

文章编号:1671-251X(2007)06-0032-04

# 三电平逆变器 SVPWM 谐波对电动机转矩的影响

李 明, 朱美强, 郭孝圆

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**文章首先对空间电压矢量的三电平逆变器 PWM 算法进行了分析, 然后以 MATLAB 的 Simulink 为平台, 建立了 SVPWM 方式在调速系统中的仿真模型。基于仿真研究, 着重分析了谐波对异步电动机电磁转矩的影响, 并介绍了谐波消除方法。

**关键词:**电动机; 三电平逆变器; 空间矢量; 谐波; SVPWM

**中图分类号:** TM343 **文献标识码:** A

## Influence of Harmonics of SVPWM of Three-level Inverter on Motor Torque

LI Ming, ZHU Mei-qiang, GUO Xiao-yuan

(College of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The paper analyzed PWM algorithm of three-level inverter of space voltage vector, then took Simulink of MATLAB as platform, established simulation model of SVPWM mode in speed-regulation system. Based on simulation research, it analyzed harmonics influence on electromagnet torque of asynchronous motor emphatically, and introduced the clearing method for harmonics.

**Key words:** motor, there-level inverter, space vector, harmonics, SVPWM

### 0 引言

脉宽调制技术(PWM)对近代电力电子技术的发展起到了极大的推动作用, 特别是空间电压矢量 PWM(SVPWM)技术的优良特性, 使其在交流调速系统中获得了越来越广泛的应用, 同时, PWM 技术本身在应用中也获得了不断的发展与进步。但是, SVPWM 技术的应用也存在着一些缺点和问题, 主要体现在逆变器的输出电压电流波形中存在不必要的谐波成分。当应用该控制技术的逆变器用于交流电动机供电时, 除基波外还有一系列的时间谐波, 这些谐波分量的存在使得逆变器的损耗及电动机的损耗、转矩脉动增大, 其中影响最大的是产生谐波转矩, 最终造成转速的脉动。所以, 目前许多学者致力于研究最优的 PWM 模式, 力求降低逆变器输出中的谐波分量, 提高逆变器的输出性能。本文的重点是研究时间谐波成分对电动机电磁转矩的影响。

### 1 空间电压矢量 PWM 控制原理<sup>[1]</sup>

目前, 应用较广的是二极管中点钳位(Neutral Point Clamp, NPC)式三电平逆变器, 其主电路的拓扑结构如图 1 所示。

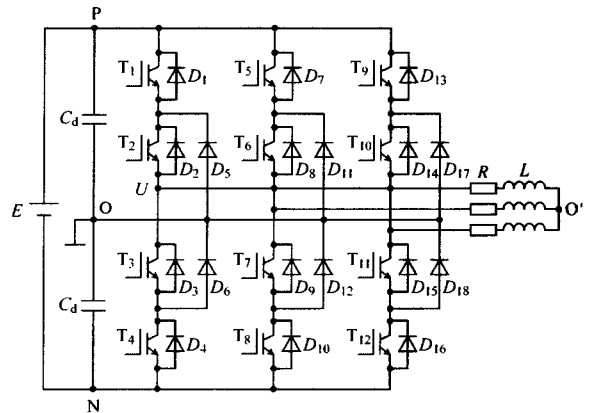


图 1 三电平逆变器主电路的拓扑结构图

由图 1 可知, 这种二极管钳位结构的特点是采用多个二极管对相应开关元件进行钳位, 输出相应于三电平的相电压。对于三电平逆变器来说, 每一相的 3 种输出状态组合起来可获得 27 种开关状

收稿日期:2007-06-11

作者简介:李明(1962-),男,博士,教授,现在中国矿业大学信电学院从事教学与科研工作。

态,也即有 27 个空间矢量。

如果对三相电压进行变换,根据空间矢量理论,输出电压矢量定义为

$$U^* = \frac{2}{3}(u_a + \alpha \times u_b + \alpha^2 \times u_c) \quad (1)$$

式中: $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 。

由式(1)计算可得如图 2 所示的电压空间矢量图,其中包括 6 个长矢量、6 个中矢量、12 个短矢量和 3 个零矢量,6 种幅值为  $E$  的长矢量将圆等分成 6 个扇区,每个扇区占  $60^\circ$  空间角。

