

基于降阶负载扰动观测器的永磁同步电机控制

章 玮, 王伟颖

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对永磁同步电动机(PMSM)的负载扰动问题,提出了一种基于降阶负载扰动观测器的永磁同步电机前馈控制方法。通过设计降阶负载观测器来实时观测电机负载转矩变化,并将观测值作为电流前馈补偿来增加系统鲁棒性;考虑到转动惯量对观测器的影响,引入了梯度校正参数估计法,对电机的转动惯量进行了实时辨识;最后,将负载转矩观测与永磁同步电机的矢量控制相结合,对永磁同步电机的 q 轴分量进行了转矩前馈补偿以提升系统的动态性能。仿真结果表明,采用梯度校正参数估算法能快速准确地迭代计算永磁同步电机的转动惯量,所设计的降阶负载扰动观测器能有效地估计转矩变化。研究结果表明,基于降阶负载转矩观测器的前馈补偿与永磁同步电机矢量控制相结合,能有效地提升永磁同步电动机转速控制的鲁棒性。

关键词:降阶观测器;永磁同步电机;参数辨识

中图分类号:TM341;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)07-0821-04

Control of PMSM based on reduced-order disturbance observer

ZHANG Wei, WANG Wei-ying

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at reducing effect of load torque disturbance to the motor speed, a novel control method for permanent magnetic synchronous motor(PMSM) with reduced order anti-disturbance observer was proposed. Reduced order anti-disturbance observer was designed to estimate the disturbance torque. The observed value was used as feed forward compensation to the current loop to improve the robustness of the system. Considering of the effect of the motor inertia parameter to the anti-disturbance observer, gradient correction parameter algorithm was introduced to estimate the inertia. Then, the estimation of the torque observer was compensated to the q -axis current to improve the dynamic response of the speed. The accuracy of the inertia estimation and the rationality of the reduced order anti-disturbance observer design were verified by the simulation result. The results indicate that the robustness of the system can be improved by vector control with the compensation of the estimation of the reduced-order disturbance observer.

Key words: reduced-order observer; permanent magnetic synchronous motor(PMSM); parameter identification

0 引 言

由于体积小、性能好、控制相对简单等优点,永磁同步电机(PMSM)被广泛应用于精密数控机床、特种机器人等高精度伺服系统^[1]。然而在实际运行过程中,负载经常受外界干扰引起转速波动,因此影响了PMSM的系统稳态性能。

目前,国内外研究学者在抗扰动方面提出了多种方法,主要分为滑模控制法^[2]、智能控制、自适应控制^[3]、自抗扰控制^[4]、基于前馈-反馈结构法的 H_∞ 控

制器^[5]、观测器法^[6-7]等。文献[8]提出了改进型滑模控制,通过仿真验证了永磁同步电机对外界扰动的抗干扰性,但仍存在抖动问题。文献[9]基于信号补偿的鲁棒控制原理,将 dq 坐标下的PMSM模型转化为标称模型与不确定项的和,但鲁棒控制很难实现对PMSM非线性的完全补偿。文献[10]提出通过闭环迭代学习补偿系统的非线性,但是其基于对象模型和扰动模型已知条件下设计,且设计较为复杂。文献[11]提出了全维观测器的设计方法,但三阶系统设计不利于编程实现。

收稿日期:2012-01-16

作者简介:章 玮(1967-),女,浙江杭州人,副教授,硕士生导师,主要从事伺服控制、风力发电技术、无位置传感器无刷直流电动机控制技术、矩阵式变换器控制技术方面的研究。E-mail: weizhang@zju.edu.cn

本研究基于全维观测器,根据永磁电机的特点提出降阶的负载转矩观测器,并考虑到转动惯量对观测器的影响,引入梯度校正参数估计法对电机转动惯量进行实时辨识和修正。最后,将负载转矩观测器与对永磁同步电机的矢量控制相结合,构成电机转矩的前馈控制系统。

1 电动机模型以及降阶观测器设计

永磁同步电机同步速 d - q 模型为:

$$\begin{cases} u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + n_p \omega_r L_d i_d + \omega \psi_f \\ u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - P \omega_r L_q i_q \\ T_e - T_l = J \frac{d\omega_r}{dt} + b \omega_r \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q —定子电流在直轴和交轴上的分量; u_d, u_q —定子电压在直轴和交轴上的分量; ω_r —机械转速; θ —电机转子位置; R_s —定子电枢电阻; L_d, L_q —电感在直轴和交轴上的分量,若相等时则有 $L_d = L_q = L$; P —极对数; ψ_f —永磁转子的磁链; J, b —电机转动惯量和摩擦系数; T_l —负载转矩。

