

# 基于模糊 PI 控制的永磁同步电机矢量控制性能研究<sup>\*</sup>

陈昱昊 郑 宾

(中北大学电气与控制工程学院 太原 030051)

**摘 要:**针对传统 PI 控制方法在对永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)矢量控制时,由于 PI 参数固定,导致系统对多变工作情况的适应性较差,易出现控制精度不高,稳定性欠佳等情况。提出在传统 PI 控制的基础上增加模糊控制器,经过对 PI 参数的在线整定,使电机的控制精度以及稳定性等性能指标均得到明显的提升。在 MATLAB/Simulink 中搭建整体 PMSM 矢量控制系统,对比分析在不同工作情况下传统 PI 控制和增加模糊控制模块后的转速,转矩波形图。实验结果证明,模糊 PI 控制下转速输出超调量比传统 PI 控制分别减少了 83% 和 100%,调节时间分别减少了 17% 和 20.55%,输出转矩振荡明显减少,稳定性提升。由此验证了模糊 PI 控制的良好效果,满足了永磁同步电机高精度,快速响应以及输出稳定的工作要求。

**关键词:**永磁同步电机;PI 控制;模糊控制;MATLAB/Simulink 仿真

**中图分类号:** TM341      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.4024

## Research on vector control performance of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy PI control

Chen Yuhao Zheng Bin

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** For the traditional PI control method in the vector control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), due to the fixed PI parameters, the adaptability of the system to changeable working conditions is poor, and it is easy to have low control accuracy and poor stability. It is proposed to add a fuzzy controller on the basis of traditional PI control. Through the on-line tuning of PI parameters, the control accuracy and stability of the motor are significantly improved. Build the overall PMSM vector control system in MATLAB / Simulink, and compare and analyze the speed and torque waveforms of traditional PI control and fuzzy control module under different working conditions. The experimental results show that the speed output overshoot under fuzzy PI control is reduced by 83% and 100% respectively compared with the traditional PI control, the adjustment time is reduced by 17% and 20.55% respectively, the output torque oscillation is significantly reduced and the stability is improved. Thus, the good effect of fuzzy PI control is verified, and the working requirements of high precision, fast response and stable output of permanent magnet synchronous motor are satisfied.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; PI control; fuzzy control; MATLAB/Simulink simulation

### 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)因其工作效率较高,电磁转矩较大,以及维护起来较为方便,散热性能较好等突出优点被广泛应用于工业制造等领域。现如今,为了响应我国建设“绿水青山”的可持续发展理念,电动汽车的普及率变得

越来越高,永磁同步电机的作用体现得愈加明显<sup>[1-2]</sup>。在实际运行过程中,通常是在带载,或者负载有突变等复杂外界条件下工作,这就对电机提出了能够快速响应给定指令,输出超调量很小甚至无超调,对系统参数的变化和外界扰动做到自适应调整和抗扰动,具有很强的鲁棒性等性能要求。传统 PMSM 矢量控制方法中,对转速环采用

收稿日期:2022-04-22

<sup>\*</sup> 基金项目:重点实验室基金(6142606203101)项目资助

PI 控制方法,该方法具有结构复杂度较低,实现起来较为容易的优点<sup>[3]</sup>。但同时也存在很大的局限性,即需要不断调试 PI 参数来达到目标控制效果,对于工程经验的依赖程度较高。由于 PMSM 中变量较多,是一个非线性的系统而且复杂程度较高,单靠 PI 控制往往达不到最佳控制效果,故如何获得对于 PMSM 更加行之有效的控制策略成为了当前的研究重点。

