Fig. 4　Relationship between voltage gain and duty cycle under different leakage inductance coefficients

图 5 为不同占空比与匝数比下的电压增益图,由此可看出,YZQZS 变换器可通过增加占空比 D 或改变匝数比 n_2 与 n_3 来增加电压增益,其相较于传统升压变换器,电压增益调节自由度更高,由图 5(a)可知,当匝数比 n_2 =0.5 时,可以通过增加占空比 D 或匝数比 n_3 来提高电压增益。



(a) n_2=0.5时



(b) n_3=1.5时

图 5　不同占空比与匝数比下的电压增益图

Fig. 5　Voltage gain plots under different duty cycles and turns ratios

与图 5(a)一样,图 5(b)为当匝数比 n_3 =1.5 时的电压增益情况。因此,通过合理优化 Y 源匝数比参数,可在低占空比工作状态下显著提升电压增益,满足实际工程需要,同时低占空比可以减小各器件的应力,提高变换器性能。

2.2　器件的电压与电流应力

根据上述模态分析可知开关管 S 和各二极管电压应力为:

$$\left.\begin{aligned} V_{D1} &= V_{D2} = \frac{V_{in}}{1-2D};\\ V_{D3} &= V_{Do} = \frac{1+n_3}{(1-2D)(1-n_2)}V_{in};\\ V_S &= V_{C4} = \frac{V_{in}}{1-2D}。\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

在一个工作周期中,根据能量守恒可得

$$V_{in}I_L = V_oI_o \Rightarrow I_L = GI_o。 \tag{8}$$

对图 3 中的模态 2、4 的等效电路进行分析并结合电容安秒平衡可得开关管 S 与各二极管的电流应力为:

$$\left.\begin{aligned} I_S &= \frac{G-1}{D}I_o;\\ I_{D1} &= \frac{G}{1-D}I_o;\\ I_{D2} &= \frac{I_o}{1-D};\\ I_{D3} &= \frac{I_o}{D};\\ I_{Do} &= \frac{I_o}{1-D}。\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

2.3　效率与损耗分析

图 6 是 YSQZS 变换器寄生参数等效电路。Y 源各绕组寄生电阻为 r_{N1}、r_{N2}、r_{N3},电感 L 寄生电阻为 r_L,电容 C_1、C_2、C_3、C_4 与 C_o 的寄生电阻分别为 r_{C1}、r_{C2}、r_{C3}、r_{C4} 与 r_{Co},V_{FD} 与 r_D 为二极管 D_2、D_3 与 D_o 的正向导通压降与寄生电阻,V_{FD1} 与 r_{D1} 为二极管 D_1 的寄生参数。变换器损耗包含开关管损耗、二极管损耗、电感损耗和电容损耗。

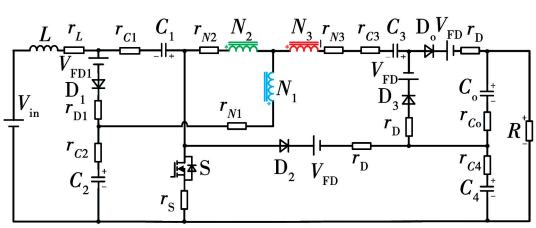


图 6　YSQZS 变换器寄生参数等效电路图

Fig. 6　Parasitic parameter equivalent circuit diagram of the YSQZS converter

开关管总损耗为

$$P_{S\_loss} = r_S I_{S\_rms}^2 + \frac{1}{6} f_s V_S I_S (t_{on} + t_{off})。 \quad (10)$$

式中：f_s 为工作频率；t_{on} 为导通上升时间；t_{off} 为关断下降时间；I_{S_rms} 为电流有效值。

二极管损耗包括导通损耗与开关损耗，由于变换器中二极管均是 ZCS 关断，其开关损耗可忽略不计，因此仅需考虑二极管的导通损耗。

二极管总损耗为

$$P_{D\_loss} = \sum (V_{FD} I_{Di\_ave} + r_D I_{Di\_rms}^2), i = 1,2,3,o。 \quad (11)$$

