

doi: 10.7690/bgzdh.2013.02.016

# 基于 Simulink/Powerlib 交流异步电机矢量控制的仿真

付绍昌, 刘金花

(华菱安赛乐米塔尔汽车板电工钢项目建设指挥部, 湖南 娄底 417009)

**摘要:** 为了实现交流异步电机矢量控制, 建立在  $M$ 、 $T$  旋转坐标系中的双轴等效电机模型和矢量控制数学模型。根据数学模型, 在 Matlab/Simulink 中设计带转矩和电流内环的转速、磁链闭环矢量控制仿真模型。仿真结果表明, 该模型具有较好的静、动态性能。

**关键词:** 交流异步电机; 矢量控制; 电力系统模块库  
**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Simulation of Vector Control of AC Asynchronous Motor Based on Simulink/Powerlib

Fu Shaochang, Liu Jinhua

(VAMA & VAME Project Construction Implementation Center, Loudi 417009, China)

**Abstract:** In order to realize vector control of AC asynchronous motor, the biaxial equivalent model of motor and the mathematical model of vector control are established based on  $M, T$  rotating coordinate system. According to the mathematical model, the simulation model of speed and flux closed-loop vector control with torque and current inner loop control was designed in Matlab/Simulink. The results show that the model has excellent static and dynamic performance.

**Key words:** AC asynchronous motor; vector control; power system module base

### 0 引言

近年来, 随着电力电子和电力传动技术的飞速发展及交流电机具有结构简单、维护方便、高容量、高效率等优点, 特别是大规模集成电路和计算机控制技术的发展, 高性能交流调速系统应运而生, 使交流变频和调速系统的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。但由于交流电机的模型是一个高价、非线性、强耦合的多变量系统<sup>[2]</sup>以及电力传动系统的复杂性, 使得对它的建模与仿真一直是研究的热点。

目前, Matlab 逐渐发展成为一个集数值分析、图像处理、信号处理、数学建模、动态仿真等为一体的应用软件。电力系统模块库 (powerlib 或 simpower systems) 是 Matlab/Simulink 中专用于电力电子电路、电力传动和电力系统仿真的模块库; 笔者首先通过数学方法在  $M$ 、 $T$  坐标系下建立交流异步电机数学模型, 然后利用电力系统模块库建立带转矩和电流内环的转速、磁链闭环电流型交流异步电机矢量控制仿真模型, 并进行仿真分析。

### 1 交流异步电机矢量控制系统数学模型

#### 1.1 交流异步电机模型

根据交流电机统一理论, 可以把实际电机等效

成一个理想化的两极电机<sup>[3]</sup>。图 1(a)是三相交流异步电机在  $ABC$  坐标系中的基本电机模型。其中定子三相对称绕组分别用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  表示, 转子三相对称绕组分别用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示, 定子  $A$  相与转子  $a$  相绕组轴线间的夹角为  $\theta_r$ , 定子绕组静止不动, 转子绕组随转子以电角速度  $\omega_r$  逆时针旋转。图 1(b)是交流异步电机在  $M$ 、 $T$  旋转坐标系中等效的双轴电机模型。其中  $M$  为励磁分量坐标,  $T$  为转矩分量坐标, 定子两相绕组分别用  $M_1$  和  $T_1$  表示, 转子两相绕组分别用  $M_2$  和  $T_2$  表示,  $M$ 、 $T$  坐标轴以同步电角速度  $\omega_1$  逆时针旋转。

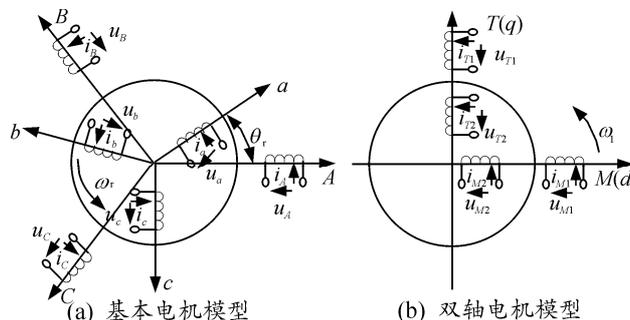


图 1 交流异步电机模型

#### 1.2 三相 $ABC$ 坐标系与 $M$ 、 $T$ 坐标系的变换关系

图 2 为按图 1 交流异步电机模型绘制的转子磁

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-09-01

作者简介: 付绍昌(1972—), 男, 湖南人, 硕士, 工程师, 从事电力电子与电力传动、智能控制、工业自动化控制研究。

链定向的矢量图<sup>[4]</sup>。图中  $\theta_1$ 、 $\omega_1$  为定子 A 轴与 M 轴的夹角和相对角速度； $\theta_2$ 、 $\omega_2$  为转子 a 轴与 M 轴的夹角和相对角速度； $\theta_r$ 、 $\omega_r$  为转子 a 轴与定子 A 轴的夹角和相对角速度； $\theta_3$ 、 $\gamma$  分别为定子合成电流  $i_1$  与 M 轴和 A 轴的夹角。

