

基于鲁棒自适应状态观测器的异步电机磁链估计抗扰性研究

许小龙, 曾岳南, 王发良, 谢传林, 沈志峰

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对传统全阶磁链观测器随内、外扰动导致磁链估测精度不高甚至系统不稳定的问题, 对观测器极点分布情况和内、外扰动对系统的影响进行研究分析, 从而对反馈矩阵增益系数的取值进行设计, 提出了一种鲁棒自适应状态观测器对磁链进行估计。当遇到内、外扰动时, 在保持系统稳定的情况下自动减小反馈增益系数以减小扰动对系统的影响, 从而保持系统良好的动静态性能。在内、外扰动下, 将鲁棒自适应状态观测器与传统的全阶磁链观测器的磁链估计精度、转速波动以及转矩波动进行比较分析。仿真和试验结果表明: 鲁棒自适应状态观测器具有比传统全阶磁链观测器更好的抗干扰性能。

关键词: 鲁棒自适应状态观测器; 磁链估计; 扰动; 抗干扰性能

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)12-0040-06

Research on Anti-Jamming Performance of Flux Estimation of Asynchronous Motor Based on Robust Adaptive State Observer

XU Xiaolong, ZENG Yuenan, WANG Faliang, XIE Chuanlin, SHEN Zhifeng

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional full-order flux observer led to the inaccuracy of the flux linkage and even the instability of the system under internal and external disturbances, the influences of the observer pole distribution and the internal or external disturbances were analyzed. Then the feedback gain matrix coefficient was designed, and a robust adaptive state observer was proposed to estimate the flux linkage. When the system was influenced by the internal or external disturbances, in order to maintain the system's good dynamic and static performance, the feedback gain coefficient was automatically reduced while maintaining the stability of the system. The flux estimation accuracy, speed fluctuation and torque ripple under internal and external disturbances were compared between the robust adaptive state observer and traditional full-order flux observer. Simulation and experimental results showed that the robust adaptive state observer had better anti-jamming performance than traditional full-order flux observer.

Key words: robust adaptive state observer; flux estimation; perturbation; anti-jamming performance

0 引言

在异步电机矢量控制系统中, 转子磁链的准确获取直接影响到按转子磁链定向矢量控制系统解耦的正确性, 进而影响整个控制系统性能^[1]。为了提高异步电机的控制性能, 国内外学者对磁

链观测进行了深入研究。自适应状态观测法由于包括磁链观测精度、系统鲁棒性、计算成本和复杂性在内的综合性能较好而得到广泛应用^[2]。

在工业运用中, 异步电机控制系统中电路的电磁干扰、电压、电流传感器的不确定性以及恶劣环境下的噪声将不可避免地产生在系统中产生干扰,

作者简介: 许小龙(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与运动控制技术。

曾岳南(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子功率变换器、电力传动运动控制。

自适应状态观测器也随外部干扰和内部参数误差而导致磁链估测精度不准,甚至系统不稳定。针对该问题国内外学者进行了大量的研究。文献[3]通过引入定子电阻的在线观测使自适应状态观测器对电机参数具有一定的鲁棒性,减小了电机参数误差对磁链观测器准确性的影响,但是并未考虑外扰对系统的影响。文献[4]分析了极点配置对自适应全阶观测器稳定性的影响,但是并未给出反馈增益系数的取值建议。文献[5]针对反馈增益矩阵对全阶状态观测器稳定性的影响给出反馈增益系数的取值建议,但是没有解决极点正比于电机极点的观测器在零速周围的振荡问题,也未考虑内、外扰对系统的影响。

本文在建立异步电机状态空间模型的基础上,详细介绍了异步电机全阶磁链观测器的模型设计,并对其极点分布情况进行研究分析,从而对反馈矩阵增益系数的取值进行设计。提出了一种鲁棒自适应状态观测器对磁链进行估计,解决了传统观测器抗干扰能力差的问题。最后通过仿真和试验验证了鲁棒自适应状态观测器的有效性。

