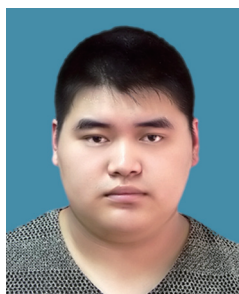


# 基于模糊自适应反步法的永磁同步电动机控制器设计

针对永磁同步电动机在运行阶段存在的外部扰动和不确定性等问题,提出了一种基于自适应反步控制方法。在分析永磁同步电动机数学模型的基础上,基于自适应反步控制方法设计了一种带微分的自适应反步控制策略,并利用李雅普诺夫函数证明了系统的收敛性。为了进一步提高自适应反步控制的动态性能,结合模糊控制理论设计了模糊自适应反步相结合的控制策略。仿真实验结果表明,模糊自适应反步控制方法能够有效提高永磁同步电动机的速度响应和鲁棒性,证明了该算法的有效性。

王 升 许傲然 谷彩连 白 迪 李 晶/沈阳工程学院电力学院



王 升/助理工程师

## 关键词/Keywords

永磁同步电动机 ·  
自适应反步控制 ·  
模糊控制 ·  
鲁棒性 ·

永磁同步电动机(PMSM)具有效率高、可靠性高、结构简单、体积小和重量轻等优点,可满足控制系统对响应速度、控制准确度的要求<sup>[1-2]</sup>。目前,在永磁同步电动机控制方式中较为常见的是采用PID控制与磁场定向控制或者直接转矩控制相结合的控制方式。PI控制具有算法简单、容易实现等优点,从而被广泛应用在永磁同步电动机的控制系统中<sup>[3]</sup>。但永磁同步电动机是一个多变量、强耦合且非线性的系统,PI控制的本质是一种线性控制,当存在非线性特性或者参数变化时,PI控制并不能满足控制系统高性能的控制要求,鲁棒性较差,因此传统的PI控制已经很难进一步提高永磁同步电动机的性能<sup>[4-5]</sup>。20世纪90年代首次提出了自适应反步控制理论,自适应反步控制对非线性控制系统具有很好的控制效果<sup>[6-10]</sup>。

本文为了克服外部扰动以及参数不确定性对永磁同步电动机系统的影响,提出了带微分项的自适应反步控制方法,提

高永磁同步电动机控制系统的抗干扰能力,并抑制 $d-q$ 轴电感不确定性对系统的影响,利用李雅普诺夫(Lyapunov)函数证明了系统的收敛性。为了进一步提高自适应反步控制的动态性能,结合模糊控制理论设计了模糊自适应反步相结合的控制策略,最后对本文的控制策略进行了仿真验证。

## 永磁同步电动机数学模型

为建立永磁同步电动机的数学模型,本文作如下基本假设:电动机定子绕组三相对称,不计转子阻尼;转子磁场成正弦分布;忽略电动机的涡流和磁滞损耗等<sup>[11-12]</sup>。

PMSM在 $d-q$ 坐标系下的电压数学模型为

$$\begin{pmatrix} v_q \\ v_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R + pL_q & P\omega_r L_d \\ -P\omega_r L_q & R + pL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q \\ i_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P\omega_r \phi_m \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $v_q$ 为定子 $q$ 轴电压; $v_d$ 为定子 $d$ 轴电压; $R$ 为定子电阻; $L_d$ 、 $L_q$ 分别为定子 $d$ 、 $q$ 轴励磁电感。

转矩方程为

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

运动方程为

$$T_e = T_L + B\omega_r + J \frac{D\omega_r}{dt} \quad (3)$$

式中, $T_e$ 为电磁转矩; $T_L$ 为电动机的负载转矩; $J$ 为转动惯量; $B$ 为阻尼系数; $p$ 为极对数; $\omega_r$ 为转子机械角速度。

永磁同步电动机的数学模型可以改

写为非线性状态方程为

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{L_d} - \frac{R}{L_d}i_d + P\omega_r \frac{L_q}{L_d}i_q \quad (4)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - \frac{R}{L_q}i_q - P\omega_r \frac{L_d}{L_q}i_d - P\omega_r \frac{\phi_m}{L_q} \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3P\phi_m}{2J}i_q + \frac{3p}{2J}(L_d - L_q)i_d i_q - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{1}{J}T_L \quad (6)$$

