

基于降阶负载转矩观测器的永磁同步电机 广义预测控制*

周雅娣, 许鸣珠, 霍召晗

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)转速控制,提出了一种基于降阶负载转矩观测器的非线性预测控制(NPC)策略。在速度环控制律中负载转矩通常作为扰动值来考虑,将降阶负载转矩观测器与广义预测控制相结合,利用得到的转矩估计值代替实际值。仿真试验结果表明,所提控制策略能有效实现转速跟踪,与传统PI控制相比,趋于稳定的时间短、超调量小、抗干扰能力强、转速环控制的鲁棒性较高。

关键词: 永磁同步电机; 非线性广义预测控制; 降阶负载转矩观测器; 转速跟踪

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)03-0008-04

doi: 10.12177/emca.2019.156

Generalized Predictive Control with Reduced Order Load Torque Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor*

ZHOU Yadi, XU Mingzhu, HUO Zhaoan

(College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at the speed control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a nonlinear predictive control (NPC) strategy based on reduced order load torque observer is proposed. In the speed loop control law, the load torque is considered as the disturbance value. The reduced order load torque observer is combined with the generalized predictive control strategy. The estimated torque value is used to replace the actual value. Simulation and experimental results show that the control strategy proposed can effectively achieve speed tracking. Compared with the traditional PI control, the overshoot is smaller, the speed approaching to stability is faster, the anti-interference ability is stronger, and the robustness of the speed loop is higher.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); nonlinear generalized predictive control; reduced order load torque observer; speed tracking

0 引言

永磁同步电机(PMSM)性能优越,常应用于高可靠性场合^[1]。PMSM系统控制常采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略,即位置环、速度环和电流三环相扣,在同步旋转坐标系下采用PI调节器实现电机转速和电流控制^[2]。PMSM是一个多变量、强

耦合、模型不确定的高度非线性系统,在运行过程中,电机参数和负载转矩实时变化,PI控制器对系统参数变化的适应能力较差,对电机的动态响应性能和鲁棒性影响较大,不能满足高性能的控制要求^[3]。

预测控制是一种基于鲁棒控制的算法,能够有效处理非线性系统。与PI控制相比,预测控

收稿日期: 2019-11-22; 收到修改稿日期: 2019-12-25

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11972238)

作者简介: 周雅娣(1995—),女,硕士研究生,研究方向为控制理论与电机控制。

许鸣珠(1967—),女,教授,硕士生导师,研究方向为控制理论与控制工程。(通信作者)

制最突出的特点是具有预测功能,能够预测未来的运行状况,并依据历史、当前和未来的运行状况确定控制量。预测控制来源于工程实践,工程背景强,被许多研究证明是最稳健的控制律之一^[4-5]。预测控制在电机领域也有很多应用,文献[6-7]将预测控制应用于电流控制,提高了系统的动静态性能。文献[8]采用基于神经网络的PMSM广义预测控制改善了电机调速系统。文献[9]将广义预测控制理论和扩展状态观测器相结合对电机转速进行跟踪控制,将负载扰动作为已知数据处理。文献[10]设计了一种基于扰动观测器的鲁棒级联非线性广义预测控制,提高了系统的鲁棒性,但是计算复杂。

本文提出了一种基于降阶负载转矩观测器的非线性预测控制(NPC),对系统进行了建模,利用仿真研究了速度响应跟踪特性,验证了所提方法的有效性。

1 数学模型

PMSM在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - B \omega_m \quad (2)$$

电磁转矩方程可以写为

$$T_e = p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \varphi_f] \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 为定子电压的 d 、 q 轴分量; R 为定子电阻; i_d 、 i_q 为定子电流的 d 、 q 轴分量; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴的电感分量; ω_e 为电角速度; φ_f 为永磁体磁链; J 为转动惯量; ω_m 为电机的机械角速度; T_m 为负载转矩; B 为阻尼系数; p_n 为电机的极对数。

选取 $x = \omega_m$ 、 $u(t) = i_q$ 。根据式(2),可得PMSM的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + g_1 u(t) + g_2 T_L(t) \\ y = g_3 x \end{cases} \quad (4)$$

其中: $f(x) = -\frac{B}{J} \omega_m$; $g_1 = \frac{p_n [(L_d - L_q) i_d + \varphi_f]}{J}$; $g_2 = -\frac{1}{J}$; $g_3 = 1$ 。

2 非线性预测控制器设计

非线性预测控制器的目标是使未来的输出 $y(t+\tau)$ 能够在存在扰动的前提下最优跟踪未来的参考轨迹 $y_r(t+\tau)$ 。成本函数 J 保证输出转速尽可能跟踪给定的参考转速,在滚动时域内的成本函数可表示为^[11]