式中：I_{Di_ave} 为电流平均值；I_{Di_rms} 为电流有效值。

电感损耗为

$$P_{L\_loss} = r_L I_{L\_rms}^2 + \sum r_{Ni} I_{Ni\_rms}^2, i = 1,2,3。 \quad (12)$$

式中 I_{L_rms} 与 I_{Ni_rms} 分别为输入电感 L 与 Y 源耦合电感 3 个绕组的电流有效值。

电容损耗为

$$P_{C\_loss} = \sum r_{Ci} I_{Ci\_rms}^2, i = 1,2,3,4,o。 \quad (13)$$

式中 I_{Ci_rms} 为电容电流有效值。

综上所述，变换器总损耗为

$$P_{Loss} = P_{S\_loss} + P_{D\_loss} + P_{L\_loss} + P_{C\_loss}。 \quad (14)$$

其效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{Loss}} \times 100\%。 \quad (15)$$

经查阅数据手册与实测数据可知，$r_S = 6\ m\Omega$，$t_{on} = 13\ ns$，$t_{off} = 14\ ns$，$V_{FD1} = 0.6\ V$，$V_{FD} = 0.75\ V$，$r_{D1} = r_D = 5\ m\Omega$，$r_L = 7\ m\Omega$，$r_{C1} = r_{C2} = 5\ m\Omega$，$r_{C3} = r_{C4} = r_{Co} = 4\ m\Omega$，$r_{N1} = 10\ m\Omega$，$r_{N2} = 5\ m\Omega$，$r_{N3} = 15\ m\Omega$，将上述寄生参数代入式(10)～式(15)，即可求得在输入 36 V 与 46 V、输出功率为 400 W 时的损耗与效率。

YSQZS 变换器各元器件损耗分布占比如图 7 所示，内环为输入 36 V，外环为输入 46 V。根据图 7 数据分析，二极管损耗在变换器总损耗中占比达 44% 与 43%，显著高于其他损耗项，这主要归因于二极管 D_1 在高频开关过程中的高输入电流，使其在导通期间承受更大的通态损耗。因此，可选择寄生参数较小的器件来降低损耗。

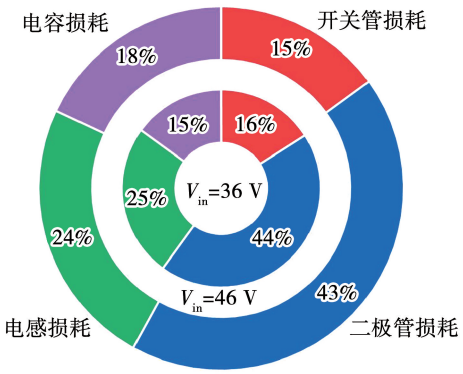


图 7 YSQZS 变换器损耗分布

Fig. 7 Loss distribution of the YSQZS converter

3 变换器性能对比

将所提变换器与近年文献中具有耦合电感的准 Z 源变换器进行性能对比，重点观察电压增益与开关器件应力。各项参数对比如表 1 所示。其中，2W 表示 2 个绕组的耦合电感，3W 同理。为公平比较，各变换器中耦合电感总匝数比 n 设定为 2，其中三绕组耦合电感匝数比设置为 $n_2 = 0.5$、$n_3 = 1.5$。