## 自适应反步积分控制

设 $\omega_r^*$ 为参考转速,则转速的误差为

$$e_m = \omega_r^* - \omega_r \quad (7)$$

将式(6)代入到式(7)中可得

$$\frac{de_m}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ T_L + B\omega_r - \frac{3p}{2J} \left[ \phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \right\} \quad (8)$$

设Lyapunov函数为

$$V = \frac{e_m^2}{2} \quad (9)$$

对式(9)求导可得

$$\dot{V} = \frac{e_m}{J} (B\omega_r + T_L) - \frac{3p}{2J} e_m \left[ \phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (10)$$

设 $k_\omega$ 为转速反馈增益,并且为大于零的常数,

则式(10)可以化简为

$$\dot{V} = -k_\omega e_m^2 + \frac{e_m}{J} \left( T_L + B\omega_r + k_\omega J e_m - \frac{3p}{2} \phi_m i_q - \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (11)$$

将 $T_L$ 、 $J$ 视为不确定参数进行估计,定义控制量 $i_d^*$ 、 $i_q^*$ 为

$$i_d^* = 0 \quad (12)$$

$$i_q^* = \frac{2}{3p\phi_m} (\hat{T}_L + B\omega_r + k_\omega \hat{J} e_m) \quad (13)$$

式中, $\hat{T}_L$ 、 $\hat{J}$ 分别为永磁同步电动机的负载转矩估计值和转动惯量估计值。

将式(13)代入到式(8)中,则转速误差可以改写为

$$\frac{de_m}{dt} = \frac{1}{J} \left[ -\tilde{T}_L + \frac{3p}{2} \phi_m e_q + \frac{3p}{2} (L_d - L_q) e_d i_q - k_\omega J e_m \right] \quad (14)$$

式中, $\tilde{T}_L = \hat{T}_L - T_L$ ,定义 $d$ - $q$ 轴电流的误差分别为 $e_d$ 、 $e_q$ 即

$$e_q = i_q^* - i_q \quad (15)$$

$$e_d = i_d^* - i_d \quad (16)$$

由式(12)~式(16)可得

$$\frac{de_q}{dt} = \frac{Ri_d - p\omega_r L_q i_q - v_d}{L_d} \quad (17)$$

$$\frac{de_q}{dt} = \frac{2(k_\omega J - B)}{3P\phi_m J} \left[ \frac{3p\phi_m}{2} e_q + \frac{3p}{2} (L_d - L_q) e_d i_q - k_\omega J e_m \right] - \frac{2(k_\omega J - B)}{3P\phi_m J} \tilde{T}_L + \frac{Ri_q + p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \phi_m - v_q}{L_q} \quad (18)$$

为了使自适应律中出现 $q$ 轴电流的误差微分项,设Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2} e_m^2 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} e_q^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{T}_L^2 + \frac{1}{2\gamma_1} (\tilde{T}_L + k_m J e_q + k_n J e_d)^2 \quad (19)$$

式中, $k_n$ 为 $d$ 轴的电流微分增益。

对式(19)求导,并将式(14)、式(17)

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -k_\omega e_m^2 - k_d e_d^2 - k_q e_q^2 + e_d \left[ \frac{Ri_d - p\omega_r L_q i_q - v_d}{L_d} + k_n e_m + \frac{3p}{2J} (L_d - L_q) e_m i_q + k_d e_d \right] + \\ & e_q \left[ \frac{2(k_\omega J - B)}{3p\phi_m J} \alpha - \frac{2(k_\omega \hat{J} - B)}{3p\phi_m J} k_\omega \hat{J} e_m + \frac{2k_m(k_\omega J - B)}{3p\phi_m} e_q + \frac{2k_n(k_\omega J - B)}{3p\phi_m} e_d + \right. \\ & \left. k_m e_m + \frac{3p\phi_m}{2J} e_m + k_q e_q + \frac{Ri_q + p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \phi_m - v_q}{L_q} + \right. \\ & \left. \tilde{J} \left[ \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{T}}_L - \frac{k_\omega}{J} e_m^2 + \frac{2k_\omega(k_\omega e_q + k_n e_d)}{3p\phi_m} e_q + \frac{2k_\omega e_q}{3p\phi_m J} \alpha \right] \right. \\ & \left. (\tilde{T}_L + k_m J e_q + k_n J e_d) \left( \frac{1}{\gamma_1} (\dot{\tilde{T}}_L + k_m J \dot{e}_q + k_n J \dot{e}_d) - \frac{e_m}{J} - \frac{2(k_\omega J - B)}{3pJ\phi_m} e_q \right) \right] \quad (20) \end{aligned}$$

