

文章编号: 1671-5896(2009)01-0017-06

# MATLAB / SIMULINK 永磁同步电机矢量控制系统仿真

王春民<sup>1</sup>, 嵇艳鞠<sup>1</sup>, 栾卉<sup>1</sup>, 张智恩<sup>2</sup>

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130061; 2. 北京环境特性研究所, 北京 100854)

**摘要:** 永磁同步电机矢量控制系统在工业控制、医疗等众多领域具有广泛的应用前景。基于 MATLAB / SIMULINK 环境, 采用模块式的结构, 分别对 PI (Proportion Integration) 调节、速度环调节、 $dq/$  变换、SVPWM (Space Vector Pulse Width Module) 波产生、主回路和整个系统模型进行了仿真研究。采用 Scope 空间对定子电流、转子转角和转子转速、以及转矩进行观察, 及时调整系统模型参数, 使系统性能达到最佳化, 实现了永磁同步电机矢量控制和正反转调速。结果表明, 该系统具有启动快、过载能力强和调速特性好等特点, 为永磁同步电机矢量控制系统设计与实现提供有效方法, 可明显缩短开发周期, 在实现永磁同步电机高精度的控制和节能控制方面具有实际意义。

**关键词:** 永磁同步电机矢量控制; Simulink;  $dq/$  变换

**中图分类号:** TN915.2      **文献标识码:** A

## Simulation of PMSM Vector Control System Based on MATLAB / SIMULINK

WANG Chun-min<sup>1</sup>, JI Yan-ju<sup>1</sup>, LUAN Hui<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-en<sup>2</sup>

(1. College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The vector control system of PMSM (Permanent Magnetic Synchronization Motor) has a wide application prospect in the fields of industrial control and medical treatment etc. The simulation research of vector control PMSM system can provide methods for PMSM vector control system design and realization. This thesis involves in simulation research of PI (Proportion Integration) adjustment, speed loop modulation and  $dq/$  transformation, gaining SVPWM (Space Vector Pulse Width Module) waves and main loop based on module structure under the environment of MATLAB / SIMULINK. Scope space was used to observe the stator current, rotating angle, revolution speed of rotor and rotating of torque. Through adjusting the model parameters timely, vector control and velocity modulation of PMSM was realized. The simulation results indicate that vector control system has the characteristics of fast speed up, strong overload capacity and ideal speed adjustment.

**Key words:** permanent magnetic synchronization motor (PMSM) vector control; Simulink;  $dq/$  transformation

## 引 言

永磁同步电动机具有结构简单、体积小、重量轻、损耗小等优点, 它没有直流电机的换向器和电刷、没有励磁电流, 因而具有效率高、功率因数高, 力矩惯量比大, 定子电流、电阻损耗小, 且转子参数可测和控制性能好等特点<sup>[1]</sup>。永磁同步电机的矢量控制系统能够实现高精度、高动态性能、可进行

收稿日期: 2008-11-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 基金资助项目 (2002CB 412600)

作者简介: 王春民 (1948—), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 吉林大学教授, 硕士生导师, 主要从事现代控制理论、DSP 与运动控制、系统辨识与建模研究, (Tel) 86-13578899158 (E-mail) wcm@jlu.edu.cn; 嵇艳鞠 (1973—), 女, 黑龙江同江人, 吉林大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力电子与电力传动研究, (Tel) 86-431-88502063 (E-mail) jiyj@jlu.edu.cn

大范围调速或定位控制,因此永磁同步电机矢量控制系统引起了国内外学者的广泛关注<sup>[2]</sup>。笔者在 MATLAB/SMULNK 环境下,对永磁同步电机矢量控制系统进行仿真,为实际系统的设计与实现提供新思路。

目前,有大量的界面友好、基于 PC 机仿真程序可用于电力电子系统的研究,如 SMULNK, PSPICE, SABEREMTP, SMNON, ACSL 等,但在电力电子与电力传动中,Math Works 公司提供的基于 MATLAB 平台下的 SMULNK 是最常用的一种,系统仿真使用了 MATLAB 平台下的 SimPowerSystems 和 SimMechanics,建模及仿真更方便和快捷<sup>[3]</sup>。

