

文章编号:1005-7277(2008)04-0005-04

## 三电平 SVPWM 方案的实现

蔡凯, 程善美

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 三电平逆变器相对于传统的两电平逆变器有很多优越之处, 在高压大功率领域有着非常广泛的应用。描述了中点箝位式三电平逆变器 SVPWM 方案的实现, 对方案所涉及的拓扑结构、矢量分区、矢量切换等基本问题进行了详细的阐述。最后, 给出了三电平和两电平 SVPWM 方案的仿真结果, 对比可以看出三电平逆变器性能更加优越。

**关键词:** 三电平 SVPWM; 最少拍连续切换矢量; 逆变器

**中图分类号:** TM343

**文献标识码:** A

## Realization of three-level SVPWM scheme

CAI Kai, CHENG Shan-mei

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The performance of inverter employing three-level scheme is superior to that of traditional two-level scheme in many respects. The former has an extensive application, especially in high voltage high power area. The implementation of SVPWM scheme of three-level Neutral-Point-Clamped(NPC) inverter is presented, and brief discussion on circuit topologic, vector plot as well as vector switching sequence are also demonstrated. The simulation results of two schemes show the advantages of three-level inverter.

**Key words:** three-level SVPWM; minimum beat vector switching sequence; inverter

## 1 引言

三电平逆变器, 相对于传统的两电平逆变器有着电压变化率( $dV/dt$ )低、谐波畸变率(THD)低、器件承受电压低等优点, 另一方面它比四电平、五电平等多电平逆变器的结构和控制方法简单, 在高压大功率领域有着非常广泛的应用<sup>[1]</sup>。

## 2 三电平逆变器 SVPWM 方案的基本问题

## 2.1 拓扑结构

1980年 A.Nabae 等人在 IAS 年会上提出了中点箝位式三相三电平变换器的结构, 如图 1 所示。它

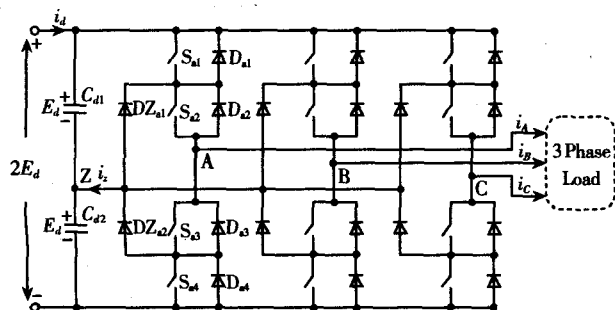


图 1 三电平逆变器电路拓扑

采用 2 个串联的电容, 将平分直流母线电压得到中间第三电平, 每桥臂由 4 个开关管串联, 用一对串联箝位二极管和内侧 2 个开关管并联, 其中心抽头与第三电平相连实现中点箝位, 形成所谓的中点箝位变换器。电平数目的增多带来更丰富的电压矢量元件, 由它们所合成的输出电压可大大减小谐波分量。

## 2.2 矢量分区

在空间矢量平面上标绘出全部 19 个电压矢量, 全部矢量标号如图 2 所示, 按幅值大小分为: 零

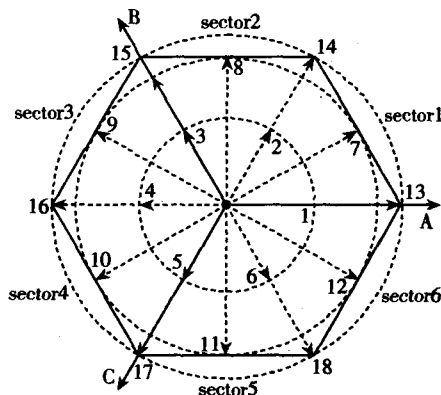


图 2 三电平全部电压矢量标号图

矢量(标号  $i=0$ )、小矢量( $i=1-6$ ),中矢量( $i=7-12$ )和大矢量( $i=13-18$ )。所有的小矢量可分为由正、负两种开关状态,如  $v_{5p}=OOP(A=零, B=零, C=正)$ ,  $v_{5n}=NNO$ 。而零矢量可分为  $NNN$ 、 $OOO$  和  $PPP$  3 种矢量开关状态。

