

# 基于 SVPWM 分解的多电平逆变器控制算法研究

王雪丹, 宋 莹, 郭殿林

(黑龙江科技学院 电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要:** 随着电气自动化的发展, 多电平逆变器在大功率变频器领域得到大量应用。针对多电平逆变器控制要求较高、基本空间矢量很多、SVPWM 调制算法具有较大的复杂性问题, 提出了一种分解为两电平 SVPWM 的简化算法。以二极管钳位式(NPC)三电平逆变器为对象, 介绍了三电平 SVPWM 的拓扑结构、工作原理及 SVPWM 控制算法, 并给出了 Matlab/Simulink 环境下的仿真建模, 结果分析证实了该算法的可行性。

**关键词:** 多电平; NPC 逆变器; SVPWM; Matlab/Simulink

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)04-0077-04

## Study on multi-level control algorithm based on reference SVPWM

Wang Xuedan, Song Ying, Guo Dianlin

(College of Electric and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract:** With the development of electrical automation, multi-level inverter has been widely used in the filed of high-power inverter. But because of its high control requirement and there are so many basic space vectors, space vector pulse width modulation(SVPWM) modulation algorithm of multi-level inverter has greater complexity. In this paper, the SVPWM algorithm is given based on decomposing the multi-level space vector into two-level space vectors to make the algorithm easily. A neutral point clamped(NPC) three-level inverter is used to explain the scheme. We briefly analyzes the structure, working principle and SVPWM control algorithm of three-level SVPWM. Then the simulation modeling is provided under Matlab/Simulink environment, the analysis of simulation results verify that the proposed SVPWM algorithm is feasible.

**Key words:** multi-level; NPC inverter; SVPWM; Matlab/Simulink

多电平逆变器作为一种节约资源型的产品, 结合了传统的电力技术、传动技术、光机电一体化技术和现代的通信互联网技术、绿色节能环保技术, 在电气自动化不断发展的现代, 具有强大的发展前景和市场需求。多电平逆变器随着电平数的增加, 输出电压谐波将减小, 输出的电压波形更接近正弦波, 开关损耗小, 逆变效率高, 适合于大功率变频领域。但由于多电平控制要求较高, 基本空间矢量繁多, 所以多电平 SVPWM 控制算法具有很大的复杂性, 主要表现在: 电平数增加引起的复杂性; 多目标控制带来的复杂性; 冗余性带来的复杂性。从简单化着手, 将多电平空间矢量分解为两电平空间矢量的组合, 就可以用两电平 SVPWM 的算法来解决多电平 SVPWM 的问题<sup>[1]</sup>。该算法计算时间方便、方法简单, 适用于各种类型的电平逆变器。

二极管钳位式多电平是出现最早、应用场合最多的

一种结构<sup>[2]</sup>。本文以二极管钳位式三电平逆变器为对象, 介绍了三电平 SVPWM 的结构、基本原理及三电平分解为两电平 SVPWM 算法, 并在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真建模及结果分析。该算法简单通用, 整个过程在笛卡尔  $\alpha-\beta$  坐标系下进行, 使得计算合成参考矢量的作用时间更加简便, 并很容易推广到多电平逆变器领域。

### 1 三电平 SVPWM 基本原理

#### 1.1 三电平的产生

图 1 为二极管钳位式(NPC)三电平逆变器拓扑结构, 其中  $VT_{11} \sim VT_{14}$  为 A 相中的 4 个 IGBT 器件, 只要改变这 4 个器件的不同通断状态, 即可在输出端获得 3 种不同的输出电压 ( $U_d, 0, -U_d$ )。逆变器的输出有三个电平值, 用 +、0、- 表示开关状态, 也可用 P、O、N 表示,  $U_d$  为直流电压, 这便是所谓的三电平<sup>[3]</sup>。

