

异步电机直接力矩控制中定子磁链自适应观测器的研究

邓智泉 严仰光

(南京航空航天大学 303 教研室, 南京, 210016)

RESEARCH ON THE ADAPTIVE STATOR FLUX OBSERVER OF DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) FOR INDUCTION MOTOR

Deng Zhiquan, Yan Yangguang

(Faculty 303, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

摘要 为了提高直接力矩控制系统中定子磁链的观测精度, 提出了一种新的定子磁链自适应观测器。该观测器在观测定子磁链的同时也辨识了随温度变化的定、转子电阻。该观测器的稳定性利用波波夫理论进行了严格的证明, 其鲁棒性和观测效果也通过数字仿真得到充分的证实。

关键词 直接力矩控制 异步电机 定子磁链自适应观测器 参数辨识

中图分类号 TM 343.3, V 242.4

Abstract In order to improve the observing precision of the stator flux observer of DTC systems, a new adaptive stator flux observer is proposed. With this flux observer, the stator resistance and rotor resistance, which vary with motor temperature, are identified simultaneously. The stability of the proposed adaptive stator flux observer is proved to be hyperstable by Popov Criterion; the robustness to parameter variations and good performance are fully verified by the simulations.

Key words DTC, induction motor, adaptive stator flux observer, parameter identification

近 10 多年来, 异步电机的直接力矩控制技术由于其控制方案新颖, 控制结构简单, 良好的调速性能等原因而获得广泛的重视^[1]。直接力矩控制的一个显著特点是定子磁场定向, 一般采用电压模型来估计定子磁链。电压模型中只受定子电阻这一电机参数影响, 它在高速领域能够非常准确地估计定子磁链; 而在低速时, 定子电阻压降项的作用非常突出, 当定子电阻随温度变化时, 会使磁链模型观测精度下降以致可能使系统根本不能有效工作。

目前在低速时一般采用电流模型来观测定子磁链, 电流模型虽然稳定性比电压模型好些, 而且不受定子电阻变化的影响, 但仍然存在着因转子参数误差和转速测量误差引起的磁链观测误差。

为了有效解决上述问题, 提出了一个定子磁链自适应观测器, 该观测器能有效地辨识对磁链估计带来直接影响的 2 个参数: 定子电阻和转子电阻, 从而真正有效地估计定子磁链, 数字仿真也证明该观测器具有良好的自适应性和观测效果。

1 定子磁链观测器

在静止两相 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的异步电动机的数学模型可以用如下的状态方程来描述

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

式中: $x = [i_s, \varphi_r]^T$; $i_s = [i_{sa}, i_{sb}]^T$;

$$\varphi_r = [\varphi_{ra}, \varphi_{rb}]^T; u_s = [u_a, u_b]^T;$$

$$A_{11} = - \left\{ \begin{matrix} R_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \tau_r \\ \frac{1}{\sigma} \tau_r \end{matrix} \right\} I = a_{r11} I;$$

$$A_{12} = \frac{1}{L\sigma} \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{\tau_r} I - \omega J \\ \omega J \end{matrix} \right\} = a_{r12} I + a_{112} J;$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{\tau_r} I = a_{r21} I;$$

$$A_{22} = - \frac{1}{\tau_r} I + \omega J = a_{r22} I + a_{122} J;$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma} I = b_1 I; C = [I \ 0];$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r};$$

$$\tau_r = L_r / R_r; \mu = n_p^2 L_m / (J L_r); L\sigma = \sigma L_s L_r / L_m;$$

ω 为电机转子旋转电气角速度; $\varphi_{ra}, \varphi_{rb}$ 为静止坐标系下电机转子两相磁链; i_{sa}, i_{sb} 为定子两相电流

值; u_a, u_b 为定子两相电压值; R_s, R_r 为定、转子绕组电阻; L_s, L_r 为定、转子绕组自感; L_m 为定、转子绕组间互感; T_L 为负载力矩; J 为电机转动惯量; n_p 为电机极对数; D 为摩擦及风阻阻力矩系数。

则定子磁链观测器可由下面两式给出,

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = A \hat{x} + B i u_s + G (\hat{i}_s - i_s) \quad (2)$$

$$\hat{\varphi}_s = \frac{L_m}{L_r} (\hat{\varphi}_r + L \sigma i_s) \quad (3)$$

式中: 上标“ $\hat{}$ ”表示的是状态观测值; 在 A 中, R_s 和 $(1/T_r)$ 分别由 \hat{R}_s 和 $(1/\hat{T}_r)$ 来代替, 而其余参数则保持不变; G 为使观测器稳定工作的调整矩阵, 在本文中, G 由下式给出^[2]

