

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.010

永磁同步电机调速系统模糊滑模双重控制策略

金家升, 张团善, 赵子昂, 华建兵

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710613)

摘要:为解决永磁同步电机传统速度控制系统中出现的控制精度低和响应灵敏度不够等问题,课题组提出一种新型的模糊滑模双重控制策略。设计了基于模糊控制和滑模控制的全新电机系统速度环控制结构,结合2种控制方案的优点,使得系统的动态性能明显改善。仿真结果表明该控制系统具有更好的抗干扰能力和更高的准确性,提出的模糊滑模双重控制策略是有效的。

关键词:永磁同步电机;模糊控制;滑模控制;速度控制

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)06-0071-05

Fuzzy Sliding Mode Dual Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Regulation System

JIN Jiasheng, ZHANG Tuanshan, ZHAO Ziang, HUA Jianbing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710613, China)

Abstract: Aiming at the problems of low control accuracy and insufficient response sensitivity in traditional speed control systems of permanent magnet synchronous motors, a new fuzzy sliding mode dual control strategy was proposed. The control structure of a new motor system speed loop based on fuzzy control and sliding mode control was designed, combining the advantages of the two control schemes to significantly improve the dynamic performance of the system. The simulation results show that the control system has better anti-interference ability and higher accuracy, and the proposed fuzzy sliding mode dual control strategy is effective.

Keywords: PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor); fuzzy control; SMC (Sliding Mode Control); speed control

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有小巧轻便、效率高和可靠性高等优点,因此在装备制造领域得到了广泛应用^[1-3]。传统的比例积分控制(proportional integral, PI)虽然算法结构简单,然而由于永磁同步电机很容易受到各种内外部因素的影响,使用传统的PI控制策略已无法取得较好的抗干扰能力和控制精度。因此,学者们进行了大量研究,提出了一系列有效的解决方案和控制策略。

文献[4]中提到的矢量控制、恒压频比控制和PID控制都属于传统控制策略,直接转矩控制、滑模变结构控制和自适应控制属于现代控制策略,目前流行的是与智能算法相结合的控制方式,如模糊控制和神经网络等。

王淑旺等^[5]在传统的滑模指数趋近律基础上设计了一种变边界层饱和函数代替传统函数,缩短了系统的响应时间;李瑞琦等^[6]研究了永磁同步电机伺服系统的速度环,有效地结合了径向基函数神经网络与传统PID控制方法,最后在Simulink中通过仿真验证了该方法的有效性;禹聪等^[7]中通过模糊逻辑设计变量趋近滑模面的距离与滑模增益之间的规则,并在此基础设计了一种模糊滑模速度控制器。

滑模控制(sliding mode control, SMC)由于具有很强的鲁棒性被广泛应用,它能在有限时间内快速收敛,但是传统的滑模控制器存在着响应速度不灵敏和超调

收稿日期:2023-03-03;修回日期:2023-06-19

基金项目:国家自然科学基金(51735010);西安现代智能纺织设备重点实验室资助项目(2019220614SYS021CG043)。

第一作者简介:金家升(1998),男,安徽岳西人,硕士研究生,主要研究方向为电机控制。E-mail:1668181733@qq.com

量过大等缺陷;模糊控制可以根据系统实时反馈的数据对系统进行控制,具有灵活性和快速性的特点,但同时也会由于系统的复杂性导致控制精度降低。故课题组以永磁同步电机控制系统的速度环为研究对象,提出了一种将滑模控制和模糊控制相结合的双重控制方法,并通过仿真来验证控制效果。

1 永磁同步电机模型

由于永磁同步电机具有强耦合性和多变量的特性,建立准确的电机数学模型是一项艰巨的任务。为了更好地实现模糊滑模双重控制器的设计,在建模过程中应当考虑三相绕组是否完全相等、气隙磁链是否呈正弦分布以及绕组电感参数变化等复杂因素的影响。