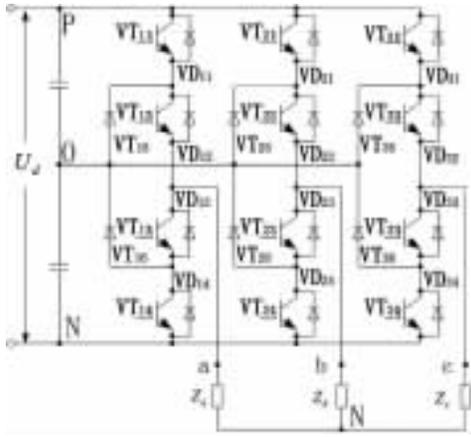


图1 NPC三电平逆变器主电路拓扑结构

1.2 三电平空间电压矢量分析

逆变器有3个桥臂，所以共有 $3^3=27$ 个基本空间矢量，除去8个重复冗余矢量还剩19个基本空间矢量。若定义开关变量 $S_a, S_b, S_c$ 代表A、B、C三相桥臂的输出状态，则定义空间电压矢量为：

$$u_k = \frac{1}{3} U_d (S_a + \rho S_b + \rho^2 S_c) = \frac{1}{6} U_d [(2S_a - S_b - S_c) + j\sqrt{3}(S_b - S_c)] \quad (1)$$

式中， $K$ 为基本矢量号(1~19)，且：

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{第 } x \text{ 相输出正电平} \\ 0 & \text{第 } x \text{ 相输出0电平 ( } x \text{ 为 } a, b \text{ 或 } c \text{)} \\ -1 & \text{第 } x \text{ 相输出负电平} \end{cases}$$

由式(1)可求得这19个矢量的幅值，分为3类： $2U_d/3$ 、 $\sqrt{3}U_d/3$ 和 $U_d/3$ ，如图2所示。

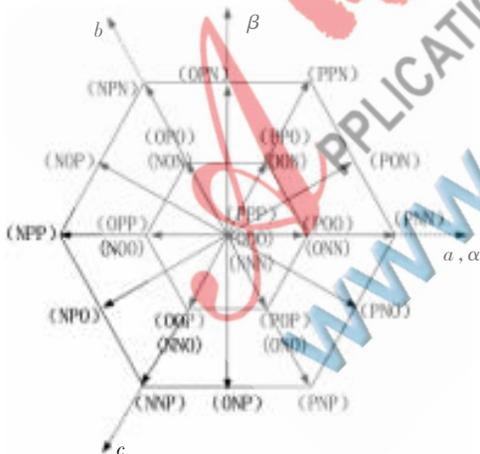


图2 三电平逆变器空间电压矢量图

2 三电平 SVPWM 算法

三电平 SVPWM 算法具体指：将图2所示的三电平空间电压矢量图分解为图3所示的6个小四边形<sup>[4]</sup>，每个四边形就是一个两电平空间电压矢量图的一部分，分别以每个小四边形的中点作为两电平空间电压矢量图的原点，就可以用两电平 SVPWM 的算法来处理三电平 SVPWM 问题，使计算得到简化。

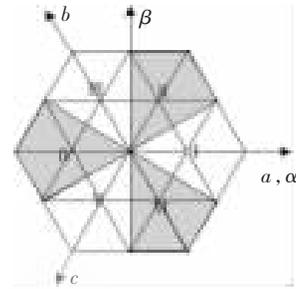


图3 三电平分解为两电平示意图

2.1 判断参考电压矢量  $u_{ref}$  所处扇区

SVPWM 算法的首要任务就是要判断  $u_{ref}$  所处的扇区，以确定相应的输出电压矢量，计算其作用时间。扇区  $N$  根据  $u_\alpha, u_\beta$  的关系来判断。取：

$$\begin{cases} u_{ref1} = u_\alpha \\ u_{ref2} = \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta - u_\alpha \\ u_{ref3} = -\frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta + u_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u_\alpha, u_\beta$  为三电平空间矢量图中  $u_{ref}$  在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的分量，且：

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{1}{3} (U_a - \frac{1}{2} U_b - \frac{1}{2} U_c) \\ u_\beta = \frac{1}{3} (\frac{\sqrt{3}}{2} U_b - \frac{\sqrt{3}}{2} U_c) \end{cases} \quad (3)$$

则扇区  $N$  为：

$$N = \text{sign}(u_{ref1}) + 2\text{sign}(u_{ref2}) + 4\text{sign}(u_{ref3}) \quad (4)$$