如图 3 所示,由 6 个大矢量的顶点连成的六边形区域是所有目标矢量顶点的集合,6 个大矢量将该区域划分为 6 个三角形扇区(sector),中矢量与小矢量的顶点连线又将每个扇区划分为 4 个小三角形小区(region)。当目标矢量顶点落入某一小区时,毗邻的 3 个矢量便参与合成该目标矢量。距离目标矢量越近的合成矢量,其作用时间越长,据此可进一步将 1、3 小区划分为 1a、1b 和 3a、3b 小区。a、b 小区中的矢量作用时间略有不同,例如第  $i$  扇区中,若目标矢量顶点落入 a 小区,则第  $i$  号小矢量作用时间  $T_i >$  第  $(i+1)$  号小矢量作用时间  $T_{(i+1)}$ ;若落入 b 小区,则有  $T_i < T_{(i+1)}$  [2]。

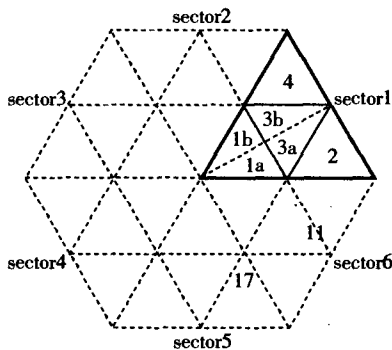


图 3 三电平电压矢量空间分区图

### 2.3 矢量切换逻辑

为了保证开关桥路上的器件所承受的电压不超过  $E_d$ ,在矢量切换时应遵循每一相的电压变化不

表 1 三电平连续切换矢量表

当前矢量		连续切换矢量			
开关状态	标号	零	小	中	大
零	0	N	1n 3n 5n		
		O	1p 2n 3p 4n 5p 6n		
		P	2p 4p 6p		
小	i	奇:0o; 偶:0p	$(i-1)p (i+1)p$	$(i-1)+6, i+6$	
		奇:0n; 偶:0o	$(i-1)n (i+1)n$		$i+12$
中	$i+6$		奇: $(i)p (i+1)n$ ; 偶: $(i)n (i+1)p$		$i+12, (i+1)+12$
大	$i+12$		奇: $(i)n$ ; 偶: $(i)p$	$(i-1)+6, i+6$	

大于  $E_d$  (即每次矢量切换时同一桥臂最多只能有 2 个开关动作)的连续矢量切换原则。把连续矢量切换原则的全部可能矢量称为连续切换矢量。其中有些目标矢量相对于当前矢量发生了 2 个桥臂的开关变化,有些仅在一相发生开关变化(不存在三相发生变化的连续切换矢量),称前者为当前矢量的最少拍连续切换矢量。不失一般性,对全部矢量对应的连续切换矢量的求取可以归结为对一个扇区中的零(0)、小( $i$ )、中( $i+6$ )、大( $i+12$ )这 4 个矢量的分析。如表 1 所示,对  $i$  都执行 mod6 的加减法,即  $i=6$  时  $i+1=1, i=1$  时  $i-1=6$ 。

可进一步总结目标矢量位于不同扇区、不同小区时所对应的最少拍连续切换矢量序列,如表 2 所示为 1a、1b、2 小区的矢量序列。矢量序列均以 n 型小矢量起始,每个序列均为 7 个矢量,第 4 矢量均为起始矢量对应的 p 型小矢量。从连续多周期的波形考虑,以 n 型小矢量起始或以 p 型小矢量起始,是完全等同的。由上面的推理可见,三电平的矢量切换逻辑具有高度的严密性,符合上述连续矢量切换原则的最少拍序列是唯一的。

