

感应电动机调速系统的自适应逆控制

杨立永¹, 李正熙¹, 李华德², 王久和³

(1. 北方工业大学, 北京 100041; 2. 北京科技大学, 北京 100083; 3. 北京信息工程学院, 北京 100101)

摘要: 针对电压源型逆变器供电的感应电动机调速系统, 提出了一种自适应逆控制方法, 实现了电磁转矩和定子磁链的解耦控制. 应用得到的逆系统将多变量、非线性、强耦合的感应电动机调速系统解耦为电磁转矩和定子磁链两个一阶线性子系统, 从而简化了各个闭环线性调节器的设计难度. 为了提高系统的鲁棒性, 利用递推最小二乘法实时辨识电动机参数, 降低了参数变化对系统性能的影响. 使用MATLAB软件进行了仿真实验, 实验结果验证了理论分析的正确性和控制方案的可行性.

关键词: 感应电动机; 非线性控制; 逆系统; 解耦控制; 自适应逆控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive inverse control of induction motor drive system

YANG Li-yong¹, LI Zheng-xi¹, LI Hua-de², WANG Jiu-he³

(1. North China University of Technology, Beijing 100041, China;

2. University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

3. Beijing Information Technology Institute, Beijing 100101, China)

Abstract: The adaptive inverse control strategies is presented for pulsewidth modulation (PWM) inverter-fed induction motor drive system. The proposed control strategies are then applied to obtain high performance decoupled stator flux and torque control. Cascading the inverse system with the drive system, the multivariable, nonlinear and strongly coupled system is decoupled into two independent first-order linear subsystems, or torque subsystem and stator flux subsystem, so as to be easy to design the closed-loop linear regulators. In order to enhance the robustness of the drive system, a recursive least-squares method is also used for the identification of the induction motor parameters. Finally, the control system is verified with MATLAB simulations, and the results are presented to show the validity of the adaptive inverse control strategies.

Key words: induction motor; nonlinear control; inverse system; decoupling control; adaptive inverse control

1 引言(Introduction)

近年来, 感应电动机已经被广泛地应用到了各种高性能调速领域. 为了提高调速系统的性能, 在许多应用场合, 希望对电磁转矩和磁链进行动态解耦控制^[1].

在调速系统的运行过程中, 除了要对转速进行控制以外, 还要对磁链模值进行控制. 如果选择控制转子磁链模值, 必修解决转子磁链的估计问题, 而转子磁链估计器和众多的电机参数有关, 尤其是转子电阻在电机运行中会发生较大变化, 使准确观测转子磁链非常困难^[2]. 和转子磁链相比, 实现定子磁链的准确观测是比较简单的, 目前关于定子磁链的观测方法已经取得了很大的进展^[3~5], 所以本文把定子磁链模值平方作为调速系统的一个输出, 对其进行控制.

逆系统控制方法^[6]是一种直接反馈线性化方法, 具有直观、简便和易于理解的特点, 为了提高逆控制系统的鲁棒性, 本文利用递推最小二乘法对控制器的参数进行实时修正, 从而在逆系统的基础上构成了自适应逆控制策略. 本文针对电压源型逆变器供电的感应电动机调速系统, 利用自适应逆控制方法, 提出了一种新型的解耦控制方案, 实现了定子磁链和电磁转矩的动态解耦控制, 仿真试验验证了这种方案的可行性.

2 逆系统控制原理 (Principle of the inverse system control)

对于一个给定的非线性系统 Σ , 其输入向量用 $\mathbf{u}(t)$ 表示, 输出向量用 $\mathbf{y}(t)$ 表示, 状态变量用 $\mathbf{x}(t)$ 表示, 初始条件为 $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$, 则 $\mathbf{y}(t)$ 被初始条件和输入完全决定, 其因果映射关系可以用算

子 θ 描述为

$$\mathbf{y}(t) = \theta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}(t)). \quad (1)$$

简记为

$$\mathbf{y} = \theta \mathbf{u}. \quad (2)$$

假设 Σ 的状态方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad (3)$$

输出方程

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, \quad \mathbf{y} \in \mathbb{R}^r. \quad (4)$$