式中， $\text{sign}(x)$ 为符号函数，取值为：

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

根据  $N$  的值判断扇区，如表1所示。

表1  $u_{ref}$  所在扇区

$N$	扇区
1	I
2	III
3	II
4	V
5	VI
6	IV

2.2 空间电压矢量转换

扇区  $N$  确定后可以将参考电压矢量转换到相应的小六边形的中心点上<sup>[5]</sup>，即将参考电压矢量减去基矢量，则有：

$$u_{ref}' = u_{ref} - u_{rBase} \quad (5)$$

表示为  $\alpha$ - $\beta$  坐标系中的空间矢量形势为：

$$u_{ref(\alpha\beta)}' = u_{ref(\alpha\beta)} - u_{rBase(\alpha\beta)} \quad (6)$$

由于三电平空间矢量图中长矢量幅值为  $2U_d/3$ ，若在 I 扇区，基矢量为：

$$u_{rBase} = u_1 = (\frac{U_d}{3} - \frac{U_d}{6} - \frac{U_d}{6})^T \quad (7)$$

表示为  $\alpha$ - $\beta$  坐标系中的空间矢量形势为：

$$u_{1(\alpha\beta)} = C_{3/2} u_1 = (\frac{U_d}{6} \quad 0)^T \quad (8)$$

根据式(6)可得：

$$u_\alpha' = u_\alpha - \frac{U_d}{6}, u_\beta' = u_\beta \quad (9)$$

# 技术与方法 Technique and Method

式中,  $u_{\alpha}'$ 、 $u_{\beta}'$  为两电平空间矢量图中  $u_{ref}'$  在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的分量。

同理可得具体转换关系, 如表 2 所示。

表 2 空间电压矢量转换表

扇区	$u_{\alpha}'$	$u_{\beta}'$
1	$u_{\alpha}-U_d/6$	$u_{\beta}$
2	$u_{\alpha}-U_d/12$	$u_{\beta}-U_d/4\sqrt{3}$
3	$u_{\alpha}+U_d/12$	$u_{\beta}-U_d/4\sqrt{3}$
4	$u_{\alpha}+U_d/6$	$u_{\beta}$
5	$u_{\alpha}+U_d/12$	$u_{\beta}+U_d/4\sqrt{3}$
6	$u_{\alpha}-U_d/12$	$u_{\beta}+U_d/4\sqrt{3}$

## 2.3 判断 $u_{ref}'$ 所处区域 K

将三电平电压空间矢量问题转化为两电平电压空间矢量问题后, 首先判断两电平矢量空间中  $u_{ref}'$  所处区域 K。通过分析  $u_{\alpha}'$  和  $u_{\beta}'$  的关系<sup>[6]</sup>, 如果  $u_{\beta}' > 0$ , 则  $A=1$ , 否则  $A=0$ ; 如果  $\sqrt{3}u_{\alpha}' - u_{\beta}' > 0$ , 则  $B=1$ , 否则  $B=0$ ; 如果  $\sqrt{3}u_{\alpha}' + u_{\beta}' < 0$ , 则  $C=1$ , 否则  $C=0$ 。因此, 区域  $K=A+2B+4C$ 。根据 K 值判断  $u_{ref}'$  扇区, 如表 3 所示。

表 3  $u_{ref}'$  所在扇区

K	区域
1	II
2	VI
3	I
4	IV
5	III
6	V

## 2.4 计算作用时间

根据以上所述空间电压矢量的转换, 得到对应的  $u_{\alpha}'$ 、 $u_{\beta}'$ , 就将三电平 SVPWM 问题转化为两电平 SVPWM 问题, 则新的合成矢量变为空间电压矢量  $u_0'$ 、 $u_x'$ 、 $u_y'$ , 其中  $u_0'=(0 \ 0)^T$ ,  $u_x'$  为起始矢量,  $u_y'$  为终止矢量, 根据空间矢量合成的秒伏平衡原则<sup>[7-8]</sup>, 有:

$$u_{ref}' \times T_s = u_0' \times t_0 + u_x' \times t_x + u_y' \times t_y \quad (10)$$

两电平空间矢量中, 若  $u_{ref}'$  落在第 I 区域 ( $K=3$ ), 如图 4 所示, 则有新的电压空间矢量  $u_{ref}'$ 、 $u_1'$ 、 $u_2'$ 、 $u_0'$ , 用笛卡尔  $\alpha$ - $\beta$  坐标系表示:

$$u_0' = (0 \ 0)^T, \quad u_x' = u_1' = \begin{bmatrix} U_d/6 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$u_y' = u_2' = \begin{bmatrix} U_d/12 & U_d/4\sqrt{3} \end{bmatrix}^T$$