以表贴式永磁同步电机为例,其电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= Ri_d + L \frac{d}{dt} i_d - p\omega Li_q; \\ u_q &= Ri_q + L \frac{d}{dt} i_q + p\omega (Li_d + \Psi_f) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: L 为定子电感; R 为电阻; u_d, u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压; i_d, i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; p 为电机极对数; ω 为机械角速度; Ψ_f 为永磁体磁链。

电机的转矩为:

$$T = \frac{3}{2} p \Psi_f i_q \quad (2)$$

式中 T 为电机输出转矩。

电机的动力学方程为:

$$T - T_L = J \frac{d}{dt} \omega \quad (3)$$

式中: T_L 为电机负载转矩, J 为转动惯量。

2 模糊滑模控制器设计

2.1 滑模控制器

对于表贴式永磁同步电机,课题组采用 $i_d = 0$ 的磁场定向控制方式,首先建立系统的状态变量 x_1 和 x_2 :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \omega_d - \omega; \\ x_2 &= \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: x_1 和 x_2 为系统的状态变量, ω_d 为指定转速, $\dot{x}_1$ 为 x_1 关于时间的导数, $\dot{\omega}$ 为角速度 ω 关于时间的导数。

定义滑模面 s 为:

$$s = x_1 + cx_2 \quad (5)$$

式中 c 为待设计常数。

设置控制器的滑模控制律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (6)$$

式中: $\dot{s}$ 为 s 关于时间的导数, ε 和 k 均为待设计常数, $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数。

可得控制函数为:

$$i_q = \frac{2J}{3p\Psi_f \int_0^\tau [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks] d\tau} \quad (7)$$

式中 τ 为表示时间过程的参数。

则李雅普诺夫函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (8)$$

式中: V 为构造的李雅普诺夫函数。

此时系统满足 $\dot{V} = \dot{s}s < 0$, 由李雅普诺夫稳定性定理知系统状态趋于渐近稳定。其中, $\dot{V}$ 表示为函数 V 关于时间的导数。

2.2 模糊控制器

针对永磁同步电机的速度环,设计模糊 PI 控制器。首先定义控制的输入、输出为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大,并用 NB, NM, NS, Z, PS, PM 和 PB 表示。

将通过反馈得到的误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入,在模糊器进行模糊推理,接着通过在所制定的模糊规则表对其进行解模糊化,输出参数 k_p 和 k_i 的变化值,达到实时调整 PI 参数的目的。

模糊控制的设立非常依赖于操作员的经验和专业知识,课题组将误差 e 和误差变化率 e_c 的论域均设计为 $[-6, 6]$, 输出的参数 k_p 和 k_i 的变化值 Δk_p 和 Δk_i 的论域均为 $[-8, 8]$ 。选取三角形隶属度函数建立输入输出变量隶属函数,图 1 所示为输入参数的隶属度函数,图 2 所示为输出参数的隶属度函数。并为其制定模糊控制规则,参数变化值 Δk_p 和 Δk_i 的模糊控制规则分别见表 1 和表 2。

2.3 模糊滑模控制器

在单独地运用模糊控制器或者滑模控制器对永磁同步电机进行调速时,都存在一定的缺陷:单独采用模糊控制会降低控制精度,得到的结果不够准确;单独采用滑模控制则会有超调量大、响应速度慢的问题。

