

基于无速度传感器直接转矩控制自抗扰交流调速研究

戴巨川¹, 吴新开², 文 丽²

(1. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 在感应电机直接转矩控制(DTC)调速系统中,常规PID速度调节器在电机受到扰动的情况下,需要花费较长时间才能使电机恢复到稳态值。为此,将一种新型的自抗扰控制器(ADRC)引入感应电机直接转矩控制调速系统中,设计速度ADRC调节器代替PID调节器,基于模型参考自适应控制(MRAS)方法设计速度观测器。对比分析了PID与ADRC两种方案下无速度传感器直接转矩控制交流调速系统性能。仿真试验结果表明,采用ADRC后,系统动态响应更快,抗扰动能力更强,在电机参数摄动的情况下,电机运行速度与指令速度偏差更小。

[关键词] 直接转矩控制;自抗扰控制;速度观测器;无速度传感器;感应电机

[中图分类号] TM921 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)04-0091-05

1 前言

直接转矩控制中,转矩控制的效果不取决于是否能够得到简化的电机数学模型,而取决于转矩的实际状况^[1,2]。目前,转矩调节多采用PID控制,包括诸多性能优越的新型PID控制器^[3~5]。20世纪90年代,我国学者提出的自抗扰控制器(ADRC)^[6]得到了众多学者的重视,成为传统PID的强有力竞争者,并在交流调速领域得到初步应用,但主要集中于矢量控制调速系统中^[7~12]。文章在深入分析感应电机直接转矩控制原理上,以模型参考自适应理论为基础,采用PI自适应率,设计速度观测器,并以ADRC控制器取代PID控制器建立无速度传感器直接转矩控制系统,对其各项关键参数进行良好整定。系统保持了直接转矩控制固有优点,且性能得到进一步提升。

2 直接转矩控制中的速度观测器设计

2.1 感应电机数学模型

交流电机在静止坐标系 $\alpha - \beta$ 下的定转子电压方程为

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + D\psi_{s\alpha} \quad (1)$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + D\psi_{s\beta} \quad (2)$$

$$u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + D\psi_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\beta} = 0 \quad (3)$$

$$u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + D\psi_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} = 0 \quad (4)$$

式中, R_s, R_r 为定、转子电阻; ω_r 为转子速度; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 为 α, β 轴定子电压; $u_{r\alpha}, u_{r\beta}$ 为 α, β 轴转子电压; $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ 为定子磁链 α, β 轴分量; $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ 为转子磁链 α, β 轴分量; D 为微分算子; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 为 α, β 轴定子电流。转子磁链方程为

$$D\psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} u_{s\alpha} - \frac{L_r}{L_m} (R_s + \sigma L_s D) i_{s\alpha} \quad (5)$$

$$D\psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} u_{s\beta} - \frac{L_r}{L_m} (R_s + \sigma L_s D) i_{s\beta} \quad (6)$$

式中, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s$, L_s, L_r, L_m 分别为定、转子自感及互感。转子磁链方程也可写为

$$D\psi_{r\alpha} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} \quad (7)$$

[收稿日期] 2007-07-29; 修回日期 2008-09-19

[基金项目] 湖南省自然科学基金资助项目(03jyy6019)

[作者简介] 戴巨川(1979-),男,四川广安市人,硕士,湖南科技大学讲师,主要研究方向为电力电子传动;E-mail: daijuchuan@163.com

$$D\psi_{r\beta} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} \quad (8)$$

式(5)、式(6)为转子磁链电压模型,式(7)、式(8)为转子磁链电流模型。电磁转矩方程为

$$T_e = p_n (\psi_{sa} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{sa}) \quad (9)$$

式中, p_n 为电机极对数; T_e 为电磁转矩。机电运动方程为

$$J \frac{D\omega_r}{dt} + B\omega_r = T_e - T_L \quad (10)$$

式中, J 为转动惯量; B 为粘滞阻尼系数; T_L 为负载转矩。

2.2 速度观测器设计

电压型逆变器输入端直流电压是已知量,而输入为6个电压矢量及两个零矢量,在直接转矩控制系统中,任一时刻所发的电压矢量是知道的,由此电机相(线)电压值可以精确求得,而电机电流值可采用高精度电流传感器检测出来,因而可由式(5)、式(6)构成电机参考模型,合并成式(11)。

若将式(7)、式(8)中 ω_r 看成需要辨识的量,其他参数认为不变化,则将式(7)、式(8)合并为式(12)作为电机可调模型。

$$D \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (R_s + \sigma L_s D) & 0 \\ 0 & (R_s + \sigma L_s D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & -\hat{\omega}_r \\ \hat{\omega}_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

