

# 永磁同步电机(PMSM)调速系统的智能控制算法研究

王宝忠<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>, 王波<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 济宁供电公司 山东 济宁 272000)

**摘要:** 为了解决 PMSM 速度控制问题, 文中提出了一种模糊自整定 PI 的控制方案, 并用 MATLAB 对系统进行了建模仿真验证。仿真实验结果表明, 该种新型控制算法与传统的 PI 控制相比较, 具有很强的适应性, 鲁棒性和抗干扰性。能快速跟踪设定速度, 并且在改变负载时, 能快速恢复到额定状态。

**关键词:** PMSM; 模糊自整定 PI; 调速; 仿真

中图分类号: TN710

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2014)01-0139-04

## Research on intelligent control algorithm for speed control system of PMSM

WANG Bao-zhong<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Jining Power Supply Company, Jining 272000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of PMSM speed control, a novel control method is put forward in this article, which is based on fuzzy self-tuning PI. The simulation on an inverter based on MATLAB were implemented. The result show that, the new control algorithm compared with the traditional PI, It has strong adaptability, robustness and anti-interference. And it can track speed quickly, it can also be quickly restored to the rated condition when the load is change.

**Key words:** PMSM; fuzzy self-tuning PI; speed control; simulation

在实际工业控制过程中经常会遇到滞后、时变、非线性的复杂系统, 而 PMSM 调速系统就是一个复杂的非线性系统, 无法获得精确的数学模型, 单纯采用 PI 控制或模糊控制都不会取得较好的控制效果, 而采用模糊自整定 PI 控制方式控制能充分发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小的优点, 又具有 PI 控制器的动态跟踪能力和稳定精度高的特点。本文只对传统 PI 控制与模糊自整定 PI 控制的仿真结果进行比较。

## 1 模糊自整定 PI 控制器的设计

模糊自整定 PI 控制器就是运用模糊数学的基本理论和方法, 把规则的条件、操作用模糊集表示, 并把这些模糊控制规则及有关信息作为知识存入计算机知识库中, 然后计算机根据控制系统的实际响应情况, 运用模糊推理, 就可以实现

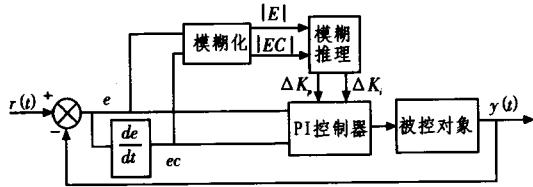


图 1 模糊自整定 PI 控制器的结构

Fig. 1 Structure of fuzzy self-tuning PI controller

收稿日期: 2013-05-27

稿件编号: 201305268

作者简介: 王宝忠 (1956—), 男, 江苏镇江人, 副教授。研究方向: 信号与信息处理、应用电子电路与系统。

对 PI 参数的最佳调整<sup>[1]</sup>。模糊自整定 PI 控制器的结构如图 1 所示。

PI 参数模糊自整定控制器就是在常规 PI 调节器  $u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i)$  的基础上, 应用模糊理论建立参数  $K_p$ 、 $K_i$  与偏差绝对值  $|E|$  以及偏差变化绝对值  $|EC|$  间的二元连续函数关系的控制器<sup>[2]</sup>。

$$\begin{cases} K_p = f_1(|E|, |EC|) \\ K_i = f_2(|E|, |EC|) \end{cases} \quad (1)$$

在实际控制系统中, 误差的变化一般不是模糊论域中的元素, 这就需要通过量化因子进行论域变换, 定义误差的量化因子  $K_e = n/e$ , 误差变化率量化因子  $K_{ec} = n/ec$ , 输出控制量量化因子  $K_u = u/n$ <sup>[3]</sup>。