文献[4]提出利用蜻蜓算法优化分数阶双闭环 PI 参数,通过分析蜻蜓捕食特性,将待优化的参数类比为食物的空间位置进而构建目标函数,可以提高 PMSM 矢量控制系统鲁棒性以及动态响应性能。文献[5]提出一种新型智能算法,以人工神经网络为主要控制手段,但该方法设计难度大,实现起来较为困难,不利于在实际工程中普及应用。文献[6]提出一种预测电流的 PMSM 控制策略,该方法存在前一电流预测结果不准确会对后续结果造成连锁反应的缺陷。文献[7-8]提出了利用遗传算法来整定 PI 参数的方法,在遗传算法的寻优过程中,产生的每代个体结果随机性较大,在所规定的代数内得到的解可能无法满足最优。本文提出在传统 PI 控制的基础上,增加模糊控制器的方法。该方法能够将人工调节 PI 参数的经验加入到控制过程中,不断在线整定比例增益  $K_p$  和积分增益  $K_i$  的值,这样可以使得整定后的 PI 参数适应当前工作情况,得到最优控制效果。相较于传统固定参数的 PI 控制方法,能够有效减少 PMSM 输出响应的超调,提高电机的控制精度和抗干扰能力。同时文献[9]提到的自适应模糊控制方法主要针对模糊控制中的论域进行了调整。文献[10]参考模型自适应控制方法针对不确定被控对象的参考模型,需要进行大量公式计算,会导致误差增大,控制不准确的问题。本文首先对于 PMSM 参考模型进行了详细的确定,各项电机参数已知,关系明确,省去了间接型自适应模糊控制器的设计。随后对量化因子进行在线调整固定合适模糊论域,可以使得输入输出更加稳定。最后采用重心法进行解模糊,可以精确反映出输入信号的微小变化,最终输出更为准确的变化 PI 参数,优化控制效果<sup>[9-10]</sup>。整体控制过程更加简单,高效,易于实现。

## 1 永磁同步电机矢量控制系统

本文以 PMSM 的矢量控制方法为基础进行研究。建立 PMSM 在  $d-q$  坐标系下的数学模型,良好的数学分析是整体矢量控制性能的研究关键,配合空间矢量脉宽调制技术(space vector pulse width modulation, SVPWM),通过控制逆变器开关的通断状态进而合成电压矢量来驱动电机运转<sup>[11-12]</sup>,最终构建整体双闭环的控制系统。

永磁同步电机由于是存在多个变量成分,且变量之间存在耦合关系的非线性复杂系统,为了便于研究分析,本文做出如下假设。

1) 定子绕组分布均匀,呈 Y 型联结,绕组轴线互差  $120^\circ$ ;

- 2) 电机内部铁芯饱和忽略不计;
  - 3) 转子的阻尼绕组忽略不计或无阻尼绕组;
  - 4) PMSM 中的永磁体无导电性;
  - 5) PMSM 中电能磁能转化效率为  $100\%$ ,电机运行过程中不会有热量产生,磁滞损耗等于 0。
- 各变量符号如表 1 所示。

表 1 各符号含义

符号	含义
$u_d, u_q$	定子电压分量
$i_d, i_q$	定子电流分量
$R_s$	定子电阻
$\phi_d, \phi_q$	定子磁链分量
$\omega_e$	电角速度
$L_d, L_q$	定子绕组电感分量
$H_f$	永磁体等效到定子侧磁链分量
$n_p$	电机极对数
$J_m$	转子转动惯量
$T_e$	电磁转矩
$T_m$	负载转矩
$B$	阻尼系数
$\omega_m$	机械角速度

则 PMSM 在  $d-q$  坐标系下的定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_e \phi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_e \phi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + H_f \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = 1.5 n_p i_q [i_d (L_d - L_q) + H_f] \quad (3)$$

此时,电机运动平衡方程为:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - B\omega_m \quad (4)$$

经过对于 PMSM  $d-q$  轴数学模型的分析,电机的转矩控制可以通过对  $i_d, i_q$  的控制来实现。对于凸极 PMSM,  $L_d \neq L_q$ ,而对于隐极 PMSM 来说,  $L_d = L_q$ ,此时,  $T_e = 1.5 n_p i_q H_f$ ,采用  $i_d = 0$  的矢量控制方式,使得电磁转矩  $T_e$  与  $i_q$  呈线性关系,此时的永磁同步电机与他励直流电机等效,大大简化了控制策略。