若存在另一个输入向量为 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^r$, 输出向量为 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^m$ 的系统 Π_α , 并且 Π_α 和 Σ 具有相同的初始状态, 用算子 θ_α 描述 Π_α 的因果映射关系

$$\mathbf{v} = \theta_\alpha \mathbf{w}. \quad (5)$$

当 Π_α 的输入向量为 $\mathbf{w} = \mathbf{y}^{(\alpha)}$ 时, 如果

$$\theta \theta_\alpha \mathbf{w} = \theta \theta_\alpha \mathbf{y}^{(\alpha)} = \theta \theta_\alpha \mathbf{v}^{(\alpha)} = \mathbf{y}, \quad (6)$$

则称 Π_α 为 Σ 的 α -阶积分逆系统, 简称逆系统^[6], 其中 $\mathbf{y}^{(\alpha)} = [y_1^{(\alpha)}, y_2^{(\alpha)}, \dots, y_r^{(\alpha)}]$, 把逆系统串联在原系统的输入端构成的新系统称为伪线性系统, 简记为 $\theta \theta_\alpha$. 根据式(6), 从输入输出关系上看, 伪线性系统等价于 r 个线性子系统^[6].

从式(6)可以看出, 伪线性系统的输入、输出变量之间具有线性关系, 同时实现了输入、输出之间的动态解耦, 所以伪线性系统相当于如下 r 个线性子系统.

$$\begin{aligned} \text{子系统 } 1: \quad & y_1^{(\alpha)} = w_1, \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$\text{子系统 } r: \quad y_r^{(\alpha)} = w_r,$$

定理 1^[7] 如果系统 Σ 在点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 的某一邻域内的相对阶为 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$, 且 $\sum_{i=1}^r \alpha_i \leq n$, 则系统 Σ 在点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 处具有可逆性.

3 感应电动机调速系统的自适应逆控制方法 (Adaptive inverse method of induction motor drive system)

在两相定子坐标系中, 定义感应电动机调速系统的状态变量 $\mathbf{x}$ 、输入变量 $\mathbf{u}$ 、输出向量 $\mathbf{y}$ 分别为

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \omega]^T,$$

$$\mathbf{u} = [u_{s\alpha}, u_{s\beta}]^T,$$

$$\mathbf{y} = [T_{ei}, |\Psi_s|^2]^T = [T_{ei}, \psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2]^T.$$

根据以上定义, 感应电动机调速系统的状态方程和输出方程如下^[3]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) =$$

$$\begin{cases} -\gamma x_1 + x_5 x_2 + \alpha \beta x_3 + \beta x_5 x_4 + \beta u_1, \\ x_5 x_1 - \gamma x_2 - \beta x_5 x_3 + \alpha \beta x_4 + \beta u_2, \\ -R_s x_1 + u_1, \\ -R_s x_2 + u_2, \\ \mu(x_3 x_2 - x_4 x_1) - \frac{n_p}{J} T_L, \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mu(x_3 x_2 - x_4 x_1), \\ x_3^2 + x_4^2. \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$\alpha = R_r / L_r, \quad \beta = 1 / (\sigma L_s),$$

$$\gamma = R_s / (\sigma L_s) + R_r / L_r,$$

$$\mu = 3n_p^2 / 2J,$$

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r).$$

L_s, L_r, L_m 分别是定子电感, 转子电感和互感, n_p 是电机的极对数, J 是转动惯量, σ 是漏感系数, T_L 是负载转矩, ω 是转子的电角速度.

利用相对阶的定义^[7], 由式(7)和式(8)可以计算出当 $\beta(x_3^2 + x_4^2) - x_1 x_3 - x_2 x_4 \neq 0$ 时, 系统的相对阶为 $\{\alpha_1, \alpha_2\} = \{1, 1\}$, 且 $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 2 < 5$, 根据定理1可知调速系统满足可逆性条件. 利用隐函数定理可以证明, 当 $\beta(x_3^2 + x_4^2) - x_1 x_3 - x_2 x_4 \neq 0$ 时方程组

$$\begin{cases} L_f^1 h_1(\mathbf{x}) = \dot{y}_1, \\ L_f^1 h_2(\mathbf{x}) = \dot{y}_2 \end{cases} \quad (9)$$