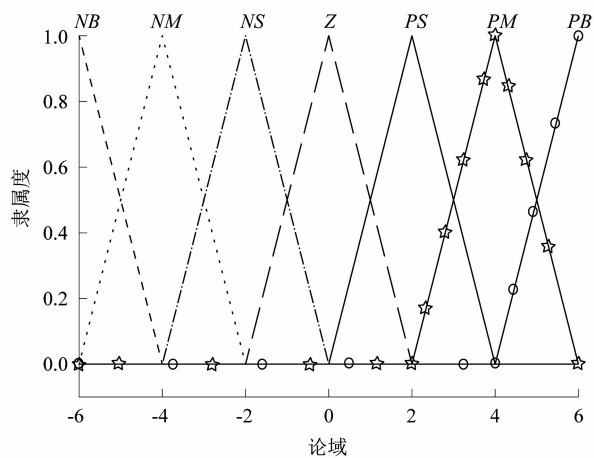


图 1 输入参数的隶属度函数

Figure 1 Membership function of input variable

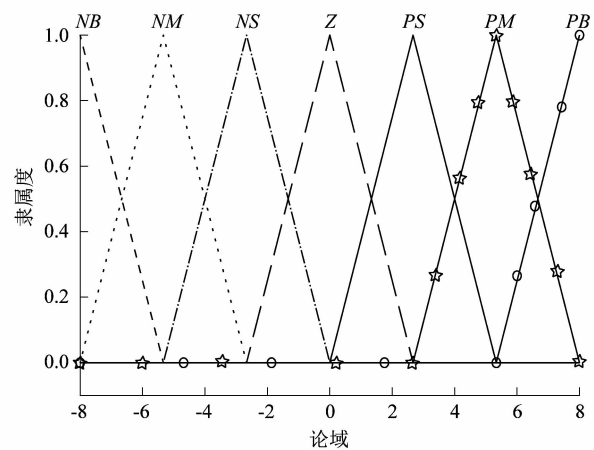


图 2 输出参数的隶属度函数

Figure 2 Membership function of output variable

表 1 Δk_p 的模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules of Δk_p

e	e_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PM	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 的模糊控制规则

Table 2 Fuzzy control rules of Δk_i

e	e_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

因此课题组采取同时运用模糊控制和滑模控制对永磁同步电机的调速系统进行双重控制,即在电机控制的转速环中同时应用模糊控制和滑模控制,以降低系统的超调量,也可以提高系统的动态响应速度并降低系统的抖振,同时能够保证最后调节效果的准确性。