在对 PMSM  $d-q$  轴数学模型有了基本分析后,本文采用  $i_d = 0$  的控制策略,搭建双电流环和转速环的 PMSM 矢量控制系统。如图 1 所示。

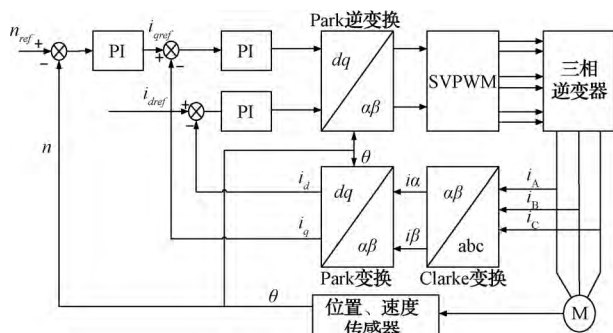


图1 PMSM 矢量控制系统结构

## 2 模糊 PI 控制器设计

### 2.1 模糊 PI 控制的基本原理

由于传统的 PI 控制效果欠佳,现引入模糊控制器来进行优化。模糊控制是一种利用操作员在实际工程应用中的操作经验或者专家知识,采用语言型的控制规则的控制方式。根据控制规律之间的模糊连接,在不放弃严格数学关系的前提下,能够使得控制效果优于常规控制器。模糊 PI 控制器可以对 PI 参数做出实时调整,进而改善控制结果<sup>[13-15]</sup>。误差  $e$  与误差变化率  $e_c$  作为输入,输出  $\Delta K_p$  与  $\Delta K_i$  作为原 PI 控制参数  $K_{p0}$  与  $K_{i0}$  的补偿。模糊控制基本结构如图 2 所示。

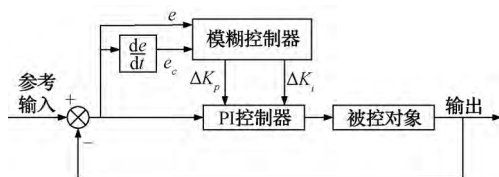


图2 模糊控制基本结构

$$\begin{cases} K_p^* = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i^* = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $K_{p0}$  与  $K_{i0}$  为原 PI 控制参数;  $\Delta K_p$  与  $\Delta K_i$  为补偿量;  $K_p^*$  与  $K_i^*$  为补偿修正后的新 PI 控制参数。

### 2.2 模糊 PI 控制器的设计

模糊控制过程如图 3 所示。

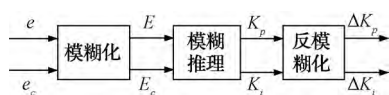


图3 模糊控制过程

其中,  $e$  与  $e_c$  模糊化为  $E$  与  $E_c$ ;  $K_e$ 、 $K_c$  为量化因子,如式(6)所示。

$$\begin{cases} E = K_e \times e \\ E_c = K_c \times e_c \end{cases} \quad (6)$$

将输入误差  $e$  与误差变化率  $e_c$  的论域定义为  $\{-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ , 输出  $K_p$ 、 $K_i$  的论域定义为  $\{-1, 0, 1\}$ , 模糊

集合为  $\{(NB), (NM), (NS), (ZO), (PS), (PM), (PB)\}$ , 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。本文选取了三角形隶属度函数。定义输入输出隶属度函数如图 4 所示<sup>[16]</sup>。