1 异步电机状态空间模型

异步电机 T 型稳态等值电路如图 1 所示。

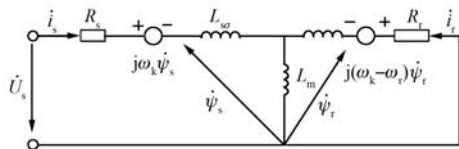


图 1 异步电机 T 型稳态等值电路

根据 T 型稳态等值电路,在 $\alpha\text{-}\beta$ 静止坐标系下建立异步电机状态方程^[6]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_s$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{i}_s = \mathbf{C} [\mathbf{i}_s \quad \boldsymbol{\psi}_r]^T = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{i}_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T$; $\boldsymbol{\psi}_r = [\psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T$; $\mathbf{u}_s = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T$; $\mathbf{A}_{11} = a\mathbf{I}$; $\mathbf{A}_{12} = b\mathbf{I} - c\omega_r\mathbf{J}$; $\mathbf{A}_{21} = e\mathbf{I}$; $\mathbf{A}_{22} = f\mathbf{I} + \omega_r\mathbf{J}$; $a = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right)$; $b = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r}$; $c = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; $e = \frac{L_m}{T_r}$; $f = -\frac{1}{T_r}$; $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{B}_1 = d\mathbf{I}; d = \frac{1}{\sigma L_s}; \mathbf{C} = \frac{1}{\sigma L_s} [\mathbf{I} \quad 0]$$

式中: R_s ——定子电阻;

L_m, L_s, L_r ——励磁电感、定子电感、转子电感;

T_r ——电机转子时间常数;

ω_r ——转子电角速度;

σ ——电机漏感系数。

2 异步电机全阶磁链观测器模型

异步电机全阶磁链观测器以电机本身作为参考模型,通过构建状态方程观测电机的磁链与定子电流,并将定子电流作为输出,引入实际电流与观测电流的误差作为反馈校正,通过调整校正项的反馈增益矩阵来提高观测器的性能^[7]。其结构框图如图 2 所示。

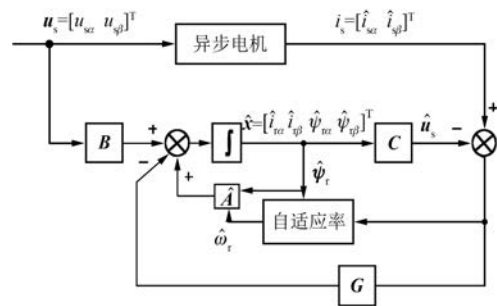


图 2 全阶观测器结构框图

根据被控对象模型,可以构造一个动态方程与式(1)相同的模拟系统:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u}_s \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (2)$$

其中:状态矩阵 $\hat{\mathbf{A}}$ 是将矩阵 \mathbf{A} 中的电机转速和电机参数分别用估算值得到。

增加反馈矩阵,可构成全阶磁链观测器模型为

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

该观测器有 2 个输入,即 \mathbf{u}_s 和 \mathbf{y} ,输出为 $\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{G}$ 为观测器输出反馈增益矩阵:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

3 异步电机全阶磁链观测器极点分析

3.1 异步电机的极点分析

根据经典控制理论,一个系统的稳定性、动态性能和稳态性能都与系统的极点有关。为了更好地控制异步电机及构建理想的状态观测器,对异步电机自身的极点分布进行分析。

由异步电机的状态方程可知状态矩阵为 A 阵,根据 $|\lambda \cdot I - A| = 0$,推导出感应电机 4 个极点的解析解:

$$\lambda_{1,2} = [-M + \sqrt{\sqrt{(P^2 + Q^2 + P)/2}}]/2 \pm j[\omega_r + \sqrt{\sqrt{(P^2 + Q^2 - P)/2}}]/2$$

$$\lambda_{3,4} = [-M - \sqrt{\sqrt{(P^2 + Q^2 + P)/2}}]/2 \pm j[\omega_r - \sqrt{\sqrt{(P^2 + Q^2 - P)/2}}]/2$$

