

永磁同步电机的自适应云模型控制研究^{*}

陆佳琪, 朱保鹏, 尤钱亮, 张 懿, 魏海峰
(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 针对 PID 或其改进的算法鲁棒性偏低问题, 提出了永磁同步电机(PMSM)的自适应云模型控制算法研究。在分析了自适应云模型结构后设计了 PMSM 自适应云模型控制器。搭建了基于自适应云模型控制算法的 PMSM 试验平台, 试验结果表明提出的 PMSM 的自适应云模型控制算法精度高、性能稳定。

关键词: 永磁同步电机; 云模型; 自适应; 控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)03-0041-05

Research of Adaptive Cloud Model Control Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

LU Jiaqi, ZHU Baopeng, YOU Qianliang, ZHANG Yi, WEI Haifeng
(School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The current loop of permanent magnet synchronous motor was controlled by PID algorithm or improved PID algorithm. The robustness of PID algorithm and improved PID algorithm was unsatisfactory. The adaptive cloud model control algorithm for permanent magnet synchronous motor was proposed to solve the problem. After analyzing the structure of adaptive cloud model, an adaptive cloud model controller for permanent magnet synchronous motor was designed, and the adaptive cloud model structure was deduced. The experimental platform of PMSM Based on adaptive cloud model control algorithm was constructed. The experimental results show that the adaptive cloud model control algorithm for permanent magnet synchronous motor is effective and stable.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); cloud model; adaptive; control

0 引 言

目前, 各行各业中永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的用量十分大, 因此对 PMSM 的控制方案需求十分多。当下 PMSM 的电流环多采用 PID 或其改进的算法控制。

文献[1]研究了电梯用 PMSM BP 神经网络 PID 调速控制方法, 利用 BP 神经网络改进 PID, 其控制效果相对于传统 PID 来说精度有所提高。文献[2]介绍了 PMSM 的模型预测电流控

制器, 提出了表贴式 PMSM 的模型预测电流控制法, 实现了对电流的前馈和反馈控制, 其本质也是一种改进的 PID 控制器。文献[3]提出 PMSM 变论域自适应模糊 PID 控制, 采用变论域模糊控制实现控制参数自整定和控制规则的自调整, 其算法相对而言比较复杂, 控制性能良好, 但不易于实现。文献[4]介绍了 PMSM 单神经元自适应 PID 控制, 利用神经元自适应来改进 PID, 其鲁棒性有所提高, 但是相对于传统 PID, 动态响应速度却有所下降。文献[5]提出的基于模糊 PID 控制的 PMSM 控制器, 模糊 PID

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61503161); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016073-01)

作者简介: 陆佳琪(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动控制。

朱保鹏(1996—), 男, 研究方向为电机驱动控制。

尤钱亮(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动控制。

相对于其他的智能改进型 PID 来说是目前比较成熟的一种算法,但其模糊规则也相对比较复杂。文献[6]提出的 PMSM 伺服控制系统的灰色 PID 控制,并设计出一种结合传统 PID 控制与灰色预测补偿的灰色 PID 控制器,虽灰色预测对未知量的处理能力较强,抗干扰能力比较出色,但是与此同时,响应速度却有所下降。以上 6 种方案都是在传统 PID 的基础上利用各种先进的算法进行改进,其性能都只有略微的提高,并且这些方案算法复杂,鲁棒性却并不是很强。

针对以上问题,本文提出了 PMSM 的自适应云模型控制算法研究。利用自适应云模型控制器完全取代 PID 控制器,在分析了自适应云模型结构后设计了 PMSM 自适应云模型控制器。在分析了 PMSM 电流闭环系统的情况下,将自适应云模型结构应用于 PMSM 电流闭环系统,并搭建基于自适应云模型控制算法的 PMSM 试验平台。试验结果表明提出的 PMSM 的自适应云模型控制算法精度高、性能稳定。

1 PMSM 电流闭环控制

根据 PMSM 工作原理,可得如图 1 所示的 PMSM 分析模型,其中 $d-q$ 轴为实际转子位置, θ 为实际转子位置角。

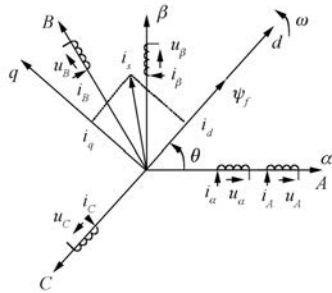


图 1 PMSM 分析模型

在 $\alpha-\beta$ 参考坐标系下的 PMSM 动态模型可以表示如下:

$$i_{\alpha} = -\frac{R}{L}i_{\alpha} + \frac{\psi_f}{L}\omega\sin\theta + \frac{u_{\alpha}}{L} \quad (1)$$

$$i_{\beta} = -\frac{R}{L}i_{\beta} + \frac{\psi_f}{L}\omega\cos\theta + \frac{u_{\beta}}{L} \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J}\omega + \frac{p^2\psi_f}{L}i_{\beta}\cos\theta - \frac{p^2\psi_f}{L}i_{\alpha}\sin\theta - \frac{p}{J}T_L \quad (4)$$

