

# 基于 DSP 的三电平逆变器 SVPWM 控制系统的研究

Study of SVPWM Control System Base on Three-level Inverter by DSP

哈尔滨九洲电气股份有限公司 曲文超 董晓伟

Qu Wenchao Dong Xiaowei

**摘要:** 本文介绍一种中点箝位式三电平逆变器 SVPWM 原理及以 DSP 为控制核心的控制系统的硬件结构和软件设计。为了使三电平逆变器高效、稳定工作,本文提出矢量区间判断方法,利用矢量所在区间的特点给出三种判断规则,在得到矢量所在区间后计算各合成矢量的作用时间和矢量作用顺序及规则。在以单 DSP 形式的控制系统架构中,给出了控制系统的硬件结构图及软件设计方法。

**关键词:** 三电平 多电平 逆变器 变频 空间矢量控制 DSP

**Abstract:** In this thesis a kind of neutral point clamped inverter-type three-level SVPWM principle will be introduced. And the hardware structure and software design of the control system which is based DSP as the control core will be expounded. To make sure the three-level inverter's high efficiency and stability, vector interval method is put forward in the thesis. And according to the distinguishing feature of vector range, three kinds of judgment rules are given. After obtaining the vector range, the function time, order and rules of every synthesis vector will be calculated. The hardware structure and software design of the control system are given in architecture of control system based on single DSP.

**Key words:** Three-level Multi-level Inverter VF SVPWM DSP

[中图分类号] TM46

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2010)11-0086-04

## 1 引言

三电平逆变器是多电平逆变器中最具代表性的一种,并以其大容量、高效、简便等诸多优点在运动控制领域得到快速发展。而电压空间矢量控制方法的出现使高压大容量变频调速系统具有直流调速系统的性能成为可能。空间矢量控制方法通过优化开关矢量,降低了开关频率,减少了交流侧电流的总谐波畸变率,提高了母线

电压利用率,使电机平稳运行,特性提高。本文以二极管中点箝位式三电平逆变器为主电路结构,介绍一种以 TI 公司电机控制专用 DSP 为核心的空间矢量控制系统。在介绍主电路基本组成及功能基础上,给出由 DSP 组成的控制系统及软件设计方法。

## 2 二极管中点箝位式三电平逆变器拓扑结构分析

二极管中点箝位式三电平逆变器主电路结构如图 1 所示。逆变器每相桥臂由 4 个功率开关器件,4 个续流二极管和 2 个中点箝位二极管组成。

功率开关的不同组合分别输出  $+U_{dc}/2$ 、0、 $-U_{dc}/2$ , 直流母线电压  $V_{dc} = U_{dc}$ 。三电平逆变器的输出状态:“正态”代表输出  $+U_{dc}/2$ , 以字母 P 表示;“零态”代表输出 0, 以字母 O 表示;“负态”代表输出  $-U_{dc}/2$ , 以字母 N 表

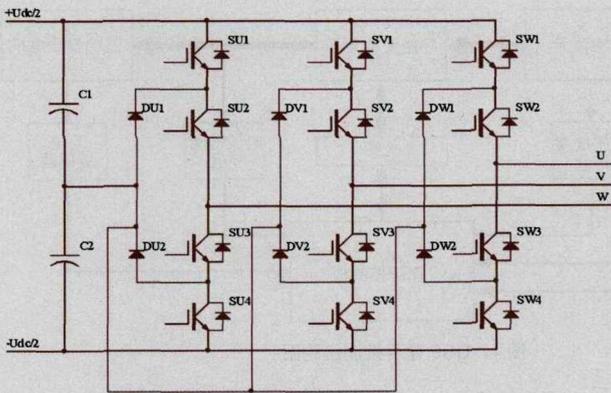


图1 二极管中点箝位式三电平逆变器拓扑结构

附表 逆变器输出状态与功率开关状态

功率开关状态	$S_{X1}$	$S_{X2}$	$S_{X3}$	$S_{X4}$	$V_{XO}$
P	1	1	0	0	$+U_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-U_{dc}/2$