其中: $M = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_r}{L_r}$, $P = M^2 - \frac{4}{\sigma T_s T_r} - \omega_r^2$, $Q = \left(\frac{4}{\sigma T_s} - 2 \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} - \frac{2}{T_r}\right) \omega_r$, $T_s = L_s/R_s$, $T_r = L_r/R_r$ 。

随着电机转速的变化,感应电机极点分布轨迹^[8]如图 3 所示。

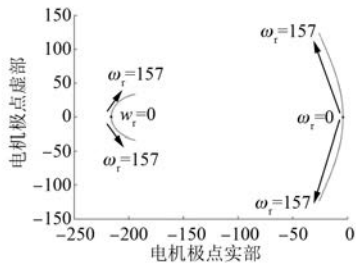


图 3 异步电机极点分布轨迹

电机的所有极点位于复平面左半平面,由自动控制原理可知感应电机本身是稳定的。当感应电机在零频附近运行(即 $\omega_r = 0$),有一对极点靠近虚轴。此时,感应电机的频率响应带宽较窄,抗干扰能力差。

3.2 全阶磁链观测器的极点分析

由于电机系统状态完全能观,所以观测器极点能任意配置^[9]。为了保证自适应观测器的稳定性,观测器的极点必须配置在电机极点左侧。将观测器的极点设计为成正比于电机的极点,且通常

选择比例系数 k 大于 1。

由式(3)可得自适应观测器的特征方程为

$$\det[sI - (\hat{A} + GC)] = 0 \quad (5)$$

特征方程的根即为自适应观测器的极点,化简可得:

$$s^2 - [(a + f + g_1) + j(\omega_r + g_2)]s - (b - jc\omega_r) \cdot \left[\frac{1}{c}a + \frac{1}{c}g_1 + e + g_3 + j\left(\frac{1}{c}g_2 + g_4\right)\right] = 0 \quad (6)$$

假设 $g_1 = g_2 = g_3 = g_4 = 0$,可得感应电机自身的特征方程为

$$s^2 - [(a + f) + j\omega_r]s - (b - jc\omega_r) \times \left(\frac{1}{c}a + e\right) = 0 \quad (7)$$

令观测器的极点等于电机极点的 k 倍,则观测器的特征方程可以表示为

$$s^2 - k[(a + f) + j\omega_r]s - k^2(b - jc\omega_r) \times \left(\frac{1}{c}a + e\right) = 0 \quad (8)$$

对比式(6)、式(8)的各项系数,可得:

$$g_1 = -(k - 1) \frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma L_s L_r} \quad (9)$$

$$g_2 = (k - 1) \hat{\omega}_r \quad (10)$$

$$g_3 = -(k^2 - 1) \frac{R_s L_r}{L_m} + (k - 1) \frac{R_s L_r + R_r L_s}{L_m} \quad (11)$$

$$g_4 = -\frac{\sigma L_r L_s}{L_m} (k - 1) \hat{\omega}_r \quad (12)$$

4 鲁棒自适应状态观测器反馈矩阵设计

由于总扰动使系统发生误差时,磁链观测器可以写成:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bu_s + GC[\hat{x} - (x + \Delta v)] = \hat{A}\hat{x} + Bu_s + GC(\hat{x} - x) - GC\Delta v \quad (13)$$

由式(13)可知,总误差 Δv 通过增益矩阵 G 影响估计精度,同时增益矩阵 G 由增益系数 k 确定。上述增益矩阵中 $k \geq 1$,使磁链观测器的极点位于电机极点的左侧,以保证磁链观测器的稳定性。 k 值选取越大,观测器的收敛速度就越快,但当系统发生干扰时,受到的影响就越严重,甚至不稳定。需减小 k 值以减小干扰因素对系统的影