表 2 最少拍连续切换矢量序列表

region	奇扇区 $i=2k-1$	偶扇区 $i=2k$
1a	$(i)n \rightarrow (i+1)n \rightarrow 0o \rightarrow (i)p \rightarrow 0o \rightarrow (i+1)n \rightarrow (i)n$	$(i)n \rightarrow 0o \rightarrow (i+1)p \rightarrow (i)p \rightarrow (i+1)p \rightarrow 0o \rightarrow (i)n$
2	$(i)n \rightarrow (i+12) \rightarrow (i+6) \rightarrow (i)p \rightarrow (i+6) \rightarrow (i+12) \rightarrow (i)n$	$(i)n \rightarrow (i+6) \rightarrow (i+12) \rightarrow (i)p \rightarrow (i+12) \rightarrow (i+6) \rightarrow (i)n$
1b	$(i+1)n \rightarrow 0o \rightarrow (i)p \rightarrow (i+1)p \rightarrow (i)p \rightarrow 0o \rightarrow (i+1)n$	$(i+1)n \rightarrow (i)p \rightarrow 0o \rightarrow (i+1)p \rightarrow 0o \rightarrow (i)n \rightarrow (i+1)n$

### 3 三电平 SVPWM 方案的实现

三电平空间矢量调制由目标矢量位置判断模块、作用时间计算模块和开关状态选择模块 3 部分组成。它根据目标矢量和中性点状态,运行电压空间矢量调制和中性点电压控制逻辑,输出驱动脉冲信号实现对三电平逆变桥的控制,如图 4 所示。

#### 3.1 目标矢量位置判断

目标矢量位置判断模块的主要目的是判断目标矢量顶点所处的扇区,并进一步判断其所在的小区。不失一般性,在任一扇区中作出如图 5 所示的辅助线后,可以很方便地确定目标矢量顶点所在的扇区和小区位置。例如在 sector=1 时,  $l_1$  左方 ( $V_\alpha + V_\beta / \sqrt{3} \leq V_d /$

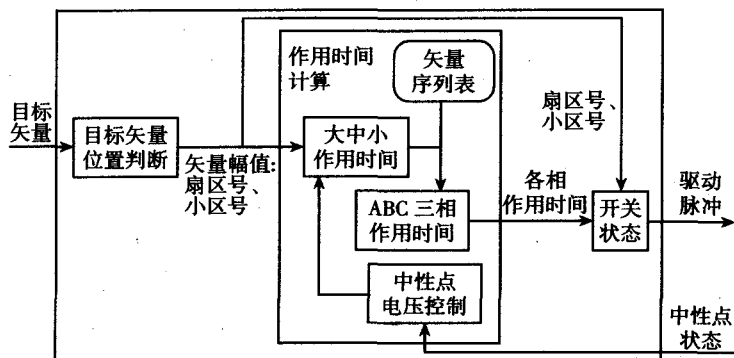


图 4 三电平 SVPWM 总体方案

3)为 1 小区, \$l\_4\$ 右方 (\$V\_\alpha - V\_\beta / \sqrt{3} > V\_d / 3\$) 为 2 小区, 其它类似。

对于其它扇区 (sector = n), 可将目标矢量作相应的旋转变换, 映射到 1 扇区后就可以统一使用上述的判小区逻辑。

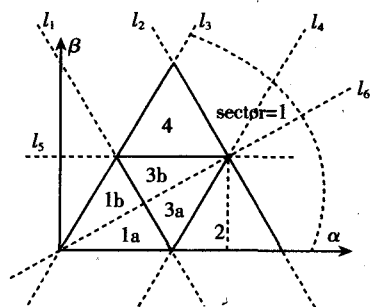


图 5 三电平小区分区图

### 3.2 作用时间计算

作用时间的计算是三电平 SVPWM 方案实现中工作量最大的一部分工作, 其主要目的就是将由矢量控制算法得到的 3 个矢量的作用时间 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$) 进行一系列变换后, 最终得到与 PWM 硬件相匹配的三相开关管的导通时间 (\$t\_a, t\_b, t\_c\$)。

