

# 两种感应电机磁链观测器的参数敏感性研究

陆文斌, 姚文熙, 吕征宇

(浙江大学, 电力电子技术国家专业实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**在无速度传感器感应电机矢量控制系统中, 准确的磁链和转速信息至关重要。但随着电机温度和运行状态的变化, 电机参数会发生变化, 磁链的观测和转速估算就会受到影响, 可能导致电机无法正常运行。为此在电动模式和发电模式下对闭环电压电流模型磁链观测器和滑模磁链观测器参数敏感性进行了研究, 通过仿真和实验比较了这两种观测器对定、转子电阻及励磁电感的敏感性。同时还研究了基于这两种观测器的模型参考自适应系统(MRAS)转速估算对参数的敏感性。

**关键词:**感应电机; 磁链观测器; 参数敏感性; 发电模式

**中图分类号:** TM346

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-100X(2013)08-0102-03

## Parameter Sensitivity Analysis of Two Kinds of Flux Observer for Induction Motor

LU Wen-bin, YAO Wen-xi, LÜ Zheng-yu

(National Key Laboratory of Power Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In the speed sensorless vector control system of induction motor, accurate flux and speed information is of great importance. But as the motor temperature and running state change, the motor parameters change, affecting the observation of flux and estimation of speed, thus the motor may not work normally. Parameter sensitivity of both the voltage and current model based on closed-loop flux observer and the sliding-mode flux observer are studied in power mode and generating mode. Comparison of stator resistance, rotor resistance and excitation inductance sensitivity is made by simulation and experiment. Meanwhile, parameter sensitivity of model reference adaptive system(MRAS) speed estimation based on this two kinds of observer is studied.

**Keywords:** induction motor; flux observer; parameter sensitivity; generating mode

## 1 引言

经过多年对感应电机的控制研究, 越来越多的高性能应用场合开始接受感应电机。矢量控制技术对电机方程采用矢量变换, 使感应电机定子电流的励磁分量和转矩分量实现解耦, 从而可独立控制电机的磁链和电磁转矩, 实现直流电机调速性能<sup>[1-2]</sup>。为准确估算磁链和转矩, 获得良好的性能, 必须有非常准确的电机参数。但温度的改变、电机磁场的饱和程度都会引起电机参数的变化, 参数的敏感性会影响电机的稳态和动态性能。

为了改善电机参数对系统的影响, 可以应用以下两种方法: 一种方法是在线参数辨识, 在电机运行过程中修改参数信息; 另一种方法是设计对参数敏感性较小的磁链观测和转速估算方法。基于电压电流模型的闭环磁链观测器, 在低速下主

要通过电流模型观测磁链, 在高速下通过电压模型观测磁链, 中间通过过渡环节平滑过渡。该方法结合了两种开环观测器的优点, 改善了电机对参数的敏感性。滑模观测器根据滑模结构来设计参数, 降低了系统扰动和参数误差的影响<sup>[3]</sup>。全阶状态观测器通过设计合适的反馈矩阵可获得较好的参数敏感性, 文献[4]中给出了参数敏感性的关系和反馈矩阵的设计方法。

在此研究对比了基于电压、电流模型的闭环磁链观测器和滑模磁链观测器在不同运行条件下对参数的敏感性, 然后研究了基于这两种观测器的 MRAS 转速估算对参数的敏感性。

## 2 闭环电压、电流模型磁链观测器

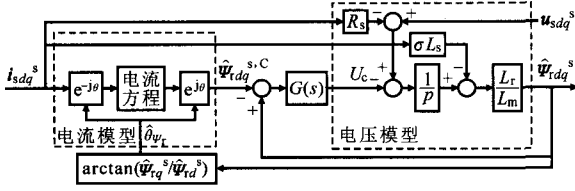
文中的关系式采用复数矢量形式可表示为:

$$f_{dq} = f_d + jf_q \quad (1)$$

基于电压、电流模型的闭环磁链观测器<sup>[5-7]</sup>的结构如图 1 所示。在低速下, 观测器主要是电流模型作用; 在高速下, 主要是电压模型作用。中间通过过渡环节  $G(s)$  过渡。

