



# 感应电机多参数辨识的实验研究

许胜辉

(武汉职业技术学院 电信工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 从理论及试验上深入地分析了定子电阻参数变化对定子磁链估计的影响。同时, 在伪降阶磁链观测器的基础上提出了定子电阻、转子电阻及转速的参考模型自适应律, 从实验结果可以看出电机参数依据本文所得到自适应律进行独立辨识时可以获得的估计精度。

**关键词:** 定子电阻; 转子电阻; 转速; 参数辨识; 参考模型自适应系统; 耦合关系

中图分类号: F507.454

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2012) 05-0062-06

62

武汉职业技术学院学报二〇一二年第十一卷第五期(总第六十一期)

## 引言

本文深入研究了定子电阻参数的变化对定子磁链估计的影响, 针对定子电阻的变化在低速运行时对定子磁链估计精度影响大问题<sup>[1]</sup>, 提出了参考模型自适应电机参数辨识方案, 同时, 对多参数独立辨识及同时辨识进行了研究, 针对同时辨识不能保证收敛于实际值的问题, 提出了在独立辨识的基础上转子电阻按照定子电阻变化规律进行在线修正的定子电阻辨识方案。

## 一、基于 MRAS 的电机多参数辨识研究

本文在伪降阶磁链观测器的基础上提出了定子电阻、转子电阻及转速参考模型自适应估计系统, 并进行了深入研究。

### (一) 观测器模型的建立

在静止坐标系下, 以定子电流矢量与转子磁链矢量为状态变量, 感应电机状态方程表示如下<sup>[2]</sup>。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u_s = Ax + Bu_s \quad (1)$$

$$i_s = Cx \quad (2)$$

式中,  $i_s = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$  为定子电流;  $\psi_r = [\psi_{rd} \ \psi_{rq}]^T$  为转子磁链;  $u_s = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$  为定子电压;  $A_{11} = -\{R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma\tau_r)\}I = \alpha_{r11}I$ ;  $A_{21} = (L_m/\tau_r)I = \alpha_{r21}I$ ;  $I = [10; 01]$ ;  $A_{12} = \{(1/\tau_r)I - \psi_r\}L_m/(\sigma L_s L_r) = \alpha_{r12}I + \alpha_{r12}J$ ;  $A_{22} = -(1/\tau_r)I + \psi_r J$ ;  $J = [0-1; 1 \ 0]$ ;  $C = [I \ 0]$ ;  $B_1 = 1/(\sigma\tau_s)I = b_1I_0$ 。

自适应的伪降阶磁链观测器可以写成如下的形式<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = \hat{A}_{11}\hat{i}_s + \hat{A}_{12}\hat{\psi}_r + \frac{1}{\sigma L_s}u_s + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{dt} = \hat{A}_{22}\hat{\psi}_r + (L_m/\tau_r)\hat{i}_s \quad (4)$$

式中,  $i_s$ 、 $u_s$  分别为定子电流与定子电压矢量的测量值; “ $\hat{\cdot}$ ”表示估计值;  $G$  为反馈增益矩阵, 一般通过极点配置法来确定, 并保证观测器的性能不受转速波动的影响。本观测器由电流误差来驱动的一个闭环系统。

### (二) 基于 MRAS 的辨识系统设计

D.Landau 将基于 Popov 超稳定理论的参考模型自适应系统的设计分为如下三个步骤<sup>[4-6]</sup>: ①等价表示一个反馈系统, 即是用一个线性定常的前向方框与一个时变非线性的反馈方框来等价整个系统; ②

收稿日期: 2012-06-02

作者简介: 许胜辉(1966-), 男, 湖北鄂州人, 武汉职业技术学院电信工程学院实训中心主任, 副教授, 研究方向: 自动控制技术。



要不等式  $I_{11}$ 、 $I_{12}$  成立,则不等式  $I_1$  必然成立。

首先考虑不等式  $I_{11}$ , 只要被积函数为正时,取  $\gamma_{11}$  为零,则不等式  $I_{11}$  成立。即得到函数表达式:

$$\phi_{12}(v, t) = k_{12}(-e^{\hat{T}_{12}} \hat{i}_s), k_{12} > 0 \quad (19)$$

再考虑不等式  $I_{12}$ , 求解  $\phi_{11}(v, t)$  的函数表达式, 首先要用到下面著名的积分不等式关系:

$$\int_0^t \dot{f}(t) f(t) dt = \frac{1}{2} [f^2(t_1) - f^2(0)] \geq -\frac{1}{2} f^2(0) \quad (20)$$