本研究取状态量 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_l \end{bmatrix}$, 输出量 $y = \omega_r$, 将式

(1) 写成状态方程的形式有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (2)$$

设定:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix};$$

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

$$\mathbf{u} = T_e。$$

式(2)简写为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (3)$$

在 S 空间,转子位置和转速之间存在 $\theta = \omega/s$ 的线性关系,转子位置可通过转速获得,因此只需估计转速及负载转矩两个变量。本研究基于式(3)的状态方

程,提出了一个降阶状态观测器,表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ —被估计的状态量, $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ \hat{T}_l \end{bmatrix}$; $\mathbf{K}$ —反馈增益矩

阵, $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$ 。

假设定义 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 为状态误差,则根据式(2~4)可知:

$$\frac{d\mathbf{e}}{dt} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} - k_1 & -\frac{1}{J} \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其特征方程为:

$$\det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})) = s^2 + \left(k_1 + \frac{b}{J}\right)s - \frac{k_2}{J} = 0 \quad (6)$$

为了满足 $\hat{\mathbf{x}}$ 逼近 $\mathbf{x}$ 的速率要求,需要通过选择合适的 $\mathbf{K}$ 值以满足 $\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C}$ 的极点配置。根据期望极点 a_1, a_2 , 观测器的期望特征多项式为:

$$s^2 - (a_1 + a_2)s + a_1 a_2 = 0 \quad (7)$$

若式(6)中忽略摩擦系数 b ,则由式(6~7)可得

$$\begin{cases} k_1 = -(a_1 + a_2) \\ k_2 = a_1 a_2 J \end{cases} \quad (8)$$

式(4)又可改写成:

$$\hat{\omega}_r = \frac{T_e + (\omega_r - \hat{\omega}_r) \left(k_1 + \frac{k_2}{s} \right)}{Js + b} \quad (9)$$

由式(9)构造的降阶负载转矩观测器如图1所示。图中 k_l 为电机转矩常数。

式(1)中的运动方程在 S 域可表示成:

$$\omega_r = \frac{T_e - T_l}{Js + b} \quad (10)$$

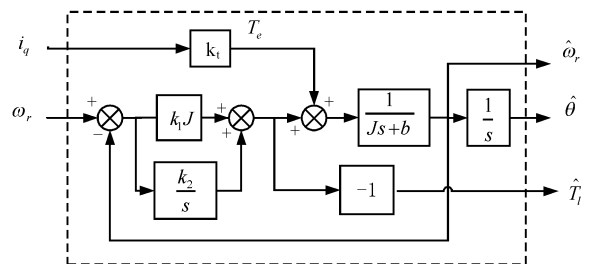


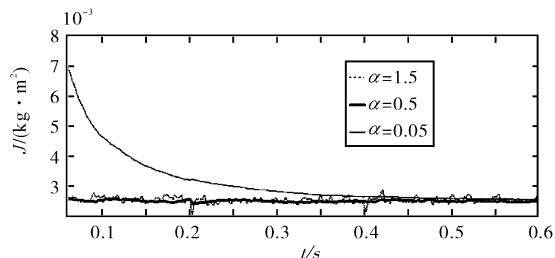
图1 负载力矩降阶观测器控制图

对比图1和式(10)可知,图1中转速误差信号经过一个PI运算后可得到负的等效负载转矩分量。降

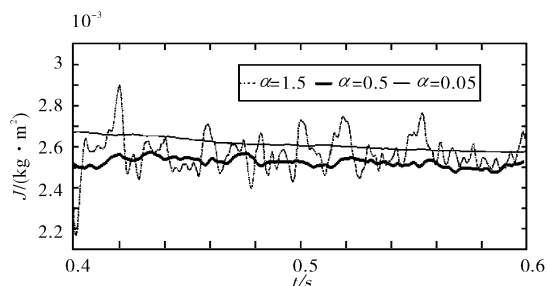
图2 永磁同步电机抗负载扰动控制原理图

3.2 转动惯量辨识

根据式(21)可得,转动惯量的辨识很大程度上与自适应增益 α 有关(一般修正常数 c 取值为1)。为探讨 α 的选值,本研究在给定转速标么值为0.15情况下,研究了不同 α 选值对转动惯量估算收敛的影响。