## 1 永磁同步电机在 $d, q, 0$ 坐标系下的数学模型

矢量控制是建立在坐标变换理论下的控制方法,经坐标变换后,永磁同步电机具有像直流电机一样的调速性能,为此给出永磁同步电机在  $d, q, 0$  坐标系下的数学模型<sup>[4]</sup>,其电路和转矩方程分别为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{\omega_r}{L_q} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = 1.5p [ i_q + (L_d - L_q) i_d i_q ] \quad (2)$$

其中  $L_q, L_d$  为  $q, d$  轴的电感量;  $\omega_r$  为转子角速度;  $R$  为定子内阻;  $i_q, i_d$  为  $q, d$  轴方向的电流分量;  $v_q, v_d$  分别为  $q, d$  轴方向的电压分量;  $k$  为电磁转矩系数;  $p$  为定子磁极对数;  $T_e$  为电磁转矩。

在永磁同步电机中,  $i_0 = 0$ , 因此有

$$T_e = 1.5p i_q \quad (3)$$

在  $i_d = 0$  条件下,电磁转矩和  $q$  轴电流成正比,只要对电流进行控制就达到了控制转矩的目的,同时也能保证最大的输出转矩

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

其中  $T_L, J$  分别为电机的阻转矩和转动系统的转动惯量。通过对输出力矩的控制,达到速度调节的目的。

## 2 SMULNK 仿真

在 SMULNK 环境下,构建的仿真模型如图 1 所示。图 1 中主电路由 DC Voltage Source, Universal Bridge 和 Permanent Magnet Synchronous Machine 构成,使用 Scope 空间对定子电流、电磁转矩、转子转角和转子转速进行观察。其中 Step 控件用于加载负载转矩,由 speed control 实现电机矢量控制系统中的速度环调节,用速度反馈信号与设定速度的差值作为速度调节器输出  $q$  方向的电流参考量,并设定  $d$  方向的电流参考量为零<sup>[5]</sup>。

仿真时,将  $d, q$  两个方向参考量与实际电流相比较,然后通过两个 PI 调节器计算出系统的调节电压  $U_q$  和  $U_d$ , 经  $dq/$  坐标变换,最后送入 SVPWM 实现电机的控制<sup>[6]</sup>。SVPWM 模块可产生 SVPWM 波,输入模式有两种:输入  $U_d, U_q$  轴的电压值和输入  $A, B, C$  3 相的电压分量。根据空间向量的原理调制出脉宽控制 6 个不同的开关顺序。

Universal Bridge 是 SimPowerSystems 内全桥模型,可仿真由不同电力电子器件搭建的全桥,根据不同器件的特点设定相关模型参数。 $g$  端用于控制内部三对桥路的导通情况,三相输出  $A, B, C$  可直接接入电机模型的三相输入,+, - 端口为直流电压输入,仿真时设为 300 V。

Permanent Magnet Synchronous Machine 是依据  $d, q, 0$  坐标系下建立的永磁同步电机和直流无刷电机数学仿真模型,可以处于电动和发电两种状态,提供了转子转角、速度、定子电流和电磁转矩参数,为实现永磁同步电机的矢量控制仿真实验提供了有利条件<sup>[7]</sup>。在 SMULNK 环境下仿真时,采样周期  $T_s = 5 \mu s$ , 仿真时间  $0 \sim 0.2 s$ , Type 为 Fixed-step, Solver 为 discret (no continuous states), Periode samp-

ie time constraint为 Unconstrained, Fixed-step size (fundamental samplie times) 为  $T_s$ , Tasking mode for periodic sample time为 AUTO<sup>[8]</sup>。

