DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.28 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

具有自平衡和升压能力的有源中点箝位七电平逆变器

王林涛[1]，曾 君[1]，刘俊峰[2](中国电源学会高级会员)
(1.华南理工大学电力学院，广州 510640；2.华南理工大学自动化科学与工程学院，广州 510640)

摘要：提出了1种基于开关电容原理的新型有源中点箝位ANPC(active-neutral-point-clamped)七电平逆变器。拓扑使用了10个开关管、2个二极管和1个开关电容，当输入幅值为V_{DC}时，通过开关电容可使该拓扑的峰值输出达到$1.5V_{DC}$。与其他APNC逆变器相比，该拓扑具有更低的开关应力和更高的升压能力。无需采用辅助控制方法，直流侧的分压电容可自平衡至$0.5V_{DC}$，开关电容可自平衡至V_{DC}。对所提拓扑的工作原理和电容的自平衡进行了仔细论证，通过与最新的拓扑进行比较，证明了所提拓扑具有器件减少、升压能力较高、总体电压应力较低、电容具有自平衡能力等优势，表明其适用于分布式发电、电动汽车和其他领域应用。最后，通过仿真和实验验证了所提拓扑的升压能力以及电容的自平衡能力。

关键词：多电平；开关电容；电压自平衡；升压

Active-neutral-point-clamped Seven-level Inverter with Self-balancing and Boost Capabilities

WANG Lintao[1], ZENG Jun[1], LIU Junfeng[2], *Senior Member, CPSS*
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel active-neutral-point-clamped (ANPC) seven-level inverter based on the principle of switched-capacitor is proposed in this paper, which employs ten switches, two diodes and one switched-capacitor. With an input amplitude of V'_{DC} the peak output from this topology can reach $1.5V_{DC}$ through the switched-capacitor. Compared with other APNC inverters, the novel topology has lower switch stress and a higher Boost capability. Without the auxiliary control methods, the voltage-sharing capacitors in the DC link can be self-balanced at $0.5V'_{DC}$ and the switched-capacitor can be self-balanced at $V_{DC.}$ The operation principle for the proposed topology and the self-balancing mechanism for capacitors are described in detail. Through a comparison with the latest topologies, the advantages of the proposed topology such as fewer components, a higher Boost capability, lower overall voltage stress and a self-balancing capability of capacitors are also demonstrated, showing that it is suitable for distributed generation, electric vehicles and other applications. Finally, the Boost capability of this topology and the self-balancing capability of capacitors were verified by simulation and experimental results.

Keywords: Multilevel; switched-capacitor; voltage self-balancing; Boost

收稿日期：2022-12-06；**修回日期**：2023-02-08，2023-02-21；**录用日期**：2023-03-07；**网络首发日期**：2023-04-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62173148，51877085)；广东省自然科学基金资助项目(2022A1515010150，2021A1515011347)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 62173148 and 51877085; Guangdong Natural Science Foundation under the grants 2022A1515010150 and 2021A1515011347

由于多电平逆变器MLIs(multilevel inverters)具有输出质量高、电压应力低、电磁干扰EMI(electromagnetic interference)小、开关频率低、d*v*/d*t*低等优点，其在可再生能源发电REG(renewable energy generation)系统、分布式发电、电动汽车EV

(electric vehicle)等研究领域具有显著的吸引力[1-4]。MLI 有 3 种主要类型[5-7]，分别是中性点箝位 NPC (neutral-point-clamped)[8-9]、飞跨电容 FC(flying capacitor)[10-11]和级联 H 桥 CHB(cascaded H-bridge)[12]。

基于开关电容的多电平逆变器[13]发展迅速，其中的有源中点箝位 ANPC(active-neutral-point-clamped)逆变器灵活地结合了 FC 和 NPC 拓扑，越来越受到人们的关注。文献[14]提出了 1 种新型五电平六开关 ANPC 逆变器，但其感性带载能力有限；文献[15]在该拓扑的基础上增加了一个开关，从而使得该拓扑能够输出七电平，并且增强了其感性带载能力；文献[16]提出了多输入 ANPC 逆变器，其拓扑在直流侧串联了 3 个隔离电源，每一相仅需要 1 个电容就可以产生七电平输出。但是上述 ANPC 的拓扑需要通过传感器的监测控制电容的冗余态来实现电压平衡，而且这些 ANPC 逆变器的输出峰值仅为输入的一半。