式中: u_{α}, u_{β} —— α, β 轴定子电压;

i_{α}, i_{β} —— α, β 轴定子电流;

L ——定子绕组电感;

R ——定子电阻;

ψ_f ——永磁体的磁通;

p ——极对数;

T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

B ——阻尼系数;

ω ——转子速度。

其中: $i_{\alpha}, i_{\beta}, \dot{\theta}$ 和 $\dot{\omega}$ 分别为 $i_{\alpha}, i_{\beta}, \theta$ 和 ω 的微分。

在 $d-q$ 参考轴坐标系下的 PMSM 数学模型可以表示如下:

$$\frac{di}{dt} = Ai + Bu + D \quad (5)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_e \\ -\omega_e & -R/L \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix};$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ -\psi\omega_e/L \end{bmatrix}; i = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix};$$

R, i_d, i_q 和 u_d, u_q 分别为 $d-q$ 参考轴下的电流和电压; ω_e 为电角速度。

PMSM 的电流闭环系统如图 2 所示。 i_q 的值由 $\dot{\theta}^*$ 经过转速调节器确定, $\dot{\theta}^*$ 为给定的角度, $\dot{\theta}_e$ 是转速位置估计后得到的转子角度。 i_q 与转矩有关, i_d 与磁通有关。在实际控制中,常将 i_d 设置为 0。经典控制中,常将电机的三相电流进行 Clark 变换和 Park 变换得到的电流值与给定的电流值相减得到电流误差,再将电流误差进行 PID 控制。

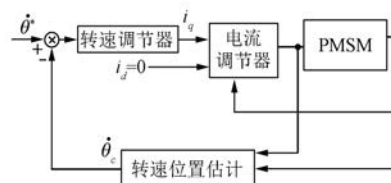


图 2 PMSM 电流闭环系统

2 PMSM 的自适应云模型控制

2.1 自适应云模型概念

云模型理论用定量和定性概念表示同一特

征,可以通过特征的云模型来反映出人们对物体认识的本质,云模型自适应算法的具体原理如图 3 所示。在图 3 中,差变量控制块主要是表示用期望值和实际值的偏差来确定输出量所需要的修正值;控制量校正块的作用则是将需要校正的输出相应量转变为需校正的控制量;规则修改块的作用是通过修改控制规则来实现校正量。工作思路是:通过对反映输出量大小的误差信号的测量,获得需要校正的输出相应量的信息,然后将其转换成对控制输入的校正量,最后通过修改控制规则实施校正量。这一过程都是在人不参与的情况下进行的,所以对于干扰和对对象参数的变化引起的输出偏差量有较好的调节作用。

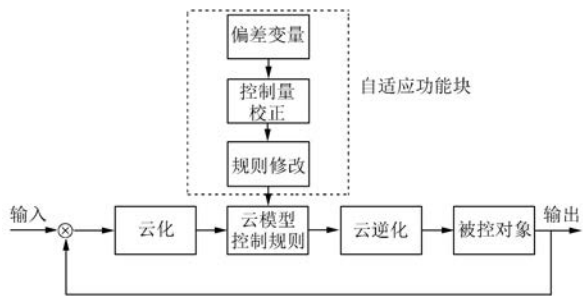


图 3 自适应云模型结构图

2.2 PMSM 自适应云模型控制器设计

基于自适应云模型的 PMSM 控制结构如图 4 所示。

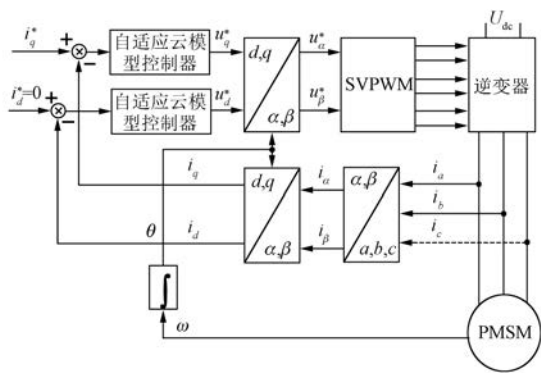


图 4 PMSM 自适应云模型控制结构图

本质上,控制器所实现的输入输出控制就是一种映射关系,PMSM 自适应云模型控制器的设计就是 PMSM 自适应云模型映射器的设计。映射器的设计步骤如下:

