

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.121

中图分类号: TM464

文献标志码: A

# 一种新型开关电容准谐振多电平逆变器

梁国壮<sup>1</sup>, 聂辰浩<sup>1</sup>, 田涵雷<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学电气工程学院, 石家庄 050018; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 针对现有多电平逆变器充电过程存在电流尖峰和电压波动问题, 提出一种新型准谐振五电平逆变器。简言之, 采用载波层叠脉宽调制方案, 将开关电容技术与传统五电平逆变器相结合, 减小了前级承受的累加电平, 实现了五电平输出; 并在电容充电过程与串接电感谐振, 消除了电流尖峰和电压波动, 同时减轻了电容的发热问题, 延长电路的使用寿命。最后, 对所提结构进行了仿真验证, 其结果证明了所提逆变器结构方案的正确性和可行性。

**关键词:** 多电平逆变器; 开关电容; 载波层叠脉宽调制; 准谐振

## Novel Switched Capacitor Quasi-resonant Multi-level Inverter

LIANG Guozhuang<sup>1</sup>, NIE Chenhao<sup>1</sup>, TIAN Hanlei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aimed at the problems of current spikes and voltage fluctuations in the charging process of existing multi-level inverters, a novel quasi-resonant five-level inverter is proposed in this paper. A carrier-stacked pulse width modulation scheme is adopted, and the switched capacitor technology is combined with the traditional five-level inverter, which reduces the accumulated level at the previous stage and realizes the output of five-level voltage. In addition, the capacitor charging process and the series inductance resonate to eliminate current spikes and voltage fluctuations, while reducing the heating problem of the capacitor and prolonging the service life of the circuit. Finally, simulation verification is carried out, and results prove the correctness and feasibility of the scheme for the proposed inverter structure.

**Keywords:** Multi-level inverter; switched capacitor; carrier-stacked pulse width modulation; quasi-resonance

近年来, 能源危机日益严重, 开发新型清洁无污染的可再生能源已成为研究热点<sup>[1]</sup>。高频输电系统因其可以输出无污染安全可靠的能源而备受关注, 其中电力电子逆变器在功率转换方面发挥重要作用。在电能传输的过程中, 多电平逆变器因其输出波形好、效率高等优点而被广泛应用。

与传统的逆变器相比, 多电平逆变器拥有输出电能质量高、电压谐波含量少、谐波畸变率 THD (total harmonic distortion) 小和低电压应力 (low voltage stress) 等优点<sup>[2-4]</sup>。现有多电平逆变器主要分为二极管箝位型 NPC (neutral point-clamped)<sup>[5]</sup>、飞跨电容型 FC (flying capacitor)<sup>[6]</sup> 以及级联 H 桥型 CHB (cascaded H-bridge)<sup>[7]</sup>。在实践中, NPC 和 FC 普遍存在电路控制策略复杂和电容电压不均衡等缺陷。相较于上述结构, CHB 拥有拓扑简单、易操作和电容电压自均衡等优势<sup>[7-8]</sup>。但随着电平数量增加, 开关管数量及电容数量倍增, 有悖变换器轻量化设计<sup>[9-10]</sup>。对此, 文献[11-12]基于 CHB 结构提出了优化拓扑, 此类电路极大地减少开关管数量, 但 H 桥开关管的电压应力显著增加, 降低了电路的升压能力, 从而

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-07-23, 2021-09-08;

录用日期: 2021-10-13; 网络首发日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61876059); 河北省通用航空增材制造协同创新中心开放基金课题资助项目 (2018DQ01)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 61876059; Hebei Province General Aviation Additive Manufacturing Collaborative Innovation Center Open Fund Project under the grant 2018DQ01

导致传递效率很难进一步提升。

基于此,文献[13-15]提出了一种改进半桥式逆变器,其拓扑的优化使得输出电压等级增加,并且相较于全桥逆变器拥有更低的输出谐波,同时减少了开关的应力。但是,简单的控制电路并不能弥补大量存在的功率器件造成较低的功率密度。对此,文献[16]提出了一种对功率型器件分时复用的新型拓扑,但采用多回路反馈的控制单元,复杂程度过高。此外,有学者提出了开关电容单元结构<sup>[17-19]</sup>,利用电容直接与电源串并联的结构,其操作更为灵活,此类拓扑虽通过复用开关器件的方式减少了开关管数量,但需要多个输入电源,成本过高。文献[20-21]提出的单相多电平逆变器采用九开关管便可实现九电平输出,减少了器件的使用,实现了低压间的功率平衡。但该结构需要利用电平比较的方法进行调制,且需要多回路控制以实现逆变器中电容电压间均衡,增加了控制策略的复杂度及传感器数量。文献[22-23]提出了新型七电平逆变器结构,在器件使用数量和效率方面得到了优化,但是采用悬浮电容结构,使电容两端耐压能力达到了极限,电容间的平衡难以达到很好的控制。

对此,文献[24-25]提出一种可实现电容间自均衡拓扑结构,该拓扑两电容在一个开关周期内充放电状态保持一致,避免了电容电压不均衡的问题。由于仅适用于并联结构,考虑到向更多电平扩展的情况,其电路本身受限严重。相比之下,文献[26]提出了一种基于开关电容的多电平逆变器,不仅具备自均压的能力,并且同时适用于高频逆变器等。但在直流电压输入时,电容在充放电过程中产生的电压尖峰对器件的耐压提出了挑战,会增加电路开关器件的功率损耗<sup>[27-28]</sup>。

鉴于此,本文提出一种基于开关电容的准谐振五电平逆变器。相较于上述研究,功率器件数量得到简化;同时在不改变开关电容单元的基础上实现电容电压均衡输出,模块化电平的输出更适用于中低压场合应用<sup>[29-30]</sup>。此外,在实现五电平输出和 2 倍升压增益的同时完成电容与电感间的谐振,减少电路的电磁干扰,克服电容充放电过程的电压尖峰和

