

SVPWM 调制异步电机矢量控制系统的原理与仿真

方俊初, 凌有铸

(安徽工程科技学院 电气工程系, 安徽 芜湖 241000)

摘要:在设计一个控制系统之前对系统进行仿真是很有必要的。本文介绍了采用SVPWM调制的矢量控制系统的原理,并在Matlab/Simulink环境下建立了系统的仿真模型,给出了仿真结果,并与采用电流滞环PWM调制的矢量控制系统的仿真结果进行对比,结果显示SVPWM在减小电磁转矩脉动方面具有明显的优势。

关键词: 矢量控制; 变频; SVPWM; 仿真

中图分类号: TM464 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-7241 (2006) 09-0054-03

Simulation of the Vector Control System With SVPWM for Asynchronous Motors

FANG Jun-chu, LING You-zhu

(Electrical Engineering Department Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China)

Abstract: The vector control system with SVPWM is introduced in the paper, and a system model is established for simulation in Matlab/Simulink. A comparison with the traditional PWM system is also given. As a result, SVPWM has a great advantage in decreasing the fluctuation of torque.

Keywords: Vector control; Inverter; SVPWM; Simulation

1 引言

和直流电动机相比,交流异步电动机结构简单,使用方便。但交流电动机是个多变量、非线性、强耦合的被控对象,采用参数重构和状态重构的矢量控制理论实现了异步电动机定子电流的励磁分量和转矩分量之间的解耦控制,将交流电动机的控制过程等效为直流电动机的控制过程,从而获得了能和直流电动机相媲美的控制性能。

和传统的SPWM(正弦脉宽调制)相比,SVPWM(电压空间矢量脉宽调制)具有如下优点:对系统中逆变器的直流母线电压利用率较前者提高了15%左右;开关损耗较前者小^[1];电动机转速脉动及电流畸变较前者减小;便于实现数字化控制。

本文在理论分析的基础上,应用Matlab/Simulink构建了基于SVPWM的异步电机矢量控制系统的仿真模型,并验证理论分析的结论。

2 矢量控制基本控制方程的导出

按转子磁链定向的三相异步电机在同步旋转坐标系上的数学模型,如式(1-1)

$$\begin{bmatrix} u_{sM} \\ u_{sT} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -w_s L_s & L_m p & -w_s L_s \\ w_s L_s & R_s + L_s p & w_s L_m & L_m p \\ L_m p & -\Delta w L_m & R_r + L_r p & -\Delta w L_r \\ \Delta w L_m & L_m p & \Delta w L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sM} \\ i_{sT} \\ i_{rM} \\ i_{rT} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$T_e = n_p L_m (i_{sT} i_{rM} - i_{sM} i_{rT}) = n_p \frac{L_m}{L_r} j_r i_{sT}$$

其中: R_s 、 R_r --- 定子、转子电阻

L_s 、 L_r 、 L_m --- 定子、转子电感及定转子之间的互感

n_p --- 极对数 p --- 微分算子 --- 转差角速度

--- 转子磁链

由式(1-1)及磁场和电流的关系可得到如下控制方程式

$$i_{sM} = \frac{T_r p + 1}{L_m} y_r \quad (1-2)$$

$$i_{sT} = \frac{T_s y_r + 1}{L_m} \Delta w \quad (1-3)$$

其中 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 为转子电路的时间常数。这样,通过 i_{sM} 即可控制转子磁链,当 i_{sM} 恒定时,通过 i_{sT} 即可控制电动机的转速和转矩。

收稿日期: 2006-04-03

3 SVPWM基本原理^{[4][5]}

图1为典型的逆变器结构图,假定晶体管导通为1,截止为0,图中的功率晶体管的开关状态(000-111)一共有8个,对应得到8个空间电压矢量,其中(000)和(111)为零矢量。每一个空间矢量幅值都是 $2V_{DC}/3$,如图2所示。SVPWM调制就是用这六个有效空间矢量和两个零矢量的组合去等效旋转参考矢量 U_{ref} ,使电机磁通轨迹逼近圆形。