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_r} [y(t+\tau) - y_r(t+\tau)]^T \cdot [y(t+\tau) - y_r(t+\tau)] d\tau \quad (5)$$

式中: τ_r 为预测时域; $y(t+\tau)$ 为预测的转速输出; $y_r(t+\tau)$ 为参考的转速输出。

根据文献[11],令相对阶 $\rho=1$,输出对时间的 $0 \sim \rho$ 阶导为

$$y(t) = L_f^0 h(x) \quad (6)$$

$$y(t) = L_f h(x) + L_{g1} L_f^0 h(x) u(t) \quad (7)$$

预测输出在 t 时刻的泰勒级数展开可得:

$$y(t+\tau) = y(t) + \tau y(t) \quad (8)$$

同理,预测的参考输出为

$$y_r(t+\tau) = y_r(t) + \tau y_r(t) \quad (9)$$

为了实现转速的跟踪控制,需要满足成本函数最小,即需要满足 $\frac{\partial J}{\partial u} = 0$ 。因此,考虑扰动时非线性系统多输入多输出的控制律为

$$u(t) = -G_1^{-1}(x) \left\{ \sum_{i=0}^{\rho} K_i [L_f^i h(x) y_r^{(i)}(t)] + L_f h(x) + G_2(x) T_L(t) \right\} \quad (10)$$

其中: $K_i = \frac{(2\rho+1)(\rho!)}{(\rho+i+1)(i!) } \tau_r^{i-\rho}$, $i=0$; $G_1(x) = L_{g1} L_f^{\rho-1} h(x) = L_{g1} L_f^0 h(x) = L_{g1} \omega = \frac{p_n [(L_d - L_q) i_d + \varphi_f]}{J}$; $L_f h(x) = f(x) = -\frac{B}{J} \omega_m$; $G_2(x) = L_{g2} L_f^{\rho-1} h(x) = -\frac{1}{J}$; $L_f^k h(x) - y_r^{(k)}(t) = [L_f^0 h(x) - y_r^0(t)] = y - y_r$ 。

综上所述,可得PMSM的转速控制律为

$$u(t) = -\frac{J}{p_n [(L_d - L_q) i_d + \varphi_f]} \cdot \left[\frac{3}{2\tau_r} (y - y_r) - \frac{B}{J} \omega_m - -\frac{1}{J} T_L(t) \right] \quad (11)$$

3 降阶负载转矩观测器

由式(11)可知,PMSM 的转速控制律中包含着负载转矩,而负载转矩一般不能直接测得,因此本文设计了降阶负载转矩观测器获得电机负载转矩的估计值来替代实际值。将式(3)改写为状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中: } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0]; u = T_e.$$

所构建的降阶负载转矩观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{K}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ 为被估计的状态变量, $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix}$; $\mathbf{K}$ 为反馈

增益矩阵, $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$ 。

定义 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 为状态误差,则根据式(12)~式(13)可得:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{e} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} - k_1 & -\frac{1}{J} \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

特征方程可表示为

$$\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})] = s^2 + \left(\frac{B}{J} + k_1\right)s - \frac{k_2}{J} \quad (15)$$

根据极点配置法,设期望极点为 a_1 、 a_2 ,则观测器的期望特征多项式可表示为

$$s^2 - (a_1 + a_2)s + a_1 a_2 = 0 \quad (16)$$

当摩擦因数 B 忽略不计,由式(15)、式(16)可得:

$$\begin{cases} k_1 = -(a_1 + a_2) \\ k_2 = a_1 a_2 J \end{cases} \quad (17)$$

则式(13)可表示为

$$\hat{\omega}_m = \frac{T_e + (\omega_m - \hat{\omega}_m)\left(k_1 J + \frac{k_2}{s}\right)}{Js + B} \quad (18)$$

转速误差信号经过一个 PI 运算后可得等效负载转矩分量为负^[12],则转矩状态观测可表示为

$$\hat{T}_L = -(\omega_m - \hat{\omega}_m)\left(k_1 J + \frac{k_2}{s}\right) \quad (19)$$

4 仿真研究

利用 Simulink 建立系统的仿真模型,通过试验来验证所提方法的转速跟踪性能与鲁棒性。试验采用 $i_d=0$ 的控制策略,系统控制框图如图 1 所示。试验用 PMSM 参数如表 1 所示。