电流变化率过快等问题,并且延长电容的使用寿命,保护电路。首先介绍逆变器的工作原理和拓扑结构;其次通过比较几种 PWM 调制方法,提出适用于本文拓扑的载波层叠脉宽调制策略;其次,分析和对比现有拓扑的结构;最后在 PSIM 平台对所提结构进行验证。

## 1 五电平逆变器电路结构与工作原理

### 1.1 电路结构

图 1 为本文提出的准谐振五电平逆变器拓扑结构,由单个直流输入电源、开关电容电路、准谐振电路和全桥电路相整合。开关电容电路由  $S_1$ 、 $S_2$ 、二极管  $D_1$ 、分压电容  $C_1$  构成;准谐振电路由谐振电容  $C_1$  和谐振电感  $L_1$  组成;全桥电路为  $Q_1 \sim Q_4$ 。所提电路中,通过开关器件的驱动顺序实现电源与电容之间的串并联转换产生阶梯波电平;同时电容与电感发生谐振以消除电流尖峰和波动电压;全桥电路实现对输出电平的正负极性转换。

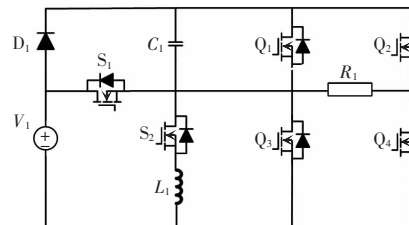


图 1 五电平逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of five-level inverter

### 1.2 工作原理

在所提的五电平逆变器中,设定直流电压源两端电压为  $V_1$ ,直接给并联电容  $C_1$  供电。在电容充电过程中会与电感发生串联谐振。通过控制开关器件导通顺序,所提逆变器可以输出 5 种电平,即  $2V_1$ ,  $V_1$ ,  $0$ ,  $-V_1$ ,  $-2V_1$ 。5 种模式下逆变器各器件工作状态如表 1 所示,逆变器驱动信号和对应时态如图 2 所示,其工作模态如图 3 所示。

模态 1:如图 3(a)所示,在该电流回路中,开关管  $S_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  导通,其余开关管保持关闭状态。此时该回路在谐振电流作用下给电容充电,使其电压等于直流电源电压  $+V_1$ ,此过程和传统的串联谐振相

似,此时逆变器输出 0 电平。

模式 2:如图 3(b)所示,开关管  $S_2$ 、 $Q_1$ 、 $Q_4$  导通,其余开关管处于关断状态。该回路在谐振电流作用下给负载供电,此时逆变器输出  $+V_1$  电平。

模式 3:如图 3(c)所示,开关管  $S_1$ 、 $Q_1$ 、 $Q_4$  开通,其他开关管处于关断状态。由于电容  $C_1$  的作用,二极管  $D_1$  被反向截止。直流电源和电容  $C_1$  共同为负载供电,此时逆变器的输出电平为  $+2V_1$ 。

表 1 逆变器功率器件工作状态

Tab. 1 Working statuses of inverter power devices

模式	$S_1$	$S_2$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$D_1$	$C_1$	$L_1$	输出
1	0	1	0	0	1	1	1	C	Q	0
2	0	1	1	0	0	1	1	C	Q	$+V_1$
3	1	0	1	0	0	1	0	D	—	$+2V_1$
4	0	1	0	1	1	0	1	C	Q	$-V_1$
5	1	0	0	1	1	0	0	D	—	$-2V_1$

注:开关管的 1 和 0 表示开关管的开通和关断;二极管的 1 和 0 表示正向导通和反向截止;电容的 C、—、D 分别表示充电、保持和放电状态;电感的 Q、— 分别表示谐振和保持。

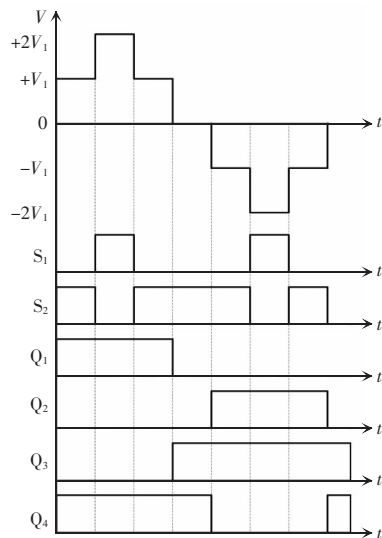
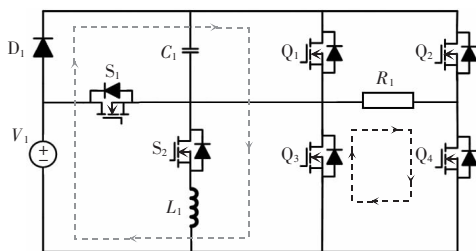
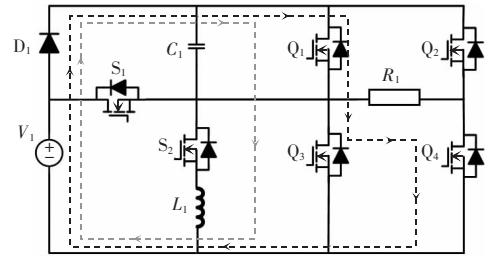


图 2 五电平逆变器驱动信号、模式

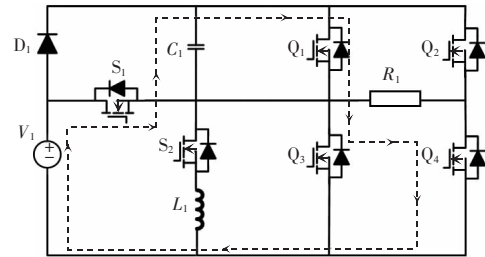
Fig. 2 Drive signal and modal of five-level inverter



