

文章编号: 1001-0920(2009)01-02015-04

基于滑模观测器的永磁同步电机变结构鲁棒控制

张细政, 王耀南

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 提出一种由一个变结构控制器和一个滑模观测器组成的控制系统, 用于永磁同步电机的无传感器鲁棒控制. 首先利用 Lyapunov 稳定性原理分析得到观测器的收敛条件及自适应率, 并证明了其稳定性; 然后以转速误差为参量建立滑模面, 构造出变结构速度控制器, 推导出自适应速度控制律, 并得到速度控制的参考电流和参考电压. 该方案的控制性能不依赖于电机参数和干扰变化, 具有较强的鲁棒性. 仿真结果验证了该方案的有效性与正确性.

关键词: 永磁同步电机; 滑模观测器; 变结构控制; 矢量控制; 鲁棒性

中图分类号: TP372

文献标识码: A

Robust variable structure control of PMSM based on sliding mode observer

ZHANG Xi2zheng, WANG Yao2nan

(School of Electrical and Information Engineering, Hu. nan University, Changsha 410082, China. Correspondent: ZHANG Xi2zheng, E-mail: z_x_z2000@163.com)

Abstract: A robust control scheme, composed of a variable structure controller and a sliding mode observer, is presented for permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive in this paper. The convergence condition and controlling rule of the observer are obtained by utilizing Lyapunov theory. By using the speed error as the sliding surface, the controller's adaptive law is deduced and the required voltages and currents are then solved. The scheme is insensitive and robust to the parameters' variation and uncertainties. Simulation results show the effectiveness and correctness of the proposed scheme.

Key words: PMSM; Sliding mode observer; Variable structure control; Vector control; Robustness

1 引言

在采用永磁同步电机(PMSM)的高性能伺服驱动和控制场合, 为保证电机稳定运行并达到期望的控制性能, 需要获得可靠的永磁转子位置信息. 采用无传感器的 PMSM 系统由于具有免安装、低价格和高可靠性而得到了广泛的研究与应用^[1]. PMSM 无传感器调速控制系统利用电机绕组中的有关电信号, 通过计算估计出转子的位置和速度. 目前已提出的主要策略有: 1) 基于数学模型的开环估计; 2) 基于检测感应电动势来估计转速和位置; 3) 模型参考自适应方法; 4) 引入状态观测器的现代控制方法^[25]. 近年来, 滑模变结构方法因其所具有的优良特性而受到越来越多的重视. 该方法通过自行设计所需的滑模面和等效控制律, 能快速响应输入的变

换, 而对参数变换和扰动不敏感, 具有很好的鲁棒性, 且物理制作简单. 但大多数采用滑模变结构方法的控制系统没采用联合滑模观测和滑模控制的思想进行鲁棒方案的设计^[28].

本文在两轴坐标系下对永磁同步电机的速度参量建立滑模面, 并根据 Lyapunov 稳定性条件设计到达律, 构造一种变结构速度控制器以取代传统的 PI 速度控制器, 使得系统具有强鲁棒性和快速动态响应. 同时, 对转子速度构造鲁棒性更强的滑模观测器以取代传统的速度观测器, 该方法能克服电机参数摄动和负载扰动对系统性能的影响. 系统仿真结果验证了该控制方案设计的正确性.

2 滑模观测器

2.1 永磁同步电机模型

收稿日期: 2008-04-13; 修回日期: 2008-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60775047); 湖南省自然科学基金项目(07JJ6111).

作者简介: 张细政(1978), 男, 湖北浠水人, 讲师, 博士生, 从事智能控制及其在电气工程中应用的研究; 王耀南(1958), 男, 昆明人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能信息处理等研究.

