

一种感应电机参数自适应转子 磁链观测器的设计 *

余夫良, 邓志奇, 陈阳生 *

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了解决“感应电机运行过程中由电机参数变化引起的转子磁场定向不准确”的问题,根据龙贝格观测器原理提出了一种新颖的参数自适应转子磁链观测器。首先论述了观测器的设计原理,针对磁链误差无法获得这一问题提出了一种有效的解决方案,引入了新变量,然后根据 Lyapunov 稳定性原理设计出参数自适应律。最后分别在 Matlab 和 DSP2812 平台上对该算法的参数收敛性以及定子电阻误差对观测器的影响进行了验证。仿真和实验结果表明,该方法不但可以对转子磁链加以观测,还可以同时在线调整并辨识转子电阻以及转子时间常数,对定子电阻具有很强的鲁棒性。

关键词:磁链观测器;感应电机;磁场定向

中图分类号:TM343

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)07-0876-05

Design of rotor flux observer with adaption of motor parameters for induction motors

YU Fu-liang, DENG Zhi-qi, CHEN Yang-sheng

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

Abstract: In order to solve the problems of the field oriented inaccuracy caused by the variation of induction motor parameters during operation, a novel flux observer with parameters adaptive was proposed based on Luenberger observer. Firstly, the principle of the observer was elaborated. To avoid the flux error, which is unavailable, a new variable was introduced. Then, the adaptive laws of motor parameters was designed based on Lyapunov equation. Finally, the convergence of the algorithm and the effect of stator resistance mismatch were evaluated on Matlab and DSP2812 respectively. Simulations and actual experiments show that the method can observe the rotor flux with auto-tuning rotor resistance and rotor time constant identification. The algorithm is robust to stator resistance.

Key words: flux observer; induction motors; field oriented

0 引 言

感应电机磁场定向控制已经广泛应用于现代交流驱动系统中,实现感应电机转子磁场定向的关键是获取转子磁链的瞬时位置。获取转子磁链信息的途径有很多,例如可以用霍尔传感器直接测量,但这种方法必须要在电机内装上传感器装置,同样也可以通过一些比较容易测量的信号来计算转子磁链,传统的方法有电流模型法和电压模型法,电流模型法的明显缺陷是

运算严重依赖于转子时间常数,而对于电压模型法,由于要对电压进行积分,在低频时,由于积分器的并非完全线性的频率响应特性,使得积分产生困难,此外,在低频时,定子电阻压降的偏差对积分结果影响较大^[1]。为了充分利用这两种模型的优势,可以将其进行结合,在低速时采用电流模型,高速时则采用电压模型^[2]。然而这种方法最终还是依赖于电机参数,例如互感、定转子电阻,而这些参数随着电机的运行发热以及饱和等条件限制会发生很大的变化,即使是直接测

收稿日期:2010-12-16

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2009ZX04010-013)

作者简介:余夫良(1983-),男,江西上饶人,主要从事电机控制方面的研究. E-mail: fuliangyu@zju.edu.cn

通信联系人:陈阳生,男,教授,博士生导师. E-mail: yschen@zju.edu.cn

量也难免存在一定的误差。由这些限制引起的磁场定向偏差会导致驱动系统的性能下降,针对这一问题,近年来各种观测器和参数辨识方法相继提出。Rowan 提出了模型参考自适应磁链观测器,但这种方法很依赖定子电阻以及 L_m^2/L_r 项,在低频时对积分的影响很明显^[3]。文献[4]提出一种参数辨识方法使得估算电流与测量电流间的误差最小,但由于计算量很大,每 60 s 才能更新一次。文献[5-6]采用了神经网络和模糊算法,这种方法通常都过于复杂,不适合实际应用。Seok Ho Jeon 提出了一种 11 阶磁链观测器,不但可以观测磁链,还可以同时辨识定子电阻以及转子电阻,然而这种观测器对定转子间互感特别敏感,一旦由于饱和和作用使得互感发生了变化,将会严重降低这种观测器的精确度,甚至引起系统的不稳定。另外由于存在电流的积分问题,并且观测器阶数很高,参数调整也是一个很大的挑战,难以在实际中应用。

