

基于 GaN 的高增益微型光伏逆变器*

林逸垒¹⁾ 杨翠^{2)†} 王新怀^{3)‡} 毛维^{1)††} 葛崇志¹⁾于龙洋¹⁾ 张春福¹⁾ 张进成¹⁾ 郝跃¹⁾

1) (西安电子科技大学集成电路学部, 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

3) (西安电子科技大学电子工程学院, 雷达探测感知全国重点实验室, 西安 710071)

(2024 年 12 月 30 日收到; 2025 年 2 月 22 日收到修改稿)

微型逆变器以其模块化、灵活等优势, 近年来已被广泛应用于分布式光伏发电系统中. 然而受拓扑结构和传统功率器件性能的影响, 目前微型逆变器拓扑的电压增益低、可靠性差等问题仍制约着微型逆变器的进一步发展. 为此, 本文提出并研制了一种基于氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 的增强型开关电感准 Z 源逆变器. 该逆变器首次采用了辅助升压单元融合开关电感准 Z 源网络的新型拓扑结构, 显著提高了低直通占空比下的电压增益, 同时降低了开关器件电压应力. 此外, 采用 GaN HEMT 作为逆变器功率开关器件, 设计了专用负压关断驱动电路, 将功率管开关频率从传统的 10 kHz 提高到 100 kHz, 减小了电感及其他无源器件的体积. 经样机系统测试, 在直通占空比为 0.2 时, 逆变器实际升压因子达到 5.75, 较其他开关电感准 Z 源型逆变器拓扑提高了 15%. 本研究在现有拓扑结构的基础上有效地提高了电压增益, 结合 GaN HEMT 的应用, 为高效、紧凑的微型逆变器设计提供了新的技术路径.

关键词: 微型光伏逆变器, 开关电感准 Z 源逆变器, GaN 高电子迁移率晶体管**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** 10.7498/aps.74.20241798**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241798

1 引言

近年来, 技术进步带动成本下降, 加之现代电力系统对灵活性的需求, 推动了分布式光伏发电系统的全球应用^[1-3]. 在户用屋顶、建筑一体化光伏等分布式光伏发电场景中, 系统需在复杂光照条件下实现高效率能量采集与高可靠性并网, 这对功率转换装置提出了小型化、低损耗、抗阴影扰动等核心要求. 作为分布式光伏发电系统的核心组件, 微型

逆变器因其模块化布署和高可靠性, 能够满足上述要求, 因此在户用光伏、工商业分布式光伏以及微电网应用中展现出独特的优势. 在众多微型逆变器当中, 准 Z 源拓扑结构凭借其优异的性能表现, 被认为是最具发展前景的结构之一^[4,5].

2003 年 Peng^[6] 首次提出了 Z 源逆变器 (Z-source inverter, ZSI) 拓扑, 克服了传统电压源/电流源逆变器的理论局限性, 但 ZSI 拓扑存在电压增益受限、开关器件电压应力高以及浪涌电流大等缺陷^[7,8]. 为此, Li 等^[9] 提出了准 Z 源逆变器 (quasi-Z-source

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3604303, 2022YFB3604300) 和国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (批准号: 62421005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ycx503@126.com

‡ 通信作者. E-mail: xinhuiwang@xidian.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: mwxdian@126.com

inverter, qZSI) 拓扑, 相比 ZSI, qZSI 具有更低的电压电流应力和启动冲击电流, 适合高电压增益的应用场景^[10]. 鉴于这些优势, 高增益 qZSI 逆变器的研究对未来分布式光伏发电系统的进一步应用具有重要意义.

为了进一步提高 qZSI 的电压增益, 学者提出开关电感结构^[11,12]: 通过开关过程中的串联充电、并联放电, 从而提高电压增益. 基于此, Zhu 等^[13]提出了开关电感 Z 源逆变器 (switched-inductor Z-source inverter, SL-ZSI); Nguyen 等^[14]提出了开关电感准 Z 源逆变器 (switched-inductor quasi-Z-source inverter, SL-qZSI). Zhu 等^[15]在 qZSI 中引入了有源开关电感的概念, 但同时也伴随着一定的控制复杂性和开关损耗. 2021 年, Karbalaee 和 Mardaneh^[16]在开关电感单元的结构中融入开关电容结构, 提出开关电感-电容准 Z 源逆变器 (switched-inductor-capacitor quasi-Z-source inverter, SLC-qZSI). Bolaghi 等^[17]使用一个开关电容-电感单元代替 qZSI 中的电感元件, 一定程度上提高了电压增益. 尽管现有研究取得了显著进展, 但目前需要在兼顾系统效率和可靠性的前提下进一步提高拓扑升压能力.

此外, 氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN high electron mobility transistor, GaN HEMT) 器件对比硅基器件具备更高的开关速度、更低的开关损耗、更小的体积以及更强的耐高温能力^[18-21]. 研究表明, 在逆变器中使用 GaN HEMT 器件能获得较硅基器件更高的效率、开关频率及更低的系统功率损耗^[22,23]. 因而 GaN HEMT 有望取代硅 MOSFET 和 IGBT 以进一步提高微型光伏逆变器性能.

