

# 五电平双降压式半桥逆变器

杨伟, 洪峰, 王成华

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏省 南京市 210016)

## A Novel Dual Buck Half Bridge Five-level Inverter

YANG Wei, HONG Feng, WANG Chenghua

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** A novel dual Buck half bridge five-level inverter (DBHBFLI) was presented in this paper, using dual Buck circuit as the basic unit to build multilevel inverter. The topology of this inverter is different from the traditional multilevel inverters such as flying-capacitor multilevel inverter, diode-clamp multilevel inverter and cascade multilevel inverter, and it retains dual Buck half bridge inverter's (DBHBI) merits of no shoot-through problem, no body diode reverse-recovery problem, and half-period work mode. Compared with traditional multilevel inverter, clamp circuits are simplified, the complexity of circuit is reduced, and the stability of system is improved. The proposed inverter reaches a high efficiency and its filter is much small at the same time. Experiment verifies these analyses.

**KEY WORDS:** inverter; topology; dual Buck; five-level; half-bridge

**摘要:** 以双 Buck 电路为基本单元构建多电平逆变器, 提出新颖的五电平双降压式半桥逆变器。该拓扑结构不同于传统飞跨电容型、二极管箝位型或级联型多电平逆变器, 它保留了双 Buck 逆变器无桥臂直通、无体二极管反向恢复问题的优点和电流半周期工作模式。与传统桥式多电平逆变器相比, 钳位电路得到简化, 电路复杂度降低, 无桥臂直通隐患, 系统稳定性提高。理论分析、仿真和实验结果均表明该逆变器性能优异, 同时实现了高效率和小滤波器的体积重量。

**关键词:** 逆变器; 拓扑结构; 双降压; 五电平; 半桥

## 0 引言

适用于高压大容量场合的多电平逆变器是当

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50907033); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093218110001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50907033); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20093218110001).

前研究热点<sup>[1-2]</sup>, 如何提高电路可靠性是其中关键问题。功率器件多、电路结构复杂是影响多电平逆变器可靠性的最主要因素。传统桥式多电平逆变器, 桥臂上串联了多个功率器件, 为维持各个功率器件电压均衡, 需额外增加大量复杂的钳位电路, 特别是随着电平数增加, 所需钳位器件数成两倍甚至平方关系增长, 以  $n$  电平输出为例, 二极管钳位型需  $n-1$  个直流分压电容和  $(n-1)(n-2)$  个钳位二极管<sup>[3]</sup>, 飞跨电容型需  $n-1$  个直流分压电容和  $(n-1)(n-2)/2$  个钳位电容<sup>[4]</sup>, 级联型需  $(n-1)/2$  个独立直流电源<sup>[5]</sup>, 这大大增加了电路复杂度, 降低了系统可靠性。

对此, 国内外学者做了大量研究工作, 概括起来, 可分为改进拓扑结构、容错技术和软开关技术 3 种。例如, 文献[6]以多电平桥臂控制输入母线电压, 省去多个钳位二极管, 增加输出电压电平数; 文献[7-8]对桥臂中串联的大量功率开关管进行精简; 文献[9-10]利用多电平拓扑自身电路结构与开关组合冗余资源, 在故障时进行系统重构, 提高电路稳定性; 文献[11]提出无源吸收电路和软开关辅助电路, 消除电压电流尖峰, 降低开关损耗和电磁干扰。

上述研究均基于桥式多电平逆变器, 在简化钳位电路、提高电路可靠性方面取得了较大成果, 促进了多电平逆变器发展, 但电路中仍是主功率变换桥臂和钳位电路并存, 简化钳位电路工作付出了其它代价, 如增加了有源器件数、增大了部份器件电压应力等。此外, 桥式多电平逆变器存在桥臂直通隐患, 部分开关组合禁用, 逆变与钳位控制不完全解耦, 也是造成电路结构和控制方法复杂原因之一。为此, 本文从另一角度出发, 以双 Buck 电路