示。其具体输出状态与功率开关状态的关系如附表所示。

三相交流电经过整流、滤波后输出给逆变器，此时直流母线电压为

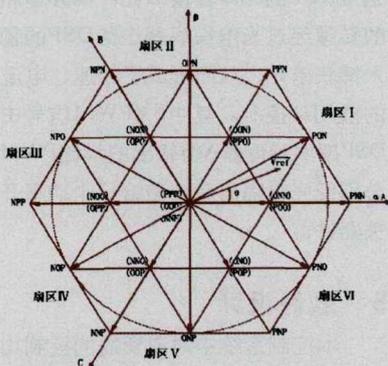


图2 三电平逆变器电压空间矢量分布图

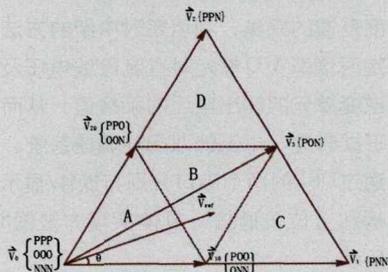


图3 扇区I示意图

$V_{dc}$ ，逆变器输出U相、V相及W相电压给负载。

(1)“正态”：功率开关 $S_{X1}$ 、 $S_{X2}$ 导通， $S_{X3}$ 、 $S_{X4}$ 关闭，此时相输出 $+U_{dc}/2$ ；

(2)“零态”：功率开关 $S_{X2}$ 、 $S_{X3}$ 导通， $S_{X1}$ 、 $S_{X4}$ 关闭，此时相输出为0；

(3)“负态”：功率开关 $S_{X3}$ 、 $S_{X4}$ 导通， $S_{X1}$ 、 $S_{X2}$ 关闭，此时相输出为 $-U_{dc}/2$ 。

定义开关量 $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$ 代表各相桥臂的输出状态，则各相电压表示为：

$$u_A = \frac{1}{2}V_{dc}S_a, \quad u_B = \frac{1}{2}V_{dc}S_b, \quad u_C = \frac{1}{2}V_{dc}S_c$$

$$\text{其中, } S_x = \begin{cases} 1, \text{第}x\text{相输出P} \\ 0, \text{第}x\text{相输出O} \\ -1, \text{第}x\text{相输出N} \end{cases}, \text{这里}x\text{为}a、b\text{或}c。$$

### 3 电压空间矢量控制原理

#### 3.1 空间电压矢量的分布

通过坐标变换实现的控制系统就叫做矢量控制系统<sup>[1]</sup>。在三相交流电机的对称系统中，当给交流电机加上三相正弦电压时，电机气隙磁通在 $\alpha - \beta$ 静止坐标平面上的运动轨迹为圆形。设A相轴线与 $\alpha$ 轴线重合，则三相正弦电压的瞬时值表达式如下：

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin(\omega t) \\ u_B &= U_m \sin(\omega t + 2/3\pi) \\ u_C &= U_m \sin(\omega t + 4/3\pi) \end{aligned}$$

其中 $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$ 代表三相正弦电压的瞬时值。对应的空间电压矢量为：

$$V_{ref} = \frac{2}{3}(u_A + \alpha \cdot u_B + \alpha^2 \cdot u_C)$$

其中 $\alpha$ 为矢量算子， $\alpha = e^{j2/3\pi}$ 。

在三电平逆变器中，每相均有三种开关状态，分别为P、O、N。对应交流侧输出电压为 $+U_{dc}/2$ 、0、 $-U_{dc}/2$ 。对三相系统来说共可组合成 $3^3(27)$ 组开关状态。而每一种开关状态对应一个电压空间矢量，因此三电平逆变器电压空间矢量共有27个不同的矢量组成。在 $\alpha - \beta$ 平面坐标系中，27组开关状态对应的电压空间矢量分布图如图2所示。其中，大六边形的6个顶点为6个大矢量所在的位置，小六边形的每个顶点代表两个矢量(P型小矢量和N型小矢量)，因此小矢量共有12个矢量且总是成对出现，它们对中性点电压的作用刚好相反，这种特性在中点电压平衡的控制中将会得到应用。零电压矢量由3个矢量组成，且都位于六边形的中点，其余的矢量是六个中矢量。

