

负载转矩和转子电阻未知任意情形下 感应电机转矩无源性跟踪控制

马良河

(上海建桥学院 机电学院, 上海 201315)

摘要: 应用无源性控制方法研究了在负载转矩和转子电阻为未知时变情形下感应电机期望转矩的跟踪控制问题。基于感应电机的 Euler-Lagrange (E-L) 模型, 通过设计控制器、期望轨道、期望转矩、转子电阻估计器、负载转矩估计器、转子状态观测器, 在理论上证明了可以实现对任意时变期望转矩的渐近跟踪, 以及对负载转矩和转子电阻的快速估计。基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果, 证明了理论结果的正确性、有效性和高性能。

关键词: 感应电机; 无源性控制; 期望转矩; 负载转矩; 转子电阻

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)01-0036-05

doi: 10.12177/emca.2019.127

Torque Tracking Control of Induction Motor Based on Passivity Principle in Case of Arbitrary Unknown Load Torque and Rotor Resistance

MA Lianghe

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201315, China)

Abstract: The expected torque tracking control problem of induction motor based on passivity principle is analyzed in case of arbitrary unknown time varying load torque and rotor resistance. The mathematical model of induction motor in Euler-Lagrange (E-L) equation is built. The controller, the expected orbit, the expected torque, the rotor resistance estimator, the load torque estimator and the rotor state observer are designed. Through these processes, it is theoretically proved that the expected torque and speed can be tracked asymptotically and the load torque and rotor resistance can be estimated rapidly. The MATLAB/Simulink simulation results also show the correctness, validity and excellent performance of the proposed method.

Key words: induction motor; passivity-based control; expected torque; load torque; rotor resistance

0 引言

感应电机应用广泛, 具有较好的自然特性。但是, 感应电机的数学模型具有多变量、非线性、系统参数时变、转子状态不可测量等特点, 因此难以实现高性能控制。随着电力电子技术、计算机技术、现代控制理论的发展和应用, 这些问题逐渐得以解决。目前, 研究表明, 无源性控制具有许多优良的控制性能。基于能量的观点, 无源性控制是一种全

局定义而且全局稳定的非线性控制方法, 无奇异点, 对未知参数和未建模动态具有较强的鲁棒性。文献[1-2]给出了无源性控制的一般方法和应用。文献[3-6]研究了感应电机的无源性控制。但是这些研究大多假设负载转矩是已知的常数或形式已知的时变函数, 并且转子电阻是已知或未知的常数。文献[4]将负载转矩的假设推广到形式已知且是一个依赖于状态的函数。文献[5-6]研究了转子电阻的自适应估计, 但是应用的不是无源性控制

收稿日期: 2019-08-01; 收到修改稿日期: 2019-11-12

作者简介: 马良河(1963—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机与电气控制。

方法。本文在假设负载转矩和转子电阻是时变未知的情况下,基于感应电机的 Euler-Lagrange (E-L) 方程,应用无源性控制方法,通过设计期望轨道、转子电阻估计器、负载转矩估计器、转子状态观测器、控制器,得到了对期望转矩渐近跟踪的整体方案,并对该方案的正确性和有效性进行了理论证明。基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果证明该设计方案可以实现对期望转矩的快速渐近跟踪控制,同时也实现了对负载转矩和转子电阻的高精度在线估计。本文在文献[7-8]基础上,对感应电机限制条件和控制目标进行了进一步研究。

$$L_{(d,q)} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -u_3 L_s & L_{sr} p & -u_3 L_{sr} \\ u_3 L_s & R_s + L_s p & u_3 L_{sr} & L_{sr} p \\ L_{sr} p & -(u_3 - p_n \omega_r) L_{sr} & R_r + L_r p & -(u_3 - p_n \omega_r) L_r \\ (u_3 - p_n \omega_r) L_{sr} & L_{sr} p & (u_3 - p_n \omega_r) L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix};$$

R_s, R_r 为定转子电阻; L_s, L_r 为定转子电感; L_{sr} 为定转子互感; J 为转动惯量; b 为电机阻尼; p_n 为电机极对数; u_1, u_2 为定子电压的 d, q 轴分量, $u_1 = U_{sd}, u_2 = U_{sq}$; u_3 为定子电压频率, $u_3 = f$; T, T_L 为电机电磁转矩和负载转矩; p 为导数算子; ω_s 为转差率, $\omega_s = u_3 - p_n \omega_r$ 。