以定子电流和反电动势作为状态变量时,理想表贴式永磁同步电机可表示为^[1]

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t).\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(t) = [i_A, i_B, e_A, e_B]^T$ 为 A B 轴的定子电流和反电动势; $e_A = -K_e X \sin H$; $e_B = -K_e X \cos H$; K_e 为反电动势常数; $\mathbf{u}(t) = [u_A, u_B]^T$ 为定子 A B 轴电压;

R_s, L_s 分别为定子电阻和电感. 系统矩阵 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = [-\mathbf{B} \quad \mathbf{0}]^T$, $\mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}]$, 二维矩阵 \mathbf{A}

$$= -R_s \mathbf{I} / L_s, \mathbf{B} = \mathbf{I} / L_s, \mathbf{D} = \mathbf{X}\mathbf{J}, \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & -1 \\ 1 & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

在获取测量的定子电压和电流分量后,依据上述模型设计基于滑模变结构的观测器来估计转子实际转速和位置,并利用变结构控制器实现对电机参数摄动和外部扰动不敏感的无传感器鲁棒控制.

2.2 观测器设计

由式(1)中的状态和输出方程,构造滑模观测方程

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) - \mathbf{K}\text{sgn}(\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}). \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}(t) = [\hat{i}_A, \hat{i}_B, \hat{e}_A, \hat{e}_B]^T$ 为 A B 轴的定子电流和反电动势观测值; $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1, -h_1 \mathbf{K}_1]^T$; $\mathbf{K}_1 =$

$$k_1 \mathbf{I} / L_s; \text{矩阵 } \hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; h_1 \text{ 和}$$

k_1 为正的常数,决定了观测器的开关增益; $\text{sgn}(\#)$ 为符号函数.

用观测方程(2)减去 PMSM 的状态方程(1),可得观测误差的动态方程为

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - \mathbf{K}_1 \text{sgn}(\mathbf{e}), \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{D}\mathbf{e} + h_1 \mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{e}), \quad (4)$$

式中上标 ~ 0 为变量的观测值与实际值之差. 给出建立在定子电流误差上的滑动超平面 $S_1 = i_s = \hat{i}_s - i_s$. 定义 Lyapunov 函数 V_1 且其导数 \dot{V}_1 满足下列条件:

$$\dot{V}_1 = S_1^T \dot{S}_1 = [i_A \quad i_B] \# [i_A \quad i_B]^T < 0. \quad (5)$$

即当 $i_A < 0, i_B < 0$ 时,滑模观测器进入滑模状态,由此可推得

$$\begin{aligned}i_A &= i_A [-\frac{R_s}{L_s} i_A + \frac{1}{L_s} e_A - \frac{k_1}{L_s} \text{sgn}(i_A)] = \\ &\begin{cases} \frac{1}{L_s} i_A (e_A - k_1) - \frac{R_s}{L_s} i_A^2, & i_A \setminus 0; \\ \frac{1}{L_s} i_A (e_A + k_1) - \frac{R_s}{L_s} i_A^2, & i_A < 0. \end{cases} \quad (6)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_B &= i_B [-\frac{R_s}{L_s} i_B + \frac{1}{L_s} e_B - \frac{k_1}{L_s} \text{sgn}(i_B)] = \\ &\begin{cases} \frac{1}{L_s} i_B (e_B - k_1) - \frac{R_s}{L_s} i_B^2, & i_B \setminus 0; \\ \frac{1}{L_s} i_B (e_B + k_1) - \frac{R_s}{L_s} i_B^2, & i_B < 0. \end{cases} \quad (7)\end{aligned}$$

