基于Matlab/Simulink的异步电机自适应矢量控制系统研究

李家荣
(盐城工学院 电气学院,江苏 盐城 224003)

摘要:提出了一种速度自适应的转子磁链闭环观测器,并应用于矢量控制系统中,以取代传统的纯积分器。经过理论证明,该系统是超稳定系统。针对1.1 kW感应电机,采用MATLAB/SIMULINK仿真软件对系统进行仿真,仿真结果表明该方案对电机参数变化的鲁棒性较好,磁链观测精度高。同时,基于磁链状态观测器设计的速度辨识方案收敛速度快,精度高,尤其是在较低转速下仍能保持很高的精度。

关键词:感应电机;矢量控制;自适应系统;转子磁链
中图分类号:TM343　**文献标识码**:A　**文章编号**:1671-5322(2008)04-0042-04

三相异步电机的磁场定向是矢量控制中的关键问题。只有准确地检测或运算出转子磁通矢量的位置和幅值,才能将定子电流矢量变换到沿转子磁场定向的M、T坐标上,从而实现对转子磁通的矢量控制[1]。在矢量控制中,传统的方法是采用纯积分器作为磁链估计器,其唯一需要的电机参数是定子电阻(这是电机参数中最容易获得的参数),而且不需要转速信息,因此获得了广泛的应用。然而,通过积分器实现对电机磁链的准确估算并不容易,定子电阻不准确会导致积累误差,这在低速时表现尤其严重。另外,纯积分器还存在直流偏移和初始值问题[2]。

在实际应用中,速度传感器的使用既增加了成本,又降低了系统的可靠性,因此采用无速度传感器已是未来发展的必然趋势。在磁场定向过程中,由于电机温度变化而影响电阻,由于饱和程度的不同而影响电感,这些都会造成磁场定向上的误差[2]。本文将一种新型的速度自适应转子磁链闭环观测器应用于矢量控制系统中,在电机全阶观测器的基础上分别采用李雅普诺夫理论和波波夫理论推导出了电机转速以及电机定、转子电阻的自适应收敛率,从而构造了速度自适应的转子磁链观测器[3]。该方案的新颖性在于直接将闭环观测器观测的转子磁链应用于矢量控制系统中,同时能够辨识出电机的转速及电机参数。仿真表明系统对电机参数变化具有很好的鲁棒性,在低速范围内运行时效果良好。

1　速度自适应磁链观测器

1.1　异步电机的转子磁链观测器

在静止的坐标系下,若以定子电流和转子磁链为状态变量,那么矩阵形式的异步电机状态方程可以描述如下:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} u_s = Ax + Bu_s \tag{1}$$

$$i_s = Cx \tag{2}$$

式中:$i_s = [i_{sd}\quad i_{sq}]^T$为定子电流;$\psi_r = [\psi_{rd}\quad \psi_{rq}]^T$为转子磁链;$u_s = [u_{sd}\quad u_{sq}]^T$为定子电压。

$$A_{11} = -\left[\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma\tau_r}\right]I = a_{r11}I$$

$$A_{12} = -\frac{1}{\rho}\left[\frac{1}{\tau_r}I - \omega_r J\right] = a_{r12}I - a_{i12}J$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{\tau_r}I = a_{r21}I \qquad A_{22} = \rho A_{12} = a_{r22}I + a_{i22}J$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s}I = b_1 I \qquad \tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^{\ 2}}{L_s L_r} \qquad \rho = -\frac{\sigma L_s L_r}{L_m}$$

收稿日期:2008-10-17
作者简介:李家荣(1970-),女,江苏赣榆人,副教授,硕士,主要研究方向为电机控制。

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \qquad C = [I \quad 0]$$

式中:ω_r 为转子角速度;L_s,L_r 分别为定、转子电感;R_s,R_r 分别为定、转子电阻; L_m 为定、转子间互感。

公式(1)和(2)所描述的电机模型可以认为是四阶线性缓变系统,即假设矩阵 A 中的变量(如 ω_r 和 R_s,R_r 等)是缓慢变化的。

那么,同时观测转子磁链和定子电流的状态观测器,可以采用如下公式:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\hat{x} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u_s + G[i_s - \hat{i}_s] \tag{3}$$