对式(1)改写并整理其中一些项,得到下列 E-L 方程^[2-3]:

$$\begin{cases} D\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(\mathbf{x}, u_3)\mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{x} = [\mathbf{u}_{12}^T & 0 & 0]^T + \mathbf{h} \\ T = L_{sr}(x_2 x_3 - x_1 x_4) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq} \ \omega_r]^T$; x_1, x_2 为定子电流的 d, q 轴分量, $x_1 = i_{sd}, x_2 = i_{sq}$; x_3, x_4 为转子电流的 d, q 轴分量, $x_3 = i_{rd}, x_4 = i_{rq}$; x_5 为转子角速度, $x_5 = \omega_r$; $\mathbf{h} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -p_n T_L]^T$; $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T = [U_{sd} \ U_{sq} \ f]^T$; $\mathbf{D} = \text{blockdiag}\{D_e, p_n J\}$; $\mathbf{u}_{12} = [u_1 \ u_2]^T$; $\mathbf{R} = \text{blockdiag}\{R_e, p_n b\}$; $\mathbf{C}(\mathbf{x}, u_3) = \begin{bmatrix} C_e(u_3, x_5) & -\mathbf{c}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{c}^T(\mathbf{x}) & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} L_s I_2 & L_{sr} I_2 \\ L_{sr} I_2 & L_r I_2 \end{bmatrix}$; $\mathbf{R}_e = \begin{bmatrix} R_s I_2 & 0 \\ 0 & R_r I_2 \end{bmatrix}$; $\mathbf{C}_e(u_3, x_5) = \begin{bmatrix} L_s J_2 & L_{sr} J_2 \\ L_{sr} J_2 & L_r J_2 \end{bmatrix}$; $\omega_s = [1 \ 0]^T$; $\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{c}(\mathbf{x}) = p_n [L_s x_2 + L_{sr} x_4 - (L_s x_1 + L_{sr} x_3) \ 0 \ 0]^T$; 矩阵 $\mathbf{C}(\mathbf{x}, u_3)$ 是反对称的。

假设负载转矩 $T_L = T_L(t)$ 和期望电磁转矩

1 感应电机数学模型和问题表示

感应电机机电系统在同步坐标系中的 $d-q$ 模型为^[1]

$$\begin{cases} U_{(d,q)} = L_{(d,q)} \cdot I_{(d,q)} \\ J\dot{\omega}_r + b\omega_r = T - T_L \\ T = L_{sr}(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{(d,q)} = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T$; $U_{(d,q)} = [u_1 \ u_2 \ 0 \ 0]^T$;

$T_d = T_d(t)$ 均是时变的, T_L 未知, $T_d = T_d(t)$ 根据式(3)的期望运动学方程计算可得:

$$J\dot{\omega}_{rd} + b\omega_{rd} = T_d - \hat{T}_L \quad (3)$$

式中: ω_{rd} 为期望电机转速; \hat{T}_L 为负载转矩估计。

电机控制问题要求同时实现 2 个目标。

电磁转矩渐近跟踪:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (T - T_d) = 0 \quad (4)$$

渐近定向转子磁场:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (L_{sr} x_2 + L_r x_4) = 0 \quad (5)$$

设 $\mathbf{x}_d = [x_{d1} \ x_{d2} \ x_{d3} \ x_{d4} \ x_{d5}]^T$ 为待设计的期望状态变量,满足下列要求:

$$L_{sr}(x_{d2} x_{d3} - x_{d1} x_{d4}) = T_d \quad (6)$$

$$L_{sr} x_{d2} + L_r x_{d4} = 0 \quad (7)$$

令状态误差 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5]^T$, 整理可得状态误差的动态方程为

$$D\dot{\mathbf{e}} + [\mathbf{C}(\mathbf{x}, u_3) + \mathbf{R}]\mathbf{e} = \mathbf{g} \quad (8)$$

式中: \mathbf{g} 为 5 维列矩阵, $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5]^T$ 。

\mathbf{g} 可由下列表达式计算得到:

$$\mathbf{g} = [\mathbf{u}_{12}^T \ 0 \ 0]^T -$$

$$\{\mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}_d + [\mathbf{C}(\mathbf{x}, u_3) + \mathbf{R}]\mathbf{x}_d\} + \mathbf{h} \quad (9)$$

显然,只要 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x} = \mathbf{x}_d$, 则可以实现转矩的渐近跟踪和磁场的渐近定向。取误差系统的能量函数为

$$H_d = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{D} \mathbf{e} \quad (10)$$