本文提出 1 种新型 ANPC 七电平逆变器，该逆变器具有自然平衡和升压能力，适用于电动汽车、可再生能源和其他分布式发电系统。首先，介绍其电路结构和工作原理；其次，详细介绍基于多载波调制的自然平衡分析；然后，通过与其他拓扑比较，说明其在降低元件和电压应力等方面的优势；最后，通过仿真和实验验证所提逆变器拓扑的优势。

1　逆变器结构和工作原理

1.1　逆变器结构

本文提出 1 种基于开关电容的单输入七电平逆变器拓扑，电路由 1 个直流电源、3 个开关电容、10 个开关管、2 个二极管构成，并利用开关电容与电源的串、并联实现电容的电压平衡。由于该拓扑为有源中点箝位型，在电源侧具有中性点，根据中点箝位型的特点可知，其方便运作在三相场合，且能够降低泄露电流。本文所提有源中点箝位型七电平升压逆变器拓扑如图 1 所示，该拓扑包含 1 组直流侧组件(1 个直流电源 E 和 2 个分压电容 C_1、C_2)和三相相同的逆变结构。图 1 中给出了其中一相的详细结构，其中：O 点为各相的共同中性点；E 为直流侧电源；C_1、C_2 为直流侧的分压电容，其电压能够自平衡至 $0.5E$；C_3 为开关电容，其电压能够自平衡至 E。本文所提拓扑中一相可输出七电平，峰值输出电压为 $1.5E$。

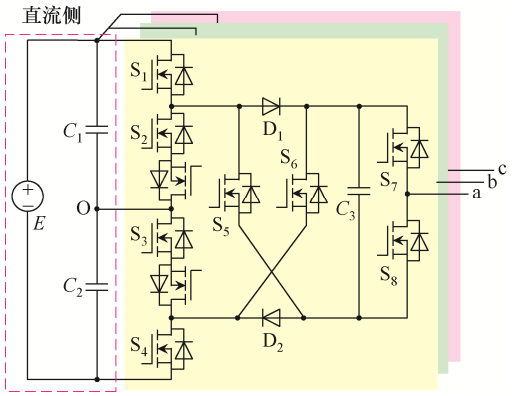


图 1　本文所提中点箝位型七电平逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of neutral-point clamped seven-level inverter proposed in this paper

1.2　工作原理

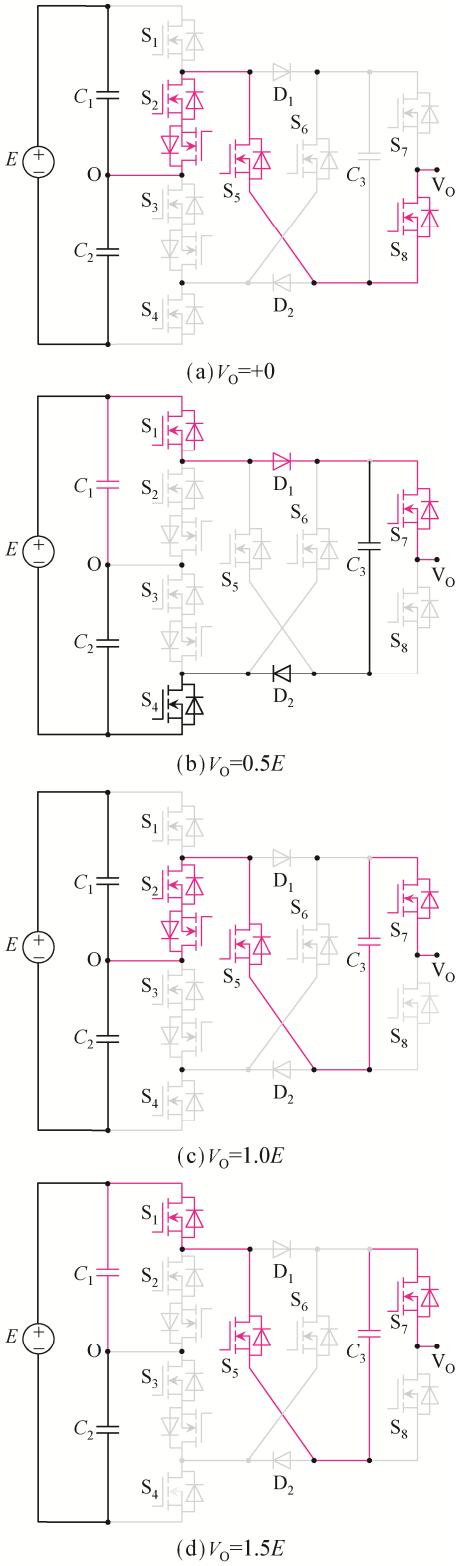
本文所提拓扑仅使用 1 组直流电源和 3 组相同逆变结构便可工作于三相状态。由于三相状态下每相的结构都是相同的，所以后续对于本文所提拓扑的工作原理分析以单相为例，每相均可单独输出七电平。本文所提拓扑在正半周各电平下的工作模态和电流通路如图 2 所示。