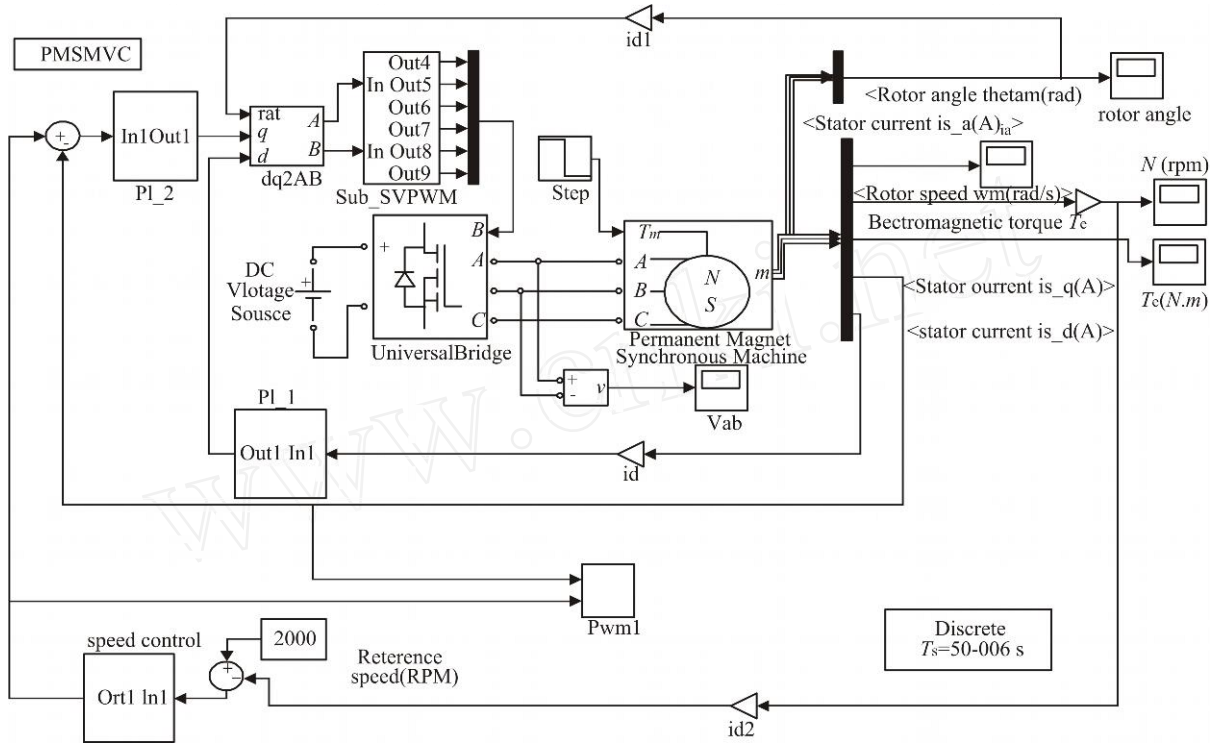


图 1 永磁同步电机仿真模型

Fig. 1 Simulation model of PMSM

### 2.1 调节器

经过多次仿真实验, 在速度调节中只单纯采用 P 调节效果并不理想, 为此, 提出了采用分段 P 速度调节的方法, 即根据误差量的大小分段确定  $K_p$ ,  $K_i$  参数。在初期, 加大比例调节成分, 随着误差减小适当加大积分系数, 其速度环调节器仿真模型如图 2 所示<sup>[9]</sup>。

