

永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真

王 莉,刘 佳,严仰光
(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘要:根据内永磁同步电机的数学模型及矢量控制方法,在 MATLAB/SIMULINK 环境中对电机及其控制系统的各部分进行精确建模和仿真。为使仿真系统更接近于实际系统,其中根据电压型逆变器驱动信号及功率管的实际开关状态对其进行建模。仿真的结果表明所建立的模型是正确的,控制方法是可行的,为该同步电机控制系统的硬件参数设计提供了良好的理论依据。
关键词:同步电动机;矢量控制;建立模型;仿真
中图分类号: TM921.5 **文献标识码:** A

0 前言

计算机仿真技术能有效地验证控制系统的设计思想,特别是在采用电力半导体器件对电机进行交流调速的分析研究中,计算机仿真技术已成为重要研究手段。
MATLAB/SIMULINK 是一种优秀的系统仿真工具软件,它具有模块化、可封装、可重载、面向结构图编程以及高度可视化等特点,可大大提高系统仿真的效率和可靠性。矢量控制系统具有可连续控制、调速范围宽等优点,且在简化矢量变换控制系统方面已获满意的结果,为此矢量变换控制系统仍为现代交流调速的重要方向之一。目前,国内外在异步电机的建模与控制已基本成熟^[1~3],而对永磁同步电机的控制和建模则有大量的工作需要做。本文运用 MATLAB/SIMULINK 建立内永磁同步电机矢量控制系统仿真模型,并进行了控制仿真研究,为进一步的实际研究奠定理论基础。

1 内永磁同步电机伺服系统控制方法及数学模型

电机调速系统的动态性能取决于能否直接控制电机的瞬时力矩^[4],本文所采用的磁场定向的矢量控制方法正是实现对电机输出力矩的瞬时控制。内永磁同步电机的电磁转矩基本上取决于交流电流和直流电流,对力矩的控制最终可归结为对两种电流的控制。本文采用 $i_d = 0$ 的电流控制方法,该方法控制简单,无去磁效应,输出力矩与输入电流成正比。为实现电机磁场定向的矢量变换控制,采用电流控制电压型逆变器对电机定子电流矢量幅值和方向进行控制,从而获得高精度的力矩控制性能。图 1 为本文所研究的内永磁同步电机矢量控制系统的结构框图,其中包括内永磁同步电机、电流控制逆变器、矢量变换、转速控制器、转速测量等。矢量控制系统中的内永磁同步电机的数学模型^[5]为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R i_d + P \frac{d}{dt} \psi_d - \psi_q \omega_e \\ u_q &= R i_q + P \frac{d}{dt} \psi_q + \psi_d \omega_e \\ T_e &= P [\psi_d i_q - (L_d - L_q) i_d i_q] \\ T_e &= T_L + B \omega_r + J P \frac{d}{dt} \omega_r \\ e &= P \omega_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 u_d, u_q 为直流电压、交流电压;

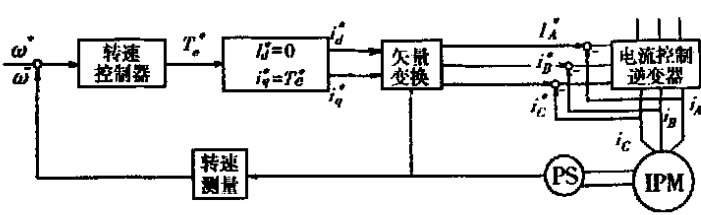


图1 内永磁同步电机矢量控制系统结构框图

ψ_d, ψ_q 为直流磁链、交流磁链; i_d, i_q 为直流电流、交流电流; L_d, L_q 为直流电感、交流电感; T_e 为电机输出力矩; T_L 为负载力矩; P 为电机极对数; ω_e, ω_r 为电角速度、机械角速度; B 为与转速成正比的摩擦

