

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107356

基于 MFO 的车用 PMSM 控制策略研究*

王延年 吕志发 武阳 范昊
(西安工程大学 电子信息学院 西安 710048)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)弱磁控制系统的建模不精、抗干扰能力不足等问题,分析了该系统的基本结构,并对该系统的控制策略进行主要研究,但是目前常规的模糊 PID 控制下的系统依然存在不足之处。提出了模糊控制与飞蛾火焰优化(MFO)算法相结合的控制策略,重新构建出控制系统中的电流环和速度环,对系统的控制参数实时自整定。将传统的 PID 控制算法、模糊 PID 控制算法和本文中的模糊飞蛾火焰优化算法(MFO)法进行仿真测试,通过这 3 种算法得出相应的转速和转矩的仿真曲线,并对转速、转矩的波动误差和恢复时间进行数据分析,最终结果表明,本文所提出的算法控制下的系统恢复时间相比于传统 PI 控制算法、模糊 PID 控制算法分别提升了 0.04 s 和 0.02 s,且抗干扰能力也具有明显提升。

关键词: 永磁同步电机弱磁控制;模糊 PID 控制;飞蛾火焰优化算法;自整定

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on vehicle PMSM control strategy based on MFO

Wang Yannian Lyu Zhifa Wu Yang Fan Hao

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the weak magnetic control system of permanent magnetic synchronous motor (PMSM), the basic structure of the system is analyzed, but the system under the conventional fuzzy PID is still insufficient. A control strategy combining fuzzy control with moth flame optimization (MFO) algorithm, constructs the current loop and speed loop in the control system and self-rectify the control parameters in real time. This paper tests the traditional PID control algorithm, fuzzy PID control algorithm, obtains the corresponding speed and torque simulation curve and analyzes the fluctuation error and recovery time. The final results show that the system recovery time under the control of the algorithm has improved 0.04 s and 0.02 s, compared with the traditional PI control algorithm and fuzzy PID control algorithm and anti-interference capability.

Keywords: flux weakening control of PMSM; fuzzy PID control; MFO; self tuning

0 引言

在如今这个节能环保的社会背景下,电动汽车将逐渐成为日常生活中的重要交通工具工具^[1],因永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)相比于其他电机具有很多独特的优点^[1],将 PMSM 作为电动汽车的驱动电机正在被广泛应用^[2]。

虽然 PMSM 驱动下的系统的调速精度高且效率也有所提高^[3],但是 PMSM 在实际运用过程中,它的优越性能并没有完全发挥出来^[4],目前 PMSM 弱磁控制系统中的控制器仍然采用的是传统的 PI 控制器或常规的模糊 PI 控制器调节^[5],传统的 PI 控制算法简单,易于实现^[6],但传统的

PI 控制器在使用当中过分依赖工程人员的工作经验^[7];而模糊 PI 控制算法虽然具有不错的鲁棒性及容错性,但一般不会轻易更改已经制定好的模糊控制规则^[8],因此对 PMSM 弱磁控制算法的研究仍具有重要意义^[9]。

目前,针对传统的弱磁控制算法当中所普遍存在的一些问题^[10],许多专家和学者将先进的一些先进的控制算法传统控制算法相结合,进一步提高了弱磁控制系统的动态性能^[11]。本文引入模糊控制算法与飞蛾火焰优化(moth-flame optimization, MFO)控制算法相结合^[12],设计了 MFO 模糊 PI 控制器,通过 MFO 对模糊控制中的量化因子和比例因子的优化,很好地抑制了系统内部因超调引起的振荡,有效地提高了系统的抗扰能力。

收稿日期:2021-07-22

* 基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021GY-076)、西安工程大学(柯桥)研究生创新学院研究生联合培养项目(19KQYB02)资助

$$M_n = S(M_i, F_j) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (10)$$

式中: M_i 为第 i 只飞蛾, F_j 为第 j 个火焰, D_i 为第 i 只飞蛾到第 j 个火焰的距离, b 为数螺旋形状常数, t 的范围为 $[-1, 1]$ 。

为了减少计算时间,提高运行效率,火焰的更新公式为:

$$flame_no = round\left(N - k * \frac{N-1}{T}\right) \quad (11)$$

式中: k 为当前迭代次数, N 为最大火焰数量, T 为最大迭代次数。

2.2 MFO 模糊控制器设计

1) 速度环设计

模糊控制器通常采用系统误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入控制量,根据 e 和 e_c 相关参数,凭借模糊规则定义决定输出的大小,从而实现对参数的实时可调能力。本文采用模糊控制器这一特点并结合负 i_d 补偿弱磁控制,进而提高了系统的自适应能力。其结构如图 3 所示。