本系统中, 速度的给定值  $w^* = 500 \text{ r}/\text{m}$ , 系统的性能指标为: 误差  $e$  的变化范围不大于给定值的 3%, 误差变化率  $ec$  的变化范围不大于误差的 5%。那么, 误差  $e$  的基本论域为  $[-15, 15]$ , 其量化因子  $K_e = 6/15 = 0.4$ ; 误差变化率  $ec$  的基本论域为  $[-0.75, 0.75]$ , 其量化因子  $K_{ec} = 6/0.75 = 8$ 。设参数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  的调整范围不大于已整定参数的 20%, 系统已整定参数为  $K_p = 2.4$ ,  $K_i = 7.2$ , 则  $\Delta K_p$  的基本论域为  $[-0.48, 0.48]$ , 其比例因子  $K_{up} = 0.48/6 = 0.08$ ;  $\Delta K_i$  的基本论域为  $[-1.44, 1.44]$ , 其比例因子  $K_{ui} = 1.44/6 = 0.24$ 。

在不同的  $|E|$  和  $|EC|$  下, 被控过程对参数  $K_p$ 、 $K_i$  的自整

定要求如下。

1) 当  $|E|$  较大, 为使系统响应具有较好的快速跟踪能力, 应取较大的  $K_p$ , 同时为避免系统响应出现较大的超调, 需对积分作用加以限制, 通常取  $K_i=0$ 。

2) 当  $|E|$  为中等大小时, 为使系统具有较小的超调, 应取较小的  $K_p$  和适当的  $K_i$ , 以保证系统的响应速度。

3) 当  $|E|$  较小时, 为使系统具有良好的稳态性能, 应取较大的  $K_p$  和  $K_i$ 。

总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验, 可得到针对  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  两个参数分别整定的模糊控制表。

表 1  $\Delta K_p$  的模糊规则表

Tab.1 The fuzzy rule table of  $\Delta K_p$

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

表 2  $\Delta K_i$  的模糊规则表

Tab.2 The fuzzy rule table of  $\Delta K_i$

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

建立好控制规则表后, 将系统误差和误差变化率范围定义为模糊集上的论域  $E, EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , 其模糊子集为  $E, EC = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 为了计算机处理和实现方便, 输入偏差  $E$ 、偏差变化率  $EC$  和输出  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  的隶属函数均采用线性函数。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计 PI 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入下式计算:

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \quad (2)$$

$$K_i = K'_i + \Delta K_i \quad (3)$$

其中,  $K'_p$ 、 $K'_i$  为常规 PI 控制器的设置参数;

$\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  为模糊控制器输出的修正量;

$K_p$ 、 $K_i$  为模糊自整定 PI 控制器参数。

在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算, 完成对 PI 参数的在线自调整。

## 2 模糊自整定 PI 控制器的仿真

启动 MATLAB 后, 在主窗口中键入 fuzzy 回车, 屏幕上就会出现 “FIS Editor” 界面, 即模糊推理系统编辑器。本文选择了如图 2 所示的模糊控制器, 其中输入为偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$ , 输出为修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 。该控制器为双输入双输出结构, 其选用三角形隶属度函数和重心法解模糊的方式进行<sup>[4]</sup>。

接下来, 按照表 1 和表 2 的模糊控制规则表编辑各个输出量与输入量之间的模糊控制规则, 模糊控制规则编辑器的窗口<sup>[5]</sup>如图 3 所示。以 if...then 的形式输入 49 条模糊控制规则。