基金项目:航空青年基金资助项目(S9918 - 303)
作者简介:王 莉(1969 -),女,河南省南阳市人,讲师
收稿日期:2001 - 04 - 16

及风阻力矩系数; ψ_a 为永磁磁极产生的与定子交链的磁链。

2 内永磁同步电机在 MATLAB/SIMULINK 环境下的矢量控制系统

2.1 电流控制电压型逆变器的 MATLAB/SIMULINK 实现

图 2 所示为电流控制电压型逆变器框图。设 A、B、C 三相中无悬空相,三相电压用相电压矢量 $U = [U_a \ U_b \ U_c]^T$ 表示,功率管触发控制电压矢量用 $U_s = [U_{sa} \ U_{sb} \ U_{sc}]^T$ 表示。现以 A 相桥臂为例进行说明逆变器 A 相的控制及 A 相 PWM 触发信号的形成情况见图 3。由图 3b,将经过电流控制器调节的电流误差信号与三角波信号相比较,当误差信号比三角波信号大时导通情况见图 3b, B 相和 C 相的情况类似。三相电压 U 的计算为式(3),其中 E_d 为逆变器直流侧的电压。图 4 即为电流控制电压型逆变器基于 MATLAB/SIMULINK 的仿真框图。

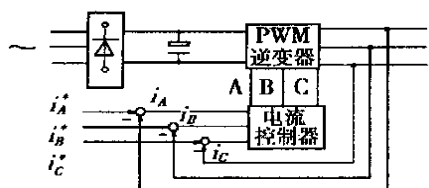
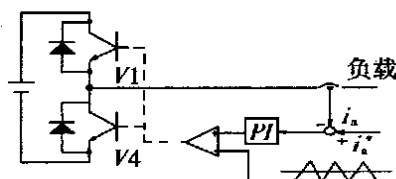
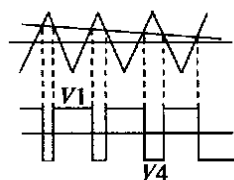


图2 电流控制电压型逆变器



(a) 逆变器A相控制示意图



(b) 逆变器A相PWM触发信号

图3 逆变器控制示意图

$$U_{sa} = \begin{cases} 1 & V_1 \text{ 导通} \\ 0 & V_4 \text{ 导通} \end{cases}$$

$$U = \frac{1}{3} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} U_s \quad (3)$$

2.2 内永磁同步电机的 MATLAB/SIMULINK 实现

由式(1),选取状态变量

$$X = [x_1 \ x_2]^T = [i_d \ i_q]^T \quad (4)$$

将式(1)的前两个等式写成状态空间表达式的形式,则

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} \\ \frac{\omega L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \frac{U_d}{L_d} \\ \frac{U_q - \omega \psi_a}{L_q} \end{bmatrix} U \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X \quad (6)$$

式(5)中, $U = [U_d \ U_q]^T$ 。根据状态空间表达式即可在 MATLAB/SIMULINK 环境下实现内永磁同步电机的仿真,方法如下。

(1)直接运用 MATLAB/SIMULINK 模块库拼建系统。MATLAB/SIMULINK 中的 State-Space 模块所允许的系数矩阵 A 、 B 、 C 、 D 为线性定常的,不能直接用于多变量、强耦合、非线性的电机模型。考虑到 MATLAB 软件具有强大的矩阵运算性能,所以可用 MATLAB/SIMULINK 中的 MATLAB Function 来实现。如图 5 所示。