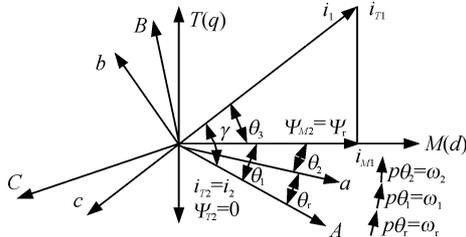


图 2 交流异步电机 M、T 系统矢量

根据图 2，按变换前后功率和磁动势相等的原则，可建立三相 ABC 坐标系和 M、T 坐标系电压、电流、磁动势之间的变换关系。设  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  为三相绕组的电流， $i_M$ 、 $i_T$  为两相绕组的电流， $\theta$  三相绕组和两相绕组的夹角，它们间的变换关系为：

$$\begin{bmatrix} i_M \\ i_T \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中， $i_0$  为零序分量。

### 1.3 按转子磁链定向 M、T 坐标系的数学模型

如图 2 所示，根据转子磁链定向原理，M 轴的取向与转子磁链  $\Psi_r(\Psi_{M2})$  方向一致，在 T 轴向转子磁链分量  $\Psi_{T2}$  为零。在 M、T 坐标系中可以建立定子和转子电压、磁链方程及转矩方程<sup>[4]</sup>。

M、T 坐标系下定子电压方程：

$$\begin{cases} u_{M1} = r_1 i_{M1} + p \Psi_{M1} - \Psi_{T1} \omega_1 \\ u_{T1} = r_1 i_{T1} + p \Psi_{T1} + \Psi_{M1} \omega_1 \end{cases} \quad (3)$$

M、T 坐标系下转子电压方程：

$$\begin{cases} u_{M2} = r_2 i_{M2} + p \Psi_{M2} - \Psi_{T2} \omega_2 = r_2 i_{M2} + p \Psi_r = 0 \\ u_{T2} = r_2 i_{T2} + p \Psi_{T2} + \Psi_{M2} \omega_2 = r_2 i_{T2} + \Psi_r \omega_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

M、T 坐标系下定子磁链方程：

$$\begin{cases} \Psi_{M1} = L_s i_{M1} + L_m i_{M2} \\ \Psi_{T1} = L_s i_{T1} + L_m i_{T2} \end{cases} \quad (5)$$

M、T 坐标系下转子磁链方程：

$$\begin{cases} \Psi_{M2} = L_r i_{M2} + L_m i_{M1} = \Psi_r \\ \Psi_{T2} = L_r i_{T2} + L_m i_{T1} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

两相旋转 M、T 坐标系磁链方程代入后的电压方程：

$$\begin{bmatrix} u_{M1} \\ u_{T1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_s & -\omega_1 L_s & pL_m & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & r_1 + pL_s & \omega_1 L_m & pL_m \\ pL_m & 0 & r_2 + pL_r & 0 \\ \omega_2 L_m & 0 & \omega_2 L_r & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{M1} \\ i_{T1} \\ i_{M2} \\ i_{T2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

M、T 坐标系下电磁转矩方程

$$T_e = -n_p i_{T2} \Psi_r = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{T1} \Psi_r \quad (8)$$

转子运动方程

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (9)$$

式中： $u_{M1}$ 、 $u_{T1}$ 、 $i_{M1}$ 、 $i_{T1}$ 、 $\Psi_{M1}$ 、 $\Psi_{T1}$  为 M、T 系统中的定子电压、电流和磁链； $u_{M2}$ 、 $u_{T2}$ 、 $i_{M2}$ 、 $i_{T2}$ 、 $\Psi_{M2}$ 、 $\Psi_{T2}$  为 M、T 系统中的转子电压、电流和磁链； $r_1$ 、 $r_2$  为定子和转子(折算后的)电阻； $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  为定子自感、转子自感和定子与转子的互感； $T_e$ 、 $T_L$  为电磁转矩和负载转矩； $J$  为转动惯量； $n_p$  为电机磁极对数； $p$  为微分算子。