以开关量形式表示电压空间矢量为：

$$\begin{aligned} V_{ref} &= \frac{1}{3}V_{dc}(S_a + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) = \\ &= \frac{V_{dc}}{6}[(2S_a - S_b - S_c) + j\sqrt{3}(S_b - S_c)] \end{aligned}$$

应用上式计算得大、中、小及零矢量幅值分别为 $\frac{2}{3}V_{dc}$ 、 $\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$ 、 $\frac{1}{3}V_{dc}$ 、0。

### 3.2 矢量作用时间的计算

三电平NPC逆变器的SVM算法也基于伏秒平衡原理，即：给定矢量  $\vec{V}_{ref}$  与采样周期  $T_s$  的乘积，等于所选定空间矢量与其作用时间乘积的累加和<sup>[2]</sup>。定义参考电压矢量为：

$$\vec{V}_{ref} = V_{ref} e^{j\theta}$$

其中： $V_{ref}$ 为电压矢量模值， $\theta$ 为电压矢量的空间角度。

为便于计算空间矢量的作用时间，图2所示的空间矢量分布图分为六个三角形扇区。由于矢量分布的对称性，下面以参考电压矢量  $\vec{V}_{ref}$  位于第一扇区进行介绍。扇区1矢量定义如图3所示，A、B、C、D将扇区1细分为四个小三角形区域。

定义第x扇区： $(x-1) \times 60^\circ < \theta < x \times 60^\circ$ 。在第一扇区，各矢量表示如下：

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= 0, & \vec{V}_{10} &= \frac{1}{3} V_{dc}, \\ \vec{V}_{20} &= \frac{1}{3} V_{dc} e^{j/3\pi}, & \vec{V}_1 &= \frac{2}{3} V_{dc}, \\ \vec{V}_2 &= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j/3\pi}, & \vec{V}_3 &= \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc} e^{j/6\pi} \end{aligned}$$

由三角函数关系可以得出参考电压矢量在A、B、C、D区域分别满足如下关系：

- (1) 在D区域只满足：  
 $V_{ref} \cos \theta \geq \sqrt{3}/6 V_{dc}$ ;
- (2) 在A区域只满足：  
 $V_{ref} \cos \theta + \sqrt{3}/3 V_{ref} \sin \theta \leq 1/3 V_{dc}$ ;
- (3) 在C区域只满足：  
 $V_{ref} \cos \theta - \sqrt{3}/3 V_{ref} \sin \theta \geq 1/3 V_{dc}$ ;
- (4) 在B区域以上条件均不满足。

根据以上关系可知，由给定参考电压矢量的空间角度可以确定所有扇区，然后根据以上三种比较关系可以确定给定参考电压矢量所在的具体小区域，从而根据所在小区域的三个矢量进行合成。现以图3所示参考电压矢量所在位置对各矢量作用时间计算如下：设  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别为矢量  $\vec{V}_{10}$ 、

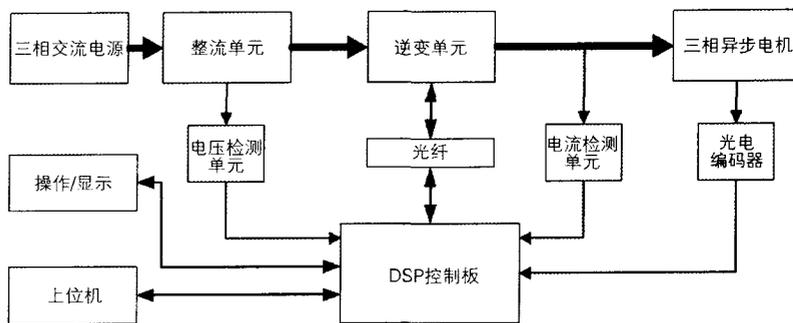


图4 DSP硬件控制结构图

$\vec{V}_{20}$ 、 $\vec{V}_3$  的作用时间，采样时间为  $T_s$ ， $0 < \theta < \pi/3$ ，则有

$$\begin{cases} T_1 \vec{V}_{10} + T_2 \vec{V}_{20} + T_3 \vec{V}_3 = V_{ref} T_s \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_s \end{cases}$$