为基本单元构建多电平逆变器<sup>[12-14]</sup>, 提出五电平双降压式半桥逆变器。双降压式半桥逆变器拓扑结构是近年来提出的一种具有发展潜力和研究价值的拓扑结构, 该电路与传统半桥逆变器相比, 具有无桥臂直通、无体二极管反向恢复问题的优点和电流半周期模式特点。在构建多电平逆变器时, 这些优点将被保留, 同时, 利用两个 Buck 电路结构对称性和半周期工作模式特点, 在一个 Buck 电路逆变工作时, 控制另一个原本不工作的 Buck 电路来补偿输入侧电容电压偏差。由于利用功率变换电路本身来钳位, 无需额外增加钳位电路, 五电平输出与电容电压钳位完全解耦, 拓扑结构更为简化, 系统可靠性更高。

## 1 五电平双降压式半桥逆变器工作原理

### 1.1 五电平双降压式半桥逆变器拓扑结构

图1是本文提出的五电平双降压式半桥逆变器(dual Buck half bridge five-level inverter, DBHBFLI)拓扑结构示意图, 开关管  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ , 二极管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  及滤波电感  $L_1$  组成 Buck 电路 1,  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $D_5$ 、 $D_6$ 、 $D_7$ 、 $D_8$ 、 $L_2$  组成 Buck 电路 2,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  为输入分压电容,  $C_f$  为滤波电容,  $R$  为输出负载。

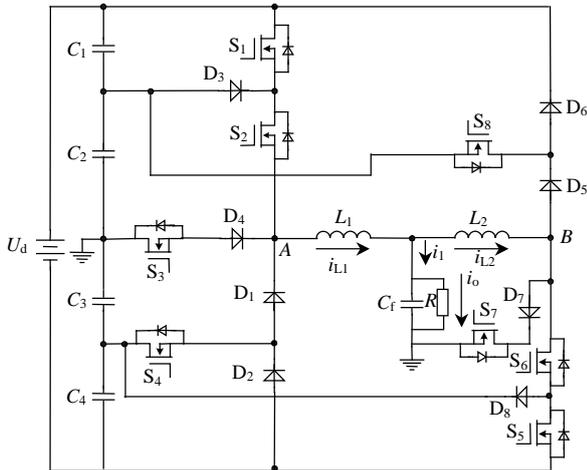


图1 五电平双降压式半桥逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of dual Buck half bridge five-level inverter

两个 Buck 电路完全对称, 且工作于输出电流半周期模式。若直流电源电压为  $U_d$ , 则通过选择恰当的开关组合, 可在桥臂 A 和 B 点分别得到  $\pm U_d/2$ 、 $\pm U_d/4$ 、0 五种输出电平。下面结合 DBHBFLI 半周期模式下关键波形来具体分析该逆变器工作原理。

### 1.2 五电平双降压式半桥逆变器模式分析

电路具体工作时序如图2所示(以空载为例)。正半周期时, 输出电流  $i_L > 0$ , Buck 电路 1 工作,  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  断开, Buck 电路 2 不工作。此时, 根据输出电压的大小共有 4 个阶段, 7 个工作模式。

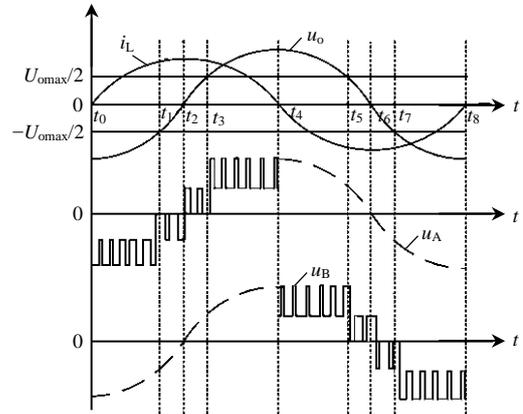


图2 五电平双降压式半桥逆变器时序图

Fig. 2 Key waves of dual Buck half bridge five-level inverter

1)  $t_0 \sim t_1$  段。

输出电压  $u_o < -U_{omax}/2$  ( $U_{omax}$  为  $u_o$  的最大值), 此阶段开关管  $S_4$  高频调制, 电路包含 2 个工作模式:

①工作模式 1: 如图 3(a)所示, 开关管  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  都断开, 电感电流  $i_{L1}$  从二极管  $D_1$ 、 $D_2$  续流, 线性下降, 桥臂 A 点输出  $-U_d/2$  电平。

②工作模式 2: 如图 3(b)所示, 开关管  $S_4$  闭合,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  断开, 二极管  $D_2$  反向偏置不导通,  $i_{L1}$  线性上升, 桥臂 A 点输出  $-U_d/4$  电平。

2)  $t_1 \sim t_2$  段。

输出电压  $-U_{omax}/2 < u_o < 0$  时, 此阶段  $S_4$  常闭,  $S_3$  高频调制,  $S_1$ 、 $S_2$  一直断开, 电路交替工作于模式 2 和 3:

①工作模式 2: 同上, 但此时电感电流  $i_{L1}$  为续流模式, 线性下降。

②工作模式 3: 如图 3(c)所示, 开关管  $S_3$ 、 $S_4$  闭合,  $S_1$ 、 $S_2$  断开, 二极管  $D_1$  反向偏置不导通,  $i_{L1}$  线性上升, 桥臂 A 点输出 0 电平。

3)  $t_2 \sim t_3$  段。

输出电压  $0 < u_o < U_{omax}/2$ , 此阶段  $S_3$  常闭,  $S_2$  高频调制, 电路交替工作于模式 4 和 5:

①工作模式 4: 如图 3(d)所示, 开关管  $S_3$  闭合,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_4$  断开,  $i_{L1}$  通过  $D_4$  续流, 线性下降, 桥臂 A 点输出 0 电平。