表 1 性能对比

Table 1 Performance comparison

变换器	电压增益	归一化开关管电压应力	归一化二极管最大电压应力	元件数量 开关/电容/二极管/耦合电感/电感/总数	软开关	输入电流	效率
文献[14]	$\frac{n+2}{1-2D}$	$\frac{1}{n+2}$	$\frac{n+1}{n+2}$	$1/5/4/1^{2W}/1/12$	ZCS	连续	91.3%/200 W
文献[17]	$\frac{2+n(2-D)}{1-2D}$	$\frac{1}{2+n(2-D)}$	$\frac{n}{2+n(2-D)}$	$1/6/5/1^{3W}/0/13$	无	不连续	93.5%/400 W
文献[19]	$\frac{(1+n)(2-D)}{1-2D}$	$\frac{1}{(1+n)(2-D)}$	$\frac{1+n}{(1+n)(2-D)}$	$2/5/3/1^{3W}/1/12$	ZVS	连续	96.1%/200 W
文献[20]	$\frac{2+n_2+n_3D}{1-2D}$	$\frac{1}{2+n_2+n_3D}$	$\frac{1+n_3}{2+n_2+n_3D}$	$2/5/5/1^{2W}/1/14$	ZCS	连续	96.5%/300 W
文献[22]	$\frac{2+n_3-D-(1-D)n_2}{(1-2D)(1-n_2)}$	$\frac{1-n_2}{2+n_3-D-(1-D)n_2}$	$\frac{1+n_3}{2+n_3-D-(1-D)n_2}$	$1/4/3/1^{3W}/1/10$	ZCS	连续	96.1%/100 W
本文变换器	$\frac{2-n_2+n_3}{(1-2D)(1-n_2)}$	$\frac{1-n_2}{2-n_2+n_3}$	$\frac{1+n_3}{2-n_2+n_3}$	$1/4/5/1^{3W}/1/12$	ZCS	连续	95.6%/400 W

电压增益对比曲线如图 8 所示,分析表明,相较于其他拓扑结构,YSQZS 变换器在相同占空比和匝数比的条件下展现出高电压增益特性。高电压增益特性使变换器在较低占空比与合理匝数比下,既可实现目标电压输出,又有利于降低各器件电压、电流应力,提升系统可靠性。

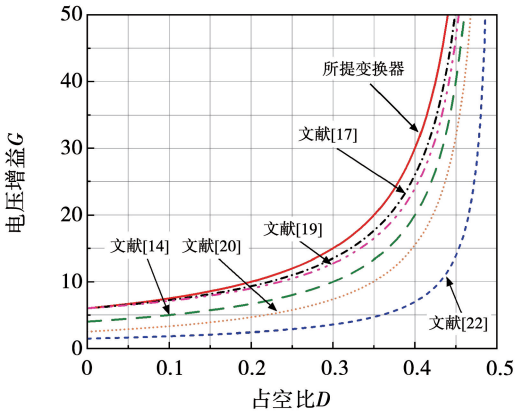


图 8　电压增益对比曲线

Fig. 8　Voltage gain comparison curves

图 9 为归一化开关管电压应力对比曲线。由图可知,YSQZS 变换器在开关器件电压应力方面展现出显著优势,始终保持较低电压应力。与文献[19 -20]的双开关管相比,单开关管设计更易于控制,以及开关管总电压应力与损耗更小,体现了拓扑结构设计的优越性。

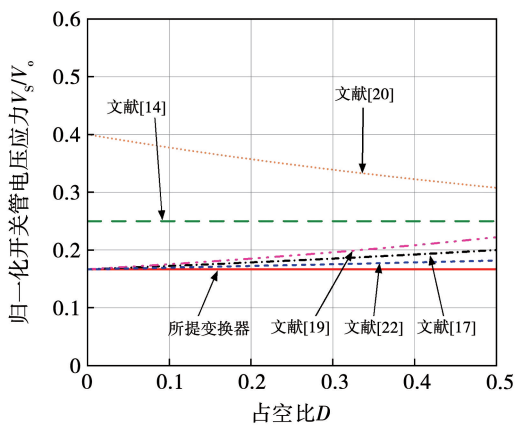


图 9　归一化开关管电压应力对比曲线

Fig. 9　Normalized voltage stress contrast curves of the switching tube

图 10 展示了不同变换器归一化最大二极管电压应力对比曲线。对比分析可见,相较其他变换器,YSQZS 变换器的输出二极管电压应力处于中等水平且不随占空比变化,输出二极管实现了 ZCS,有助于降低器件开关损耗。