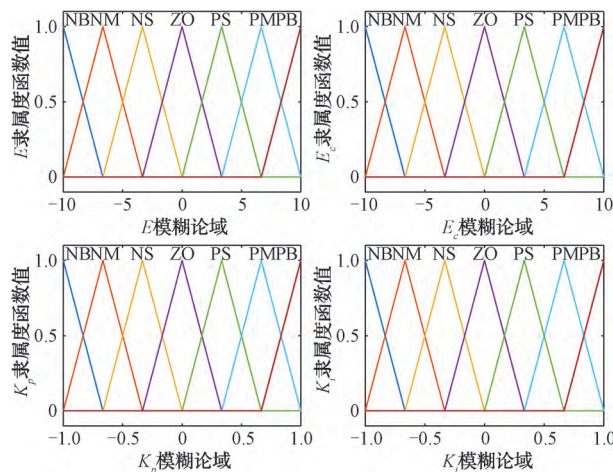


图4 输入输出的隶属度函数

$K_p$  越大,系统的响应速度越快,过大容易产生超调,反之,  $K_p$  越小,系统响应速度也会随之变慢。  $K_i$  越大,误差消除越快,过大的话会产生积分饱和现象,导致超调产生。若  $K_i$  过小会导致系统的稳态误差无法消除,所以  $K_i$  的选取大小应视情况而定。

模糊控制规则是根据专家知识或经验来定的,经过大量的实验,最终得到控制规则如表 2、3 所示。

表2  $\Delta K_p$  的模糊规则

$E$	$E_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	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3  $\Delta K_i$  的模糊规则

$E$	$E_c$						
	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	NS	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	PS	PM	PM	PB	PB



$K_p$  与  $K_i$  的输出曲面如图 5、6 所示。

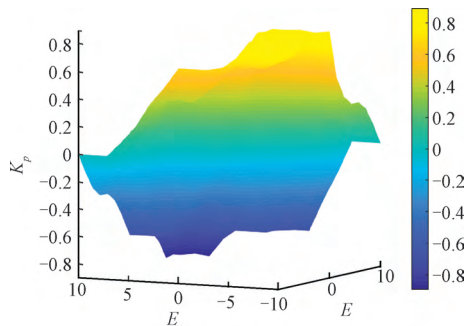


图 5  $K_p$  输出曲面

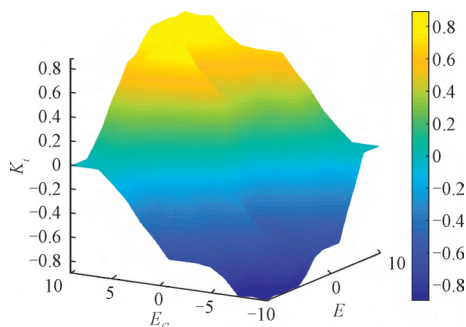


图 6  $K_i$  输出曲面

由于需要补偿原 PI 参数,故最后经过反模糊化过程,

这里的反模糊化方法采用重心法,将输出模糊量转变为精确量。其计算公式为:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_m \cdot y(i)}{\sum_{i=1}^n y(i)} \quad (7)$$

式中:  $y(i)$  为输出的模糊量;  $y_m$  为各组元素权重。由于模糊集合定义为了  $\{(NB), (NM), (NS), (ZO), (PS), (PM), (PB)\}$ , 所以  $n = 7$ 。采用重心法的好处在于可以灵敏反映输入量的变化,解模糊输出更加精准,使控制效果更优。

在 MATLAB/Simulink 中搭建模糊 PI 控制模型,如图 7 所示。

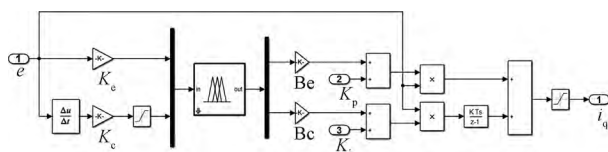


图 7 模糊 PI 控制模型

### 3 系统仿真及结果

基于以上控制策略分析,在 MATLAB/Simulink 中搭建改进后的 PMSM 矢量控制系统。将模糊 PI 控制模块与传统 PI 控制模块分别作用于系统后,通过参数的调整比较仿真结果。整体仿真系统模型如图 8 所示。