为了解决这些问题,本研究在文献[7]的基础上提出了一种新颖的磁链观测器。由于定子电阻比较容易测量,绕组温度变化也可以通过温度传感器得到,计算时所采用的定子电阻值与真实值相差不大。因为如果对所有的参数都加以辨识,那么观测器的阶数将会大大增加,不易于实现,文献[8]已做了尝试。所以在本研究中,假定定子电阻为已知量。由于漏感通常比互感要小一个数量级, $\lambda = L_m/L_r$ 可以视为一个接近于 1 的常量。通过该算法不但可以准确地观测出转子磁链,还可以同时辨识出转子时间常数以及转子电阻,相对于文献[7],本研究提出的观测器在阶数上有了很大的降低,同时算法相对简单,易于实现。从仿真结果可以看出,定子电阻误差对于辨识结果的影响很小,这说明该算法对定子电阻也有很强的鲁棒性。

1 自适应磁链观测器

本研究选取定子电流和转子磁链作为状态变量,则感应电机在两相静止坐标系下的状态方程为^[9]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_\alpha = -\frac{R_s}{L_\sigma} i_\alpha + \frac{\lambda}{L_\sigma} (M_r \psi_\alpha - \lambda R_r i_\alpha) + \frac{\lambda}{L_\sigma} \omega_r \psi_\beta + \frac{1}{L_\sigma} u_\alpha \\ \frac{d}{dt} i_\beta = -\frac{R_s}{L_\sigma} i_\beta + \frac{\lambda}{L_\sigma} (M_r \psi_\beta - \lambda R_r i_\beta) - \frac{\lambda}{L_\sigma} \omega_r \psi_\alpha + \frac{1}{L_\sigma} u_\beta \\ \frac{d}{dt} \psi_\alpha = -M_r \psi_\alpha - \omega_r \psi_\beta + \lambda R_r i_\alpha \\ \frac{d}{dt} \psi_\beta = -M_r \psi_\beta + \omega_r \psi_\alpha + \lambda R_r i_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_α, i_β —定子电流; ψ_α, ψ_β —转子磁链; u_α, u_β —定子电压; R_s, R_r —定子电阻和转子电阻; M_r —转子时

间常数的倒数; L_σ —漏感, $L_\sigma = (L_s L_r - L_m^2)/L_m$ 。

转子电阻和转子时间常数在转子磁场定向控制中具有较大的作用。在这两个参数发生偏差的情况下,系统的动、静态特性均会变坏,并可能造成电机的电磁转矩发生振荡。为此,本研究选取定子电流和转子磁链作为状态变量构建的状态观测器,对转子电阻、转子时间常数倒数以及转子磁链进行观测。状态观测方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{i}_\alpha = -\frac{R_s}{L_\sigma} \hat{i}_\alpha + \frac{\lambda}{L_\sigma} (\hat{M}_r \hat{\psi}_\alpha - \lambda \hat{R}_r \hat{i}_\alpha) + \frac{\lambda}{L_\sigma} \omega_r \hat{\psi}_\beta + \frac{1}{L_\sigma} u_\alpha + f_\alpha \\ \frac{d}{dt} \hat{i}_\beta = -\frac{R_s}{L_\sigma} \hat{i}_\beta + \frac{\lambda}{L_\sigma} (\hat{M}_r \hat{\psi}_\beta - \lambda \hat{R}_r \hat{i}_\beta) - \frac{\lambda}{L_\sigma} \omega_r \hat{\psi}_\alpha + \frac{1}{L_\sigma} u_\beta + f_\beta \\ \frac{d}{dt} \hat{\psi}_\alpha = -\hat{M}_r \hat{\psi}_\alpha - \omega_r \hat{\psi}_\beta + \lambda \hat{R}_r \hat{i}_\alpha \\ \frac{d}{dt} \hat{\psi}_\beta = -\hat{M}_r \hat{\psi}_\beta + \omega_r \hat{\psi}_\alpha + \lambda \hat{R}_r \hat{i}_\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中:“ $\hat{\cdot}$ ”—估计量。