步骤 1: 令 $i=1, j=1, k=1$;

步骤 2: 生成前件云滴 (x, μ_j) ;

步骤 3: 生成后件云滴 (y_{jk}, μ_j) ;

步骤 4: 计算单规则映射输出值:

$$y_{i1} = \sum_{j=1, k=1}^N (y_{jk} \cdot \mu_j) / \sum_{j=1}^N \mu_j * k \tag{6}$$

步骤 5: $i=i+1$;

步骤 6: 当 $i=N$ 时,执行步骤 7;否则返回步骤 2 (其中 N 为规则个数,本映射器中 $N=5$);

步骤 7: 计算云模型映射器总输出值:

$$y = \sum_{i=1}^N (y_{i1} \cdot \mu_{i1}) / \sum_{i=1}^N \mu_{i1} \tag{7}$$

云模型的控制规则如下:

规则一:If 电流正误差较大,Then 正控制量较大;

规则二:If 电流正误差较小,Then 正控制量较小;

规则三:If 电流误差为零,Then 控制量为零;

规则四:If 电流负误差较小,Then 负控制量较小;

规则五:If 电流正误差较大,Then 负控制量较大。

其中所提及的电流正误差较大是 0.02 A,电流正误差较小是 0.005 A,电流误差为零是 0 A,电流负误差较大是 -0.02 A,电流负误差较小是 -0.005 A。0.02、0.005、0、-0.02、-0.005 A 作为前件云的 5 个期望,对应的控制量的后件云期望分别是 0.2、0.03、0、-0.2、-0.03。前件云与后件云的参数如表 1 所示。

表 1 前件云与后件云参数

前件云五规则	后件云五规则
(0.02, 0.2, 0.08)	(0.2, 0.24, 0.03)
(0.005, 0.05, 0.02)	(0.03, 0.5, 0.04)
(0, 0.001, 0)	(0, 0.01, 0.04)
(-0.02, 0.05, 0.02)	(-0.2, 0.5, 0.04)
(-0.005, 0.2, 0.08)	(-0.03, 0.24, 0.03)

自适应云模型的控制规则前件云与后件云的定性表示如图 5 和图 6 所示。

上述规则根据步骤 1、步骤 2、步骤 3 生成前件云和后件云的云滴。所生成的云滴根据步骤 4,进行每条规则映射输出的计算,根据步骤 5 与步骤 6 可以循环完成五条规则的映射输出。云模

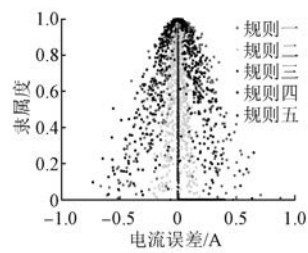


图5 前件云规则定性表示

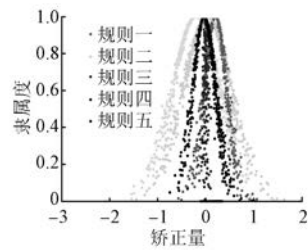


图6 后件云规则定性表示

型映射器如图 7 所示。根据步骤 7 中的式(7)计算得出控制量输出总值。

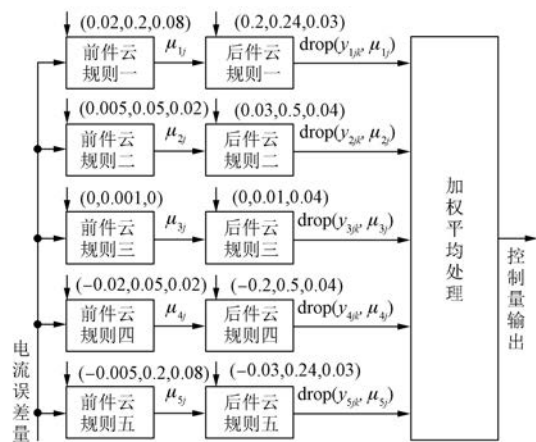


图7 云模型映射器

3 试验分析

试验平台中所使用的 PMSM 参数如表 2 所示。

试验过程中,选择不同负载运行与负载转矩突变两种典型工况进行试验研究。

(1) 设置电机分别在 10%、50%、100% 额定负载转矩 3 种工况下稳定运行。图 8、图 9 和图 10 分别是电机在 3 种不同负载工况下的 d 轴电流 i_d 和 q 轴电流 i_q 的控制情况。从图 8~图 10 中

表 2 试验电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.2
额定电压/V	310
额定电流/A	4.2
额定转矩/(N·m)	7.2
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
定子电阻/ Ω	1.2
d 、 q 轴电感/mH	5.22
极对数/个	4
转子永磁磁链 ψ_f /Wb	0.162