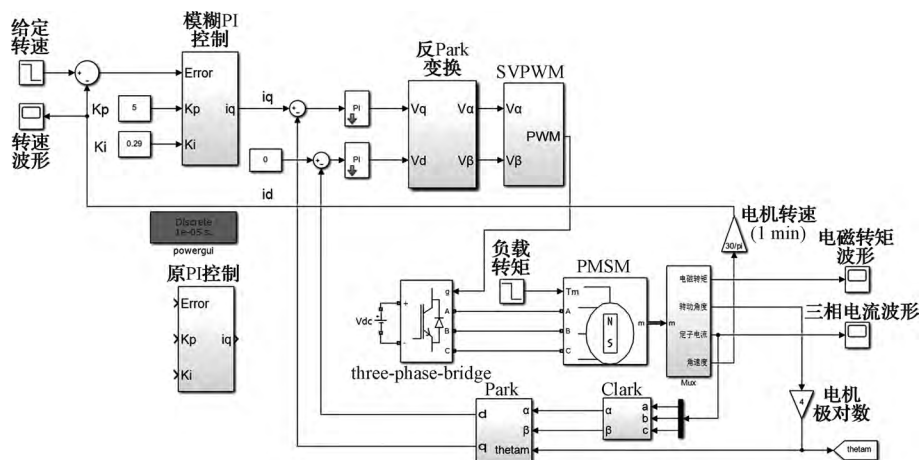


图 8 整体系统仿真模型

电机各项参数如表 4 所示。

电机给定转速为 1 000 r/min,仿真时间定为 0.1 s,分别在如下几种情况下进行系统仿真研究,模拟不同工作条件下的运行结果<sup>[17]</sup>。

- 1) 无负载启动,指定转速为 1 000 r/min,在 0.05 s 转速突变为 0 r/min。
- 2) 无负载启动,指定转速为 1 000 r/min,在 0.05 s 突然施加 10 N·m 负载转矩。

- 3) 以 4 N·m 负载启动,指定转速为 1 000 r/min,在 0.05 s 负载突降为 0。

仿真波形如图 9~13 所示。

通过对以上仿真结果的分析,可以看出,在 1 000 r/min 额定转速作为输入的情况下,模糊 PI 控制方式比传统 PI 控制拥有更小的超调量和更短的调节时间,转速突降为 0 模拟电动汽车碰到意外情况的紧急制动,同样可以看到模糊 PI 的控制效果要优于传统 PI 控制。

表4 PMSM 各项参数

参数	数值
$L_d$	8.5 mH
$L_q$	8.5 mH
$B$	0.008 N·m·s
$H_f$	0.19 Wb
$n_p$	4
直流母线电压 $U_{dc}$	311 V
$R_s$	2.5 $\Omega$