为了加快电流的收敛速度,本研究在这里引入 f_α 和 f_β , 其设计将在下文中进一步说明。

本研究将电机本身模型作为参考模型,考虑到只有定子电流是可以采样得到的,所以选择定子电流误差作为反馈量,并利用其与估算电流间的误差作为参考模型和可调模型之间的调节量。其中 $i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta$ 的状态误差定义如下:

$$\begin{cases} \tilde{i}_\alpha = i_\alpha - \hat{i}_\alpha & \tilde{\psi}_\alpha = \psi_\alpha - \hat{\psi}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta = i_\beta - \hat{i}_\beta & \tilde{\psi}_\beta = \psi_\beta - \hat{\psi}_\beta \end{cases} \quad (3)$$

同样可将参数误差定义如下:

$$\begin{cases} \tilde{R}_r = R_r - \hat{R}_r \\ \tilde{M}_r = M_r - \hat{M}_r \end{cases} \quad (4)$$

方程式(1)和式(2)几乎相同,差别在于方程式(2)中转子电阻和转子时间常数以及转子磁链用的是估计量,而并非电机的实际参数。联立式(1)和式(2),可以得到误差状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \tilde{i}_\alpha = \frac{\lambda}{L_\sigma} (\tilde{M}_r \hat{\psi}_\alpha + \hat{M}_r \tilde{\psi}_\alpha - \lambda \tilde{R}_r \hat{i}_\alpha + \omega_r \tilde{\psi}_\beta) - f_\alpha \\ \frac{d}{dt} \tilde{i}_\beta = \frac{\lambda}{L_\sigma} (\tilde{M}_r \hat{\psi}_\beta + \hat{M}_r \tilde{\psi}_\beta - \lambda \tilde{R}_r \hat{i}_\beta - \omega_r \tilde{\psi}_\alpha) - f_\beta \\ \frac{d}{dt} \tilde{\psi}_\alpha = -\tilde{M}_r \hat{\psi}_\alpha - \hat{M}_r \tilde{\psi}_\alpha - \omega_r \tilde{\psi}_\beta + \lambda \tilde{R}_r \hat{i}_\alpha \\ \frac{d}{dt} \tilde{\psi}_\beta = -\tilde{M}_r \hat{\psi}_\beta - \hat{M}_r \tilde{\psi}_\beta + \omega_r \tilde{\psi}_\alpha + \lambda \tilde{R}_r \hat{i}_\beta \end{cases} \quad (5)$$

可以通过对 f_α 和 f_β 的设计使得上式中的电流误差趋于零。但从方程式(5)可以看出,其中包含未知项 $\tilde{\psi}_\alpha, \tilde{\psi}_\beta$,而这些未知项又与转子电阻和转子时间常数耦合,为了将其消除,以便能够设计出 f_α 和 f_β ,在本研究中引入新的变量 z_α, z_β 并用来代替磁链误差项 $\tilde{\psi}_\alpha, \tilde{\psi}_\beta$ 。 z_α, z_β 设计如下:

$$\begin{cases} z_\alpha = \frac{\lambda}{L_\sigma} \tilde{\psi}_\alpha + \tilde{i}_\alpha \\ z_\beta = \frac{\lambda}{L_\sigma} \tilde{\psi}_\beta + \tilde{i}_\beta \end{cases} \quad (6)$$

联立求解方程式(5)和式(6),式(5)可重新表示为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \tilde{i}_\alpha = \frac{\lambda}{L_\sigma} \tilde{M}_r \hat{\psi}_\alpha + \tilde{M}_r (z_\alpha - i_\alpha) - \frac{\lambda^2}{L_\sigma} \tilde{R}_r i_\alpha + \omega_r (z_\beta - i_\beta) - f_\alpha \\ \frac{d}{dt} \tilde{i}_\beta = \frac{\lambda}{L_\sigma} \tilde{M}_r \hat{\psi}_\beta + \tilde{M}_r (z_\beta - i_\beta) - \frac{\lambda^2}{L_\sigma} \tilde{R}_r i_\beta + \omega_r (z_\alpha - i_\alpha) - f_\beta \\ \frac{d}{dt} z_\alpha = -f_\alpha \\ \frac{d}{dt} z_\beta = -f_\beta \end{cases} \quad (7)$$