图 3 为  $V_0$ 、 $V_7$ 、 $V_9$  形成的等边三角形,在这个三角形里包含大矢量  $\dot{V}_7 = Ee^{j0}$ 、 $\dot{V}_9 = Ee^{j\frac{\pi}{3}}$ ,次大矢量  $\dot{V}_8 = Ee^{j\frac{\pi}{6}}$ ,中矢量  $\dot{V}_1 = \frac{1}{2}Ee^{j0}$ 、 $\dot{V}_2 = \frac{1}{2}Ee^{j\frac{\pi}{3}}$ ,以及零矢量  $\dot{V}_0 = 0$ ,把  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_8$  的顶点连接起来,大三角形被分成 4 个小三角形 A、B、C、D。

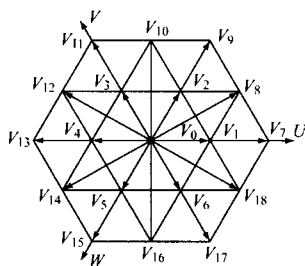


图 2 六角形电压空间矢量图

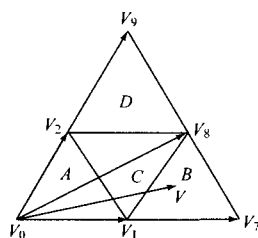


图 3 SVPWM 原理图

当  $V$  位于三角形 B 时,3 个顶点矢量的作用时间由式(2)求解:

$$\begin{cases} \dot{V}_1 t_1 + \dot{V}_7 t_7 + \dot{V}_8 t_8 = \dot{V} T \\ t_1 + t_7 + t_8 = T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T$  为采样时间; $t_1$ 、 $t_7$ 、 $t_8$  分别为  $V_1$ 、 $V_7$ 、 $V_8$  的作用时间。

由式(2)计算可得  $V_1$ 、 $V_7$ 、 $V_8$  的作用时间:

$$\begin{cases} t_7 = \frac{4V}{\sqrt{3E}} T \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - T \\ t_8 = \frac{4V}{\sqrt{3E}} T \sin \theta \\ t_1 = T - t_7 - t_8 \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (3)$$

同理可以得出参考矢量  $V$  处于其它三角形 A、C、D 的作用时间。从式(3)可知,电压空间矢量在线性区调制的约束条件是  $t_1 + t_7 + t_8 < T$ ,本文所讨论的是在线性调制区域。

## 2 谐波分量对电动机转矩脉动的影响<sup>[2~3]</sup>

由于逆变器输出电压中含有基波及各次谐波,

它们各自在电动机中将产生相应的电磁转矩。为了获得高性能的电磁转矩,要尽可能地减少谐波转矩对电动机的影响,因为谐波转矩将使电动机产生转矩脉动。

### 2.1 变频器输出电压频谱

对于对称的三相制来说,3 个对称的非正弦相电压在时间上依次相差  $1/3$  周期,分别表示为

$$u_a = f(t), u_b = f(t - T/3), u_c = f(t - 2T/3)$$

式中: $T = 2\pi/\omega_1$ 。

由于三相中的非正弦波通常是以横轴为镜对称的,所以其傅立叶级数只含有奇次谐波,经过傅立叶级数展开后得:

$$\begin{cases} u_a = f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_k) \\ u_b = f\left(t - \frac{T}{3}\right) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin\left[k\omega_1 t + \psi_k - \frac{2}{3}k\pi\right] \\ u_c = f\left(t - \frac{2T}{3}\right) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin\left[k\omega_1 t + \psi_k - \frac{4}{3}k\pi\right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{km}$  是谐波电压幅值;谐波次数  $k$  是奇数。

基波、7 次谐波、13 次谐波( $6k+1, k=0, 1, 2, \dots$ ) 分别是对称的三相电压,其相序是正序的,构成正序对称组;5 次谐波、11 次谐波、17 次谐波( $6k-1, k=0, 1, 2, \dots$ ) 等构成负序对称组;而 3 次谐波、9 次谐波、15 次谐波( $6k+3, k=0, 1, 2, \dots$ ) 等构成零序对称组。

### 2.2 谐波脉动电磁转矩的分析

由逆变器供电的异步电动机的气隙中存在基波和一系列的时间谐波,它们在旋转着的电动机转子中产生感应电动势和电流。由前面分析的正序、负序概念可知,正序对称组( $6k+1, k=0, 1, 2, \dots$ ) 产生的( $6k+1$ ) $\omega_1$  正序旋转磁场,由于转子本身的转速接近  $\omega_1$ ,所以正序旋转磁场在转子中感应出频率近似  $6k f_1$  的电动势和电流,同理可知负序旋转磁场在转子中感应出频率近似  $6k f_1$  的电动势和电流。