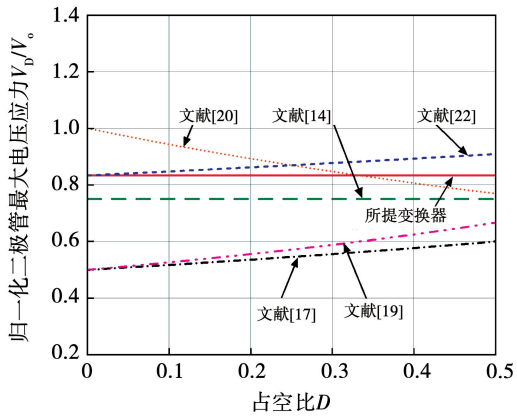
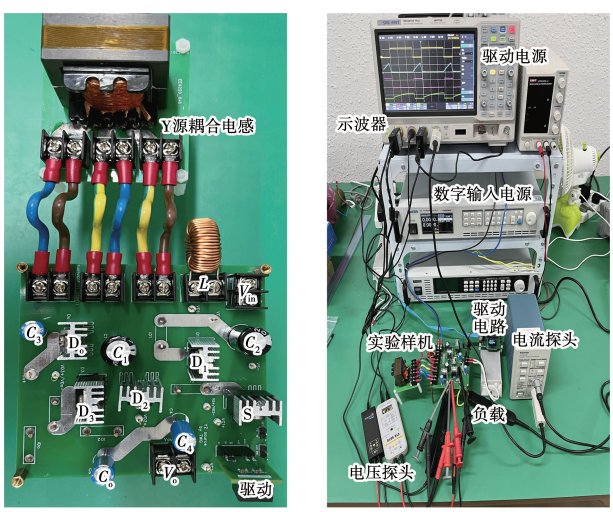


图 10　归一化二极管最大电压应力对比曲线

Fig. 10　Comparison curves of the maximum voltage stress of the normalized diode

4　实验验证与分析

为验证 YSQZS 变换器的正确性与可行性,基于实际应用需求,在实验室制作一台输入电压 20 ~ 60 V、输出功率 400 W 的实验样机,实验样机原型与实验平台如图 11 所示。该实验样机预留了电压、电流测量接口,便于进行全方位的性能测试与分析。实际应用中样机结构可以更紧凑。实验样机各关键参数见表 2。



(a) 实验样机　　(b) 实验平台

图 11　YSQZS 变换器实验样机与实验平台

Fig. 11　Experimental prototype and experimental platform of the YSQZS converter

表 2 实验样机参数

Table 2 Parameters of experimental prototype

参数	数值
输入电压 V_{in} /V	20 ~ 60
输出电压 V_o /V	400
开关频率 f_s /kHz	50
额定功率 P_o /W	400
输入电感 L /μH	220
励磁电感 L_m /μH	140
n_1 :n_2 :n_3	1:0.5:1.5
电容 C_1 、C_2 /μF	220
电容 C_3 、C_4 、C_o /μF	22
二极管 D_1	MBR20100CT
二极管 D_2 、D_3 、D_o	MUR1640CT
开关管 S	NCEP01T11

图 12 和图 13 分别为变换器工作在输入电压为 36 V 与 46 V、功率为 400 W 时的实验波形。由图 12(a)与图 13(a)可知,输入电压为 36 V 与 46 V 时,输出电压为 400 V,展现出 YSQZS 变换器在宽输入电压范围下的高电压增益特性。由图 12(b)与图 13(b)可知,变换器输入电流连续,其漏感电流波形与理论波形完全相符。

图 12(c)与图 13(c)所呈现的驱动信号与开关管 S 的电压、电流变化趋势表明,在额定工作状态下,开关器件的电压应力显著低于输出电压,不足输出电压的 20%,且开关管实现零电流开通,有助于提升转换效率。

图 12(d)、图 12(e)与图 13(d)、图 13(e)为二极管 D_1 ~ D_o 分别在 36 V 与 46 V 输入电压下的电压、电流波形,其电压、电流波形与理论波形基本吻合,各二极管均为零电流关断,有效降低变换器中二极管损耗。

图 14 为 YSQZY 变换器效率曲线。根据图 14 所示效率曲线分析,所提变换器在 36 V 与 46 V 输入电压、400 V 输出电压下表现出优异的能效特性。由于存在寄生参数与实验误差,两者实测效率存在一些差距,但是整体趋势高度吻合,整体数据验证了该变换器在宽输入电压范围内的稳定性和设计可靠性。

