

# 感应电机矢量控制系统的仿真研究

张伟<sup>1</sup> 余莉<sup>1</sup> 鲁晨<sup>2</sup>

## 摘要

根据感应电机矢量控制的基本原理,在分析异步电机数学模型的基础上,采用电流滞环型 PWM 调速系统,基于 Matlab/Simulink 构建了感应电机在 MT 坐标系下的仿真模型.通过稳态和动态仿真实验验证了模型的有效性和合理性,所建模型动态性能良好,具有响应快、超调量小、抗干扰能力强等特点.

## 关键词

感应电机; 矢量控制; Simulink; PWM; 仿真

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

## 0 引言

### Introduction

1971 年由德国人 Blaschke 提出的矢量控制理论,在现代电气传动领域得到了广泛的应用,并成为以交流电动机作为控制对象的交流变频调速系统的主流<sup>[1-2]</sup>. 矢量控制技术根据磁动势等效原则,应用坐标变换将三相系统等效为二相系统,经过按磁场定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而达到对交流电机的磁链和电流分别控制的目的<sup>[3]</sup>. 这样就可以将一台三相异步电机等效为直流电机来控制,从而获得了与直流调速系统同样的静、动态性能. 本文借助于 Matlab/Simulink 的功能元件,将交流感应控制系统的功能单元模块化,介绍一种感应电机按转子磁场定向的矢量控制系统的建模仿真方法,利用仿真模型,进行控制系统的仿真实验.

## 1 感应电机矢量控制系统的数学模型<sup>[4-7]</sup>

### Mathematical model of vector control system of induction motors<sup>[4-7]</sup>

感应电机的矢量变化控制是要把交流电机模拟成直流电机,需要通过坐标变换的方法推导出感应电机在按转子磁场定向旋转坐标上的数学模型和转矩控制方程式. 本文采用的是一种具有直轴和交轴绕组的原形电机,并认为各类电机都可通过变换等效成原形电机,从而形成双轴理论. 二级原型电机如图 1 所示,其各绕组电压方程如式(1)所示.

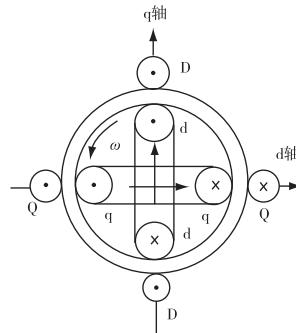


图 1 二级原型电机

Fig. 1 Archetypal motor

收稿日期 2010-01-25

资助项目 江苏省高校自然科学基金(08KJ-470001);南京信息工程大学科研基金(09-JY0031)

## 作者简介

张伟,女,博士生,讲师,主要研究方向为电力系统分析与控制. nuistzhangwei@163.com

1 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京, 210044

2 巴黎高科大学,巴黎 法国

$$\begin{cases} U_d = R_d i_d + U_{Ud}, \\ U_Q = R_Q i_Q + U_{UQ}, \\ U_d = R_d i_d + U_{Ud} + U_{sd}, \\ U_q = R_q i_q + U_{Uq} + U_{sq}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $U_d, U_Q, U_d, U_q$  为电源电压;  $U_{Ud}, U_{UQ}, U_{Ud}, U_{Uq}$  为变压器电压;  $U_{sd}, U_{sq}$  为转子直轴绕组和交轴绕组中产生的速度电压. 它的定、转子分别是由直轴绕组和交轴绕组组成, 在双轴理论中忽略磁路饱和, 谐波以及铁损的影响, 可推导出原形电机的电压方程式为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_Q \\ U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_{dd}p & 0 & L_{dQ}p & 0 \\ 0 & R_Q + L_{QQ}p & 0 & L_{Qd} \\ L_{dQ}p & \omega L_{dQ} & R_d + L_{dd}p & \omega L_{dQ} \\ -\omega L_{dQ} & L_{dQ}p & -\omega L_{dQ} & R_q + L_{qq}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_Q \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.1 MT 旋转坐标系上的感应电机及其电压方程

应用双轴理论和原形电机电压方程式, 将三相异步电动机用等效的两相异步电动机代替, 即将三相电动机的定转子绕组都等效到  $\alpha\beta$  坐标系, 它和原形电动机绕组的对应关系为

$$\begin{aligned} D \rightarrow \alpha_1, Q \rightarrow \beta_1, d \rightarrow \alpha_2, q \rightarrow \beta_2, L_{DD} = L_{QQ} = L_s, \\ L_{Dd} = L_{Qq} = L_m, L_{dd} = L_{qq} = L_r, \end{aligned}$$