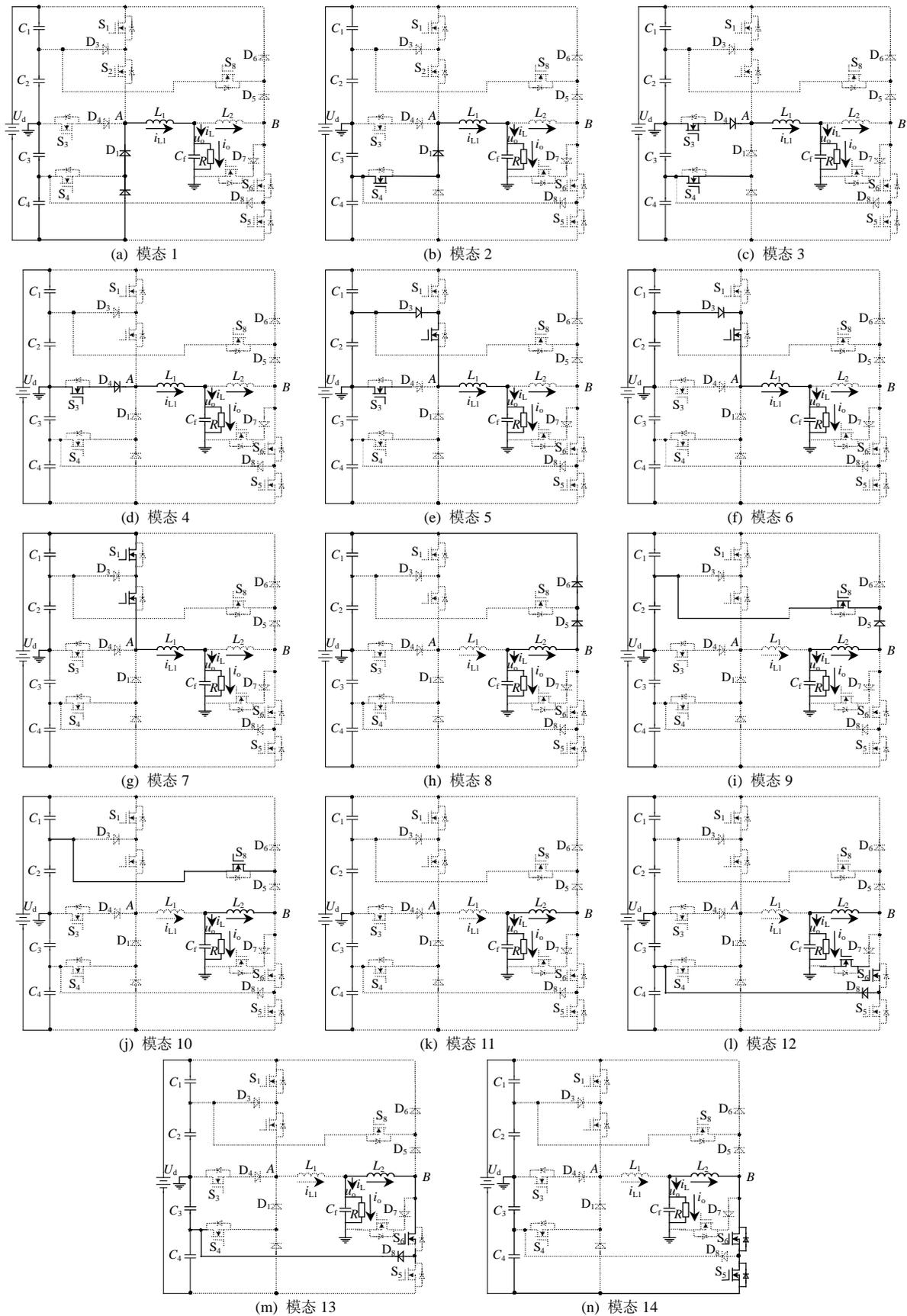


图 3 五电平双降压式半桥逆变器工作模态

Fig. 3 Working models of dual Buck half bridge five-level inverter

②工作模式 5: 如图 3(e)所示, 开关管  $S_2$ 、 $S_3$  闭合,  $S_1$ 、 $S_4$  断开, 二极管  $D_4$  反向偏置不导通,  $i_{L1}$  线性上升, 桥臂 A 点输出  $U_d/4$  电平。

4)  $t_3 \sim t_4$  段。

输出电压  $u_o > U_{omax}/2$ , 此阶段  $S_2$  常闭,  $S_1$  高频调制, 电路交替工作于模式 6 和 7:

①工作模式 6: 如图 3(f)所示, 开关管  $S_2$  闭合,  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  断开,  $i_{L1}$  通过  $D_3$  续流, 线性下降, 桥臂 A 点输出  $U_d/4$  电平。

②工作模式 7: 如图 3(g)所示, 开关管  $S_1$ 、 $S_2$  闭合,  $S_3$ 、 $S_4$  断开, 二极管  $D_3$  反向偏置不导通,  $i_{L1}$  线性上升, 桥臂 A 点输出  $U_d/2$  电平。

负半周期时, 输出电流  $i_L < 0$ , Buck 电路 2 工作,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  断开, Buck 电路 1 不工作, 此时电路也包含 4 个阶段 7 个模式, 与正半周期类似, 不

再赘述。

### 1.3 五电平双降压式半桥逆变器控制策略

图 4 为 DBHBFLI 的控制框图, 图中,  $u_r$  为电压基准;  $i_r$  为电压环输出即电流基准;  $u_r$ 、 $i_r$  经过过零比较后得到电压、电流周期  $u_p$ 、 $i_p$ ;  $U_m$  为门槛电压, 取  $u_r$  最大值的一半;  $u_r$  分别与  $\pm U_m$  相比得  $u_{c1}$ 、 $u_{c2}$ 、 $u_p$ 、 $i_r$ 、 $u_{c1}$ 、 $u_{c2}$  作为 4 个控制信号输入到逻辑电路中。系统采用电压电流双闭环控制及正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)方式, 逻辑电路根据 4 个控制信号将整个电路分为 8 个工作区间, 14 个工作模式(参见上文分析), 通过输出合适的开关组合逻辑分别在桥臂 A 点和 B 点输出五电平 SPWM 调制波, 滤波后得到正弦交流输出电压  $u_o$ 。图 4 中虚线框部分为均匀解耦控制部分原理示意图, 具体分析见下文。