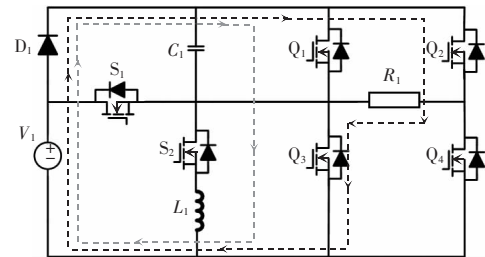
(a)模式 1



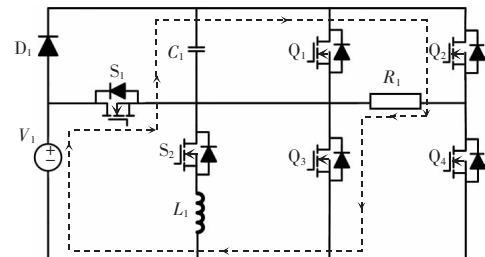
(b)模式 2



(c)模式 3



(d)模式 4



(e)模式 5

图 3 逆变器的电流流动路径

Fig. 3 Current flow path of inverter

模式 4:如图 3(d)所示,开通开关管  $S_2$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ ,其他开关管处于关断状态。该闭合回路在谐振电流作用下给负载供电,由于负载两端输出电压极性发生改变,此时逆变器输出  $-V_1$  电平。

模式 5:如图 3(e)所示,开关管  $S_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  开通,其他处于关断状态。由于电容  $C_1$  作用,二极管  $D_1$  被反向截止。直流电源与电容  $C_1$  共同为负载供电,输出电压的极性由正变负,此时逆变器的输出电平为  $-2V_1$ 。

### 1.3 电压应力分析

在设计电路过程中,开关管所承受的电压应力是研究的重要参数<sup>[31-32]</sup>。根据电路的不同模态以及所对应不同的开关状态,列出了电路开关所受应力表,如表 2 所示。从表中可以看出,开关管  $S_1$ 、 $S_2$  最大应力为  $V_1$ ,H 桥上开关管  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  最大应力均为  $2V_1$ 。桥臂上开关管所受最大电压应力均为 2 倍输入电压。

表 2 五电平逆变器开关电压应力

Tab. 2 Switching voltage stress of five-level inverter

电平数	$S_1$	$S_2$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
$2V_1$	0	$V_1$	0	$2V_1$	$2V_1$	0
$V_1$	$V_1$	0	0	$V_1$	$V_1$	0
0	$V_1$	0	$V_1$	$V_1$	0	0
$-V_1$	$V_1$	0	$V_1$	0	0	$V_1$
$-2V_1$	0	$V_1$	$2V_1$	0	0	$2V_1$

## 2 控制策略与参数设计

### 2.1 调制策略分析

多电平逆变器的调制方式有很多种,其中主要包括载波层叠法、特定谐波消除法、载波移相法。在相同幅值调节下,功率器件保持特定频率等条件,载波移相法可以实现开关电容单元同步平衡,并且开关器件开关损耗保持一致。但是当载波移相法调制策略应用于三相逆变器时,其输出线电压会存在跃变现象,这会对逆变器输出 THD 造成很大影响。特定谐波消除法利用波形合成的原理,波形逼近正弦波,可以通过选择功能更好的消除谐波,降低误差从而达到优化效果。由于其操作复杂,并且计算量庞大,故应用范围小。本文所采用载波层叠法调制方法,通过正弦波与三角波比较可得出理论阶梯波,输出波形接近理想波形,逆变器输出 THD 较低,很好地实现电路开关的分时复用。为了降低谐波的干扰,本文采取载波层叠调制法来实现多电平输出控制,其驱动信号如图 4 所示。图 4 中采用了四路三角载波和正弦波进行比较和调制得到  $u_1 \sim u_4$  四种信号,并根据逻辑关系可以得出 4 个开关管的驱动信号为

$$V_{CS1} = u_1 + \bar{u}_4 \quad (1)$$

$$V_{CS2} = \bar{u}_2 u_3 \quad (2)$$

$$V_{CQ1} = u_2 \quad (3)$$

$$V_{CQ2} = \bar{u}_4 \quad (4)$$

$$V_{CQ3} = \bar{u}_3 \quad (5)$$

$$V_{CQ4} = u_3 \quad (6)$$

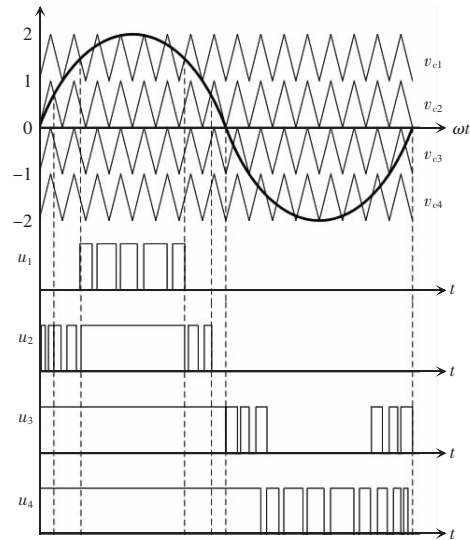


图 4 调制波、载波与比较波形

Fig. 4 Waveforms of modulation, carrier and comparison waves

### 2.2 谐振参数选择

在多电平逆变器设计中,电容的选取尤为关键,其值过小或过大都会影响电路的稳定性及运行成本,因此本节将为电容值的选取提供指导。图 5 为电容充放电过程,其连续放电区间为  $[\theta, \pi - \theta]$  和  $[\pi + \theta, 2\pi - \theta]$ 。对电容  $C_1$  的最大连续放电量  $\Delta Q_{1\max}$  进行计算,其结果为

$$\Delta Q_{1\max} = \frac{1}{2\pi f} \int_{\pi}^{\pi-\theta} i_d(\omega t) d(\omega t) \quad (7)$$