如果令

$$\dot{f}(t) = k_{11} e^{\hat{T}_{11}} \hat{i}_s, k_{11} > 0 \quad (21)$$

$$f(t) = R_s - \int_0^t \phi_{11}(v, t, \tau) d\tau \quad (22)$$

则根据积分不等式关系(20)可知,不等式(18)即成立。

对(22)式两边分别求导,再结合(21)式,得到:

$$\phi_{11}(v, t) = k_{11}(-e^{\hat{T}_{11}} \hat{i}_s) \quad (23)$$

同理, 根据估计的转子电阻及转速也要分别满足不等式  $I_2$ 、 $I_3$ , 可以得到如下的关系:

$$\begin{cases} \phi_{21} = k_{21} e^{\hat{T}_{21}} \left( \frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_r - \frac{1}{\sigma L_r} \hat{i}_s \right) \\ \phi_{22} = k_{22} e^{\hat{T}_{22}} \left( \frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_r - \frac{1}{\sigma L_r} \hat{i}_s \right) \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \phi_{31} = k_{31}(-e^{\hat{T}_{31}} J \hat{\psi}_r) \\ \phi_{32} = k_{32}(-e^{\hat{T}_{32}} J \hat{\psi}_r) \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $k_{21} > 0, k_{22} > 0, k_{31} > 0, k_{32} > 0$ 。

第三步: 将 Popov 超稳定性定理应用于等价反馈系统<sup>[8]</sup>。

超稳定性问题是对绝对稳定性问题的一个推广,由 Popov 于 60 年代首先提出的。所谓超稳定性问题,对于图 1 所示的系统,反馈方框满足波波夫积分不等式(10)时,正向线性定常方框在满足什么条件下才能保证系统状态(不包括反馈方框)的有界性和收敛性。当系统的状态是有界时,系统是超稳定的;系统在超稳定条件下,当时间趋于无穷时,系统状态趋于零,这样的系统是渐近超稳定的。

波波夫超稳定性定理可知:由线性定常前向通道(8)和非线性时变的反馈通道(9)组成的系统渐近超稳定的充分必要条件是前向通道的传递函数矩阵为严格正实传递函数矩阵。

$$H(s) = [sI - (A_{11} + G)]^{-1} \quad (26)$$

保证传递函数矩阵为严格正实的充分条件是存在对称正定矩阵  $P$  和  $Q$ , 使得如下的李雅普诺夫方程得到满足。

$$(A_{11} + G)^T P + P(A_{11} + G) = -Q \quad (27)$$

利用极点配置法进行合理设计反馈增益矩阵  $G$ , 总可以使上述的李雅普诺夫方程得到满足。

第四步: 返回到原先的参考模型自适应系统, 以显示方式确定自适应律。

综上, 在满足 Popov 超稳定性的前提下, 根据式(5)得到定子、转子电阻及转速估计的自适应律如下:

$$\begin{cases} \hat{R}_s = k_{11} \int_0^t -e^{\hat{T}_{11}} \hat{i}_s dt + k_{12}(-e^{\hat{T}_{12}} \hat{i}_s) \\ \hat{R}_r = k_{21} \int_0^t e^{\hat{T}_{21}} \left( \frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_r - \frac{1}{\sigma L_r} \hat{i}_s \right) dt + k_{22} e^{\hat{T}_{22}} \left( \frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_r - \frac{1}{\sigma L_r} \hat{i}_s \right) \\ \hat{\omega}_r = k_{31} \int_0^t (-e^{\hat{T}_{31}} J \hat{\psi}_r) dt + k_{32}(-e^{\hat{T}_{32}} J \hat{\psi}_r) \end{cases} \quad (28)$$

