

永磁同步电机积分反步自适应控制

杨启涯, 庄海, 张颖杰

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对外界干扰导致永磁同步电机(PMSM)固有参数发生变化的问题,将新型的智能控制理论引入到PMSM控制系统中,提出了一种新颖的带有积分环节的反步自适应法的控制方法。该控制器能够利用交轴电流动态抑制或消除参数的变化对系统的影响,基于Lyapunov稳定性原理设计被控系统的控制律和自适应律,并引入积分环节,增强被控系统的稳定性,缩短速度响应的时间。仿真试验证明,该控制器能够有效地抑制电机固有参数的变化对被控系统的影响,保证了系统的强鲁棒性和动静态性能。

关键词: 永磁同步电机; 反步自适应法; 交轴电流; 积分环节

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)08-0015-04

Integral Backstepping Adaptive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

YANG Qiya, ZHUANG Hai, ZHANG Yingjie

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to solve the problem that the inherent parameters of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) were changed due to external interference, a new intelligent control technology was introduced into the control system of PMSM, and a new control strategy based on the integral backstepping adaptive method was proposed. The controller could dynamically suppress and eliminate the influence of parameter changes on the system by using the cross axis current. Based on the Lyapunov stability principle, the control laws and the adaptive laws of the controlled system were designed, and the integral action was introduced to improve the stability and shorten the time of the speed response. The simulation experiments showed that the controller had strong robustness as well as good dynamic and static performance to suppress the influence of the change of the inherent parameters.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); backstepping adaptive method; cross axis current; integral action

0 引言

由于永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)是一个时变非线性和强耦合性系统^[1-3],数学模型中的参数的准确性严重影响着电机的控制性能。电机在实际运行过程中,外界环境和电机负载都会随时发生变化,这将导致电机的固有参数发生变化,影响被控对象的动静态性能,较难实现电机的高性能和高精度

控制^[4]。

随着现代控制技术的逐渐成熟,滑模变结构、反馈线性化、自适应、反步、模糊等人工智能方法被逐渐应用在PMSM中^[5],其中,反步自适应法能够有效地发挥自适应法与反步法两者的优点,不仅能保证被控对象的稳定性,而且能抑制电机运行时电机参数变化对系统的影响。该方法利用自适应法和反步法设计控制器,根据虚拟变量和Lyapunov稳定性原理来推导被控系统的控制律和

作者简介: 杨启涯(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动。

庄海(1958—),男,高级工程师,研究方向为电力电子与电气传动。

张颖杰(1979—),男,硕士,工程师,研究方向为电力电子与电气传动。

参数自适应律^[6-7]。

本文提出了一种带有积分环节的反步自适应控制策略,利用反步法来求解系统的控制率和自适应律,并且引入了积分器,能够有效地增强被控系统的抗干扰性能^[8]。在 MATLAB/Simulink 下进行了相应的仿真验证。仿真试验证明,本文所设计的控制方法能够保证被控系统快速稳定,显著地增强 PMSM 控制器抗扰性能。

1 PMSM 数学模型

假设 PMSM 气隙中磁场呈现正弦分布,且忽略磁路饱和、铁损、铜损和涡流损耗,则可以得到表贴式 PMSM 的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q - p\omega i_d - \frac{p\psi_f}{L}\omega + \frac{u_q}{L} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3p\psi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_q, i_d ——定子交、直流电流;

R_s ——定子电阻;

L ——定子电感;

p ——电机极对数;

ω ——转子角速度;

u_q, u_d ——定子交、直流电压;

ψ_f ——转子磁链;

B ——摩擦因数;

J ——转动惯量;

T_L ——负载转矩。

2 反步自适应控制器

2.1 矢量控制系统

本文在双闭环矢量控制的基础上,利用由参考自适应律和实际控制电压两个单元组成的反步自适应控制器代替传统的电流环和转速环,建立系统的整体结构框图,如图 1 所示。

2.2 反步自适应控制器设计

PMSM 的数学模型中的部分参数不完全确定^[9]。例如电阻、负载和摩擦因数在电机运行的过程中,可能会发生变化,使其与模型中设定的值出现一定的偏差。如果在设计控制系统的时候,未考虑这些因素,将会导致控制系统偏离期望值,

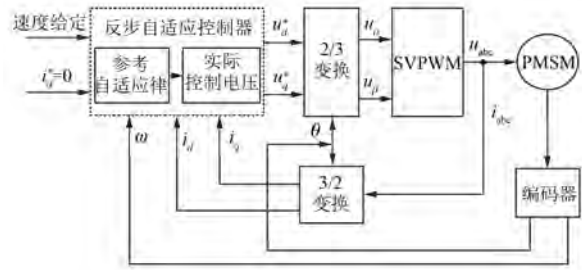


图 1 系统的整体结构框图

严重时将导致系统偏离稳态运行。

本文采用 $i_d = 0$ 的控制策略,在理想情况下,定子电流全部为转矩电流,所有的电流都用来产生电磁转矩,故电机控制的本质即控制 q 轴电流^[10]。无论电机的固有参数如何变化,只是引起 q 轴电流的变化,故只需对 q 轴电流进行相应的补偿,即可消除固有参数对电机控制性能的影响^[11]。