和式(18)代入得

式中,  $\alpha = \frac{3p\phi_m}{2}e_q + \frac{3p}{2}(L_d - L_q)e_d i_q$ ;  $k_d$ 、 $k_q$ 为正常数。

为了使系统渐进稳定性, 选取实际控制量 $v_d$ 、 $v_q$ 为

$$v_d = Ri_d - p\omega_r L_q i_q + \frac{3p}{2J}(L_d - L_q)L_d e_\omega i_q + k_d L_d e_d \quad (21)$$

$$v_q = Ri_q + p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \phi_m + \frac{2L_q}{3p\phi_m J}(k_\omega J - B)\left[\frac{3p\phi_m}{2}e_q + \frac{3p}{2}(L_d - L_q)e_d i_q\right] - \frac{2k_\omega(k_\omega J - B)L_q}{3p\phi_m}e_\omega + k_q L_q e_q + \frac{3pL_q}{2J}\phi_m e_\omega \quad (22)$$

自适应律为

$$\dot{\hat{T}}_L = \gamma_1 \left[ \frac{e_\omega}{J} + \frac{2(k_\omega \hat{J} - B)}{3n\phi_m J} e_q \right] - k_m J \dot{e}_q - k_n \dot{e}_d \quad (23)$$

$$\dot{\hat{J}} = -\gamma_2 \left\{ -\frac{k_\omega e_\omega^2}{J} + \frac{2k_\omega(k_m e_q + k_n e_d)}{3p\phi_m} e_q + \frac{2k_\omega e_q}{3p\phi_m J} \left[ \frac{3p\phi_m}{2} e_q + \frac{3p}{2}(L_d - L_q)e_d i_q \right] \right\} \quad (24)$$

将式(21)~式(24)代入到式(20)中, 整理得

$$\dot{V} = -k_\omega e_\omega^2 - k_d e_d^2 - k_q e_q^2 \leq 0 \quad (25)$$

式中,  $k_\omega$ 、 $k_d$ 和 $k_q$ 均为正常数, 则 $\dot{V} \leq 0$ , 且 $V \geq 0$ , 由Lyapunov渐进稳定性定理可以看出该系统渐进稳定。

## 模糊自适应反步控制器设计

在上面设计的带微分项的自适应积分反步控制器中, 为了确保该控制系统的收敛性, 控制器参数 $k_\omega$ 、 $k_d$ 和 $k_q$ 均为正常数, 即控制系统中的反馈增益都是固定的正值, 但这在一定程度上限制了电动机控制系统的动态特性。为了提高系统的动态特性, 通过模糊推理系统对上面设计的反步控制器中的参数进行了在线自整定。

在初始阶段通过对式(23)进行观测, 并记录稳态情况下的观测值, 作为模糊自适应反步控制器的已知条件, 此后通过模糊自适应反步控制算法对负载转矩进行观测, 式(13)变为

$$i_q^* = \frac{2}{3p\phi_m}(\hat{T}_L + B\omega_r + k_\omega J e_\omega) \quad (26)$$

设Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}e_\omega^2 + \frac{1}{2}e_d^2 + \frac{1}{2}e_q^2 + \frac{1}{2\gamma_1}\tilde{T}_L^2 \quad (27)$$

对式(28)求导得

$$\dot{V} = e_\omega e_\omega^2 + e_d e_d^2 + e_q e_q^2 + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{T}_L \dot{\tilde{T}}_L \quad (28)$$

为保证 $\dot{V} \leq 0$ , 选择实际控制率为

$$v_d = Ri_d - p\omega_r L_q i_q + \frac{3p}{2J}(L_d - L_q)L_d e_\omega i_q + k_d L_d e_d \quad (29)$$

$$v_q = Ri_q + p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \phi_m + \frac{2L_q}{3p\phi_m J}(k_\omega J - B)\left[\frac{3p\phi_m}{2}e_q + \frac{3p}{2}(L_d - L_q)e_d i_q\right] - \frac{2k_\omega(k_\omega J - B)L_q}{3p\phi_m}e_\omega + k_q L_q e_q + \frac{3pL_q}{2J}\phi_m e_\omega \quad (30)$$

