

永磁同步电机模糊PI控制的设计与仿真

宋子龙¹, 夏石涛²

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年10月12日; 录用日期: 2024年11月5日; 发布日期: 2024年11月12日

摘要

传统的基于PI的永磁同步电机(PMSM)控制存在调节时间长、超调量大、适应性差等问题。因此, 本文采用了一种基于FLC和PI的闭环SVPWM控制系统。该系统可以提高速度并显著减少过冲量。FLC (Fuzzy Logic Controller)的两个输入是转速误差和转子或主轴的误差变化率。模糊控制器根据MF (Membership Function)和模糊规则进行推理和去模糊。该逻辑算法最终输出一个信号以实现FLC控制。在MATLAB/Simulink中对基于模糊PI的PMSM闭环SVPWM控制系统进行建模和仿真。在仿真实验中, 经过与不同工况下传统PI控制的对比分析, 得出以下结论: 基于FLC和PI的永磁同步控制器与传统PI算法相比, 具有反应快、过冲可忽略不计、对变化具有更强的弹性等优点。

关键词

永磁同步电机, PI控制, 模糊控制

Design and Simulation of the Fuzzy PI Control System for PMSM

Zilong Song¹, Shitao Xia²

¹School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Received: Oct. 12th, 2024; accepted: Nov. 5th, 2024; published: Nov. 12th, 2024

Abstract

Conventional PI-based permanent magnet synchronous motor (PMSM) control has problems such as long regulation time, large overshoot, and poor adaptability. Therefore, a closed-loop SVPWM control system based on FLC and PI is used in this paper. The system can improve both the speed and

文章引用: 宋子龙, 夏石涛. 永磁同步电机模糊 PI 控制的设计与仿真[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5849-5856.

DOI: 10.12677/mos.2024.136533

significantly reduce the amount of overshooting. The two inputs to the FLC are the rotation speed error and the rate of change of error for the rotor or spindle. The fuzzy controller performs inference and defuzzification according to the MF and fuzzy rules. This logic algorithm finally outputs a signal to achieve FLC control. A Fuzzy PI based PMSM Closed-loop SVPWM Control System is modeled and simulated in MATLAB/Simulink. In the simulation experiment, after comparing and analyzing with the traditional PI control under different working conditions, the following conclusions are obtained: the PMSM controller based on FLC and PI has the following strengths: fast reaction, negligible overshoot, and greater resilience to change compared to the conventional PI algorithm.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Proportional-Integral Control, Fuzzy Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

PMSM 是一个具有多变量和强耦合特性的非线性系统[1]。同时, 交流控制系统具有非线性和不确定性。传统的控制方法使得难以处理非线性、变化参数和负载干扰的影响。为了应对上述问题, 需要一些非线性控制策略或集成控制策略。在本文中, 该算法使用了一种结合了 FLC 和 PI 的方法。该系统可以根据不断变化的电机运行条件和系统输入, 及时调整 PI 的基本参数。以下工作步骤旨在通过研究 PMSM 的基本操作特性来获得可用的控制系统。在实验的多次重复中调整参数以接近出色的性能。

近年来, 在永磁同步电机的模糊 PI 控制研究中, 主要集中于引入自适应机制, 通过在线学习和改进模糊规则, 使控制算法能够实时调整, 适应不同工况下的需求。尽管模糊 PI 控制在永磁同步电机控制中取得了一定的成果, 但仍然面临一些挑战, 模糊规则的设计依赖于专家经验, 缺乏系统化的方法。

随着系统复杂性的增加, 模糊控制器的计算负担可能成为瓶颈。未来的研究方向可以包含开发基于机器学习的模糊规则生成方法, 实现自动化设计。深入探索多变量控制策略, 以应对更加复杂的控制需求。