由于矩阵 $C(x, u_3)$ 是反对称的, 经计算可得 H_d 的导数满足下列方程:

$$\dot{H}_d = -e^T R e + e^T g \quad (11)$$

设计控制变量 u 和期望轨道 x_d 使得 $g = -Ke$, 其中, K 为待定矩阵 $K = \text{diag}(k_1, k_1, 0, 0, k_2), k_1, k_2 > 0$ 。从而式(11)变为

$$\dot{H}_d = -e^T (R + K) e \quad (12)$$

再由式(10)得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \text{lime} = 0$, 从而实现上述 2 个目标。此时 $e \rightarrow 0$ 的速度可以由 k_1, k_2 调节。

2 无源性控制器设计

为了设计无源性控制器, 作出假设: 定子电流和转子转速可以准确测量, 转子电阻和负载转矩时变未知, 因此需要实时估计负载转矩和转子电阻。首先假设转子电流可以测量, 实际上转子电流不可测量, 将在下文进一步研究。期望转矩的无源性渐近跟踪控制整体设计方案如下。

(1) 控制器设计。

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ \dot{x}_{d2} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \dot{x}_{d3} \\ \dot{x}_{d4} \end{bmatrix} + \omega_s L_s \begin{bmatrix} -x_{d2} \\ x_{d1} \end{bmatrix} + \omega_s L_{sr} \begin{bmatrix} -x_{d4} \\ x_{d3} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} x_{d1} \\ x_{d2} \end{bmatrix} - p_n \begin{bmatrix} L_s x_2 + L_{sr} x_4 \\ -(L_s x_1 + L_{sr} x_3) \end{bmatrix} x_{d5} - k_1 \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$u_3 = -\frac{\hat{R}_r x_{d4}}{L_s x_{d1} + L_r x_{d3}} + p_n x_5 \quad (14)$$

(2) 期望轨道设计。期望轨道 x_d 由下列方程组确定:

$$\begin{cases} \dot{x}_{d2} - \left(\frac{\hat{T}_d}{T_d} + \frac{\hat{R}_r L_{sr}}{L_r} \frac{x_{d2} x_{d3}}{T_d} \right) x_{d2} = 0 \\ x_{d1} = \frac{L_r}{L_{sr}^2} \frac{T_d}{x_{d2}} - \frac{L_r}{L_{sr}} x_{d3} \\ x_{d4} = -\frac{L_{sr}}{L_r} x_{d2} \\ J \dot{x}_{d5} + b x_{d5} + (L_s x_2 + L_{sr} x_4) x_{d1} - (L_s x_1 + L_{sr} x_3) x_{d2} = -\hat{T}_L + k_2 e_5 \end{cases} \quad (15)$$

式中: \hat{T}_L, \hat{R}_r 为负载转矩 T_L 和转子电阻 R_r 的估计值; x_{d3} 为任意给定值。

(3) 负载转矩估计。设计负载转矩的估计误

差 \tilde{T}_L 的反馈律和负载估计器分别为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{T}}_L = -k_3 \tilde{T}_L + p_n e_5, \\ \hat{T}_L(t) = \hat{T}_L(t-1) + \tilde{T}_L(t) = \hat{T}_L(t-1) + \tilde{T}_L(t-1) - k_3 \int_{t-1}^t \tilde{T}_L ds + p_n \int_{t-1}^t e_5(s) ds \end{cases} \quad (16)$$

其中: $k_3 > 0$ 。

(4) 转子电阻估计。转子电阻误差 \tilde{R}_r 反馈规律和转子电阻估计方法如下:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{R}}_r = -k_4 \tilde{R}_r + e_{34}^T x_{d34} \\ \hat{R}_r(t) = \hat{R}_r(t-1) + \tilde{R}_r(t) = \hat{R}_r(t-1) + \tilde{R}_r(t-1) - k_4 \int_{t-1}^t \tilde{R}_r ds + \int_{t-1}^t e_{34}^T x_{d34} ds \end{cases} \quad (17)$$

其中: $k_4 > 0$ 。

定理 当采用上文给出的期望轨道设计、控制器设计、转子电阻估计器和负载转矩估计器以及控制器时, 选择合适的反馈系数 k_1, k_2, k_3, k_4 , 就能实现期望转矩的快速渐近跟踪, 同时可实现对负载转矩和转子电阻的高精度估计。