对上式求解可得：

$$\begin{cases} T_1 = T_s [1 - 2m \sin \theta] \\ T_2 = T_s [1 - 2m \sin(-\theta + \pi/3)] \\ T_3 = T_s [-1 + 2m \sin(\theta + \pi/3)] \end{cases}$$

### 3.3 矢量作用顺序

在三电平逆变器中，由于冗余开关状态的存在，使得一个电压矢量对应于两个或三个开关状态。因此必须使用一定的算法来减少开关动作次数，从而减少开关损耗。减少开关损耗算法的基本原则是每次开关状态的变化，只引起一相电压的变化，并且只有两个互补开关管的触发信号发生变化，从而减少了开关损耗并降低开关频率<sup>[3]</sup>。本文将按照如下规则确定矢量作用顺序。

- (1) 同一桥臂从一种开关状态切换到另一种开关状态的过程中，只能有两个开关器件同时动作；
- (2) 同一时刻三相逆变单元只能有一相开关动作；
- (3) 作用矢量对中点电位的影响最小；
- (4) 参考电压矢量从一个扇区转移到另一个扇区所需的开关动作最少。

## 4 DSP控制系统

本系统的控制芯片采用TI公司最

新的数字信号处理器TMS320F2812，这是一款专门在电机及其他运动控制领域中应用的专用DSP芯片。具体控制系统结构如图4所示。

三相交流电经过整流滤波输出给逆变器，整流模块输出电压经过电压霍尔传感器检测送给DSP的A/D转换单元，DSP通过光电隔离技术将SVPWM控制信号传递给逆变器，控制功率开关动作，逆变器输出三相交流电给负载，同时经过电流霍尔检测送给DSP的A/D转换单元。异步电机的转速经过光电编码器送给DSP的输入捕获单元，从而形成了转速、电流的双闭环控制。其中SVPWM信号由DSP事件管理器A/B输出的12路PWM分别经光电隔离后传递给12个功率开关器件。

## 5 软件设计

本控制系统中对逆变器的控制均是通过DSP实现的。DSP的两个事件管理器负责SVPWM波形的输出及速度反馈的采集，利用定时中断的方法定时读取A/D单元对直流母线电压及逆变单元的输出电流的采样值，从而形成转速、电流的双闭环调速系统。通过DSP的两个串口分别与操作/显示板和上位机通信。具体实现方法图5所示。

(下转第125页)

值, 如果没有检查相应的控制程序是否正常。

(2)通过R550、R551参数来查看变频器控制字1和控制字2相应位的高低电平状态, 来判断控制程序中控制变频器运行的对应的每一位的状态。

其中R550参数用于在柜门面板上显示控制字1对应的每一位的高低电平状态, 某一位为高电平状态时, 该位上的发光二极管被点亮。R551参数用于查看控制字2相应位的状态。当对变频器发出运行命令后变频器没有正常启动时, 可从柜门面板监视控制字每一位的高低电平状态, 检查程序

后从而迅速判断出故障原因。

## 8 结束语

开启电压 $U_{GE}$ 是实现电导调制而导通的最低栅射电压, 在25℃时 $U_{GE}$ 的值一般为2~6V。在IGBT电路中, 每个IGBT导通和关断由门级电压确定, 当发生擎住现象(流过的电流大于最大容许电流), IGBT关断不了(大负荷工作时)。

IGBT对环境温度要求比较苛刻, 要求管壳温度不超过70℃, 要求环境温度20℃左右, 因此在传动室内都要求安装有空调。

西门子6SE70系列书本型变频器在冶金领域有着非常广泛的应用, 上述对变频器内部结构的介绍、触发脉冲的测试和典型故障的排除对于从事西门子变频器维护和修理的技术人员有着较高的参考价值。