2. 基本结构和工作原理

2.1. 控制系统架构

系统的基本框架架构。如图 1 所示。

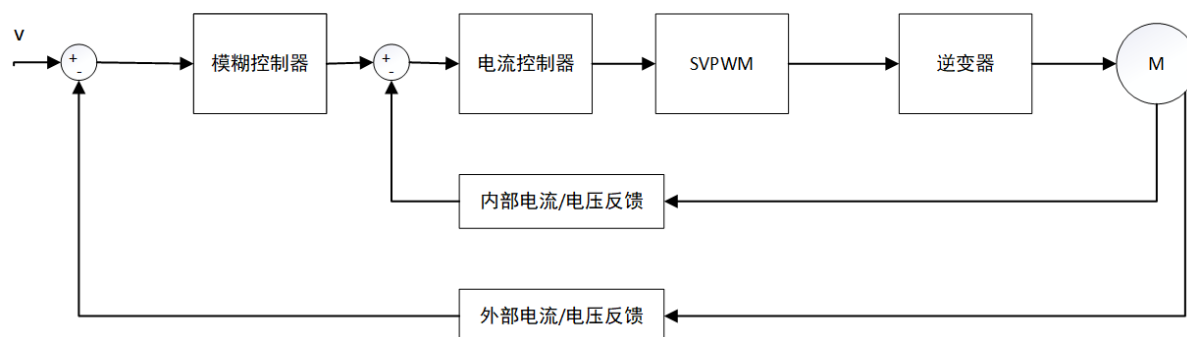


Figure 1. The basic architecture of motor control

图 1. 电机控制的基本框架结构

2.2. 数学模型

假设电机是理想电机。电机可以用旋转 d - q 坐标中的数学符号表示:

定子 - 电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \dot{\psi}_d - \psi_q \omega_r \\ u_q = R_s i_q + \dot{\psi}_q - \psi_d \omega_r \end{cases} \quad (1)$$

定子磁通联动方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

在等式(1)到等式(3)中, u 、 i 、 ψ (ψ_f) 和 T_e 表示定子电压、电流、磁通联动和电磁转矩; d 和 q 是直轴或交叉轴分量; R 是定子绕组电阻; L_d 和 L_q 表示定子绕组的直线轴和绕组的交叉轴的电感; p 是极对数; ω_r 是转子的角速度。

根据上述数学模型, 当确定永磁体的磁通联动和电感时, PMSM 的转矩由 i_d 和 i_q 确定。因此, 我们可以通过改变 i_d^* 和 i_q^* 的大小, 然后将实际电流 i_d 和 i_q 跟踪 i_d^* 和 i_q^* 来实现对电机扭矩和速度的控制。当 i_d 为 0 时, 可以找到 T_e 和 i_q 之间的线性关系[2]。换句话说, 利用这种线性关系, 我们可以通过调整 i_q 来实现电机的扭矩控制。

2.3. PMSM 的闭环 SVPWM 控制

2.3.1. SVPWM 技术

该技术将电机和逆变器视为一个单元, 并为电机提供恒定振幅的圆磁场[3]。该技术谐波少, 电压利用率高, 适用于数字控制系统。因此, SVPWM 是 PMSM 控制的主要方法。