响,保持系统具有良好的动静态性能。因此,设计了一种 k 值的自适应算法,当系统受到干扰时 k 自动调节,以保持系统的良好特性。 k 值的自适应算法如下:

$$k = \begin{cases} k, & Z_\alpha < nV_k \\ k[1 - \mu g(e_{is})], & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中: $Z_\alpha = e_{is} \cdot e'_{is}$, e 是状态变量的误差, V_k 是电机运行状态正常突变如加速、减速与突加负载时可能产生的最大 Z_α 值, n 是一个可调系数。当电机在不同条件下运行时, n 的取值与 Z_α 的最大值相关。同时 μ 是一个校正系数,其取值在 $0 \sim 1$ 。 $g(e_{is})$ 是一个非线性函数,定义为

$$g(e_{is}) = 1 - \exp[-(e_{is}/|i_s|)^2/\alpha_k^2] \quad (15)$$

其中: $|x|$ 是向量 x 大小, α_k 是函数输入输出之间的可调系数。对于 $\forall \alpha_k \neq 0, 0 < g(e_{is}) < 1$ 。

5 仿 真

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建整个控制系统并仿真,对鲁棒自适应状态观测器与传统全阶磁链观测器的抗扰性能进行分析对比。异

步电机双闭环采用传统 PI 控制器。PI 控制器参数使用工程整定法: d 、 q 轴电流控制器比例系数为 47.18, 积分系数为 10 438; 速度控制器比例系数为 7.086, 积分系数为 7 619.35; 反馈增益系数 k 的初始值为 1.2。仿真所用三相异步电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	220	额定电流/A	7.3
额定功率/kW	1.5	额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	最高转速/(r·min ⁻¹)	10 000
极对数	2	额定转矩/(N·m)	9.5
转动惯量/(kg·m ²)	0.005 6	定子电阻/ Ω	0.583 4
转子电阻/ Ω	1.504 5	互感/H	0.101 809
转子漏感/H	0.005 226	定子漏感/H	0.004 47

额定转速下,分别在 0.18 s 处改变电机参数,在 0.3 s 处突加脉冲干扰,分析内、外扰对系统的影响。基于转子磁场定向的异步电机矢量控制系统结构框图如图 4 所示。

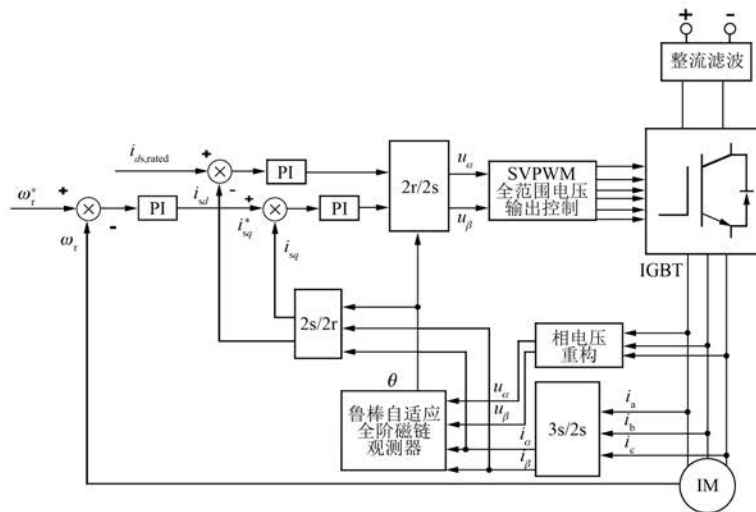


图 4 矢量控制结构框图

为了检测鲁棒自适应状态观测器相比传统全阶磁链观测器对内部扰动具有更好的抗干扰性,在 0.18 s 处使定子电阻变化 $|\Delta R_s| = 30\%$ 。其反馈增益系数变化波形如图 5 所示。