则由式(2)可得到  $\alpha\beta$  坐标系下描述的异步电动机的数学模型为

$$\begin{bmatrix} U_{\alpha 1} \\ U_{\beta 1} \\ U_{\alpha 2} \\ U_{\beta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_1 + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega L_m & R_2 + L_r p & \omega L_r \\ -\omega L_m & L_m p & -\omega L_r & R_2 + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \\ i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于  $\alpha\beta$  轴坐标是静止的, 而 MT 轴坐标以同步角速度  $\omega_1$  旋转, 它与定子绕组相对角速度为  $\omega_1$  与转子绕组之间相对角速度为  $\omega_s$  (即转差角速度). 设  $M$  轴为沿磁场方向的轴,  $T$  轴为与磁场方向正交的轴. 因而  $M$  轴与  $\alpha$  轴的夹角为  $\theta = \omega_1 t + \theta_0$ ,  $\theta_0$  是任意初始角, 利用矢量旋转变换将  $\alpha\beta$  坐标系中各量变换到 MT 坐标系下. 经过化简最终得到矢量变换控制所依据的感应电机数学模型为

$$\begin{bmatrix} U_{m1} \\ U_{t1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_s p & -\omega_1 L_s & L_m p & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & R_1 + L_s p & \omega_1 L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_2 + L_r p & 0 \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_r & R_2 + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m1} \\ i_{t1} \\ i_{m2} \\ i_{t2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 1.2 滞环型 PWM 变频器仿真

脉宽调制(也称为 PWM)控制技术就是利用高性能大容量的新型电自开关的导通与关断把直流电

压变成脉冲序列, 并通过控制电压脉冲宽度或周期以达到变频目的的一种控制技术. 最常用的 PWM 技术是正弦 PWM 技术. 在仿真中 PWM 实行的是电流控制, 由控制电路或微型机产生给定频率和幅值的正弦电流参考信号  $i_{ref}$ , 与实际相电流检测电流信号  $i_s$  相比较, 其偏差经过具有滞环特性的高增益放大器, 即滞环比较器 DHC, 控制逆变器该相上下 2 个桥臂电力晶体管的通或断.

仿真中采用滞环型 PWM 逆变器是由 3 个单相半桥电路组成. 其中, 环宽对跟踪的性能有比较大的影响: 环宽太宽时, 跟踪误差增大, 开关频率降低; 环宽太窄时, 跟踪误差减小, 开关频率太高, 甚至会超过晶体管的允许频率. 鉴于这些考虑, 在这个系统中,  $\Delta i_{max}$  取为 0.1, 由此得出电流滞环型逆变器在 Simulink 中的仿真模型如图 2 所示, 图 2 中输入  $i_a^*, i_b^*, i_c^*$  是三相定子电流的给定值; 输入  $i_a, i_b, i_c$  是三相定子电流的实际值; 输出  $U_a, U_b, U_c$  是送入电动机的三相定子脉冲电压.

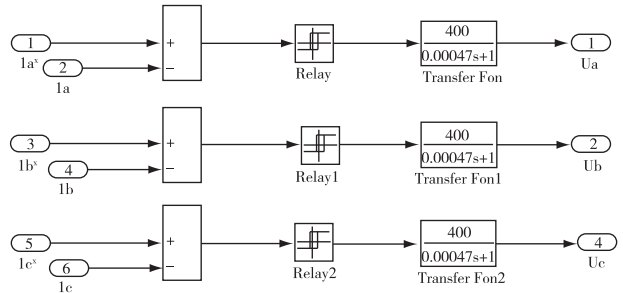


图 2 电流滞环型逆变器仿真模型

Fig. 2 Simulation model of hysteresis current inverter

### 1.3 感应电机仿真模型

由式(4)可得到异步电动机的仿真模型, 其在 Simulink 中的仿真图形如图 3 所示. 其中的  $U/I$  环节是电压-电流变换环节,  $U/I$  环节避开对转子磁链的求导运算, 而求导环节对噪声信号极其敏感, 不利于仿真模型的稳定, 所以本仿真模型有较强的稳定性. 通过对上述数学模型做一些变换, 可求得许多有关感应电机的物理量, 因此能很方便地研究感应电机及其控制系统的稳态和动态过程.

## 2 仿真实例及分析

### Simulation and analysis

为了验证仿真模型的正确性, 本文采用了北京电机总厂生产的 3KW4 及 Y 系列三相异步电动机来

进行稳态和动态的仿真验证. 电机实测参数分别为功率:3 kW, 极对数:2, 转速:1 420 r/min, 转矩:21.45 N·m, 定子电流:6.8 A, 转子电流:3.27 A, 定子电阻:1.898 Ω, 转子电阻:1.45 Ω, 定子自感:196 mH, 转子自感:196 mH, 互感:187 mH, 转动惯量:0.006 7 kg·m<sup>2</sup>.