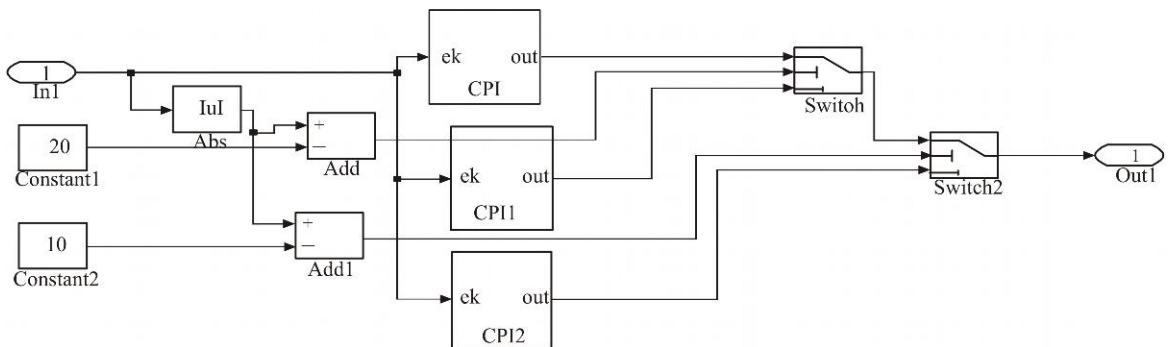


图 2 速度环调节器仿真模型

Fig. 2 Simulation model of speed bop adjustor

图 2 中 CPI, CPII, CP $\Sigma$  为 3 个不同参数的 PI 调节器, 对应  $K_p$ ,  $K_i$  参数为 CPI (1, 0.1)、CPII (0.1, 0.2) 和 CP $\Sigma$  (0.02, 1)。PI 调节器的仿真模型如图 3 所示, 其中 constant 和 constant1 输入分别为  $K_p$  和  $K_i$ 。

### 2.2 坐标变换

$dq/$  变换采用了 SMULNK 环境提供的 Function 模块实现, 坐标变换仿真模型如图 4 所示, 其中 Fcn 和 Fcn1 参数, 可以按照  $dq/$  变换公式 (5) 进行设置为<sup>[10]</sup>

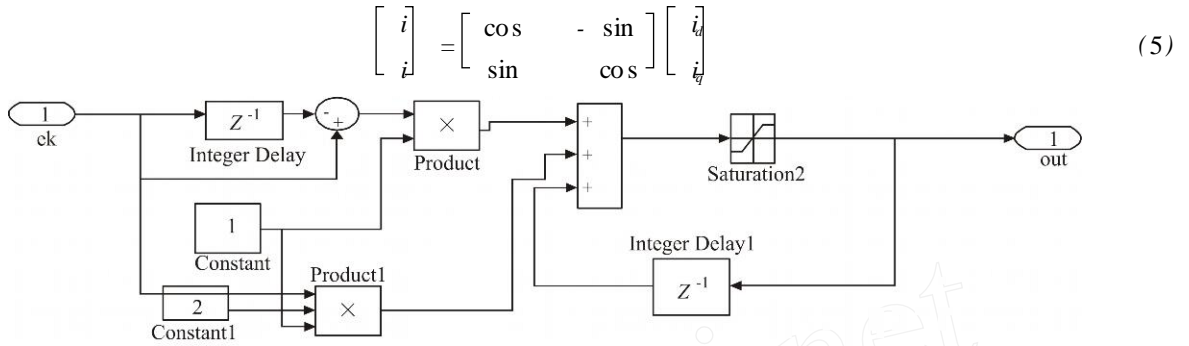


图 3 PI调节器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of PI adjustor

### 2.3 SVPWM 波的产生

由于 Discrete SV PWM Generator只能输入 0~1 的空间矢量，所以需要先对输入量进行归一化处理，产生 SVPWM 波的仿真模型如图 5 所示。其中  $K_1$  和  $K$  为  $1/300$ ，Discrete SV PWM Generator参数中 Data type of input reference vector 设为 alpha-beta components，Switching pattern 为 Pattern# 2，Chopping frequency 设为 8 kHz，Sample time 设为  $2 \times 10^6 \text{ s}^{[11,12]}$ 。

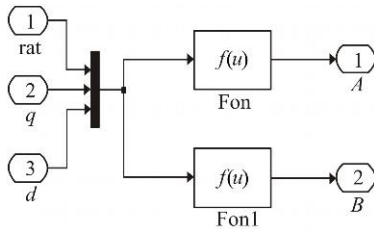


图 4 dq/ 变换仿真模型

Fig. 4 Simulation model of dq/ transformation

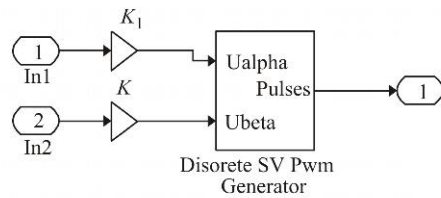


图 5 SVPWM 波产生的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of SVPWM wave generation

