

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.017

永磁伺服系统前馈型模糊二自由度控制研究*

马立新¹, 范洪成¹, 黄阳龙¹, 姚 鹏²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200333)

摘要:针对传统 PID 控制抗干扰能力差以及智能化控制方法计算复杂、模型难建立、不易应用等问题,在对模糊控制理论和二自由度原理分析的基础上,提出了一种在工程中易于实现的前馈型模糊二自由度控制策略。通过对前馈型二自由度模型化简变换,在变换后模型的基础上引入了模糊控制规则,使其同时具备模糊控制和二自由度控制的优点,实现了实时跟踪和自动整定控制参数的功能。利用 Matlab 工具建立了前馈型模糊二自由度控制系统仿真模型。研究表明,系统转速无超调,响应速度和扰动恢复时间比传统 PID 控制提高一倍。该控制方法具有良好的动、静态性能,实现了永磁伺服系统高速化、强抗干扰能力,提高了永磁伺服系统控制精度,为解决高精度数控系统提供了一种可行、易于实现的控制策略。

关键词:永磁伺服系统;前馈型模糊二自由度;实时跟踪;自动整定

中图分类号:TH39;TM921.47

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1229-04

Feedforward fuzzy 2-DOF control of PMSM servo system

MA Li-xin¹, FAN Hong-cheng¹, HUANG Yang-long¹, YAO Peng²

(1. Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Motor System Energy Saving Engineering Technology Research Center Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: Aiming at the problems that the interference can't be restrained by the traditional PID control strategy and some intelligent control methods are too complex to be calculated, established and applied, based on the analysis of fuzzy theory and two-degree-of-freedom(2-DOF) principle, an easy way was proposed to realize feedforward fuzzy 2-DOF control strategy. Feedforward 2-DOF model abbreviation transformation makes it have a combination of fuzzy control and the advantages of 2-DOF control, which helps achieve real-time tracking and auto-tuning function after the transformation model on the basis of introducing the fuzzy control rules. The feedforward fuzzy 2-DOF control system simulation model was established with the help of Matlab. The results indicate that the system realizes without overshoot, besides, its response speed and disturbance recovery time double the conventional PID control. The feedforward fuzzy 2-DOF control strategy achieves the permanent magnet synchronous motor(PMSM) servo system of high speed and strong anti-interference ability, and improves the dynamic and static performance and control precision. It provides a feasible and easy way to realize the control strategy for solving the high precision numerical control system.

Key words: PMSM servo system; feedforward fuzzy 2-DOF; real-time tracking; auto-tuning

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)^[1-2]是一种高效节能环保

型电机,因其自身的损耗小、功率因数高特点,大量的工业生产都以 PMSM 作为驱动电机,如数控机床、矿山机械、船舶等。

收稿日期:2015-04-27

基金项目:上海张江国家自主创新重点资助项目(201310-PI-B2-008)

作者简介:马立新(1960-),男,陕西安康人,博士,教授,主要从事电力系统稳定性与优化运行、电力电子与电力传动、电气系统故障诊断与模式识别方面的研究. E-mail:malx_ain@sina.com

传统的 PMSM 控制策略采用的是 PID 控制^[3-4], 其中 PID 控制中比例、积分、微分 3 个参数是根据已经建立好的数学模型进行整定的, 不能跟随系统参数的变化而自动做出相应的整定。尽管出现了一些智能化控制方法, 如: 遗传算法、蚁群算法以及神经元算法等。但是, 因为这些智能化控制方法计算量大, 模型很难确立导致在工程中难以应用。

本研究提出的前馈型模糊二自由度控制策略^[5-9]可弥补这些不足, 其结构模型简单, 在实际工程中易建立, 并且可以得到较好的控制效果。

1 永磁同步电机坐标变换及数学模型

1.1 永磁同步电机坐标变换

永磁同步电机原始模型复杂, 分析和求解非线性方程困难, 在实际应用中必须予以化简, 化简的基本方法就是坐标变换。坐标变换公式如下:

三相-两相变换: 即三相绕组 A、B、C 和两相绕组 α 、 β 之间的变换, 简称 3/2 变换。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