为了消去方程式(7)中的估计项,只剩下误差项,以便使用 Lyapunov 方程得出参数自适应律,本研究对 f_α 和 f_β 定义如下:

$$\begin{cases} f_\alpha = \tilde{M}_r z_\alpha \hat{\psi}_\alpha + \omega_r \hat{z}_\beta + k \tilde{i}_\alpha \\ f_\beta = \tilde{M}_r \hat{z}_\alpha - \omega_r \hat{z}_\beta + k \tilde{i}_\beta \end{cases} \quad (8)$$

本研究定义 Lyapunov 函数如下:

$$V = \frac{1}{2} \left[\tilde{i}_\alpha^2 + \tilde{i}_\beta^2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{M}_r^2 + \frac{\lambda^2}{L_\sigma \gamma_2} \tilde{R}_r^2 + \frac{1}{\gamma_3} (z_\alpha^2 + z_\beta^2) \right] \quad (9)$$

本研究对 Lyapunov 函数进行求导如下:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -(k + T_r) (\tilde{i}_\alpha^2 + \tilde{i}_\beta^2) - \frac{\lambda^2}{L_\sigma} \tilde{R}_r (i_\alpha \tilde{i}_\alpha + i_\beta \tilde{i}_\beta) + \\ & \tilde{M}_r \left[\left(\frac{\lambda}{L_\sigma} \hat{\psi}_\alpha + \hat{z}_\alpha \right) \tilde{i}_\alpha + \left(\frac{\lambda}{L_\sigma} \hat{\psi}_\beta + \hat{z}_\beta \right) \tilde{i}_\beta \right] + \\ & \frac{1}{\gamma_1} \tilde{M}_r \dot{\tilde{M}}_r + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{R}_r \dot{\tilde{R}}_r + \frac{1}{\gamma_3} (\tilde{z}_\alpha \dot{\tilde{z}}_\alpha + \tilde{z}_\beta \dot{\tilde{z}}_\beta) \end{aligned} \quad (10)$$

从方程式(10)中可以看出,为了使 Lyapunov 函数的导数小于零,只要令式(10)中除第1项以外,其他项总和为零,如此便可以得到参数自适应律为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \tilde{M}_r = \gamma_1 \left[\left(\frac{\lambda}{L_\sigma} \hat{\psi}_\alpha + \hat{z}_\alpha \right) \tilde{i}_\alpha + \left(\frac{\lambda}{L_\sigma} \hat{\psi}_\beta + \hat{z}_\beta \right) \tilde{i}_\beta \right] \\ \frac{d}{dt} \tilde{R}_r = -\gamma_2 (i_\alpha \tilde{i}_\alpha + i_\beta \tilde{i}_\beta) \\ \frac{d}{dt} \hat{z}_\alpha = -f_\alpha + \gamma_3 \tilde{i}_\alpha \\ \frac{d}{dt} \hat{z}_\beta = -f_\beta + \gamma_3 \tilde{i}_\beta \end{cases} \quad (11)$$

本研究适当地选择增益 $k, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, 可以使得参数估计值在较短的时间内趋于真实值。

2 仿真结果

对于上述方法,本研究在 Matlab/Simulink 下建立了仿真模型,如图1所示。 M 轴给定电流 i_M^* 和给定转速 ω^* 作为系统的输入信号,将检测得到的转子速度 ω 与电流信号 i_α 和 i_β 作为磁通观测器的输入,经由磁通观测器计算后得到转子磁链幅值空间矢量位置以及角速度等信息,再对静止两相电流进行旋转坐标变换,得出定子电流的磁通分量和转矩分量。速度调节器是 PI 调节器,其输出是转矩电流参考值 i_T^* ; 转矩电流参考值 i_T^* 再与实际值 i_T 相比较,其差值经由 T 轴电流 PI 调节器控制,输出是 T 轴电压参考值 u_T^* ; 参考信号 i_M^* 与实际值相比较后,其偏差值再被输入到 M 轴电流调节器,输出是 M 轴电压参考值 u_M^* ; 磁通观测模型给出了转子磁通矢量空间位置,将此相位作为 MT 轴系定向坐标,并对 u_M^* 和 u_T^* 进行坐标变换,得到两相静止坐标系下电压参考值 u_α^* 和 u_β^* , 经由 SVPWM 运算,输出的脉冲信号用以控制 IGBT 的通断,进而达到电压调制的目的。

