

一种三相五电平电流型逆变器拓扑及其 PWM 控制方法的研究

鲍建宇, 李玉玲, 白志红, 张仲超
(浙江大学电气学院, 浙江省 杭州市 310027)

Research on Topology and PWM Control Method of a Three-phase Five-level Current-source Inverter

BAO Jian-yu, LI Yu-ling, BAI Zhi-hong, ZHANG Zhong-chao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Multilevel inverters have been paid more and more attentions because of their good characteristics with low output harmonics, high power capacity, good electromagnetic compatibility and so on. With the development of the superconducting magnetic energy storage (SMES) technology, the energy storage efficiency of inductors can be greatly improved, for higher power applications, current source inverters can have particular advantages in some circumstances. Hence it is useful to explore the topology and control strategy of a multilevel current source inverter (CSI) system. A topology of three-phase 5-level CSI is presented in this paper and its operational principle is analyzed. By simplifying the multicarrier PWM technology, two triangular-carriers out of phase are used to generate 3-level signals, after being decoupled, a kind of 5-level PWM control strategy suited for this topology is obtained and is also testified by simulations. Lastly, an experimental system is built to validate the mechanism of this 5-level topology and its PWM control method.

KEY WORDS: power electronics; current-source; inverter; 5-level; topology; multicarrier

摘要: 多电平变流器具有输出谐波小、功率容量大、电磁兼容性好等特性而越来越引起人们的重视。随着超导储能技术的发展,电感储能效率的不断提高,在某些大功率应用场合,电流型逆变器也将发挥出其特定的优点。因此,电流型多电平逆变器拓扑和控制策略的研究具有一定的实际意义。文中提出了一种三相5电平电流型逆变器拓扑,并分析了其工作原理。对多载波 PWM 控制方法进行简化,采用两个相位相反的三角载波得到3电平信号,经过解耦处理,得到了一种

适合于该拓扑的5电平 PWM 开关控制策略,并进行了仿真验证。最后,建立了一个三相5电平 CSI 的实验系统,对文中所给的拓扑和控制方法进行了验证。

关键词: 电力电子; 电流型; 逆变器; 五电平; 拓扑; 多载波

0 引言

多电平变流器具有输出功率大、器件开关频率低、变流器等效开关频率高、输出谐波小、动态响应快、传输频带宽、电磁兼容性好等特性。它的输出一般是由几个电平台阶合成阶梯波以逼近正弦输出波形。因此,有关多电平变流器的研究越来越受到人们的重视。

多电平变换技术的研究工作主要是针对电压型逆变器^[1] (VSI), 因为目前大功率变流器的应用主要是以 VSI 为主。多电平 VSI 经过多年来的研究和发 展, 在拓扑结构、调制方式、谐波特性、控制性能、直流电压平衡等方面取得了丰硕的研究成果^[2-5], 并仍然成为研究热点之一。与多电平 VSI 相比, 多电平 CSI^[6-7] 的研究工作则相对较少。但随着科学技术的发展, 尤其是高温超导技术^[8-9] 突破性的发展并进入实用化, 超导技术将解决电流型变流器中的储能电感储能效率问题。同时电力超导储能系统中储能线圈具有电流源特性, 因而 CSI 将具有广泛的应用前景。超导线圈电阻为零, 储能效率高, 几乎没有能量的损失。超导线圈位于变流器的直流侧, 在系统中等效为一电流源。超导储能系统用于电力系统有功电流, 无功电流和谐波电流补偿时, 补偿是以连接超导储能线圈的变流器向电网注入有功电

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477033)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50477033).