静止两相-旋转正交变换: 即从静止两相正交坐标系 α 、 β 到旋转正交坐标系 d 、 q 的变换, 简称 2s/2r 变换。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 永磁同步电机数学模型

以两级贴面式永磁同步电机空间矢量为例, 其电压方程、磁链方程、转矩方程如下:

电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & \omega \\ \omega & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

转矩方程为:

$$T_e = 3p(\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d)/2 \quad (5)$$

式中: $D = d/dt$ —微分算子; r_s —定子电阻; L_d, L_q — d 轴和 q 轴电感; U_d, U_q — d 轴和 q 轴电压; ω —转子角速度; i_d, i_q — d 轴和 q 轴电流; Ψ_m —永磁体磁通; Ψ_d, Ψ_q — d 轴和 q 轴磁通; Ψ_f —转子磁链。

2 前馈型模糊二自由度控制原理

2.1 模糊控制

模糊控制根据模糊逻辑和模糊推理, 模拟人类的思维方式, 根据系统参数的变化实时改变其控制参数。

模糊控制是以误差和误差变化率作为输入量, 以比例变化量 Δk_p 、积分变化量 Δk_i 、微分变化量 Δk_d 作为输出量, 通过模糊推理语句, 对 PID 中的控制参数进行实时调整。

2.2 二自由度控制

二自由度控制有前馈型和回路补偿型等控制方式。本研究选用前馈型二自由度进行说明, 其结构图如图 1 所示。

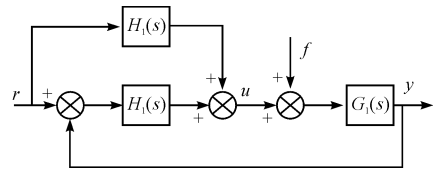


图 1 前馈型二自由度原理图

$H_1(s)$ —反馈通道控制; $H_2(s)$ —前馈通道控制; F —负载扰动信号

控制器的输出电压为:

$$u = (H_1 + H_2)r - H_1y \quad (6)$$

2.3 前馈型模糊二自由度控制

令:

$$F_1 = K_p + K_i/s + K_d s; F_2 = \alpha K_p + \beta K_d s \quad (7)$$

$$F_r = F_1 + F_2; F_y = F_1 \quad (8)$$

前馈型二自由度数学模型为:

$$u = [F_r \quad F_y] \begin{bmatrix} r \\ -y \end{bmatrix} = [(1 + \alpha)K_p + K_i/s + (1 + \beta)K_d s K_p + K_i/s + K_d s] \begin{bmatrix} r \\ -y \end{bmatrix} \quad (9)$$

令:

$$m = 1 + \alpha; n = 1 + \beta \quad (10)$$

得

$$u = K_p(mr - y) + K_i \frac{1}{s}(r - y) + K_d s(nr - y) \quad (11)$$

为了实现在前馈型二自由度模型中引入模糊控制规则, 需对前馈型二自由度模型进行简化变换, 式(11)为简化变换后的前馈型二自由度控制结构, 在简化后的前馈型二自由度结构基础上, 引入模糊控制规则, 可以同时整定二自由度中的控制参数, 使其同时具