定稿日期: 2012-10-31

作者简介: 陆文斌(1987-), 男, 浙江舟山人, 硕士研究生, 研究方向为感应电机无速度矢量控制及数字控制。



上标 s, C 分别表示定子坐标系、电流模型; ^ 表示估算值;  $U_c$  为补偿量。

图 1 闭环电压电流模型磁链观测器

Fig. 1 Close-loop flux observer based on voltage and current model

感应电机电压、电流方程可表示为:

$$\begin{cases} u_{sdq}^s = (R_s + \sigma L_s p) i_{sdq}^s + L_m p \Psi_{rdq}^{s,V} / L_r \\ p \Psi_{rdq}^{e,C} = L_m i_{sdq}^{e,C} / T_r - \Psi_{rdq}^{e,C} / T_r - j \omega_s \Psi_{rdq}^{e,C} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_s$  为定子电压;  $i_s$  为定子电流;  $\Psi_r$  为转子磁链;  $R_s$ ,  $L_m$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  分别为定子电阻、励磁电感、定子电感和转子电感;  $\omega_s$  为转差角频率;  $\sigma$  为漏感系数,  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ ;  $T_r$  为转子时间常数,  $T_r = L_r / R_r$ ,  $R_r$  为转子电阻; 上标 V 表示电压模型; 上标 e 表示转子磁链坐标系。

在转子磁场定向系统中,  $\Psi_{rdq}^{e,C} = 0$ , 则电流方程为:  $\Psi_{rdq}^{e,C} = L_m i_{sdq}^{e,C} / (1 + T_r p)$ 。观测器输出可表示为:

$$\Psi_{rdq}^s = \frac{L_m s}{L_m s + L_r G(s)} \Psi_{rdq}^{s,V} + \frac{L_r G(s)}{L_m s + L_r G(s)} \Psi_{rdq}^{s,C} \quad (3)$$

式中:  $\Psi_{rdq}^{s,C}$ ,  $\Psi_{rdq}^{s,V}$  分别为开环电流、电压模型的磁链。

### 3 滑模磁链观测器

在任意坐标系下, 以定子磁链和转子磁链为状态变量的状态空间方程为:

$$p \Psi = A \Psi + B u_s \quad (4)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} -[R_s / (L_s \sigma) + j \omega_s] & L_m R_s / (L_s L_r \sigma) \\ L_m / (L_s T_r \sigma) & -[1 / (T_r \sigma) + j (\omega_s - \omega_r)] \end{bmatrix}$ ,  $\omega_s$  为旋转角频率;  $B = [1 \ 0]^T$ ;  $\Psi = [\Psi_s \ \Psi_r]^T$ 。

滑模观测器可在定子坐标系和转子磁链坐标系下来实现, 其结构框图如图 2 所示。

$$\begin{cases} p \hat{\Psi}_{sdq}^s = -R_s \hat{i}_{sdq}^s + U_{sdq}^s + K_1 v \\ p \hat{\Psi}_{rdq}^s = L_m \hat{i}_{sdq}^s / (L_s T_r \sigma) - \hat{\Psi}_{rdq}^s [1 / (T_r \sigma) + j \omega_s] + K_2 v e^{-j \hat{\theta}_{\Psi_r}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\hat{\theta}_{\Psi_r}$  为转子磁链估算角度;  $K_1, K_2$  为反馈增益。

$$\begin{cases} \hat{i}_{sdq}^s = (L_r \hat{\Psi}_{sdq}^s - L_m \hat{\Psi}_{rdq}^s) / (L_s L_r \sigma) \\ v = e_{is} + K_{SMO} \text{sign}(e_{is}), \quad e_{is} = i_{sdq}^s - \hat{i}_{sdq}^s \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $K_{SMO}$  为滑模增益。

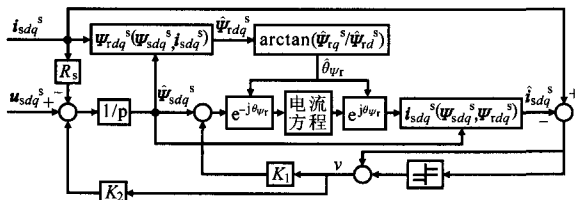


图 2 滑模磁链观测器结构框图

Fig. 2 Structural block diagram of sliding-mode flux observer

### 4 参数敏感性分析

在此通过大量仿真来分析基于电压、电流模型

磁链观测器和滑模观测器的参数敏感性。仿真的内容包括电动模式和发电模式下转子的磁链幅值和相位误差 ( $R_s, R_r, L_m$  分别为真实值的 50%, 20%, -20%, -50%)。电动模式运行状态分别为 3 Hz-0 $T_n$ , 3 Hz- $T_n$ , 40 Hz-0 $T_n$ , 40 Hz- $T_n$ ; 发电模式运行状态为 -3 Hz-0.1 $T_n$ , -40 Hz-0.1 $T_n$ ,  $T_n$  为额定负载转矩,  $T_n = 14 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