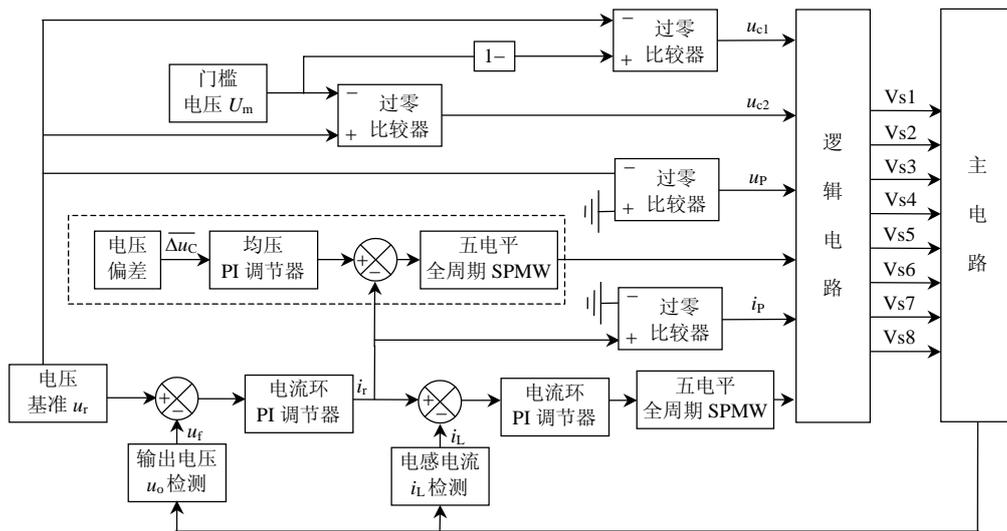


图 4 控制策略原理框图

Fig. 4 Block diagram of control strategy

## 2 五电平双降压式半桥逆变器电路特点

本文提出的 DBHBFLI 除了具有多电平逆变器共有优点外, 与传统桥式多电平逆变器相比还具有以下特点。

1) 无桥臂直通隐患。

传统桥式拓扑结构中, 电路中有大量直接串联在电源两端的开关管, 桥臂直通隐患严重。需另加控制死区, 造成输出波形畸变失真。DBHBFLI 拓扑结构中, 保留了双 Buck 逆变器无桥臂直通的优点, 驱动中无需加入死区, 提高了电路稳定性和输出波形质量。

2) 更多开关组合状态。

由于无桥臂直通隐患, 在 DBHBFLI 中开关状态可以任意组合, 相比于桥式多电平逆变器, 在故障时可以利用更多的冗余资源来进行系统重构。

3) 无体二极管反向恢复问题。

传统桥式逆变器中通过功率开关管体二极管来续流, 对 MOS 型器件而言, 提高 MOSFET 性能的措施往往会导致体二极管性能变差, 很难兼顾两者的优化, 研究表明随着开关频率提高, 开关器件体二极管的反向恢复问题趋于严重, 反向恢复损耗在变换器总损耗中所占比例大幅增长。而本方案中通过独立的功率二极管来续流, 开关管体二极管不工

作，不存在体二极管反向恢复问题，同时优化了功率开关管和续流二极管的设计。

4) 钳位均压解耦控制。

直流侧输入电压不均衡是逆变器中普遍存在问题，电压失衡会造成输出波形畸变，严重时导致系统失控<sup>[15]</sup>。DBHBFLI 可以实现逆变过程与均压钳位完全解耦控制。如图 4 虚线框部分所示，其基本思想是：将电路分为两个工作阶段，第一阶段，未均压前，检测电容电压偏差，将之作为反馈量，加入到电压电流双闭环控制系统中，控制电路工作于电流全周期模式，此时，两个 Buck 电路均工作，一个用于逆变过程，利用另一个原本不工作的 Buck 电路来补偿电容电压偏差，实现均压与逆变压解耦控制；偏差消除后，进入第二阶段，控制电路稳定地工作于电流半周期模式。