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

其中: $g_1 = (k-1)(\hat{a}_{r11} + \hat{a}_{r22})$; $g_2 = (k-1)\hat{a}_{r22}$; $g_3 = (k^2-1)(\hat{a}_{r21} + L \sigma \hat{a}_{r11}) - L \sigma g_1$; $g_4 = -L \sigma g_2$, ($k > 0$)。

按照模型参考自适应理论, 可把式(1)作为参考模型, 把式(2)作为需调整的模型, 利用状态误差来导出 \hat{R}_s 和 $(1/\hat{T}_r)$ 的自适应律。如果 \hat{R}_s 和 $(1/\hat{T}_r)$ 分别能收敛到其相应的实际值, 则状态观测器的估计值 \hat{x} 也将收敛到状态的真实值 x_0 。

2 定子电阻和转子电阻的辨识

定子广义误差

$$e = x - \hat{x} = [e_i \quad e_{\varphi}]^T \quad (5)$$

式中: $e_i = i_s - \hat{i}_s$; $e_{\varphi} = \varphi_r - \hat{\varphi}_r$

根据式(1)和式(2)可得

$$\dot{e} = (A + GC)e - \Delta A x = (A + GC)e - W \quad (6)$$

式中: $W = \Delta A [i_s \quad \hat{\varphi}_r]^T$;

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta R_s + \begin{bmatrix} \frac{1-\sigma}{\sigma} I & -\frac{1}{L \sigma} I \\ -L_m I & I \end{bmatrix} \Delta \left(\frac{1}{T_r} \right);$$

$$\Delta R_s = R_s - \hat{R}_s; \quad \Delta (1/T_r) = (1/T_r) - (1/\hat{T}_r)。$$

根据波波夫超稳定理论^[3], 如果前向传递通道是严格正实的, 且非线性反馈通道的输入输出满足波波夫判据

$$\int_0^t e^T W dt = \gamma^2, \quad \gamma \text{ 为常数} \quad (7)$$

则系统是超稳定的。

可以证明前向通道传递矩阵 $[sI - (A + GC)]^{-1}$ 是严格正实的, 而

$$\int_0^t e^T W dt = \int_0^t e^T \Delta A x dt = \left[\frac{\Delta R_s}{\sigma} (e_{ia} \hat{i}_{sa} + e_{ib} \hat{i}_{sb}) + \Delta \left(\frac{1}{T_r} \right) \frac{1}{L \sigma} (e_{ia} (-\hat{\varphi}_{ra} + L_m \hat{i}_{sa}) + e_{ib} (-\hat{\varphi}_{rb} + L_m \hat{i}_{sb})) + \Delta \left(\frac{1}{T_r} \right) (e_{\varphi} (\hat{\varphi}_{ra} - L_m \hat{i}_{sa}) + e_{\varphi} (\hat{\varphi}_{rb} - L_m \hat{i}_{sb})) \right] dt$$

一般情况下, $|e_{\varphi}| L_m |e_i|$, 则上式中, e_{φ} 可由 $L_m e_i$ 来替换, 整理得

$$\int_0^t e^T W dt = \left[\frac{\Delta R_s}{\sigma} (e_{ia} \hat{i}_{sa} + e_{ib} \hat{i}_{sb}) - \Delta \left(\frac{1}{T_r} \right) \left(L_m - \frac{1}{L \sigma} \right) (e_{ia} (-\hat{\varphi}_{ra} + L_m \hat{i}_{sa}) + e_{ib} (-\hat{\varphi}_{rb} + L_m \hat{i}_{sb})) \right] dt \quad (8)$$

在一般异步电机中 $(L_m - (1/L \sigma))$ 这项均小于零。

如果分别选择式(9)和式(10)作为定、转子电阻的自适应律, 可证明式(8)是满足波波夫不等式(7)的。

$$\hat{R}_s = - (k_{ps} + k_{is}/s) (e_{ia} \hat{i}_{sa} + e_{ib} \hat{i}_{sb}) \quad (9)$$

$$(1/\hat{T}_r) = (k_{pr} + k_{ir}/s) (e_{ia} (\hat{\varphi}_{ra} - L_m \hat{i}_{sa}) + e_{ib} (\hat{\varphi}_{rb} - L_m \hat{i}_{sb})) \quad (10)$$

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

利用式(9)和式(10), 不仅可以有效地辨识定子电阻和转子电阻, 结合观测器调整矩阵 G , 还可以控制它们的收敛速度。

根据超稳定理论, 一旦 \hat{R}_s 和 $(1/\hat{T}_r)$ 分别收敛到其相应的实际值, 则状态观测器的观测值也将收敛到状态的真实值 x_0 。由式(3)可知, $\hat{\varphi}_r$ 也将同时收敛于 φ_r 。

