

SVPWM在现代串级调速系统中的仿真研究

张峰, 林永君, 张少伟

(华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 根据高电压大容量电动机的节能调速问题,提出了采用空间矢量脉宽调制SVPWM的串级调速系统,重点阐述了SVPWM的基本原理及调制算法,给出了利用Simulink的实现方法,建立了采用SVPWM的串级调速系统仿真模型。仿真结果证明了该模型的有效性,为实际系统的设计提供了理论依据。

关键词: 空间矢量脉宽调制; 仿真; 串级调速; 建模

中图分类号: TP271+.4

文献标识码: B

Research on the application of SVPWM in modern cascade speed control system

ZHANG Feng, LIN Yong Jun, ZHANG Shao Wei

(School of Control Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In this paper, cascade speed control system which adopting SVPWM was proposed according to the energy conservation timing problem of a high voltage high-capacity motor. The basic principle and modulating algorithm of SVPWM was expatiated, implement method was given by Simulink in this paper, and the simulation model of cascade speed control system which adopting SVPWM was established. The reasonability and validity have been testified by the simulation results and the theory basis for the designing of real system is provided.

Key words: SVPWM; simulation; cascade speed control; modeling

三相异步电动机具有结构简单、价格低廉、维护方便、运行可靠等许多优点,因而获得了广泛应用。但在采用较简单的方法调速时,性能远不如直流电动机。随着科学技术的发展,特别是半导体制造技术的长足进步,以变频调速和串级调速为代表的复杂调速技术控制电路因性能不断提升、成本不断下降而获得了广泛的应用。

绕线式异步电动机多采用串级调速方法,由于这种调速方法可以将串入附加电动势而增加的转差功率回馈到电网或电动机轴上,克服了以往转子回路需要串电阻的缺点,提高了调速的经济性,具有节能作用,可以使系统获得较高的运行效率。图1是斩波串级调速原

理图,它在转子直流回路中加入了直流斩波器,通过调节斩波器的占空比实现电机转子转速的无级调速。斩波串级调速技术具有独特的优势,特别在高压大中型电动机节能应用方面前景光明。

对于串级调速系统中逆变控制器多采用SPWM控制

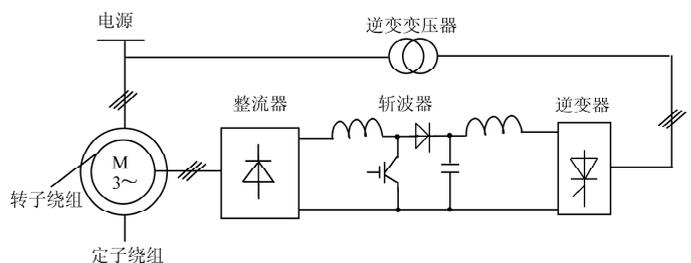


图1 斩波串级调速系统原理图

技术,而 SVPWM 控制技术是一种优化了的 PWM 控制技术,和传统的 SPWM 相比, SVPWM 具有直流利用率高(比传统的 SPWM 提高了约 15%)、谐波少、控制简单、易于实现数字化等优点。而且电压空间矢量的不同调制方法在不同程度上可以缓解开关频率与开关损耗之间的矛盾。正是由于 SVPWM 控制技术的这些优点,使得本课题的研究具有重要的意义。

1 SVPWM 脉宽调制原理及实现

1.1 SVPWM 基本原理

空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)是以三相对称正弦波电压供电时交流电动机产生的理想圆形磁链轨迹为基准,用逆变器不同的开关模式产生的实际磁通去逼近基准磁链圆,并由他们比较的结果决定逆变器的开关状态,形成 PWM 波形,从而达到较高的控制性能^[1]。根据三相逆变器的工作原理可以知道,逆变桥共有 $2^3=8$ 种状态,若将逆变器的 8 种状态用电压空间矢量来表示,则形成 8 个基本的电压空间矢量,其中 6 个非零矢量,2 个零矢量,每两个电压矢量在空间相隔 60° ,如图 1 所示。SVPWM 技术的目的是通过与基本的空间矢量对应的开关状态的组合,得到一个等效的空间旋转电压矢量 V_{ref} (通常称为参考电压矢量,其理想轨迹是一个圆)。图 2 中所示六边形内切圆表示 SVPWM 欠调制方式下参考电压的极限值^[2]。

在对称的三相正弦电压输入下,设相电压分别为 V_α 、 V_β 、 V_c , 电压空间矢量可表示为:

$$V = \sqrt{\frac{2}{3}}(V_\alpha + V_\beta e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{j\frac{4\pi}{3}})$$