本文在传统 qZSI 拓扑基础上提出了一种新型增强型开关电感准 Z 源逆变器 (enhanced switched-inductor quasi-Z-source inverter, ESL-qZSI) 拓扑, 通过理论模型计算和 MATLAB/Simulink 仿真, 验证了其在微型逆变器中的功率特性. 基于设定参数选定了 GaN HEMT 器件, 并设计了微型逆变器实验样机, 最终搭建了单相微型逆变器系统实验平台并完成系统测试. 本研究为微型光伏逆变器的实际设计与应用提供了一种高可行性的解决方案.

2 ESL-qZSI 拓扑模型

2.1 理论模型

ESL-qZSI 拓扑结构如图 1 所示. 输入为直流

电压源, 辅助升压单元、增强型开关电感升压单元与准 Z 源单元结合, 形成一个集成升压阻抗网络, 该阻抗网络与后级逆变桥相连接, 最后经滤波器滤波输出后连接至负载.

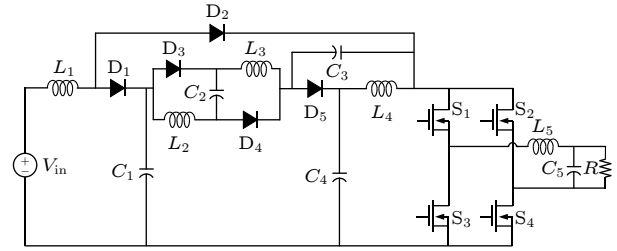


图 1 ESL-qZSI 拓扑

Fig. 1. ESL-qZSI topology.

图 2 和图 3 是 ESL-qZSI 逆变器的两个工作模式等效电路图. 根据逆变桥直通、非直通状态的切换, 二极管 D_1 , D_2 , D_3 , D_4 和 D_5 发生交替导通或关断, 因而电路的工作状态也随之变化.

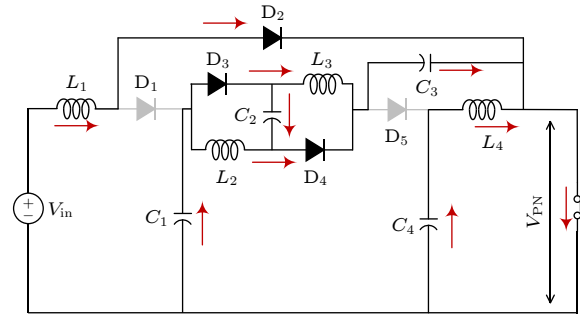


图 2 ESL-qZSI 拓扑的直通模式等效电路

Fig. 2. Equivalent circuits of ESL-qZSI topology in shoot-through states.

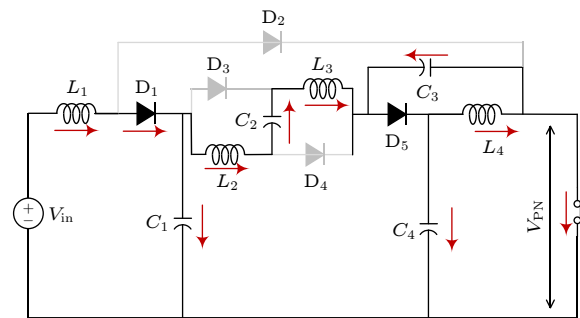


图 3 ESL-qZSI 拓扑的非直通模式等效电路

Fig. 3. Equivalent circuits of ESL-qZSI topology in non-shoot-through states.

如图 2 所示, 当单相逆变桥在直通状态时, 上下两个开关对 (S_1 和 S_3 , S_2 和 S_4) 同时导通, 二极管 D_1 , D_5 关断; 二极管 D_2 , D_3 和 D_4 导通; 电容 C_1 , C_2 和 C_3 串联, 一起对电感 L_2 和 L_3 充电; 电容 C_4

对电感 L_4 充电.

如图 3, 当单相逆变桥在非直通状态时, 电路接入交流侧负载, 二极管 D_1, D_5 导通; 二极管 D_2, D_3 和 D_4 关断. 电压源 V_{in} 与电感 L_1 串联, 在回路中对 C_1 和 C_4 充电; 电压源与 L_1, L_2, C_2, L_3 和 L_4 串联对负载供电; 电感 L_4 对电容 C_3 进行充电. 最后通过单相逆变桥, 准 Z 源网络对交流侧负载实现持续供电.

对 ESL-qZSI 拓扑的升压因子 B 以及电压增益 G 进行计算: 设定逆变桥直流侧直流链电压为 V_{PN} ; 设定电感 L_1, L_2, L_3, L_4 的两端电压分别为 $V_{L1}, V_{L2}, V_{L3}, V_{L4}$; 设定电容 C_1, C_2, C_3, C_4 两端的电压分别为 $V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}$; 设定单相逆变桥单元的直通占空比为 D ; 开关周期为 T_s .