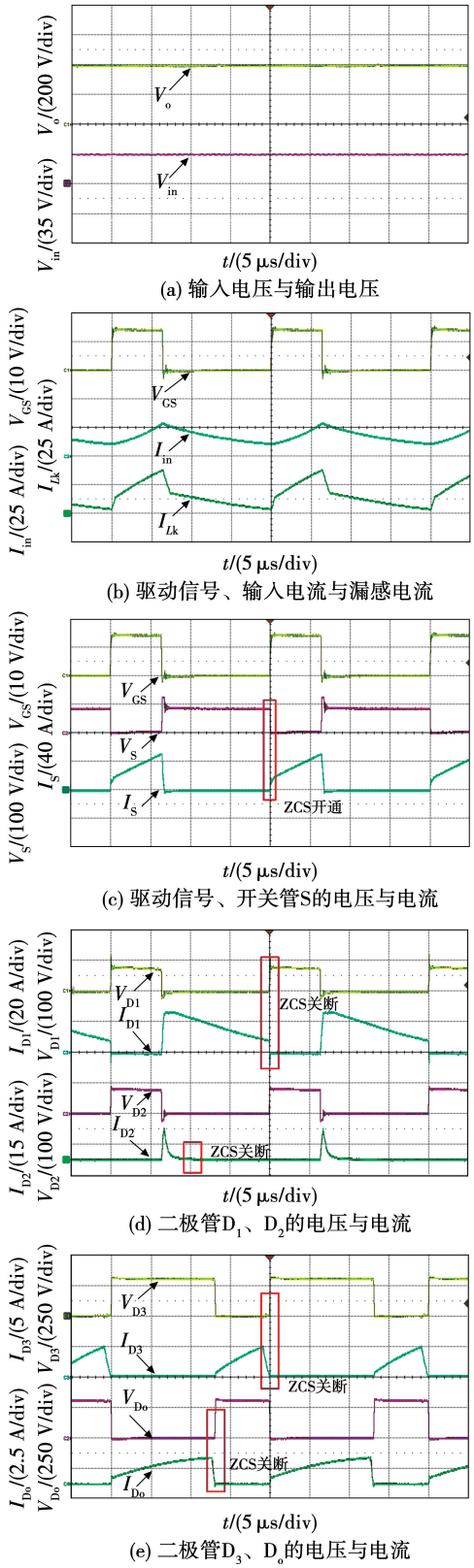
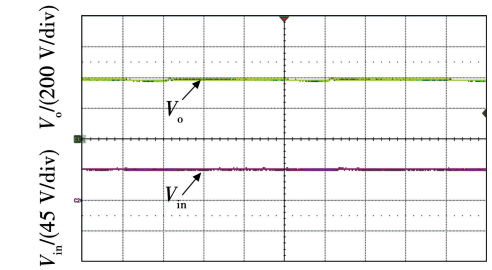
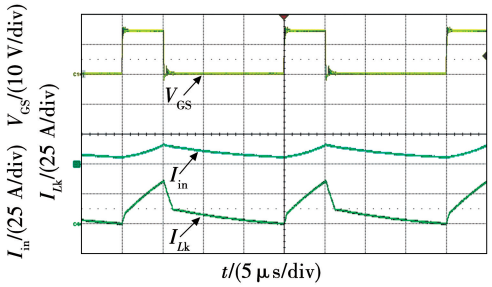


图 12 36 V 输入电压实验波形

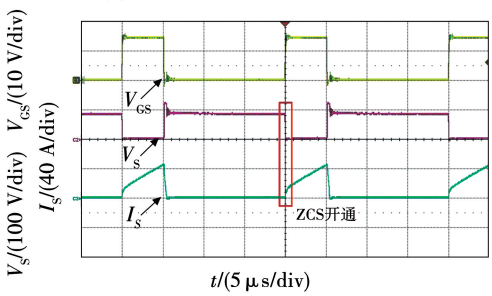
Fig. 12 36 V input voltage experimental waveforms