其中,上标"^"表示的是状态估计值,在 $\hat{A}$ 中,ω_r、R_s 和 R_r 分别由 $\hat{\omega}_r$、$\hat{R}_s$ 和 $\hat{R}_r$ 来代替,而其余参数则保持不变。u 是状态观测器的输入,输出是 $\hat{i}_s$,G 是观测器增益矩阵。观测器的最后一项是包含观测输出 $\hat{i}_s$ 与电机真实输出 i_s 的修正项。增益矩阵 G 起到加权矩阵的作用,用于修正观测所得的转子磁链状态变量。当观测器模型使用的矩阵 $\hat{A}$ 与实际系统的矩阵 A 之间存在差异时,必然会导致观测器输出 $\hat{i}_s$ 与实际输出 i_s 之间存在偏差,在此情况下,该附加的修正项将进一步校正这些影响。

式(3)中观测器增益矩阵可以表示为如下矩阵形式

$$G = \begin{bmatrix} g_1 I + g_2 J \\ g_3 I + g_4 J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T \tag{4}$$

其中:$g_1 = (k-1)(\hat{a}_{r11} + \hat{a}_{r22})$

$g_2 = (k-1)\hat{a}_{i22}$

$g_3 = (k^2-1)(\hat{a}_{r21} + L_\sigma \hat{a}_{r11}) - cg_1$

$g_4 = -cg_2$

如果状态观测器的极点位置调整到和电机状态方程极点位置成一定比例(如 k 倍,$k>0$),那么就能使观测器稳定工作[4]。

1.2　转速和定子电阻的自适应辨识

转速 ω_r 是变化量,但是当转速 ω_r 的变化速度远远低于电量的变化速度时可以视作常数。据此根据李亚普诺夫理论推导出转速自适应收敛率,并使系统保持稳定。图1为该速度自适应磁链观测器的系统框图。

考虑到辨识转速与实际转速之间存在的偏差,定子电流、转子磁链的实际值与估算值之间的误差可以通过公式(1)减去(3)计算得到,即:

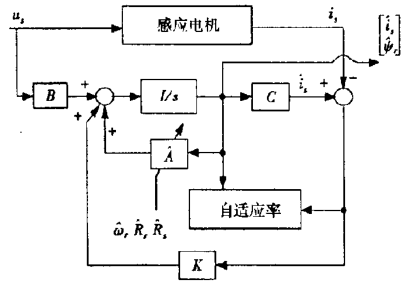

图1　自适应磁链观测器框图

Fig. 1　Block diagram of adaptive flux observer

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}e = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} e_{is} \\ e_{\psi r} \end{bmatrix} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\hat{x} =$$
$$Ax - \hat{A}\hat{x} - GC(\hat{x} - x) =$$
$$Ax - [(A + \Delta A)x - GCe] =$$
$$(A + GC)e - \Delta A\hat{x} \tag{5}$$

上式中,$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\omega_r J/c \\ 0 & \Delta\omega_r J \end{bmatrix}$　(6)

$$e = x - \hat{x}, \quad \Delta\omega_r = \hat{\omega}_r - \omega_r, \quad c = (\sigma L_s L_r)/L_m$$

现在,定义如下的李雅普诺夫函数:

$$V = e^T e + (\hat{\omega}_r - \omega_r)^2/\lambda \tag{7}$$

这里,λ 是正常数。

下面对式(7)求时间的微分运算:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}V = e^T\{(A+GC)]^T + (A+GC)\}e -$$
$$e^T\Delta A\hat{x} - \hat{x}^T e + 2\Delta\omega_r \frac{\mathrm{d}\hat{\omega}_r}{\mathrm{d}t}/\lambda$$

推导可得上式中:

$$e^T\Delta A\hat{x} \doteq \hat{x}^T\Delta A^T e = \Delta\omega_r(e_{isd}\hat{\psi}_{rq} - e_{isq}\hat{\psi}_{rd})/c$$

上式变为:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}V = e^T\{(A+GC)^T + (A+GC)\}e -$$
$$2\Delta\omega_r(e_{isd}\hat{\psi}_{rq} - e_{isq}\hat{\psi}_{rd})/c + 2\Delta\omega_r\frac{\mathrm{d}\hat{\omega}_r}{\mathrm{d}t}/\lambda \tag{8}$$

这里 $e_{isd} = i_{sd} - \hat{i}_{sd}$, $e_{isq} = i_{sq} - \hat{i}_{sq}$

若令公式(8)中的第二项等于第三项,可以得到电机转速的自适应收敛率:

$$\frac{\mathrm{d}\hat{\omega}_r}{\mathrm{d}t} = \lambda(e_{isd}\hat{\psi}_{rq} - e_{isq}\hat{\psi}_{rd})/c \tag{9}$$