2.3.2. 控制过程

永磁同步电机矢量控制系统主要由以下几个部分组成: 速度控制器和电流控制器、坐标转换模块、

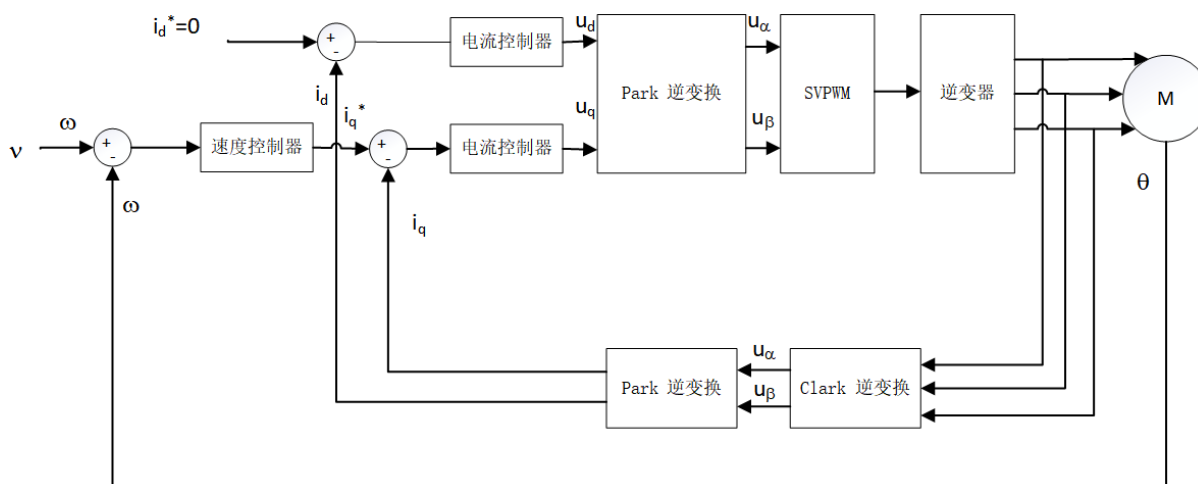


Figure 2. The control structure of PMSM

图 2. PMSM 的控制结构

SVPWM 模块和逆变器。闭环矢量控制的主要步骤如下：首先，速度控制器将给定的速度值与实际采样值进行比较。之后，速度控制器输出电流信号 i_q^* 。定子两相电流 i_a 和 i_b 是采样后得到的。在 Clark 和 Park 变换之后，两相电流转换为反馈电流 i_d 和 i_q 。电流控制器将给定值 i_d^* 和 i_q^* 与实际值 i_d 和 i_q 进行比较，然后输出电压值 u_d 和 u_q 。之后，输出电压值通过 Inverse Park 变换进行转换，得到电压 u_α 和 u_β 。将 u_α 和 u_β 输入到 SVPWM 模块进行计算的值得。SVPWM 输出逆变器驱动控制信号。逆变器产生可变频率和振幅的三相正弦电流。电流输入到电机的定子。用于 PMSM 的 SVPWM 双闭环的控制架构如图 2 所示。

3. FLC 的制定

传统的 PI 控制通常应用于线性系统。控制过程的参数和情况通常不会发生急剧变化。但是，实际应用情况通常不会像预期的那样。当线性部分受到外部干扰和系统参数变化的影响时，自适应解决方案可以通过调整参数来保持预设的性能[4]。使用模糊控制可以有效避免上述问题。同时，模糊控制可以充分利用专家经验来设计模糊规则。

3.1. FLC 的结构

FLC 的结构通常可分为四个主要部分。本文讨论和研究了三个主要部分：模糊器、推理机制和去模糊器[5]。模糊控制器的常见架构，根据维度数分为一维 FC、二维 FC 和三维 FC。二维 FC 有两个输入变量(通常为 e 、 e_c)。由于二维 FC 在动态性能方面提供了很好的改进，并且具有简单的架构，因此它是最常用的。除此之外，我们还应该注意电机具有惯量和负载。结合 PMSM 的动态特性，该文采用二维 FC 结构构建模糊控制系统，如图 3 所示。

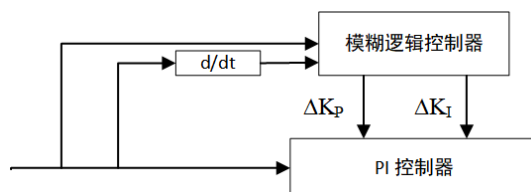


Figure 3. Two-dimensional FC architecture

图 3. 二维 FC 结构

3.2. 模糊化

模糊化的过程从通过 MF 计算输入开始，然后用语言变量来表示它们[6]。本文使用的二维 FC 结构有两个输入 e 和 e_c ，以及三个输出 u_p 和 u_i 。上述值分别对应于 PI 的误差、误差变化率和三个参数。误差 e 是使用三角形 MF 定义的，它分为七个模糊子集：A [-13 -10 -7]；B [-10 -7 -3]；C [-7 -3 0]；D [-1.5 0 1.5]；E [0 3 7]；F [3 7 10]；G [7 10 13]。误差 e_c 的变化率使用三角 MF 定义，该三角 MF 分为七个模糊子集：A [-13 -10 -7]；B [-10 -7 -3]；C [-7 -3 0]；D [-1.5 0 1.5]；E [0 3 7]；F [3 7 10]；G [7 10 13]。输出 u 定义为使用三角形 MF，它分为七个模糊子集：A [-1.3 -1 -0.7]；B [-1 -0.7 -3]；C [-0.7 -0.3 0]；D [-0.3 0 0.3]；E [0 0.3 0.7]；F [0.3 0.7 1]；G [0.7 1 1.3]。

3.3. 模糊规则的制定

在这些步骤中，模糊推理程序的关键步骤是控制规则[6]。当输入误差为正且其值较大时，表示实际值与目标值之间存在较大差距。当间隙较大时，控制器应增强比例分量的作用，以提高系统的快速性。当间隙较小时，控制器可以适当减弱比例分量的作用，增强积分分量的作用，以减小误差。当 e_c 相对较大时，算法可以适当地削弱导数分量。当 e_c 相对较小时，控制器可以增强衍生分量。推理机制根据模糊