因此, 根据式(28)可以得到基于 MRAS 的电机多参数辨识的总体方案, 如图 2 所示。

## 二、感应电机多参数辨识的实验研究

### (一) 感应电机多参数独立辨识的实验研究

首先, 定子电阻、转子电阻及电机转速等参数按照自适应律式(28)进行独立地辨识, 也就是说, 辨识某一个参数时, 假定其它两个参数是已知给定的。

电机在=50Hz 额定负载起动, 假定实验在=0.5s 时刻起定子电阻随着时间按照如下的规律变化:

$$R_s = R_{s0} + 0.8R_{s0}(1 - e^{-(t-1.5)/T}) \quad (29)$$

式中,  $R_s$  为零时刻的初始定子电阻值,  $0.4\Omega$ ;  $T$  为热惯性时间常数, 为了反映辨识系统的动态性能, 突出定子电阻变化, 取  $=-0.2s$ 。定子电阻辨识过程的实验结果如图 3 所示。其中左图为定子电阻辨识的曲线; 右图为定子电阻辨识误差的曲线。

假定转子电阻在=0.5s 以后与定子电阻随时间具有相似的变化规律:

$$R_r = R_{r0} + 0.5R_{r0}(1 - e^{-(t-1.5)/T}) \quad (30)$$

式中,  $R_r$  为零时刻转子电阻初始值  $0.4\Omega$ , 其它

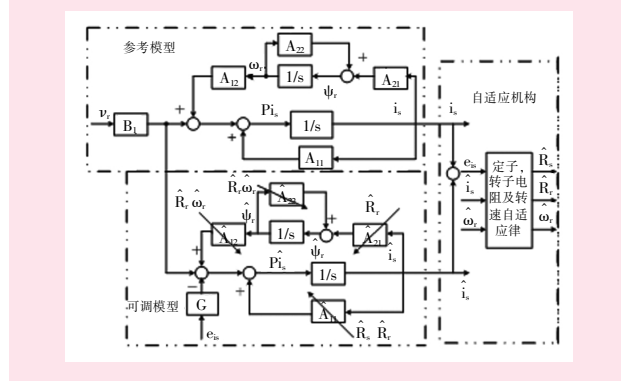


图 2 基于参考模型自适应系统的电机多参数辨识系统

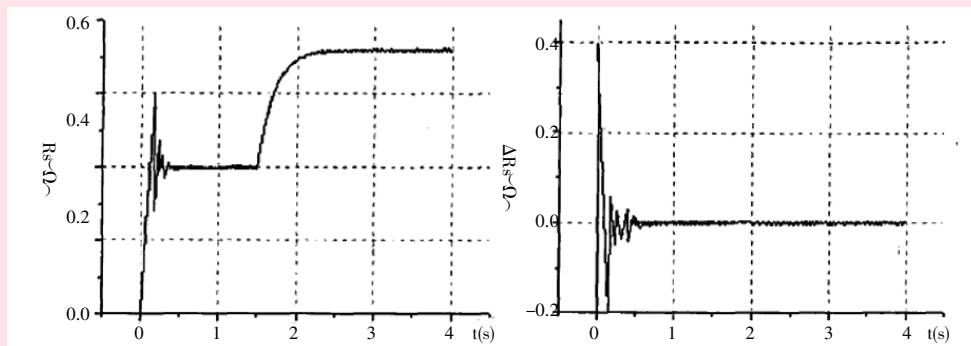


图3 定子电阻辨识及其误差曲线

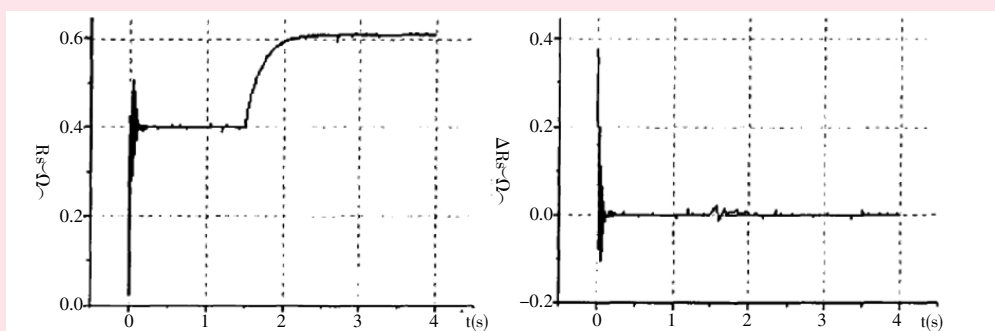


图4 转子电阻辨识及其误差曲线

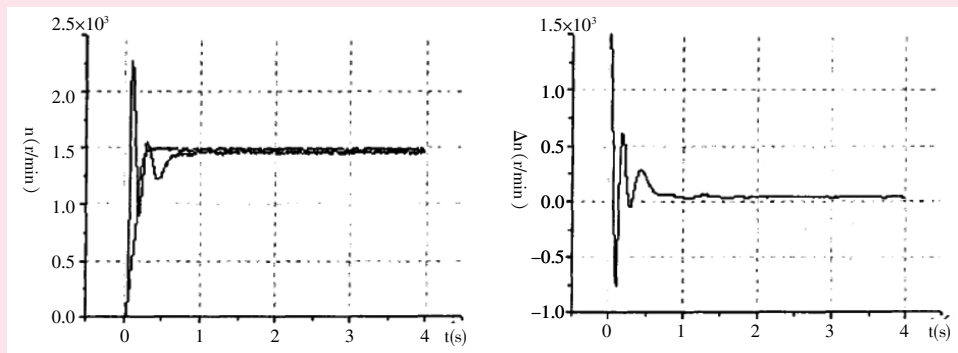


图5 电机转速辨识及其误差曲线

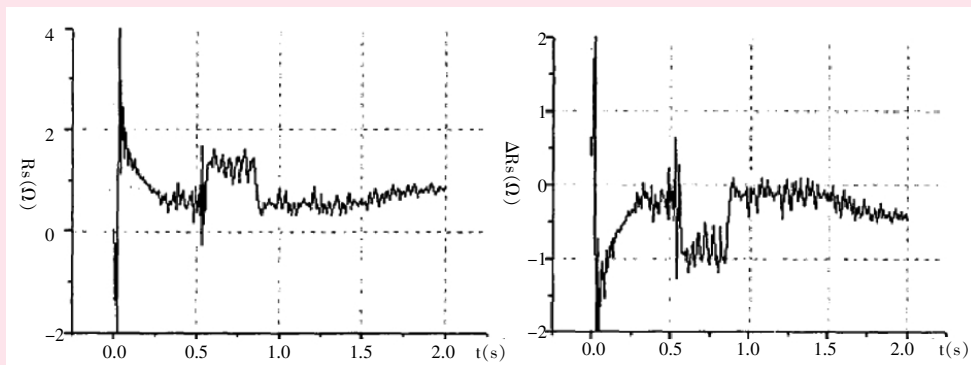


图6 定子电阻辨识及其误差曲线

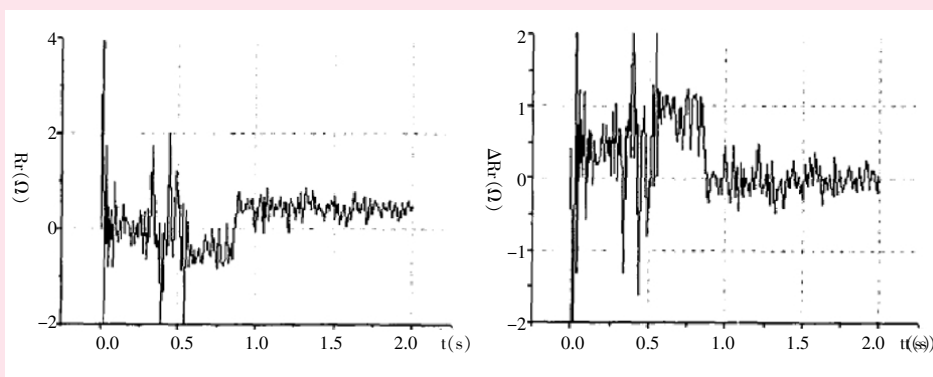


图7 转子电阻辨识及其误差曲线

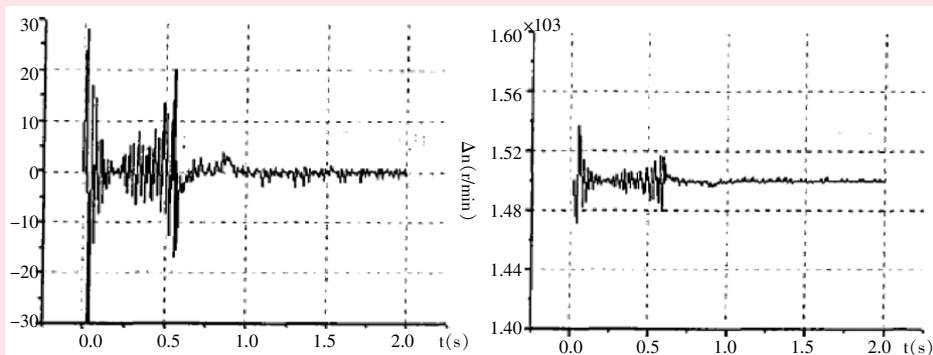


图8 电机转速辨识及其误差曲线

参数与定子电阻的相同。转子电阻辨识过程的实验结果如图4所示。其中,左图为转子电阻辨识的曲线;右图为转子电阻辨识误差的曲线。

电机在=50Hz空载起动,电机转速辨识过程的实验结果见图5所示。其中,左图为电机实际转速与估计转速的曲线;右图为转速估计误差的曲线。

从实验结果图5可知,电机参数按照所得到的参考模型自适应律进行独立辨识,由于起动时的动态影响,估计过程初始时刻具有较大的波动,而在稳态运行时电机参数估计结果都得到了相当高的估计精度。