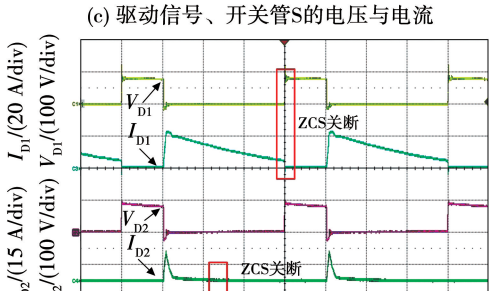
(a) 输入电压与输出电压



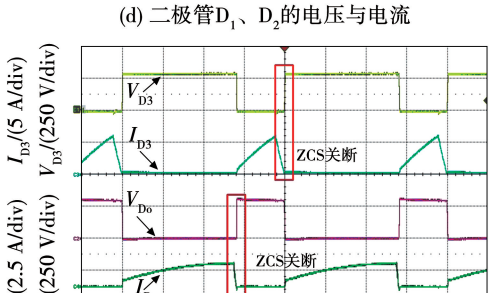
(b) 驱动信号、输入电流与漏感电流



(c) 驱动信号、开关管S的电压与电流



(d) 二极管D_1、D_2的电压与电流



(e) 二极管D_3、D_o的电压与电流

图 13　46 V 输入电压实验波形

Fig. 13　46 V input voltage experimental waveforms

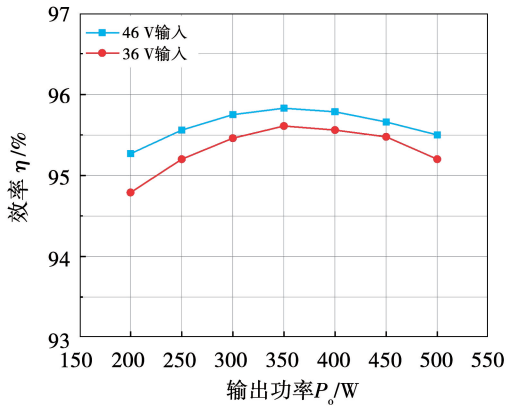


图 14　效率曲线

Fig. 14　Efficiency curves

5　结　论

通过在准 Z 源网络结构中融入 Y 源耦合电感与开关电容网络,结合三者优点提出一种集成 Y 源耦合电感的高增益准 Z 源 DC-DC 变换器(YSQZS 变换器)。详细分析 YSQZS 变换器原理与性能,并通过 400 W 实验样机验证理论分析。实验结果表明,该变换器具有以下优点:

1)高升压性能,将 Y 源耦合电感与开关电容网络结合,形成新型倍压单元,大幅度提升准 Z 源变换器的电压增益且输入输出共地。

2)Y 源耦合电感匝数比可实现低占空比下电压增益的灵活调控,可在宽输入范围、低占空比与合适匝数比下实现更高电压增益。

3)开关管在宽输入范围内可保持低电压应力,开关管和二极管均实现零电流关断,有效降低开关损耗并提升能量转换效率。同时,负载电压由 2 个电容共同输出,有效降低输出端电容电压应力,并减小电容体积。

参 考 文 献:

[1]　孙瑄璿, 荣德生, 王宁. 具有谐振软开关的高增益耦合电感组合 Boost-Zeta 变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1830.
SUN Xuanjin, RONG Desheng, WANG Ning. High step-up integrated Boost-Zeta converter with coupled inductor and resonant soft-switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1830.

[2]　周国华, 王娜, 唐熹, 等. 对称双极性输出的高增益 Boost-Sepic 四端口变换器[J]. 电机与控制学报, 2025, 29

(12):24.
ZHOU Guohua, WANG Na, TANG Xi, et al. High-gain Boost-Sepic four-port converter with symmetrical bipolar output[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(12):24.

[3] 周明珠, 刘超, 庄一展, 等. 一种非隔离型双极性输出DC-DC变换器合成方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12):3953.
ZHOU Mingzhu, LIU Chao, ZHUANG Yizhan, et al. A synthesis method for non-isolated DC-DC converters with bipolar outputs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12):3953.