满足式(6)和(7)中的 k_1 取值范围为

$$k_1 > \max(|e_A|, |e_B|). \quad (8)$$

为满足上述条件,开关增益 k_1 必须足够大. 但 k_1 过大,会增加抖振噪声,导致不必要的估计误差,故选用如下自适应律:

$$k_1 = w \sqrt{e_A^2 + e_B^2}, \quad (9)$$

式中 w 为正的比例因子. 由式(9)确定的 k_1 满足不等式(8),此时系统进入滑模状态,有 $S_1 = \dot{S}_1 = 0$. 进一步,求得等效的反电动势误差为 $\mathbf{B}\mathbf{e} = \mathbf{K}_1 \text{sgn}(i_s)$, 这时可将反电动势误差方程转化为

$$\dot{e}_A = -X e_B + X e_B - h_2 e_A, \quad (10)$$

$$\dot{e}_B = X e_A - X e_A - h_2 e_B, \quad (11)$$

式中 h_2 为正的常数. 而转速误差方程为

$$\dot{X} = e e_B - e e_A. \quad (12)$$

经低通滤波器将观测变量中的高次谐波滤除后,得到反电动势为

$$\hat{e}_A = -X \hat{e}_B - h_2 e_A, \quad (13)$$

$$\hat{e}_B = X \hat{e}_A - h_2 e_B. \quad (14)$$

式(13)和(14)即构成了反电动势观测值的自适应律. 同样,若忽略采样周期内转速的变动,可推得转速估计方程为

$$\dot{X} = e \hat{e}_B - e \hat{e}_A. \quad (15)$$

式(15)即为转速估计的自适应律. 通过一个 PI 积分环节,可计算出估计转速,对转速进行积分即可得到转子位置 H , 这里使用延迟的一阶积分环节代替纯积分环节求取转子位置.

为证明反电动势观测方程的稳定性,选取 Lyapunov 函数

$$V_2 = 0.5(e_A^2 + e_B^2 + X^2). \quad (16)$$

则其导数为

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= e \hat{e}_A + e \hat{e}_B + X \dot{X} = \\ &[e \hat{e}_A X - e \hat{e}_B X + X(e \hat{e}_A - e \hat{e}_B)] = \\ &- h_2(e_A^2 + e_B^2) [0].\end{aligned} \quad (17)$$

因 \dot{V}_2 满足负定的条件,故反电动势和转速估计算法是稳定的. 从式(17)还可看出,转速的调整信号取自反电动势误差信息,当观测反电动势值与实际值趋于相同时,转速的观测值也会很快地逼近实际值,滑模观测器能够自适应地工作.

3 变结构速度控制器

使用滑模观测器在取得了转速观测值并求出转速误差后, 一般的控制方案使用 PI 控制器得到定子电流参考值以调节相绕组控制电压. 这类方法对扰动和电机参数摄动的鲁棒性不强, 而且滑模观测器的抖振问题和相位延迟会影响转速估计的精度. 为提高控制器的鲁棒性和系统性能, 本文设计了变结构速度控制器以取代常规的 PI 控制器, 使速度误差收敛并稳定在零值附近.

PMSM 机械运动方程为

$$\dot{X} + aX + d = bi_q \quad (18)$$

式中: $a = R_s/J$; $d = p_n T_l/J$; $b = 3p_n^2 W/2J$; R_s 为转动阻尼; i_q 为 dq 坐标系下定子电流 q 轴分量; T_l 为负载转矩; J 为电机转动惯量; p_n 为电机极对数; W 为永磁体产生的基波磁场, 在电机运行中若不计及温度变化对永磁体供磁能力的影响, 则可认为 W 为常值.

考虑到电机参数变化和不确定性, 上式可写为

$$\dot{X} = - (a + \Delta a) X - (d + \Delta d) + (b + \Delta b) i_q \quad (19)$$

式中 Δa , Δd 和 Δb 代表电机参数的摄动值. 定义速度跟踪误差为

$$e(t) = X(t) - X^*(t) \quad (20)$$

其中 $X^*(t)$ 为转子速度参考值. 则

$$\dot{e}(t) = \dot{X}(t) - \dot{X}^*(t) = -ae(t) + z(t) + f(t) \quad (21)$$

式中: $z(t) = bi_q - aX^*(t) - d(t) - \dot{X}^*(t)$, 而表征电机参数变化和不确定项的 $f(t) = -\Delta aX(t) - \Delta d(t) + \Delta b i_q(t)$.