仿真所采用的电机参数为实验所用电机的实测参数,分别为:额定功率 1.1 kW,额定转速 1 500 rpm,额定电流 2.8 A,极对数 2,定子相电阻 5.2 Ω ,转子相电阻 2.8 Ω ,定子电感 0.3 H,转子电感 0.3 H,定转子互感 0.29 H,转动惯量 0.01 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

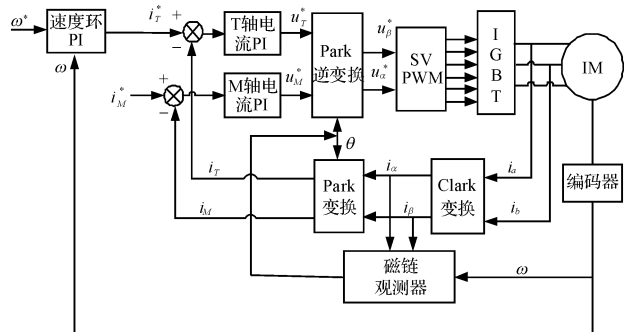


图1 磁链观测器控制框图

2.1 观测器参数收敛性的仿真验证

为了验证本研究所采用的观测器对磁链观测以及参数辨识的效果,对该方法进行了仿真研究,仿真中所采用的异步电机定子电阻为实测值。转子时间常数倒数和转子电阻的初始值分别为其真实值的1.5倍情况下各参数的收敛性以及观测误差如图2所示,图形的上半部分分别表示转子电阻和转子时间常数倒数的估算情况,下半部分分别表示 α 轴磁链的估算误差 β (轴类似)和磁链位置角的估算误差。

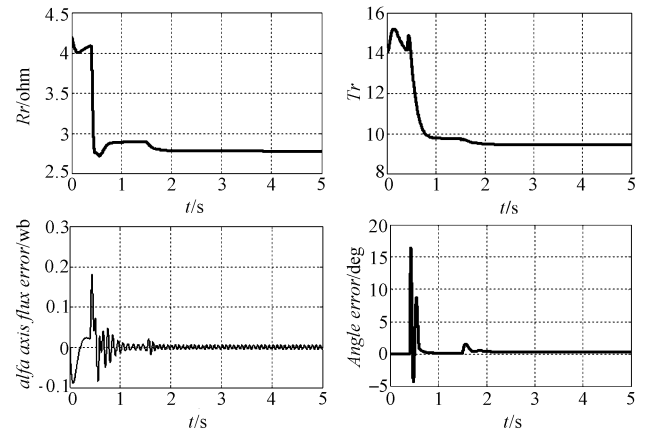


图2 在 $Rr(0) = 1.5Rr^*$ 和 $Mr(0) = 1.5Mr^*$ 下的各参数收敛性以及磁链观测误差的仿真结果

从仿真结果可以看出,在不同的参数初始值下,转子电阻以及转子时间常数都能很快地收敛到实际值,转子磁链观测误差几乎为零。

2.2 定子电阻对辨识结果影响的仿真分析

本研究所设计的观测器不但能够观测出转子磁链,而且可以辨识出转子电阻以及转子时间常数的倒数,由于观测器只对转子侧参数敏感,对定子电阻的敏感性较低,为了简化观测器并提高观测器的可靠性,本研究中所提及的观测器是在定子电阻给定的条件下设计的,所以定子电阻的误差会对辨识结果产生一定影响。为了检验定子电阻对辨识结果的影响,笔者针对不同的定子电阻给定值做了仿真研究,磁链位置角观测误差如图3所示。