图 2 中用细实线(红色)标明的回路为输出电流的回路，图中用黑色粗线标明的回路为电容充电的回路。在一个周期内各个电平下的开关状态见　表 1。电容 C_1 和 C_2 实现分压，应稳定在 $0.5E$；开关电容 C_3 平衡至 $1.0E$，其输出电压为 V_O 端和中性点 O 点之间的电压差。以正半周的模态为例，具体分析如下。

(1)0 电平：如图 2(a)所示，开关管 S_2、S_5、S_8 导通，在这时 V_O 端和中性点 O 端直接相连，此时逆变器的输出电压 V_O 为 0。

(2)+0.5 电平：如图 2(b)所示，开关 S_1、S_4、S_7 导通，此时电容 C_3 与直流电源并联，并被充电至 E，电容 C_1 串联到了 V_O 端和中性点 O 之间的输出回路。此时逆变器的输出电压 V_O 为 $0.5E$。

(3)+1.0 电平：如图 2(c)所示，S_2、S_5、S_7导通，电容 C_3 被串联到中性点 O 和 V_O 端之间并持续放电。此时逆变器输出电压 V_O 为 $1.0E$。



(a) V_O=+0　(b) V_O=0.5E　(c) V_O=1.0E　(d) V_O=1.5E

图 2　逆变器在正半周期各电平下的工作模态

Fig. 2 Operating states of inverter at each level in positive half-cycle

(4)+1.5 电平：如图 2(d)所示，S_1、S_5、S_7 导通，电容 C_1 和 C_3 串联到中性点 O 端和 V_O 端之间，此时逆变器的输出电压 V_O 为 $1.5E$。

表 1　七电平逆变器的开关状态

Tab. 1 Switching states of seven-level inverter

输出电压	开关状态							
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
1.5E	1	0	0	0	1	0	1	0
1.0E	0	1	0	0	1	0	1	0
0.5E	1	0	0	1	0	0	1	0
+0	0	1	0	0	1	0	0	1
−0	0	0	1	0	0	1	1	0
−0.5E	1	0	0	1	0	0	0	1
−1.0E	0	0	1	0	0	1	0	1
−1.5E	0	0	0	1	0	1	0	1

2　调制与特性分析

2.1　调制策略

多电平逆变器的调制策略主要包括空间矢量脉宽调制 SVPWM(space vector pulse width modulation)、多载波正弦脉宽调制 SPWM(sine pulse width modulation)和基频调制这 3 种方法。多载波 SPWM 虽然具有开关频率高、开关损耗大的劣势，但是能够有效减少输出电压的谐波含量，所以通常用在输出电平数较少的逆变器中。尽管调制策略的选择不会影响到电容的自平衡，但是在电平数较少时，多载波 SPWM 较为简单，而且该调制策略的输出电压波形更好，因此可选择多载波垂直分布 SPWM 作为调制条件进行推导。

多载波垂直分布 SPWM 是将多个载波呈垂直方向排列。七电平的多载波垂直分布 SPWM 的调制原理如图 3 所示。其中，e_{sin} 为正弦波，也称为调制波；e_1~e_6 为同频率、同相位、同幅值的三角载波。将 e_1~e_6 与正弦调制波相比较即可得到所需的控制信号，进而控制开关管的通断，得到所需的输出波形。图 3 中，在输出电压为 $1.0E$ 时，根据前文模态分析可知，此时由 C_3 进行放电，将这段最长的放电区间起始横坐标定义为 θ_1，则 C_3 的最

大连续放电区间为$(\theta_1,\pi-\theta_1)$；同样地，将C_1的最长放电区间起始横坐标定义为θ_2，则C_1的最大连续放电区间为$(\theta_2,\pi-\theta_2)$。对于该七电平逆变器，其波形的幅度调制比M_a定义为