证明: 将式(13)~式(15)代入式(9), 得到:

$$\begin{cases} g_{12} = -k_1 e_{12} \\ g_{34} = -\tilde{R}_r x_{d34} \\ g_5 = -p_n \tilde{T}_L - k_2 e_5 \end{cases} \quad (18)$$

则有:

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -p_n \hat{T}_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{R}_r I_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_d - K \begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{34} \\ e_5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中: $K = \text{diag}(k_1, k_1, 0, 0, k_2)$ 。

将式(19)代入式(8)得到:

$$D \dot{e} + C(x, u_3) e = -(R + K) e + [0_{1 \times 2} \quad -\tilde{R}_r x_{d34}^T \quad -p_n \tilde{T}_L]^T \quad (20)$$

定义正定二次型能量函数如下:

$$H_T = \frac{1}{2} e^T D e + \frac{1}{2} \tilde{y}_L^2 + \frac{1}{2} \tilde{R}_r^2 \quad (21)$$

由于 $C(x, u_3)$ 是反对称的, H_T 沿方程式(16)、式(17)、式(20)求得:

$$\dot{H}_T = -e^T (R + K) e +$$

$$\dot{\bar{T}}_L(\bar{T}_L - p_n e_5) + \bar{R}_r(\dot{\bar{R}}_r - e^{T_1} x_{d34}) \quad (22)$$

当采用前文给出的转子电阻估计器和负载转矩估计器后,有:

$$\dot{H}_T = -e^T(R + K)e - k_3 \bar{T}_L^2 - k_4 \bar{R}_r^2 \quad (23)$$

由于 $R+K$ 正定,从而 $H_T \rightarrow 0$,以指数速度 e , $\bar{T}_L, \bar{R}_r \rightarrow 0$,所以式(4)、式(5)成立。即实现了磁场渐近定向和转矩的快速渐进跟踪。

下面考虑定理的扩展。实际上转子电流是不可测量的,这就需要设计转子电流观测器。应用文献[1]的观测器:

$$D_e \dot{\hat{I}} + C_A(x_5, u_3) \hat{I} + R_e \hat{I} = \begin{bmatrix} u_{12} \\ 0 \end{bmatrix} + F(\hat{I} - I) \quad (24)$$

式中: $I = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$; $\hat{I} = [x_1 \ x_2 \ \hat{x}_3 \ \hat{x}_4]^T$; $C_A = \begin{bmatrix} L_s u_3 J_2 & L_{sr} u_3 J_2 \\ L_{sr} \omega_s J_2 & L_r \omega_s J_2 \end{bmatrix}$; $F = \begin{bmatrix} L_s p_n x_5 J_2 & 0 \\ -L_{sr} p_n x_5 J_2 & 0 \end{bmatrix}$; \hat{x}_3, \hat{x}_4 为转子电流的观测值。

利用观测值 \hat{x}_3, \hat{x}_4 ,可以重新设计转子电阻估计器,以代替式(17):

$$\begin{cases} \dot{\bar{R}}_r = -k_5 \bar{R}_r + (\hat{x}_{34} - x_{d34})^T x_{d34} \\ \hat{R}_r(t) = \hat{R}_r(t-1) + \bar{R}_r(t) = \\ \hat{R}_r(t-1) + \bar{R}_r(t-1) - \\ k_5 \int_{t-1}^t \bar{R}_r ds + \int_{t-1}^t (\hat{x}_{34} - x_{d34})^T x_{d34} ds \end{cases} \quad (25)$$

其中: $k_5 > 0$ 。

仿真结果证明了上述设计能够实现期望转矩的快速跟踪,同时可实现对负载转矩和转子电阻的高精度估计。

3 仿真介绍及结果分析

参考文献[9],假设负载转矩为 $T_L = 10 + 5\sin(10t)$ 。本文仿真采用文献[1]的电机参数 $R_s = 0.687 \ \Omega$, $R_r = 0.842 \ \Omega$, $L_s = 0.084 \ \text{H}$, $L_r = 0.0852 \ \text{H}$, $L_{sr} = 0.0813 \ \text{H}$, $J = 0.03 \ \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $b = 0.03 \ \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,极对数 $p_n = 4$ 。

(1) 定理的仿真1。转子电阻的真实值设为 $R_r = \begin{cases} 0.842, t \leq 1 \\ 0.984, t > 1 \end{cases}$,根据式(13)~式(17)进行 Simulink 模块搭建,仿真结果如图1~图3所示。

