

# 三电平 NPC 逆变器 SVPWM 方法研究\*

李国丽<sup>1,2</sup> 夏秋实<sup>1</sup> 胡存刚<sup>1</sup> 王群京<sup>1</sup>

1. 合肥工业大学 2. 浙江工业大学

**摘要:**针对经典 SVPWM 算法计算复杂的缺点,提出了基于  $60^\circ$ 坐标系的三电平逆变器的 SVPWM 算法,该算法无需进行复杂的三角运算,仅需进行简单的逻辑判断就可以得到参考矢量的具体位置和合成参考矢量的最近三矢量,能够极大简化 SVPWM 的运算。实验结果表明了这种基于  $60^\circ$ 坐标系的三电平 NPC 逆变器 SVPWM 方法的有效性。

**关键词:**三电平逆变器 空间矢量调制  $60^\circ$ 坐标系

## SVPWM Algorithm for Three-level NPC Inverter

Li Guoli Xia Qiushi Hu Cungang Wang Qunjing

**Abstract:** Aim at the complex computation of the classical SVPWM, a fast space-vector pulse width modulation algorithm using  $60^\circ$  coordinate frame applied to three-level NPC inverter was introduced. This SVPWM algorithm needs not to compute trigonometric function, so the computer is extremely simple. The position of reference vector and the base vector are easy confirmed base on  $60^\circ$  coordinate frame. Experiment results show that the space-vector pulse width modulation algorithm is effective.

**Keywords:** three-level inverter SVPWM  $60^\circ$  coordinate frame

## 1 引言

中点钳位型(neutral-point-clamped NPC)三电平逆变器,自从 A. Nabale 1980 年在 IAS 年会上提出以来<sup>[1]</sup>,由于解决了功率元器件耐压低,降低了  $dv/dt$ ,改善了逆变器的输出波形,因而成为当今电力电子和电力传动技术的研究热点。

PWM 控制策略是三电平 NPC 逆变器研究中的关键技术之一,国内外专家学者已经提出了许多的 PWM 方法<sup>[2~6]</sup>,基本上可以分为载波调制法和空间矢量调制法两类。其中 SVPWM 具有易于数字实现、电压利用率高、输出电压形式丰富和易于控制中点电压等优点,但经典的三电平 SVPWM 理论基于  $\alpha-\beta$  坐标系,计算十分复杂。

本文采用  $60^\circ$ 坐标系,避免了三角函数等复杂的运算,将 SVPWM 算法极大简化,仿真和实验结果验证了该算法的有效性。

## 2 经典的三电平逆变器 SVPWM 算法

中点钳位型三电平逆变器拓扑结构图如图 1 所示。

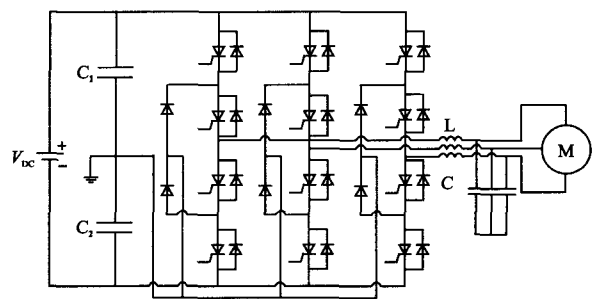


图 1 中点钳位型三电平逆变器拓扑结构

三电平电路的一个桥臂只有  $+V_{DC}/2$ ,  $0$ ,  $-V_{DC}/2$  3 种可能的输出电压值,分别记做  $p, o, n$  3 种开关状态。若定义逆变器的开关状态为:  $V_s = [S_a, S_b, S_c]$ , 则各相电压表示为

\* 安徽省“十一五”科技攻关资助项目(06012143H)

$$v_a = \frac{V_{DC}}{2} \cdot S_a \quad v_b = \frac{V_{DC}}{2} \cdot S_b \quad v_c = \frac{V_{DC}}{2} \cdot S_c$$

其中

$$S_x = \begin{cases} 1, & \text{代表第 } x \text{ 相输出 } p \\ 0, & \text{代表第 } x \text{ 相输出 } o \\ -1, & \text{代表第 } x \text{ 相输出 } n \end{cases} \quad x = a, b, c$$

因此三相三电平逆变器可以输出  $3^3 = 27$  种电压状态组合, 对应 27 种不同的逆变器开关状态, 此时定义电压空间矢量为

$$\mathbf{V}(k) = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_{DC}}{2} (S_a + \alpha \cdot S_b + \alpha^2 \cdot S_c) \quad (1)$$

式中:  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 。

则在  $\alpha - \beta$  坐标系上, 得到三电平逆变器 27 种开关状态所对应的空间矢量图, 且可将其分为 A~F 6 个大区, 每个大区又可以分为 4 个小三角形。由于冗余矢量的存在实际上只对应着 19 个空间矢量。根据矢量的模长可将空间矢量分为零矢量、小矢量、中矢量和 大矢量 4 组, 如图 2a 所示。