$$M_a=\frac{A_S}{3e} \tag{1}$$

式中：A_S为对应调制波的幅值；e为对应三角波的峰峰值。

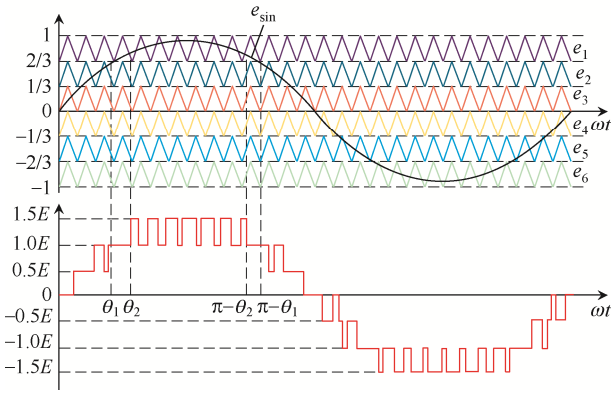


图 3　多载波 SPWM 原理

Fig. 3 Principle for multi-carrier SPWM

2.2　电容分析

在多电平的工作过程中，电容的电压平衡至关重要，而本文所提拓扑能够不使用传感器实现自平衡，从而简化了拓扑的控制，可根据图 2 中逆变器的工作模态得知电容的自平衡过程。当V_O=±0.5E时，开关电容C_3通过开关S_1、S_4被并联到电源两端，这时电容被充电至 1.0E；当V_O=±1.0E和V_O=±1.5E时，则由开关电容C_3放电来产生输出电压。电容在向负载放电的同时会产生电压纹波，电压纹波过大会影响输出电能的质量，使得电容电压纹波的波动始终在合理的范围之内。为了避免分析过程过于复杂，假定逆变器输出电压u_o和输出电流i_o均为纯正弦波，即

$$u_o=U_m\sin(\omega t) \tag{2}$$

$$i_o=I_m\sin(\omega t-\varphi) \tag{3}$$

式中：U_m为电压幅值；ω为输出电压的角频率；I_m为电流幅值；φ为阻抗角。

电容的最小值可根据电容最大的放电区间去计算。根据图 3 可知，电容C_3的最大连续放电区间为$(\theta_1,\pi-\theta_1)$，其中θ_1表示为

$$\theta_1=\arcsin\left(\frac{2e}{A_S}\right) \tag{4}$$

不难看出，C_3在上述区间内放电，拓扑的输出电压在 1.0E 和 1.5E 之间快速交替输出，根据 SPWM 面积等效原理，电容C_3的放电量ΔQ_3为

$$\Delta Q_3=\frac{1}{2\pi f_R}\int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} i_0(\omega t)\mathrm{d}\omega t \tag{5}$$

式中：$i_0(\omega t)$为输出电流或负载电流；f_R为输出基波频率。

为了保证电压的输出质量，电容电压的纹波必须要限定在一定的范围内，不妨将电压纹波限定在其额定值的 5%以内。则电容C_3应该满足

$$C_3\geqslant\frac{\Delta Q_3}{0.05E} \tag{6}$$

同样地，根据图 3 可知，C_1的最大连续放电区间为$(\theta_2,\pi-\theta_2)$，其放电量ΔQ_1为

$$\Delta Q_1=\frac{1}{2\pi f_R}\int_{\theta_2}^{\pi-\theta_2} i_o\mathrm{d}(\omega t) \tag{7}$$

C_1、C_2的工作状态是对称的，且容值大小相等，所以C_1、C_2满足

$$C_2=C_1\geqslant\frac{\Delta Q_1}{0.05E} \tag{8}$$

3　拓扑性能比较

为了对本文所提拓扑的性能进行评估，本节将所提逆变器与近几年相似的七电平逆变器进行比较。为了合理地比较，选择的逆变器拓扑均能使用 1 组直流电源实现三相运行，直流侧的分压电容也不纳入统计。选取的关键参数包括电平数、开关管数量、非直流侧电容数、直流侧电源数、电压增益、电压自平衡能力、开关电压应力。其中δ_{TSV}为每个开关承受的最大阻断电压之和与最大输出峰值电压的比值，即

$$\delta_{TSV}=\sum_{i=1}^{n}V_{b,sw,i}\Big/V_{o,max} \tag{9}$$

式中：$V_{b,sw,i}$为拓扑中每个开关的最大阻断电压；

$V_{o,max}$ 为最大输出峰值电压。

不同多电平逆变器比较见表 2。由表 2 可知，本文所提拓扑使用开关管数目最低，减少了相应的隔离电源和驱动器的数目，从而降低了成本。文献[2]中虽然也仅使用了 10 个开关管，但是其需要 2 个开关电容，而且也只能够实现五电平；文献[6]虽然减少了开关管数和电容数，只需要 12 个开关管和 1 个直流侧电容，但是其需要 3 个隔离直流电源。值得注意的是，上述 3 个拓扑的电压增益均为 0.5。文献[7]所提拓扑虽然同样能够以较少的开关管数量实现七电平 1.5 倍增益，但是其需要 2 个开关电容，而且其开关应力也最大。