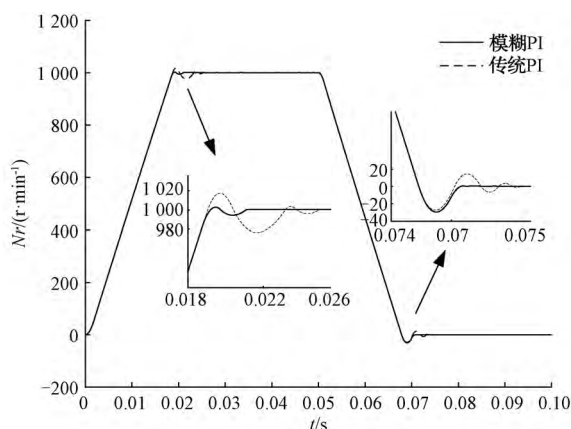


图9 无负载启动,0.05 s 转速突变为 0 r/min 下转速波形

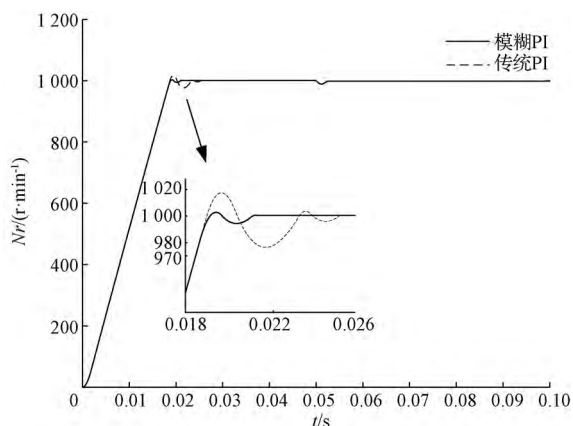


图10 无负载启动,0.05 s 突然施加 10 N·m 负载转矩下转速波形

在0.05 s 突加 10 N·m 的外加力矩来模拟不同的负载情况。施加负载的一瞬间,电机转速略有下降,随后迅速恢复至给定值。电机在无转矩情况下启动,电磁转矩迅速上升,随着电机运行达到稳定,电磁转矩回落至 0 N·m 附近。根据电机的运动平衡方程计算,  $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ , 没有外加负载转矩,  $T_m = 0$ ,  $T_e = B\omega_m$ , 代入数据得,  $T_e = 0.837$  N·m, 与仿真结果相符。通过仿真结果可以明显的观察到,模糊