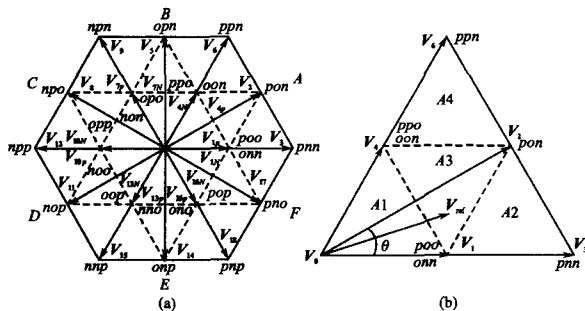


图 2 三电平逆变器的空间矢量图

利用这 19 个基本矢量, 在一个采样周期  $T_s$  内, 对于一个给定的参考电压矢量  $\mathbf{V}_{ref}$ , 根据最近三矢量原则, 可以用 3 个基本电压矢量来合成, 由伏秒平衡原理, 满足方程组

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ref} = d_1 \cdot \mathbf{V}_1 + d_2 \cdot \mathbf{V}_2 + d_3 \cdot \mathbf{V}_3 \\ 1 = d_1 + d_2 + d_3 \end{cases} \quad (2)$$

图 2b 是 A 分区内的矢量合成关系。基于  $\alpha - \beta$  坐标系空间矢量的分区算法和作用时间的计算在很多论文中都有所讨论, 这里就不再赘述, 直接给出矢量在 A 大区的不同小三角形中各基本矢量的作用时间占空比的计算式如表 1 所示。

表 1 中,  $m = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{|V_{DC}|}$ 。可以看出, 合成时间的

关系式中含有三角函数, 计算较复杂, 计算量较大。且经典的矢量分区算法中也含有大量的三角运算, 给三电平逆变器 SVPWM 的实时控制带来一定困难。

表 1 经典空间矢量作用占空比的计算

扇区	$d_1$	$d_2$	$d_3$
A1	$2m \sin(-\frac{\pi}{3} - \theta)$	$1 - 2m \sin(-\frac{\pi}{3} + \theta)$	$2m \sin \theta$
A2	$2 - 2m \sin(-\frac{\pi}{3} + \theta)$	$2m \sin \theta$	$2m \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) - 1$
A3	$1 - 2m \sin \theta$	$2m \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) - 1$	$1 - 2m \sin(-\frac{\pi}{3} - \theta)$
A4	$2 - 2m \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$	$2m \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$	$2m \sin \theta - 1$

### 3 60°坐标系 SVPWM 算法

在  $\alpha - \beta$  坐标平面上, 注意到三电平空间矢量图 2a 具有按 60°分区的特性, 因此本文采用非正交的 60°坐标系<sup>[7,8]</sup>来表示三电平空间矢量图。

#### 3.1 坐标变换

采用的 60°坐标系为  $g - h$  坐标系, 取  $g$  轴与  $\alpha$  轴重合, 逆时针旋转 60°为  $h$  轴, 如图 3a 所示。参考矢量为  $\mathbf{V}_{ref}$ ,  $\alpha - \beta$  坐标系到  $g - h$  坐标系的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

当参考矢量为  $\mathbf{V}_{ref}$  用  $a - b - c$  坐标表示时, 设三相电压为  $V(u_a, u_b, u_c)$ , 由 Clark 变换可以得到  $a - b - c$  坐标系到  $g - h$  坐标系的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

按小矢量的长度  $\frac{1}{3}V_{DC}$  将矢量图归一化后, 将三电平逆变器的基本矢量变换到  $g - h$  坐标系, 得到的变换到 60°坐标系下三电平逆变器的空间矢量图如图 3a 所示。

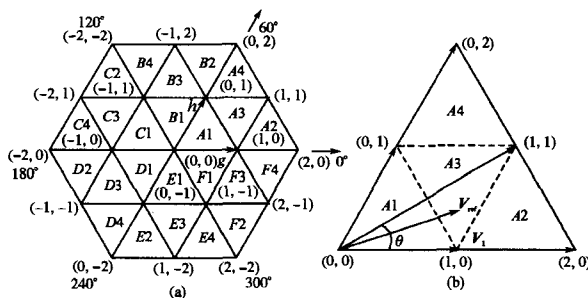


图 3 60°坐标系下三电平空间矢量图

#### 3.2 矢量分区方法

在电压空间矢量控制中, 首先要确定参考矢量所处的位置, 根据最近三矢量法, 得到用于合成目标矢量的空间矢量。在 60°坐标系中确定任意

参考电压矢量位置的方法如下。

### 3.2.1 大区的确定方法

将  $60^\circ$  坐标系同样划分为 A~F 6 个大区,如图 3a 所示。设参考电压矢量在  $60^\circ$  坐标系中的坐标为  $V_{ref}(v_{rg}, v_{rh})$ 。参考矢量所处的大区的位置可以通过表 2 简单地逻辑判断得到。

表 2 大区的分区方法

	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
$v_{rg}$	>0	<0	<0	<0	>0	>0
$v_{rh}$	>0	>0	>0	<0	<0	<0
$v_{rg} + v_{rh}$	-	>0	<0	-	<0	>0

