

文章编号:1000-582X(2004)07-0032-04

# 永磁同步电动机调速系统的模糊控制与仿真\*

冉振亚<sup>1</sup>, 杨超<sup>1</sup>, 曹文明<sup>1</sup>, 赵树恩<sup>1,2</sup>, 庞迪<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400030; 2. 陕西理工学院, 陕西汉中 723001)

**摘要:**对电动汽车驱动用永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor 缩写为 PMSM)的调速系统进行模糊控制并对其结果进行仿真。对 PMSM 进行数学建模, 根据其数学模型在 MATLAB/Simulink 下建立 PMSM、PMSM 测量环节、dq/abc 转换器和 PWM 三相逆变器的仿真模块并进行封装。采用二维模糊设计, 以电动汽车行驶时所要求的电动机转速  $n'$  与电动机的实际转速  $n$  之间的偏差  $E$  和其偏差变化率  $EC$  作为系统的输入变量, 把控制占空比的电流信号  $U$  作为输出语言变量, 进行模糊控制器的设计。根据 PMSM 的各模块和所设计的模糊控制器, 在 MATLAB/SIMULINK 下创建电动汽车 PMSM 调速系统的模糊控制仿真结构模型, 并进行仿真, 从而验证控制方法的正确性。

**关键词:**电动汽车; 永磁同步电动机; 调速系统; 模糊控制; 仿真

**中图分类号:**U469.72

**文献标识码:**A

为了保护人类赖以生存的环境, 汽车的绿色技术化成为当今世界的热门话题; 特别是当前石油资源面临枯竭, 促使绿色汽车的开发成为世界汽车发展的主流。电动机驱动系统(亦称电动机及其控制系统)是电动汽车的心脏, 电动汽车研制的关键技术之一, 解决电动汽车中“电动机及其驱动系统”这个关键技术意义深远。在电动汽车驱动系统中, PMSM 由于具有动态性能好、体积小、重量轻等优点, 成为电动汽车驱动系统的最理想的选择<sup>[1]</sup>。为适应电动汽车复杂的运行工况要求, 其驱动系统应具有尽可能高的转矩密度、良好的转矩控制能力、高的运行可靠性及在整个电动汽车调速范围内具有尽可能高的效率。

## 1 电动汽车永磁同步电动机调速系统模型

为保证电动汽车驱动系统在复杂的运行工况具有高的运行可靠性、恒功率运行区域及在整个电动汽车调速范围内具有尽可能高的效率, 需要对电动汽车的驱动系统进行调速控制。电动汽车 PMSM 调速系统<sup>[2]</sup>模糊控制的结构图为:

由图 1 可见, PMSM 调速系统的过程为: 以电动

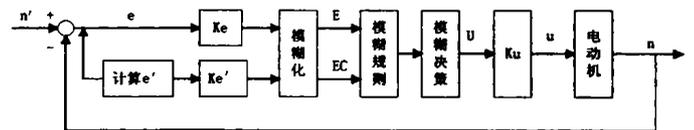


图 1 磁同步电动机模糊控制系统框图

汽车行驶时所要求的电动机转速  $n'$  与电动机的实际转速  $n$  之间的偏差  $e$  以及偏差变化率  $e'$  作为系统的输入变量, 并将偏差  $e$  以及偏差变化率  $e'$  送给模糊控制器, 由模糊控制器计算出电动机控制量  $U$ , 送给电动机, 实现电动机的调速控制。

## 2 永磁同步电动机

PMSM 是一个多输入、多输出、强耦合、非线性的系统。具有转矩密度大、调速性能高, 动态性能好等特点, 在高性能的调速系统中得到了广泛应用。

### 2.1 永磁同步电动机的数学模型

在对电动汽车进行计算机仿真、数学建模时, 以 PMSM 为中心将电动汽车的负载特性转换到电动机的轴输出端, 并以电动汽车车速  $V$  作为电动机速度变量,

\* 收稿日期: 2004-03-13

作者简介: 冉振亚(1949-), 男, 重庆人, 重庆大学副教授, 从事汽车绿色技术及天然气汽车技术的开发工作。

则 PMSM 的仿真数学模型<sup>[3]</sup>为：

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d}(u_d - R_1 i_d + \omega L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q}(u_q - R_1 i_q - \omega \Psi_f - \omega L_d i_d) \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{18\eta_r i_s}{5r\epsilon m} \\ \left[ T_2 - \frac{r}{\eta_r i_s} \left( G_f + \frac{C_D A v^2}{21.15} + G_{i\omega} \right) \right] \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega = \frac{p i_q v}{3.6r} \end{aligned}$$