[4] 房绪鹏, 郭红震, 刘坤, 等. 改进型高增益耦合电感Boost-Sepic变换器[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(8):124.
FANG Xupeng, GUO Hongzhen, LIU Kun, et al. Improved high-gain coupled inductor Boost-Sepic converter[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(8):124.

[5] HAJILOU M, GHOLAMI S, FARZANEHFARD H. Fully soft-switched high step-up quasi Z-source converter with controllable duty cycle range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6):5802.

[6] SAMADIAN A, MARANGALU M G, TARZAMNI H, et al. High step-up common grounded switched quasi Z-source DC-DC converter using coupled inductor with small signal analysis[J]. IEEE Access, 2023, 11:120516.

[7] HEIDARI M, ESTEKI M, ALI KHAJEHODDIN S, et al. A high voltage gain ZVT quasi-Z-source converter with reduced voltage stress[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11):13696.

[8] LI Haichao, CHEN Daolian. A novel high step-up nonisolated quasi-Z-source DC-DC converter with active switched inductor and switched capacitor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(5):5062.

[9] SAMADIAN A, GHAVIPANJEH MARANGALU M, TALEBIAN I, et al. Analysis of high step-up quasi-Z-source-based converter with low input current ripple[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5:632.

[10] AHMAD A, SHILUVERU K, SINGH R K. Switched capacitor-based continuous input current high step-up impedance source DC-DC converter[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(18):4204.

[11] KUMAR A, WANG Yi, PAN Xuewei, et al. Switched-LC based high gain converter with lower component count[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3):2816.

[12] SINGH A, KUMAR A, PAN Xuewei, et al. Quasi-impedance-source-network-based nonisolated high-step-up DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6):6405.

[13] SAMADIAN A, HOSSEINI S H, SABAHI M, et al. A new coupled inductor nonisolated high step-up quasi Z-source DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7):5389.

[14] 丁新平, 张胜蓝, 俞寅昊, 等. 一种新型准Z源耦合电感低纹波DC-DC变换器[J]. 电源学报, 2026, 24(1):21.
DING Xinping, ZHANG Shenglan, YU Yinhao, et al. A novel quasi-Z-source coupled inductor low-ripple DC-DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1):21.

[15] 林佳奇, 李海滨, 翁雨森, 等. 基于三绕组耦合电感的准Z源高增益DC-DC变换器[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9):369.
LIN Jiaqi, LI Haibin, WENG Yusen, et al. Three-winding coupled inductor-based high step-up quasi-Z-source DC-DC converter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(9):369.

[16] GOUDARZHAGH H, FATHI S H, ESFANDIARI S. A novel coupled winding nonisolated quasi-Z-source high step-up DC-DC converter with low input current ripple[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(4):6097.

[17] SAMADIAN A, HOSSEINI S H, SABAHI M. A new three-winding coupled inductor nonisolated quasi-Z-source high step-up DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10):11523.

[18] JIN Tao, YAN Xu, LI Haibin, et al. A new three-winding coupled inductor high step-up DC-DC converter integrating with switched-capacitor technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11):14236.

[19] 周明珠, 刘超, 庄一展, 等. 一种非隔离型软开关高增益准Z源DC-DC变换器[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14):5714.
ZHOU Mingzhu, LIU Chao, ZHUANG Yizhan, et al. A non-isolated soft-switching high-voltage-gain quasi-Z-source DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14):5714.

[20] HAJILOU M, FARZANEHFARD H. Soft-switched high step-up quasi Z-source converter with low switch voltage stress[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12):15610.

[21] 李海滨, 颜胥, 翁雨森, 等. 软开关高增益准YZ源DC-DC变换器[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11):4435.
LI Haibin, YAN Xu, WENG Yusen, et al. Soft-switched high voltage gain quasi-YZ source DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11):4435.

[22] LI Haibin, LIN Jiaqi, LIN Yunzhi, et al. A high step-up hybrid Y-source-quasi-Z source DC-DC converter for renewable energy applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9):10681.

(编辑:邱赫男)