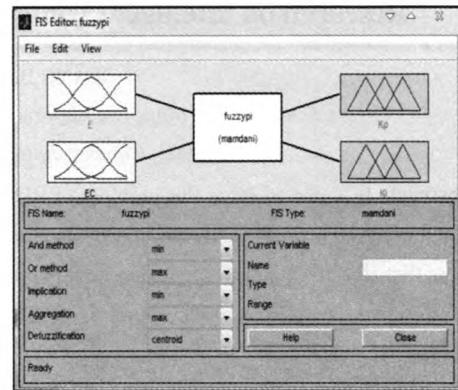


图 2 模糊控制器结构图

Fig. 2 Structure of fuzzy controller

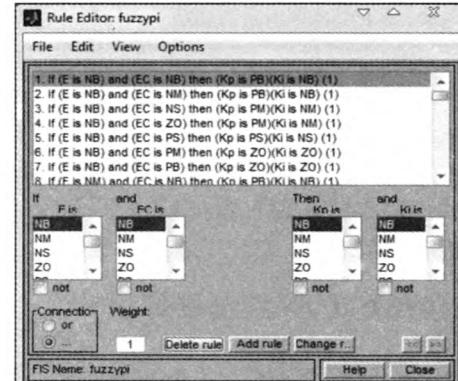


图 3 模糊控制规则编辑器

Fig. 3 Rule editor of fuzzy controller

最后可以生成输入输出的三维观察图形。 $K_p$ 、 $K_i$  的三维曲面分别如图 4、图 5 所示。

在确定量化因子和比例因子以及建立好模糊控制器之后, 对图 6 的常规 PI 转速调节器进行优化, 建立了图 7 所示的模糊自适应 PI 转速控制器, 其中  $K_p$ 、 $K_i$  的值保持不变。PMSM 调速系统总仿真图<sup>[6]</sup>如图 8 所示。

## 3 仿真结果分析

在给定速度值为 500 r/min 时, 常规 PI 调节器和模糊自适应 PI 调节器的仿真响应波形如图 9、10 所示。

仿真结果表明, 采用常规 PI 控制器时, 转速有一定的超

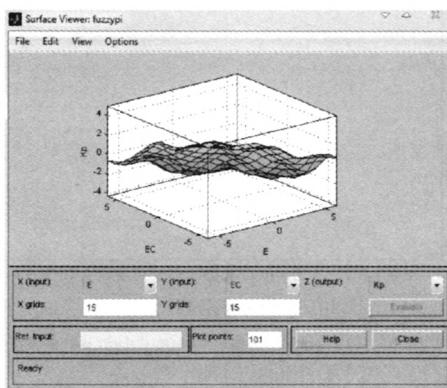


图 4  $K_p$  的输出三维图  
Fig. 4 3D output of  $K_p$

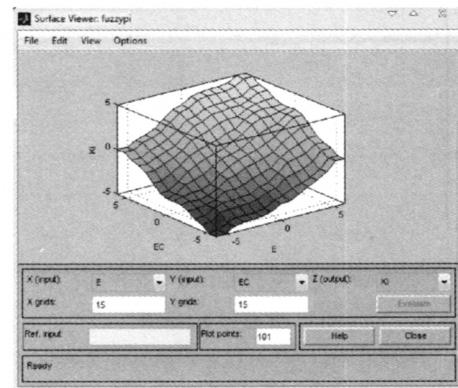


图 5  $K_i$  的输出三维图  
Fig. 5 3D output of  $K_i$

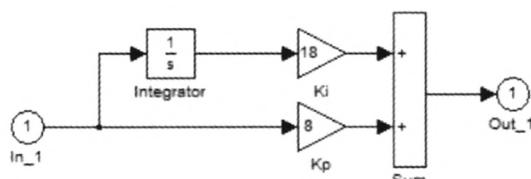


图 6 常规 PI 调节器  
Fig. 6 Conventional PI regulator

调量, 而且系统达到稳定的时间较长。采用改进后的模糊自整定 PI 控制器后, 速度几乎没有超调, 系统响应速度快。在系统运行时间  $t=0.2$  s 时加上  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  的额定负载, 常规 PI 控制时, 转速波动较大; 而采用模糊自整定 PI 控制时, 转速稍有下降, 并很快恢复额定转速, 具有较好的静差率。