有唯一解为

$$\mathbf{u} = A^{-1} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & -\mu C \\ \dot{y}_2 & -D \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \mu(x_2 - \beta x_4) & \mu(\beta x_3 - x_1) \\ 2x_3 & 2x_4 \end{bmatrix},$$

$$C = \gamma x_4 x_1 - x_4 x_5 x_2 - \beta x_4^2 x_5 + x_3 x_5 x_1 - \gamma x_3 x_2 - \beta x_3^2 x_5 - R_s x_2 x_1 + R_s x_1 x_2,$$

$$D = -2R_s x_1 x_3 - 2R_s x_2 x_4.$$

用 $\mathbf{w} = [w_1, w_2]^T$, $\mathbf{v} = [v_1, v_2]^T$ 分别表示逆系统的输入和输出变量, 把式(10)中的 $u_1, u_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2$ 分别用 v_1, v_2, w_1, w_2 代替, 得逆系统的输入输出方程为

$$\mathbf{v} = A^{-1} \begin{bmatrix} w_1 & -C \\ w_2 & -D \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将逆系统串联在调速系统之前就得到了伪线性系统, 其输入输出关系相当于两个独立的线性子系统, 分别称为转矩子系统和磁链子系统。

在电机运行过程中, 电机参数是不断变化的, 为了降低参数变化对调速性能的影响, 需要对电机参数进行实时估计, 然后利用估计结果对控制器的参数进行更新。为此, 定义 δ 算子为

$$\delta x(t) = \frac{[x(t+h) - x(t)]}{h}.$$

根据式(7), 可以得到如下的线性回归模型^[8]

$$y(t) = \mathbf{h}^T(t)\boldsymbol{\theta}. \quad (12)$$

其中:

$$y = \delta^2 i_{s\alpha} + \omega \delta i_{s\beta},$$

$$\mathbf{h}^T(t) = [-\delta i_{s\alpha} \quad -i_{s\alpha} \quad -\omega i_{s\beta} \quad u_{s\alpha} \quad \omega u_{s\beta} + \delta u_{s\alpha}],$$

$$\boldsymbol{\theta}^T = [\gamma \quad R_s \alpha \beta \quad \beta R_s \quad \alpha \beta \quad \beta].$$

利用得到的线性回归模型(12), 可以使用递推最小二乘法(RLSM)对参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 进行估计, 具体的算法见参考文献[8]。

4 控制器的设计 (Controller designing)

图1为感应电动机调速系统自适应逆控制方法的系统框图, 图中ASR、A Ψ R和ATR分别为转速调节器、磁链调节器和转矩调节器, 根据伪线性系统的性质可知, 这3个调节器都可以利用线性系统理论进行设计。ATR和A Ψ R的输出分别为 w_1 和 w_2 , 作为逆系统的输入信号。在图1中, 逆系统单元的作用是根据式(11)计算出逆系统的两个输出 v_1 , v_2 , 然后, 经过2/3变换后作为逆变器的电压给定信号。

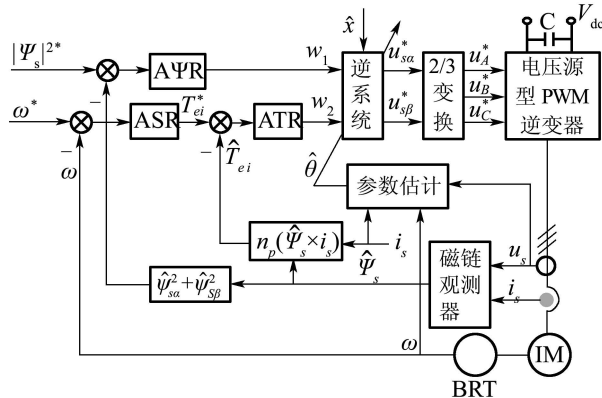


图1 感应电动机调速系统的自适应逆控制方法系统框图

Fig. 1 Diagram for adaptive inverse control of induction motor drive system

系统框图中的参数估计单元的作用是, 利用RLSM对参数进行实时估计, 得到的参数估计值用来实时更新逆系统中的电机参数。因为转矩和定子磁链不能准确地进行直接测量, 为了解决转矩和