自适应律为

$$\dot{\hat{T}}_L = \gamma_1 \left[ \frac{e_\omega}{J} + \frac{2(k_\omega \hat{J} - B)}{3n\phi_m J} e_q \right] \quad (31)$$

将式(16)、式(20)代入到式(30)中, 整理得

$$v_q = Ri_q + p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \phi_m + \frac{3pL_q}{2J}\phi_m e_\omega + \frac{2L_q}{3p\phi_m J}(k_\omega J - B)(\hat{T}_L + B\omega_r - i_q) + \frac{L_q(k_\omega J - B)}{\phi_m J}(L_d - L_q)e_d i_q + k_q L_q \left[ \frac{2}{3p\phi_m}(\hat{T}_L + B\omega_r + k_\omega J e_\omega) - i_q \right] \quad (32)$$

由式(26)、式(31)和式(32)可知, 通过转速误差以及转速误差变化自适应调整动态改变 $k_\omega$ 和 $\gamma_1$ 大小, 便可以影响 $i_q^*$ 的值, 从而改变控制输出 $v_q$ , 在一定程度上提高了电动机控制系统的动态响应速度。模糊自适应反步控制器主要由模糊系统模块和反步法模块两部分构成, 控制器结构框图如图1所示。

## 仿真实验

为验证上述算法的可行性, 仿真实验主要对PMSM控制系统采用传统反步控制方法控制器和模

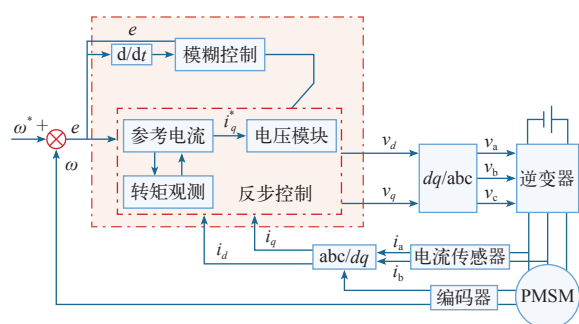


图1 模糊自适应反步控制系统

糊自适应反步控制器进行仿真对比，控制器的主要参数如下表所示。

表 永磁同步电动机主要参数

| 参数                                                              | 数值    |
|-----------------------------------------------------------------|-------|
| 额定功率/kW                                                         | 40    |
| 额定电压/V                                                          | 380   |
| 额定电流/A                                                          | 70    |
| 极对数                                                             | 4     |
| $d$ 轴电感 $L_d$ /mH                                               | 1.25  |
| $q$ 轴电感 $L_q$ /mH                                               | 1.25  |
| 定子电阻/ $\Omega$                                                  | 0.2   |
| 电动机转动惯量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$                           | 0.089 |
| 阻尼系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}/\text{rad}^2)$ | 0.005 |

在0.5 s时刻，负载扰动从10 N·m突然增加到20 N·m。控制器分别采用传统的反步控制和模糊自适应反步控制的电动机速度响应曲线如图2所示，由此可以看出模糊自适应反步控制的动态响应速度要优于传统的反步控制。永磁同步电动机采用模糊自适应反步控制时的定子电流仿真曲线以及电磁转矩仿真曲线如图3、图4所示，可以看

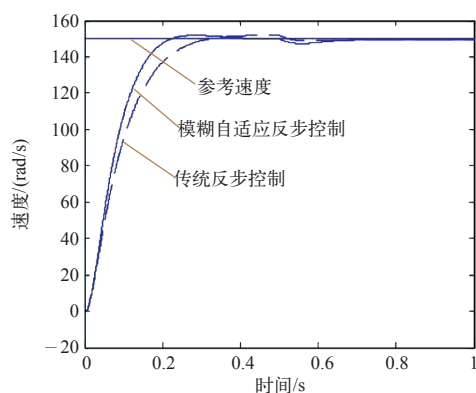


图2 模糊自适应反步控制和传统反步控制速度响应曲线

出电流和转矩在经过自适应调整后最终都能趋于稳定，并未出现大幅度剧烈波动。在电动机参数设置中 $d$ 轴电感变为 $0.5L_d$ ， $q$ 轴电感变为 $1.5L_q$ ，转子转动惯量为 $1.1J$ ，控制器参数不变，永磁同步电动机在传统反步控制和模糊自适应反步控制的速度响应曲线如图5所示，由图5可以看出模糊自适应反步控制相比传统反步控制具有更强的稳定性和鲁棒性。