仿真结果表明, 两种观测器无论是电动模式还是发电模式, 对转子电阻基本不敏感。在低速状态下, 定子电阻变化较大 ( $\pm 50\%$ ) 时, 对观测器影响很大, 当定子电阻不准时, 估算值偏小相对于估算值偏大对观测器的影响较小; 在高速状态下, 观测器对定子电阻不太敏感。电压、电流模型磁链观测器对励磁电感在高速电动模式下敏感性较小, 在发电模式下敏感性较大。滑模观测器对励磁电感敏感性较大, 当励磁电感不准时, 估算值偏大相对于估算值偏小对观测器的影响较小。

### 5 转速估算

MRAS 的参考模型选择前面提到的两个磁链观测器, 可调模型选择电流开环模型磁链观测器。电流开环模型方程为:

$$p \Psi_{rdq}^s = L_m i_{sdq}^s / T_r - \Psi_{rdq}^s / T_r + j \omega_r \Psi_{rdq}^s \quad (7)$$

为了保证系统的稳定性, 根据 Popov 超稳定性理论, 可得估算转速的表达式为:

$$\hat{\omega}_r = K_p (1 + K_s / s) \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$  为误差输出,  $\varepsilon = \Psi_{rdq}^s \hat{\Psi}_{rdq}^s - \Psi_{rdq}^s \hat{\Psi}_{rdq}^s$ 。

仿真结果表明, 在高速下, 对参数的敏感性较小。在低速空载和低速小转矩发电条件下, 转速估算对转子电阻不太敏感, 在低速带载条件下对转子电阻敏感。对定子电阻和励磁电感在低速条件下比高速条件下敏感。

### 6 实验结果

实验平台框图如图 3 所示。

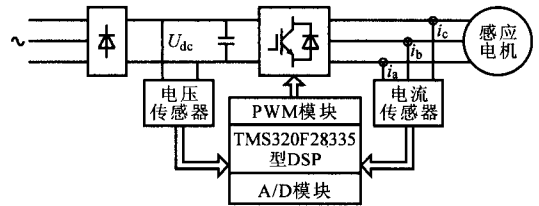


图 3 实验平台框图

Fig. 3 Block diagram of experimental platform

采样得到直流母线电压值和感应电机三相定子电流值, 然后通过 TMS320F28335 型 DSP 进行数字控制, 输出 PWM 驱动信号驱动 IGBT。系统采

样频率 6 kHz, 开关频率为 3 kHz。在此通过 MRAS 估算电机转速, 分别以基于电压电流模型的闭环磁链观测器和基于滑模结构的观测器观测转子磁链实现异步电机无速度控制。

图 4 为定子电阻估算值为真实值 120% 条件下获得的实验结果。

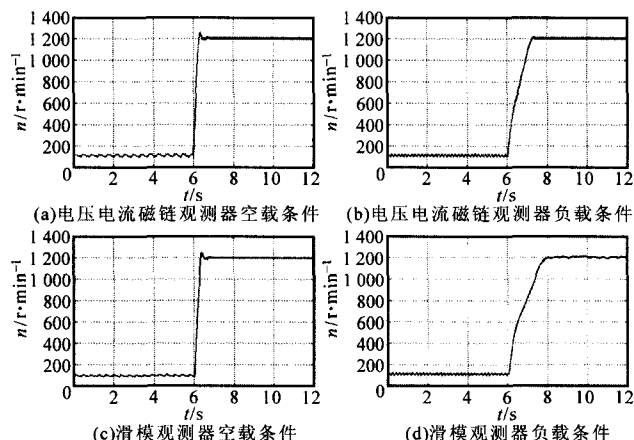


图 4 电机估算转速 (120% $R_s$ ) 实验结果

Fig. 4 Estimated speed (120% $R_s$ ) experimental results of motor

可见, 在低速条件下, 估算转速与实际转速有点偏差, 但误差较小; 在高速条件下, 估算转速与实际转速无偏差, 符合仿真结果。

图 5 为励磁电感估算值为真实值的 120% 条件下获得的实验结果。电机给定转速 1200 r·min<sup>-1</sup>, 在 4 s 时由空载变为额定负载, 10 s 时变为空载。可见, 对于高速条件, 无论是空载还是额定负载, 励磁电感对转速估算的影响很小, 符合仿真结果。