式中:  $i_d$  为负载输出电流;  $f$  为工频状况下的输入频率;  $\omega$  为工频状况下的角频率。

在  $[\alpha, \theta]$  和  $[\pi - \theta, \pi - \alpha]$  工作区间内,逆变器输出的电压为  $V_1$ ; 在  $[\theta, \pi - \theta]$  工作区间内,逆变器输出的电压为  $2V_1$ 。则可得电容  $C_1$  的最大连续放电量为

$$\Delta Q_{2\max} = \frac{1}{2\pi f} \left[ \int_{\alpha}^{\theta} \frac{V_1}{R_0} d(\omega t) + \int_{\theta}^{\pi-\alpha} \frac{2V_1}{R_0} d(\omega t) + \int_{\pi-\theta}^{\pi-\alpha} \frac{V_1}{R_0} d(\omega t) \right] \quad (8)$$

式中,  $R_0$  为负载电阻值。

对式(8)进行简化,可得

$$\Delta Q_{2\max} = \frac{V_1(2\pi - 2\theta - 2\alpha)}{2\pi f R_0} \quad (9)$$

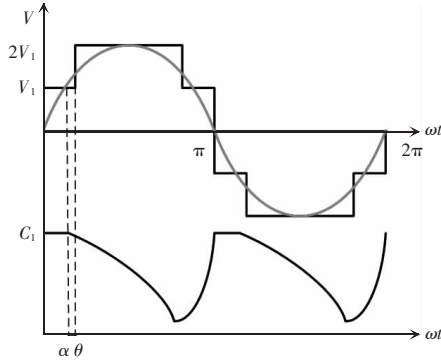


图 5 电容  $C_1$  充放电状态

Fig. 5 Charging and discharging states of capacitor  $C_1$

设计中,电容电压纹波应小于电容额定电压的 10%<sup>[33]</sup>,则电容取值应满足

$$C \geq \frac{\Delta Q}{0.1V_c} \quad (10)$$

式中,  $V_c$  为电容的额定电压。

因此,可得逆变器最小电容值  $C_m$  为

$$C_m = \frac{V_1(2\pi - 2\theta - 2\alpha)}{0.2\pi f R_0 V_c} \quad (11)$$

在满足输入频率  $f$  时,电容在充电过程中,和传统电路发生的串联谐振相同<sup>[34]</sup>,考虑设计裕度选取的电感为

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (12)$$

### 2.3 损耗分析

开关管主要由开关损耗和导通损耗组成,本文将其分为导通损耗  $P_1$  和开关损耗  $P_2$ 。电路的损耗分析如图 6 所示。

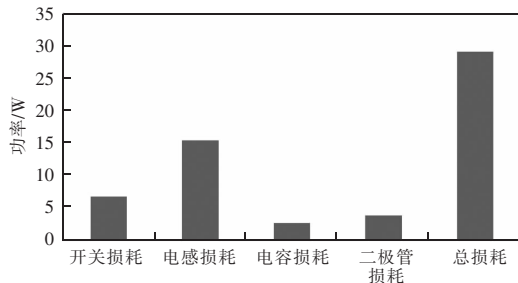


图 6 损耗分析

Fig. 6 Loss analysis

此外,电容充电时产生的损耗为  $P_{c1}$  和电容放电时产生的损耗为  $P_{d2}$ 。因此,电容充电时的损耗为

$$P_{c1} = 2f \int_{(\pi-\theta)/\omega}^{\pi/\omega} i_1^2 r_c dt \quad (13)$$

式中:  $i_1$  为电容充电时电路电流;  $r_c$  为开关管寄生参数。

通过模态分析可知,电容放电损耗为

$$P_{d2} = 2f \int_{\alpha/\omega}^{(\pi-\alpha)/\omega} i_2^2 r_d dt \quad (14)$$

式中:  $r_d$  为电容放电时的导通电阻;  $i_2$  为放电时电路电流。

因此,逆变器除开关管外的导通损耗  $P_1$  为

$$P_1 = P_{c1} + P_{d2} \quad (15)$$

所提逆变器的开关管导通与关断损耗分别为

$P_{on1}$  和  $P_{off2}$ 。通过模态分析,得到导通损耗为

$$P_{on1} = f_0 \int_0^{t_{on}} v i_0 dt \quad (16)$$

式中:  $f_0$  为开关时的频率;  $t_{on}$  为开关管导通时间;  $v$ 、 $i_0$  分别为开关管开通瞬间的电压和电流值。

简化式(16),得

$$P_{on1} = \frac{1}{6} f_0 i_0 t_{on} \quad (17)$$

通过分析式(17),可得开关管的关断损耗为

$$P_{off2} = \frac{1}{6} f_0 v' i_0' t_{off} \quad (18)$$

式中:  $t_{off}$  为开关管的关断时间;  $v'$ 、 $i_0'$  分别为开关管关断瞬间的电压和电流值。因此,开关管总损耗为

$$P_2 = P_{on1} + P_{off2} \quad (19)$$

综上所述,可得电路总损耗为

$$P = P_1 + P_2 \quad (20)$$

## 3 比较分析

为验证所提电路的优势,本节从电源数量、电容数量、开关器件数、二极管数、电感数、升压增益以及控制的复杂度对现有五电平逆变器与本文所提逆变器进行了比较分析,逆变器拓扑结构对比见表 3。