流,无功电流和谐波电流的形式实现的。电力电子变流器等效为可控的电流源,所以在这方面 CSI 具有其独特的优点。电流型变流器作为一种变流器的基本结构,与电压型变流器一样可以用于国民经济各部门,尤其是超导技术在电力系统中的应用。电流型多电平变流器^[10-11]更具优越性,因而开展电流型多电平变流器的研究工作具有重要的学术意义和广泛的商业应用前景。

文献[12]提出了一种三相分相式五电平 CSI 拓扑,但其需要引入中性线并且中性线上要流过负载电流,因此它的实用性受到了限制。文献[13]提出了一类三相直接式多电平 CSI 拓扑,通过阶梯波合成的方法得到多电平电流,虽然控制比较简单,但并没有实现 PWM 调制。本文的主要研究内容:①提出了一种三相电流型五电平拓扑,该拓扑无需中性线就可以直接带三相负载,分析了其产生五电平电流的工作机理,并讨论了带三相不平衡负载的能力;②通过分析和比较多电平 VSI 的多载波 PWM^[14-15]控制方法,根据对偶原理,在满足多电平 CSI 电流源不开路、并利用电感实现电流均分的控制思想,提出了一种仅采用两个相位相反的三角载波,就可产生五电平 PWM 信号的调制方法;③分别建立了仿真模型和实验系统进行了验证。

1 三相五电平 CSI 拓扑及其工作原理

该三相 5 电平逆变器拓扑如图 1 所示。由电压源 U_d 、电感 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 以及 2 个电流型逆变器组成。4 个电感既起平波作用,又起到均流作用,因此电压源这一侧就不需再串联一个大电感来构造电流源。与多电平 VSI 控制方式不同,在该五电平 CSI 中,为保证直流侧电流连续,在每一组逆变桥中,任一时刻其上桥臂和下桥臂的 3 个开关管中有且仅有一个开关管导通;另外为了保证流过两组逆变桥的直流电流相同,同一相的两个开关管不直通。在满足这样的开关条件下,就可以得到图 2 所示的两种等效工作模式。不难看出,在这两种工作模式中,4 个电感与负载之间的连接是对称的,而且都由同一个电压源供电,因此流过 2 个逆变器的直流电流近似相等,也即在开环条件下就可基本实现 $I_1=I_2=1/2I_d$,这也就为产生五电平电流创造了良好的工作条件。

以 A 相为例,其五电平电流的产生机理如下:

① S_{A1} 、 S_{A2} 导通, $i_a = +I_d$; ② S_{A1} 、 S_{A2} 中一个导通,

另一个关断, $i_a = +1/2I_d$; ③ S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{A3} 、 S_{A4} 全关断, $i_a = 0$; ④ S_{A3} 、 S_{A4} 中一个导通,另一个关断, $i_a = -1/2I_d$; ⑤ S_{A3} 、 S_{A4} 导通, $i_a = -I_d$ 。