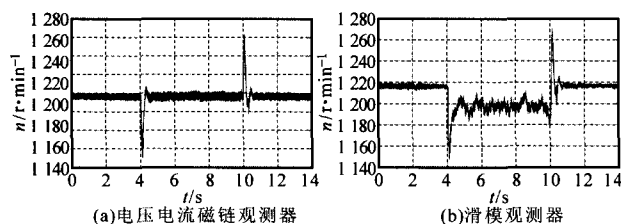


图 5 电机估算转速 (120% $L_m$ ) 实验结果

Fig. 5 Estimated speed (120% $L_m$ ) experimental results of motor

图 6 为转子电阻估算值为真实值的 150% 条件下获得的实验结果。

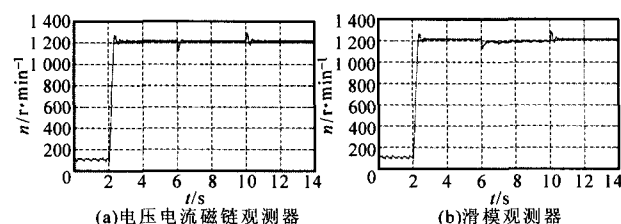


图 6 电机估算转速 (150% $R_r$ ) 实验结果

Fig. 6 Estimated speed (150% $R_r$ ) experimental results of motor

0~2 s, 电机给定转速为 90 r·min<sup>-1</sup>, 2 s 时电机给定转速变为 1200 r·min<sup>-1</sup>, 6 s 时电机由空载突加额定负载, 10 s 时电机由额定负载变为空载运行。可以看出, 电机运行在低速空载, 高速空载及高速额定负载条件下对转子电阻基本都不敏感, 符合仿真结果。

## 7 结 论

研究了基于电压电流模型的闭环磁链观测器和基于滑模结构的磁链观测器的参数敏感性。并以这两个观测器作为参考模型, 开环电流模型作为可调模型分析了模型参考自适应系统速度估算的参数敏感性。两种观测器无论是电动模式还是发电模式, 对转子电阻基本不敏感。在低速状态下, 定子电阻变化较大 (50%) 时, 对观测器影响很大; 在高速状态下, 观测器对定子电阻不太敏感。对于电压、电流模型磁链观测器, 对励磁电感在高速电动模式下敏感性较小, 在发电模式下敏感性较大。对于滑模观测器, 对励磁电感的敏感性较大。

对于模型参考自适应系统转速估算, 在高速下, 对参数的敏感性较小。在低速空载和低速小转矩发电条件下, 转速估算对转子电阻不太敏感, 在低速带载条件下对转子电阻敏感。对定子电阻和励磁电感在低速条件下比高速条件下敏感。

## 参考文献

- [1] 张春喜, 廖文建, 王佳子. 异步电机 SVPWM 矢量控制仿真分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 160-163.
- [2] 冯焱生. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] C Lascu, I Boldea, F Blaabjerg. A Class of Speed-sensorless Sliding-mode Observers for High-performance Induction Motor Drives[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2009, 56(9): 3394-3403.
- [4] Marko Hinkkanen, Jorma Luomi. Parameter Sensitivity of Full-order Flux Observers for Induction Motors[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2003, 39(4): 1127-1135.
- [5] P L Jansen, R D Lorenz. A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for Field Oriented Induction Machine Drives[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1994, 30(1): 101-110.
- [6] Cristian Lascu, Ion Boldea. A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2000, 36(1): 122-130.
- [7] 周亚丽, 李永东, 郑泽东. 基于 MRAS 的感应电机无速度传感器矢量控制[J]. 电气传动, 2009, 39(4): 3-8.