由表 3 可知,本文所提拓扑在器件总数和控制电路两方面均得到优化。详言之,文献[35]存在级联

型桥式单元,造成其损耗增大,且需要增加额外的控制器实现对电容恒压的控制。文献[36]在拓扑结构上与所提拓扑相似,其使用了级联型开关电容单元,有效地实现了升压效果,但是在功率器件数量上却无法比拟。文献[37]使用相同数量的开关管即可实现 2 倍电压增益,由于电路中存在前后两级复合的桥式结构,增加了控制算法的复杂度,使得拓扑的轻量化受阻。文献[38]采用 buck-boost 复合型电路可以实现输出的升降压功能,扩大了输出的范围,由于前级电路的高复杂度会对后级全桥电路的电压应力造成很大的影响。

表 3 逆变器拓扑结构对比

Tab. 3 Comparison of topology among different inverters

方法	电源数量	电容数量	开关管数量	二极管数量	电感数	增益	控制单元
所提拓扑	1	1	6	1	1	$2V_1$	简单
文献[35]	2	3	8	4	3	$2V_1$	复杂
文献[36]	2	2	10	2	3	$2V_1$	简单
文献[37]	1	3	6	3	2	$2V_1$	复杂
文献[38]	1	3	6	3	3	$2V_1$	复杂

## 4 仿真结果及分析

为了验证准谐振五电平逆变器的可行性并验证理论分析的正确性,本文在 PSIM 平台进行仿真验证,仿真参数见表 4,具体仿真波形如图 7~图 11 所示。

图 7 所示为输出的五电平电压波形和对应开关管的驱动信号。将频率为 5 kHz 的三角波作为载波,并与正弦调制波进行比较,得到最终调制波形,其结果与理论分析的 PWM 调制波形一致。

图 8 所示为负载  $R_1=50 \Omega$  时逆变器输出电压和电流,输出波形均为理想状态下的五电平阶梯波。电容电压在周期内呈现出稳定的放电和充电状

表 4 仿真电路参数

Tab. 4 Simulation circuit parameters

参数	数值
正弦调制波 $V_1/V$	2
三角载波 $V_{c1}/V$	1
三角载波 $V_{c2}/V$	1
三角载波 $V_{c3}/V$	1
三角载波 $V_{c4}/V$	1
直流源输入值 $V_1/V$	15
谐振电感 $L_1/\mu\text{H}$	4.54
电容 $C_1/\mu\text{F}$	2 200
输出负载 $R_1/\Omega$	50
载波频率 $f_c/\text{Hz}$	5 000

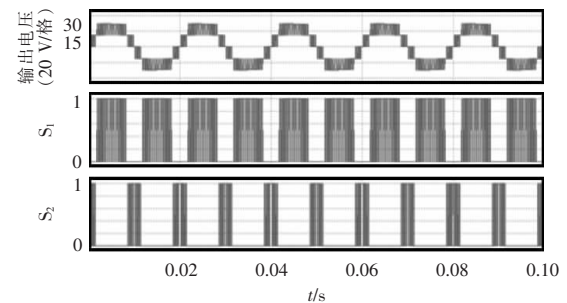
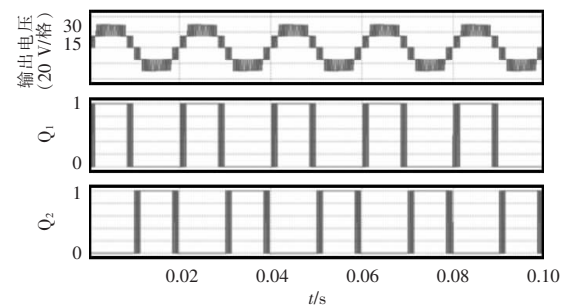
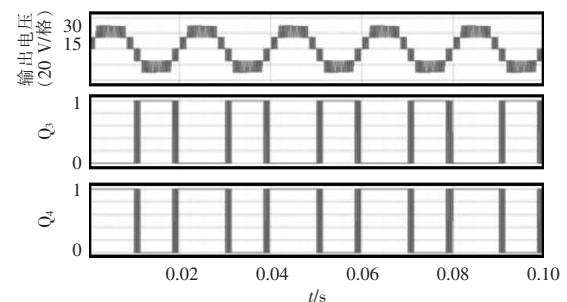
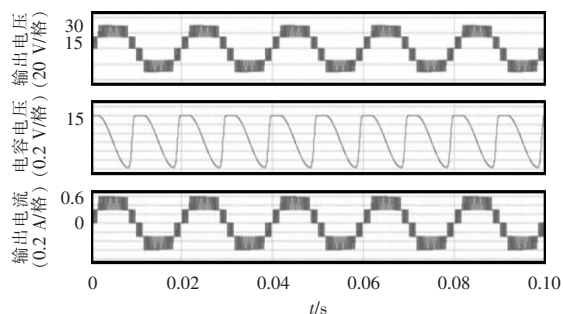
(a) 开关  $S_1$  和  $S_2$  的波形(b) 开关  $Q_1$  和  $Q_2$  的波形(c) 开关  $Q_3$  和  $Q_4$  波形