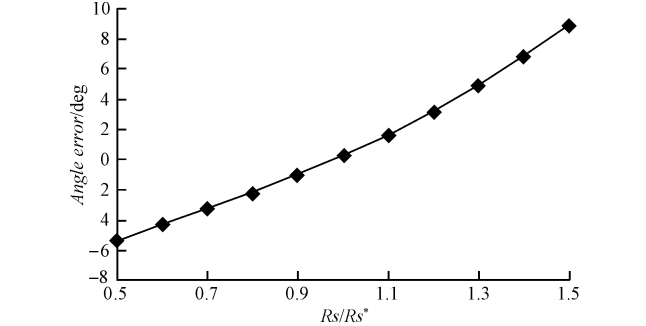


图3 定子电阻对转子磁链位置角估算影响的仿真结果

从仿真结果可以看出,定子电阻误差对磁链位置角的观测影响并不大,由此可见,该观测器即使在定子电阻有误差的情况下仍然能够有效地观测出转子磁链并辨识出电机参数。

3 实验结果

本研究以DSP2812为核心建立了硬件平台,该平台主要由驱动电路和控制电路组成,功率驱动电路采用IPM模块,控制电路以DSP2812为核心,外扩CAN、232通讯芯片用于上位机与控制板之间的通讯。电机的速度信号通过光电码盘与2812芯片上的正交编码脉冲电路QEP连接,通过M法与T法测得转速。经过矢量控制算法计算获得的PWM脉冲信号通过光耦隔离电路输入到IPM的驱动电路。硬件结构图如图4所示。

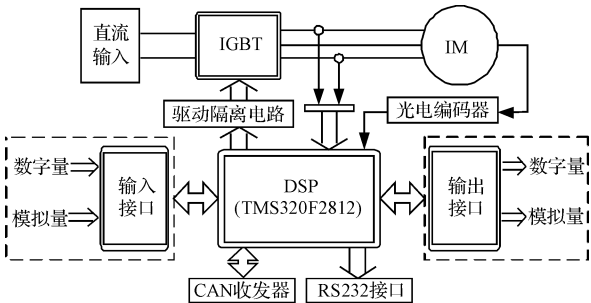


图4 硬件结构图

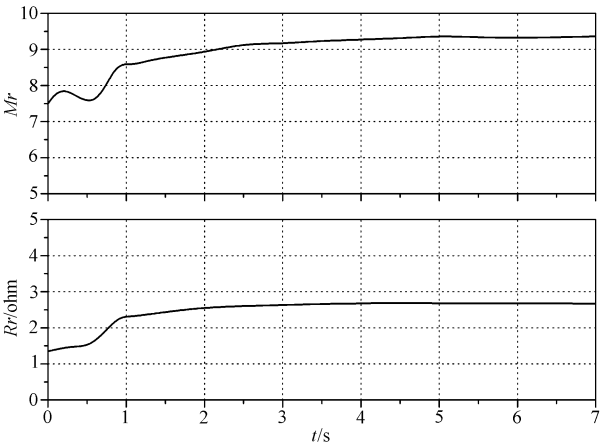


图5 在 $Rr(0) = 0.5Rr^*$ 和 $Mr(0) = 0.8Mr^*$ 下的各参数收敛性以及磁链观测误差的实验结果

3.1 参数收敛性的实验验证

为了对参数的收敛性进行进一步的实验验证,本研究针对不同的转子电阻与转子时间常数给定值进行了实验。不同参数给定值下的辨识情况如图5~7所示。从实验结果可以看出,不论参数的初始给定值是多少,都能很快的收敛到实际值,稳态误差很小,仿真结果得到了验证。

