

不确定性直接转矩控制系统

冉正云, 李华德, 杨立永

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 在异步电动机直接转矩控制系统中, 由于定子电阻变化及负载扰动的不确定性, 导致定子磁链、转子转速和电磁转矩估计不准确, 从而影响系统的调速性能. 本文基于扩展Kalman滤波器, 引进虚拟噪声补偿技术, 然后采用Sage和Husa噪声统计估值器, 构成鲁棒扩展Kalman滤波器. 并将定子电流, 定子磁链, 转子转速, 定子电阻及负载作为状态变量, 基于鲁棒扩展Kalman滤波器进行了大量实验研究. 实验结果证实: 状态变量能够准确估计, 且转矩脉动优于常规的直接转矩控制方案, 实现了高性能无速度传感器的直接转矩控制系统.

关键词: 直接转矩控制; 鲁棒扩展Kalman滤波器; 无速度传感器控制; 不确定性

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Direct torque control system with uncertainties

RAN Zheng-yun, LI Hua-de, YANG Li-yong

(Information Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The uncertainty of stator resistance variance and load disturbance for asynchronous motor in direct torque control(DTC) system makes stator flux linkage, rotor speed and electromagnetic torque's estimation inaccurate, which leads to poor performance for the system. Based on extended Kalman filter(EKF), virtual noise compensation technology is introduced and the Sage-Husa noise statistical estimation method is adopted, which forms robust EKF. Then, stator current and flux linkage, rotor speed, stator resistance and load are regarded as the state variables and DTC experiment is carried out on the basis of robust EKF. Experiment shows that the state variables can be estimated accurately, and torque ripple is superior to ordinary DTC scheme, which achieves sensorless DTC system with good performance.

Key words: DTC; robust and extended Kalman filter; sensorless control; uncertainty

1 引言(Introduction)

在直接转矩控制系统中, 由于电动机参数变化及负载扰动具有不确定性, 定子磁链、转速、转矩的准确估计显得尤为重要^[1~3]. 文献[4]采用扩展Kalman滤波器对电动机的磁链和转速进行估计, 其不足在于: 1) 用Taylor级数对电动机模型线性化时忽略了高阶项而引起的模型误差, 将导致滤波误差; 2) 扩展Kalman滤波器要求噪声统计已知, 而实际系统由于未建模动态使得噪声统计未知, 若用错误的噪声统计设计Kalman滤波器, 将使滤波器误差增大, 甚至使滤波发散. 为了解决上述问题, 作者进行了如下改进: 针对问题1), 引进虚拟噪声补偿技术^[5], 将Taylor展开的高阶项看成虚拟噪声, 补偿了由于线性化引起的模型误差; 针对问题2)的噪声统计未知问题, 作者采用改进的Sage和Husa噪声统计估值器, 可处理未知时变噪声统计问题, 且精度比原始Sage和Husa的噪声统计估值器精度高^[6,7].

可见, 基于改进的Sage和Husa噪声统计估值的扩展Kalman滤波, 同时引入虚拟噪声补偿技术, 不但可处理带未知噪声统计的状态估计问题, 而且可提高滤波精度. 实验验证了方案的有效性.

2 系统的鲁棒扩展Kalman滤波算法(Robust and EKF algorithm of the system)

在两相静止坐标系中, 将定子电流分量 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$, 磁链分量 $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$, 转速 ω_r , 定子电阻 R_s 及负载转矩 T_l 视为状态变量, $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 视为观测量, 同时令 $x = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \omega_r, R_s, T_l]^T$, $y = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}]^T$, 则异步电动机的离散时间随机状态方程为:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) + W(k), \quad (1)$$

$$y(k) = h(x(k)) + V(k). \quad (2)$$

式中:

$$h(x(k)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k),$$

$$f = \begin{bmatrix} -(TR_r L_s/a)x_1 - Tx_2x_5 + m_1 \\ -(TL_r x_6/a) - (TL_s R_r/a)x_2 - m_2 \\ -Tx_6x_1 + u_{s\alpha} \\ -TR_r x_2 + u_{s\beta} \\ T[n_p^2 m_3 - x_7 n_p]/J + x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix}$$

$x_i (i = 1 \sim 7)$ 表示状态向量 x 的分量,

$$\begin{aligned} m_1 &= 1 - (TL_r x_6/a) + m_4, \\ m_2 &= -1 - Tx_1x_5 + m_5, \\ m_3 &= x_2x_3 - x_1x_4, \\ m_4 &= T[(R_r x_3 + L_r x_4x_5 + L_r u_{s\alpha}/a)], \\ m_5 &= T[(L_r x_3x_5 - R_r x_4 - L_r u_{s\beta}/a)]. \end{aligned}$$

L_s, L_r 分别为定、转子电感, L_m 为互感, $u_{s\alpha}$ 和 $u_{s\beta}$ 是定子电压分量, J 为转动惯量, n_p 为极对数, $a = L_s L_r - L_m^2$, T 为离散化步长, $W(k) \in \mathbb{R}^7, V(k) \in \mathbb{R}^2$ 是相互独立的白噪声, 均值和协方差阵分别为

$$\begin{cases} E(W(k)) = q(k), \\ \text{cov}[W(k), W(j)] = Q(k)\delta_{kj}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} E(V(k)) = r(k), \\ \text{cov}[V(k), V(j)] = R(k)\delta_{kj}. \end{cases} \quad (4)$$

