

新型单相五电平电压源逆变器

曾繁鹏, 纪延超, 王建赟

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了改善传统多电平逆变器电路结构复杂的问题, 利用较少的功率器件实现尽可能多的电平输出, 提出一种新型单相五电平电压源逆变器。新型电路拓扑是在传统的单相 H 桥型电压源逆变器的基础上, 增加了两个单向功率开关, 利用 6 个功率开关在交流侧就可以产生 5 个不同的电平输出。在分析电路拓扑工作原理和 6 种工作模式的基础上, 给出了简单的 PWM 控制策略。实验结果验证了电路拓扑及其控制方法的有效性。

关键词: 电气设备; 逆变器; 五电平; 拓扑结构; 电压源逆变器

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1007-449X(2008)03-0300-04

A novel single-phase five-level voltage-source inverter

ZENG Fan-peng, JI Yan-chao, WANG Jian-ze

(Department of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper presents a new single-phase five-level voltage-source inverter. The proposed design improved on the complex circuit structure of a conventional multilevel inverter and achieved as much output voltage levels as possible with fewer power switches. In this topology two power switches were used together with a conventional single-phase H-bridge voltage-source inverter. By using six power switches, five output voltage levels can be obtained at ac side. Simple PWM (Pulse-Width Modulation) control was achieved. The simple PWM control strategy was presented on the base of analysis of operating principles and six working model. Experimental results verify the validity of the proposed topology and control strategy.

Key words: electric equipment; inverters; five-level; topology; voltage source inverters

1 引言

由于多电平逆变器具有输出功率大、器件开关频率低、逆变器等效的开关频率高、输出谐波小、动态响应速度快、电磁兼容性好等一系列的优点, 受到了越来越多的关注, 并已经得到了广泛的研究和应用。目前对多电平技术的研究大部分集中在电压型多电平电路拓扑, 但是也有学者对电流型逆变器展开研究。其研究热点主要是对多电平逆变器的拓扑结构^[1-4]和控制方法^[5-7]。

多电平逆变器的基本思想是在一定的主电路拓

扑结构的基础上通过不同的开关组合, 获得多级阶梯波形输出等效正弦波。电压型多电平逆变器自 20 世纪 80 年代发展至今, 已经在拓扑结构上出现了多个分支^[2,3]。总体来说, 多电平电压型逆变器的基本拓扑结构可以分为三类: 二极管钳位型多电平逆变器; 飞跨电容型多电平逆变器; 级联型多电平逆变器。二极管型钳位型和电容钳位型多电平逆变器需要附加大量钳位二极管和钳位电容来达到多电平输出的目的, 其钳位二极管和钳位电容的数量取决于电平数。而级联型多电平逆变器采用多个模块化的单相 H 桥逆变器电路级联而成, 具有结构一

收稿日期: 2007-11-16

作者简介: 曾繁鹏(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子电路的控制技术及其在电力系统中的应用;

纪延超(1962-), 男, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

王建赟(1972-), 男, 副教授, 研究方向为信号处理技术在电力系统中的应用。

致、维护方便等优点,得到了广泛的关注。但是级联型多电平逆变器需要大量的功率开关,限制了其在实际中的应用。

本文为了简化多电平逆变器的结构,在不使用钳位二极管和钳位电容的情况下,尽量减少功率开关的使用数量。提出了一种单相五电平电压源型逆变器,电路拓扑只需要6个单向功率开关就可以实现五电平的交流输出。相比与传统的五电平电压源逆变器具有开关器件少,无需钳位二极管和钳位电容、可以四象限运行、控制简单等优点。详细分析了电路拓扑的工作原理,给出了简单的PWM控制策略。