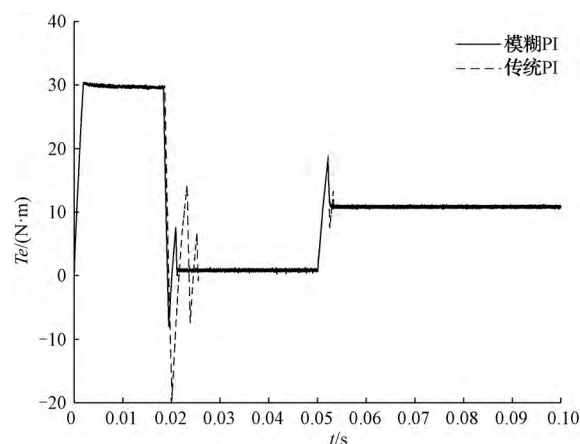


图11 无负载启动,0.05 s 突然施加 10 N·m 负载转矩下转矩波形

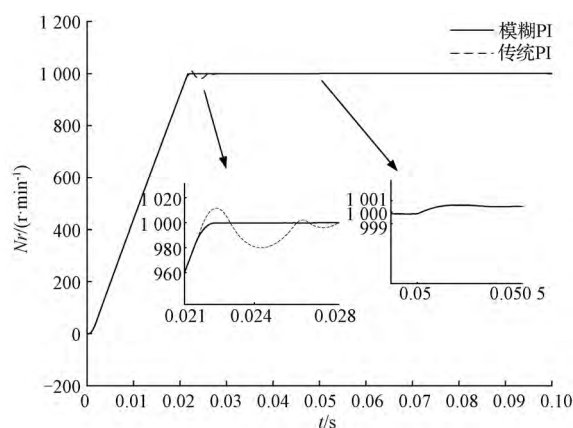


图12 4 N·m 负载启动,0.05 s 负载突降为 0 N·m 下转速波形

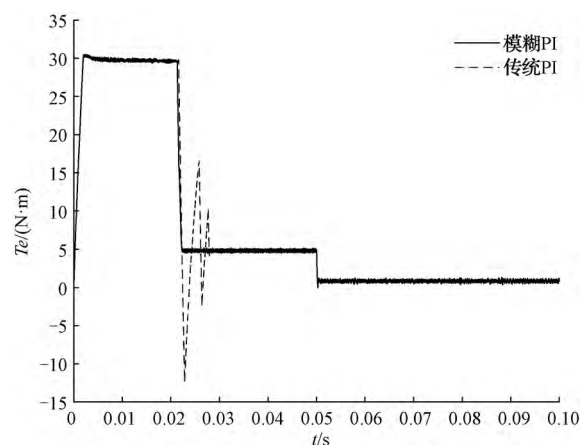


图13 4 N·m 负载启动,0.05 s 负载突降为 0 N·m 下转矩波形

PI 控制对电磁转矩的调节超调量更小,振荡次数更少,调节时间更短,相较于传统 PI 控制能够更好的适应复杂多

变的工作情况,抗干扰能力更强。

当带载启动时,同样可以看到模糊 PI 控制下电机输出转速无超调,相比传统 PI 控制有明显的优势。在 0.05 s 负载突变为 0 后,电机转速有一个很小范围的向上波动;电磁转矩在模糊 PI 控制作用下能更快跟踪给定值,相比传统 PI 控制,超调量更小,调节时间更短。以转速输出达到 1 000 r/min 为例,通过局部放大后读取数据,计算出各性能指标。设置误差带宽度为  $\pm 0.2\%$ ,  $T_s$  为调节时间,  $\sigma_p$  为超调量。  $T_s$  为转速进入 1 000 r/min  $\pm 0.2\%$  误差带时刻且后续输出转速保持在误差带范围内。表 5 为模糊 PI 相较于传统 PI 的优化结果。

$$\sigma_p = \frac{\text{转速最大值} - 1\,000}{1\,000} \times 100\% \quad (8)$$

	无负载启动, 0.05 s 转速突 变为 0 r/min	无负载启动, 0.05 s 突加 10 N·m 负载	4 N·m 负载启 动,0.05 s 负载 突降为 0 N·m
$\sigma_p$	83.88	83.88	100
$T_s$	17	17	20.55

通过数据分析,可以更直观的看出,情况 1)与情况 2)下,模糊 PI 控制比传统 PI 控制超调减少了 83.88%,调节时间减少了 17%,情况 3)下,模糊 PI 控制无超调产生,比传统 PI 控制超调减少了 100%,调节时间减少了 20.55%。

图 14~16 所示为在 3 种情况下采用本文模糊 PI 控制的比例参数与积分参数变化曲线。

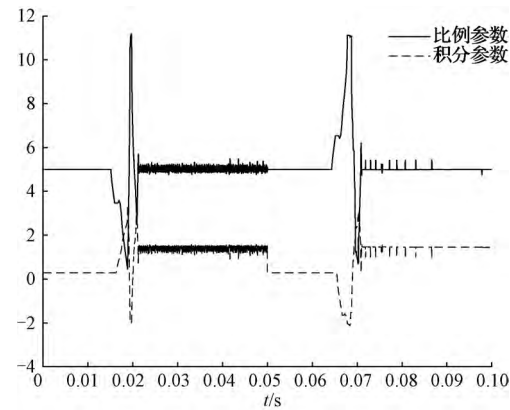


图 14 无负载启动,0.05 s 转速突变为 0 r/min 工况下比例,积分参数曲线

#### 4 结 论

通过分析仿真波形可知,相较于固定增益系数的传统 PI 控制,无论是无载启动还是带载启动,模糊 PI 控制都能有效地抑制转速转矩的超调量,缩短调节时间。突加负载后,转速和转矩输出振荡较小,且快速跟随给定信号。结