5) 拓扑结构更为简化。

桥式多电平逆变器，主功率变换桥臂和钳位电路并存，为实现有效钳位与均压，需额外增加大量钳位器件。而双降压式多电平逆变器，由于钳位均压完全解耦，可利用功率电路本身来钳位，无需额外的钳位二极管。表 1 对两者的功率器件数作了比较。实现相同电平数输出，两者所需开关管数相同，但双降压式结构中，所需功率二极管数大为减少，以五电平为例，单相系统，二极管钳位型需 12 个，双降压式只需 8 个，减少了 1/3。三相系统，二极管钳位型需 36 个<sup>[16]</sup>，双降压式需 24 个。特别地，随着电平数增加时，双降压式多电平逆变器优势更为明显， $n$  电平输出，传统桥式电路需要 $(n-1)(n-2)$  个钳位二极管<sup>[3]</sup>，接近平方倍关系增长，而双降压式电路只需  $2(n-1)$  个二极管。通过对比可知，本文提出的双降压式结构有助于简化电路拓扑结构。

表 1 双降压式与传统桥式多电平逆变器功率器件数比较

Tab. 1 Number of power devices comparison between dual buck and traditional half bridge multilevel inverter

电平数	拓扑类型	单相		三相	
		开关管	二极管	开关管	二极管
五电平	双降压	8	8	24	24
	二极管钳位	8	12	24	36
$n$ 电平	双降压	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$6(n-1)$	$6(n-1)$
	二极管钳位	$2(n-1)$	$(n-1)(n-2)$	$6(n-1)$	$6(n-1)(n-2)$

3 仿真结果

为验证该方案可行性，对系统进行 saber 仿真，

仿真条件如下：输入电压  $\pm 180\text{ V}$ 、输出电压  $110\text{ V}/400\text{ Hz}$ 、输出滤波电容  $C_f=10\text{ }\mu\text{F}$ 、输出滤波电感  $L_1=L_2=100\text{ }\mu\text{H}$ ，输出电阻  $50\text{ }\Omega$ 。图 5 为空载和满载时仿真波形， $u_A$  为桥臂 A 点电压， $u_B$  为桥臂 B 点电压， $i_L$ 、 $u_o$  分别为输出电感电流和输出电压。

稳态后电路工作于电流半周期模式，空载时，如图 5(a)所示，电压相位滞后于电流  $90^\circ$ ，正半周期，对应输出电压上升区域，Buck 电路 1 工作，桥臂 A 点输出  $\pm U_d/2$ 、 $\pm U_d/4$ 、 $0$  五种电平，Buck 电路 2 不工作，电感  $L_2$  上电流为零，桥臂 B 点电压  $u_B=u_o$ ；负半周期，对应输出电压下降阶段，Buck 电路 1 不工作， $u_A=u_o$ ，Buck 电路 2 工作，桥臂 B 点输出五电平调制波。图 5(b)为满载时仿真波形，电感电流与输出电压相位几乎一致，正半周期对应于输出电压大于零区域，桥臂 A 点输出  $+U_d/2$ 、 $+U_d/4$ 、 $0$  三种电平，负半周期对应输出电压小于零区域，桥臂 B 点输出  $-U_d/2$ 、 $-U_d/4$ 、 $0$  三种电平。仿真波形同前文分析的工作原理完全吻合。