## 2 交流异步电机矢量控制系统仿真

### 2.1 电力系统模块库 (SimPowerSystems) 简介

SimPowerSystems 库是 Simulink 下的一个专用模块库，是在 Simulink 环境下进行电力、电子系统建模和仿真的先进工具。电力系统模块库包含电源模块库 (Electrical Sources)、电器元件模块库 (Elements)、电机模块库 (Machines)、电力电子元件模块库 (Power Electronics)、测量仪器模块库 (Measurements)、其他电气模块库 (Extra Library) 和 PowerGui 等。

### 2.2 交流异步电机闭环矢量控制仿真模型

图 3 为带转矩和电流内环带转速、磁链闭环的矢量控制仿真模型。图中 ASR 为速度调节器，ATR 为转矩调节器，AΨR 为磁通调节器，iMR 为励磁电流调节器，iTR 为转矩电流调节器，ΨF 为磁通函数发生器。转子磁链观测器 ΨrO 计算出  $\Psi_r$ 、 $T_e$ 、 $\theta_1$ 、 $i_{M1}$  和  $i_{T1}$ ，并用于相应的控制回路。矢量变换器 VC 按公式 (2) 通过逆旋转变换得到定子三相电流给定值，由电流滞环 PWM 脉冲发生器触发逆变器。图 4 为交流异步电机开环 SPWM 仿真模型。

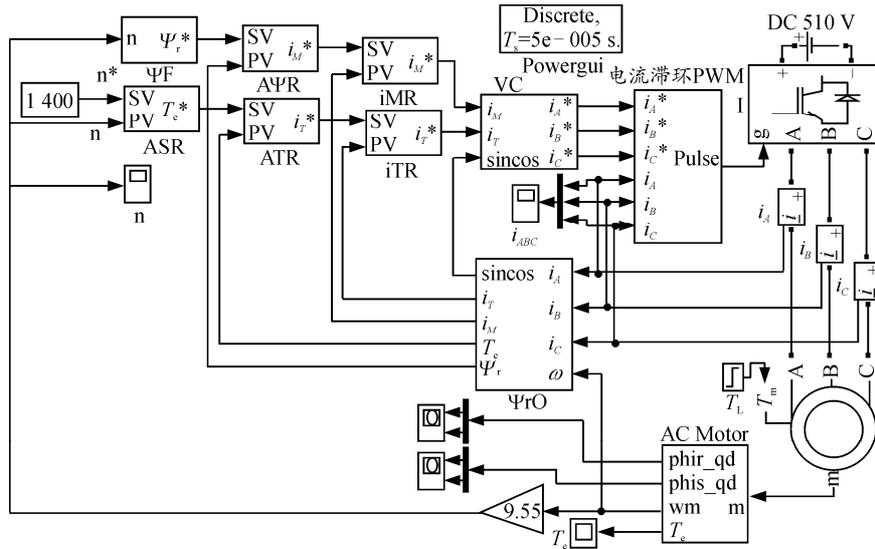


图 3 交流异步电机闭环矢量控制仿真模型

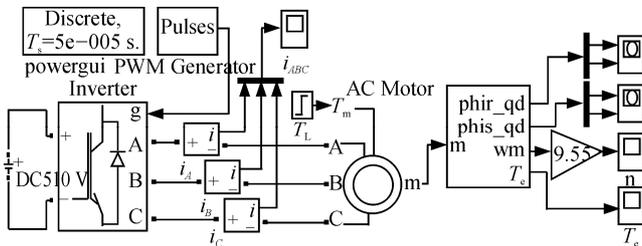


图 4 交流异步电机开环 SPWM 仿真模型

2.2.1 PI 调节器模块

速度调节器 ASR、转矩调节器 ATR、磁通调节器 AΨR、励磁电流调节器 iMR 和转矩电流调节器 iTR 均采用带输出限幅的 PI 调节器<sup>[5]</sup>, 如图 5 所示。其中 SV 为输入设定值, PV 为反馈值或计算值, K<sub>p</sub> 为比例系数, K<sub>i</sub> 为积分系数。