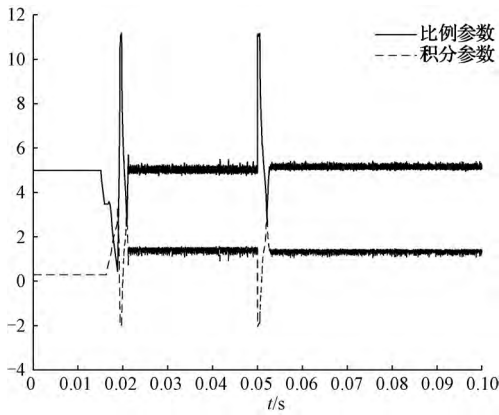


图 15 无负载启动,0.05 s 突然施加 10 N·m 负载转矩工况下比例,积分参数曲线

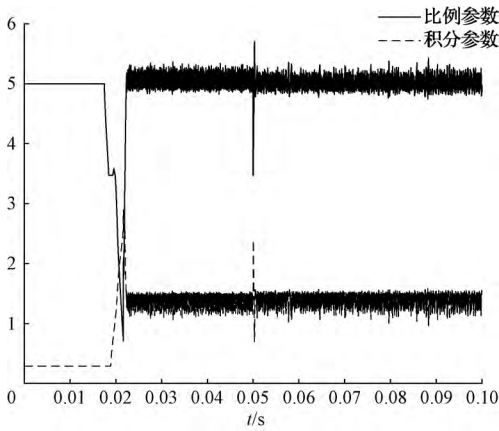


图 16 4 N·m 负载启动,0.05 s 负载突降为 0 N·m 工况下比例,积分参数曲线

果表明,将模糊 PI 应用于永磁同步电机矢量控制方法后控制效果更加优秀,对于系统参数的变化有更好的适应性,整体来看,应用模糊 PI 控制器能有效地提升系统的鲁棒性与稳定性。

#### 参 考 文 献

- [1] 贾宁,程瑶,田又源. 基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12):61-66.
- [2] 宋舒,龚建国,林薇,等. 纯电动汽车用永磁同步电机空间矢量控制系统建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(4):118-122, 140.
- [3] YANG Z G, CAI T F. Research on the vector control of permanent magnet synchronous motor based on SVPWM[J]. Mechatronic Systems and Control, 2020, DOI:10.2316/J.2020.201-0093.
- [4] 杜涛,曾国辉,黄勃,等. 基于蜻蜓算法分数阶 PI 的 PMSM 矢量控制优化[J]. 电子测量与仪器学报,

- 2020,34(10):132-141.
- [5] 邱丹,陶诚.基于单神经元算法的内嵌式永磁同步电机智能驱动控制[J].电机与控制应用,2017,44(10):36-41.
- [6] 杜川.基于电流预测控制的永磁同步电机矢量控制策略[J].沈阳工业大学学报,2019,41(6):616-620.
- [7] 郑世祺,唐小琦,卢少武,等. PMSM 伺服系统参数自整定研究[J].电气传动,2013,43(3):10-13,17.
- [8] 李浩,蒋雪峰,黄文新.基于遗传算法的永磁同步电动机 PI 参数自整定[J].微特电机,2015,43(1):58-61.
- [9] 崔家瑞,李擎,张波,等.永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J].中国电机工程学报,2013,33(S1):190-194.
- [10] 庞科旺,马亚民.船用永磁同步电机参考模型自适应模糊控制研究[J].舰船科学技术,2018,40(3):76-80,105.
- [11] GUI J, ZHANG N, LIU L J. Simulation of PMSM vector control based on SVPWM and SVPWM algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2012, 580: 320-324.
- [12] YANG C, ZHANG P, DING S C, et al. Effect of different SVPWM modulation carrier forms on performance and loss of permanent magnet synchronous motor [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(2): e12642.
- [13] 胡勤丰,陈威振,邱攀峰,等.适用于连续加减速的永磁同步电机模糊增益自调整 PI 控制研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):907-915.
- [14] SHI Y L, QIAO Z Y, BAI K Q, et al. A fuzzy adaptive PID control algorithm with improved quantification factor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1828(1): 012154.
- [15] 骆晓玲,王子含.基于模糊 PID 的水下航行器运动控制研究[J].电子测量技术,2020,43(19):53-56.
- [16] 周向阳,舒通通,吕子豪,等.基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J].仪器仪表学报,2021,42(12):263-271.
- [17] 程涛,李红岩.超螺旋滑模控制的永磁同步电机 DTC 优化[J].国外电子测量技术,2022,41(1):1-7.

#### 作者简介

陈昱昊,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机控制技术。

E-mail:461151817@qq.com

郑宾,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为动态测试与测控技术等。

E-mail:A2482460423@163.com