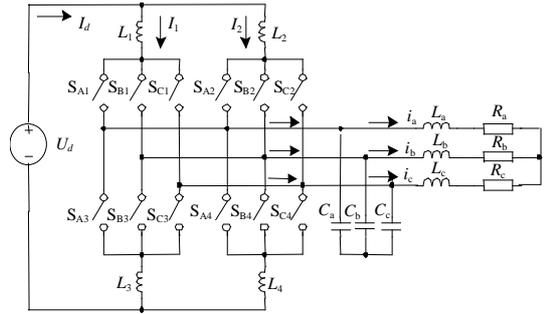


图 1 三相电流型五电平逆变器主电路拓扑
Fig. 1 Topology of a three-phase 5-level CSI

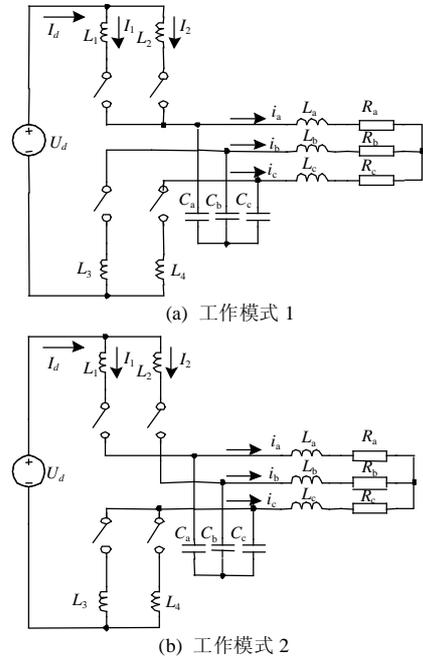


图 2 三相电流型五电平逆变器的两种等效工作模式
Fig. 2 Two operational modes of three-phase 5-level CSI

2 PWM 控制方法的实现

(1) 将传统的多载波 PWM 方法简化,仅采用两个三角载波,就可得到图 3 所示的 PWM 调制方法。其中三角波幅值为 1,调制波的幅值(可调)大于 1 而小于 2,两者比较之后就可以得到如图 4(a)所示的 A、B、C 三相的三电平逻辑信号 p_a 、 p_b 、 p_c 。

(2) 将 p_a 、 p_b 、 p_c 分别两两互减,得到 $p_a^c = p_a - p_b$, $p_b^c = p_b - p_c$, $p_c^c = p_c - p_a$, 因为 $p_a^c + p_b^c + p_c^c = 0$, 所以这三相的开关控制信号相互解耦,其对应的五电平控制信号如图 4(b)所示。

(3) 根据前面所述的 5 电平拓扑的工作原理,将图 4(b)所示的 5 电平逻辑信号进行分解。例如,

A 相正半周分解为两个 2 电平信号并送给其上桥臂的两个开关管，同理负半周分解后送给下桥臂的 2 个开关管。这样就可以得到表 1 所示的一种开关组合方式，在该种组合方式下可以实现 PWM 调制。

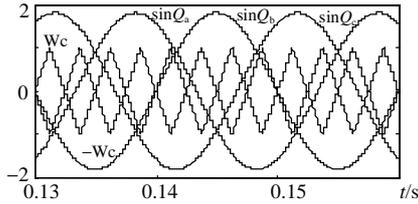
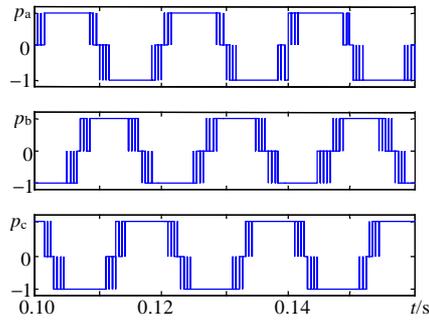
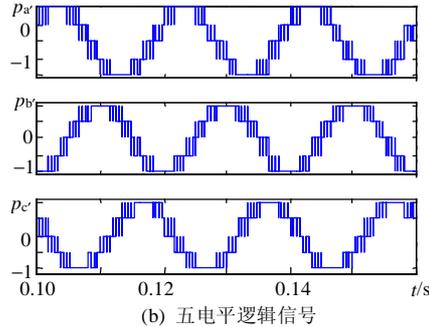


图 3 PWM 调制原理示意图

Fig. 3 Principle Diagram of PWM



(a) 三电平逻辑信号



(b) 五电平逻辑信号

图 4 多电平逻辑信号

Fig. 4 Multilevel logic signals

表 1 三相 5 电平 CSI 拓扑的开关组合

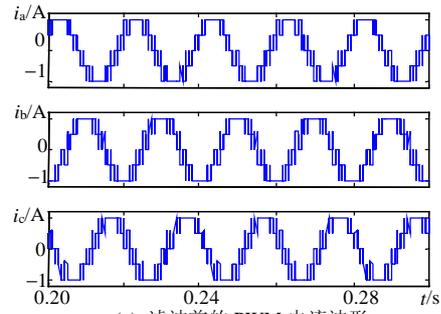
Tab. 1 Switching Combination of 3-Phase 5-Level CSI