磁链的闭环控制问题, 在控制方案中, 利用转矩和定子磁链估计器对实际值进行估计^[5]。

由于转矩的响应速度远远大于转速的响应速度, 所以在设计ASR时, 可以认为转矩环节的传递函数为1。为了限制最大转矩, ASR采用了带限幅的PI调节器, 其限幅值为 $\pm 40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

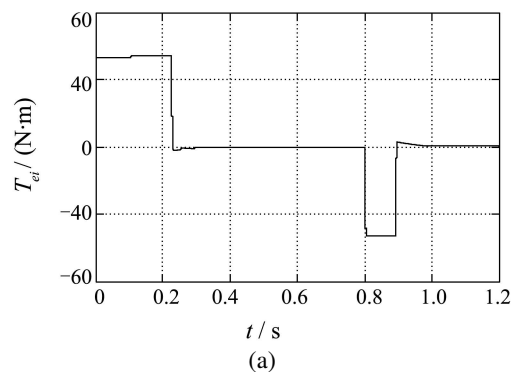
5 仿真实验 (Simulation)

为了验证上述控制方案的可行性, 按照图1所示的控制结构进行了仿真实验, 电机的参数如下:

$$n_p = 2, L_s = 0.435 \Omega, R_r = 0.8 \Omega, L_s = 0.0733 \text{ H}, \\ L_r = 0.0713 \text{ H}, L_m = 0.0693 \text{ H}, J = 0.089 \text{ kg}\cdot\text{m}^2.$$

仿真开始时, $\omega^* = 100 \text{ (rad}\cdot\text{s}^{-1})$, 调速系统的动态特性如图2所示, 图2(a)(b)(c) 分别为 T_{ei} , $|\Psi_s|^2$ 和 ω 的变化曲线。电动机起动后, T_{ei} 迅速达到设定的限幅值($\pm 40 \text{ N}\cdot\text{m}$), 0.23 s时 T_{ei} 退出饱和, 在控制器的作用下, T_{ei} 发生迅速改变, 此时从图2(b)中可以看出, 转矩的变化没有对定子磁链的模值产生影响, 0.29 s时 ω 达到给定值; 0.5 s时 $|\Psi_s|^2$ 从 0.2 Wb^2 变为 0.215 Wb^2 , 在A Ψ R的作用下, $|\Psi_s|^2$ 迅速的达到给定值, 同时图2(a)中可以看出, 磁链的变化并没有对转矩产生影响。0.8 s时 ω^* 变为 $60 \text{ (rad}\cdot\text{s}^{-1})$, 1.0 s时调速系统达到新的稳定转速。以上仿真结果表明, 转矩子系统、磁链子系统都具有快速的动态响应特性, 并且实现了转矩和定子磁链的动态解耦控制, 同时整个调速系统具有优良的转速响应特性, 见图2(c)。

图3中的仿真结果表明了自适应逆控制方法的鲁棒性。系统重新启动后, 在0.4 s时达到稳态, 0.5 s时改变电机参数, R_s 和 R_r 分别增加到原来的两倍, L_m 减小到原来的70%。由于参数的变化, 转矩产生波动, 此时开始对电机参数进行辨识, 0.6 s时辨识算法收敛, 辨识结果的最大相对误差为2%, 然后, 利用得到的参数估计值对控制器进行更新, 0.02 s后转矩重新收敛于给定值, 仿真结果表明了自适应逆控制方法具有很强的鲁棒性。