根据图 2 所示直通状态下的等效电路, 可得

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{in}, & V_{L2} = V_{L3} = V_{C2}, \\ V_{L3} = V_{C1} + V_{C3}, & V_{L4} = V_{C4}. \end{cases} \quad (1)$$

直通状态下, 直流链电压 V_{PN} 为 0 V, 逆变桥的直通时间为 DT_s , 根据图 3 所示逆变状态下的工作模式, 可得

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{in} - V_{C1}, \\ V_{L2} + V_{L3} = V_{C1} + V_{C2} - V_{C4}, \\ V_{L2} = V_{L3}, & V_{L4} = -V_{C3}. \end{cases} \quad (2)$$

直流链电压 V_{PN} 为电容 C_3 的两端电压 V_{C3} 与电容 C_4 的两端电压 V_{C4} 之和:

$$V_{PN} = V_{C3} + V_{C4} \quad (3)$$

非直通状态下, 逆变桥的非直通时间为 $(1-D) \cdot T_s$, 联立 (1) 式和 (2) 式, 对电感 L_1, L_2, L_3, L_4 分别运用伏秒守恒原理, 可得

$$\begin{cases} DV_{in} + (1-D)(V_{in} - V_{C1}) = 0, \\ DV_{C2} + (1-D) \frac{(V_{C1} + V_{C2} - V_{C4})}{2} = 0, \\ D(V_{C1} + V_{C3}) + (1-D) \frac{(V_{C1} + V_{C2} - V_{C4})}{2} = 0, \\ DV_{C4} + (1-D)(-V_{C3}) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

根据 (4) 式可得出电容 C_1, C_2, C_3 和 C_4 的两端电压 $V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}$ 分别与直流电压源电压 V_{in} 之间的关系式为

$$\begin{cases} V_{C1} = \frac{1}{1-D} V_{in}, & V_{C2} = \frac{1}{1-3D} V_{in}, \\ V_{C3} = \frac{2D}{1-4D+3D^2} V_{in}, & V_{C4} = \frac{2}{1-3D} V_{in}. \end{cases} \quad (5)$$

联立 (3) 式和 (5) 式可得出本逆变器的升压因子 B 为

$$B = \frac{V_{PN}}{V_{in}} = \frac{2}{1-4D+3D^2}. \quad (6)$$

2.2 模型性能分析

2.2.1 逆变器升压能力

为了对比分析, 本文同时给出了 SL-ZSI, SLC-qZSI 两种主流拓扑结构逆变器的特性. 相比 SL-ZSI 与 SLC-qZSI 拓扑结构逆变器, 本文提出的 ESL-qZSI 拓扑结构逆变器的创新点是嵌入了辅助升压单元, 可与后级准 Z 源网络形成协同升压机制, 提高拓扑升压能力. SL-ZSI, SLC-qZSI 与 ESL-qZSI 的升压因子分别如下:

$$\begin{cases} B_{SL-ZSI} = \frac{1+D}{1-3D}, & B_{SLC-qZSI} = \frac{1}{1-4D}, \\ B_{ESL-qZSI} = \frac{2}{1-4D+3D^2}. \end{cases} \quad (7)$$

逆变器工作时, 直通占空比与调制系数的关系为 $D = 1-M$, 且有输出电压增益 $G = MB$. 代入 (7) 式后, 可得到 G 与 D 的关系式如下:

$$\begin{cases} G_{SL-ZSI} = \frac{M(2-M)}{3M-2}, \\ G_{SLC-qZSI} = \frac{M}{4M-3}, \\ G_{ESL-qZSI} = \frac{2}{3M-2}. \end{cases} \quad (8)$$

升压因子和直通占空比对逆变器性能有着重要影响, 在相同的升压因子下, 更低的直通占空比, 可以减少半导体损耗, 提高逆变器效率^[24]. 图 4 为 SL-ZSI, SLC-qZSI, ESL-qZSI 三种拓扑结构的升压因子 B 和电压增益 G 的变化趋势对比. 可以观察到 ESL-qZSI 拓扑有最高的 B 和 G , 当直通占空比 $D = 0.2$, 调制系数 $M = 0.8$ 时, $B = 6.25$, $G = 5$. 与 SL-ZSI 相比, ESL-qZSI 的升压能力提升了 108%; 与 SLC-qZSI 相比, 提升了 25%. 该结果验证了 ESL-qZSI 拓扑在理论升压能力上的优越性.

2.2.2 元器件电压应力

在输出电压直通、占空比和负载等条件相同的情况下, 本节对 SL-ZSI, SLC-qZSI, ESL-qZSI 三种逆变器拓扑结构的开关器件 (S_1, S_2, S_3, S_4) 的电压应力进行比较. 根据 (8) 式可得占空比 D 关于

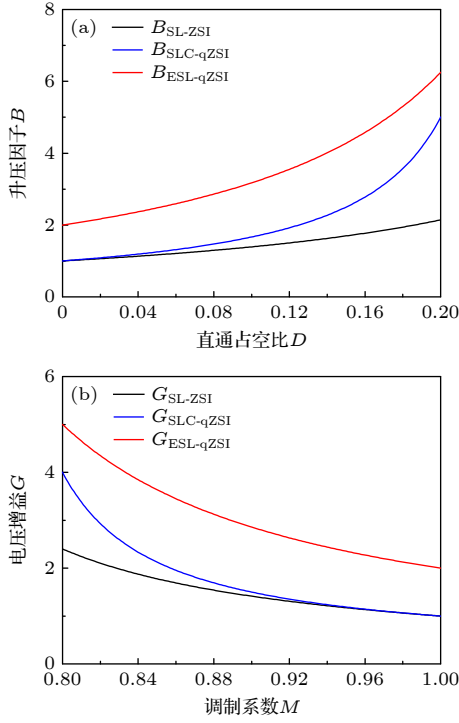


图 4 不同拓扑升压能力对比 (a) 升压因子 B ; (b) 电压增益 G

Fig. 4. Boosting capability comparison of different topologies: (a) Boost factor B ; (b) voltage gain G .