### (二)感应电机多参数同时辨识的研究

为了反映出自适应律同时辨识存在的问题,我们分析最简单的情况,假定电机的定子电阻、转子电阻为 $0.4\Omega$ 的常值不变,电机以=50Hz空载起动,电机参数按照参考模型自适应律进行同时辨识的实验结果见图8所示,其中左图为电机参数辨识曲线,右图为电机参数辨识误差曲线。

从图8可知,电机定子电阻、转子电阻及转速等参数按照所得到的参考模型自适应律无法同时辨识出来,这是由于多参数在辨识的动态过程的强耦合作用不能保证每个参数估计值收敛于其实际值。

### 三、结语

本文从理论及试验上深入研究了定子电阻参数的变化对定子磁链估计的影响,针对定子电阻的变化在低速运行时对定子磁链估计精度影响大问题,提出了参考模型自适应电机多参数辨识方案,同时,对多参数独立辨识及同时辨识进行了研究,针对同时辨识不能保证收敛于实际值的问题,提出了在独立辨识的基础上转子电阻按照定子电阻变化规律进行在线修正的定子电阻辨识方案。这样补偿了转子电阻的变化对定子电阻估计的影响,提高定子电阻参数辨识的精度。

### 参考文献:

- [1] 王红梅,阮毅,徐静.定子电阻变化对异步电机按定子磁场定向控制系统性能的扰动分析[J].电气传动自动化,2004,26(1):14-17.
- [2] Madadi Kojabadi H, Chang L. Model reference adaptive system pseudoreduced-order flux observer for very low speed and zero speed estimation in sensorless induction motor drives [C]. In: Power Electronics Specialists Conference, USA: Philadelphia, 2002.1: 301-305.



- [3] 魏伟,许胜辉,郭新超.感应电机定子磁链观测器的研究[J].微电机,2009,42(2):45-49.
- [4] Wang P,Li B,Huang R X,Li G D. Study of speed-sensorless direct torque control system based on neural-network[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 5-8.
- [5] 魏伟,郭新超.感应电动机无速度传感技术实验研究[J].微电机,2008,41(12):9-13 .