定义误差变量为

$$\begin{cases} z_1 = \omega^* - \omega \\ z_2 = i_q^* - i_q \\ z_3 = i_d^* - i_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω^*, i_q^*, i_d^* ——转速、交轴、直轴电流分量的设定值。

对 z_1 求导,可得:

$$\frac{dz_1}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} = -\frac{3p\psi_f}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{T_L}{J} \quad (3)$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (4)$$

对式(4)求导,可得:

$$\frac{dV_1}{dt} = z_1 \frac{dz_1}{dt} = z_1 \left(-\frac{3p\psi_f}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{T_L}{J} \right) \quad (5)$$

为了保证 $\dot{V}_1 \leq 0$, 令:

$$\begin{cases} i_q^* = \frac{2}{3p\psi_f}(Jk_1z_1 + T_L + B\omega + J\eta + k_4J\theta_\omega) \\ i_d^* = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: η ——弥补固有参数的变化需要的 q 轴电流的补偿值;

θ_ω ——转速跟踪误差的积分, $\theta_\omega =$

$$\int_0^t z_1(\tau) d\tau。$$

对式(2)求导,则可得:

$$\frac{dz_1}{dt} = -\frac{3p\psi_f}{2J}(i_q^* - z_2) + \frac{B}{J}\omega + \frac{T_L}{J} = -k_1z_1 - \eta - k_4\theta_\omega + \frac{3p\psi_f}{2J}z_2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_2}{dt} = & \frac{2}{3p\psi_f} \left(Jk_1 \frac{dz_1}{dt} + B \frac{d\omega}{dt} + J \frac{d\eta}{dt} + k_4Jz_1 \right) + \frac{R_s}{L}i_q + p\omega i_d + \frac{p\psi_f}{L}\omega - \frac{u_q}{L} = \\ & \frac{2}{3p\psi_f} \left[(Jk_1 - B) \left(-k_1z_1 - \eta - k_4\theta_\omega + \frac{3p\psi_f}{2J}z_2 \right) + J \frac{d\eta}{dt} + k_4Jz_1 \right] + \frac{R_s}{L}i_q + p\omega i_d + \frac{p\psi_f}{L}\omega - \frac{u_q}{L} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dz_3}{dt} = \frac{R_s}{L}i_d - p\omega i_q - \frac{u_d}{L} \quad (9)$$

定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} \left(z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + k_4\theta_\omega^2 + \frac{\eta^2}{\lambda} \right) \quad (10)$$

式中: k_4, λ ——可调非负数。

对式(10)求导,化简可得:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \frac{dz_1}{dt}z_1 + \frac{dz_2}{dt}z_2 + \frac{dz_3}{dt}z_3 + k_4\theta_\omega z_1 + \frac{\eta}{\lambda} \frac{d\eta}{dt} = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 - k_3z_3^2 + \\ & z_2 \left\{ k_2z_2 + \frac{2}{3p\psi_f} \left[(Jk_1 - B) \left(-k_1z_1 - \eta - k_4\theta_\omega + \frac{3p\psi_f}{2J}z_2 \right) + J \frac{d\eta}{dt} + k_4Jz_1 \right] + \right. \\ & \left. \frac{R_s}{L}i_q + p\omega i_d + \frac{p\psi_f}{L}\omega - \frac{u_q}{L} + \frac{3p\psi_f}{2J}z_1 \right\} + z_3 \left(k_3z_3 + \frac{R_s}{L}i_d - p\omega i_q - \frac{u_d}{L} \right) + \eta \left(\frac{1}{\lambda} \frac{d\eta}{dt} - z_1 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: k_1, k_2, k_3 ——可调非负数。

为了保证式(11)为非正定系统,即需要保证 $\dot{V} \leq 0$,则可以得到系统的实际的控制率为

$$\begin{aligned} u_q = & L \{ k_2z_2 + \\ & \frac{2}{3p\psi_f} \left[(Jk_1 - B) \left(-k_1z_1 - \eta - k_4\theta_\omega + \frac{3p\psi_f}{2J}z_2 \right) + J \frac{d\eta}{dt} + k_4Jz_1 \right] + \frac{R_s}{L}i_q + p\omega i_d + \frac{p\psi_f}{L}\omega + \frac{3p\psi_f}{2J}z_1 \} \end{aligned} \quad (12)$$

$$u_d = L \left(k_3z_3 + \frac{R_s}{L}i_d - p\omega i_q \right) \quad (13)$$

参考自适应律为

$$\frac{d\eta}{dt} = \lambda z_1 \quad (14)$$

则可得:

$$\dot{V} = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 - k_3z_3^2 \leq 0 \quad (15)$$