电压增益 G 的关系式为

$$\begin{cases} D_{SL-ZSI} = \frac{3G - \sqrt{9G^2 - 4G + 4}}{2}, \\ D_{SLC-qZSI} = \frac{G - 1}{4G - 1}, \\ D_{ESL-qZSI} = \frac{G - 2}{3G}. \end{cases} \quad (9)$$

根据 (7) 式及 (9) 式可得到升压因子 B 和电压增益 G 的关系式为

$$\begin{cases} B_{SL-ZSI} = \frac{2G}{2 - 3G + \sqrt{9G^2 - 4G + 4}}, \\ B_{SLC-qZSI} = \frac{4G - 1}{3}, \quad B_{ESL-qZSI} = \frac{3G^2}{2G + 2}. \end{cases} \quad (10)$$

(10) 式所得的 B 关于 G 的表达式两边同乘以 V_{in} , 即可得到开关器件电压应力与输出电压增益 G 之间的关系, 关系式如下:

$$\begin{cases} V_{SW_SL-ZSI} = \frac{2G}{2 - 3G + \sqrt{9G^2 - 4G + 4}} V_{in}, \\ V_{SW_SLC-qZSI} = \frac{4G - 1}{3} V_{in}, \\ V_{SW_ESL-qZSI} = \frac{3G^2}{2G + 2} V_{in}. \end{cases} \quad (11)$$

图 5 展示了三种逆变器拓扑开关器件的电压应力对比, 可以观察到: ESL-qZSI 拓扑具有最低的开关器件电压应力. 更低的应力减少了在实际应用场景中逆变器的热损耗, 提高了逆变器的可靠性和热稳定性. 系统中电容器件的电压应力如 (5) 式所示, 二极管器件的电压应力不再赘述推导. ESL-qZSI 完整拓扑特性在表 1 中直接给出.

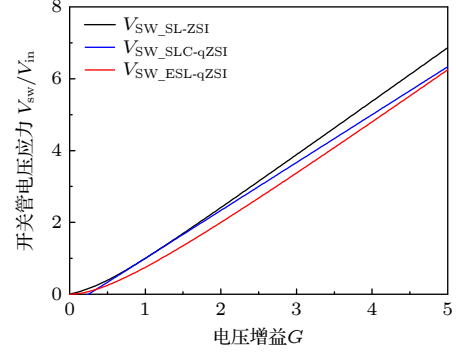


图 5 不同拓扑开关器件电压应力对比

Fig. 5. Switching voltage stress comparison of different topologies.

表 1 ESL-qZSI 拓扑特性

Table 1. Characteristics of ESL-qZSI topology.

参数名称	参数值
升压因子(B)	$\frac{2}{1 - 4D + 3D^2}$
电压增益(G)	$\frac{2}{3M - 2}$
开关管电压应力 V_{sw}/V_{in}	$\frac{3G^2}{2G + 2}$
C_1 电压应力 V_{C1}/V_{in}	$\frac{1}{1 - D}$
C_2 电压应力 V_{C2}/V_{in}	$\frac{1}{1 - 3D}$
C_3 电压应力 V_{C3}/V_{in}	$\frac{2D}{1 - 4D + 3D^2}$
C_4 电压应力 V_{C4}/V_{in}	$\frac{2}{1 - 3D}$
D_1/D_2 电压应力 V_{D1}/V_{in}	$\frac{2}{1 - 4D + 3D^2}$
$D_3/D_4/D_5$ 电压应力 V_{D3}/V_{in}	$\frac{1 - D}{1 - 4D + 3D^2}$

3 GaN HEMT 器件选型适配

本次设计的实验样机选用了英飞凌 (Infineon) 生产的 CoolGaN 系列 IGOT60R070D1 器件, 该器件具备 600 V 的耐压能力, 漏源最大连续电流 31 A, 导通内阻为 70 mΩ. 与传统硅基器件相比,