2 电路结构

图1中给出了新型单相五电平电压源型逆变器的电路拓扑结构。由图1中可以看出,电路只需要6个单向功率开关就可以实现交流侧a、b端的五种不同电平输出,图中的 L_f 是滤波电感, v_1 和 v_2 是直流侧电压。图1中的 S_2 和 S_2' , S_3 和 S_3' 构成了传统的H桥型逆变器,在此基础上,增加了两个单向功率开关 S_1 和 S_1' 就可以增加两个电平的交流输出。功率开关 S_1 和 S_1' 所承受的直流电压为 v_1 ,而全桥的功率开关 S_2 、 S_2' 、 S_3 和 S_3' 要承受的直流电压为 $v_1 + v_2$ 。功率开关 S_1 和 S_1' , S_2 和 S_2' , S_3 和 S_3' 分别工作在互补状态。这样就只有3个独立通断的开关 S_1 、 S_2 和 S_3 ,可以组合出8种工作状态,其中有6种有效的工作状态,有5种不同的电压输出,可以在交流侧合成的电压分别为 $\pm(v_1 + v_2)$ 、 $\pm(v_2)$ 和0。如果假设直流电压相等,即 $v_1 = v_2 = E$,那么就有 $\pm 2E$ 、 $\pm E$ 和0五种电平输出。

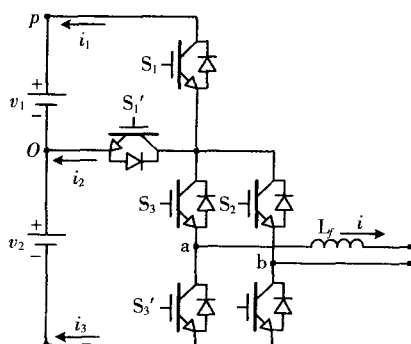


图1 主电路结构图

Fig. 1 Diagram of the main circuit

3 工作模式

图1所示的电路共有8种工作模式,在这8种工作模式中有效的工作模式有6种,其工作模式如图2所示,在分析工作模式时,作以下假设:

- 功率开关 $S_1 \sim S_3$ 是理想的开关;
- 直流电压是恒定的。

表1 逆变器的运行状态

Table 1 Operating states of the proposed inverter

运行状态	S_1	S_1'	S_2	S_2'	S_3	S_3'	v_{ab}
1	1	0	0	1	1	0	$v_1 + v_2$
2	0	1	0	1	1	0	v_2
3	0	1	1	0	0	1	$-v_2$
4	1	0	1	0	0	1	$-v_1 - v_2$
5	1,0	0,1	1	0	1	0	0
6	1,0	0,1	0	1	0	1	0

表1中给出了6种有效工作模式的功率开关状态表,1表示通、0表示断开。各个工作模式的等效电路图如图2所示。

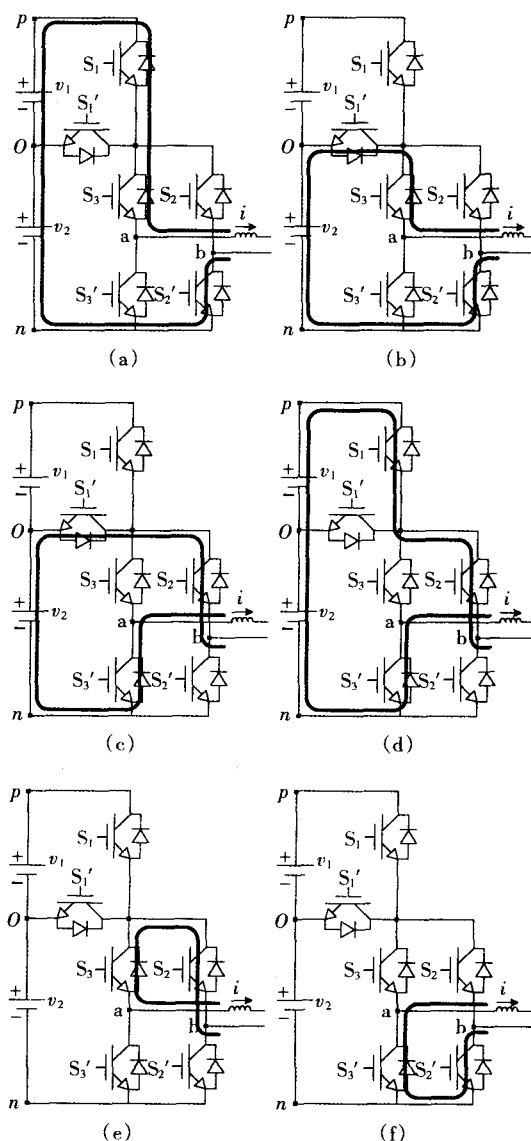


图2 等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit

1) 工作模式1 等效电路如图2(a)所示,在这种工作模式中,交流侧输出电压为 $v_1 + v_2$,此时的开关 S_1 、 S_2' 和 S_3 处于导通状态;