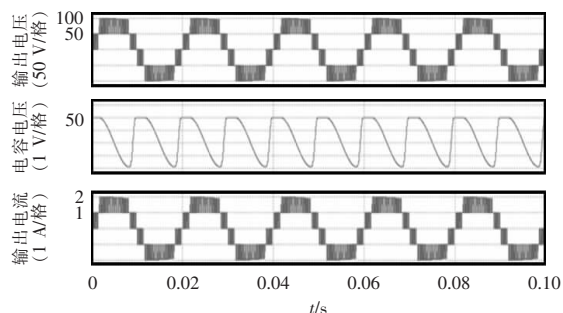
图 7 输出电压及所对应驱动信号的波形

Fig. 7 Waveforms of output voltage and the corresponding drive signal

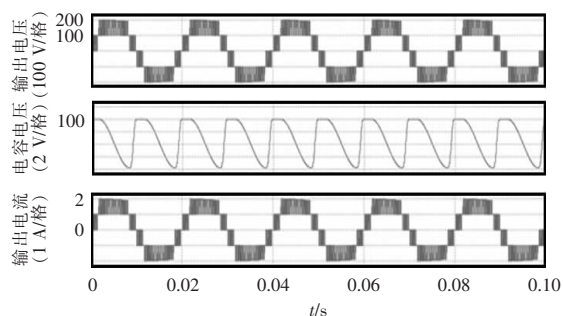
态。本文又验证了输入直流源电压在 50 V 和 100 V 时电容电压的波形和逆变器的输出波形,仿真结果证明了所提拓扑可满足较大输入电压波形的情况,扩大了该拓扑应用范围。



(a)输入电压 15 V



(b)输入电压 50 V

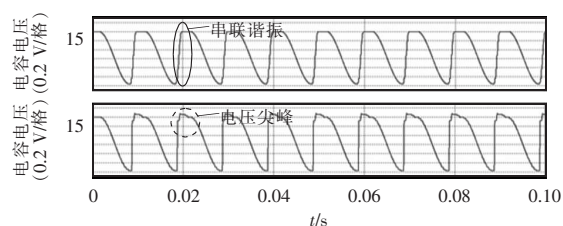


(c)输入电压 100 V

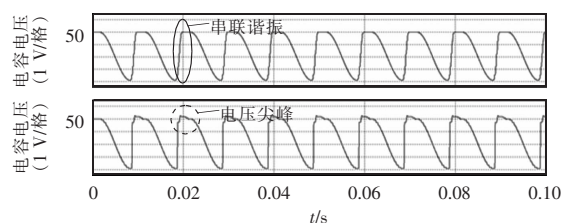
图 8 不同输入电压下输出电压、电容电压以及负载电流波形

Fig. 8 Waveforms of output voltage, capacitor voltage and load current under different input voltages

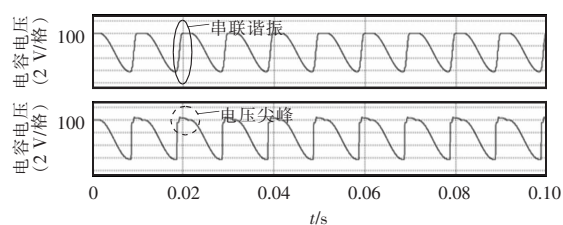
图 9 所示为对电路中有无引入准谐振的探讨。由 3 组波形图对比可知,在没有引入准谐振的电路中,电容电压在充电时的尖峰使得输出电压不平稳;在准谐振电路中,电容充放电的电压波形平缓圆滑,证明了所提拓扑在引入谐振电感的情况下极大地改善了电容充放电过程。



(a)输入电压 15 V



(b)输入电压 50 V

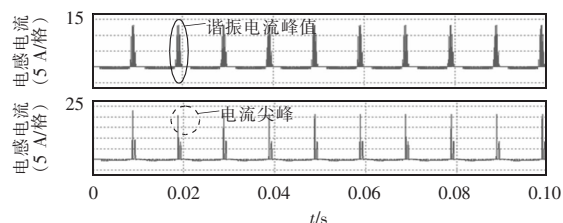


(c)输入电压 100 V

图 9 不同输入电压下准谐振电容电压、无准谐振电容电压

Fig. 9 Capacitor voltage with and without quasi-resonance under different input voltages

图 10 所示为输入电压  $V_1=15, 50, 100$  V 所对应电感电流波形。由图 10 可知,在引入准谐振的电路中,由于电感的存在极大地减弱了电流的尖峰值,并且电流的瞬时变化率也被改善,对整体系统起到很好的保护作用。图 11 为对先前工作复现的电压波形<sup>[39-40]</sup>。为了保持对比的一致性,2 种拓扑均保证输入电压 15 V。可明显看出,先前工作在电容充放电过程中,电压波形在每个周期内呈现瞬时性突变现象,并且存在充电电压尖峰;比较充分地验证了准谐振的引入很好地改善了电压质量。



(a)输入电压 15 V,输入电流 13 A

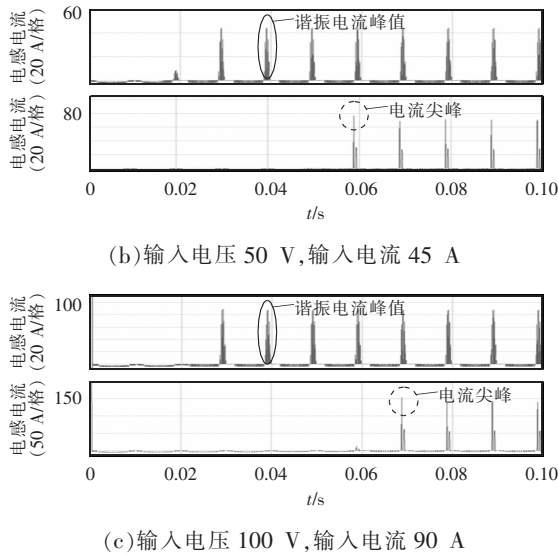


图 10 不同输入电流下准谐振电感电流、无准谐振电感电流

Fig. 10 Inductance current with and without quasi-resonance under different input currents