3 数字仿真

用于仿真的电机参数为: $R_s = 6.1 \Omega, R_r = 5.6 \Omega, L_s = 573 \text{mH}, L_r = 580 \text{mH}, L_m = 550 \text{mH}, J = 0.0021 \text{kg} \cdot \text{m}^2, n_p = 2, D = 0, n_N = 1400 \text{r/min}, P_N = 1.1 \text{kW}$ 。

图 1 为电机定、转子电阻在 0.2s 内(0.2s~0.4s)增加到标准值的 1.5 倍, 采用定子磁链自适应观测器时, 定、转子电阻的自适应辨识过程 ($\omega = 900 \text{r/min}, T_L = 8 \text{N} \cdot \text{m}$)。

(注: 在实际中, 定子电阻在如此短的时间内幅度变化如此之大是不可能的, 这样处理仅仅是为了减少仿真用时)

图 2 为电机定、转子电阻变化时(同上), 采用定子磁链自适应观测器时, 系统的低速输出特性

($\omega = 50 \text{ r/min}$, $T_L = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$)。

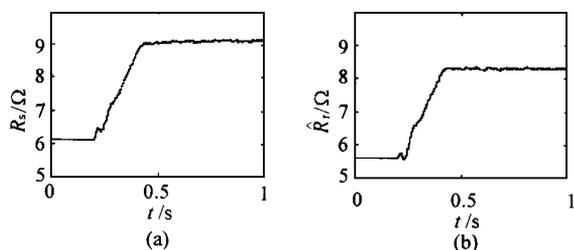


图1 定、转子电阻的自适应辨识过程

(a) 定子电阻的自适应辨识; (b) 转子电阻的自适应辨识

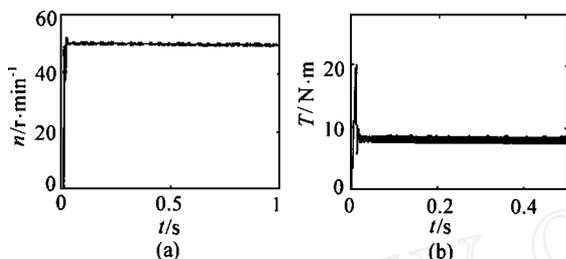


图2 采用参数自适应辨识方案系统的低速运行特性

(a) 转速跟踪特性; (b) 电磁力矩响应特性

从上述仿真结果可以看出:

(1) 采用定子电阻的自适应辨识方案时, 定、转子电阻均能收敛到真实值, 辨识误差小于 1.5%。

(2) 系统的低速性能较高, 转速的稳态精度小

于 1.5%, 电磁力矩的脉动量适中(小于 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$), 这是由于低速时定子磁链的观测精度较高的原因。

参 考 文 献

- 1 李夙. 异步电动机直接转矩控制. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1~4
- 2 Kubota H, Matsuse K, Nakane T. New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives. In: Robert Begun. 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. California: Anthony Pietrzykowski, 1990. 921~926
- 3 Landan ID 著. 自适应控制—模型参考方法. 吴百凡译. 北京: 国防工业出版社, 1985. 52~61

邓智泉 男, 1969 年出生。1990 年在西安冶金建筑学院获工学学士学位, 1993 年和 1996 年在东北大学分别获工学硕士学位和工学博士学位, 1996.4~1998.4 在南京航空航天大学航空与宇航技术博士后流动站工作, 现在南京航空航天大学从事科研与教学工作, 副教授。研究领域: 电机控制、高速电机、机电一体化等。联系电话: (025)-4892313

严仰光 男, 1935 年出生, 南京航空航天大学教授, 博士生导师。主要从事航空电源和电力电子变换技术方面教学和科研工作。联系电话: (025)-4892361

联系电话: (025)-4892313

新书简介

《结构稳定性设计手册》出版、征订

本手册由中国航空研究院崔德刚主编, 集我国航空领域 30 多年来在理论与实验研究以及工程设计实践的基础上, 提供了多种类型薄壁结构屈曲、后屈曲直至破坏的结构稳定性分析和设计方法, 是我国第 1 本实用的结构稳定性手册。全书内容配套, 数值与曲线准确可靠, 可供航空、空间、机械、造船、车辆以及其他工程结构和强度分析工程技术人员使用, 也可供科研院所使用和高等院校师生参考。全书分为 12 章, 约 50 万字, 已由航空工业出版社出版, 进口 80 克胶版纸印刷, 精装, 每册 70 元。欲购单位或个人请来函与本刊发行组联系。

(李铁柏)