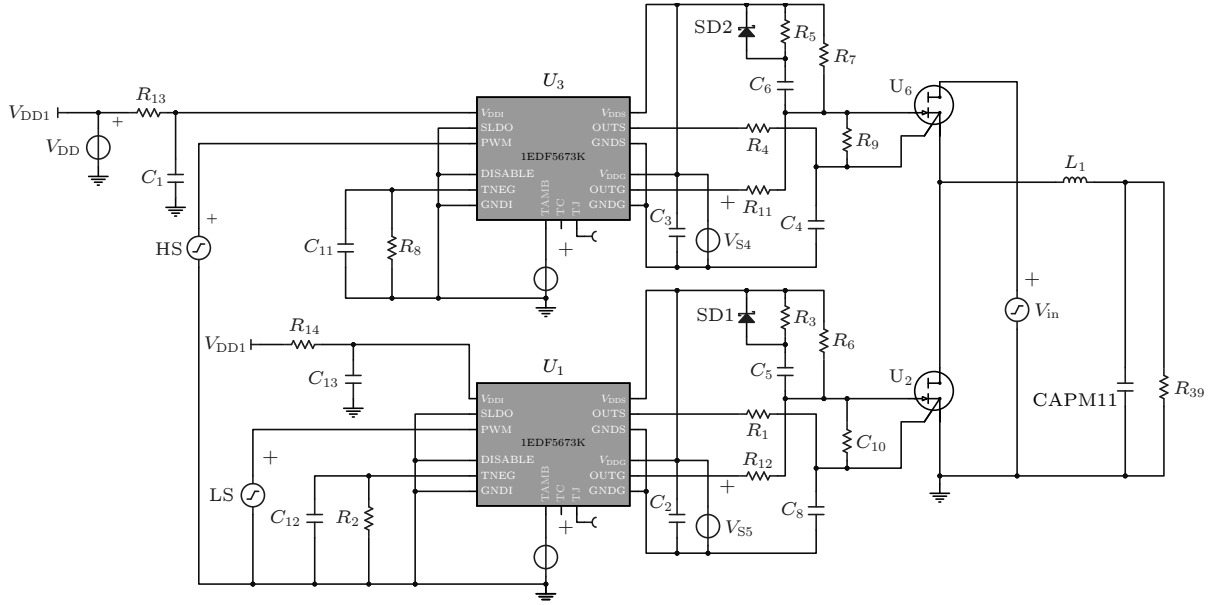


图 6 负压关断驱动电路

Fig. 6. Driver circuit with negative voltage turn-off.

IGOT60R070D1 具备更快的开关速度,使微型光伏逆变器能在高频下运行,从而使用更小的储能和滤波元件.此外,由于 GaN HEMT 无反向恢复电荷,可有效地降低高频操作中的开关损耗和电磁干扰.

GaN HEMT 具有更高开关频率,可能带来更大的电磁干扰和寄生效应挑战,导致复杂的非线性行为及栅极击穿等问题^[25,26].因此,微型光伏逆变系统的优化设计至关重要.在实际中,上述问题可以从电路设计、布局优化以及驱动策略等方面解决.在本文设计中,将 GaN HEMT、驱动芯片和去耦电容的布局尽量紧凑,以减少回路电感;尽可能缩短驱动信号与 GaN HEMT 栅极之间的走线长度,并采用了差分对布局.此外,本文还采用了负压关断驱动电路,抑制米勒电容引起的寄生导通.

基于英飞凌公司的 1EDF5673K 驱动芯片和 IGOT60R070D1 器件,本文设计了一种与该器件性能匹配的半桥 BUCK 负压关断驱动电路,如图 6 所示.采用英飞凌公司推荐的电路仿真工具 Infineon designer,针对驱动电路输出特性的稳定性、响应速度开展了电路参数的优化设计,表 2 给出了驱动电路关键参数的优化结果.最后基于该模型在样机上实现了模块设计.

表 2 驱动电路关键参数

Table 2. Key parameters of driver circuit.

参数名称	R_7/Ω	R_6/Ω	R_4/Ω	C_6/nF	C_3/nF	C_4/nF
参数值	470	10	3.3	3	100	1

4 实验结果及讨论

4.1 仿真验证

表 3 提供了系统主要仿真参数指标,这些指标为后续系统仿真和实物测试提供了参考.在 MATLAB/Simulink 软件中基于 ESL-qZSI 拓扑结构进行逆变器系统建模与仿真.控制方法采用基于空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 的单相 SVPWM 控制算法^[27],在同等开关频率下减少逆变电源的开关控制损耗.

表 3 ESL-qZSI 实验参数

Table 3. Experimental parameters of ESL-qZSI.

参数名称	参数值
输入电压/V	64
开关频率/kHz	100
准 Z 源网络电容/ μF	100
准 Z 源网络电感/mH	0.5
LC 滤波电容/ μF	20
LC 滤波电感/mH	1
直通占空比 D	0.2
基准频率/Hz	50

图 7 为系统直流链电压仿真结果,在已设定参数条件下,显示了直流链电压大小为 380 V,对应的升压因子 B 为 5.94.图 8 为经滤波后的逆变器输出波形.由图可知,稳定后的输出正弦电压幅值

$V_{\text{out, peak}} = 294 \text{ V}$, 对应电压输出增益 $G \approx 4.59$. 波形总谐波失真 (total harmonic distortion, THD) 为 1.69%. 以上仿真结果符合理论计算.

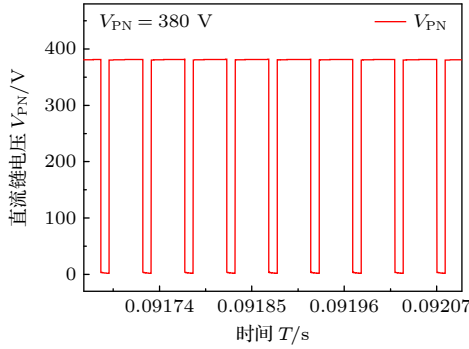


图 7 直流链电压仿真波形

Fig. 7. Simulation result of DC-link voltage waveform.