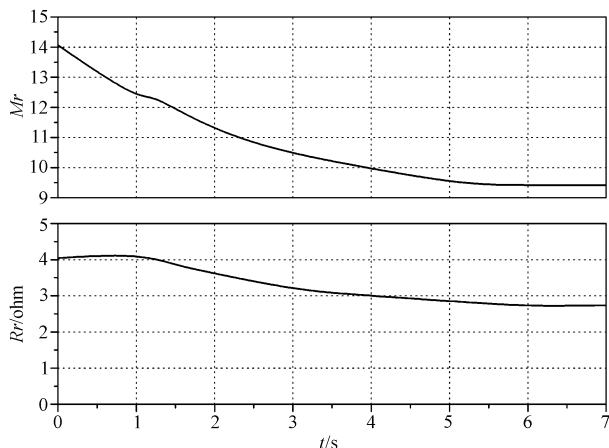


图 6 在 $Rr(0) = 1.5Rr^*$ 和 $Mr(0) = 1.5Mr^*$ 下的各参数收敛性以及磁链观测误差的实验结果

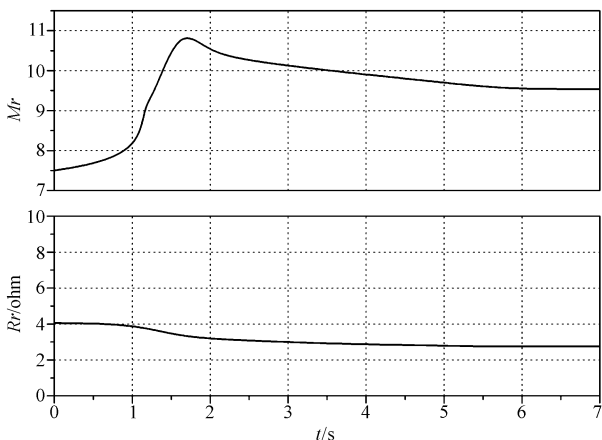


图 7 在 $Rr(0) = 1.5Rr^*$ 和 $Mr(0) = 0.8Mr^*$ 下的各参数收敛性以及磁链观测误差的实验结果

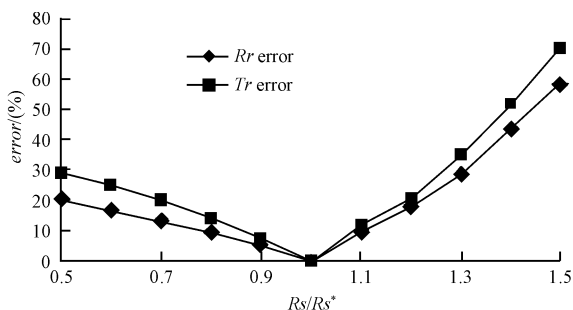


图 8 定子电阻对转子参数辨识影响的实验结果

3.2 定子电阻对辨识结果影响的实验分析

为了更好地检验定子电阻对辨识结果的影响,针对不同的定子电阻给定值做了实验研究,参数辨识结果如图 8 所示,从仿真分析和实验结果都可以看出,即使是在定子电阻与实际值存在偏差的情况下,观测器仍然可以很好地工作,并且能够很快地收敛,从而进一步验证了该观测器的适用性。

4 结束语

本研究针对异步电机磁场定向矢量控制提出了一种参数自适应转子磁链观测器,该方法利用电流估算值与电流采样值之间的误差,通过 Lyapunov 稳定性原理设计出参数的自适应律,不但能够观测出转子磁链,而且能够实时估算出转子电阻和转子时间常数。另外,对于定子电阻对辨识结果的影响,本研究也分别作了仿真分析。最后,仿真和实验结果表明,该观测器能够很好地应用在感应电机磁场定向矢量控制上,克服了传统感应电机矢量控制严重依赖电机参数这一缺陷,大大提高了控制系统对电机参数的鲁棒性。

参考文献 (References):

- [1] 王成元,夏加宽. 电机现代控制技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] VERGHESE G C, SANDERS S R. Observers for flux estimation in induction machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1988, 35(1): 85-94.
- [3] ROWAN T M K, LEGGATE R J. A simple on-line adaption for indirect field orientation of an induction machine [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(4): 720-727.
- [4] HOLTZ J, THIMM T. Identification of the machine parameters in a vector-controlled induction motor drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, 27(6): 1111-1118.
- [5] KRANAYIL B, RAHMAN M F, GRANTHAM C. Rotor Resistance Identification Using Artificial Neural Networks for an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive [C]//Industrial Electronics Society. Denver: [s. n.], 2001, The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001: 1315-1320.
- [6] KARANAYIL B, RAHMAN M F, GRANTHAM C. Stator and Rotor Resistance Observers for Induction Motor Drive using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks [C]//Industry Applications Conference, 2003, 38th IAS Annual Meeting. Salt Lake City: [s. n.], 2003: 124-131.
- [7] JEON S H, KWANG K O, CHOI J Y. Flux observer with online tuning of stator and rotor resistances for induction motors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 49(3): 653-664.
- [8] 金海,黄进,杨家强. 感应电机转子磁链自适应观测及参数辨识 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(2): 339-343, 351.
- [9] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(3): 570-579.