表 2 不同多电平逆变器比较

Tab. 2 Comparison among different multi-level inverters

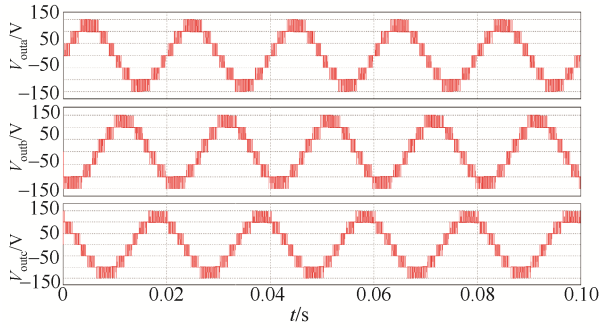
文献	电平数	开关管数	非直流侧电容数	直流侧电源数	电压增益	能否自平衡	δ_{TSV}
[2]	5	10	2	1	0.5	否	4.67
[5]	7	18	5	1	0.5	否	6.00
[6]	7	12	1	3	0.5	否	6.67
[7]	7	10	2	1	1.5	能	7.33
本文	7	**10**	**1**	**1**	**1.5**	能	**4.67**

通过与这些拓扑之间的对比可以看出，本文所提拓扑在减小开关应力和电压增益、减少开关器件数量和非直流侧电容数量方面具有优势。与其他拓扑相比，所提拓扑使用的开关数量最少，这意味着可以节省驱动器的外围电路和隔离源。其自然平衡的特点和较少的有源器件有助于大大降低控制的复杂性。

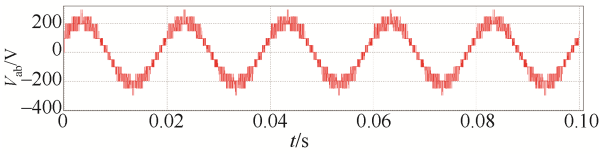
4 仿真与实验验证

4.1 仿真分析

输出电压仿真波形如图 4 所示。图 4(a)为负载为 50 Ω 时 a、b、c 三相输出电压 V_{outa}、V_{outb}、V_{outc} 的波形，当输入电压为 100 V 时，逆变器可以输出最大电压为 150 V 的七电平阶梯波，这验证了所提逆变器的升压能力。图 4(b)为 a、b 相间的输出电压 V_{ab} 波形，逆变器输出的相间电压符合三相运行的电压关系，验证了逆变器的三相运行能力。因为三相间电压波形只是相位依次相差120°，为避免赘述，在后续仿真中只以 a 相波形为例进行说明。



(a)三相输出电压

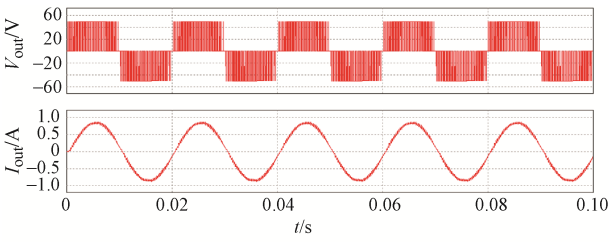


(b)a、b相间的输出电压

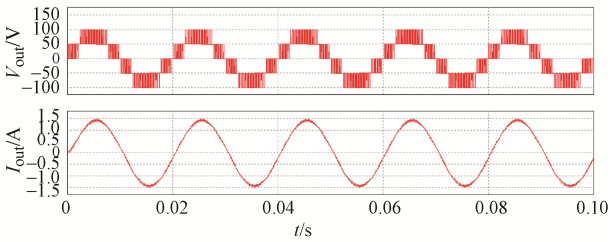
图 4 带纯电阻负载 50 Ω 的输出电压仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of output voltage with purely resistive load of 50 Ω

图 5 给出了不同幅度调制比情况下的仿真输出波形，图中 V_{out}、I_{out} 分别为输出电压、输出电流。当 M_a=0.3 时，输出为三电平；当 M_a= 0.6 时，输出为五电平。由图 5 可以看出，在不同的调制比下，电容器的总电压保持稳定，也证实了本文所提拓扑的自平衡能力。



(a)M_a=0.3



(b)M_a=0.6

图 5 不同调制比下的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms at different modulation ratios

图 6 给出了电容电压的仿真波形，从而证明电容的电压平衡。从图 6 中可以看出，电容 C_1、C_2 的电压 V_{C_1}、V_{C_2} 均稳定在 50 V 左右，C_3 的电压 V_{C_3} 稳定在 100 V 左右，所有的电容电压波动均小于 5%，证明了所提拓扑的自平衡能力。