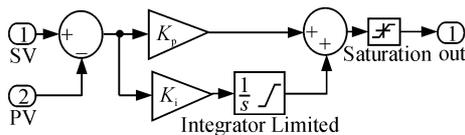


图 5 PI 调节器模块

2.2.2 转子磁链 Ψ<sub>r</sub> 观测器

本仿真转子磁链 Ψ<sub>r</sub> 观测器采用按转子磁链定向二相旋转坐标系上的转子磁链电流模型<sup>[5]</sup>。转子磁链 Ψ<sub>r</sub> 观测器通过检测定子三相电流和转子转速 ω<sub>r</sub> 计算转子磁链。如图 6, 三相定子电流按坐标变换公式 (1) 实现从三相定子静止坐标到两相旋转坐标的电流变换, 得到励磁分量 i<sub>M1</sub> 和转矩分量 i<sub>T1</sub>。根据公式 (10)、公式 (11) 和公式 (12) 可计算出转子磁链 Ψ<sub>r</sub> 和三相定子静止坐标与两相同步旋转坐标之间的夹角 θ<sub>1</sub>。在图 6 中计算电机转差 ω<sub>2</sub> 时, 公式 (11) 分母加很小的数以避免 Ψ<sub>r</sub> 为零的情况。

同时根据公式 (13) 可计算出交流电机的电磁转矩。

$$\Psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{M1} \quad (10)$$

$$\omega_2 = \frac{L_m i_{T1}}{T_r \Psi_r} = \omega_1 - \omega_r \quad (11)$$

$$\theta_1 = \int \omega_1 dt = \int (\omega_2 + \omega_r) dt \quad (12)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{T1} \Psi_r \quad (13)$$

式中: T<sub>r</sub>=L<sub>r</sub>/r<sub>2</sub> 为转子电磁时间常数。

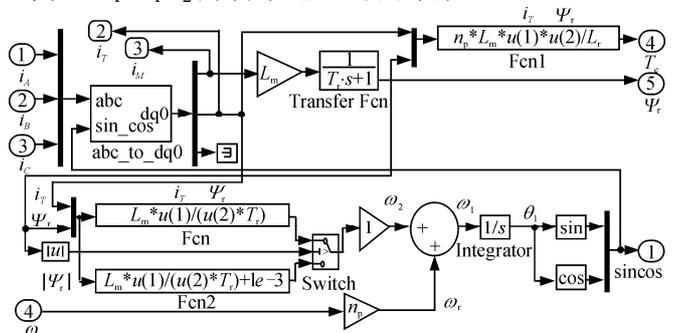


图 6 转子磁链 Ψ<sub>r</sub> 观测器

2.2.3 电流滞环 PWM 脉冲发生器模块

电流滞环 PWM 脉冲发生器将给定电流和反馈电流进行比较, 当电流偏差超过滞环控制器的环宽时, 切换逆变器开关状态<sup>[1,5]</sup>, 如图 7 所示。

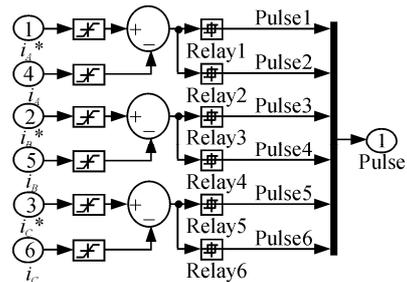


图 7 电流滞环 PWM 脉冲发生器模块

### 3 仿真研究

#### 3.1 仿真参数设置

电机参数设定为：额定线电压  $U_N=380\text{ V}$ ；频率  $f_N=50\text{ Hz}$ ；极对数  $n_p=2$ ；定子电阻  $r_1=0.435\ \Omega$ ；转子电阻  $r_2=0.816\ \Omega$ ；转动惯量  $J=0.19\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；定子和转子漏感  $L_{ls}=L_{lr}=0.002\text{ H}$ ；定子、转子互感  $L_m=0.069\text{ H}$ 。给定转速  $1\ 400\text{ r/min}$ ，空载起动，在  $0.6\text{ s}$  时负载转矩加载  $80\text{ N}\cdot\text{m}$ 。开环 SPWM 控制系统载波频率  $3\ 000\text{ Hz}$ ，调制波为  $50\text{ Hz}$ ，调制度为  $0.85$ 。逆变器直流电压  $U_{DC}$  均为  $510\text{ V}$ 。

#### 3.2 仿真结果及分析

比较图 8 和图 9 转速曲线可见，闭环矢量控制系统空载起动转速上升平稳，在突加负载时转速能迅速恢复到设定值。比较图 10 和图 11 定子三相电流曲线可见，闭环矢量控制系统在起动过程中定子三相电流峰值保持平稳，转矩逐渐增加；开环 SPWM 启动时三相定子电流峰值达到闭环的 2 倍，起动电流波动非常大。在突加负载时，闭环控制电流和转矩能快速响应使转速保持不变。比较图 12 和图 13 磁链轨迹可见，闭环矢量控制系统在起动阶段磁场建立过程比较平滑，磁链呈螺旋形增加，磁链轨迹接近圆形；开环 SPWM 启动时磁链轨迹波动较大，稳定后磁链轨迹形状介于圆形和正六边形之间。