## 作者简介

高扬 男 电气自动化工程师, 现就职于河北钢铁集团承德分公司自动化管控中心, 主要从事自动化维护开发工作。

## 参考文献(略)

(上接第88页)

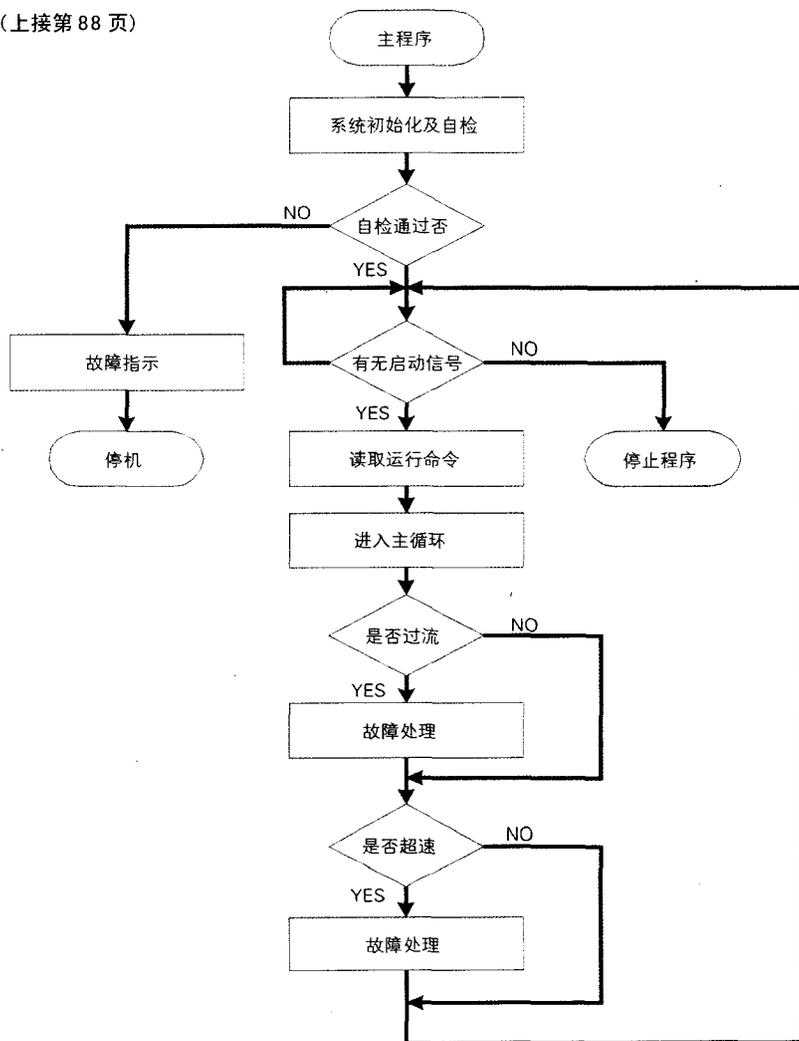


图5 逆变器的控制软件具体实现方法

## 6 结束语

本文详细介绍了中点箝位式三电平逆变器空间电压矢量调制的工作原理及以DSP为控制核心的软硬件实现方法, 为了使三电平逆变器高效、稳定工作, 提出了以三种判断规则确定参考矢量所在区间, 从而很快计算出各合成矢量的作用时间, 在此基础上给出了各合成矢量的作用顺序及规则。最后给出以DSP为控制核心的控制系统的硬件结构和软件设计方法。从而实现了中点箝位式三电平逆变器控制系统的设计。

## 作者简介

曲文超(1983-) 男 工程师, 工作于哈尔滨九洲电气股份有限公司, 任研发员, 研发方向为电力电子与电气传动。

## 参考文献

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Bin Wu. 大功率变频器及交流传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 段先波. 三电平高压变频器及其相关问题的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.