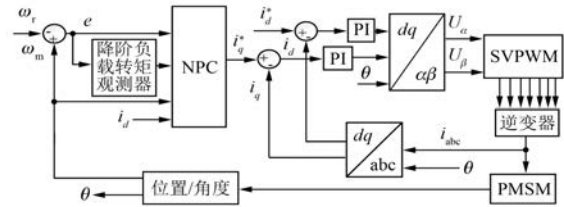


图 1 系统控制框图

表 1 试验用 PMSM 参数表

参数名称	参数值
电机转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
定子电阻 R_s/Ω	0.958
极对数 p_n	4
永磁体磁链 φ_f/Wb	0.182 7
d 轴电感 L_d/mH	5.25×10^{-3}
q 轴电感 L_q/mH	0.012
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.008

为了保证速度的光滑性,定义实现速度基准的二阶线性滤波器^[13-14]:

$$H(s) = \frac{w_0^2}{s^2 + 2\zeta w_0 s + w_0^2} \quad (20)$$

其中: $w_0=200$; $\zeta=1$ 。

在广义预测控制中取预测时域 $\tau_r=0.01$ 。给定电机转速为 1 000 r/min。在降阶负载观测器中取 $k_1=10$ 、 $k_2=50$ 。

为了分析基于降阶负载观测器 PMSM 广义预测控制的抗扰动能力,系统空载起动进入稳态后,在 $t=0.02$ s 时突加负载得到系统响应曲线。传统 PI 控制和所提控制方法对应的电机转速性能响应曲线如图 2 所示。从仿真结果可知,与传统 PI 控制相比,基于降阶观测器的 PMSM 广义预测控制方法具有超调量小、趋近于稳定的速度快、

抗干扰能力强等优点。

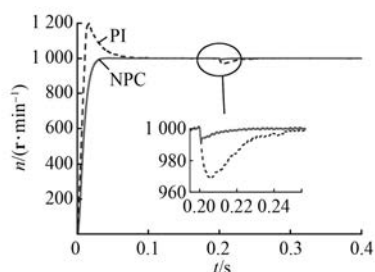


图2 速度阶跃响应曲线

为了验证所提控制方法的速度跟踪特性,在额定负载 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时启动电机,给定速度为 $800 \sim 1000 \text{ r/min}$ 之间变化的方波信号,系统的速度跟踪曲线如图3所示。与PI方法相比,所提方法系统的速度响应快,能够准确无超调地跟踪设定值。

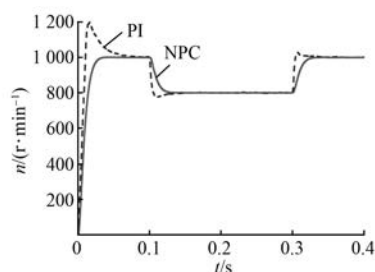


图3 速度跟踪响应曲线

采用 $i_d = 0$ 的控制策略,对应的 dq 轴电流响应曲线如图4所示。图4中, i_d 的值基本保持在0附近,在 0.2 s 施加负载转矩 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, i_d 的值基本保持不变。由此说明所提控制方法对电流控制有效。

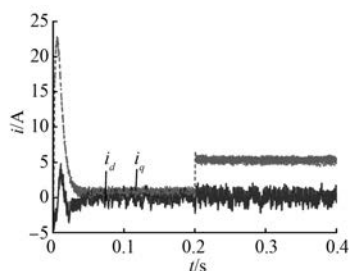


图4 d 、 q 轴电流的响应曲线

5 结 语

本文提出了一种新型 PMSM 转速跟踪策略。基于 NPC 设计了针对 PMSM 的转速控制律,应用

降阶负载观测器解决负载转矩不可测的问题。仿真试验表明,本文所提控制策略能够对速度进行快速准确的跟踪。与传统 PI 控制相比,所提方法调节时间短且超调量更小,负载扰动时,转速的抗干扰性能更好,具有较强的鲁棒性,需要调节的控制参数较少,易于工程应用。