备模糊控制和二自由度控制的优点,完成跟踪特性和干扰抑制特性。其原理如图2所示。

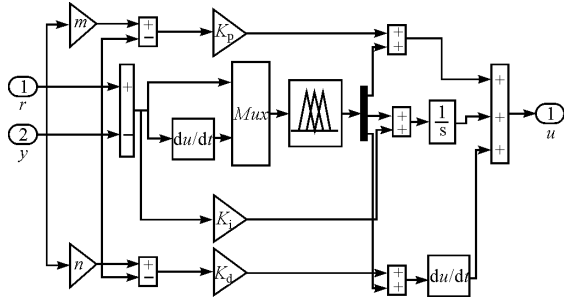


图2 前馈型模糊二自由度控制原理图

前馈型模糊二自由度控制仿真,仿真结果如图4所示。

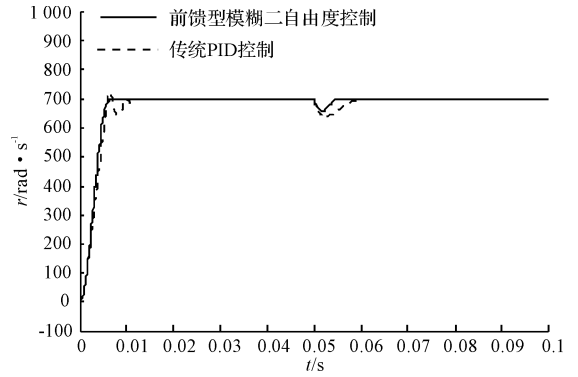


图4 两种控制模式下转速仿真曲线

4 仿真结果

4.1 电机参数

本研究实验选取的永磁同步电机参数如表1所示,永磁同步电机运行时负载变化情况为:当 $t = 0$ s时,给定负载转矩 $T_L = 3 \text{ N} \cdot \text{m}$,当 $t = 0.05$ s时,负载转矩跃变为 $T_L = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

表1 永磁同步电机参数

额定功率/ kW	额定转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	额定电压/ V	额定电流/ A
1	2 000	110	5.6

4.2 系统运行过程

仿真过程中,选取控制方式为: $I_d = 0$ 控制,其给定转速为 700 rad/s ,通过转速反馈环节,将速度误差 e 送到前馈型模糊二自由度控制器中,在控制器中系统自动跟踪并调节控制参数,最后根据电压空间矢量脉宽调制原理^[10-11],输出三相电流驱动电机。

前馈型模糊二自由度闭环矢量控制结构图如图3所示。

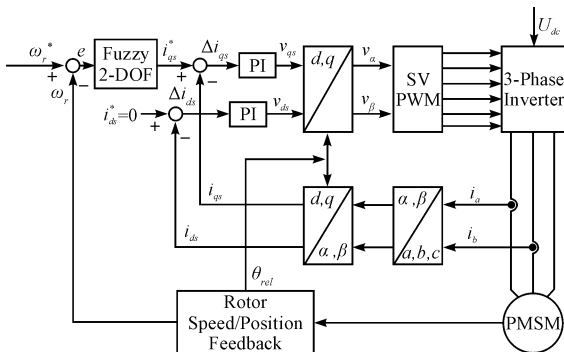


图3 前馈型模糊二自由度闭环矢量控制结构图

4.3 仿真结果

本研究利用 Matlab 工具分别对传统 PID 控制和

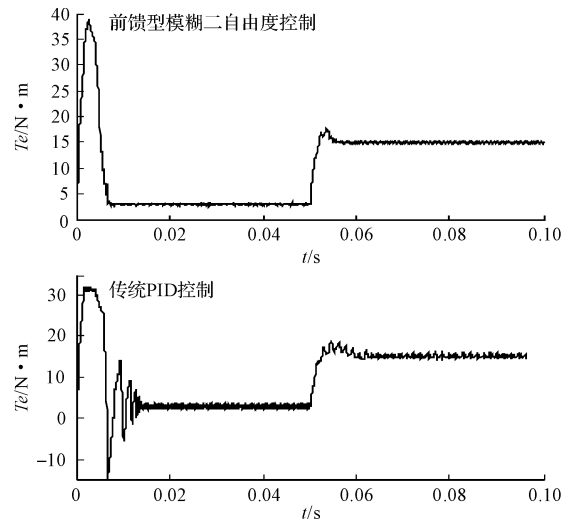


图5 两种控制模式下转矩仿真曲线

由仿真曲线可以看出,利用传统 PID 控制方法使得系统转速和转矩超调量较大,转速超调会使电机在启动过程中发生抖动,转矩超调会产生冲击电流,对系统造成损害。而笔者利用本研究控制策略使得转速和转矩波形比传统 PID 控制波形曲线要平缓,而且启动过程中转速无超调、响应快,发生干扰后,恢复时间短,实现了永磁同步电机的平滑启动和快速恢复性,说明该方法不但可以提高系统响应速度,而且可以提高系统控制精度,为高精度数控系统提供了一种可行、易实现控制方法。其仿真结果对比如表2所示。