所以,交流电动机除由基波磁动势与相应频率的转子感应电流合成作用产生基波电磁转矩外,还存在一系列谐波磁动势和转子谐波电流合成作用产生的谐波电磁转矩。谐波电磁转矩有 2 类:一类是每一次谐波磁动势和任一次转子谐波电流的合成作用产生的,由于  $k$  次谐波磁动势的最大幅值是基波磁动势最大幅值的  $1/k$  倍,所以谐波转矩很小,一般不考虑;对交流电动机工作有影响的是另一类是由基波磁动势与各次谐波磁动势在转子中感应的频率

为  $6kf_1$  的转子谐波电流相互作用所形成的转矩。

本文中为异步电动机供电的是电压型逆变器，逆变器输出的电子三相电压分别为

$$\begin{cases} u_{ak} = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin k\omega_1 t \\ u_{bk} = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin \left( k\omega_1 t - \frac{2}{3}k\pi \right) \\ u_{ck} = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin \left( k\omega_1 t + \frac{2}{3}k\pi \right) \end{cases} \quad (5)$$

图4为异步电动机定子单相等值电路图，谐波电流的励磁分量很小，所以定子谐波电流可以近似等于转子谐波电流：

$$\begin{cases} i_{ak} = \frac{1}{k} I_{km} \sin(k\omega_1 t + \phi_k) \\ i_{bk} = \frac{1}{k} I_{km} \sin \left( k\omega_1 t + \phi_k - \frac{2}{3}k\pi \right) \\ i_{ck} = \frac{1}{k} I_{km} \sin \left( k\omega_1 t + \phi_k + \frac{2}{3}k\pi \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $I_{km} = \frac{U_{km}}{\omega_1(L_{\sigma_1} + L_{\sigma_2})}$ ，为谐波电流幅值； $\phi_k$  为功率因数角。

所以，谐波供电下电动机的瞬时电磁功率为

$$P(t) = u_{a1} i_{ak} + u_{b1} i_{bk} + u_{c1} i_{ck} \quad (7)$$

分析得出，基波电动势与转子  $k$  次谐波电流合成产生的瞬时电磁功率为

$$P(1-k) = \frac{3}{2} \frac{1}{k} U_{1m} I_{km} \cos(6k\omega_1 t + \phi_k + \pi) \quad (8)$$

式中： $(1-k)$ 表示基波磁动势对  $k$  次谐波电流的作用， $k=6n \pm 1 (n=1, 2, 3, \dots)$ ，+、-号分别对应于正序和负序谐波电流。

谐波电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_c(1-k) &= \frac{P(1-k)(t)}{\Omega} \\ &= \frac{1}{k} \frac{3n_p}{2\omega_1} U_{1m} I_{km} \cos(6n\omega_1 t + \phi_k + \pi) \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $\Omega$ 为同步角速度； $n_p$ 为电动机磁对数。

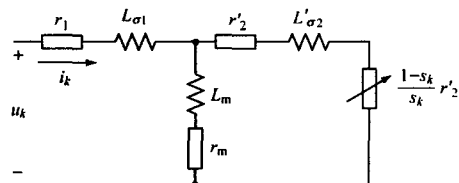


图4 异步电动机定子单相等值电路图

50 Hz, 定子电阻为 3.435, 定子电感为 8.0 mH; 转子电阻为 5.816  $\Omega$ , 转子电感为 5.0 mH, 互感为 200.3 mH; 转动惯量为 0.089  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。仿真结果如图 5、6 所示。

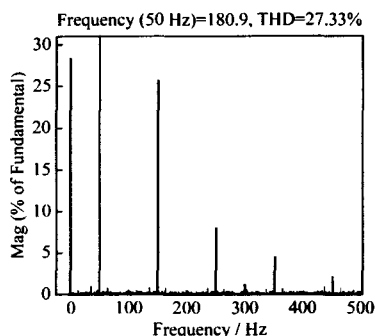


图5 逆变器相电压的谐波分析图

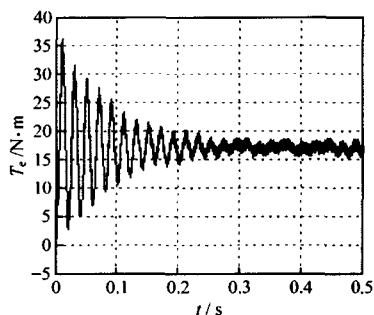


图6 电动机转矩的动态特性曲线

从图5仿真结果可以看出，逆变器电压中的谐波含量主要以奇次谐波为主(从数值上可以看出)，故对电动机运行影响最大的也是奇次谐波，所以要消除谐波对电磁转矩影响，不一定要消除所有的谐波。