在 MATLAB/Simulink 中搭建模糊滑模双重控制器如图 3 所示。

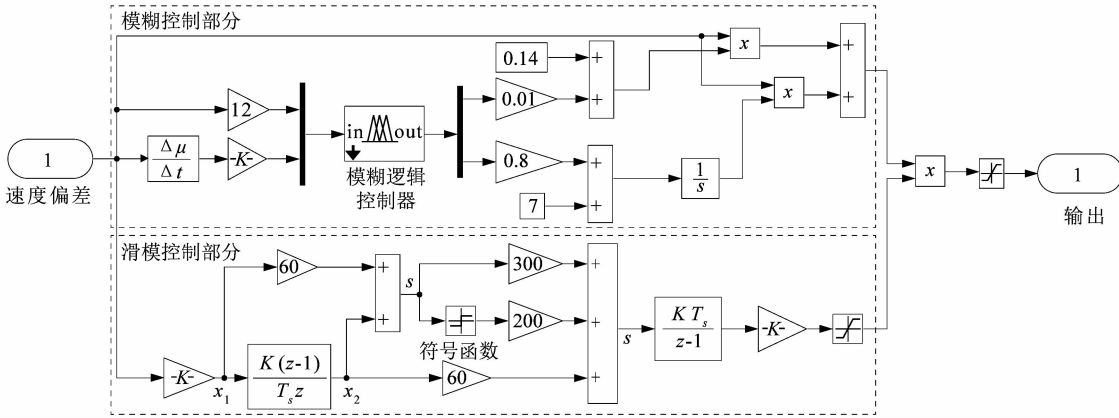


图 3 模糊滑模双重控制器

Figure 3 Fuzzy sliding mode dual controller

3 仿真与结果分析

为了验证所设计的控制器的性能,在 MATLAB/Simulink 搭建如图 4 所示的电机仿真模型,采用 $i_d = 0$

的永磁同步电机矢量控制方式,并将其与单一的模糊控制和滑模控制进行对比。

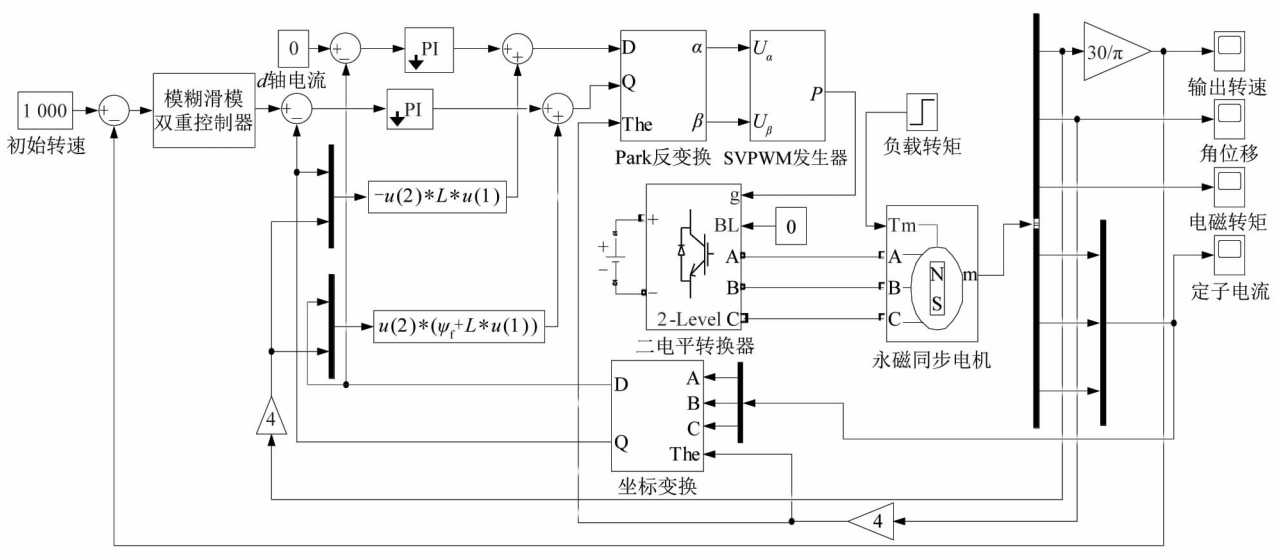


图 4 PMSM 矢量控制模型

Figure 4 PMSM vector control model

在 MATLAB/Simulink 的仿真建模中,仿真条件设置为:采样周期为 $T_s = 10 \mu\text{s}$,磁链 $\Psi_f = 0.1827 \text{ Wb}$,等效电感 $L = 5.25 \text{ mH}$,转动惯量 $J = 0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,极对数 $P = 4$ 。采用变步长 ode23tb (stiff\TR-BDF2) 算法,仿真时间设置为 800 ms 。给定的初始参考转速 $\omega_d = 1000 \text{ r/min}$,仿真以阶跃信号为输入信号,初始时刻的负载转矩设置为 $T_L = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$,而后在 200 ms 时负载转矩变为 $T_L = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

当分别对电机调速系统采用滑模控制器、模糊控制器和模糊滑模双重控制器时,在初始时刻无负载情况下电机转速的控制效果如图 5 所示,在 200 ms 时负载转矩从 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 阶跃到 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$,此时电机转速的控制效果如图 6 所示。从图 5~6 中可以看出与单一地采用滑模控制器相比,采用模糊滑模双重控制器时系统的响应速度更快,并可以有效减小抖动;与单一地采用模糊控制器相比,采用模糊滑模双重控制器时系统的控制精度更高。