(a) 转动惯量观测波形



(b) 转动惯量稳态观测波形

图3 转动惯量观测波形

转动惯量为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,不同自适应增益 α 取值下的辨识结果如图3(a)所示,图3(a)中0.4 s~0.6 s的部分如图3(b)所示。从图3(a)可看出, α 取0.05时,到0.6 s观测值还未收敛。由图3(b)可知,当自适应增益 α 取1.5时,误差达到12%。因此可以看出:当自适应增益 α 太小时,观测值收敛较慢;而当自适应增益 α 较大时,会导致观测值误差偏大,甚至振荡。根据本研究所搭建的系统,自适应增益 α 取0.5。

3.3 负载转矩辨识

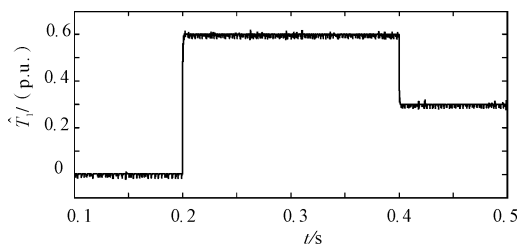


图4 负载转矩观测波形

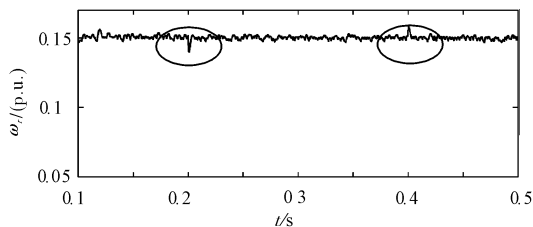
为验证负载转矩观测器设计的有效性,电机给定转速标么值为0.15,本研究在0.1 s~0.2 s不施加负载转矩,0.2 s~0.4 s施加标么值为0.6的负载转矩,在0.4 s~0.5 s施加标么值为0.3的负载转矩。转矩

观测器观测结果如图4所示。

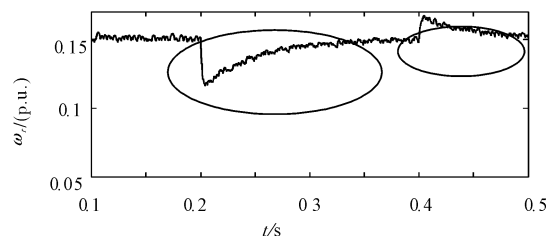
根据图4仿真波形可知,负载转矩观测器不但能在稳态时准确地辨识出电机的负载转矩值。当电机负荷发生变化时,负载观测器能很好地跟踪负载转矩的变化,显示了良好的鲁棒性。

3.4 永磁同步电机系统抗负载扰动测试

同样负载转矩变化情况下,本研究通过给定相同PI参数得到的转速对比波形如图5所示。在同步电机矢量控制中引入转矩观测构成速度前馈控制的仿真波形如图5(a)所示。转速标么值给定为0.15,在0.2 s时突加负载60%,在0.4 s突卸负载30%。受负载转矩的影响,补偿转速波形如图5(a)所示,加入速度前馈的系统中,转速下降0.01,大约为6%;速度调节时间约为0.01 s。而在未加前馈的系统中,补偿转速波形如图5(b)所示,转速下降约为25%;速度调节时间约为0.15 s。以上结果说明,负载补偿环节的引入减小了动态速降,缩短了速度动态调节时间,有效抑制了由负载扰动引起的转速变化。



(a) 引入负载转矩观测补偿转速波形



(b) 未引入负载转矩观测补偿转速波形

图5 负载转矩观测器对控制系统影响

4 结束语

针对负载转矩变化不确定情况,提出的降阶观测器的设计,相对于全维观测器,更为简洁、易实现。仿真结果表明,该观测器能有效、快速地实时观测负载转矩变化;与永磁同步电机的矢量控制结合,通过对 q 轴电流进行前馈控制,该观测器能很好地提升系统的动态响应性。

考虑到观测器需要用到转动惯量 J ,而电机的参

(下转第832页)