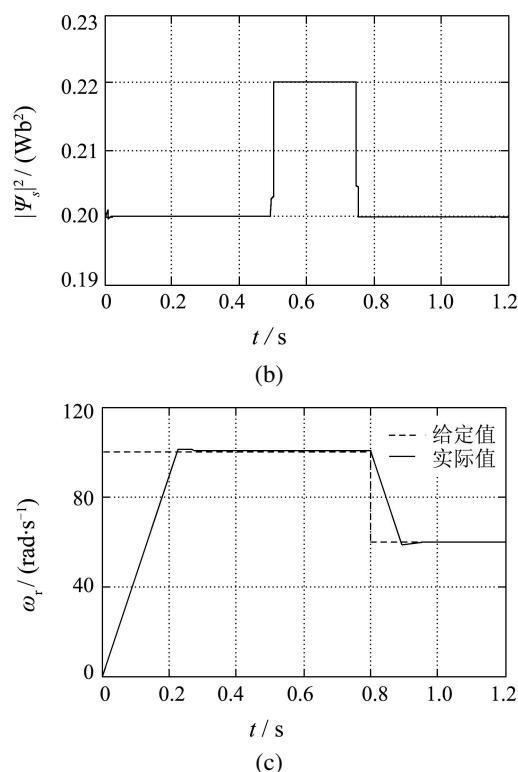


图2 自适应逆控制方法的动态性能

Fig. 2 Dynamic performance of adaptive inverse control

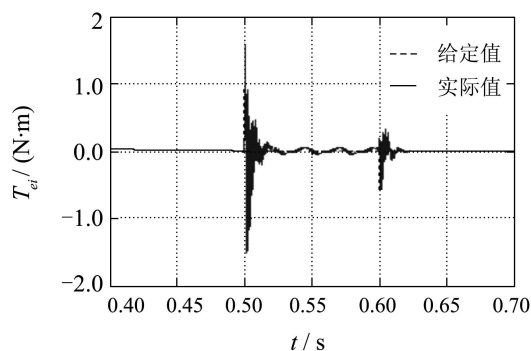


图3 自适应逆控制方法的鲁棒性

Fig. 3 Robust performance of adaptive inverse control

6 结论 (Conclusion)

针对感应电动机调速系统, 基于逆系统理论提出了一种新型的解耦控制方法. 证明了调速系统的可逆性, 在此基础上得到了逆模型, 利用逆模型将调速系统解耦为转矩线性子系统和磁链线性子系统, 其优点是可以利用线性控制理论完成各个调节器的设计. 当参数变化时, 使用RLSM对电机参数进行辨识, 实时修正逆模型中的电机参数, 提高了调速系统的鲁棒性.

理论分析和仿真结果表明, 这种新型控制策略具有以下特点: 1) 不需要复杂的旋转坐标变换, 计算量小; 2) 实现了转矩和定子磁链的动态解耦控制; 3) 调速系统结构简单, 能够利用线性控制理论对各个调节器进行设计; 4) 具有快速的动态响应特性; 5) 对参数变化具有很强的鲁棒性.

参考文献 (References):

- [1] 李华德, 白晶, 李志民, 等. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
(LI Huade, BAI Jing, LI Zhiming, et al. *AC Drives Control System*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.)
- [2] DWARD Y Y, PARESH C S. Decoupling control of induction Motor Drives[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1988, 35(2): 253 – 252.
- [3] 宋文超, 林飞, 张春朋. 基于定子磁链模型的异步电动机反馈线性化控制[J]. 电工技术学报. 2003, 18(4): 85 – 88.
(SONG Wenchao, LIN Fei, ZHANG Chunpeng. Direct feedback linearization control of induction motors based on stator flux model[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(4): 85 – 88.)
- [4] JULIUS L, MARKKU N, JUHA P. Estimation of the flux linkage in a Direct-Torque-Controlled drive[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronic*, 2003, 50(2): 283 – 287.
- [5] MAURIZIO C, MARCELLO P, GIAN SOLVO C, et al. A new adaptive integration methodology for estimation flux in induction machine drive[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2004, 19(1): 25 – 33.
- [6] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
(LI Chunwen, FENG Yuankun. *Inverse Control for the Multi-variable Nonlinear System*[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1990.)
- [7] 张兴华, 戴先中. 基于逆系统方法的感应电动机调速控制系统[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 708 – 711.
(ZHANG Xinghua, DAI Xianzhong. Speed control system of induction motor based on inverse system method[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(6): 708 – 711.)
- [8] RIBEIRO L A, JACOBINA C B, LIMA A M. Real-time estimation of the electric parameters of an induction machine using sinusoidal PWM voltage waveforms[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2002, 36(3): 743 – 754.

作者简介:

杨立永 (1974—), 男, 博士, 主要研究方向为交流电机调速理论, E-mail:mailyangliyong@tom.com;

李正熙 (1955—), 男, 教授, 主要研究方向为工业自动化系统与控制工程, 电气传动技术;

李华德 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气传动、电力电子;

王久和 (1963—), 男, 教授, 主要研究方向为电力电子、控制理论.