因此根据 Lyapunov 原理,当式(12)~式(14)同时成立时,能够保证被控电机快速进入到稳定状态。

3 试 验

为了验证对本文所提出的带积分环节的反步自适应法的优越性,以及系统的实际运行性能,在 MATLAB/Simulink 下,搭建相应的控制系统仿真

模型。为了保证仿真结果与实际应用控制相接近,故本文选用 110ST-M04030 表贴式 PMSM 作为被控电机。其具体参数如表 1 所示。

表 1 110ST-M04030 电机主要参数

参数名称	参数值
额定功率 P/kW	1.2
额定转矩 $T_L/(\text{N}\cdot\text{m})$	4
额定电流 I_N/A	5
转子惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.54×10^{-3}
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
定子电阻 R_s/Ω	0.545
定子电感 L/mH	1.65
极对数 p	4
额定电压 U_N/V	220
摩擦因数 B	0.02

理论分析可得,只需保证 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 和 λ 为非负数即可保证系统的稳定性。但是在实际的工程控制中,5 个参数对系统的稳定性起着重要的作用,故需要在仿真时不断试验^[12]。

当积分反步自适应控制器的系数为 $k_1 = 3\ 620$ 、 $k_2 = 150$ 、 $k_3 = 120$ 、 $k_4 = 1\ 000\ 000$ 、 $\lambda = 0.000\ 2$ 时,可以保证被控系统快速进入到稳定状态。当 $k_4 = 0$ 时,表示不考虑积分环节的作用。

令 $T_L = 0$,当稳定运行后,在 $t = 0.02\ s$ 时, $T_L = T_{LN}$ 。分别采用传统的反步自适应法和积分反步自适应法的电机转速响应,如图 2 和图 3 所示。

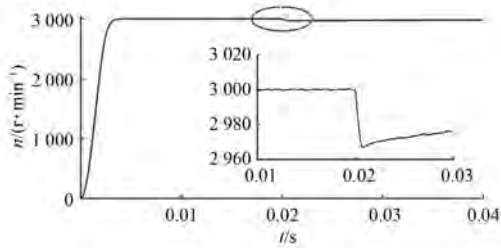


图 2 负载突变时,无积分环节的转速响应

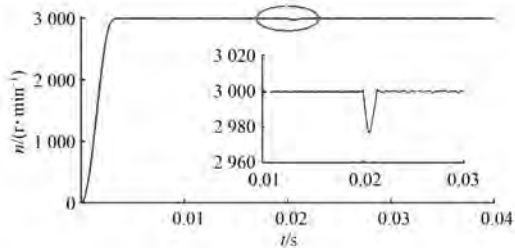


图 3 负载突变时,带积分环节的转速响应

令 $T_L = T_{LN}$,当稳定运行后,在 $t = 0.02\ s$ 时将定子电阻增加 40%。分别采用传统的反步自适应法和积分反步自适应法的电机转速响应,如图 4 和图 5 所示。