## 3 仿真结果及分析

在某一时刻 6 路 PWM 波形如图 6 所示，波形 PWM1~PWM6 分别为逆变桥的 6 个输入，任意一路

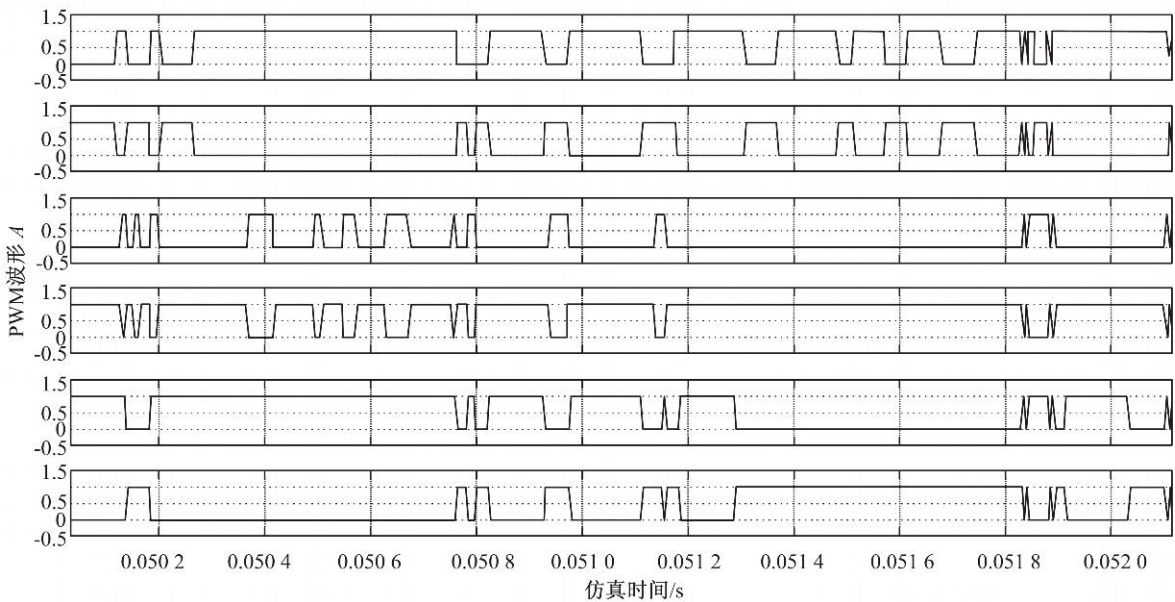


图 6 在 0.050 2 ~0.052 s 时间内 6 路 PWM 波形

Fig. 6 Six circuit PWM wave between 0.050 2 and 0.052 second

输入信号为 1 时,表示其对应开关器件处于导通状态,反之处于截止状态。在 SVPWM 的周期为 1 ms,母线电压为 300 V,设定转速为 2 000 r/min。

在调速过程中,其输出电磁转矩如 7 图所示,系统的调速过程分为 3 个过程,在 0~0.02 内,属于启动过程。在该期间,要抑制负载转矩做功,应该在整个过程中输出转矩最大;在系统负载转矩下,进入稳态,此时电磁转矩较稳定;在系统撤出电磁转矩的情况下,理论上输出电磁转矩为零,仿真结果与理论相符<sup>[13]</sup>。正反向调速波形如图 8,图 9 所示。

从图 8 和图 9 可看出,在 0.02 s 内系统都能完成速度调节,进入稳态,并在后续的调速过程中趋于稳定。在 0.1 s 时,突然撤出负载的情况下,经过短暂的速度小幅波动后又重新进入稳态。在进入稳态时,系统速度稳定,说明系统具有正、反向调速能力。在进入稳态时,系统运行平稳,达到预期效果,从而验证了永磁同步电机调速系统的特点<sup>[14]</sup>。