2) 工作模式2 等效电路如图2(b)所示,在这种工作模式中,在交流侧产生的输出电压为 v_2 ,此时的开关 S_1' 、 S_2' 和 S_3 处于导通状态;

3) 工作模式3 等效电路如图2(c)所示,在这种工作模式中,在交流侧的输出电压为 $-v_2$,此时的开关 S_1' 、 S_2 和 S_3' 处于导通状态;

4) 工作模式4 等效电路如图2(d)所示,在这种工作模式中,交流侧产生的电压为 $-v_1 - v_2$,此时的功率开关 S_1 、 S_2 和 S_3' 处于导通状态;

5) 工作模式5 等效电路如图2(e)所示,在这种工作模式中,交流侧产生的电压为0,此时功率开关 S_2 和 S_3 处于导通状态;

6) 工作模式6 等效电路如图2(f)所示,在这种工作模式中,交流侧产生的电压为0,此时功率开关 S_1' 和 S_2' 处于导通状态。

在这6种的工作模式中,由于工作模式5和工作模式6产生的交流输出电压同样为0,所以有5种不同的交流输出电压。

4 简单控制策略

假设逆变器的直流电压 $v_1 = v_2 = E$,图3给出了新型五电平逆变器的 SPWM 工作原理。在该电路拓扑中共有6个开关器件, S_1 和 S_1' , S_2 和 S_2' , S_3 和 S_3' 分别工作在互补状态。利用不同的开关组合,叠加出接近正弦的输出电压波形。为了减少开关器件的开关次数、降低开关器件的开关损耗,令 S_2 的开关频率与调制波的频率相同,即当调制波大于零时 S_2 导通, S_2' 关断。当调制波小于零时 S_2 关断, S_2' 导通。在该电路拓扑结构中, S_1 和 S_1' 负责控制逆变器的输出电压为高电平 $2E$ 还是低电平 E ,而 S_2 和 S_2' , S_3 和 S_3' 负责控制逆变器的输出电压为正电压、还是为负电压。如图3所示,给出了功率开关 $S_1 \sim S_3$ 的控制策略以及逆变器的交流输出电压。

5 实验结果

为验证所提出的电路拓扑结构以及 PWM 控制的方法,设计了单相五电平逆变器的实验模型。实验装置的主电路由三菱公司的 IPM 模块 PM75CSA120 构成,逆变器的滤波电感为 10 mH,五电平逆变器的直流电压为 $v_1 = v_2 = 150\text{V}$,开关频率为 1075 Hz,负载为纯阻性负载 20 Ω 。控制单元核心由 TMS320F2812 构成。

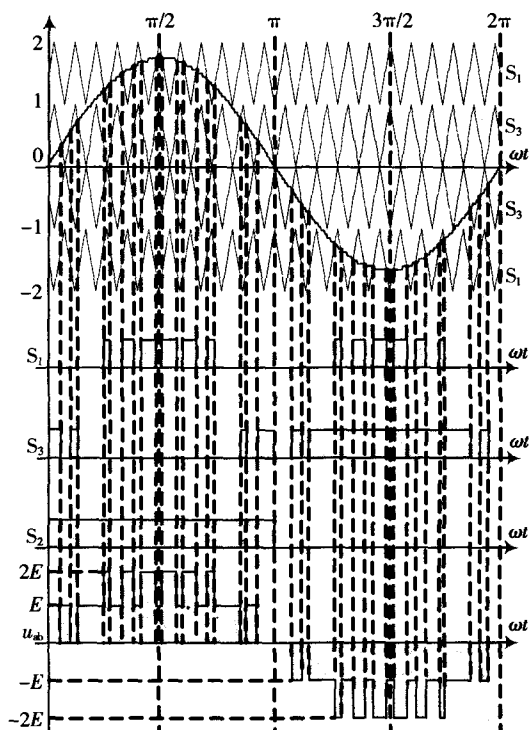
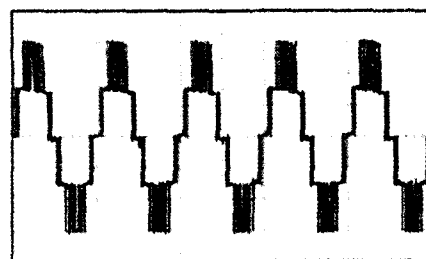