上式中:$e_{is} = [e_{isd}, e_{isq}]^T = i_s - \hat{i}_s$。

如果选择合适的观测器增益矩阵 G,使得矩阵$(A+GC)$满足负半定的条件,则按上述的自适应率所构成的自适应观测器将是稳定的。

因此,采用公式(9)作为 $\hat{\omega}_r$ 的自适应率,可以使系统保持稳定。由于电机转速变化很快,为了满足系统动态性能的要求,采用公式(10)所示的比例积分形式的速度自适应率。

$$\hat{\omega}_r = K_p(e_{isd}\hat{\psi}_{rq} - e_{isq}\hat{\psi}_{rd}) + K_I\int(e_{isd}\hat{\psi}_{rq} - e_{isq}\hat{\psi}_{rd}) \quad (10)$$

考虑到辨识电阻与实际电阻之间存在的偏差,那么,转子磁链、定子电流的估算值与实际值之间的误差可以通过公式(1)减去(3)得到,即

$$\frac{d}{dt}e = \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} e_{is} \\ e_{\psi r}\end{bmatrix} = \frac{d}{dt}x - \frac{d}{dt}\hat{x} =$$

$$Ax - \hat{A}\hat{x} - GC(\hat{x} - x) =$$

$$Ax - [(A + \triangle A)x - GCe] =$$

$$(A + GC)e - \triangle A\hat{x} = (A + GC)e - W \quad (11)$$

其中:$e = x - \hat{x} = [e_i \quad e_\psi]^T$

$$e_i = i_s - \hat{i}_s, e_\psi = \psi_r - \hat{\psi}_r \qquad W = \triangle A[\hat{i}_s \quad \hat{\psi}_r]^T$$

$$\triangle A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s}I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\triangle R_s + \begin{bmatrix} \frac{1-\sigma}{\sigma}I & -\frac{1}{L_\sigma}I \\ -L_m I & I \end{bmatrix}\triangle(\frac{1}{\tau_r})$$

$$\triangle R_s = R_s - \hat{R}_s, \triangle(1/\tau_r) = (1/\tau_r) - (1/\hat{\tau}_r)$$

则基于全阶磁链观测器的定、转子电阻的自适应辨识方案见图 2。我们可根据波波夫超稳定理论推导出定、转子电阻的自适应收敛率,见公式(12)、(13)。

$$\hat{R}_s = -(k_{ps} + k_{is}/s)(e_{id}\hat{i}_{sd} + e_{iq}\hat{i}_{sq}) \quad (12)$$

$$(/\hat{\tau}_r) = (k_{pr} + k_{ir}/s)(e_{id}(\hat{\psi}_{rd} - L_m\hat{i}_{sd}) + e_{iq}(\hat{\psi}_{rq} - L_m\hat{i}_{sq})) \quad (13)$$

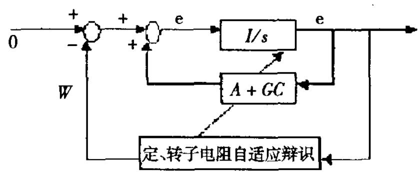

图 2　定、转子电阻的自适应辨识方案框图

Fig. 2　Block diagram of adaptive estimated of stator and rotor resistance

上式中,1/s 为积分项,参数 k_{ps},k_{is}和 k_{ir},分别为定子电阻和转子电阻估计器的比例积分常数。

2　系统实现

图 3 是基于 Matlab/Simulink 的异步电机自适应矢量控制系统框图。与传统的方案的不同之处在于转子磁链通过磁链观测器观测得到并应用于矢量控制中,同时自适应辨识出电机的转速以及电机参数,以使系统具有更好的鲁棒性。仿真系统由三部分组成:逆变器、感应电机和控制电路。图中转子磁链 ψ_r^* 由函数发生器 FG 给出。将转子速度检测值 ω_r 输入 FG,当 ω_r 小于基速时,ψ_r^* 保持恒定,当 ω_r 大于基速时,ψ_r^* 随速度增加反比例地减小。逆变部分采用结构简单、动态响应速度快的电流滞环控制 PWM 逆变器。