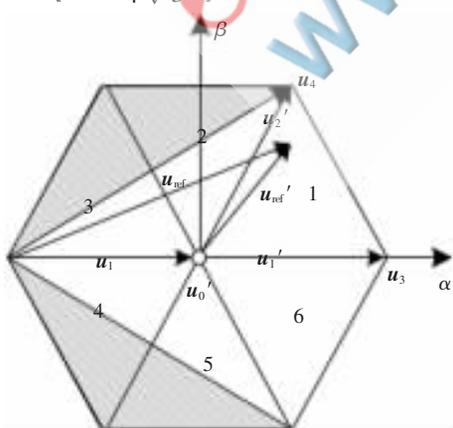


图 4 第 I 扇区三电平空间矢量转换为二电平空间矢量

可得到:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}' \\ u_{\beta}' \end{bmatrix} \times T_s = \begin{bmatrix} U_d/6 \\ 0 \end{bmatrix} \times t_x + \begin{bmatrix} U_d/12 \\ U_d/4\sqrt{3} \end{bmatrix} \times t_y \quad (11)$$

计算得到:

$$\begin{cases} t_x = t_1 = (6u_{\alpha}' - 2\sqrt{3}u_{\beta}') \times T_s / U_d \\ t_y = t_2 = 4\sqrt{3}u_{\beta}' \times T_s / U_d \\ t_0 = T_s - (t_1 + t_2) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $T_s$  表示开关周期。

同理计算, 若  $u_{ref}'$  落在第 II 区域 ( $K=1$ ), 起始矢量  $u_x' =$

$$u_3' = \begin{bmatrix} -U_d/12 & U_d/4\sqrt{3} \end{bmatrix}^T, \text{ 终止矢量 } u_y' = u_2' = \begin{bmatrix} U_d/12 & U_d/4\sqrt{3} \end{bmatrix}^T,$$

据此计算出  $t_x$ 、 $t_y$ 。定义:

$$X = 4\sqrt{3}u_{\beta}' T_s / U_d$$

$$Y = (6u_{\alpha}' + 2\sqrt{3}u_{\beta}') T_s / U_d$$

$$Z = (2\sqrt{3}u_{\beta}' - 6u_{\alpha}') T_s / U_d$$

则对于不同区域 K, 可以用 X、Y、Z 表示  $T_1$ 、 $T_2$ <sup>[9]</sup>。相邻电压空间矢量的作用时间  $T_1$ 、 $T_2$  按表 4 取值。

## 3 建模及仿真

为了验证所述三电平 SVPWM 分解为两电平 SVPWM 算法的可行性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了算法模型<sup>[10-12]</sup>, 仿真参数设置如下:  $U_d=600$  V, 输出频率  $f_0=50$  Hz, 开关周期  $T_s=0.0001$  s, 输入的三相交流电压幅值为 220 V, 取采样时间  $T_s=2e-6$  s。

### 3.1 仿真建模

根据上述的 SVPWM 算法分析对每个步骤进行建模仿真, 再将各模型图封装后进行连接, 得到图 5 所示的 SVPWM 实现仿真模型图。本图是在 Simulink 环境下搭建的仿真模型, 直观易于理解, 各模块反应了该 SVPWM 算法的具体步骤。

### 3.2 仿真分析

由上述仿真方法和步骤, 完成对三电平逆变器系统的仿真。主要仿真波形如图 6、图 7 所示。

图 6、图 7 分别为三电平逆变器输出的相电压、线电压波形, 可以看出, 输出波形为五段式电平, 接近正弦波, 谐波分量小, 说明所提出的算法是可行的。

多电平由于逆变器拓扑结构和电平数的增多使得其控制复杂, 针对这一问题介绍了一种将三电平空间矢量分解为两电平空间矢量的控制算法, 算法所有过程在笛卡尔  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下进行, 使得合成参考矢量的作用时间的计算更简便, 计算结果直接用  $u_{\alpha}$ 、 $u_{\beta}$  来表示, 方便仿真模型的建立。通过计算机软件仿真直观地体现了