设 k 时刻状态 $x(k)$ 的滤波估值为 $\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k)$. 将式(1)中的 f 围绕 $\hat{x}(k)$ 展成Taylor级数:

$$f(x(k), u(k)) = f(\hat{x}(k), u(k)) + \frac{\partial f}{\partial x(k)} [x(k) - \hat{x}(k)] + \Delta\delta. \quad (5)$$

则式(1)写成线性模型:

$$x(k+1) = \frac{\partial f}{\partial \hat{x}(k)} x(k) + m(k) + \xi(k). \quad (6)$$

式中:

$$m(k) = f(\hat{x}(k), u(k)) - \frac{\partial f}{\partial \hat{x}(k)} \hat{x}(k), \quad (7)$$

$$\xi(k) = W(k) + \Delta\delta. \quad (8)$$

式(8)表明: 将Taylor展式中高阶项 $\Delta\delta$ 合并到虚拟噪声 $\xi(k)$ 中, 补偿了线性化模型误差. 令此时的时变噪声统计:

$$\begin{cases} E(\xi(k)) = q(k), \\ \text{cov}[\xi(k), \xi(j)] = Q(k)\delta_{kj}. \end{cases} \quad (9)$$

用式(9)取代式(3), 而式(4)不变. 于是非线性系统(1)和(2)的滤波问题转化为线性系统(6)和(2)的滤波问题. 令

$$G(k) = \frac{\partial f}{\partial x(k)}|_{x = \hat{x}(k)}, \quad (10)$$

$$h(k) = \frac{\partial h}{\partial x(k)}|_{x = \hat{x}(k|k-1)}, \quad (11)$$

则系统的扩展Kalman滤波器为:

1) 预报方程:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(\hat{x}(k), u(k)) + \hat{q}(k). \quad (12)$$

2) 滤波方程:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= f(x(k), u(k)) + M(k+1) \cdot \\ &e(k+1) + \hat{q}(k). \end{aligned} \quad (13)$$

3) 误差计算式:

$$e(k+1) = y(k+1) - h(\hat{x}(k+1|k)) - \hat{r}(k). \quad (14)$$

4) 最优增益矩阵计算式:

$$M(k+1) = P(k+1|k)H^T(k+1)N(k+1). \quad (15)$$

其中:

$$N(k+1) = [S(k+1) + \hat{R}(k)]^{-1}, \quad (16)$$

$$S(k+1) = H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1). \quad (17)$$

5) 估计误差方差阵:

$$P(k+1|k) = G(k)P(k|k)G^T(k) + \hat{Q}(k), \quad (18)$$

$$P(k+1) = [I_n - M(k+1)H(k+1)]P(k+1|k). \quad (19)$$

式(8)中, 由于高阶项归为虚拟噪声, 则噪声统计未知. 文中采用改进的Sage和Husa噪声统计估值器, 可处理未知时变噪声统计问题^[5], 由于篇幅所限, 不再列出.

3 基于鲁棒EKF算法的直接转矩控制系统(Robust and EKF algorithm of DTC system)

图1为基于鲁棒EKF算法的直接转矩控制系统结构框图. 鲁棒EKF的输入为两相定子电压 $u_{s\alpha\beta}$ 、电流 $i_{s\alpha\beta}$ 、输出定子电流 $\hat{i}_{s\alpha\beta}$ 、定子磁链 $\hat{\psi}_{s\alpha\beta}$ 及角速度 $\hat{\omega}_r$ 的滤波值.

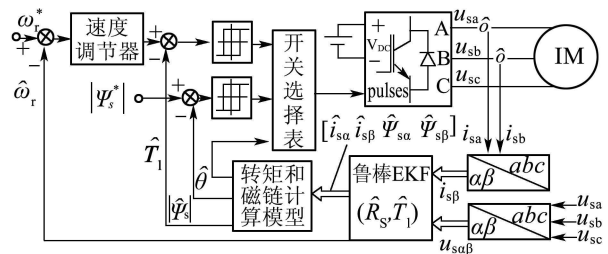


图1 基于鲁棒EKF算法的直接转矩控制系统
Fig. 1 DTC system based on robust EKF algorithm

4 实验结果及分析(Experimental result and analysis)

感应电机的参数为:

$$\begin{aligned} P_N &= 2.2 \text{ kW}, f = 50 \text{ Hz}, \\ n_N &= 1400 \text{ r/min}, U_N = 220 \text{ V}, \\ n_p &= 2, R_s = 2.5 \Omega, \\ R_r &= 2.7 \Omega, L_s = 500 \text{ mH}, \\ L_r &= 500 \text{ mH}, L_m = 479 \text{ mH}, \end{aligned}$$

初始值 $\hat{x}_0, \hat{q}_0, \hat{r}_0$ 均取为零, $\hat{Q}_0, \hat{R}_0, P(0|0)$ 取为正定对称矩阵, 采样时间 $120 \mu\text{s}$. 图2、图3分别为采用常规的直接转矩控制方法及本算法在空载起动2 s时突加负载的电磁转矩响应曲线. 图2中, 转矩动态响应较快, 转矩脉动较大, 切换时超调较大, 表明系统的鲁棒性较差. 图3中, 转矩的动态响应较快, 转矩脉动较小, 切换时超调较小, 表明系统对不确定性负载扰动具有较强的鲁棒性.