输入和知识库[7]得出去模糊的值。根据上述推理过程, 通过大量的实验和观察, 研究人员建立了模糊规则, 如下图 4 到图 5 所示。

$\begin{smallmatrix} e \\ e_c \end{smallmatrix}$	A	B	C	D	E	F	G
A	G	G	F	F	E	D	D
B	G	F	F	E	E	D	C
C	G	G	G	F	F	C	C
D	G	G	G	D	C	B	B
E	E	E	D	C	C	B	B
F	E	D	C	B	B	B	A
G	D	D	B	B	B	A	A

Figure 4. Kp fuzzy control rule

图 4. Kp 模糊规则

$\begin{smallmatrix} e \\ e_c \end{smallmatrix}$	A	B	C	D	E	F	G
A	A	A	B	B	C	D	D
B	A	A	B	C	C	D	C
C	A	B	C	C	D	E	E
D	B	B	B	E	G	G	F
E	B	C	D	E	E	F	G
F	D	D	E	E	F	G	G
G	D	D	E	F	F	G	G

Figure 5. Ki fuzzy control rule

图 5. Ki 模糊规则

3.4. 模糊规则的制定

将从模糊推理中获得的模糊值转换为显式控制值。对于本文中的系统, 模糊化使用质心法。质心法将 MF 曲线和水平坐标包围的区域质心作为模糊推理的输出。质心法的数学表达式为:

$$v_0 = \frac{\int v \mu_v(v) dv}{\int \mu_v(v) dv} \quad (4)$$

在公式(4)中, v 是模糊推理的输出值, v 是变量, $\mu_v(v)$ 是变量 v 对应的函数的值。完成上述步骤后, FLC 构建就完成了, 如图 6 所示。