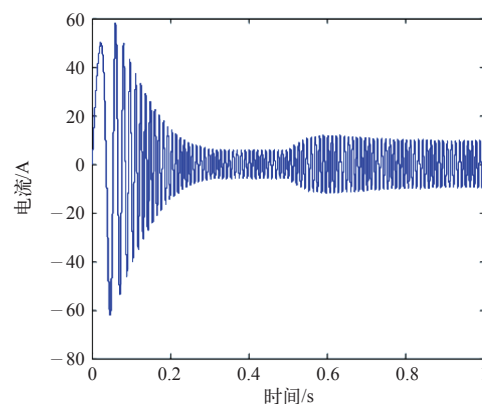


图3 模糊自适应反步控制的定子电流曲线

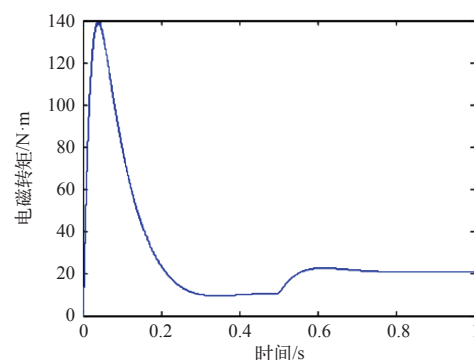


图4 模糊自适应反步控制的电磁转矩仿真曲线

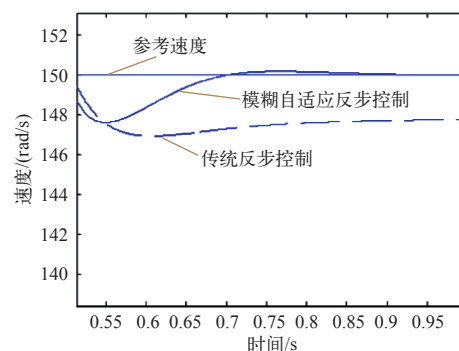


图5 参数变化时模糊自适应反步控制和传统反步控制仿真曲线

本文提出了一种基于模糊自适应反步控制方法,在分析永磁同步电动机数学模型的基础上,基于自适应反步控制方法设计了一种带微分的自适应反步控制策略,并利用李雅普诺夫函数证明了系统的收敛性。为了进一步提高自适应反步控制的动态性能,结合模糊控制理论设计了模糊自适应反步相结合的控制器的。经仿真实验可知,该控制策略具有较好的抗干扰能力,在经过模糊自整定反步控制下具有较好的动态响应速度。在参数改变情况下,基于模糊自适应反步控制方法有效提高了的永磁同步电动机系统的控制性能,且其速度响应曲线无明显变化。

## 参考文献

- [1] 王鑫, 李伟力, 程树康. 永磁同步电动机发展展望 [J]. 微电机, 2007, 40 (5) : 69-72.
- [2] Andon V T, Giuseppe L C, Vincenzo G, et al. Sliding mode neuro-adaptive control of electronic drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (1) : 671-679.
- [3] 张昌凡, 王耀南. 永磁同步电动机的变结构智能控制 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7) : 13-17.
- [4] Mohamed Y A R I, EI-Saadany E F. A current control scheme with an adaptive internal model for torque ripple minimization and robust current

regulation in PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 92-100.

- [5] 于海生, 郭雷, 赵克友, 等. 基于端口受控哈密顿方法的MSM最大转矩/电流控制 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (8): 82-87.
- [6] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8 (3): 338-353.
- [7] 纪志成, 李三东, 沈艳霞. 自适应积分反步法永磁同步电机伺服控制器的设计 [J]. 控制与决策, 2005, 20 (3).
- [8] 张国柱, 陈杰, 李志平. 直线电机伺服系统的自适应模糊摩擦补偿 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13 (1): 154-160.
- [9] 王军, 肖建. 永磁同步电动机自适应神经网络IP位置控制器 [J]. 电机与控制学报, 2005, 9 (6): 525-528.
- [10] 沈艳霞, 林瑾, 纪志成. 神经网络磁链估计的感应电机反步法研究 [J]. 控制与决策, 2006, 21 (7): 833-836.
- [11] 张月玲, 党选举. 基于死区迟滞函数的永磁同步直线电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (3): 67-74.
- [12] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于内模的永磁同步电机滑模电流解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (15): 91-99.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告