参考电压 V_{ref} 在相平面上可表示为:

$$V_{ref} = V_\alpha + j V_\beta$$

以图 2 中位于 1 扇区的电压参考矢量为例,由伏秒

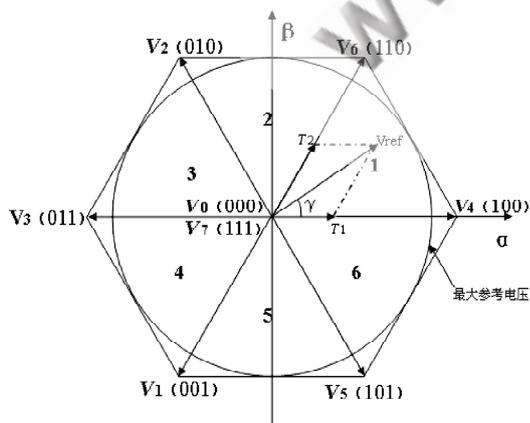


图 2 电压空间矢量图

平衡原理和正弦定理可得:

$$V_{ref} T_s = V_4 T_1 + V_6 T_2 + (V_0 \text{ or } V_7) T_0,$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} |V_{ref}| T_s \sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)}{U_{dc}}, \quad T_2 = \frac{\sqrt{3} |V_{ref}| T_s \sin(\gamma)}{U_{dc}}$$

式中, T_s 为 PWM 的开关周期, T_1 、 T_2 分别为 V_4 和 V_6 在 T_s 内的作用时间, U_{dc} 为直流侧电压。

同样,可根据参考电压矢量的幅值和相角求取其他扇区的任一基本矢量的作用时间。在参考电压矢量作用下,可以获得幅值近似恒定、顶点沿圆形轨迹运动、平均速度可调的矢量。通过调控 V_{ref} 的频率、幅值和相位,即可实现逆变器输出电压频率、幅值和相位的控制。

1.2 SVPWM 算法

SVPWM 算法实质是通过控制逆变器不同的开关模式,使逆变器瞬时输出的三相脉冲电压构成的电压空间矢量与所期望输出的三相对称正弦波电压构成的电压空间矢量相等效。SVPWM 信号的实时调制需要参考电压矢量的二维静止坐标系 α 轴和 β 轴的分量、以及 PWM 周期 T_s 作为输入,其产生框图如图 3 所示。

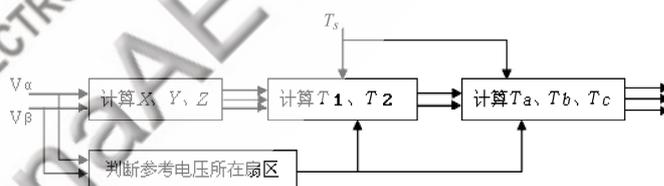


图 3 SVPWM 产生框图

1.2.1 判断参考电压矢量 V_{ref} 所在扇区

根据图 2 中各扇区与 V_α 、 V_β 的关系,当 $\sqrt{3}V_\alpha - V_\beta > 0$ 时,令 $A=1$; 当 $\sqrt{3}V_\alpha + V_\beta < 0$ 时,令 $B=1$, 当 $V_\alpha + V_\beta < 0$ 时,令 $C=1$, 取 $N=A+2B+4C$, 可得到各扇区与 N 的对应关系如表 1 所示^[3]。

表 1 N 与扇区号的对应关系

扇区号	1	2	3	4	5	6
N	3	1	5	4	6	2

1.2.2 计算 X 、 Y 、 Z 以及 T_1 、 T_2

$$\text{令 } X = \frac{\sqrt{3}V_\beta \times T_s}{U_{dc}}, \quad Y = \frac{(3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \times T_s}{2U_{dc}}, \quad Z = \frac{(-3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \times T_s}{2U_{dc}},$$

对于不同扇区的 T_1 、 T_2 , 按表 2 取值。 T_1 、 T_2 赋值后,还要对其进行饱和判断,若 $T_1 + T_2 > T_s$, 取 $T_1 = T_1 \times T_s / (T_1 + T_2)$, $T_2 = T_2 \times T_s / (T_1 + T_2)$ 。