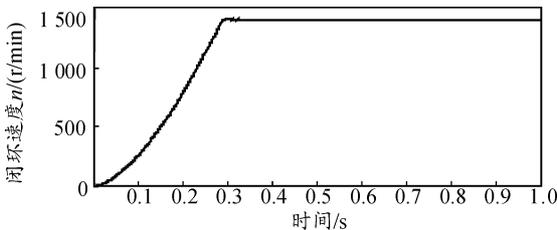


图 8 闭环转速曲线

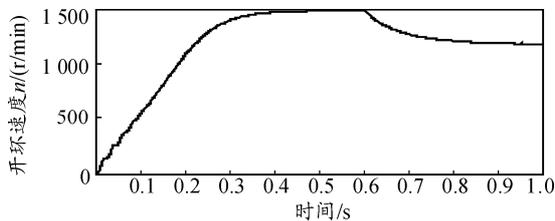


图 9 开环转速曲线

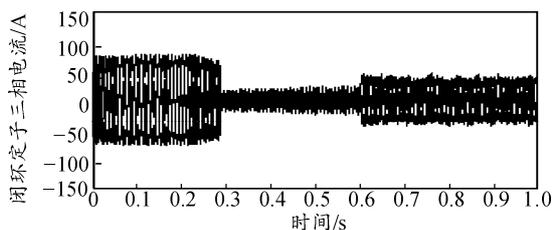


图 10 闭环定子三相电流曲线

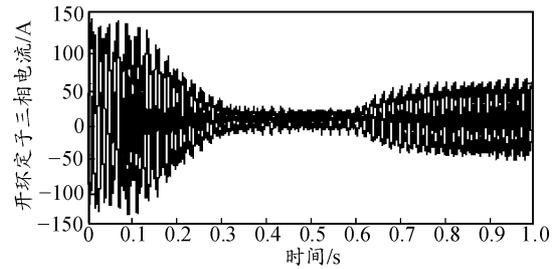
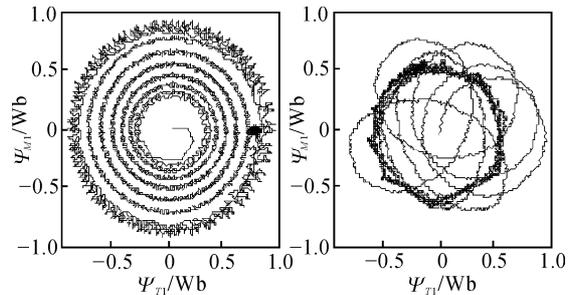
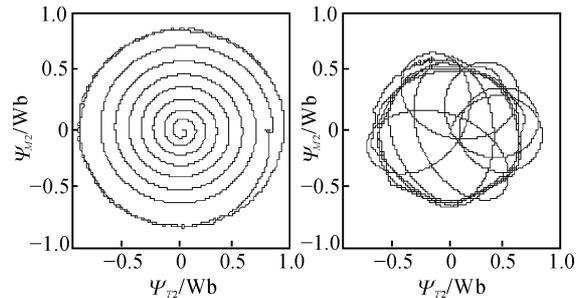


图 11 开环定子三相电流曲线



(a) 闭环定子磁链轨迹 (b) 开环定子磁链轨迹

图 12 定子磁链轨迹



(a) 闭环转子磁链轨迹 (b) 开环转子磁链轨迹

图 13 转子磁链轨迹

### 4 结束语

仿真结果表明，带转矩和电流内环的转速、磁链闭环交流异步电机矢量控制系统具有优良的起动性能，宽调速范围等静、动态性能。但由于仿真是建立在理想数学模型的基础上，实际参数的扰动将影响模型的精度和鲁棒性。因此在实际应用中需要用参数辨识、自适应控制、智能控制等方法来进一步提高控制系统的鲁棒性。

### 参考文献：

- [1] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 1-1, 145-150.
- [2] 张森, 石航飞, 陈志锦, 等. 基于 DSP 的永磁同步电机的矢量控制[J]. 兵工自动化, 30(10): 71-74.
- [3] B.阿德金斯, R.G. 哈利. 交流电机统一理论—在实际问题上的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 1-13.
- [4] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 40-85.
- [5] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 191-202.