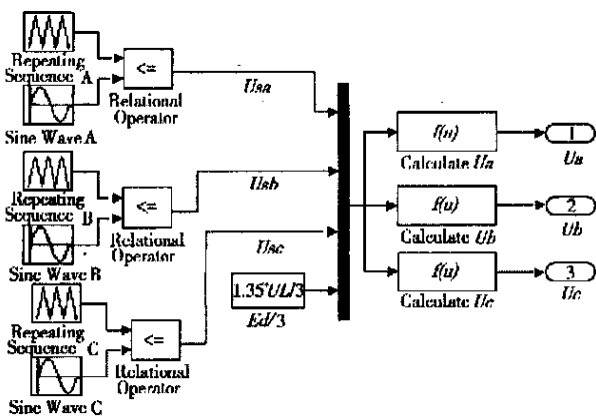


图4 逆变器的MATLAB/SIMULINK仿真图

(2) 运用 S—FUNCTION 实现内永磁同步电机的模型。在 MATLAB/SIMULINK 视窗中系统方框图一经建立, SIMULINK 就会利用该框图中的信息生成一个 S—FUNCTION, 通过 S—FUNCTION 可充分发挥 SIMULINK 的功能, 较适合解决 $\dot{x} = AX + Bu$ 型微、差分方程。根据式 (1) 的前两等式所编写的 S—FUNCTION 程序如下:

```
function [sys,x0] = idq(t,x,u,flag)
%输入量:u(1)=Ud,u(2)=Uq,u(3)=R,u(4)=Ld,u(5)=Lq,u(6)=Linkage,...,u(7)=We
%输出量:sys(1)=Id,sys(2)=Iq
%状态变量:x(1)=Id,x(2)=Iq
if flag == 0
    sys = [2 0 2 7 0 0];
    x0 = [0 0];
elseif flag == 1
    %Ud = u(1);Uq = u(2);R = u(3);Ld = u(4);Lq = u(5);Linkage = u(6);We = u(7);
    %A = [- R/Ld We *Lq/Ld;
    % - Ld *We/Lq - R/Lq];
    %B = [Ud/Ld;
    % (Uq - We *Linkage)/Lq];
    A = [- u(3)/u(4) u(7) *u(5)/u(4);
    - u(4) *u(7)/u(5) - u(3)/u(5)];
    B = [u(1)/u(4);
    (u(2) - u(7) *u(6))/u(5)];
    sys = A * x + B * 1;
elseif flag == 3
    sys = x;
else
    sys = [];
end
```

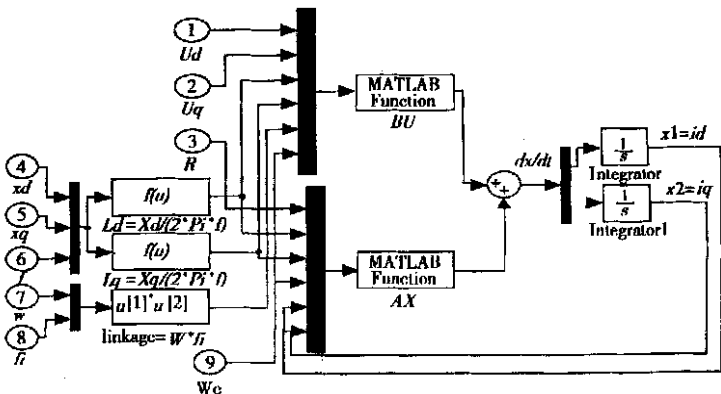


图5 内永磁同步电机的MATLAB/SIMULINK仿真结构图

在 MATLAB/SIMULINK 仿真中, 只要根据系统适当地选取数值分析方法和仿真参数, 以上两种建模方法均可获得满意的结果。方法一直接运用 SIMULINK 中的现有模块, 可视性好。方法二运用 S—FUNCTION 直接编程, 可简化仿真结构图, 且运算效率高。对于本文这样的用微分方程描述的动态系统来说, 用 S—FUNCTION 比方框建模更为方便。

3 仿真结果

运用 MATLAB/SIMULINK 仿真的结果如图 6 所示, 在 $t = 0.05\text{s}$ 时, 负载转矩由 $6\text{N}\cdot\text{m}$ 突变为 $3\text{N}\cdot\text{m}$ 。转矩曲线和交流、直流电流曲线表明通过矢量控制和 $i_d = 0$ 的电流控制, 转矩的变化主要取决于交流电流, 这样就能实现对电机瞬时力矩的控制, 得到较好的电机控制性能。

4 结论

本文运用 MATLAB/SIMULINK 实现了内永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真。MATLAB/SIMULINK 是基于 MATLAB FOR WIN 的用户图形接口的软件包, 易于实现软件通用和共享, MATLAB/SIMULINK 实现了可视化建模, 将理论和工程实现有机地结合在一起, 其系统结构可在线修改, 参数可在线变更, 运用其进行仿真工作效率高且仿真结果可很好地指导硬件参数的设计。