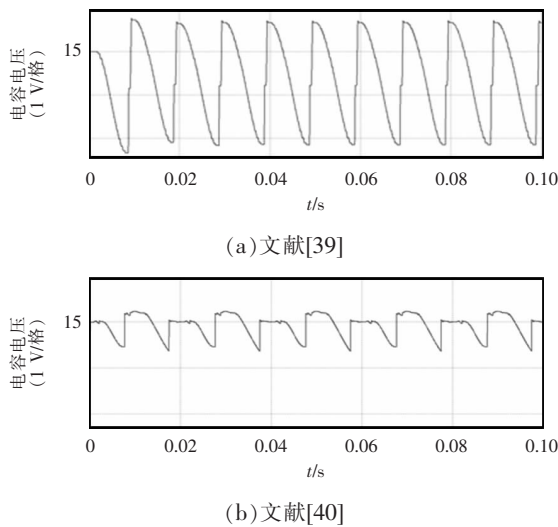


图 11 电容充放电电压波形

Fig. 11 Voltage waveforms during capacitor charging and discharging

综上所述,实验结果与理论分析一致,验证了本文所提出电路结构的可行性,也证明了引入准谐振电路有效地改善了拓扑的性能。

## 5 结语

本文提出了一种基于开关电容的准谐振五电平逆变器。所提逆变器在开关电容结构的基础上,

嵌入准谐振电路,改善了电源与电容并联产生的电容电压剧烈波动和电流尖峰问题,并且实现了五电平输出。与现有工作相比,所提多电平逆变拓扑结构和功率器件数量均得到简化。通过 PSIM 平台进行仿真验证,其结果显示准谐振技术的引入有效改善了电容两端的电压性能,且达到延长器件寿命的目的。

## 参考文献:

- [1] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.  
Chen Li, Zhang Jinguo, Su Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127 (in Chinese).
- [2] 邵振国, 黄伟达. 考虑出力不确定性的分布式电源谐波传播计算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 674-683.  
Shao Zhenguo, Huang Weida. Harmonic propagation calculation of distributed generation considering output uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 674-683 (in Chinese).
- [3] 田涵雷, 刘俊峰, 曾君, 等. 基于可控开关电容的定频谐振式多路 LED 均流驱动器[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 286-295.  
Tian Hanlei, Liu Junfeng, Zeng Jun, et al. A constant frequency resonant multi-channel LED driver based on switch-controlled capacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 286-295 (in Chinese).
- [4] Gupta K K, Ranjan A, Bhatnagar P, et al. Multilevel inverter topologies with reduced device count: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 135-151.
- [5] 刘朋, 陈昌松, 段善旭. 带飞跨电容的三电平全桥直流变换器输入中点电压的自平衡分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4335-4344.  
Liu Peng, Chen Changsong, Duan Shanxu. Self-balance mechanism analysis of the neutral point voltage in three-level full bridge DC-DC converter with flying capacitors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,

- 33(18): 4335-4344 (in Chinese).
- [6] 陈仲, 许亚明, 袁涛, 等. 级联型逆变器载波循环功率均衡控制方法及比较[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4802-4812.
- Chen Zhong, Xu Yaming, Yuan Tao, et al. Control methods and comparison of carrier cyclic power balance for cascaded inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4802-4812 (in Chinese).
- [7] 吴可丽, 夏长亮, 张云, 等. 二极管钳位型三电平逆变器共模电压抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 110-117, 170.
- Wu Keli, Xia Changliang, Zhang Yun, et al. Common-mode voltage suppression of diode-clamped three-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 110-117, 170 (in Chinese).
- [8] 胡文华, 刘剑锋. 一类新型的混合 H 桥级联逆变器构成方案[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6044-6055, 6185.
- Hu Wenhua, Liu Jianfeng. A new scheme of hybrid H-bridge cascaded inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6044-6055, 6185 (in Chinese).
- [9] Liu Junfeng, Wu Jialei, Zeng Jun, et al. A novel nine-level inverter employing one voltage source and reduced components as high-frequency AC power source [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2939-2947.
- [10] Barzegarkhoo R, Kojabadi H M, Zamiry E, et al. Generalized structure for a single phase switched-capacitor multilevel inverter using a new multiple DC link producer with reduced number of switches [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5604-5617.
- [11] Babaei E, Laali S, Alilu S. Cascaded multilevel inverter with series connection of novel H-bridge basic units [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6664-6671.
- [12] Babaei E, Laali S, Bayat Z. A single-phase cascaded multilevel inverter based on a new basic unit with reduced number of power switches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 922-929.
- [13] Sandeep N, Ali J S M, Yaragatti U R, et al. Switched-capacitor-based quadruple-boost nine-level inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7147-7150.
- [14] Siddique M D, Mekhilef S, Shah N M, et al. A single DC source nine-level switched-capacitor boost inverter topology with reduced switch count [J]. IEEE Access, 2019, 8: 5840-5851.
- [15] Hinago Y, Koizumi H. A single-phase multilevel inverter using switched series/parallel DC voltage sources [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2643-2650.
- [16] Ebrahimi J, Babaei E, Gharehpetian G B. A new multilevel converter topology with reduced number of power electronic components [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 655-667.
- [17] Liu Junfeng, Cheng K W E, Ye Yuanmao. A cascaded multilevel inverter based on switched-capacitor for high-frequency AC power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4219-4230.
- [18] 吴学智, 赵亚雪, 刘京斗, 等. 含开关电容的有源箝位多电平逆变器[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1453-1462.
- Wu Xuezhi, Zhao Yaxue, Liu Jingdou, et al. Active clamped multilevel inverter with switched capacitors [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1453-1462 (in Chinese).
- [19] 叶远茂, 林明亮. 基于开关电容的单电源升压型多电平逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5636-5644.
- Ye Yuanmao, Lin Mingliang. Single source step-up multilevel inverter based on switched-capacitor [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5636-5644 (in Chinese).
- [20] 王要强, 周成龙, 王明东, 等. 开关电容单相九电平逆变器及其调制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 201-207.
- Wang Yaoqiang, Zhou Chenglong, Wang Mingdong, et al. Single-phase nine-level inverter based on switched capacitor and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 201-207 (in Chinese).
- [21] Reddy B P, Meraj M, Iqbal A, et al. A single DC source-based three-level inverter topology for a four-pole open-end winding nine-phase PPMIM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2750-2759.
- [22] 张云雷, 王群京, 胡存刚. 一种新型混合式七电平逆变器[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 48-58.
- Zhang Yunlei, Wang Qunjing, Hu Cungang. Hybrid seven-level inverter and control strategy [J]. Electric Machines and