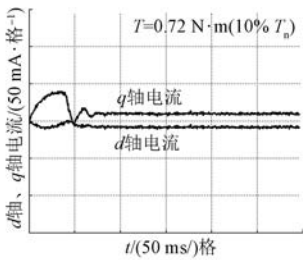


图8 10% 额定负载下 i_d 、 i_q

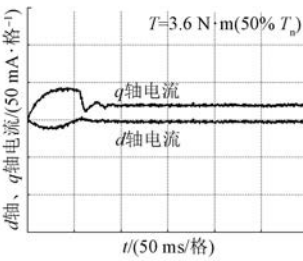


图9 50% 额定负载下 i_d 、 i_q

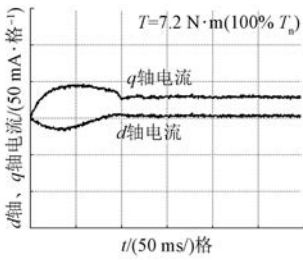


图10 100% 额定负载下 i_d 、 i_q

可以看出,在不同的负载转矩下,电流环的控制情况非常理想,证明了鲁棒性较强。

(2) 电机运行过程中,考虑负载转矩的突变。图 11 为负载转矩突变的情况下 i_d 和 i_q 的控制情况,可以看出自适应云模型控制算法响应速度非

常快,控制精度高。在转矩突变比较大的情况下依然能够快速到达稳态,鲁棒性较强。

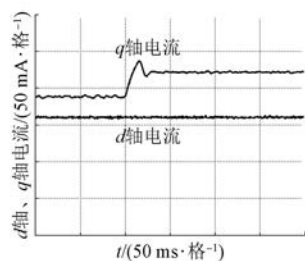


图 11 负载转矩突变下 i_d 、 i_q

4 结 语

针对传统 PID 或其改进算法的鲁棒性偏低问题,提出了 PMSM 的自适应云模型控制算法研究。在分析了自适应云模型结构后设计了 PMSM 自适应云模型控制器;分析了 PMSM 电流闭环系统的情况下,将自适应云模型结构应用于 PMSM 电流闭环系统,并搭建基于自适应云模型控制算法的 PMSM 试验平台。试验结果表明提出的 PMSM 的自适应云模型控制算法精度高、性能稳定。

【参 考 文 献】

- [1] 王同旭,马鸿雁,聂沐晗.电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J].电工技术学报,2015,30(增刊1): 43-47.
- [2] 王东文,李崇坚,吴尧,等.永磁同步电机的模型预测电流控制器研究[J].电工技术学报,2014,29(增刊1): 73-79.
- [3] 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(增刊1): 190-194.
- [4] 西佳军,孙斌,赵化启.永磁同步电机单神经元自适应 PID 控制[J].电力自动化设备,2003,23(10): 59-61.
- [5] 欧峰,陈洪,陈胜来.基于模糊 PID 控制的永磁同步电机控制器研究[J].计算机测量与控制,2017,25(4): 40-43.
- [6] 梁中华,韩殷,法乃光.永磁同步电机伺服控制系统的灰色 PID 控制[J].沈阳工业大学学报,2008,30(6): 619-622,638.

收稿日期: 2017 -08 -16

(上接第 16 页)

- [5] 高志强.自抗扰控制思想探究[J].控制理论与应用,2013,30(12): 1498-1510.
- [6] 刘旭东,李珂,孙静,等.基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J].控制理论与应用,2015,32(12): 1613-1619.
- [7] WANG B, CHEN X, YU Y, et al. Robust predictive current control with online disturbance estimation for induction machine drives[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(6): 4663-4674.
- [8] ZHANG X, HOU B, MEI Y. Deadbeat predictive current control of permanent magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(5): 3818-3834.
- [9] CARPIUC S C, LAZAR C. Fast real-time constrained predictive current control in permanent magnet synchronous machine-based automotive traction drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2015,1(4): 326-335.
- [10] KIM H, SON J, LEE J. A high speed sliding mode observer for the sensorless speed control of a PMSM[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(9): 4069-4077.
- [11] ZHANG X, LI Z. Sliding mode observer based mechanical parameter estimation for permanent magnet synchronous motor[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(8): 5732-5745.
- [12] 张碧陶,皮佑国.基于分数阶滑模控制技术的永磁同步电机控制[J].控制理论与应用,2012,29(9): 1193-1197.
- [13] EL-SOUSY F F M. Robust wavelet-neural-network sliding-mode control system for permanent magnet synchronous motor drive[J].IET Electric Power Applications,2011,5(1): 113-132.

收稿日期: 2017 -07 -10