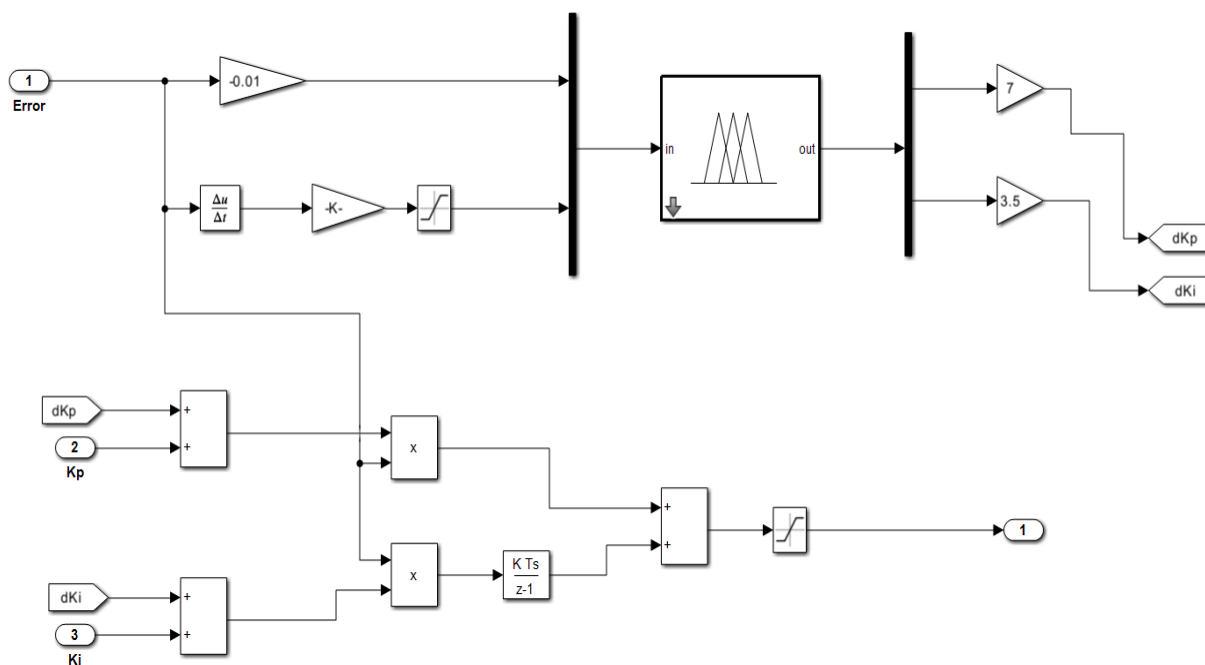


Figure 6. Fuzzy Logic Controller module
图 6. FLC 模块

4. 实验仿真结果

4.1. 虚拟模型构建

基于图 1 所示的三相 PMSM 矢量控制系统框图, 在 MATLAB/Simulink 中建立了模拟 PMSM 实际工

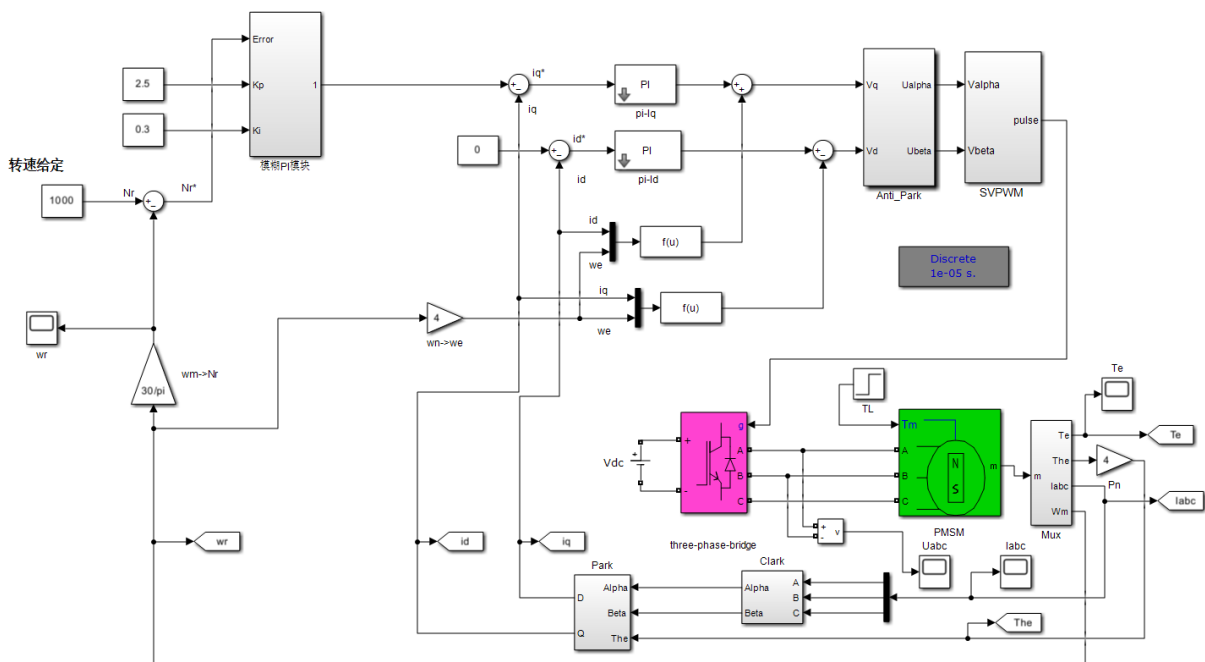
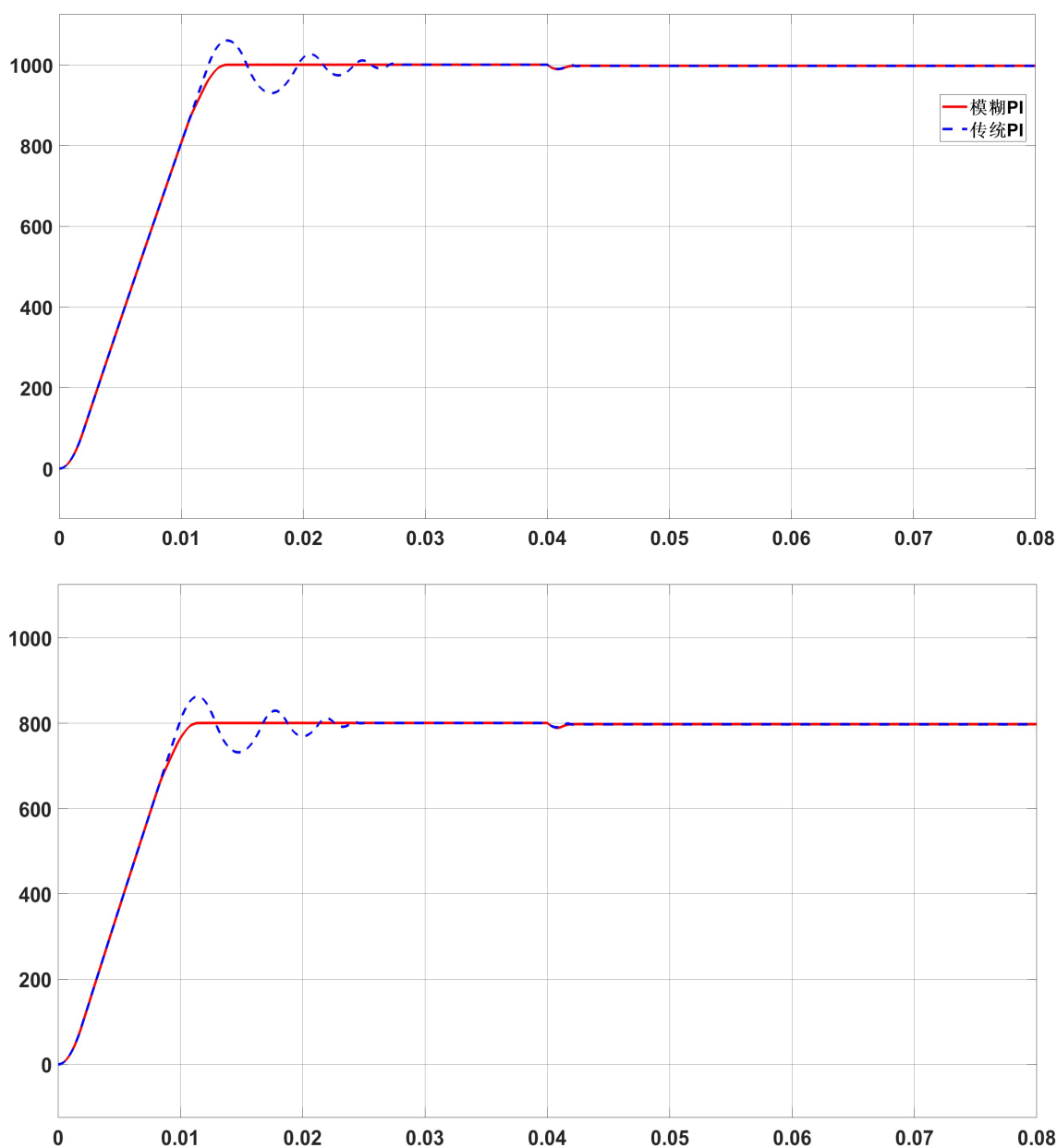