下面先设计滑模速度控制器的切换函数 $S_3(t)$, 再给出滑模速度控制律. 鲁棒控制的目的是要使误差 $e(t)$ 快速收敛到零值, 因此设计基于转速误差上的积分滑模切换函数

$$S_3(t) = e_1(t) + k_3 \int_0^t e_1(S) dS \quad (22)$$

式中: k_3 为正常数, $S_3(t)$ 满足可微、过原点要求. 定义 Lyapunov 函数 $V_3(t) = \frac{1}{2} S_3^2(t)$, 其导数为

$$\dot{V}_3(t) = S_3(t) \dot{S}_3(t) = S_3[z - (ae + ke + f)] \quad (23)$$

为使 $\dot{V}_3(t)$ 恒为负值, 选取控制量

$$z(t) = (k + a)e(t) - h_3 \text{sgn}(S_3) \quad (24)$$

其中 h_3 为滑模切换增益. 为使速度准确跟踪转速参考值, h_3 应选取合适值. 太小的增益对于开关量 $\text{sgn}(S_3)$ 的放大不足以抵消强的扰动和参数变化, 可能导致速度误差不收敛; 而太大的切换增益则会

在滑模面附近产生幅度较大的波动. 当选取 $h_3 \setminus |f|$ 时, $\dot{V}_3(t)$ 负定, 而 $V_3(t)$ 正定是显然的, 速度误差将会收敛, 且当 $S_3(t)$ 趋于无穷时 $V_3(t)$ 也趋于无穷, 系统的平衡点是全局收敛渐近稳定的.

将式(24)代入(25)可得速度控制的参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{b} [k_3 e - h_3 \text{sgn}(S_3) + aX^* + \dot{X}^* + d] \quad (25)$$

将 i_q^* 与实测 q 轴电流比较, 得到 q 轴电流误差 $i_q = i_q^* - i_q$, 通过一个 q 轴电流控制的 PI 控制器, 即可得到 PMSM 的 q 轴参考电压为

$$u_q^* = (K_p + \frac{1}{s} K_i) i_q \quad (26)$$

所设计的滑模速度控制器充分考虑了 PMSM 速度跟踪问题中的电机参数摄动和不确定性, 设计出的控制律可实现对不确定性的完全补偿, 具有很强的鲁棒性.

4 仿真结果

基于本文控制方法进行永磁同步电机无传感器控制仿真研究. 仿真对象为 2 极表贴式永磁同步电机, 具体参数为: 额定功率 400 W, 额定转速 230 rad/s, 额定转矩 $T_L = 8.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 电阻 0.68, 电感 7mH, 转动惯量 $J_r = 1.314 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. 图 1 为电机启动后空载在 0.5 s 后加速至 200 rad/s 时的转子速度响应和转子位置角曲线. 可见, 估计速度曲线与实测速度曲线大部分时间内误差很小, 即低速时的跟踪特性良好. 图 1(c) 给出了对应的转子位置观

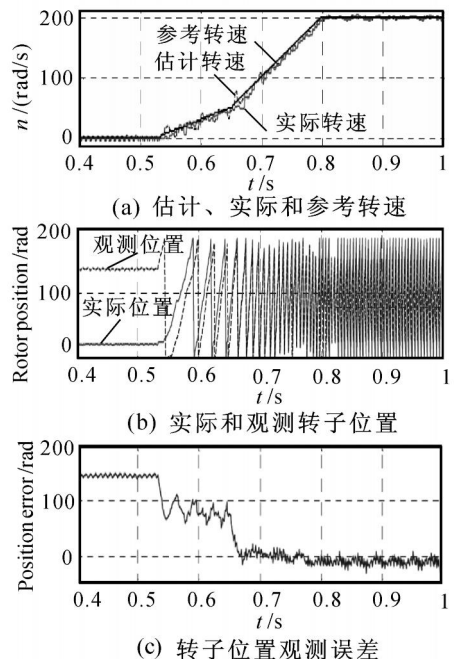


图 1 200 rad/s 时电机转速响应、转子位置及位置误差

测误差。

考察不同负载扰动对转速控制的影响,在 $t = 0.1 \text{ s}$ 时分别施加 1.5 倍、1 倍和 0.5 倍标称负载,图 2 给出了 3 种情况下的转速响应。可见,在负载变动下所提控制策略保持了较好的稳态性能。