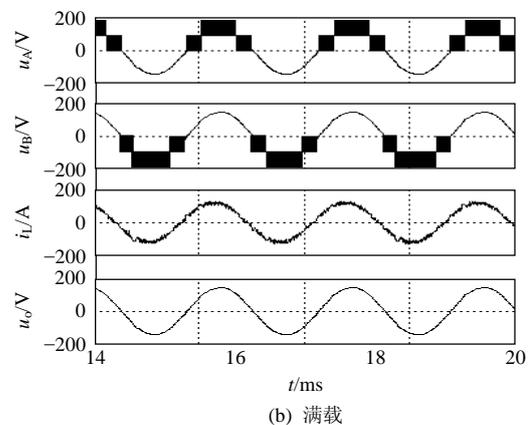
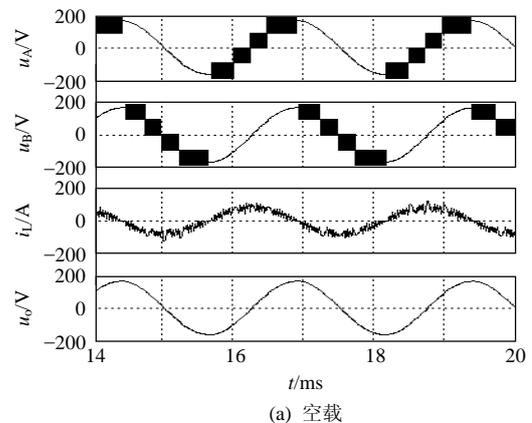


图 5 仿真波形

Fig. 5 Waveforms of simulation

## 4 实验结果

本文对该逆变器进行样机实验,参数如下:功率开关管选用 IRFP460,功率二极管选用 DSEI60-06A,输出滤波电容  $C_f=10\mu\text{F}$ ,输出滤波电感  $L_1=L_2=100\mu\text{H}$ ,输入直流母线电压  $\pm 180\text{V}$ ,输出电压  $110\text{V}/400\text{Hz}$ ,额定输出功率  $1000\text{W}$ 。

图6为空载和满载时实验波形,稳态后电路工作于电流半周期模式,  $u_A$ 为桥臂A点电压;  $u_o$ 为输出电压;  $u_p$ 为反映输出电压周期的信号,即  $u_o>0$ 时,  $u_p$ 输出高电平,  $u_o<0$ 时,  $u_p$ 输出低电平;同理  $i_p$ 反映电感电流周期,电流正半周期时,  $i_p$ 输出高电平,负半周期,  $i_p$ 输出低电平。图6(a)为空载波形,电压相位滞后电流  $90^\circ$ ,电流正半周期, Buck 电路1工作,桥臂A点输出五电平调制波,负半周期时 Buck 电路1不工作,电感电流  $i_{L1}=0$ ,桥臂A点电压等于输出电压  $u_o$ ;图6(b)是满载波形,电流、电压相位几乎相同,正半周期对应输出电压大于零区域, A点输出电平为  $+U_d/2$ 、 $+U_d/4$ 、 $0$ ,负半周期对应输出电压小于零区域, A点电压等于输出电压  $u_o$ 。实验波形与理论分析及仿真完全吻合,表明该方案保留双 Buck 逆变器优点的同时,很好实现了五电平输出。

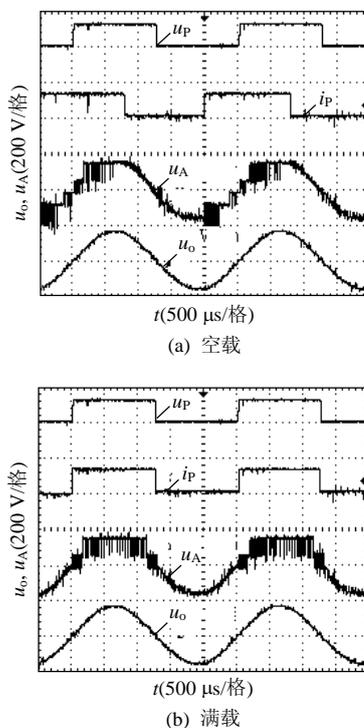


图6 实验波形

Fig. 6 Waveforms of experiment

## 5 结论

本文以双 Buck 电路为基本单元构建多电平逆变器,提出一种新型的五电平双降压式半桥逆变器。理论分析、仿真和实验验证表明该逆变器在保留了双 Buck 逆变器优点基础上,很好地实现了五电平输出,与传统桥式多电平逆变器相比,该方案无需钳位电路,拓扑结构更为简化,电路可靠性更高。因而,本逆变器适用于航空航天等对电源可靠性要求较高的大功率变换场合。另外,由于输入、输出共地,可以使用3个共用输入电源的 DBHBFLI 模块,来构建三相系统。