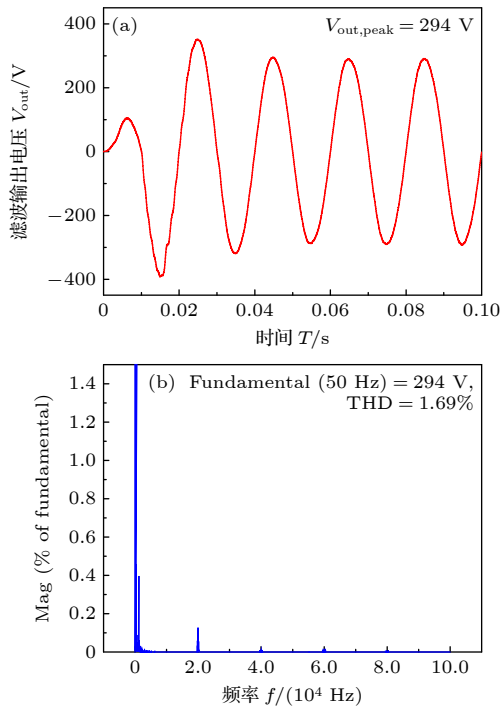


图 8 仿真滤波输出 (a) 电压波形; (b) THD 分析

Fig. 8. Simulation result of filter output: (a) Voltage waveform; (b) analysis of THD.

图 9 为电容电压应力仿真结果. 仿真中, 各电容的电压应力在 0.05 s 后逐渐达到稳态, 随后由于拓扑结构的动态特性而在一定范围内波动. C_4 的电压应力最高, 约为 300 V; 电容 C_1 和 C_3 电压应力较低, 均在 80 V 左右; C_2 的电压应力介于 C_4 和 C_1, C_3 之间, 约为 150 V. 仿真结果与 (5) 式的计算值基本符合, 验证了 ESL-qZSI 拓扑理论结构的正确性.

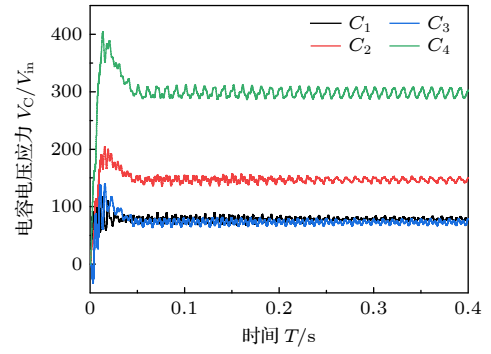


图 9 ESL-qZSI 电容电压应力仿真结果

Fig. 9. Capacitor voltage stress simulation results of ESL-qZSI.

4.2 实验测试

基于样机搭建了系统级实验测试平台, 平台主要设备包括: ESL-qZSI 样机、TMS320F28335DSP 控制器、负载、直流电源以及示波器, 如图 10 所示. 验证以 GaN HEMT 器件为基础设计的驱动电路, 其电路使用 100 kHz 的 PWM 信号进行驱动, 测量系统工作时驱动芯片输入端的信号. 波形结果如图 11 所示.



图 10 ESL-qZSI 系统测试平台

Fig. 10. ESL-qZSI system test platform.

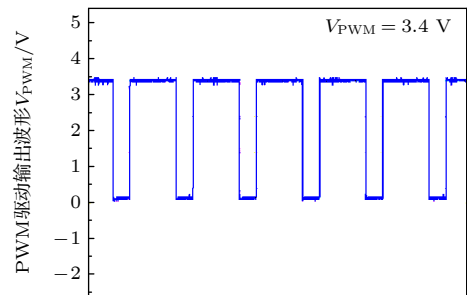


图 11 系统驱动波形

Fig. 11. Experimental result of system drive waveform.

逆变器直流链电压测试波形如图 12 所示, 其输出值稳定在 368 V, 计算得实际升压因子 B 为 5.75, 能够实现较高增益. 图 13 为逆变器输出电压

测量波形图, 可知输出正弦电压的幅值为 272 V, 有效值为 188 V, 电压频率为 50 Hz, 输入电压为 64 V, 输出波形平滑无畸变, 测得输出功率 180 W, 效率为 90.5%. 对逆变器输出波形进行 FFT 分析, 结果如图 14 所示, 可知逆变器输出电压的 THD 为 2.57%, 符合并网标准.

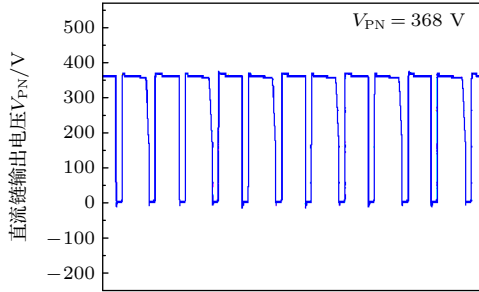


图 12 直流链电压实测波形

Fig. 12. Experimental result of DC-link voltage waveform.

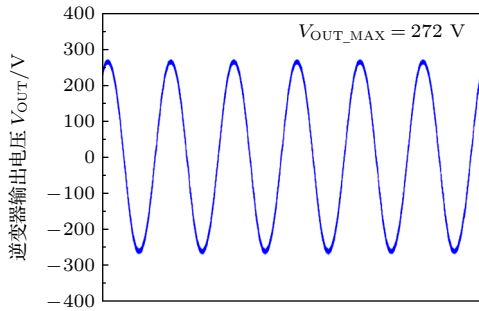


图 13 逆变器输出电压实测波形

Fig. 13. Experimental result of inverter output voltage waveform.