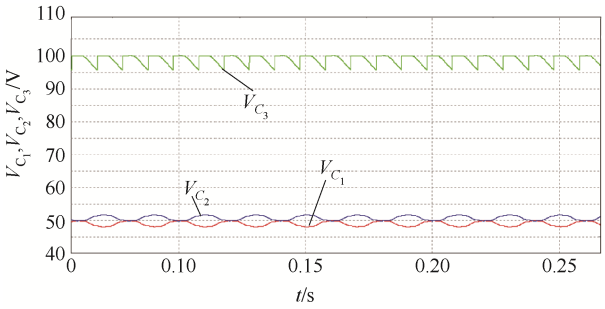


图 6　电容电压的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of capacitor voltage

4.2 实验验证

为了验证本文所提逆变器的可行性，设计并搭建了一台实验样机，如图 7 所示。本文所提拓扑仅使用 1 组直流电源和 3 组相同逆变结构便可工作于三相状态。而三相状态下每一相的结构都是相同的，在单相可靠稳定的运行下，三相自然能够按照预期工作，因此在实验中仅以单相进行验证。实验中用多载波垂直分布调制，使用 TMS320F28335 产生调制信号。调制的实验参数为：输入电压 80 V，载波频率 2 kHz，基波频率 50 Hz。实验所使用的器件型号及参数见表 3。额定输入电压为 80 V，本文所提拓扑具有 1.5 倍的升压能力。

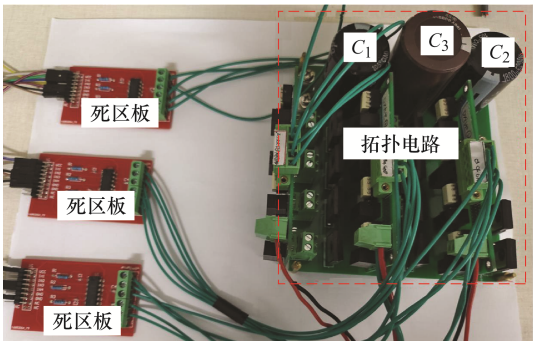


图 7　自平衡七电平逆变器实验样机

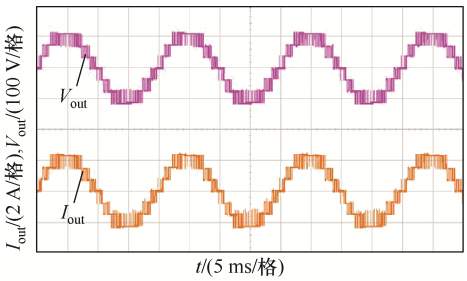
Fig. 7 Experimental prototype of self-balancing seven-level inverter

不同负载下输出电压、电流实验波形如图 8 所示。图 8(a)为纯阻性负载下的实验波形，可以看出输出的电压和电流波形与上述理论分析相符，均输出了稳定的七电平阶梯波，在 80 V 的输入电压下，输出电压峰值符合理论上的 1.5 倍增益。图 8(b)中，负载为 50 Ω 和 30 mH 阻感负载，此时输出电流的波形变为正弦波，可以看出本文所提拓扑在不同的负载条件下均能够实现电容电压的自平衡。

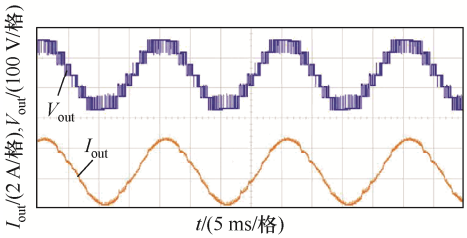
表 3　实验参数和器件型号

Tab. 3 Experimental parameters and device types

器件	型号	参数
主控芯片	TMS320F28335	—
功率开关管	IRFP4229PBF	250 V/44 A
电解电容 C_1、C_2	HP1882DMS502RB	200 V
电解电容 C_3	DA160VS3300M35*60_VS	160 V



(a)带纯电阻50 Ω负载时

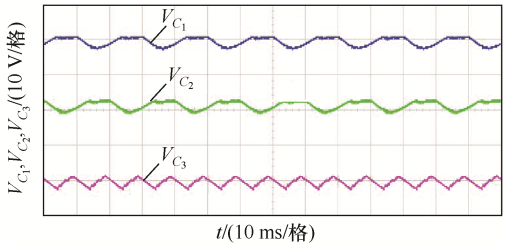


(b)带50 Ω+30 mH负载时

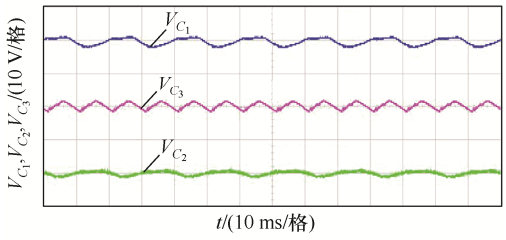
图 8　不同负载下输出电压、电流实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms of output voltage and output current under different loads