表2 仿真结果对比

参数 控制方式	启动时间	转速超调量	扰动调节时间
	/ms	%	/ms
传统 PID	12	3.8	10
前馈型模糊二自由度	6	0	5

5 实验结果

为验证本研究方法有效性,实验中,笔者选取

TMS320F2812 微处理器^[12-14],用于完成前馈型模糊二自由度控制功能。给定转速为 700 rad/s,空载启动。转速稳定时两种控制模式下采集的 A 相电压波形如图 6、图 7 所示。

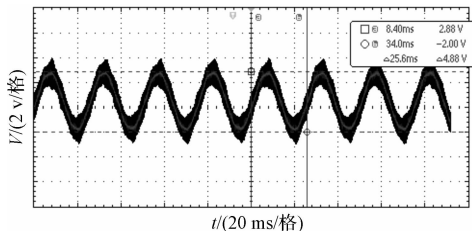


图 6 传统 PID 控制转速稳定时 A 相电压波形图

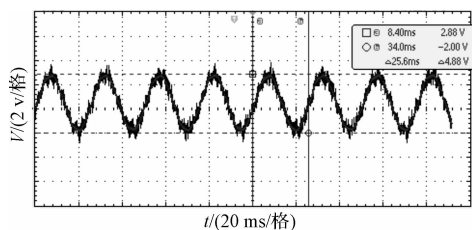


图 7 本研究控制方法转速稳定时 A 相电压波形图

由实验曲线可以看出,与传统 PID 控制方法相比,本研究控制方法中的电机三相电流无尖峰状态,且为标准正弦波形,为坐标变换提供方便,同时降低了谐波电流对电机的损害。

6 结束语

永磁同步电机具有的非线性、强耦合性以及时变性等特点,采用传统 PID 控制和智能化控制存在一定的缺陷,本研究的控制方法结合模糊控制和二自由度控制的优点,实时跟踪并改变 PID 中的控制参数,实现了系统响应速度快,强抗干扰能力,转速无超调,其结构模型简单,对永磁同步电机的控制提供了一种可行、易于实现的控制策略,尤其是对高精度数控系统的控制具有良好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 李 焯. 永磁同步电动机伺服系统研究现状及应用前景[J]. 微电机, 2001, 34(4): 30-31
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [3] 李 欢, 何 锋, 蒋雪生. 基于模糊控制的气电混合动力客车控制策略研究[J]. 客车技术与研究, 2015(1): 7-9.
- [4] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
- [5] 李海侠. 交流伺服系统无速度传感器模糊控制策略研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 31-35.
- [6] 李 勇, 陈志锦, 张 森. 交流伺服驱动功率回路参数选取方法[J]. 兵工自动化, 2014(8): 83-85, 90.
- [7] 李长兵, 曹章平. 交流伺服驱动单元抗干扰设计与实现[J]. 机电工程技术, 2013(6): 66-69.
- [8] 张景元. 基于神经网络的自适应模糊控制系统[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3613-3616.
- [9] CHENG Kuang-yao, TZOU Y Y. Fuzzy optimization techniques applied to the design of a digital PMSM servo drive[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(4): 1085-1099.
- [10] 张 兴, 季建强, 余 勇, 等. 电流型 PWM 整流器低电压应力空间矢量 PWM(SVPWM) 研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 144-149.
- [11] 何 杰, 王家军. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 77-82.
- [12] 吴家彪, 马钧华. 伺服系统永磁同步电机参数辨识策略[J]. 轻工机械, 2013, 31(6): 45-50.
- [13] 李 瑾. 基于 DSP 的 SVPWM 变频调速系统[J]. 煤矿机械, 2014, 35(1): 117-120.
- [14] 王 霞, 朱景伟, 刁 亮. 基于 TMS320F28335 的 SVPWM 信号发生器[J]. 电子科技, 2013, 26(12): 30-33.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

马立新, 范洪成, 黄阳龙, 等. 永磁伺服系统前馈型模糊二自由度控制研究[J]. 机电工程, 2015, 32(9): 1229 - 1232.

MA Li-xin, FAN Hong-cheng, HUANG Yang-long, et al. Feedforward fuzzy 2-DOF control of PMSM servo system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(9): 1229 - 1232.