### 3 谐波消除方案<sup>[4]</sup>

对于逆变器而言，不管输出要求是恒频恒压还是变频变压，有效消除或降低输出谐波是基本的要求，因而逆变电源的谐波抑制一直是研究者致力解决的问题。解决谐波问题的基本思路有2种：一种是装设滤波装置，以滤除其谐波；另一种是对逆变器本身进行改进，使其少产生谐波。

一种可行的方案是采用特定谐波消除 SHE-PWM 技术，它的基本思想是通过傅立叶级数分析，得出在特定脉冲波条件下的傅立叶级数展开式，然后令某些特定的低次谐波为零，从而得到一个反映脉冲相位角的非线性方程组，按求解的脉冲相位进行控制，则必定不含这些特定的低次谐波。该方法是通过开关时刻的优化选择来消除选定的低频次谐波，具有波形质量高、效率高、直流电压利用率高

### 2.3 仿真研究

仿真使用的电动机基本参数：三相异步电动机的额定功率为2.2kW；定子电压为380V，频率为

文章编号:1671-251X(2007)06-0035-03

# 一种嵌入式自适应应变检测系统的研究

陈连玉<sup>1</sup>, 薛晓炎<sup>2</sup>

(1. 江苏技术师范学院电信学院, 江苏 常州 213001;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

**摘要:**自适应应变检测系统采用一种能够自动调整输入电桥平衡的设计技术,即利用嵌入式器件 ARMS3C4510B 调节数字电位器对桥式输入电路进行自动平衡调节,以实现自适应校零,从而提高测量的精度。该系统同时能够根据具体输入信号的大小自适应调整放大器的放大倍数,以实现对不同范围的输入信号采用不同的放大倍数,从而确保信号在 1/2~1 满量程范围内。

**关键词:**应变检测系统; 自适应; 嵌入式; ARM; S3C4510B

**中图分类号:** TP216      **文献标识码:** A

## Research of an Embedded Self-adaptation Detection System of Strain

CHEN Lian-yu<sup>1</sup>, XUE Xiao-yan<sup>2</sup>

(1. College of Electric and Information of Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China. 2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

**Abstract:** The self-adaptation detection system of strain adopted a design technology that can adjust balance of input bridge automatically, which used ARMS3C4510B to adjust digital potentiometer, so as to realize self-adaptation zeroing and improve detection precision. In addition, according to the value of input signal, this system could adjust amplification of amplifier adaptively so that the different amplification was adopted for input signal in different range, which could ensure the signal value was in 1/2~1 full range.

**Key words:** detection system of strain, self-adaptation, embedded, ARM, S3C4510B

收稿日期:2007-07-16

作者简介:陈连玉(1971-),男,讲师,硕士,工程师,主要研究方向为嵌入式系统、智能检测。

## 0 引言

在应变检测系统中,将应变片粘在弹性体的表面就能够检测出弹性体表面的应变。常用的应变片

一系列显著优点,故该技术是交流变频调速的一种理想的控制方法,它将成为一种极有前途的交流变频调速控制方法。

## 4 结语

本文将三电平逆变器与异步电动机有机结合,建立了逆变器-异步电动机的数学模型,并通过该模型,利用 MATLAB/Simulink 软件对其仿真。同时,对于谐波对电动机电磁转矩的影响进行了详细的理论分析,最后还介绍了谐波消除的基本思路和当前最有发展前途的谐波消除技术。

## 参考文献:

- [1] 刘凤君. 正弦波逆变器[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 方瑞明,王 榕. 基于谐波分析法的高速变频电机稳态仿真研究[J]. 中小型电机,2004,31(1):1~4.
- [3] 杨顺昌,廖 勇,余 渝. 考虑谐波影响后交流励磁电动机电磁转矩的分析与计算[J]. 电工技术学报,2003,18(1):5~9.
- [4] KUMAR V S, KANNAN P S. Harmonic Studies in Space Vector PWM Inverter Drive System [C]. Harmonics and Quality of Power 2004 11th International Conference. 2004:112~116.