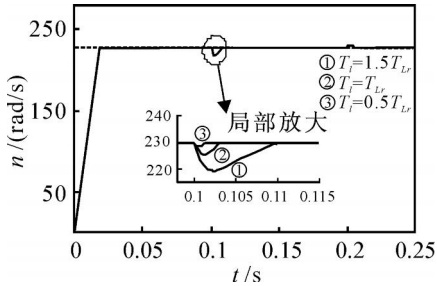


图2 不同负载扰动下转速响应

若同时发生电机参数摄动(惯量 $J = 3$ 倍标称惯量)与负载扰动($t = 0.2 \text{ s}$ 时 $T_1 =$ 标称负载),对本文控制策略与 PI 控制器的转速响应进行比较,如图 3 所示。可见,相对于 PI 控制器,本文控制策略跟踪性能仍然良好,控制器能有效抑制参数摄动和负载扰动的影响。

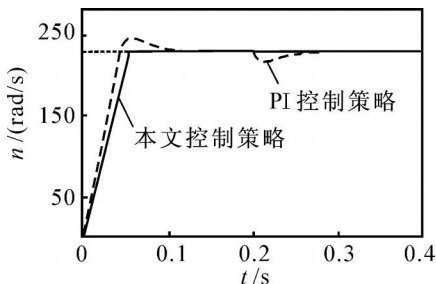


图3 参数摄动与负载扰动时的速度响应

5 结 论

基于滑模观测器和变结构控制方法,构建了一种新的永磁同步电机无位置传感器控制系统。在 Lyapunov 意义下,闭环系统的稳定性可由转速与转子位置自适应律及速度控制律得以保证,且具有较强的鲁棒性。仿真结果表明,所提控制策略具有准确的转子位置估计及良好的转速响应能力,在转动惯量和负载变化下转速跟踪性能良好,能有效抑制参

数摄动和负载扰动的影响。

参考文献(References)

- [1] 王成元,夏加宽,杨俊友,等. 电机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
(Wang C Y, Xia J K, Yang J Y, et al. Modern electrical machine control technology [M]. Beijing: Mechanical Industrial Publishing House, 2006.)
- [2] 李鸿儒,顾树生. 基于神经网络的 PMSM 自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 4612464.
(Li H R, Gu S S. Neural network based adaptive observer of position and speed of PMSM [J]. Control Theory and Application, 2005, 22(3): 4612464.)
- [3] Elbuluk M, Changsheng L. Sliding mode observer for wide speed sensorless control of PMSM drives[C]. Proc of Industrial Applications Conf. Salt Lake City: IEEE IAS, 2003: 480485.
- [4] Parasiliti F, Petrella R, Tursini M. Sensorless speed control of PM synchronous motor by sliding mode observer[C]. Proc of IEEE Int Symposium on Industrial Electronics. Guimaraes, 1997: 11061111.
- [5] Maes J, Melkebeek J A. Speed sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2000, 36(3): 7782785.
- [6] Adnan D, Mustafa K G. Design and implementation of a new sliding mode observer for speed sensorless control of induction machine [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2002, 49(5): 11721182.
- [7] 路强,沈传文,季晓隆,等. 一种用于感应电机控制的新型滑模速度观测器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 164168.
(Lu Q, Shen C W, Ji X L, et al. Novel sliding mode observer for speed sensorless induction motors [J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(18): 164168.)
- [8] Adanan D, Mustafa H G. Design and implementation of a new sliding mode observer for speed sensorless control of induction machine [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2002, 49(5): 11721182.