电容电压实验波形如图 9 所示。图 9(a)所示为纯阻性负载条件下的电容电压。可以看出，C_1、C_2 的电压 V_{C_1}、V_{C_2} 自动平衡在 40 V，C_3 的电压 V_{C_3} 自动平衡在 80 V，验证了本文所提拓扑自平衡的优势。图 9(b)中，负载为 50 Ω 和 30 mH 阻感负载，此时 V_{C_1}、V_{C_2} 仍然能够自平衡在 40 V，V_{C_3} 仍自平衡在 80 V。由此可见，不同的负载条件不会影响电容电压的自平衡。



(a)带纯电阻50 Ω负载时

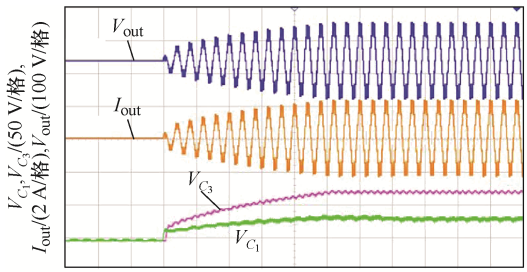


(b)带50 Ω+30 mH负载时

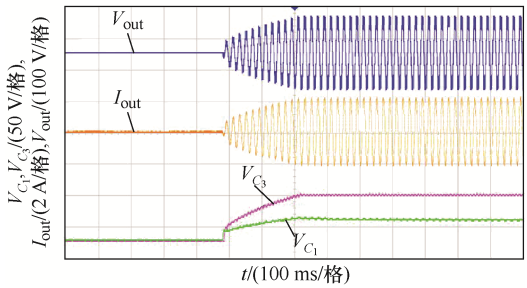
图 9 电容电压实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms of capacitor voltage

图 10 为逆变器在不同负载条件下的启动波形，输入电压均为 80 V。可以看出，在逆变器启动后，电容 C_1、C_3 电压 V_{C_1}、V_{C_3} 增加到 40、80 V，并趋于稳定。由于 C_1、C_2 并联到输入电源两端，而输入电压稳定在 80 V，这意味着 C_2 的电压 V_{C_2} 也平衡在 40 V，可见实验结果与预期相符。



(a)带纯电阻50 Ω负载时

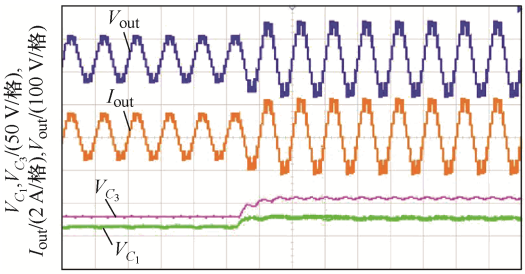


(b)带50 Ω+30 mH负载时

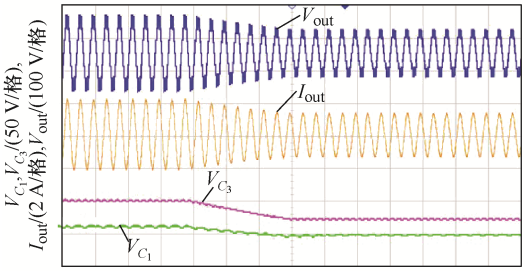
图 10 瞬态响应实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of transient response

输入电压跳变下的电容电压及输出电压、电流波形如图 11 所示。在图 11(a)中，逆变器首先在纯阻性负载输入电压 50 V 的情况下稳态运行，随后输入电压从 50 V 跳变到 80 V。在图 11(b)中，逆变器先在输入电压 80 V 的情况下稳态运行，随后输入电压由 80 V 跳变到 50 V。由图 11 可以看出，在不同负载条件下的电压跳变中电容电压都能够在很短的时间内重新达到平衡，达到新的稳态。在不同实验情况下，输出电流、输出电压、电容电压都能保持稳定，很好地验证了本文所提拓扑的稳定性。



(a)50 Ω负载下输入电压从50 V跳变到80 V



(b)50 Ω+30 mH负载下输入电压从80 V跳变到50 V

图 11 输入电压跳变下电容电压及输出电压、电流波形

Fig. 11 Waveforms of capacitor voltage, output voltage and output current under changes in input voltage

5 结语

本文提出了 1 种具有自然平衡和 1.5 倍电压增益的七电平 ANPC 升压逆变器，并对电容的自平衡和容值进行了详细论证，并与最新的类似拓扑进行了比较，证明了所提出的拓扑具有可减少器件数量、良好的升压能力、较低的总体电压应力及电容具有自平衡能力等优势。最后，通过仿真和实验验证了该拓扑的自平衡和升压能力。

参考文献：

[1] Rodriguez J, Lai J S, Peng Fangzheng. Multilevel inver-

ters: a survey of topologies, controls, and applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.