仿真结果表明,系统较好地实现了永磁同步电机的调速及其正反转控制,验证了永磁同步电机矢量控制具有启动快、过载能力强和良好的调速特性<sup>[15,16]</sup>。

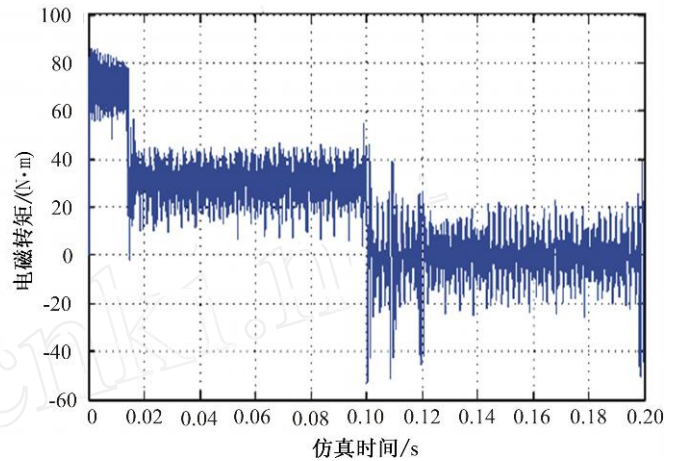


图 7 电磁转矩波形

Fig. 7 Wave of electromagnetic torque

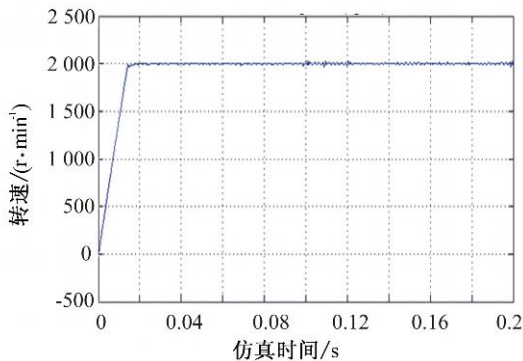


图 8 速度设定为 2 000 r/min 时的调速曲线

Fig. 8 Timing curve rate at 2 000 r/min

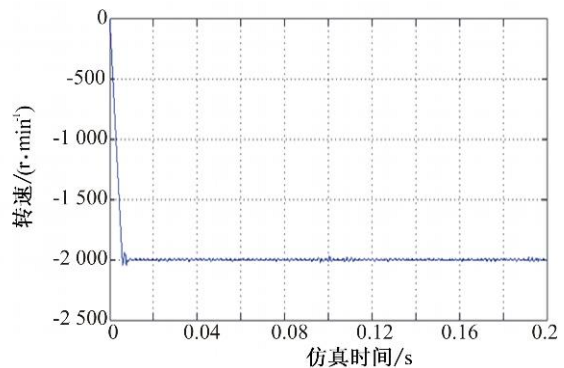


图 9 速度设定为 -2 000 r/min 的调速波形

Fig. 9 Timing wave rate at 2 000 r/min

### 4 结 语

笔者在永磁同步电机的数学模型基础上,运用电机矢量控制的思想,在 MATLAB/SMULNK 环境下,采用模块的方法设计、构建了永磁同步电机的仿真模型。对矢量控制方法进行了仿真研究,给出了永磁同步电机矢量控制的可行性和系统实现方法。笔者采用的仿真方法简单、快捷高效、准确可靠,对实际系统的设计与实现起到重要作用。

### 参考文献:

[1] 暨绵浩,曾岳南,曾建安,等. 永磁同步电动机及其调速系统综述和展望 [J]. 电气时代, 2005, 5: 20-23  
 JIM ian-hao, ZENG Yue-nan, ZENG Jian-an, et al Summarize and Prospect of the PMSM System of Frequency-Conversion and Timing [J]. Electric Age, 2005, 5: 20-23

[2] B MAL K BOSE Modern Power Electronics and AC Drives [M]. [S 1]: Pearson Education, 2001.