式中  $L_d$ 、 $L_q$  为直、交轴电感； $\Psi_f$  为永磁磁链； $\omega$  为角速度； $p$  为电动机极对数； $\theta$  为转子磁极轴线与定子  $a$  相绕组轴线的夹角(电角度)。

### 2.2 SIMULINK 下永磁同步电动机的仿真模型

基于以上 PMSM 的数学模型,在 Matlab 的图形仿真环境 Simulink 下,创建 PMSM 及其测量环节的模块,并进行封装[4],可得到如下模型,如图 2、图 3 所示：

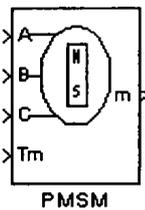


图 2 PMSM 模块

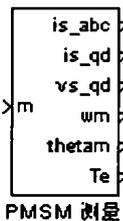


图 3 PMSM 测量环节模块

## 3 模糊控制器的设计

模糊控制的诞生是以 L. A. Zadeh 教授于 1965 年提出的模糊集理论为标志的,是以模糊集合论、模糊语言以及模糊逻辑推理为数学基础的一种新型控制方法。具有易于构造、输出量连续、可靠性高、超调量小、鲁棒性强、能够克服非线性因素的影响等特点<sup>[5-6]</sup>。其系统结构示意图如图 4 所示。

### 3.1 模糊控制变量

采用二维模糊设计,以电动汽车行驶时所需要的

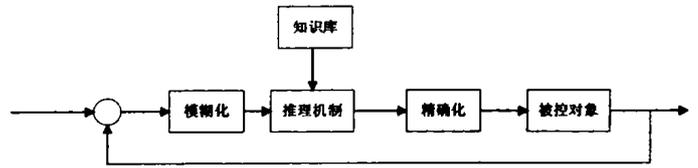


图 4 模糊控制系统结构

电动机转速  $n'$  与电动机的实际转速  $n$  之间的偏差  $E$  以及偏差变化率  $EC$  作为系统的输入变量,把控制占空比的电流信号  $U$  作为输出语言变量,如图 5 所示。这种双输入单输出结构的模糊控制器具有 PD 控制规律,有利于保证系统的稳定性,减少响应过程的超调量以及削弱其振荡现象<sup>[7]</sup>。

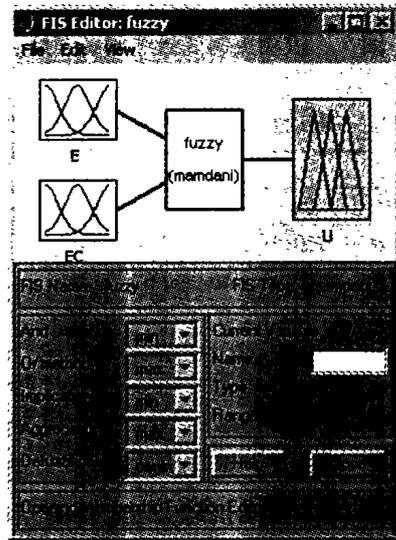


图 5 模糊控制变量

选取输入变量  $E$  和  $EC$  以及输出变量  $U$  的模糊子集均为：

{负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)}

利用 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB 这些模糊量,根据仿真结果反复地进行综合分析,将连续变化的精确量进行离散模糊化,得到输入量和输出量的隶属函数如图 6 所示。