Topology			
	A 相开关	B 相开关	C 相开关
1	S _{A1} PWM	S _{B3} , S _{B4} ON	S _{C1} PWM, S _{C2} ON
2	S _{A1} PWM, S _{A2} ON	S _{B3} , S _{B4} ON	S _{C1} PWM
3	S _{A1} , S _{A2} ON	S _{B3} PWM, S _{B4} ON	S _{C3} PWM
4	S _{A1} , S _{A2} ON	S _{B3} PWM	S _{C3} PWM, S _{C4} ON
5	S _{A1} ON, S _{A2} PWM	S _{B3} PWM	S _{C3} , S _{C4} ON
6	S _{A2} PWM	S _{B1} ON, S _{B2} PWM	S _{C3} , S _{C4} ON
7	S _{A3} PWM	S _{B1} , S _{B2} ON	S _{C3} PWM, S _{C4} ON
8	S _{A3} PWM, S _{A4} ON	S _{B1} , S _{B2} ON	S _{C3} PWM
9	S _{A3} , S _{A4} ON	S _{B1} PWM, S _{B2} ON	S _{C1} PWM
10	S _{A3} , S _{A4} ON	S _{B1} PWM	S _{C1} PWM, S _{C2} ON
11	S _{A3} ON, S _{A4} PWM	S _{B4} PWM	S _{C1} , S _{C2} ON
12	S _{A4} PWM	S _{B3} ON, S _{B4} PWM	S _{C1} , S _{C2} ON

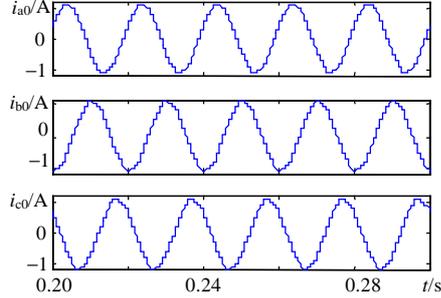
3 仿真结果

本文以图 1 所述的三相 5 电平 CSI 为例，应用文中所给的 PWM 控制方法，进行了仿真研究。仿真参数如下：电压源 U_d 由三相不控整流获得；输入

交流相电压为 50V；4 个电感均为 100mH；滤波电容为 60 μ F；负载电感为 10mH；电阻为 6 Ω 。三角波载波频率为 4kHz，调制波幅值为 1.8。图 5(a) 所示为三相 5 电平 CSI 的输出 PWM 电流波形。图 5(b) 为滤波后的三相负载电流波形，由图可见滤波后的电流波形非常接近正弦波。



(a) 滤波前的 PWM 电流波形



(b) 滤波后的 PWM 电流波形

图 5 三相 5 电平 CSI 的输出电流波形

Fig. 5 Output current waves of 3-phase 5-Level CSI

4 实验结果

控制电路的设计：系统控制框图如图 6 所示。三相电网电压经过锁相环后，通过计数器对 EEPROM 寻址，经 D/A 转换后得到与电网同相位的三相正弦波信号，与可调的幅值控制信号 U_{mod} 相乘后作为每个比较模块单元的调制信号。其中三角

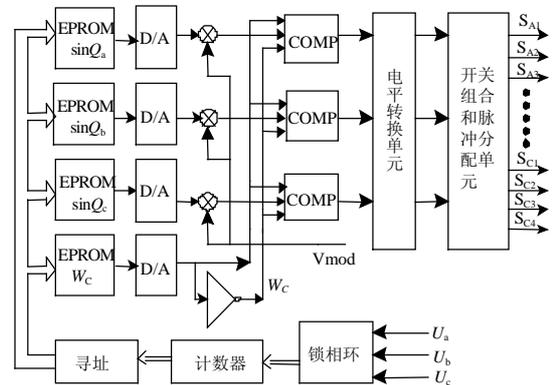


图 6 三相 5 电平 CSI 系统控制框图

Fig. 6 System control diagram of 3-phase 5-level CSI

载波信号 W_C 与 A 相调制波同相位, 载波比为 32, 三角波幅值为 2.5V, 调制波幅值可调, 此处为 4.8V。将比较模块单元出来的 3 电平信号, 经过电平转换后, 得到 5 电平信号, 再送给开关信号组合和脉冲分配单元, 最后输出 12 路开关脉冲信号去驱动 MOS 管。