#### (1) 计算矢量作用时间 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$)

根据伏秒平衡原理, 目标矢量 \$\vec{V}\_{ref}\$ 在 \$T\_s\$ 时间内的作用可由它所在三角形小区的 3 个矢量 (\$\vec{V}\_1, \vec{V}\_2, \vec{V}\_3\$) 分别作用一段时间 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$) 来等效, 即:

$$\begin{cases} \vec{V}_1 \cdot t_1 + \vec{V}_2 \cdot t_2 + \vec{V}_3 \cdot t_3 = \vec{V}_{ref} \cdot T_s \\ t_1 + t_2 + t_3 = T_s \end{cases} \quad (1)$$

根据当前目标矢量的位置 (sector, region), 可查表 2 得到 (\$\vec{V}\_1, \vec{V}\_2, \vec{V}\_3\$), 再由上式得到 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$)。计算过程中引入中间变量 \$X, Y\$ 可以简化计算结果, 定义 \$X,

\$Y\$ 为:

$$\begin{cases} X = (3V_\alpha - \sqrt{3} V_\beta) \cdot T_s / E_d \\ Y = 2\sqrt{3} V_\beta \cdot T_s / E_d \end{cases} \quad (2)$$

使用 Matlab 的符号运算功能, 可得到用 (\$T\_s, X, Y\$) 来表示的 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$), 计算结果不再列出。

#### (2) 计算大中小时间 (\$t\_{min}, t\_{mid}, t\_{max}\$)

为了使三相波形都为中心对称的阶梯波 (仅有一个波峰的凸形阶梯 PWM 波有利于硬件的实现), 将 (\$t\_1, t\_2, t\_3\$) 变换为 (\$t\_{min}, t\_{mid}, t\_{max}\$)。

$$\begin{cases} t_{min} = (t_1 - t_2 - t_3) / 4 \\ t_{mid} = t_{min} + t_2 / 2 \\ t_{max} = t_{mid} + t_3 / 2 \end{cases} \quad (3)$$

#### (3) 计算三相时间 (\$t\_a, t\_b, t\_c\$)

最后可根据目标矢量顶点位置 (sector, region), 可确定 (\$t\_{min}, t\_{mid}, t\_{max}\$) 与 (\$t\_a, t\_b, t\_c\$) 之间的对应关系, 最终得到后者, 并对硬件电路中的三相的 PWM 时间变量进行相关设置。矢量作用时间转换关系如图 6 所示。

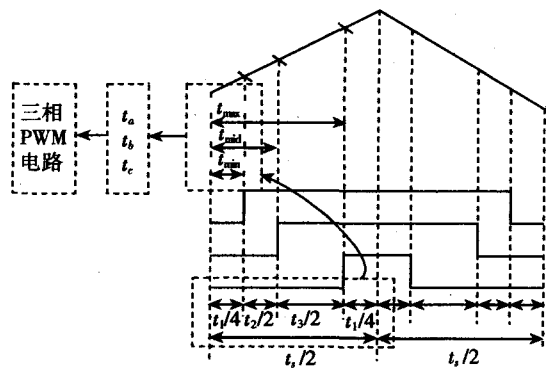


图 6 矢量作用时间转换图

### 3.3 开关状态选择

每相的作用时间 (\$t\_a, t\_b, t\_c\$) 的波形经过载波调制后可得到对偶的 2 路 PWM 信号, 记为 PWM+ 和 PWM-, 再经过开关状态选择模块的处理可得到最终的 4 路 PWM 信号, 以驱动该相桥臂的 4 个开关管。

相电压的正负判断可从图 2 看出, 对 A 相而言, 其垂线将六边形区域一分为二, 右侧的区域对应 A 相电压为正的的目标矢量, 左侧为负。B, C 相也有类似的矢量空间关系。根据相电压的正负情况, 可将 PWM+ 和 PWM- 信号相应地转换为 4 路 PWM

信号,如表3所示。

表3 电压决定开关状态的转换

某一相电压	开关状态(1表示本开关周期内常开,0表示常闭)			
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
正	PWM+	1	PWM-	0
负	0	PWM+	1	PWM-