[2] Kouro S, Malinowski M, Gopakumar K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.

[3] 杨国良, 王明, 秦杭. 带有升降压的三相五电平逆变器拓扑及控制设计[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 33-40.
Yang Guoliang, Wang Ming, Qin Hang. Design of topology and control of three-phase Buck-Boost five-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 33-40. (in Chinese)

[4] 田涵雷, 韩沛松, 唐嵩峰, 等. 计及轻量化设计的多电平光伏逆变器[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4301-4311.
Tian Hanlei, Han Peisong, Tang Songfeng, et al. Multilevel photovoltaic inverter considering lightweight design [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4301-4311. (in Chinese)

[5] Meynard T A, Foch H, Thomas P, et al. Multicell converters: basic concepts and industry applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 955-964.

[6] Nabae A, Takahashi I, Akagi H. A new neutral-point-clamped PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, IA-17(5): 518-523.

[7] Malinowski M, Gopakumar K, Rodriguez J, et al. A survey on cascaded multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2197- 2206.

[8] 宋琳, 聂子玲, 叶伟伟, 等. 基于前馈解耦控制的有源中点钳位五电平模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1910-1920.
Song Lin, Nie Ziling, Ye Weiwei, et al. Research on model predictive control of ANPC-5L permanent magnet synchronous motor based on feedforward decoupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1910-1920. (in Chinese)

[9] 张航航, 刘小刚, 张新涛, 等. 有源中点箝位式(ANPC)五电平逆变器调制方法和飞跨电容电压控制策略研究[J]. 电源学报, 2015, 13(1): 67-72, 100.
Zhang Hanghang, Liu Xiaogang, Zhang Xintao, et al. Research on modulation method of ANPC five-level inverter and control strategy of flying capacitor voltage [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(1): 67-72, 100. (in Chinese)

[10] 米慧瑶, 宋磊, 刘潇奎, 等. 飞跨电容钳位型三电平变换器飞跨电容电压移相控制策略研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 86-95.
Mi Huiyao, Song Lei, Liu Xiaokui, et al. Research on phase-shifting control strategy of flying capacitor voltage for flying capacitor clamped three-level converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 86-95. (in Chinese)

[11] 张国鑫, 陈仕铠, 叶远茂. 基于开关电容的单输入升压型七电平逆变器[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 113-120.
Zhang Guoxin, Chen Shikai, Ye Yuanmao. Single-input step-up seven-level inverter based on switched-capacitor [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 113-120. (in Chinese)

[12] 唐绪青, 马俊鹏, 肖先勇. 基于级联 H 桥变流器的动态电压恢复器电压补偿控制[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 15-24.
Tang Xuqing, Ma Junpeng, Xiao Xianyong. Voltage compensation control for dynamic voltage restorer based on cascaded H-bridge converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 15-24. (in Chinese)

[13] 梁国壮, 聂辰浩, 田涵雷. 一种新型开关电容准谐振多电平逆变器[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 121-131.
Liang Guozhuang, Nie Chenhao, Tian Hanlei. Novel switched capacitor quasi-resonant multi-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 121-131. (in Chinese)

[14] Wang Hongliang, Kou Lei, Liu Yanfei, et al. A new six-switch five-level active neutral point clamped inverter for PV applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6700-6715.

[15] Wang Hongliang, Kou Lei, Liu Yanfei, et al. A seven-switch five-level active-neutral-point-clamped converter and its optimal modulation strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5146-5161.

[16] Tian Hao, Li Yuzhuo, Li Yunwei. A novel seven-level hybrid-clamped (HC) topology for medium-voltage motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5543-5547.



王林涛

作者简介：

王林涛(1996—　)，男，硕士研究生。研究方向：多电平逆变器拓扑。E-mail：1184239951@qq.com。

曾君(1979—　)，女，博士，教授。研究方向：新能源发电技术。E-mail：junzeng@scut.edu.cn。

刘俊峰(1978—　)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子及其控制。E-mail：aujfliu@scut.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)