主电路参数设计: 电压源 U_d 由三相不控整流获得; 输入交流相电压为 50V; 开关管由 MOS 管 IRFP450 和快恢复二极管 HFA25TB60 串联而构成; 开关管的电压应力为两相负载输出电压之差, 如 SA1 关断, 则其承受的电压为 u_b-u_a 或 u_c-u_a ; 由于实现了五电平控制, 故流过每个开关管的电流最大值为 $1/2I_d$ 。

LC 滤波器中电容 C 的设计可以从两个原则考虑: 在第一主导开关谐波 f_1 下, C 相当于短路; 而在基频 f 下, C 相当于开路, 则有如下关系式:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \ll 1, \quad X_C = \frac{1}{2\pi f_1 C} \gg 1$$

再结合实际应用中, 实验装置分布参数引起的谐波干扰, 将上述计算结果得到的电容值 C 放大 1.5~2 倍后, 取 $C=60\mu\text{F}$ 。在确定电容 C 之后, 由 LC 滤波器的截止频率 f_c 即可确定电感 L , 取 8mH。

均流电感的设计主要从减少直流侧电流纹波的角度来考虑, 即满足 $L_{dc} = v_m / 2\Delta I_{dc} f_s$ 。式中, v_m 为电感两端的交流电压; ΔI_{dc} 为纹波电流; f_s 为工作频率; 在实验装置中, 均流电感取值为 100mH。

图 7 所示的为实验结果, 其中负载电阻为 5Ω, 输出电流的频率为 50Hz。图 7(a)为滤波前的 PWM

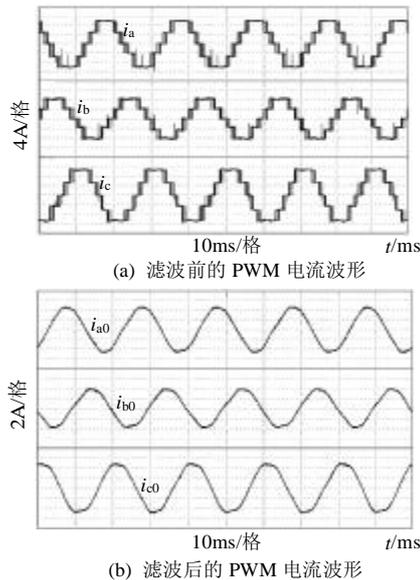


图 7 三相 5 电平 CSI 的输出电流波形

Fig. 7 Output current waves of 3-phase 5-level CSI

电流波形, 图 7(b)为滤波后的电流波形, 可以看出该波形近似为正弦波。

关于带三相不平衡负载能力的讨论: 当负载不平衡时, 若采用固定的开关组合方式, 将会出现均流电感电流 I_1 和 I_2 之间的不平衡, 导致中间电平电流的不平衡, 影响逆变器的工作性能。然而, 分析图 1 可以发现: 如在开关组合 ($S_{A1}, S_{C3}; S_{B2}, S_{C4}$) 和 ($S_{B1}, S_{C3}; S_{A2}, S_{C4}$) 分别作用下, 负载侧输出电流是一样的。而电感 L_1 、 L_2 两端承受的电压分别为 u_a-u_b 和 u_b-u_a , 极性正好相反, 导致电流 I_1 、 I_2 的变化趋势也正好相反。此时, 只有保持电感 L_1 、 L_2 两端的平均电压为零, 才能实现 $I_1=I_2=1/2I_d$ 。具体实现方法如下: 由于输出 1/2 电平电流时, 都存在两种开关组合方式, 这时电感 L_1 、 L_2 两端承受等值、极性相反的电压, 因此若在每个周期采取开关管轮换导通 (冗余开关组合之间) 的方法以使电感 L_1 、 L_2 两端承受等值的正负电压, 这样在每两个周期里即可维持平均电压为零。因此, 当负载不平衡时, 采用该方法可以使五电平逆变器正常工作。