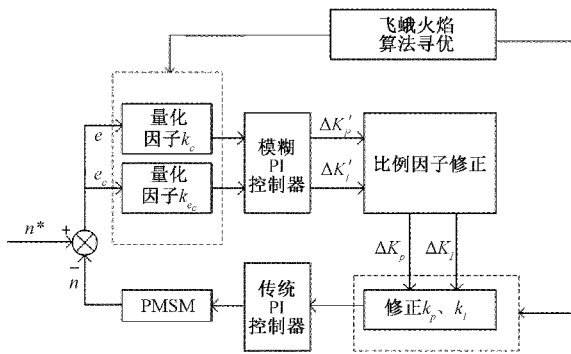


图 3 模糊控制结构原理

偏差 e 和偏差率 e_c , 输出 ΔK_p 和 ΔK_i , e 和 e_c 的关系为:

$$\begin{cases} e(k) = n^* - n \\ e_c(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (12)$$

隶属函数选用三角形函数,该函数具有计算量较小、灵敏度高的特点,采用 Mam-dani 型为模糊推理理论,得出模糊控制的输出量,根据隶属函数制定参数 ΔK_p 和 ΔK_i 的模糊规则,如表 1 所示。

表 1 ΔK_p 和 ΔK_i 模糊规则

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

每个语言的输入和输出所对应的变量有 7 个不同的语言值:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。根据不同的变量所对应的语言值,对输入和输出进行模糊化。

2) 电流环设计

(1) 量化因子和比例因子定义

输入量的量化因子为:

$$\begin{cases} k_e = f_e / e \\ k_{e_c} = f_{e_c} / e_c \end{cases} \quad (13)$$

比例因子为:

$$k_u = u / f_u \quad (14)$$

式中: e 为误差, e_c 为误差变化量, u 为输出量, f_e 为误差的模糊子集, f_{e_c} 为误差变化率的模糊子集。

(2) 模糊规则库

模糊规则库的核心是模糊控制器,在整个控制过程中起着重要作用,模糊子集同速度环控制器,并根据控制经验总结出模糊规则,如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则表

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	O	O	PM	PB	PB	PB	PB
PM	O	O	PM	PB	PB	PB	PB
PS	NS	NS	O	PM	PM	PM	PM
ZO	NM	NM	NS	O	PS	PM	PM
NS	NM	NM	NM	NM	O	PS	PS
NM	NB	NB	NB	NB	NM	O	O
NB	NB	NB	NB	NB	NM	O	O

(3) 反模糊化

经过模糊规则处理后输出量并不能直接参与被控对象的运算当中,还需要经过反模糊处理才能得到可以进行系统控制运算的数据。本设计使用重心法解模糊,重心法公式为:

$$u = \frac{\sum_{m=1}^5 u_i u_m}{\sum_{i=1}^5 u_i} \quad (15)$$

式中: u 为反模糊化后的输出量, u_i 为各组元素的权重。

3 实验结果分析

为了验证 MFO 模糊 PI 控制算法的控制性能,对 3 种算法进行仿真实验,首先使用 MATLAB 软件根据原理图搭建 Simulink 系统仿真模型。电机参数如下: PMSM 的额定电压为 $U=200$ V, 额定转速 $n=1500$ r/min, 转动惯量 $J=0.000231$ kg·m², 定子绕组 $R=1.2$ Ω, 永磁磁链 $\Psi_f=0.15$ Wb, 电机极对数 $P_n=4$, d, q 相绕组电感分别为 $L_d=$

6.35 mH、 $L_q = 6.35$ mH。设定电机转速为 1 500 r/min，仿真时间为 0.24 s，起始负载转矩为 0 N，为验证系统的抗扰动能力，分别在 0.09 s 和 0.18 s 分别增加 5 N 和 10 N 负载。实验结果如图 4 和 5 所示。

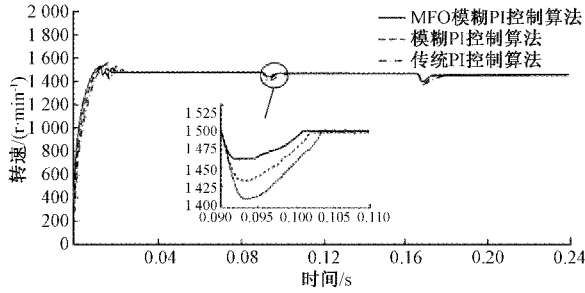


图 4 电机转速运行曲线

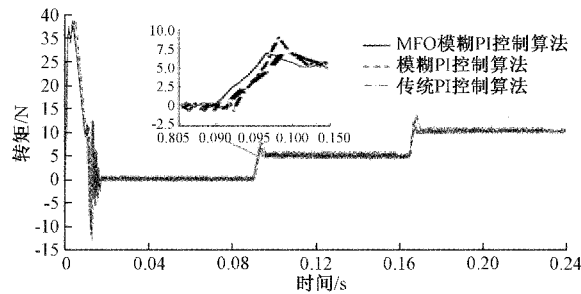


图 5 电机转矩曲线

根据仿真结果图 4 和 5 的数据可得出表 3。

表 3 实验结果对比

目标曲线	控制方法	最大波动误差	恢复时间/s
转速曲线	MFO 模糊	40 r/min	0.01
	模糊 PI	65 r/min	0.012
	传统 PI	90 r/min	0.014
转矩曲线	MFO 模糊	1.8 N	0.01
	模糊 PI	2.7 N	0.012
	传统 PI	4 N	0.014