Figure 7. PMSM control system simulation model
图 7. PMSM 控制系统仿真模型

作状态的虚拟结构, 如图 7 所示。仿真实验中电机的基本参数是极对数: 4; 定子电阻 R_s : $0.958\ \Omega$; 阻尼系数 B : $0.008\ \text{Nm/s}$; d 轴电感 L_d : $5.25\ \text{mH}$; q 轴电感 L_q : 12 ; 额定转速: $1200\ \text{r/min}$ 。

4.2. 仿真结果

在 FLC-PI 控制器和常规 PI 控制器相关参数相同的前提条件下, 对比了上述两种不同系统的转速仿真曲线。如图 8 所示, 控制目标值从低到高设置: 800 、 1000 和 $1200\ (\text{r/min})$ 。经过分析, 可以得出以下结论。在系统稳定性方面, 两个系统最终都能达到稳态, 但 FLC-PI 系统的振荡较小。在系统快速性方面, FLC-PI 系统的稳定时间比传统 PI 短, FLC-PI 系统的速度曲线更平滑; 在系统过冲量方面, 减少模糊控制系统的过冲量; 从稳态控制精度的角度来看, FLC-PI 系统优于 PI 控制。根据实验曲线可以发现, 当系统受到干扰或输入发生变化时, FLC-PI 系统在保证系统的快速性和准确性的同时获得了较好的控制平滑性。