【参考文献】

- [1] OTAVA L. Implementation of PMSM inter-turn short fault detection using frequency analysis of stator currents[C]//14th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems (PDES), 2016.
- [2] CASADEI D, PROFUMO F, SERRA G, et al. FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 779.
- [3] CHANG S H, CHEN P Y. Self-tuning gains of PI controllers for current control in a PMSM[C]//2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010.
- [4] 许锋,魏小丽,任丽红,等.基于多变量广义预测控制的不稳定系统控制结构选择方法[J].自动化学报,2013,39(9): 1547.
- [5] 许鸣珠,李申山,潘存治.基于 Kautz 模型的优化补偿预测函数控制[J].中国电机工程学报,2009,29(2): 101.
- [6] 沈绍博,李涛,祖晖,等.带扰动观测器的永磁同步电机非线性预测跟踪控制[J].南京航空航天大学学报,2015,47(3): 367.
- [7] 李玲瑞,许鸣珠,高旭东.基于扩展卡尔曼滤波器的电流预测控制[J].电机与控制应用,2017,44(3): 1.
- [8] 许泽伟,胡玉娥,李书臣,等.基于神经网络的永磁同步电机广义预测控制[J].河南科技大学学报(自然科学版),2008,29(5): 46.
- [9] 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.
- [10] ERROUSSI R, OUHROUCHE M, CHEN W H. Robust nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2009.

(下转第 16 页)

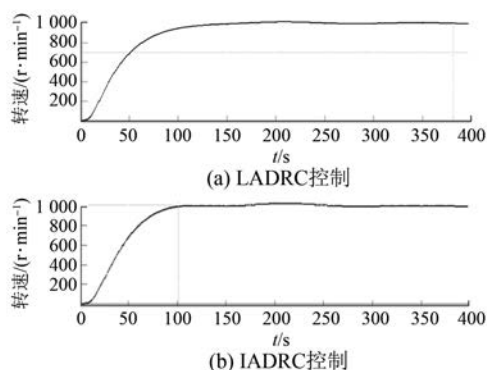


图7 LADRC 控制和 IADRC 控制的转速响应曲线

对于系统综合扰动观测有更好的观测效果。同时采用 NESO 设计的负载转矩观测器能够准确观测系统转矩并进行前馈补偿,该措施将负载转矩从综合扰动中提取出来,降低 ESO 的压力,使系统具有更好的抗扰能力。

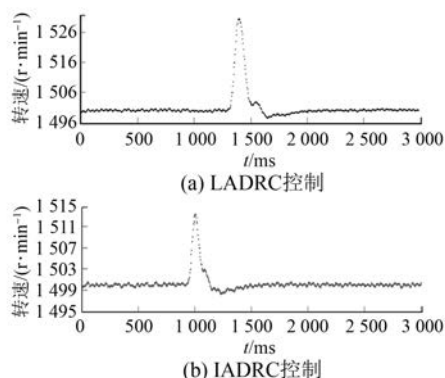


图8 LADRC 控制和 IADRC 控制的速度波动曲线

4 结 语

本文采用 ADRC 策略设计了 PMSM 的速度控制器,针对 PMSM 调速系统的控制特点设计了 IADRC。与 LADRC 相比,在实现系统解耦的基础上,采用速度信号直采的方法提高系统速度响应

性能,分离系统负载转矩扰动和 ESO 改进的措施,使 ADRC 更好地适应工况下负载扰动的变化,从而使系统具有更好的抗扰能力。

【参考文献】

- [1] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M].4版.北京:机械工业出版社,2010.
- [2] NOWAK P, CZECHOT J. Robust tuning for first-order reduced active disturbance rejection controller[C]//2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2016.
- [3] ZHANG C, CHEN Y. Tracking control of ball screw drives using ADRC and equivalent-error-model-based feedforward control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7682.
- [4] OZEN O, SARIYILDIZ E, YU H, et al. Practical PID controller tuning for motion control[C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2015.
- [5] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前沿科学, 2007(1): 24.
- [6] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.
- [7] 董家臣,高钦和.永磁直线同步电机电流环新型线性自抗扰控制[J].电机与控制应用, 2019, 46(1): 1.
- [8] 曾岳南,曾祥彩,周斌.永磁同步电机传动系统电流环非线性自抗扰控制器的设计与稳定性分析[J].电工技术学报, 2017, 32(17): 135.
- [9] WEN J, HUANG Y. Robust speed control of permanent magnet synchronous motor [C]//2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013.
- [10] 袁晓东,楼冠男,陈亮,等.基于线性自抗扰的微电网平滑切换控制策略[J].电网技术, 2017, 41(12): 3824.

(上接第 11 页)

- [11] CHEN W H, BALLANCE D J, GAWTHROP P J. Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach [J]. Automatica, 2003, 39(4): 633.
- [12] 章玮,王伟颖.基于降阶负载扰动观测器的永磁同步电机控制[J].机电工程, 2012, 29(7): 821.

- [13] 薛生辉,曲俊海,王永宏,等.比例-积分控制加广义预测控制算法及其应用[J].控制理论与应用, 2018, 35(9): 1320.
- [14] 曾德良,高耀岩,胡勇,等.基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J].中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4819.