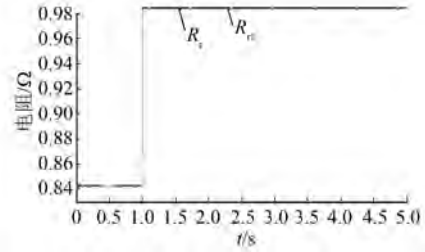


图1 仿真1中的电阻估计值 R_{r1} 和真实值 R_r

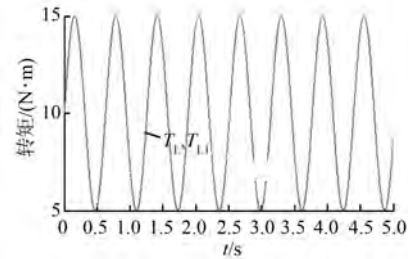


图2 仿真1中的负载估计值 T_{L1} 和真实值 T_L

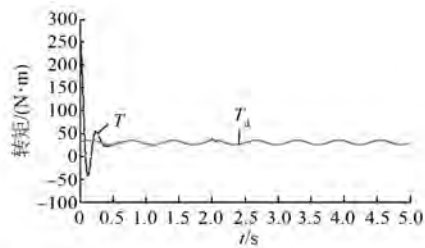


图3 仿真1中的转矩设计值 T_d 与转矩跟踪值 T

多次仿真中显示,不论转子电阻的估计初值是否为 $0.842 \ \Omega$,负载的估计初值是否为 $10 \ \text{N} \cdot \text{m}$,均能实现期望转矩的快速跟踪,并同时准确估计转子电阻和负载转矩。

(2) 对定理扩展的仿真2。转子电阻的真实值设为 $R_r = 0.842 + 6 \times 10^{-3} (|x_3| + |x_4|)$ 。根据式(13)~式(16)、式(24)、式(25)进行 Simulink 模块搭建,仿真结果如图4~图6所示。

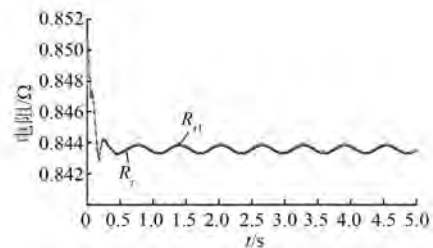


图4 仿真2中的电阻估计值 R_{r1} 和真实值 R_r

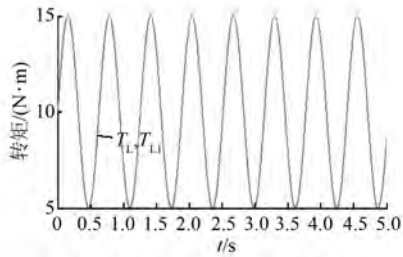


图5 仿真2中的负载估计值 T_{Li} 和真实值 T_L

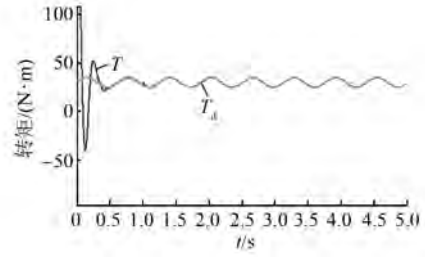


图9 仿真3中的转矩设计值 T_d 与转矩跟踪值 T

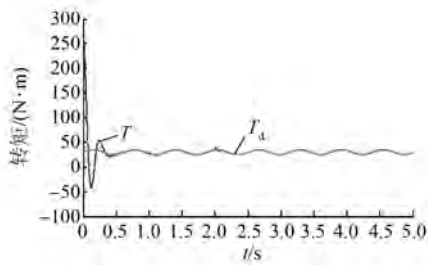


图6 仿真2中的转矩设计值 T_d 与转矩跟踪值 T

(3) 对定理扩展的另一种仿真3。转子电阻的真实值设为 $R_r = \begin{cases} 0.842, & t \leq 1 \\ 0.984, & 1 < t \leq 2 \\ 1.194, & t > 2 \end{cases}$ 。根据式(13)~式(16)、式(24)、式(25)进行 Simulink 模块搭建,仿真结果如图7~图9所示。