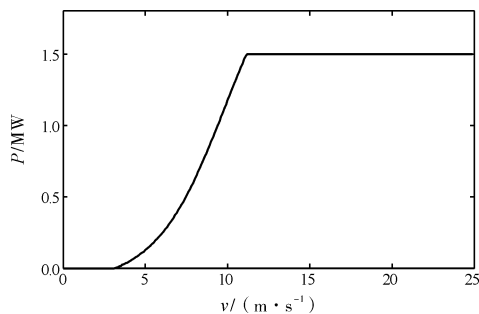


图 8 风机功率曲线图

行满功率发电。该参数基本与风机的实际设计参数一致,表明了风机模型及控制方法的正确性。

3 结束语

本研究提出了利用 PSAT 内置的风机电网模型,根据国内某 1.5 MW 双馈风力发电机组实际设计参数进行了建模,并在两种不同的风速模型下,对风机的转速、电压、功率和功角的动态特性进行了仿真,并对风机的功率曲线模型也进行了仿真。

本研究的主要贡献是:①探讨了风机接入电网的模型,利用 PSAT 软件进行了风机与电网接口的仿真;②以实际的风机设计数据为基础,进行了风机在不同风速模型下的转速、电压、功率与功角的动态响应曲线的仿真;③根据风机接入电网模型,仿真了风机的功率曲线;④利用该风机模型,对风电场的电网接口的

仿真进行了一些初步研究。

参考文献 (References):

- [1] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等. 并网风力大电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-34.
- [2] 张义斌,王伟胜,戴慧珠. 基于 P-V 曲线的风电场接入系统稳态分析[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 61-65.
- [3] 向大为,杨顺昌,冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 130-135.
- [4] BOSSANYI E A. GH Bladed Theory Manual 3.82[R]. UK-Bristol: Grand Hassan and Partner Limited, 2009: 13-36.
- [5] 许寅,陈颖,梅生伟. 风力发电机组暂态仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 100-107.
- [6] 尹明,李庚银,周明,等. 双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 22-27.
- [7] 李鹏程,叶林. 基于 EMT_PAT 的双馈式风力发电系统的模型与实现[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 93-98.
- [8] 冯双磊,赵海翔,任普春,等. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
- [9] MILANO F. Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0[R]. Canada: University of Waterloo, 2006.
- [10] 申新贺,潘东浩,唐继光. 大型风电机组功率曲线的分析与修正[J]. 应用能源技术, 2009(8): 28-34.

[编辑:李辉]

(上接第 824 页)

数随运行时间长短、工况不同具有一定的不确定性,本研究利用梯度校正参数估算法迭代计算得到转动惯量 J ,从而可以实时修正负载转矩观测器模型。

参考文献 (References):

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 骆再飞,蒋静坪,曹芳. 交流伺服系统的动态模糊滑模控制策略研究[J]. 机电工程, 2008, 25(11): 68-71.
- [3] 宋亦旭,王春洪,尹文生,等. 永磁直线同步电动机的自适应学习控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 151-156.
- [4] 杨依楠,徐进学,王向东. 基于扩张状态观测器的 PMSLM 自抗扰控制[J]. 机电工程, 2008, 25(4): 87-90.
- [5] 刘丙友,凌有铸,杨会成. 基于 H_∞ 控制理论的交流伺服系统控制器设计[J]. 机电工程, 2009, 26(11): 31-33.
- [6] LEE K B, YOO J Y, SONG J H, et al. Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO[J]. **Electric Power Applications, IEE Proceedings**, 2004, 151(1): 116-120.
- [7] XU Dian-guo, WANG Hong, SHI Jing-zhuo. PMSM Servo

System With Speed and Torque Observer[C]//Power Electronics Specialist Conference, 2003. Acaquelco: [s. n.], 2003: 241-245.

- [8] ZHANG Bi-tao, PI You-guo. Enhanced Sliding-Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Servo Drive[C]//Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan: [s. n.], 2011: 122-126.
- [9] 杨书生,钟宜生. 永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 84-90.
- [10] LI Hong-kui, WANG Qing-lin. Self-tuning Controller for Servo Motor with an Adaptive Disturbance Observer[C]//2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). Harbin: [s. n.], 2010: 277-281.
- [11] ZHENG Ze-dong, FADEL M, LI Yong-dong. A High-Performance Control System of PMSM based on Load Torque Observer[C]//Power Electronics Specialists Conference 2007. Orlando: [s. n.], 2007: 587-592.
- [12] 庞中华,崔红. 系统辨识与自适应控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.

[编辑:李辉]