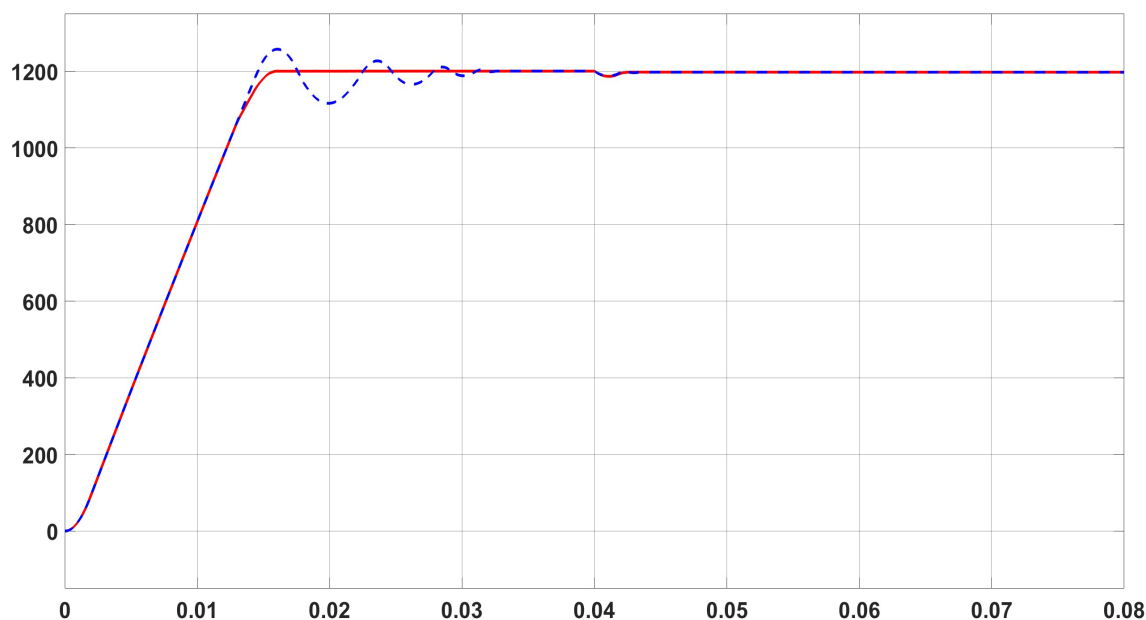


Figure 8. Analog curve

图 8. 模拟曲线

5. 结论

本文采用一种由 FLC 和 PI 相结合的智能控制方案来替代传统的 PI 控制, 构建了高性能的 PMSM 控制系统。经过仿真实验, 得出智能控制优化后控制系统的性能指标得到显著提升。FLC-PI 系统的振荡较小, 稳定时间比传统 PI 短, 速度曲线更平滑; 当系统受到干扰或输入发生变化时, 保证系统的快速性和准确性的同时获得了较好的控制平滑性。

然而, 在实践中, 模糊规则的制定很繁琐, 而且过程很复杂。其次, 本文中的系统使用了二维模糊控制器。该控制器主要由比例分量和积分分量组成, 但没有微分分量。如果系统对控制精度要求较高, 最好尽量使用精度更高的三维 FC, 使得性能指标得到显著提升。

参考文献

- [1] Zhang, L., Li, H., Shan, L., Zhang, L. and Zhang, L. (2023) Double-Hierarchical Fuzzy Exponential Convergence Law Fractional-Order Sliding Mode Control for PMSM Drive Control in Ev. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **47**, Article ID: 101536. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101536>
- [2] Gu, D., Yao, Y., Zhang, D.M., Cui, Y.B. and Zeng, F.Q. (2020) Matlab/Simulink Based Modeling and Simulation of Fuzzy PI Control for PMSM. *Procedia Computer Science*, **166**, 195-199. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.047>
- [3] Wang, X., Xing, Y., He, Z. and Liu, Y. (2012) Research and Simulation of DTC Based on SVPWM of Pmsm. *Procedia Engineering*, **29**, 1685-1689. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.195>
- [4] Salah, L. and Tahar, B. (2015) SVPWM Performance of PMSM Variable Speed and Impact of Diagnosis Sensors Faults. *Energy Procedia*, **74**, 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.803>
- [5] Jiang, W. (2011) The Application of the Fuzzy Theory in the Design of Intelligent Building Control of Water Tank. *Journal of Software*, **6**, 1082-1088. <https://doi.org/10.4304/jsw.6.6.1082-1088>
- [6] Bai, Y. and Wang, D. (2006) Fundamentals of Fuzzy Logic Control—Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. In: *Advances in Industrial Control*, Springer, London, 17-36. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4_2
- [7] Manuel, N.L., Inanç, N. and Lüy, M. (2023) Control and Performance Analyses of a DC Motor Using Optimized PIDS and Fuzzy Logic Controller. *Results in Control and Optimization*, **13**, Article ID: 100306. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100306>