[3] 黄永安,马路,刘慧敏. MATLAB 7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

- HUANG Yong-an, MA Lu, LU Hui-min MATLAB 7.0/Simulink 6.0 Modeling Simulation Develop and Step Engineering Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [4] 钱昊, 赵荣祥. 永磁同步电机矢量控制系统 [J]. 农机化研究, 2006 (2): 90-91.  
QIAN Hao, ZHAO Rong-xiang Vector Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006 (2): 90-91.
- [5] 王成元. 矢量控制交流伺服驱动电动机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.  
WANG Cheng-yuan Vector Control AC Servo-Driven Motor [M]. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [6] 林立, 黄声华. 基于矢量控制的高性能异步电机速度控制器的设计 [J]. 电子技术应用, 2006 (2): 102-105.  
LI N Li, HUANG Shen-hua Speed Controller Design of High Performance Asynchronous Motor Based on Vector Control [J]. Application of Electronic Technique, 2006 (2): 102-105.
- [7] BOUCHIKER S, CAPOLINO G A. Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using AC-AC Matrix Converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13 (6): 1089-1099.
- [8] 沈艳霞, 吴定会, 李三东. 永磁同步电机位置跟踪控制器及 Backstepping 方法建模 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (6): 1318-1321.  
SHEN Yan-xia, WU Ding-hui, LI San-dong Backstepping Method Modeling for Position Servo Controller of Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (6): 1318-1321.
- [9] 王峰, 姜建国, 颜天佑. 基于 Matlab 的异步电动机建模方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (7): 1733-1741.  
WANG Feng, JIANG Jian-guo, YAN Tian-you Methods of Asynchronous Motor Model Simulation Based on Matlab [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (7): 1733-1741.
- [10] 薛花, 姜建国. 基于 EKF 永磁同步电机 FRC 方法的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (11): 3324-3327.  
XUE Hua, JIANG Jian-guo Investigation to Simulation of Fuzzy Model Reference Adaptive Control Strategy of PMSM Based on EKF [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (11): 3324-3327.
- [11] 林伟杰. 永磁同步电机两种磁场定向控制策略的比较 [J]. 电力电子技术, 2007, 41 (1): 26-29.  
LI N Wei-jie Comparison of Two Kinds of Magnetic Field Oriented Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. Power Electronics, 2007, 41 (1): 26-29.
- [12] 汪春民, 乔瑞芳, 安海忠. 基于 DSP 和 IEM 的三相无刷直流电机控制系统 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2007, 25 (1): 62-67.  
WANG Chun-min, QIAO Rui-fang, AN Hai-zhong Three Phase Brushless DC Motor Control System Based on DSP and IEM [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2007, 25 (1): 62-67.
- [13] 汪宏, 史敬灼, 徐殿国. 永磁同步电动机调速系统 [J]. 微特电机, 2004, 32 (9): 9-11.  
WANG Hong, SHI Jing-zhuo, XU Dian-guo Speed-Adjustment System of Permanent Magnet Synchronous Generator [J]. Small & Special Electrical Machines, 2004, 32 (9): 9-11.
- [14] 汪春民, 孙淑琴, 安海忠, 等. 基于 DSP 永磁同步电动机矢量控制系统的设计 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2008, 26 (4): 343-346.  
WANG Chun-min, SUN Shu-qin, AN Hai-zhong, et al Design of PMSM Vector Control System Based on DSP [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2008, 26 (4): 343-346.
- [15] 汪春民, 刘兴明, 嵇艳鞠. 连续与离散控制系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
WANG Chun-min, LIU Xing-ming, JI Yan-ju Continuous and Discrete Control Systems [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] TAN H, CHANG J, CHAFFEE MA. Practical Motion Control Modeling and PID Design [J]. American Control Conference, 2000, 1 (6): 529-533.

(责任编辑: 刘东亮)