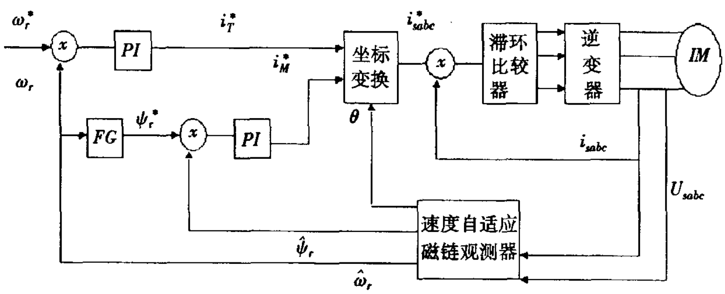

图 3　控制系统框图

Fig. 3　Block diagram of control system

3　仿真结果

图 4 是电机在低速 10 rad/s 稳态运行时的积分器计算的转子磁链、真实转子磁链和观测器观

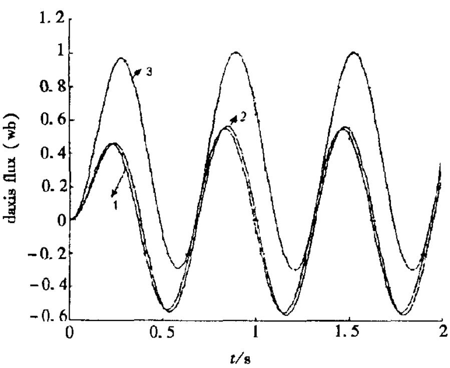

图 4　10rad/s 运行时的转子磁链的对比

Fig. 4　Behavior of flux at 10r/min

曲线 1:真实的转子磁链;曲线 2:观测器的观测值;曲线 3:积分器的计算值;($\hat{i}_s = 1.3\ R_s$)

测的转子磁链的对比仿真曲线。仿真时实际定子电阻为积分器与状态观测器中设定的定子电阻的 1.3 倍。仿真结果表明,上述磁链观测器对转子磁链的观测准确度高,对电机参数的鲁棒性好,特别是受定、转子电阻偏差的影响较小,有效地克服了积分器的固有缺陷。图 5 是采用速度自适应磁链观测器的矢量控制系统在起动过程中自适应辨识转速与真实转速的对比仿真曲线,从图中可看出,辨识转速能够快速而准确地收敛至真实转速。图 6 是将电机的定子电阻初始值设定为实际值的 1.2 倍时定子电阻的自适应收敛过程,

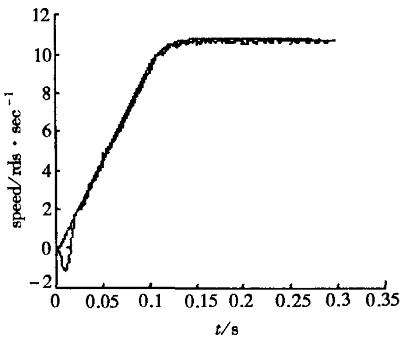

图 5　起动过程中的辨识转速与真实转速

Fig. 5　Estimated speed and real speed in start – up process

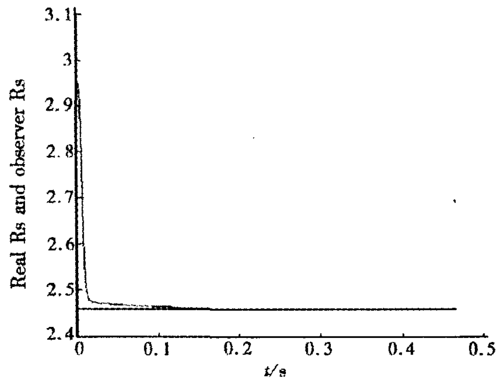

图 6　定子电阻的自适应收敛过程

Fig. 6　Aadaptive process of stator resistance

从仿真结果可以看出,经过 0.15 s 后可以收敛至真实值。

4　结论

本文将速度自适应磁链闭环观测器应用于矢量控制系统中,取代了传统的纯积分器,并利用波波夫超稳定理论对本系统进行了稳定性论证。仿真表明,该磁链观测器对转子磁链的观测精度高,对于电机参数的鲁棒性好。同时基于磁链观测器设计的速度观测器收敛速度快,准确度高,性能优良,尤其是在较低转速下仍能保持很高的精度。

参考文献:

[1] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

[2] 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[3] Hisao Kubota, Matsuse K. New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives[A]. in Conf. Rec. IEEE IECON90:921 –926.

[4] Mario Marchesoni, Segarichi Paolo. A Simple Approach to Flux and Speed Observation in induction Motor Drives[J]. IEEE trans. on Industry Application. , 1997,44(4):777 –784.

Study on Adaptive Vector Control System of Induction Motors Based on Matlab/Simulink

LI Jia-rong

(School of Electric Engineering of Yancheng Institute of Technology,Jiangsu Yancheng　224003,China)

Abstract: A speed adaptive flux observer of an induction motor will be proposed to replace the classical pure integrator in the vector control system. The resulting system is verified to be hyperstable. This approach has been implemented in a 1. 1kw drive with MATLAB/SIMULINK. Simulation show that the adaptive observer gives very satisfied estimation result of rotor flux and the rotor speed, especially near zero speed,and offers greatly yobustness to parameter variation.

Keywords:induction machine; vector control; adaptive system; rotor flux　　(责任编校:沈建新; 校对:张英健)