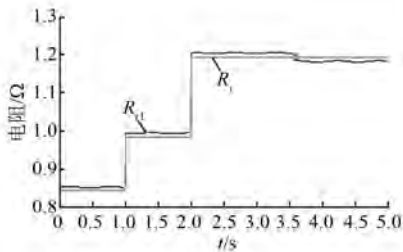


图7 仿真3中的电阻估计值 R_{ri} 和真实值 R_r

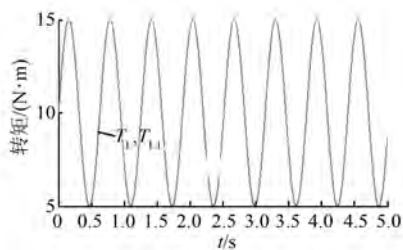


图8 仿真2中的负载估计值 T_{Li} 和真实值 T_L

的估计初值是否为 0.842Ω , 负载的估计初值是否为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$, 通过选择较大的反馈系数, 均可以实现期望转矩的高性能跟踪, 并同时准确估计转子电阻和负载转矩。在仿真图形中, $R_{ri} = \hat{R}_r$ 为转子电阻估计值; $T_{Li} = \hat{T}_L$ 为负载转矩估计值, T_d 为期望转矩设计值。

在图3、图4、图6、图9中, 因为开始时刻的值较大, 软件又自动确定显示窗口的坐标范围, 所以上述物理量开始时刻在窗口中显示时会垂直出现, 不是无穷大, 只是相对于窗口的坐标范围较大。

从仿真结果可以看出, 转子电阻的估计较好, 可以及时跟上真实值。负载转矩的估计更好, 完全重合, 几乎没有误差。电动转矩对设计的期望转矩的跟踪开始一段时间内有较大偏差, 且有超调, 不过 0.5 s 后完全跟得上, 偏差较小或没有偏差。

4 结 语

本文从理论证明和仿真2方面研究了期望转矩的渐近跟踪控制。根据方程所设计的期望转矩是时变的, 负载转矩和转子电阻是一般的未知时变形式。该设计方案能实现对期望转矩的跟踪, 同时也能高精度地实时估计负载转矩和转子电阻。从理论上给出了一般形式的控制器设计方案, 以及期望轨道、转子电流观测器、负载和转子电阻估计器的计算方程和步骤, 为感应电机无源性跟踪控制提供了理论依据。

【参 考 文 献】

[1] 李武权. 基于无源性原理的机器人自适应控制统一方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.

(下转第53页)

- [6] RUNCOS F, CARLSON R, SADOWSKI N, et al. Performance and vibration analysis of a 75 kW brushless double-fed induction generator prototype [C]//Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 2006.
- [7] 邓先明, 方荣惠, 王抗, 等. 等距笼型转子无刷双馈电机的有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 507.
- [8] MCMAHON R, TAVNER P, ABDI E, et al. Characterising brushless doubly fed machine rotors [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(7): 535.
- [9] 欧先朋, 韩力, 韩雪峰, 等. 两种不同笼型转子结构无刷双馈电机的稳态运行性能对比[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 61.
- [10] 韩力, 高强, 罗辞勇, 等. 无刷双馈电机笼型转子结构对磁场调制的影响[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 161.
- [11] 郑凌娟, 陈建生, 章玮. 无刷双馈电机的转子导条不等间距优化设计[J]. 机电工程, 2013, 30(10): 1229.
- [12] 白崑儒, 王淑红, 张爱玲, 等. 笼型无刷双馈电机稳态下转矩角的物理含义[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(2): 197.

(上接第 40 页)

- [2] ORTEGA R, LORIA PEREZ J A, NICKLASSON P J, et al. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems[M]. London: Springer, 1998.
- [3] ORTEGA R, ESPINOSA G. Torque regulation of induction motors[J]. Automatica, 1993, 29(3): 621.
- [4] ORTEGA R, CANUDAS C, SELEME S I. Nonlinear control of induction motors: torque tracking with unknown disturbance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(11): 1675.
- [5] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Adaptive output feedback control of current-fed induction motors with uncertain rotor resistance and load torque [J]. Automatica, 1998, 34(5): 617.
- [6] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(5): 967.
- [7] 马良河, 姜建国. 异步电机的一类无源性快速渐进跟踪控制器[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 385.
- [8] 马良河, 姜建国. 负载转矩未知时变情形下异步电动机的无源性跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 12.
- [9] ZHU G, KADDOURI A, DESSAINT L A, et al. A nonlinear state observer for the sensor-less control of a permanent-magnet AC machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(6): 1098.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。