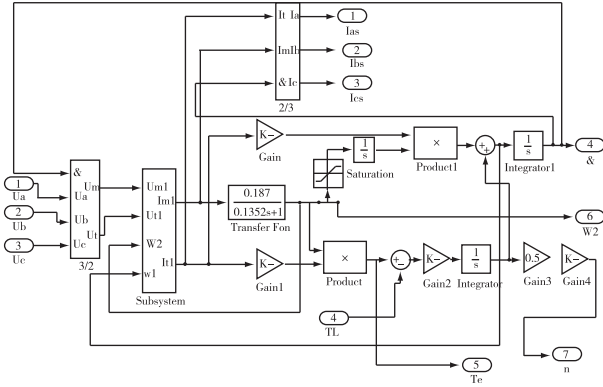


图3 仿真模型  
Fig. 3 Simulation model

2.1 稳态仿真

给图3所示仿真模型中的电机定子施加380 V/50 Hz的额定电压,并预先施加励磁信号,带10 N·m的负载直接从静止启动,进入稳态后的电机的转子磁链,电磁转矩以及转子转速的仿真曲线如图4所示.

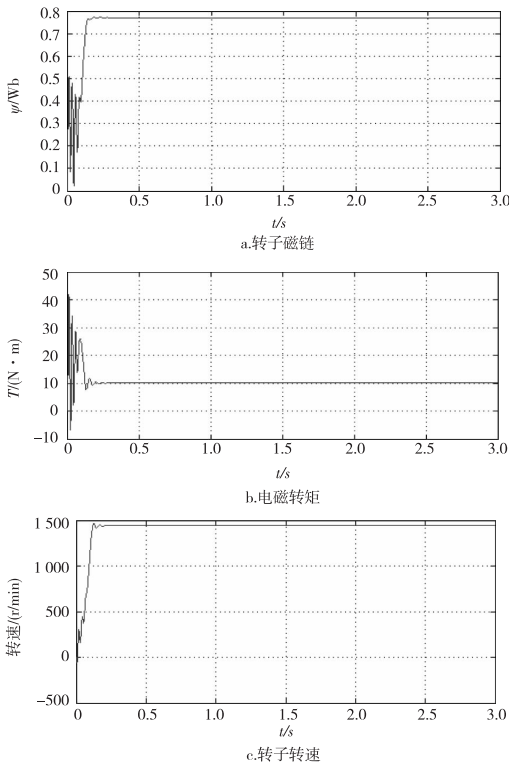


图4 稳态电机仿真曲线  
Fig. 4 Simulation graph of steady state

由图4可以看出,电机进行全压启动时,在0.2 s内的速度、转矩等瞬态值基本趋于稳定而进入了稳态过程,这说明了电机启动性能好,电机很快完成全压启动.在额定负载下,实际转速比额定值高的原因是仿真模型中忽略了铁损及风阻等因素的影响.

2.2 动态仿真

给图3所示的仿真模型中的电机定子施加三相380 V/50 Hz的额定电压,预先施加励磁信号,空载直接启动,过1 s后突加10 N·m负载,过2 s后突加5 N·m负载,过3 s后突减10 N·m负载,总的转动惯量为0.009 kg·m<sup>2</sup>,电机动态过程仿真中各主要物理量的变化曲线如图5所示.