从图 4 和 5 中可以看出，本文中 MFO 模糊 PI 控制算法的曲线，从初始启动到达到稳定运行的状态用了 0.02 s，而其他两种控制算法从初始启动到稳定状态所需时间均大于 0.02 s，可以看出改进的模糊 PI 控制器响应速度的更快。从表 3 中可以看出，在 0.09 s 时刻给定一个 5 N 的阶跃信号作为负载扰动，MFO 模糊 PI 控制算法的恢复时间更短，且抗干扰能力强。

4 结 论

本文分析了 PMSM 弱磁控制的基本原理，针对车用 PMSM 的抗干扰能力不足、鲁棒性不强等问题，提出了 MFO 模糊 PI 控制算法，将 MFO 与模糊 PI 控制算法相结合，通过 MFO 进一步优化了模糊 PI 控制算法的输出，使

得 PMSM 弱磁控制系统更加稳定。该算法参数自整定，无需精确建模，并传统 PI 控制算法及常规的模糊 PI 控制算法行对比仿真实验，得到转速和转矩的曲线，通过曲线得到对应的最大波动误差以及系统的恢复时间，并对这两组数据进行分析，最终结果显示，本文的 MFO 模糊控制算法相比于传统 PI 和模糊 PI 控制算法的响应速度快，抗干扰能力强，更适用于 PMSM 弱磁控制系统。

参 考 文 献

- [1] 刘春光,张征,陈路明,等. 电动车用永磁同步电机转速自抗扰控制[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(11): 71-77.
- [2] 温嘉斌,郭晗,荆超,等. 电动车用永磁同步电机转子结构对弱磁调速性能分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(6): 73-78.
- [3] 李宏玉,丁善峰,余超,等. 基于滑模变结构的永磁同步电机控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 112-116.
- [4] 王要强,冯玉涛,马小勇,等. 永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 230-238.
- [5] 刘攀,杨鹏,马文良,等. 基于模糊切换增益调节的 PMSM 滑膜控制算法的仿真[J]. 电子测量技术, 2019, 42(19): 106-110.
- [6] 申永鹏,郑竹风,王耀南,等. 基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 22-29.
- [7] 时培成,夏仙阳,陈晨,等. 基于场路耦合方法的永磁同步电机温度场研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 425-434.
- [8] 赵希梅,王浩林,朱文彬. 基于自适应模糊控制器和非线性扰动观测器的永磁直线同步电机反馈线性化控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 595-602.
- [9] 洪剑锋,王善铭,孙旭东,等. 矢量控制下的车用永磁电机电磁振动特性分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(6): 1-9.
- [10] 朱焜秋,顾志伟. 基于模糊神经网络逆系统的五自由度无轴承永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 72-81.
- [11] 王伟然,吴嘉欣,张懿,等. 永磁同步电机模糊自整定自适应积分反步控制[J]. 电.工.技术学报, 2020, 35(4): 724-733.
- [12] 杜涛,曾国辉,黄勃,等. 基于改进飞蛾扑火优化算法的 PMSM 矢量控制优化[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 52-55.
- [13] 赵其进,廖自力,苗成林,等. 电传动车辆轮毂电机恒转矩弱磁控制策略[J]. 浙江大学学报(工.学版), 2021, 55(1): 195-202.
- [14] HELMI A, ALENANY A. An enhanced moth-flame

optimization algorithm for permutation-based problems[J].
Evolutionary Intelligence, 2020, 13(1): 741-764.

- [15] PRATIWI A, EFENDI M, MURDIANTO F. CUK converter for power factor correction using moth flame optimization-PI controller[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 982: 012020.

作者简介

王延年,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为工业信息化系统、计算机控制系统、工业信息通信系统、专用工业电

子装置开发。

E-mail: lzf_1392010@163.com

吕志发(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为工业控制。

E-mail: 1215530103@qq.com

武阳,硕士研究生,主要研究方向为工业控制。

E-mail: 1256267432@qq.com

范昊,硕士研究生,主要研究方向为工业控制。

E-mail: 1244714279@qq.com