- Control, 2020, 24(10): 48-58 (in Chinese).
- [23] 张琦, 李江江, 孙向东, 等. 单相级联七电平逆变器拓扑结构及其控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3843-3853.
- Zhang Qi, Li Jiangjiang, Sun Xiangdong, et al. Topology and control method of single-phase cascaded seven-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3843-3853 (in Chinese).
- [24] Peng Wei, Ni Qiang, Qiu Xiaohuan, et al. Seven-level inverter with self-balanced switched-capacitor and its cascaded extension [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11889-11896.
- [25] Barzegarkhoo R, Moradzadeh M, Zamiri E, et al. A new boost switched-capacitor multilevel converter with reduced circuit devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6738-6754.
- [26] 曾君, 吴佳磊, 刘俊峰, 等. 一对基于开关电容原理的多电平高频逆变器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1312-1319.
- Zeng Jun, Wu Jialei, Liu Junfeng, et al. A pair of high-frequency multilevel inverters based on switched-capacitor technique [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1312-1319 (in Chinese).
- [27] 夏守行, 白若琦, 宋建伟, 等. 新型谐振式开关电容变换器及其潜电路分析[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 38-45.
- Xia Shouxing, Bai Ruoqi, Song Jianwei, et al. Novel resonant switched-capacitor converter and analysis of its sneak circuit [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 38-45 (in Chinese).
- [28] 袁义生, 邱志卓, 钟青峰, 等. 逆变器开关管驱动电流技术研究[J]. 电源学报, 2019, 17(3): 133-139.
- Yuan Yisheng, Qiu Zhizhuo, Zhong Qingfeng, et al. Research on changeable driving-current technology of switches for inverters [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(3): 133-139 (in Chinese).
- [29] 曾君, 吴佳磊, 刘俊峰. 新型电容自均压多电平高频逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5326-5333, 5415.
- Zeng Jun, Wu Jialei, Liu Junfeng. A novel high-frequency multilevel inverter with capacitors self-balancing [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5326-5333, 5415 (in Chinese).
- [30] Kim K M, Han J K, Moon G W. A high step-up switched-capacitor 13-level inverter with reduced number of switches [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2505-2509.
- [31] 易灵芝, 姜康宁, 胡炎申. 一种新型无源软开关三电平逆变器[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 41-47.
- Yi Lingzhi, Jiang Kangning, Hu Yanshen. Novel passive soft-switching three-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 41-47 (in Chinese).
- [32] 刘明杰, 陈艳峰, 张波, 等. 一种混合开关电感和开关电容的高增益 DC/DC 变换器[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 85-93.
- Liu Mingjie, Chen Yanfeng, Zhang Bo, et al. High-gain DC/DC converter with hybrid switched-inductor and switched-capacitor cell [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(4): 85-93 (in Chinese).
- [33] Hinago Y, Koizumi H. A switched-capacitor inverter using series/parallel conversion with inductive load [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 878-887.
- [34] Ye Yuanmao, Eric Cheng K W, Liu Junfeng, et al. A family of dual-phase-combined zero-current switching switched-capacitor converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4209-4218.
- [35] 张云, 孙力, 吴凤江, 等. 五开关五电平逆变器的载波交错 SPWM 控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 101-106.
- Zhang Yun, Sun Li, Wu Fengjiang, et al. Carriers-staggered SPWM control method based on a five-switch five-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 101-106 (in Chinese).
- [36] Sharifzadeh M, Vahedi H, Portillo R, et al. Selective harmonic mitigation based self-elimination of triplen harmonics for single-phase five-level inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 86-96.
- [37] Gao Fei. An enhanced single-phase step-up five-level inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8024-8030.
- [38] 杨国良, 张玉娜, 陈泰余, 等. 单相升降压型五电平逆变器拓扑及控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2922-2935.
- Yang Guoliang, Zhang Yuna, Chen Taiyu, et al. Topology and control strategy of a single-phase buck-boost five-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

2019, 34(14): 2922-2935 (in Chinese).

[39] 刘俊峰, 祝祥开, 曾君. 新型低电压应力的电容自均衡七电平逆变器[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 97-105.

Liu Junfeng, Zhu Xiangkai, Zeng Jun. Seven-level inverter with reduced blocking voltage and self-balancing of capacitors [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3): 97-105 (in Chinese).

[40] Barzegarkhoo R, Siwakoti Y P, Blaabjerg F. A new switched-capacitor five-level inverter suitable for transformerless grid-connected applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8140-8153.



梁国壮

#### 作者简介:

梁国壮(1968-),男,教授。研究方向:电机电器及其控制、电气参数检测与信息处理技术。E-mail:guozhuangliang@hebust.edu.cn。

聂辰浩(1996-),男,硕士研究生。研究方向:多电平逆变器技术及LED照明技术。E-mail:670595558@qq.com。

田涵雷(1992-),男,通信作者,博士研究生。研究方向:电能变换和电能质量控制。E-mail:thledu@stu.scu.edu.cn。



来源:黑龙江省公益广告研究基地