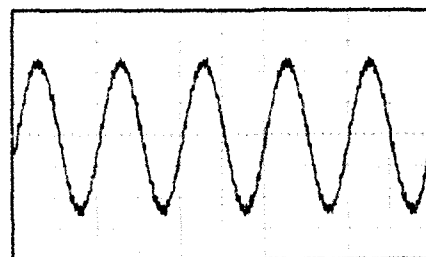
图3 SPWM 工作原理

Fig. 3 SPWM operation principle



10ms/格

(a) 逆变器的输出电压



10ms/格

(b) 负载两端电压

图4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

图4给出了实验结果,图4(a)为逆变器的输出电压波形,利用逆变器的开关组合可以合成如图所示的电压输出,共有5种不同的电平输出(0, $\pm 150\text{V}$, $\pm 300\text{V}$)。对图4(a)所示的电压波形做频谱分析,经过计算得 $\text{THD} = 9.50\%$,其谐波主要集中在15次

和17次。图4(b)给出了负载电阻两端的电压波形,由图可以看出经过滤波电感后的负载电阻电压已经比较接近于正弦。对图4(b)所示的电压波形做频谱分析,经过计算得到 $\text{THD} = 3.06\%$ 。

6 结 语

本文提出的电路拓扑结构最突出的特点是在传统的H桥型逆变器的基础上提出了新型的五电平电压型逆变器,新的电路拓扑结构相比于传统的五电平逆变器,具有较少的功率开关,只需要6个功率开关。并且不需要钳位二极管和钳位电容。在电路拓扑结构中,有部分功率开关工作在较低的开关频率,如功率开关 S_2 和 S_2' 。而为了进一步降低交流侧输出电压的谐波含量,只需要提高另外的两组功率开关的开关频率即可。因此,电路便于扩展。由于本文电路拓扑结构是在传统的H桥型逆变器的基础上扩展得到的,增加了两个功率开关。所以,电路的扩展比较容易,只需要修改部分电路就可以得到新型的五电平电压逆变器。

参 考 文 献:

- [1] AKIRA Nabae, ISAO Takahashi, HIROFUMI Akagi. A new neutral-point-clamped PWM inverter [J]. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1981, 17(3): 518-523.
- [2] 鲍建宇,王正仕,张仲超. 一类单相多电平电流型变流器拓扑的建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 112-135.
- BAO Jianyu, WANG Zhengshi, ZHANG Zhongchao. Modeling analysis of a kind of single-phase multilevel current source converter topology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(2): 112-115.
- [3] 陈阿莲,何湘宁,赵荣祥. 一种改进的级联型多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 9-12.
CHEN Alian, HE Xiangning, ZHAO Rongxiang. An improved cascaded multilevel inverter topology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 9-12.
- [4] 陈阿莲,何湘宁,胡磊. 组合型多电平变换器拓扑结构的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 41-46.
CHEN Alian, HE Xiangning, HU Lei. Research on combined multilevel converter topologies [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(14): 41-46.
- [5] 王小峰,何湘宁,邓焰. 载波交叠特性PWM方法在飞跨电容多电平逆变器中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 98-102.
WANG Xiaofeng, HE Xiangning, DENG Yan. PWM methods with carrier-overlapping characteristics in flying-capacitor multilevel inverters. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(10): 98-102.
- [6] PERERA L B, LIU Y H, ARRILLAGE J, et al. A five-level reinjection scheme for high pulse-voltage source conversion[J]. *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, 2005, 152(2): 209-216.
- [7] 王碧芳,宫金武,胡伟. 级联型多电平逆变器的改进PWM控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 73-75.
WANG Bifang, GONG Jinwu, HU Wei. Improved PWM control strategies for cascaded multilevel inverter[J]. *Automation of Electric Power System*, 2006, 30(7): 73-75.

(编辑:于智龙)