由图 5 可知,在 0.18 s 处,反馈增益系数减小,观测器极点右移以减小电机参数变化对系统的干扰。

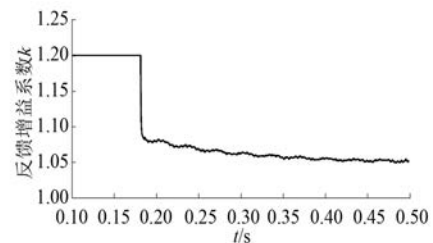


图 5 k 值变化波形

鲁棒自适应状态观测器与传统全阶磁链观测器的观测值对电机实际磁链幅值误差波形如图 6 所示。

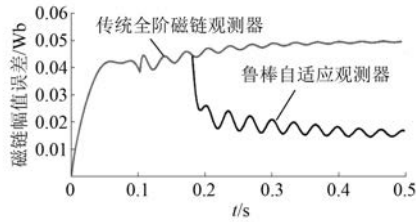


图 6 磁链幅值误差波形

当电机速度增大到稳定时,改变电机参数,可以明显看到鲁棒自适应状态观测器在遇到干扰后磁链幅值误差减小到一个稳定状态,而传统全阶磁链观测器的误差则缓慢增大到一个稳定状态。因此鲁棒自适应状态观测器对内扰具有更好的抗干扰性。

为了检测鲁棒自适应状态观测器对外部干扰的抗干扰能力,在 0.3 s 时将一个 3 mA 的干扰脉冲加在 i_{sq} 上。 k 值、转速误差以及转矩的变化波形如图 7~图 9 所示。

由图 7 可知,当发生脉冲干扰时, k 值降低以减小干扰对系统的影响,当外扰结束时,缓慢恢复到原来的值,加快系统的响应速度,保持系统良好的动静态特性。

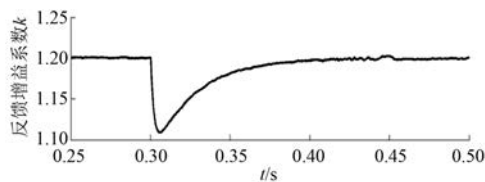


图 7 外扰时的 k 值变化波形

由图 8 可知,当脉冲干扰时,鲁棒自适应状态观测器相比传统全阶磁链观测器具有更好的鲁棒性,对速度影响小,具有更好的抗干扰性。

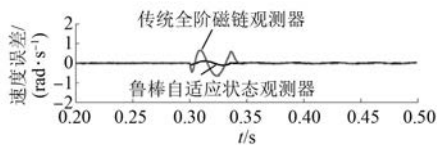


图 8 外扰时的转速误差波形

由图 9 可知,发生脉冲干扰时,鲁棒性自适应

状态观测器具有更好的抗干扰性,能够减小转矩脉动。

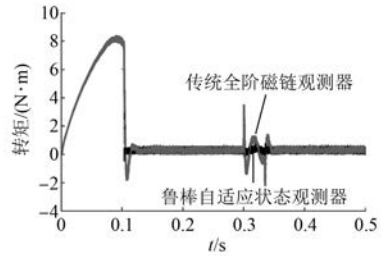


图 9 外扰时的转矩波形

通过仿真分析可知,在发生总扰动时,鲁棒自适应状态观测器相对于传统的全阶观测器而言具有更好的抗干扰性能和静态性能。

6 试验

在异步电机试验平台上进行了鲁棒自适应状态观测器的试验研究,试验对象为 GSK ZJY182-1.5BH-B35 机床用异步电机。电机参数如表 1 所示,电流、速度调节器参数与仿真相同。具体试验结果如下。

(1) 内扰试验。在 0.18 s 处使定子电阻变化 $|\Delta R_s| = 30\%$,其反馈增益系数缓慢减小直到稳定,如图 10 所示。

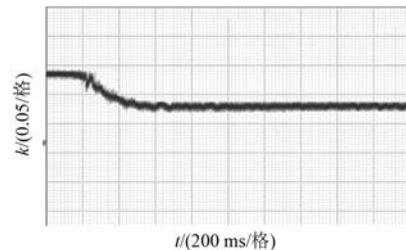


图 10 内扰试验 k 值变化波形

通过比较由速度给定转换得出的磁链角来验证磁链观测器算法的正确性。当改变电机参数时,将鲁棒自适应状态观测器磁链角和传统全阶观测器磁链角分别与转速给定磁链角相比较。具体试验波形如图 11、图 12 所示。