#### 4 结束语

本文分析了两种不同算法控制的 PMSM<sup>[7-8]</sup> 调速系统, 并

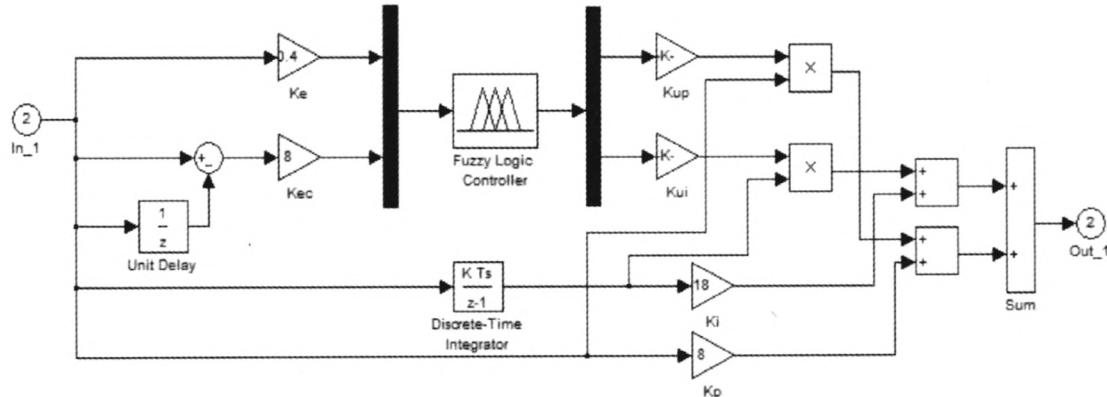


图 7 模糊自整定 PI 调节器  
Fig. 7 Fuzzy self-tuning PI regulator

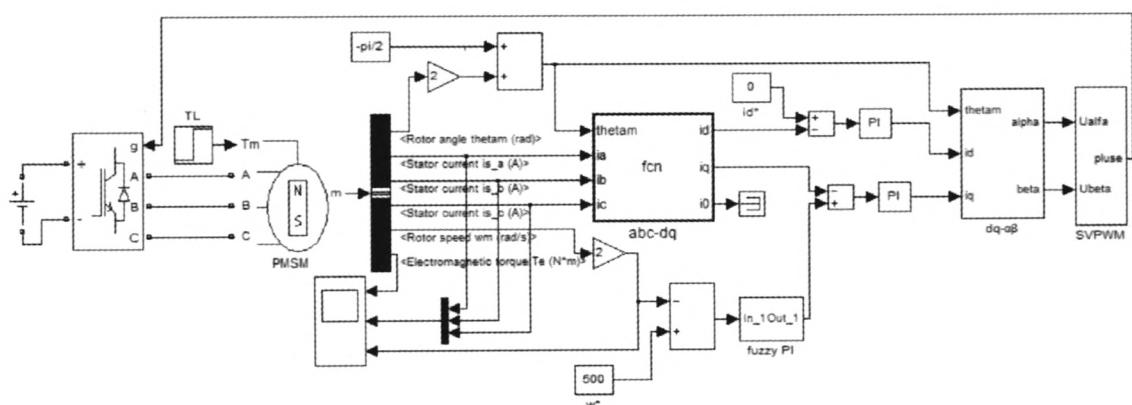


图 8 PMSM 调速系统模型  
Fig. 8 Model of PMSM speed control system

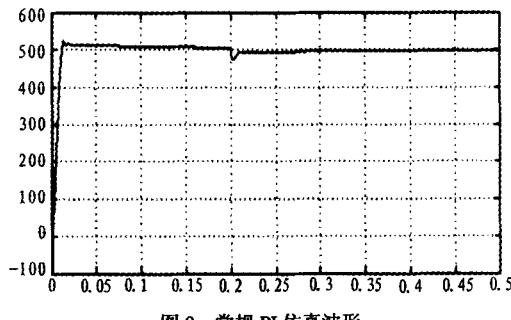


图9 常规PI仿真波形

Fig. 9 Conventional PI simulation waveform

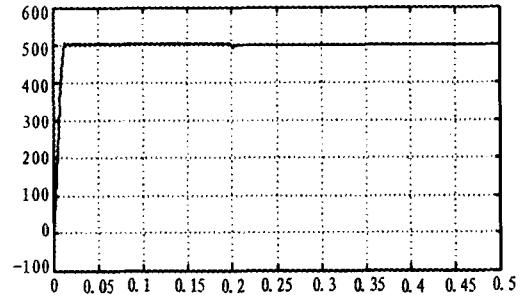


图10 模糊自整定PI仿真波形

Fig. 10 Fuzzy self-tuning PI simulation waveform

在 MATLAB/simulink 环境下实现了 PMSM 的基于常规 PI 和模糊自整定 PI 控制的建模和仿真，分别在空载和加负载两种情况下对系统进行仿真。仿真结果表明：基于模糊自整定 PI 控制的 PMSM 调速系统能够快速跟踪转速的变化，具有很好的控制特性。

#### 参考文献：

- [1] 黄友锐, 曲立国. PID 控制器参数整定与实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 曾光奇, 胡均安, 王东, 刘春玲. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [3] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [4] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接第 138 页)

本相符。

## 5 结束语

本文选用 CCII (第二代电流传输器) 设计电流模式的带通滤波器, 为了使电路尽可能简单, 本文仅选用一个 CCII 进行电路设计。

本文所设计的电流模式二阶带通滤波器具有以下特点: 1) 结构简单, 仅选用一个 CCII 和 4 个 RC 元件; 2) 功耗低; 3) 本文设计的 CMOS 电流传输器具有低功耗高带宽的特点。

#### 参考文献：

- [1] 赵玉山, 周跃庆, 王萍. 电流模式电子电路 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [2] Minaei S, Cicekoglu O, Kuntman H, et al. New Current-Mode Lowpass, Bandpass and Highpass Filters Employing CCCIIs [J]. IEEE, 2001(1):106–109.
- [3] Soliman A M. New Current-Mode Bandpass Filters Using Three Single-Output ICCLIs [J]. Active and Passive Electronic Components, 2007:14–19.