综上所述,采用模糊滑模双重控制器可以在有效地提高系统的动态响应速度的同时保证良好的控制精度。

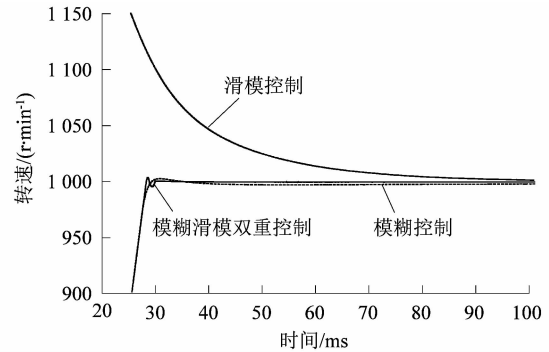


图 5 速度阶跃响应

Figure 5 Speed step response

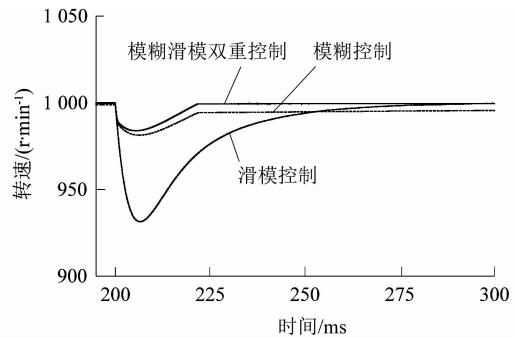


图 6 负载扰动

Figure 6 Load disturbance

4 结语

针对永磁同步电机的速度调节系统,课题组设计了基于模糊控制和滑模控制的双重控制策略。通过在 MATLAB/Simulink 中进行仿真发现该控制策略可以有效避免单一模糊控制或滑模控制的一些负面效果,可以有效地提高系统的稳定性和精度。今后的研究中,可将此控制思路进行改进,通过结合其他优秀的控制算法,进一步优化控制性能。

参考文献:

- [1] 何万青. 永磁同步电机在新能源车上的应用[J]. 时代汽车, 2023(1):106.
 - [2] 陈浩维. 浅谈永磁同步电机的技术优势及应用前景[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(9):81-82.
 - [3] 杨清. 永磁同步电机在带式输送机中的应用研究[J]. 机械管理开发, 2022, 37(8):175-176.
 - [4] 吕从鑫, 汪波, 陈静波, 等. 永磁同步电机控制策略综述与展望[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(4):2-6.
 - [5] 王淑旺, 范诚, 徐群龙. 永磁同步电机调速系统新型滑模变结构控制策略[J]. 汽车技术, 2022(1):1-7.
 - [6] 李瑞琦, 边火丁, 杨树炳, 等. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机控制系统[J]. 轻工机械, 2022, 40(4):52-56.
 - [7] 禹聪, 康尔良. 永磁同步电机模糊滑模速度控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7):98-104.
 - [8] BENMEZIANE M, ZEBIRATE S, ABDELKADER C, et al. Fuzzy sliding mode control of doubly-fed induction generator driven by wind turbine[J]. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019, 10(3):1592-1602.
 - [9] 陈昱昊, 郑宾. 基于模糊 PI 控制的永磁同步电机矢量控制性能研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7):75-81.
 - [10] 徐婷婷. 基于滑模控制的表贴式永磁同步电机控制系统设计[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(10):13-15.
-
- (上接第 70 页)
- [3] 王罗俊, 彭来湖, 史伟民. 针织选针器小尺度往复摆动特性研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(2):16-22.
 - [4] HAN F Q, LI Z Z, ZHANG D Y. Study on oblique cam type mechanical torsional vibrator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 215/216:37-41.
 - [5] HARRIS D M, BUSH J W M. Generating uniaxial vibration with an electrodynamic shaker and external air bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 334:255-269.
 - [6] OSADCHYY V, NAZAROVA O, HUTSOL T, et al. Adjustable vibration exciter based on unbalanced motors[J]. Sensors, 2023, 23(4):2170.
 - [7] DIAO W D, PAN Q S, LI Y H, et al. Development of a resonant piezohydraulic hybrid actuator[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(7):075002.
 - [8] ZHANG Z T, LIANG Y Z, ZHAO K, et al. Research on the vibration characteristic of a seawater hydraulic piston pump system and vibration reduction approach[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90212-90230.
 - [9] LIU Y, WANG T, GONG G F, et al. Present status and prospect of high-frequency electro-hydraulic vibration control technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(6):1-16.
 - [10] 吴万荣, 孙鹏. 基于位置反馈的液压激振系统特性[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5):101-105.
 - [11] 原佳阳, 阎耀保, 陆亮, 等. 旋转直接驱动式电液压力伺服阀机理及特性分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16):186-194.
 - [12] 葛正, 王维锐, 秦成林, 等. 用于控制液压激振系统的交变配流泵:2015101365727[P]. 2016-08-17.