可以看出传统磁链观测器在受到内扰时具有较大的磁链角误差,导致磁链估测不准。相对而言鲁棒自适应状态观测器具有较高的估测精度。

(2) 外扰试验。为了测试鲁棒自适应状态观测器对外扰的抗扰能力,电机起动 3 s 后,通过信

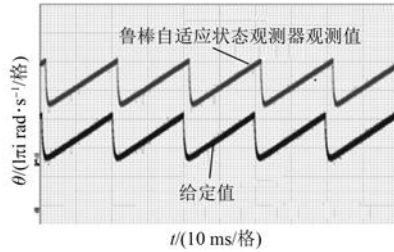


图 11 鲁棒自适应状态观测器磁链角和给定磁链角

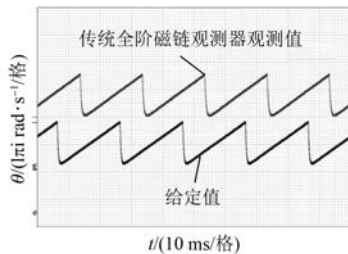


图 12 传统全阶磁链观测器磁链角和给定磁链角

号发生器将值为 3 mA 的扰动脉冲加到电流检测通道。反馈增益系数 k 变化波形和速度反馈变化波形如图 13、图 14 所示。

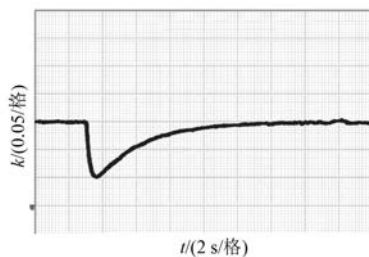
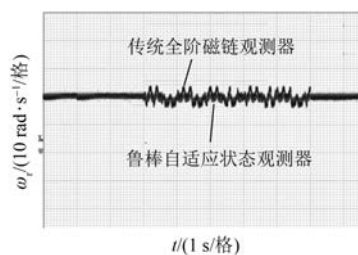
图 13 外扰试验 k 值变化波形

图 14 转速稳态反馈波形

由图 13 可见,当脉冲干扰作用于系统时, k 值减少以减小其对系统的干扰,当脉冲结束时, k 值缓慢恢复到给定值。由图 14 可以看出传统全阶磁链观测器相比鲁棒自适应状态观测器在受到外扰时,系统具有较大的转速波动,抗干扰能力差。

7 结 语

本文采用鲁棒自适应状态观测器代替传统的全阶磁链观测器进行矢量控制。仿真和试验证明,相比传统全阶磁链观测器,设计的鲁棒性自适应状态观测器能够减少内扰和外扰对估计误差的影响,使系统具有更好的抗干扰性。对观测器的极点分布情况进行了分析,有效避免了因反馈增益系数取值不当造成系统不稳定的问题。本文鲁棒自适应状态观测器的反馈矩阵设计中一些参数的取值依赖于经验。因此,在进一步的研究中应研究通过量化系统误差来调整参数。

【参考文献】

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] VICENTE I, ENDEMANO A, GARIN X, et al. Comparative study of stabilising methods for adaptive speed sensorless full-order observers with stator resistance estimation [J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(6): 993-1004.
- [3] 王高林, 陈伟, 于泳, 等. 一种基于转速和定子电阻自适应的感应电机全阶磁链观测器 [J]. 微电机, 2009, 42(3): 5-8.
- [4] CHEN B, YAO W, WANG K, et al. Comparative analysis of feedback gains for adaptive full-order observers in sensorless induction motor drives [C] // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013: 3481-3487.
- [5] SUWANKAWIN S, SANGWONGWANICH S. Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction-motor drives——tracking performance and stabilization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(1): 96-119.
- [6] 陈伟, 于泳, 杨荣峰, 等. 异步电机自适应全阶观测器算法低速稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36): 33-40.
- [7] 吴文进, 苏建微, 刘鹏, 等. 感应电机全阶磁链观测器设计及其控制性能对比分析 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 78-92.
- [8] LUO H, LOU T, WAN S Y. Implementation of full-order flux observer for speed sensorless drives of induction motor at high speeds [C] // 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008: 1638-1640.
- [9] 罗慧. 感应电机全阶磁链观测器和转速估算方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

收稿日期: 2018-07-06