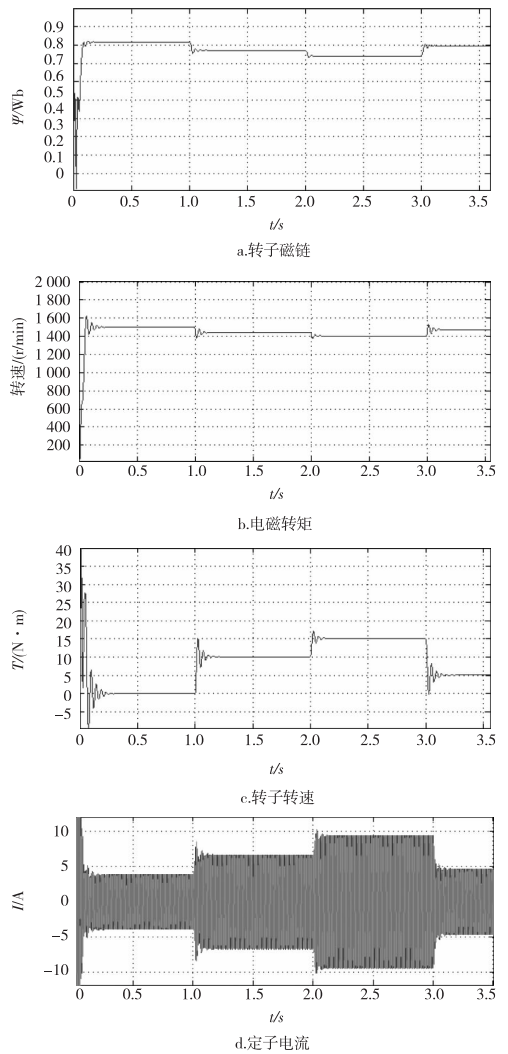


图5 动态电机仿真曲线  
Fig. 5 Simulation graph of dynamic state

由图5可以看出,感应电机进行空载启动时,

转子以同步转速进行运转. 随着负载增加, 转速有所降低, 转差率  $s$  增大, 这时转子电流增大, 以产生增大的电磁转矩与负载平衡. 随着负载减小, 转速有所增加, 转差率减小, 这说明电机自适应能力强. 另外在增加或减少负载角情况下, 实际转速有所减少或增加而且能很快稳定下来, 这说明转速的稳定性好. 在最初启动的  $0.1\text{ s}$  内转矩和转速的波动不会有仿真结果那么大, 这主要是由于假设在瞬态过程中电机参数与稳态运行时相同, 这与实际情况有出入, 因为没有考虑电机在瞬态大电流下的饱和效应. 在  $0.1\text{ s}$  以后瞬态转矩与瞬态转速的波动趋于平稳, 这基本与实际情况相符, 因为这时电机饱和程度已大大降低, 电机参数已接近稳态参数.

### 3 结论

#### Concluding remarks

本文使用感应电机在 MT 旋转坐标系下的数学模型, 利用 Matlab/Simulink 对其矢量控制系统进行了仿真建模. 仿真结果表明了此模型的正确性和有效性, 适当地选取调节参数和仿真参数, 可使该系统得到良好的动态性能, 系统的动态响应快, 超调量小, 抗干扰能力强, 对给定值具有良好的动态跟踪能力, 获得了较为理想的调速系统.

## Simulation of vector control system of induction motors

ZHANG Wei<sup>1</sup> YU Li<sup>1</sup> LU Chen<sup>2</sup>

1 College of Information and Control, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044

2 ParisTech 11 Grandes Ecoles d'Ingénieurs de Paris

**Abstract** According to the principle of vector control system and analysis of the mathematical model of induction motor, a simulation model of induction motors in the MT coordinate system is established based on Matlab/Simulink with hysteretic current PWM adjustable speed system. The steady state and dynamic state simulations verify the validity and rationality of the model, and analysis shows the model's advantages of good dynamic performance, fast response, small overshoot and anti-jamming capabilities.

**Key words** induction motor; vector control; Simulink; PWM; simulation

### 参考文献

#### References

- [1] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003  
LI Huade. Alternating current speed regulation controlling system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
- [2] 余莉, 胡度生. 内置式永磁无刷直流电动机的分析和设计[J]. 微特电机, 2005, 33(9): 7-8  
YU Li, HU Qiansheng. Analysis and design of interior permanent magnet brushless DC motor[J]. Small & Special Machines, 2005, 33(9): 7-8
- [3] 贺益康. 交流电机调速系统计算机仿真[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996  
HE Yikang. Computer simulation of alternating current speed regulation controlling system [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996
- [4] 胡庆华, 周好斌, 龙波. 感应电机矢量控制系统的研究[J]. 长江大学学报: 自科科学版, 2007, 4(4): 86-89  
HU Qinghua, ZHOU Haobin, LONG Bo. Study on vector control system of induction motors[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2007, 4(4): 86-89
- [5] 张倩, 张荣文. 基于 Simulink 的异步电机矢量控制系统建模与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2008(5): 70-71  
ZHANG Qian, ZHANG Rongwen. Modeling and simulation of the vector control system of asynchronous motor based on simulink [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008(5): 70-71
- [6] 邵杰. 基于 Matlab/Simulink 异步电机矢量控制系统仿真[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(3): 73-76  
SHAO Jie. Simulation of the asynchronous motor system based on matlab/simulink [J]. Techniques of Automation and Applications, 2009, 28(3): 73-76
- [7] ZHANG Wei, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Power flow calculation for power system including offshore wind farm grid integration [C] // Nanjing, China: SUPERGEN, 2009