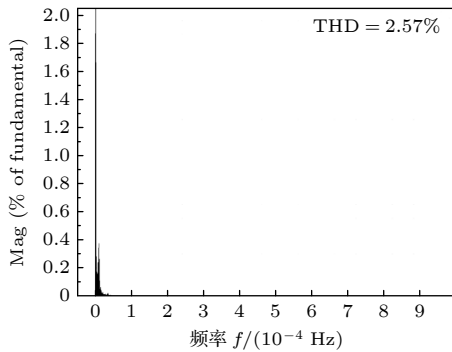


图 14 逆变器输出波形 THD 分析

Fig. 14. THD analysis of inverter output voltage.

表 4 展示了 SL-ZSI, SLC-qZSI 和 ESL-qZSI 三种拓扑的典型结果对比. 由表 4 可见, 在直通占空比 D 取值 0.2 附近时, ESL-qZSI 的样机测试得到的升压因子 B , 相比 SLC-qZSI 样机测试得到的升压因子 B 提高了 15 %, 相比 SL-ZSI 理论计算

得到的升压因子 B 提高了 91%, 说明了 ESL-qZSI 高增益拓扑结构的优越性. 从表 4 中还可以看到, 相比于 SLC-qZSI 拓扑, 本论文 ESL-qZSI 拓扑具有更高的效率, 展示出了良好的效率优势. 此外, GaN HEMT 器件较高的电子迁移率使得其在开关操作中能快速响应, 减小了开关过程中的延迟; 同时无反向恢复电荷的特性使其在高频率工作下不会产生显著的失真, 这些优点将系统的开关频率由传统的 10 kHz 提高到了 100 kHz.

表 4 不同拓扑的典型结果对比

Table 4. Typical results of different inverter topologies.

参数	逆变器拓扑类型			
	SL-ZSI		SLC-qZSI	ESL-qZSI
数据类型	样机 测试结果	理论 计算结果	样机 测试结果	样机 测试结果
输入电压 V_{in}/V	36	36	80	64
直通占空比 D	0.3	0.2	0.206	0.2
调制系数 M	0.7	0.8	0.794	0.8
升压因子 B	13	3	5	5.75
开关频率/kHz	10	10	13.3	100
效率/%	—	—	88.5	90.5

5 结 论

本文提出了一种基于新型宽禁带半导体器件 GaN HEMT 的增强型开关电感准 Z 源拓扑逆变器方案, 详细地阐述了拓扑的工作原理, 进行了模型的仿真验证以及实验测试, 并与其他多种拓扑进行对比. 结果验证了该拓扑在解决传统拓扑电压增益低, 开关器件电压应力高等问题上的有效性. 此外, 使用 GaN HEMT 替代传统功率开关器件, 将系统工作频率提高到 100 kHz, 有效地降低了开关管功率损耗, 同时减小了后级滤波元件体积. 综上所述, 该基于 GaN HEMT 的微型逆变器拓扑改进方案适用于高增益需求的微型光伏逆变器应用场景, 为未来分布式发电系统中的微型逆变器提供了更高效、可靠的技术选择, 有望在家庭微电网、户外分布式发电等应用场景中展现出重要价值.

参考文献

- [1] Hmad J, Houari A, Bouzid A E M, Saim A, Trabelsi H 2023 *Energies* **16** 5062
- [2] Iweh C D, Gyamfi S, Tanyi E, Effah-Donyina E 2021 *Energies* **14** 5375

- [3] Wang Q, Zhao B, Sun H D 2020 *IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* Wuhan, China, 2020 p1407
- [4] Priyadarshi N, Padmanaban S, Ionel D M, Mihet-Popa L, Azam F 2018 *Energies* **11** 2277
- [5] Monjo L, Sainz L, Mesas J J, Pedra J 2021 *Energies* **14** 508
- [6] Peng F Z 2003 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **39** 504
- [7] Yuan J, Yang Y H, Blaabjerg F 2020 *Energies* **13** 1390
- [8] Samanbakhsh R, Koochi P, Ibanez F M, Martin F, Terzija V 2023 *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **147** 108819
- [9] Li Y, Anderson J, Peng F Z, Liu D C 2009 *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* Washington, DC, USA, 2009 p918
- [10] Rajan V R, Premalatha L 2017 *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* **8** 325
- [11] Axelrod B, Berkovich Y, Ioinovici A 2008 *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* **55** 687
- [12] Liu H C, Yang S, Wang G L, Li F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150505 (in Chinese) [刘洪臣, 杨爽, 王国立, 李飞 2013 *物理学报* **62** 150505]
- [13] Zhu M, Yu K, Luo F L 2010 *IEEE Trans. Power Electron.* **25** 2150
- [14] Nguyen M K, Lim Y C, Cho G B 2011 *IEEE Trans. Power Electron.* **26** 3183
- [15] Zhu X Q, Zhang B, Qiu D Y 2018 *IET Power Electron.* **11** 1774
- [16] Karbalaee A R, Mardaneh M 2021 *IEEE Ind. Electron. Mag.* **15** 4
- [17] Bolaghi J A, Taheri A, Babaei M H, Gholami M, Harajchi S 2023 *IETE J. Res.* **70** 4231
- [18] Chaudhary O S, Denaï M, Refaat S S, Pissanidis G 2023 *Energies* **16** 6689
- [19] Zhang Y J, Li J G, Wang J H, Zheng T Q, Jia P Y 2022 *Energies* **15** 7791
- [20] Cheng Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 236502 (in Chinese) [程哲 2021 *物理学报* **70** 236502]
- [21] Wang S, Ge C, Xu Z Y, Cheng A Q, Chen D J 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 177101 (in Chinese) [王帅, 葛晨, 徐祖银, 成爱强, 陈敦军 2024 *物理学报* **73** 177101]
- [22] Morita T, Tamura S, Anda Y, Ishida M, Uemoto Y, Ueda T, Tanaka T, Ueda D 2011 *26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* Fort Worth, TX, USA, 2011 p481
- [23] Zhao C W, Trento B, Jiang L, Jones E A, Liu B, Zhang Z Y, Costinett D, Wang F, Tolbert L M, Jansen J F, Kress R, Langley R 2016 *IEEE J. Emerging Sel. Top. Power Electron.* **4** 824
- [24] Jagan V, Ullemgondla G, Thati D, Salveru B, Ongole D, Banoth S 2024 *3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)* Mathura, India, 2024 p475
- [25] Xie R L, Hao X, Wang Y, Yang X, Huang L, Wang C, Yang Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 120510 (in Chinese) [谢瑞良, 郝翔, 王跃, 杨旭, 黄浪, 王超, 杨月红 2014 *物理学报* **63** 120510]
- [26] Liao Z X, Luo X S, Huang G X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 130503 (in Chinese) [廖志贤, 罗晓曙, 黄国现 2015 *物理学报* **64** 130503]
- [27] Yi L Q, Gao K C 2008 *Power Electron.* **42** 50 (in Chinese) [易龙强, 郜克存 2008 *电力电子技术* **42** 50]