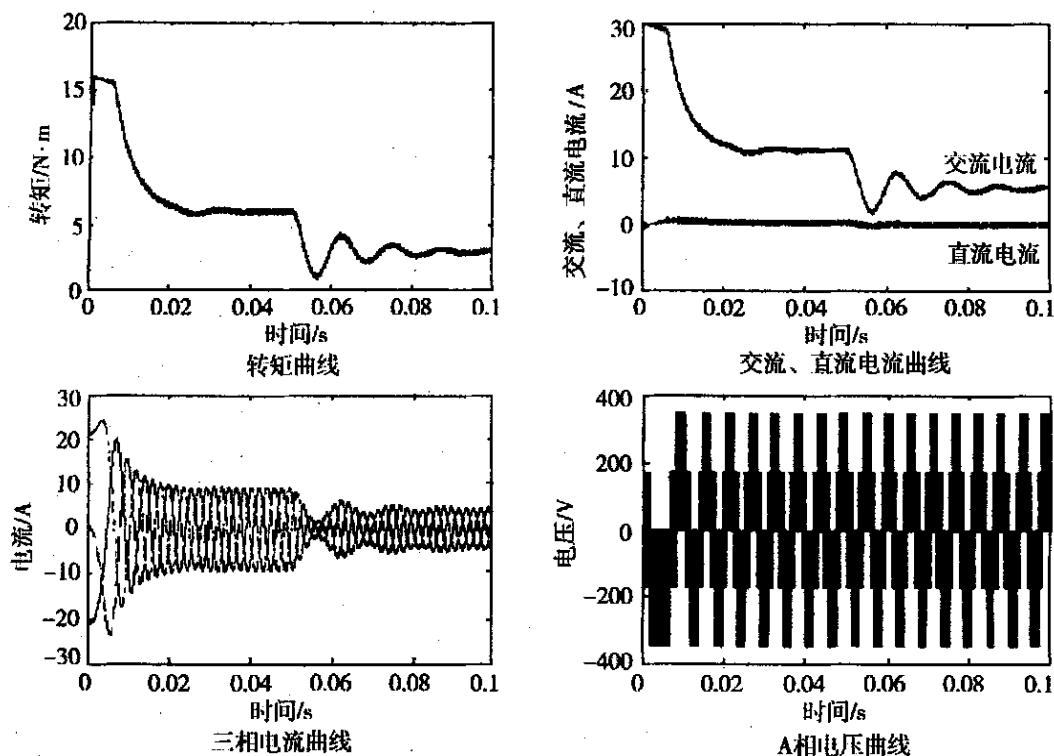


图6 仿真曲线图

参考文献:

- [1] 孙泽昌,黎燕航.一种基于稳态数学模型的感应电机转差型矢量控制方法的仿真研究[J].电气自动化,1997,15(3):12-15.
- [2] 姬志艳,李永东.应用异步电机全阶模型的无速度传感器直接转矩控制系统的仿真研究[J].电气自动化,1997,15(3):26-28.
- [3] 刘大勇.交流变频调速系统的一种通用数字仿真方法[J].电工技术学报,2000,15(1):50-53.
- [4] 秦 忆.现代交流伺服系统[M].武汉:华中理工大学出版社,1995.
- [5] 陈志杰.高性能永磁同步电机矢量控制系统研究[D].南京:东南大学,1993:65-100.

Modeling and Simulation of a Vector Control System for Permanent Synchronous Motor

WANG Li, LIU Jia, YAN Yang-Guang

(Autom. Sch., Nanjing Univ. of Aeronaut. & Astronaut., Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, according to the mathematic model of the interior permanent synchronous motor, the model of the AC serve control system adopting vector control is established in the environment of MATLAB/SIMULINK. The inverter's model is based on the switch states of the power transistors. The control method and model establishment are verified by the simulation results which shows that the model is precise and the control strategy is valid and feasible. These are important to the parameters design of the control system of this synchronous motor.

Key words: Synchronous motors; Vector control; Modeling building; Simulation