也就是说,在任意小的周期时间 T 里面,使得逆变器的输出跟参考电压 U_{ref} 的平均输出一样,如等式(2-1)所示。

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{ref}(t) dt = \frac{1}{T} (T_1 U_X + T_2 U_{X \pm 60}) \quad (2-1)$$

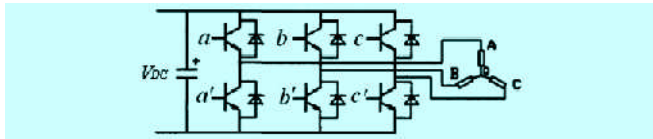


图1 逆变器结构原理图

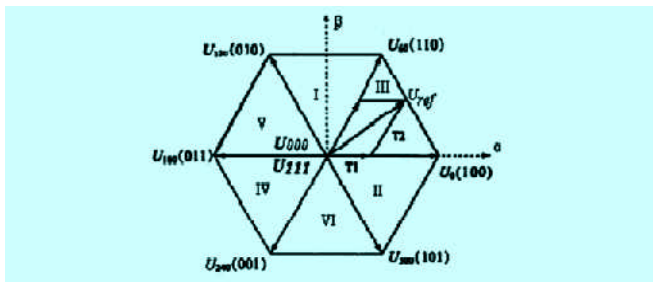


图2 空间矢量及开关状态图

这里的 T_1 、 T_2 分别为 U_X 和 $U_{X \pm 60}$ 的作用时间,如果 T 足够小,式(2-1)可以写成式(2-2)的形式

$$U_{ref}(nT) = \frac{1}{T} (T_1 U_X + T_2 U_{X \pm 60}) \quad (2-2)$$

从(2-2)式可见,如果 T 足够小,就可以保证逆变器输出能实时跟踪 U_{ref} 的变化。由于 T_1 、 T_2 的和可能小于 T ,此时要用零矢量来补充一周期中剩余的时间。那么式(2-2)应写成(2-3)

$$T * U_{ref}(nT) = T_1 U_X + T_2 U_{X \pm 60} + T_0 * U_{000} \text{ (或 } U_{111}) \quad (2-3)$$

其中 T_0 为零矢量 U_{000} 或 U_{111} 的作用时间。值得一提的是,零矢量作用的时间里,磁链矢量的末端是静止的,从而改变了磁链的旋转频率,因此实现了变频。

4 仿真模型的建立

4.1 SVPWM的算法实现^{[2][3][6][7]}

4.1.1 判断 U_{ref} 所在的扇区

六个空间矢量将图2分为六个扇区,分别给出一个扇区号,如图中所示的I~VI,只有知道了 U_{ref} 所在的扇区,才能知道用哪两个相邻的矢量去合成 U_{ref} ,在 $\alpha-\beta$ 坐标系中 U_{ref} 是以 U_{ref} 、 U_{ref} 的形式给出的,我们可按如下方法确定 U_{ref} 所在扇区,设:

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= U_{refb} \\ B_1 &= \sin 60^\circ U_{refa} - \sin 30^\circ U_{refb} \\ B_2 &= -\sin 60^\circ U_{refa} - \sin 30^\circ U_{refb} \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

再用下式计算 P 的值

$$P = 4 \text{sign}(B_2) + 2 \text{sign}(B_1) + \text{sign}(B_0) \quad (3-2)$$

最后,通过查表1确定扇区号

表1 P 值与扇区号的对应关系

| P | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|---|---|---|---|---|---|
| 扇区号 n | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 |

在Matlab/Simulink中实现如图3-1所示:

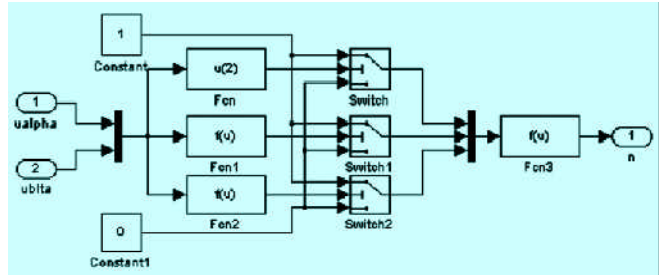


图3 确定扇区号

4.1.2 确定两相邻矢量的作用时间 T_1 、 T_2

$$\left. \begin{aligned} X &= \sqrt{3} U_{refb} T / V_{DC} \\ \text{设: } Y &= (\frac{\sqrt{3}}{2} U_{refb} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{refa}) T / V_{DC} \\ Z &= (\frac{\sqrt{3}}{2} U_{refb} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{refa}) T / V_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

| 扇区号 n | I | II | III | IV | V | VI |
|---------|---|----|-----|----|----|----|
| T_1 | Z | Y | -Z | -X | X | -Y |
| T_2 | Y | -X | X | Z | -Y | -Z |

表2 T_1 、 T_2 赋值表

对应不同的扇区,按表2给 T_1 、 T_2 赋值

其中 T_1 为前一矢量作用时间, T_2 为后一矢量作用时间。如果

果 $T_1 + T_2 > T$,则

$$T_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} T \quad T_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} T \quad (3-4)$$

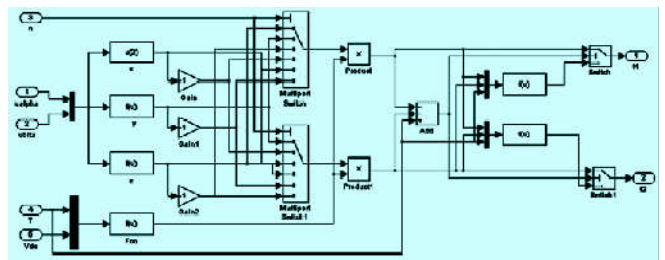


图4 确定 T_1 、 T_2

在Matlab/Simulink中实现如图4所示:

4.1.3 确定矢量切换点 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3}

$$\left. \begin{aligned} \text{设: } T_a &= (T - T_1 - T_2) / 4 \\ T_b &= T_a + T_1 / 4 \\ T_c &= T_b + T_2 / 4 \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

对应不同的扇区,按表3确定 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3}

将三角波周期 T_i 作为定时周期,与切换点 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3}

比较,即可调制出SVPWM波。

将以上各模块综合起来,组成SVPWM子系统,并封装。见图5中的SVPWM模块。

表3 开关切换时间表

| 比较器切换点 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| Tcm1 | Tb | Ta | Ta | Tc | Tc | Tb |
| Tcm2 | Ta | Tc | Tb | Tb | Ta | Tc |
| Tcm3 | Tc | Tb | Tc | Ta | Tb | Ta |

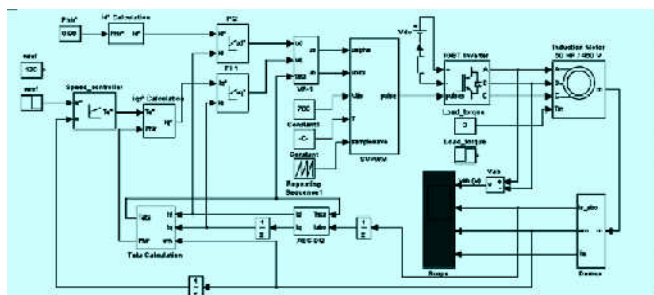


图5 SVPWM调制的转差型矢量控制系统模型

4.2 系统模型的建立

基于转差型的异步电机矢量控制系统的仿真模型的外环是转速闭环控制,通过速度调节器得到同步坐标系(M-T)上的直流电压控制量 U_{SM}^* 、 U_{ST}^* ,再经过Park反变换得到静止坐标系(-)上的两相交流控制量 U_s^* 、 U_s^* ,由此两相正弦电压产生SVPWM波,驱动三相异步电机。建立的系统模型如图5所示。其中三相异步电机模型和逆变器模型直接选自Simulink中的Simpower模块库。其他模块包括Park变换及反变换,Clark变换及反变换,转子磁链估算模块(Teta Calculation),这些模块都进行了封装,使用非常方便。