### 3.2 模糊控制规则

模糊控制规则是对模糊控制系统控制经验的总结,但只凭经验还不能确定模糊控制规则,需要在系统仿真结果的基础上分析反复调节、不断修改才能最终确定,模糊控制规则的确定应当保证模糊控制器的输出能够满足相应的静态和动态特性达到最优。电动机调速系统的模糊控制规则如表 1：

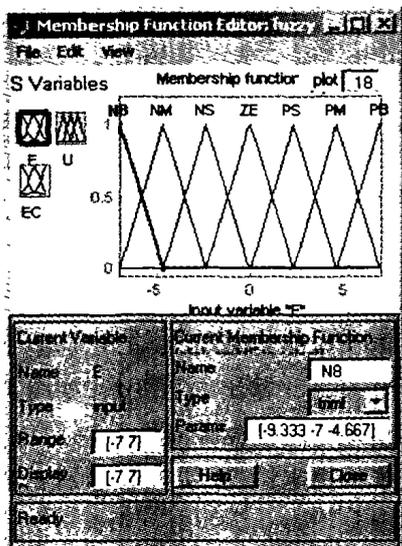


图6 模糊控制变量的隶属函数

表1 电动机调速系统模糊控制规则

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	NB	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	ZE	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	ZE	NM	NM
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NS	NB	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	NM	NB	NB	NB

根据 Mamdani 模糊推理方法,模糊控制的输出曲面如图7所示。

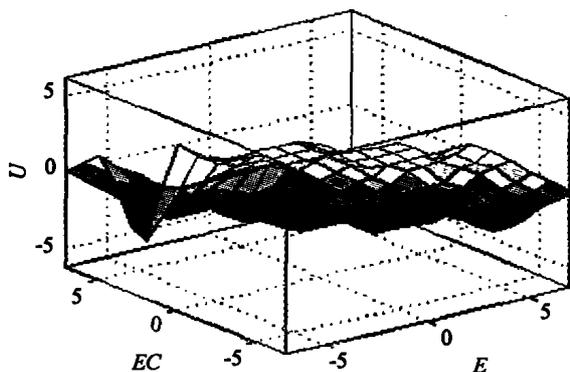


图7 Mamdani 模糊推理规则输出曲面

#### 4 永磁同步电动机调速系统的模糊控制

在图2的电动机模型中A、B、C端口是三相定子电源输入端口,  $T_m$  端口是电动机轴上的机械转矩。当  $T_m > 0$  时,为电动机状态;当  $T_m < 0$  时,为发电机状态。电动机模型的 m 端口是各个测量值的输出端口。PMSM

的可测量值有10个(包括所有流入电动机的电流):线电流  $i_a, i_b, i_c$ ;  $q, d$  轴电流  $i_q, i_d$ ;  $q, d$  轴电压  $v_q, v_d$ ; 转子转速  $\omega_e$ ; 转子位置角  $\theta_e$ ; 电磁转矩  $T_e$ 。但这些量都不能直接从 m 端口输出,必须由 PMSM 的测量环节(PMSM Measurement Demux) 输出,即将 m 端口与测量环节 m 端口连接。

图2中PMSM模型是基于  $(d, q, o)$  坐标系的,因此下标为  $q, d$  都是坐标  $d, q$  上的量,如要和静止坐标系  $(as, bs, cs)$  的量进行比较需对其进行坐标变换即用派克逆变换矩阵:

$$p^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

进行变换,逆变换关系为:

$$f_{abc} = p^{-1}(\theta)f_{dqo}$$

根据上文,在 MATLAB/SIMULINK<sup>[4]</sup> 下创建并封装  $dq/abc$  转换器和 PWM 三相逆变器,从而建立如图8所示的 PMSM 调速系统的模糊控制仿真结构模型:

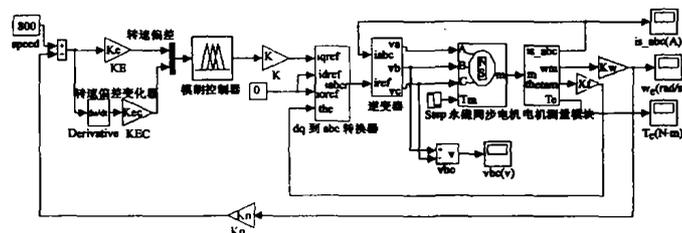


图8 永磁同步电动机模糊控制动态结构

#### 5 仿真结果

选取 PMSM 的参数为:

定子电阻  $R: 2.875 \Omega$ ;  $Ld: 8.5 \text{ mH}$ ;  $Lq: 8.5 \text{ mH}$ ; 磁链幅值:  $0.175 \text{ Wb}$ ; 转动惯量:  $0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ; 阻尼系数:  $0$ ; 电极对数:  $4$ 。

在 MATLAB/Simulink 环境下打开如图8所示的仿真模型,并设置仿真起始时间、仿真步长、解法、要求的误差限等仿真参数。文中设置起始时间为  $0$ , 停止时间为  $0.10 \text{ s}$ , 选取  $\text{Ode15s}$  变步长解法, 给定电动汽车的转速为  $800 \text{ rad/s}$ , 其它都使用缺省选项。单击 Simulink/Start, 即开始仿真, 结果如图9所示。

#### 6 结论

由图9可见,在要求电动汽车的转速为  $800 \text{ rad/s}$

时,通过对电动汽车驱动用PMSM进行模糊控制,能保证电动机具有稳定的转速。除在启动时,转速急剧增加,出现波动外,其余都处于稳定运行区域,并无较大的波动现象。结果表明该系统具有稳定的转速和高的运行可靠性,满足电动汽车的运行要求。

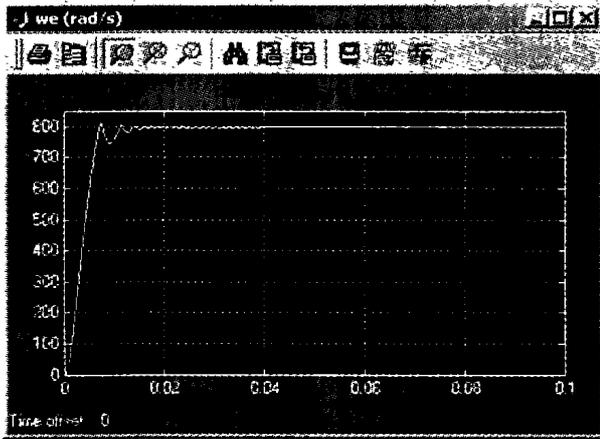


图9 永磁同步电动机模糊控制转速波形图

#### 参考文献:

- [1] TERASHIMA M. Novel motors and controllers for high - performance electric vehicle with four in - wheel motors [J]. IEEE Trans, Ind Appl, 1997, 44: 28 - 38.
- [2] 李志民, 张遇杰. 同步电动机调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 王群京. 稀土铁硼永磁同步电动机的设计理论及计算机仿真[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [4] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 何平. 模糊控制器的设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [6] 李士勇. 模糊控制神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [7] 韩启刚, 无锡祺. 计算机模糊控制技术与仪表装置[M]. 北京: 中国计量出版社, 1999.

## Fuzzy Control and Simulation of Regulating System for Permanent Magnet Synchronous Motor

RAN Zhen-ya<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, CAO Wen-ming<sup>1</sup>  
ZHAO Shu-en<sup>1,2</sup>, PANG Di<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China ;  
2. Shanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

**Abstract:** This paper researches the fuzzy control and simulation of regulating system for PMSM in electrical vehicle. The mathematics model is set up. The PMSM, the PMSM measures demux,  $dq$  to  $abc$  converter and the three phrase PWM converter models are set up in MATLAB/ Simulink. The fuzzy controller is designed with two dimension fuzzy design method, and take  $E$  and  $EC$  as input variable,  $U$  is the output variable. According to the controller and models, the fuzzy control model of regulating system for PMSM is created in matlab/simulink. At last, to test the accuracy of the control method with the simulation result.

**Key words:** electrical vehicle; PMSM; regulating system; fuzzy control; simulation

(编辑 张小强)