5 结论

本文构造了一种无中性线的三相 5 电平 CSI 拓扑 (由 4 个均流电感和 12 个开关器件组成), 并分析了其工作原理。借助于多载波 PWM 调制方法, 提出了一种适合于该拓扑的五电平 PWM 控制方法, 并给出了相应的数字化实现方案。最后, 通过仿真模型和实验系统对文中所述的有关结论进行了验证。

参考文献

- [1] Lai Jihsheng, Peng Fangzheng. Multilevel converter-a new breed of power converters[J]. IEEE Trans. on Industrial Applications, 1996, 32(3): 509-517.
- [2] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 34-38.
Chen Alian, Deng Yan, He Xiangning. A multilevel converter topology with redundancy ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 34-38(in Chinese).
- [3] 王鸿雁, 陈阿莲, 邓焰, 等. 基于控制自由度组合的多电平逆变器载波 PWM 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 131-135.
Wang Hongyan, Chen Alian, Deng Yan, et al. Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 131-135(in Chinese).
- [4] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 102-106.
Fei Wa-min, Lü Zhengyu, Yao Wenxi. Research of selected harmonic

- elimination PWM technique applicable to multi-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 102-106(in Chinese).
- [5] 张元媛, 阮新波. 多电平直流变换器中飞跨电容电压的一种控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 34-38.
Zhang Yuanyuan, Ruan Xinbo. A novel control strategy for the flying capacitor voltage of the multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 34-38(in Chinese).
- [6] Xiong Yu, Chen Danjiang, Deng Songquan, et al. A new single-phase multilevel current-source inverter[C]. IEEE APEC2004, Anaheim, California, USA, 2004.
- [7] 熊宇, 陈丹江, 刘兆燊, 等. 一类新型的单相直接式电流型多电平变流器拓扑[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 26-30.
Xiong Yu, Chen Danjiang, Liu Zhaoshen, et al. A novel single-phase multilevel current-source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5): 26-30(in Chinese).
- [8] Luongo C A. Superconducting storage systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(4): 2214-2223.
- [9] Karasik V, Dixon K. SMES for power utility applications: a review of technical and cost considerations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 541-546.
- [10] 李君, 徐德鸿, 郑家伟, 等. 超导储能用多模块电流型变流器载波轮换均流方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 106-111.
Li Jun, Xu Dehong, Cheng K W E, et al. Carrier swapping method to equalize current in a multi-modular current source converter for SMES [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 106-111(in Chinese).
- [11] Zhang zhongchao, Boon-Teck Ooi. Multi-modular current source SPWM converter for SMES [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1993, 8(3): 250-256.
- [12] Xiong Yu, Li Yuling, Yang Xin, et al. A new three-phase five-level current-source inverter[C]. IEEE APEC2005, The Hilton Hotel, Austin Texas, USA, 2005.
- [13] 熊宇, 胡长生, 陈丹江, 等. 一类新型三相直接式电流型多电平逆变器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 163-167.
Xiong Yu, Hu Chang-sheng, Chen Danjiang, et al. Research on a new three-phase direct type multilevel current source inverter topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 163-167(in Chinese).
- [14] McGrath B P, Holmes D G. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [15] Walker G R. Digitally-implemented naturally sampled PWM suitable for multilevel converter control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6): 1322-1329.

收稿日期: 2005-12-04。

作者简介:

鲍建宇(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率变流器、电机驱动、电力电子技术应用等 jianyn-bao@163.com;

李玉玲(1973—), 女, 博士生, 讲师, 主要从事有源滤波、功率因数校正方面的研究;

白志红(1980—), 女, 博士研究生, 研究方向为大功率变流器、电力电子技术应用等;

张仲超(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为中高频感应加热电源、大功率变流器、相移 SPWM 技术以及电力电子技术的应用。

(编辑 王彦骏)