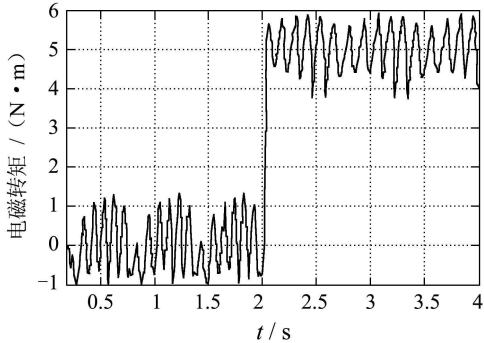


图2 常规DTC控制的转矩响应曲线

Fig. 2 Torque waveform with ordinary DTC control

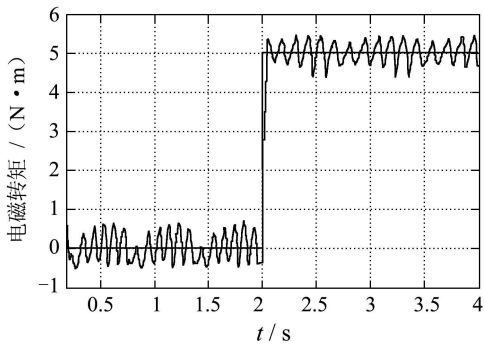


图3 鲁棒EKF直接转矩控制的转矩响应曲线

Fig. 3 Torque waveform with robust EKF control

为了检验系统对定子电阻变化的适应性, 实验时, 将鲁棒EKF算法的定子电阻初始值设为0, 观察定子电阻的收敛情况. 图4为定子电阻的真实曲线(线A)和滤波曲线(线B), 定子电阻很快收敛到真实值. 可见, 即使定子电阻发生较大变化, 采用本算法的直接转矩控制系统仍有较强的适应能力.

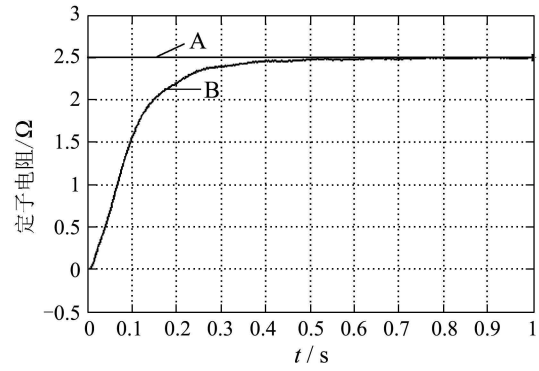


图4 定子电阻的实际曲线和滤波曲线

Fig. 4 Actual and filtering waveform of stator resistance

5 结论(Conclusions)

对于异步电动机状态变量的估计, 采用了鲁棒扩展Kalman滤波算法. 该算法用未知时变噪声统计的虚拟噪声补偿了模型线性化误差, 随之带来的噪声统计未知问题采用改进的Sage和Husa统计估值器加以解决. 在考虑了定子电阻变化及负载扰动的情况下, 基于鲁棒扩展Kalman滤波器进行了大量实验研究, 实验验证了方案的有效性.

参考文献(References):

- [1] MA X M. Extended Kalman filter for speed sensor-less DTC based on DSP[C] //Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2002: 119 – 122.
- [2] GHOUILI J. Induction motor dynamic neural stator flux estimation using active and reactive power for direct torque[C] //IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Piscataway: IEEE Press, 1999: 501 – 505.
- [3] MYOUNGHO S. Improved stator flux estimation for speed sensor-less stator flux orientation control of induction motor[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 2(2): 1581 – 1586.
- [4] Barut. Speed sensorless direct torque control of IMs with rotor resistance estimation[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(3): 335 – 349.
- [5] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 185 – 188.
(DENG Zili. Self-correcting Filter Theory and Application[M]. Harbin: Harbin Technical University Publishing House, 2003: 185 – 188.)
- [6] DEND Z L, WANG J G. Adaptive extended Kalman filtering for nonlinear systems[J]. Preprints of the 17th JAACE Symposium on Stochastic Theory and its Applications, 1987, 13(5): 375 – 379.
- [7] PAI A D, UMANAND L, RAO N J. Direct torque control of induction motor with extended Kalman filter[C] //Proc of the Third Int Power Electronics and Motion Control Conf. Beijing, China: Int Acad Publishers, 2000: 132 – 137.

作者简介:

冉正云 (1978—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为变频调速技术, E-mail: ranzhengyun@126.com;

李华德 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力电子及电力传动、热工过程控制系统、轧钢过程自动化、伺服控制系统, E-mail: tt99tt@263.net;

杨立永 (1975—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为变频调速技术.