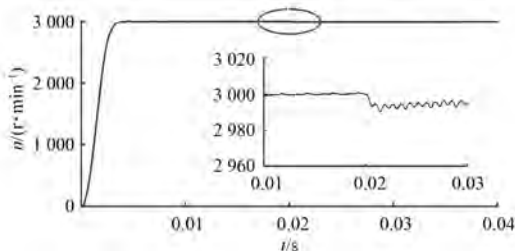


图 4 电阻突变时,无积分环节转速响应

令 $T_L = T_{LN}$,当稳定运行后,在 $t = 0.02\ s$ 时,将定子电感增加 50%。分别采用传统的反步自适

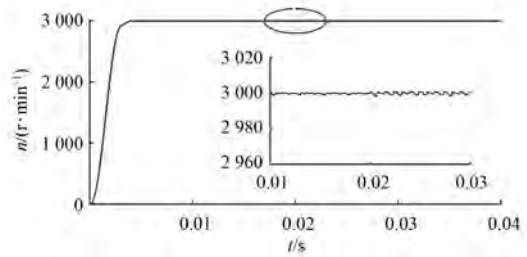


图 5 电阻突变时,带积分环节转速响应

应法和积分反步自适应法的电机转速响应,如图 6 和图 7 所示。

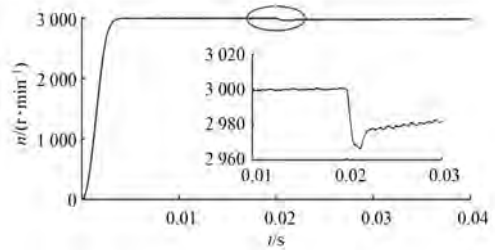


图 6 电感突变时,无积分环节转速响应

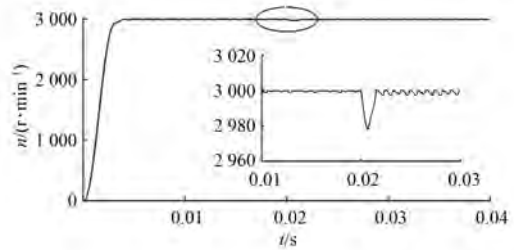


图 7 电感突变时,带积分环节转速响应

因此,当电机的负载转矩、定子电阻和定子电感变化时,所设计的积分反步自适应控制能够有效地对系统进行相应的补偿,快速跟踪速度的期望值。积分环节的控制与无积分环节的控制相比,稳态误差小、超调量小,具有较强的抗干扰能力和良好的控制性能。

4 结 语

本文把反步自适应法应用于 PMSM 高性能控制系统中。该方法能够根据固有参数的变化,利用补偿交轴电流的方法抑制系统参数变化对系统的影响。引入积分环节提高了系统的稳态性能,保证系统的快速收敛,实现了 PMSM 的非线

(下转第 62 页)

- 2014,40(4): 45-51.
- [6] 包广清,刘新华,毛开富.基于磁场调制式磁齿轮传动的永磁同步风力发电系统[J].农业机械学报, 2011,42(5): 116-120.
- [7] LIU C T, HWANG C C, CHIU Y W. Design of a coaxially magnetic-gearred liner actuator for electric power steering system applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 (3): 2401-2408.
- [8] CHEN M, CHAU K T, LIU C H. Design of a new non-rare-earth magnetic variable gear for hybrid vehicular propulsion system[J].IET Electrical System in Transportation,2016,6(3): 153-162.
- [9] CHIBA A, KIYOTA K, HOSHI N, et al. Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 (1): 175-182.
- [10] HUANG C, TSAI M, ORRELL D G, et al. Development of a magnetic planetary gearbox [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 (3): 403-412.
- [11] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (4): 2844-2846.
- [12] 杨超君,李直腾,李志宝,等.高性能磁力齿轮传动扭矩与效率的数值计算[J].中国电机工程学报, 2011,31(32): 107-114.
- [13] 刘美钧,包广清,候晨晨,等.磁场调制型磁齿轮动态性能分析[J].机械传动,2017,41(3): 21-26.
- [14] 杨岸涛,并立兵,李浩.一种混合充磁同心磁齿轮及其复合电机分析[J].微特电机,2017,45(4): 31-33,38.
- [15] WANG R J, MATTHEE A, GERBER S, et al. Calculation of torque performance of a novel magnetic planetary gear [J]. IEEE Magnetics Letters, 2016, 7 (1): 1-5.
- [16] ATALLAH K, CALVERLEY S D, HOWE D. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2004, 151 (2): 135-143.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 18 页)

性控制。仿真结果表明,当电机的负载转矩、定子电阻和定子电感变化时,积分反步自适应控制相比传统的反步自适应控制具有更好的动静态性能。

【参考文献】

- [1] HU J, QIU Y, LU H. Adaptive robust nonlinear feedback control of chaos in PMSM system with modeling uncertainty [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40 (19/20): 8265-8275.
- [2] 温慧慧,张进.单相三绕组永磁同步电动机的起动性能分析[J].现代电子技术,2016,39(17): 140-144.
- [3] 陈昊,周建亮,王永,等.永磁同步电机速度跟踪控制[J].电力电子技术,2013,47(6): 100-102.
- [4] 韩璐,张开如,樊英杰,等.基于变系数 PID 永磁同步电机的研究[J].现代电子技术,2016,39(18): 127-129.
- [5] 王庆龙,张兴,张崇巍.永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J].中国电机工程学报,2014,34(6): 897-902.
- [6] 熊丝琦.永磁同步电机混沌系统的自适应反步方法研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [7] 李岩,盛正印.自适应反步法的永磁同步电动机速度跟踪控制[J].微特电机,2014,42(12): 54-57.
- [8] 崔苏雯,盛正印,李岩.永磁同步电动机伺服系统反步法控制研究[J].微特电机,2014,42(11): 74-75.
- [9] 陈宁,熊丝琦,刘波,等.PMSM 混沌系统的自适应反步控制[J].中南大学学报(自然科学版),2014(1): 99-104.
- [10] 花熙文.永磁同步电机的模糊反步自适应调速策略研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [11] 朱汉未.永磁同步电机的自适应反推控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [12] 徐艳平,张保程,周钦,等.基于 PSO 的自适应反推永磁同步电动机 DTC 控制方法研究[J].微特电机,2017,45(1): 62-66.

收稿日期: 2018-01-03