- [6] MADADI KOJABADI H,CHANG L,DORAISWAMI R. A novel adaptive observer for very fast estimation of stator resistance in sensorless induction motor drives[C]. IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003,(3):1455-1459.
- [7] 魏伟,许胜辉,郭新超. 感应电机直接转矩控制技术的研究进展与应用[J]. 电气时代,2008,(11):182-186.
- [8] 张春朋,林飞,陈寿孙. 改进 U-I 法异步电机转子磁链估计器[J].中国电机工程学报,2004,24(5):126-129.
- [9] 魏伟,李军,魏岚婕.异步电机直接转矩控制数字化研究[J].实验室研究与探索,2007,(12):67-70.
- [10] 何仁平,魏伟.感应电机直接转矩控制技术的发展趋势[J].微电机,2008,(8):17-21.
- [责任编辑:刘 骋]

## The Experimental Study on Multi-parameters Estimate of Induction Motor

XU Sheng-hui

(School of Telecommunication Engineering, Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, the effect of the change of stator resistance parameters on the estimate of stator flux is analyzed theoretically and experimentally. Meanwhile, MRAS law of stator resistance, rotor resistance and speed is processed based on false reduced-order flux observation. The experiment result shows that the precision of estimate can be attained where the MRAS law found in the paper is applied to the unattached identification of motor parameters.

**Key words:** stator resistance; rotor resistance; speed; parameter estimate; MRAS; coupling connection