## 技术与方法 Technique and Method

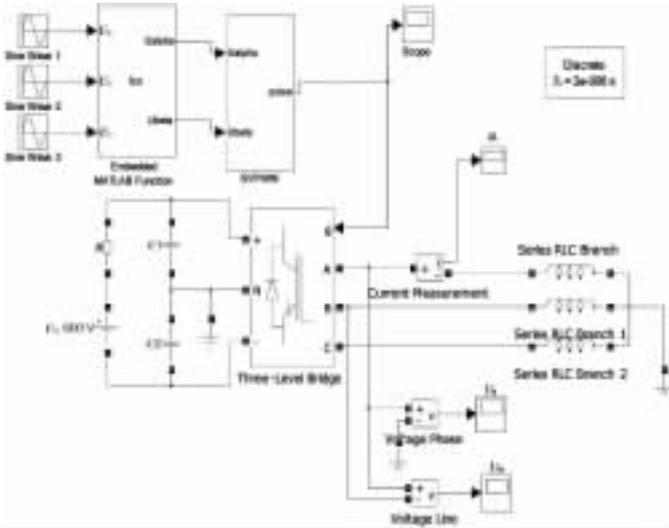
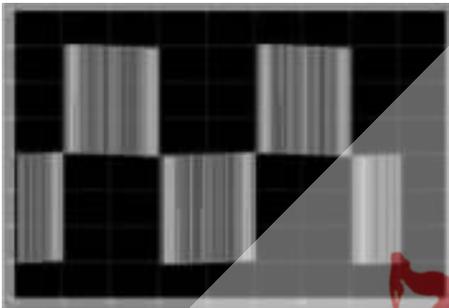
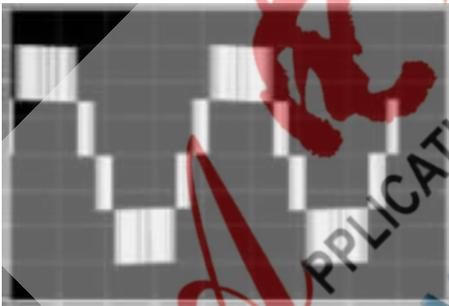


图5 三电平 SVPWM 仿真模型

图6 A相电压波形  $U_a$ 图7 A相线电压波形  $U_{ab}$ 

该算法的步骤,结果证实了该算法的有效性。对于拓扑结构多样化的多电平逆变器该方法比较适用,具有良好

的研究及应用前景。

## 参考文献

- [1] IRFAN M M, PRASAD P H K, RAO P V. Simulation of five-level five-phase SVPWM voltage source inverter[C]. Power, Control and Embedded Systems(ICPCES). International Conference on Allahabad, 2010: 1-5.
- [2] 李永东,高跃,侯轩.大容量多电平变换器 PWM 控制技术现状及进展[J].电力电子技术,2005,39(5):2-6.
- [3] 曾允文.变频调速 SVPWM 技术的原理、算法与应用[M].北京:机械工业出版社,2010:48-49.
- [4] 谭国俊,张建良,韩耀飞.基于 SVPWM 的并联型三电平有源电力滤波器的研究[J].工矿自动化,2009,35(5):26-30.
- [5] 宋强,刘文华.多电平逆变器的通用空间矢量调制算法[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(7):888-892.
- [6] 孙业树,周新云,李正明.空间矢量 PWM 的 SIMULINK 仿真[J].农机化研究,2003(2):105-106.
- [7] 方祥.基于三电平逆变器的矿井提升机矢量控制系统[D].安徽:安徽理工大学,2009:20-39.
- [8] 贾华,朱高建.SVPWM 在 NPC 三电平逆变器中的应用与实现[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):958-963.
- [9] 黄凯,王斌.空间矢量 PWM 控制的三相逆变器的仿真模型[J].三峡大学学报(自然科学版),2006,28(2):112-115.
- [10] Zhang Zhonghui, Shu Jiao. Matlab-based permanent magnet synchronous motor vector control simulation[C]. 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2010.
- [11] 周渊深.交直流调速系统与 MATLAB 仿真[M].北京:中国电力出版社,2007:234-266.
- [12] 洪乃刚.电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M].北京:机械工业出版社,2006:190-212.

(收稿日期:2012-10-22)

## 作者简介:

王雪丹,女,1956年生,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向:自动控制。