New high-gain micro photovoltaic inverter based on GaN^{*}

LIN Yilei¹⁾ YANG Cui^{2)†} WANG Xinhuai^{3)‡} MAO Wei^{1)††} GE Chongzhi¹⁾
YU Longyang¹⁾ ZHANG Chunfu¹⁾ ZHANG Jincheng¹⁾ HAO Yue¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology,*

Faculty of integrated circuit, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (*School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)*

3) (*National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, School of Electronic Engineering,*

Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 30 December 2024; revised manuscript received 22 February 2025)

Abstract

Microinverters have been widely used in distributed photovoltaic (PV) systems in recent years due to their modularity and flexibility. However, the current development of microinverter topologies faces significant challenges, such as low voltage gain and limited reliability. To solve these problems, an enhanced switched-inductor quasi-Z-Source inverter (ESL-qZSI) based on gallium nitride high electron mobility transistor (GaN HEMT) is proposed in this work. The proposed inverter introduces a novel topology that integrates an auxiliary boost unit with a switched-inductor quasi-Z-source network. This topology significantly enhances the voltage gain at low shoot-through duty ratios and reduces the voltage stress across the switching device. Additionally, the use of GaN HEMT as power switching components increases the switching frequency from the traditional 10 kHz to 100 kHz, in which a specialized negative turn-off gate driver circuit is designed to adapt the characteristics of the GaN HEMT and to ensure reliable switching operation. This increase in frequency reduces the size of passive components, such as inductors. Experimental results show that the proposed inverter achieves a boost factor of 5.75 at a shoot-through duty ratio of 0.2, which indicates that its performance is improved by 15% and 91% greater than the traditional switched-inductor-capacitor quasi-Z-source inverter (SLC-qZSI) and the traditional switched-inductor Z-source inverter (SL-ZSI), respectively. These results confirm that the proposed inverter enhances the voltage gain of existing topologies. Besides, compared with SLC-qZSI, the proposed inverter can obtain a higher efficiency of 90.5%, which shows the advantage of efficiency. In conclusion, the proposed ESL-qZSI with GaN HEMT provides a hopeful solution for high-efficiency and compact microinverter systems in photovoltaic applications.

Keywords: micro photovoltaic inverter, switched-inductor quasi-Z-source inverter, GaN highelectron mobility transistor

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: [10.7498/aps.74.20241798](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241798)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241798](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241798)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2022YFB3604303, 2022YFB3604300) and the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62421005).

† Corresponding author. E-mail: ycxd503@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: xinhuiwang@xidian.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: mwxidian@126.com

基于GaN的高增益微型光伏逆变器

林逸垒 杨翠 王新怀 毛维 葛崇志 于龙洋 张春福 张进成 郝跃

New high-gain micro photovoltaic inverter based on GaN

LIN Yilei YANG Cui WANG Xinhuai MAO Wei GE Chongzhi YU Longyang ZHANG Chunfu
ZHANG Jincheng HAO Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 100201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241798

CSTR: 32037.14.aps.74.20241798

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241798>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管的栅极电容模型

Gate capacitance model of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2021, 70(21): 217301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210700>

一种单相H桥光伏逆变器混沌控制方法

A chaos control method of single-phase H-bridge photovoltaic inverter

物理学报. 2021, 70(2): 020501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200982>

重离子辐射对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管低频噪声特性的影响

Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

物理学报. 2024, 73(3): 036103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20221360>

氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计

Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability

物理学报. 2022, 71(3): 037202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211265>

石墨烯晶体管优化制备工艺在单片集成驱动氮化镓微型发光二极管中的应用

Applications of graphene transistor optimized fabrication process in monolithic integrated driving gallium nitride micro-light-emitting diode

物理学报. 2021, 70(19): 197801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210122>