#### 4 仿真结果

根据上述三电平 SVPWM 算法,在 Matlab 中可模块化地搭建整体仿真模型。仿真参数为:直流母线电压  $E_d=300\text{V}$ ,参考信号频率  $f_r=50\text{Hz}$ ,PWM 载波频率  $f_c=1.5\text{kHz}$ 。如图 7.8 所示分别为三电平 SVPWM 方案对应的相、线电压波形,和三电平与二电平逆变器输出电压的谐波分析波形。

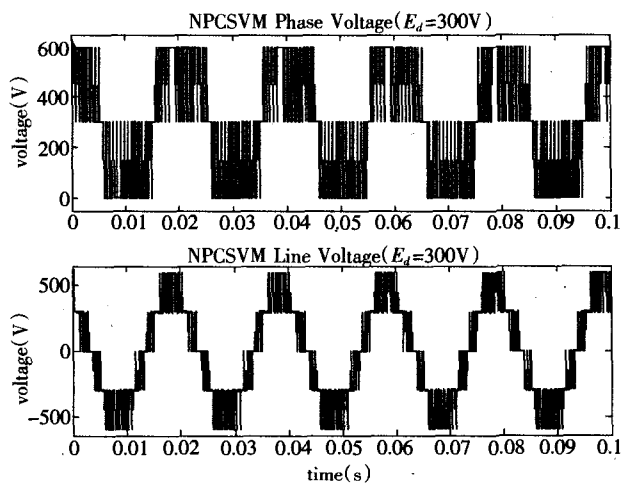


图7 三电平 SVPWM 相、线电压波形

以线电压仿真结果为例,在开关频率不高的情况下,三电平逆变器的输出电压的总谐波系数 THD=6.82%,相对于二电平方案大大减小(二电平方案中此项指标值为 42.49%)。

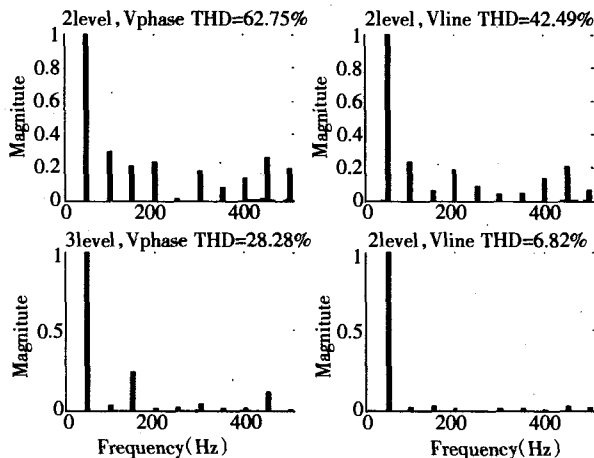


图8 三电平与二电平谐波分析对比

#### 5 结束语

相对于传统的二电平逆变器,三电平方案的输出波形具有谐波含量小、波形更加接近正弦波、逆变器性能更好等优点。SVPWM 方法可以沿用到三电平方案中,使用该方法具有控制逻辑清晰,易于实现不同的分区策略、中心点电压控制策略等优势。采用 SVPWM 方法的三电平逆变器非常适合高压大容量的电力电子变换应用。

参考文献:

- [1] Jih-sheng L, Fang Z P. Multilevel converters—a new breed of power converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 1996, 32(3):509–517.
- [2] Bin W. High-Power Converters and AC Drives[M]. Wiley-IEEE Press, 2006: 333.

作者简介:

蔡凯(1979-),男,湖北大冶人,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

程善美(1966-),男,湖北潜江人,博士,教授,研究方向为电力电子及电力传动、智能控制技术。

收稿日期:2007-10-15

#### 下期要目

- 钻机模拟发电系统与数字发电机比较
- 永磁同步电机 SVM-DTC 系统的研究
- 矩阵变换器双电压控制策略抗干扰性能分析
- 基于 DSP 控制的全数字转台直流伺服系统研究
- SINAMICS G150 在 HH300 液压钻机电控系统中的应用
- 基于智能 PID 移动机器人电机转矩控制研究