## 参考文献

- [1] Chaudhuri T, Steimer P, Rufer A. Introducing the common cross connected stage(C3S) for the 5L ANPC multilevel inverter[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Rhodes: IEEE, 2008: 167-173.
- [2] Serpa L A, Barbosa P M, Steimer P K, et al. Five-level virtual-flux direct power control for the active neutral-point clamped multilevel inverter[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Rhodes: IEEE, 2008: 1668-1674.
- [3] Yuan Xiaoming, Barbi I. Fundamentals of a new diode clamping multilevel inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 711-718.
- [4] Miquel F E, Claude V J, Arnir A. Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 89-815.
- [5] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46. Wu Hongyang, He Xiangning. Research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46(in Chinese).
- [6] Pan Zhiguo, Peng Fang Z, Victor S, et al. A diode-clamped multilevel converter with reduced number of clamping diodes[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim: IEEE, 2004: 820-824.
- [7] Kou Xiaomin, Corzine K A, Familant Y L. A unique fault-tolerant design for flying capacitor multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 531-538.
- [8] Keith A C, Yakou L F, Kou X. Full binary combination schema for floating voltage source multi-level inverters [C]//IEEE industry Applications Society. Pittsburgh:

- IEEE, 2002: 2398-2404.
- [9] 李冬黎, 张晋, 陈阿莲, 等. 一种具有自修复功能的多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 54-60.
- Li Dongli, Zhang Jin, Chen Alian, et al. A multilevel converter topology with self-repair ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 54-60(in Chinese).
- [10] 王旭, 藏义, 徐彬, 等. 基于开关管的级联 H 桥逆变器故障处理办法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 76-81.
- Wang Xu, Zang Yi, Xu Bin, et al. Research on switch-based control method for cascaded H-bridge inverter failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 76-81(in Chinese).
- [11] Mezaroba M, Martins D C, Barbi I. A ZVS PWM inverter with active voltage clamping using the reverse recovery energy of the diodes[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Application, 2005, 52(10): 2219-2226.
- [12] 洪峰, 刘军, 严仰光. 滞环电流控制型双 Buck 逆变器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 73-77.
- Hong Feng, Liu Jun, Yan Yangguan. Hysteresis current controlled dual Buck half bridge inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 73-77(in Chinese).
- [13] Hong Feng, Wang Chenghua, Ji Dingyi, et al. Three level dual Buck half bridge inverter[C]//Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing: SUPERGEN, 2009: 1-5.
- [14] 洪峰, 单任仲, 王慧贞, 等. 三电平双降压式全桥逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 55-59.
- Hong Feng, Shan Renzhong, Wang Huizhen, et al. A novel dual buck full bridge three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 55-59(in Chinese).
- [15] 陈东华, 谢少军. 电流型控制半桥逆变器研究(I): 直流分压电容不均压问题[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 85-88.
- Chen Donghua, Xie Shaojun. Research on current-mode control half-bridge inverter (i): voltage un-balance of input capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 85-88(in Chinese).
- [16] Akagi H, Fujita H, Yonetani S, et al. A 6.6 kV transformer less STATCOM based on a five-level diode-clamped PMW converter: system design and experimentation of a 200 V 10 kVA laboratory model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(2): 672-680.



杨伟

收稿日期: 2011-02-20。

作者简介:

杨伟(1982), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、航空电源, yangwei\_nuaa@163.com;

洪峰(1979), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子技术、航空电源;

王成华(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为集成电路设计。

(责任编辑 吕鲜艳)