- [5] 周成. 模糊控制在永磁同步伺服系统中的应用与研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [6] 姚绪梁. 现代交流调速技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [7] 刘小河, 王鹤华. 基于 SVPWM 永磁同步电机反馈线性化控制 [J]. 现代电子技术, 2013(12):159–162.
- LIU Xiao-he, WANG He-hua. Feedback linearization control of PMSM based on SVPWM [J]. Modern Electronics Technique, 2013(12):159–162.
- [8] 方国维, 罗文广. 基于神经网络补偿的永磁同步电机控制 [J]. 电子科技, 2013(4):143–145, 149.
- FANG Guo-wei, LUO Wen-guang. PMSM control based on neural network compensation [J]. Electronic Science and Technology, 2013(4):143–145, 149.

- [4] Popović J, Pavasović A, Vasiljević D. Low-power High Bandwidth CMOS Current Conveyor. IEEE, 1997: 693–696.
- [5] Kumngern M, Moungnoul P, Junnapiya S, et al. Current-mode universal filter using translinear current conveyors [J]. IEEE, 2008:717–720.
- [6] WANG Chun-huai, LI Jin. A CMOS differential current-controlled second generation current conveyor [J]. IEEE, 2005: 447–450.
- [7] Minaei S, Sayin ok, Kuntman H. A New CMOS Electronically Tunable CurrentConveyor and Its Application to Current-Mode Filters [J]. IEEE, 2006, 53(7):1448–1457.
- [8] Bano S, Altaf T. Lowpass, Bandpass And Highpass Filters Using Current Inversion Type Negative Impedance Converter [J]. IEEE, 2011: 62–66.
- [9] Chang C-M. current mode allpass/notch and bandpass filter using single CCII [J]. IEEE, 1991, 27(20):1812–1813.
- [10] 钟文耀, 郑美珠. CMOS 电路模拟与设计—基于 Hspice [M]. 北京: 科学出版社, 2007.