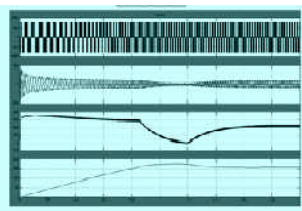


图6 采用SVPWM调制的矢量控制系统仿真结果

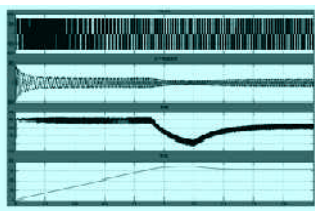


图7 采用电流滞环PWM调制的矢量系统仿真结果

(上接第84页)

不同的逻辑关系计算才能得到A(原)波形。为了简单起见,保持B与A(改)能够始终进行单一逻辑计算,符合硬件电路的设计,可对波形作相应的延时处理。根据单片机汇编程序设计知识^[2],设计流程图如图9所示。

4 结束语

通过设计该转换电路,让进口包装机在不影响生产效率的前提下使用价廉的国产包装纸,从而大大降低了生产成本。该方案已在TBA-9型利乐无菌包装机上作了试验,结果表明,该方

5 仿真结果

仿真参数:三相异步电机额定电压460V,频率60Hz, $R_s=0.087$, $L_s=0.8mH$, $R_r=0.228$, $L_r=0.8mH$, $L_m=34.7mH$, $J=1.662kg \cdot m^2$ 。逆变器直流母线电压为780V,三角载波周期为0.0001秒。转速初始给定值为120rad/s,转子磁链给定值为0.95Wb。在 $t=0.4s$ 时将转速给定值调整为160rad/s,在 $t=1.2s$ 时,给电机施加一个 $T_L=200N \cdot m$ 的扰动负载,仿真结果如图6所示,图7为同样条件下采用电流滞环PWM调制的矢量控制系统的仿真结果。图中自上而下分别为定子电压、定子三相电流、转矩和转速波形。由图可见,相比电流滞环PWM调制,SVPWM调制的电磁转矩脉动明显减小,从仿真过程来看,三相定子电流的脉动也较电流滞环PWM要小得多。

6 小结

本文给合理理论分析,在Matlab/Simulink环境下建立了采用SVPWM调制的矢量控制系统结构,仿真结果显示效果良好,完全符合电机控制要求。通过仿真模型的建立过程加深了对矢量控制系统的原理和结构的理解,其中的算法可以直接采用数字信号处理器实现,为下一步采用DSP实现电机数字化控制奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 李传海,等.空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术特点及其优化方法[J].山东大学学报.2005.(4):27-31.
- [2] 王晓明,王玲.电动机的DSP控制(TI公司DSP应用)[M].北京:北京航空航天大学出版社.2004.
- [3] 田亚菲,何继爱,等.电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法仿真实现及分析[J].电力系统及其自动化学报.2004(4):68-71.
- [4] 李永东.交流电机数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [5] 李华德.交流调速控制系统[M].北京:电子工业出版社.2003,3.

作者简介:方俊初(1974-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子技术及现代电力传动控制。

案可行。如何能在其它型号的机器上也可以实现运行,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 康华光.电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,1999
- [2] 胡汉才.单片机原理及其接口技术[M].北京:清华大学出版社,2004.

作者简介:陈森(1981-),男,江苏徐州中国矿业大学控制理论与控制工程专业,研究方向:计算机控制技术。