表 2 相邻电压矢量作用时间

扇区号	1	2	3	4	5	6
T_1	Z	Y	Z	X	X	Y
T_2	Y	$-X$	X	Z	$-Y$	$-Z$

注: T_1 表示前一矢量, T_2 表示后一矢量。

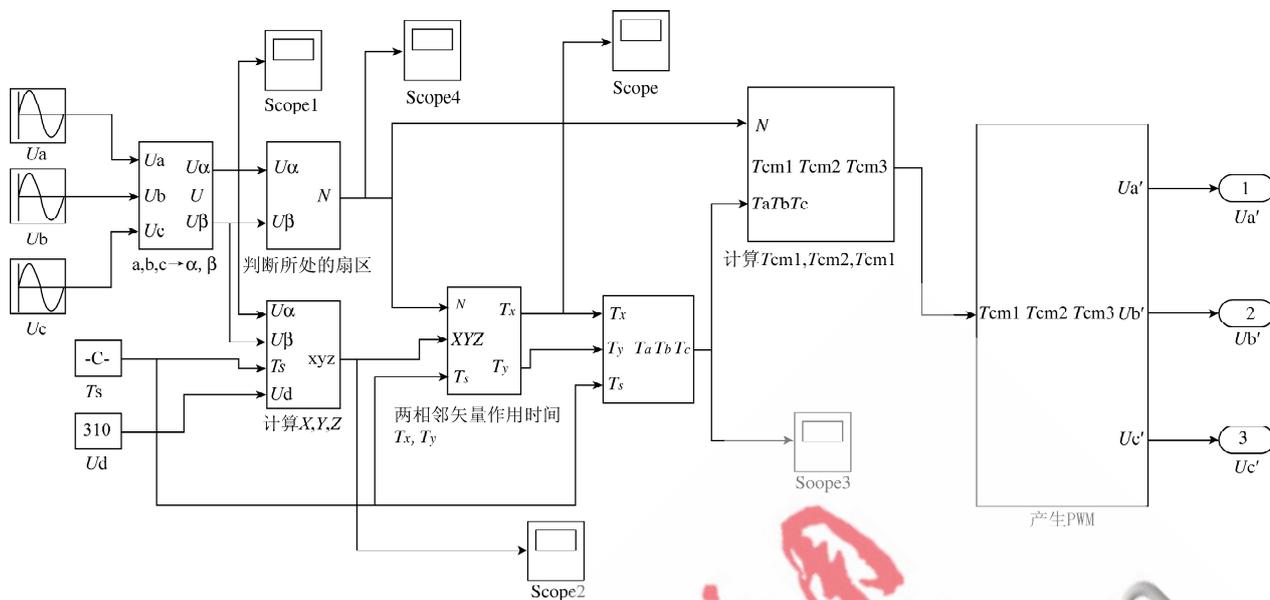


图4 SVPWM模型

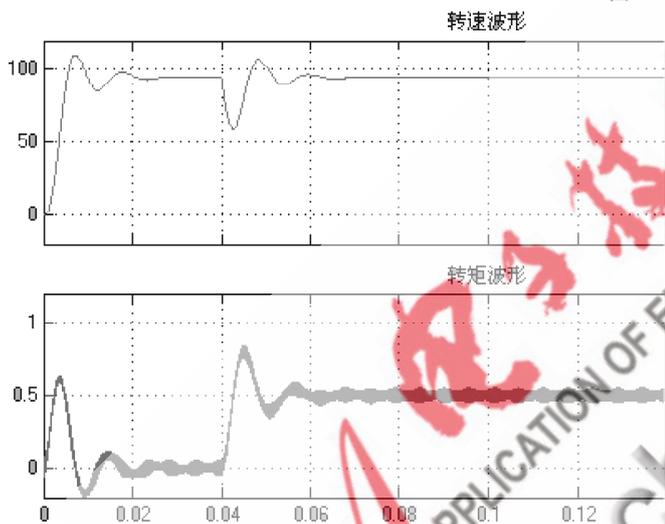


图5 仿真示意图

断、X、Y、Z的计算、 T_1, T_2 的计算、 $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ 的计算以及SVPWM产生等子模块。

2 串级调速系统仿真模型的建立

由图1可见,斩波串级调速系统的主电路由三相对称交流电压源、三相绕线式异步电动机、整流桥、平波电抗器、斩波单元、逆变器、逆变变压器等部分组成。为了研究和分析SVPWM算法在串级调速系统中应用的可行性,利用MATLAB/SIMULINK中的powersystem和Simulink模块库,为此系统建立了仿真模型,由电机测量模块可以直接检测出电机的各输出物理量。仿真结果如图5所示。

本文根据空间电压矢量PWM技术的基本原理,对SVPWM算法进行了详细阐述,并用MATLAB7.1的SIMULINK对SVPWM算法进行了仿真,得到较为理想的结果,最后建立了基于SVPWM算法的串级调速系统仿真模型,结果表明该算法在串级调速系统中的可行性,为优化串级调速系统的数字化设计打下了良好的基础。

参考文献

- [1] 杨贵杰,孙力.空间矢量脉宽调制方法的研究[J].中国电机工程学报, 2001, 21(5).
- [2] 江锡津.应用空间向量脉宽调变技术之数位式高功率单相/三相电力转换器[D].国立云林科技大学电机工程系, 1992.
- [3] 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, 4(2): 105-106.
- [4] BIMAL K.现代电力电子学与交流传动[M].北京:机械工业出版社, 2004.

1.2.3 确定比较器的切换点

令 $T_a = T_s - T_1 - T_2/4, T_b = T_a + T_1/2, T_c = T_b + T_2/2$, 则不同扇区与 $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ 之间的对应关系如表3所示^[4]。

表3 矢量比较器切换点

扇区号	1	2	3	4	5	6
T_{cm1}	T_b	T_a	T_a	T_c	T_c	T_b
T_{cm2}	T_a	T_c	T_b	T_b	T_a	T_c
T_{cm3}	T_c	T_b	T_c	T_a	T_b	T_a

1.3 SVPWM 的实现

Matlab/Simulink 为了让用户能够迅速创建所需要的系统模型,提供了用以实现各种基本功能的大量标准模块,并根据其功能的不同将它们归类在不同的模块库中。利用这些模块库可以实现前面所分析的SVPWM算法。

SVPWM的模型框图如图4所示。其中包括扇区判

(收稿日期: 2009-03-20)