### 3.2.2 小区的确定方法

在 A~F 6 个大区中,每个大区又分为 1,2,3,4 共 4 个三角形的小区,如图 3a 所示。以 A 大区为例(其它区算法类似),通过表 3 简单的算术运算可以得到参考矢量所处的小三角形(小区)。完成矢量分区以后,就可以按照相邻三矢量原则来确定每个矢量的作用时间。

表 3 A 区中小区的分区方法

	A1	A2	A3	A4
$ v_{rg} $	<1	>1	<1	<1
$ v_{rh} $	<1	<1	<1	>1
$v_g + v_h$	<1	-	>1	-

### 3.3 矢量作用时间的计算

根据上述方法得到最近三矢量后,对于一个给定的参考矢量  $V_{ref}(v_{rg}, v_{rh})$ ,由伏秒平衡原理,由式(2)可得在  $60^\circ$  坐标系中求解各个矢量的占空比公式为

$$\begin{cases} v_{rg} = d_1 v_{1g} + d_2 v_{2g} + d_3 v_{3g} \\ v_{rh} = d_1 v_{1h} + d_2 v_{2h} + d_3 v_{3h} \\ 1 = d_1 + d_2 + d_3 \end{cases} \quad (5)$$

可以解得:

$$\begin{cases} d_1 = \frac{(v_{rg} - v_{3g})(v_{2h} - v_{3h}) - (v_{rh} - v_{3h})(v_{2g} - v_{3g})}{(v_{1g} - v_{3g})(v_{2h} - v_{3h}) - (v_{1h} - v_{3h})(v_{2g} - v_{3g})} \\ d_2 = \frac{(v_{rg} - v_{3g})(v_{1h} - v_{3h}) - (v_{rh} - v_{3h})(v_{1g} - v_{3g})}{(v_{2g} - v_{3g})(v_{1h} - v_{3h}) - (v_{2h} - v_{3h})(v_{1g} - v_{3g})} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (6)$$

由表 3 和式(6)可见,基于  $60^\circ$  的坐标系无需进行复杂的三角运算,仅含有简单的算术运算,能够简化大量的运算,为三电平逆变器 SVPWM 实时控制提供了一种十分有效的方法。

### 3.4 输出开关状态的确定

为了进一步确定逆变器三相输出开关状态,设最近三矢量为

$$V_x = (v_{xg}, v_{xh})^T$$

$$v_{xg}, v_{xh} \in \{-2, -1, 0, 1, 2\} \quad x \in \{1, 2, 3\}$$

设该基本矢量对应的开关状态为

$$S_x = (S_{xa}, S_{xb}, S_{xc})$$

$$S_{xa}, S_{xb}, S_{xc} \in \{-1, 0, 1\}$$

则开关矢量可表示为

$$\begin{cases} S_{xa} = i \\ S_{xb} = i - v_{xg} \\ S_{xc} = i - v_{xg} - v_{xh} \end{cases} \quad S_{xa}, S_{xb}, S_{xc} \in \{-1, 0, 1\} \quad (7)$$

根据式(7)在满足  $S_{xa}, S_{xb}, S_{xc} \in \{-1, 0, 1\}$  的条件下,选择不同的  $i$  就可以得到 3 个最近基本矢量  $V_x$  所对应的全部开关状态。

例如,设参考矢量  $V_{ref}(v_{rg}, v_{rh}) = (0.8, 0.4)$ ,由表 2 和表 3 可知  $V_{ref}$  位于 A 大区的 A3 小区,如图 3b 所示。其在  $60^\circ$  坐标系中的最近三矢量为  $V_1(0, 1), V_2(1, 1), V_3(1, 0)$ ,根据式(5)可得到其开关状态分别为 00-1 或 110, 10-1, 110 或 00-1,根据式(6)可以得出各矢量的作用时间占空比分别为  $d_1 = 0.2, d_2 = 0.2, d_3 = 0.6$ 。

## 4 实验研究

为了验证基于  $60^\circ$  坐标系的三电平 NPC 逆变器 SVPWM 方法的正确性,在三电平 NPC 逆变器实验平台上进行了实验研究,该实验平台以 600 V 级 2 合 1 封装 T 系列型号为 2MBI200TA-600 IGBT 为主开关器件,以 TMS320LF2407A DSP 为核心控制芯片,负载为 0.75 kW 风机,运行频率为 50 Hz。

图 4 为采用 Tektronix 数字示波器实测的相电压、线电压波形和电流波形。

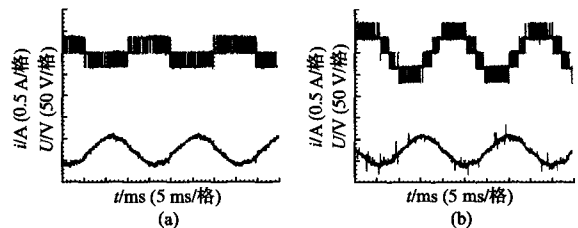


图 4 三电平逆变器 SVPWM 实验波形

从实验结果可以看出,本文介绍的 SVPWM 方法能够很好地实现三电平电压 PWM 波的输出,其特点是能够将 SVPWM 算法极大简化,准