定义状态误差为

$$\begin{aligned} e_{\psi\alpha} &= \hat{\psi}_{r\alpha} \\ e_{\psi\beta} &= \hat{\psi}_{r\beta} \end{aligned}$$

由 Popov 超稳定性理论,取比例积分自适应率推得速度辨识算法为

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_{02}fal(e(k), 1/2, \delta) + bu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) + T\beta_{03}fal(e(k), 1/4, \delta) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $e(k) = z_1(k) - y(k)$, 且

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} e\delta^{a-1}, & |e| \leq \delta \\ |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases}$$

3) 控制量的形成。

$$\hat{\omega} = (K_p + K_i/s)(e_{\psi\alpha} \hat{\psi}_{r\beta} - e_{\psi\beta} \hat{\psi}_{r\alpha}) \quad (13)$$

以上推导的速度辨识算法对电机参数如定、转子电阻的摄动具有一定的鲁棒性(对 MRAS 系统鲁棒性分析可参考相关文献),为了避免电压模型磁通观测中纯积分器的影响,可在参考模型和可调模型中引入滤波环节。此外,为了进一步提高系统性能,还需要在估计转速的同时辨识电机参数。

3 速度调节自抗扰控制器设计

3.1 自抗扰控制(ADRC)算法

在自抗扰控制技术中,“系统分类”是按系统的“时间尺度”来进行的,只需考虑“静态耦合”,不用考虑“动态耦合”。自抗扰控制器主要由安排过渡过程、扩张状态观测器、非线性组合、扰动补偿等4个部件组合而成。该方法通过扩张状态观测器观测出系统中状态变量的同时,还观测出了系统中的“扰动”。

以二阶系统为例,若被控对象为

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, w, t) + bu, y = x \quad (14)$$

1) 安排过渡过程。

x_0 为设定值

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tfst(x_1(k), x_2(k), u(k), r, h) \end{cases} \quad (15)$$

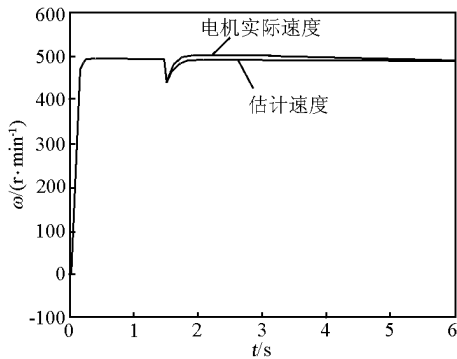
式中, T 为采样周期, $u(k)$ 为第 k 时刻输入信号, fst 函数由下面式子计算

$$\begin{aligned} \delta &= rh, \delta_0 = \delta h, y = \chi_1 - u + h\chi_2, \\ \alpha_0 &= \sqrt{\delta^2 + 8r|y|} \end{aligned}$$

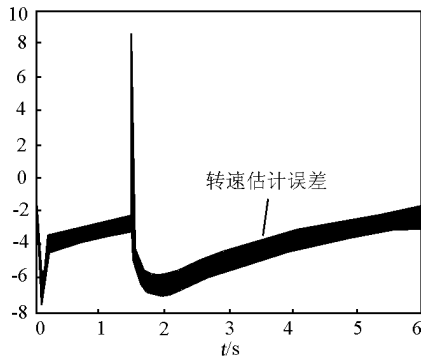
$$a = \begin{cases} x_2 + y/h, & |y| \leq \delta_0 \\ x_2 + 0.5(a_0 - \delta) \text{sign}(y), & |y| > \delta_0 \end{cases}$$

$$fst = \begin{cases} -ra/\delta, & |a| \leq \delta \\ -r \text{sign}(a), & |a| > \delta \end{cases}$$

2) 估计状态和总扰动(ESO)方程。



(a) 实际转速与估计转速



(b) 转速估计误差

图4 ADRC 控制下速度曲线波形

Fig. 4 Response of speed based on ADRC

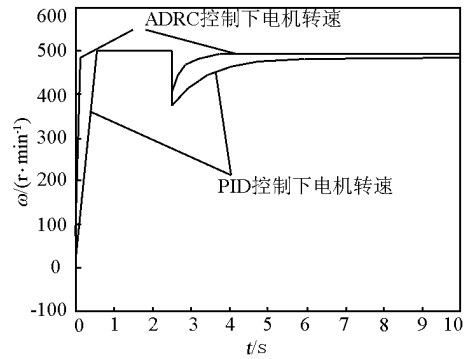


图5 参数扰动下电机速度曲线

Fig. 5 Response of motor speed when motor parameter varied

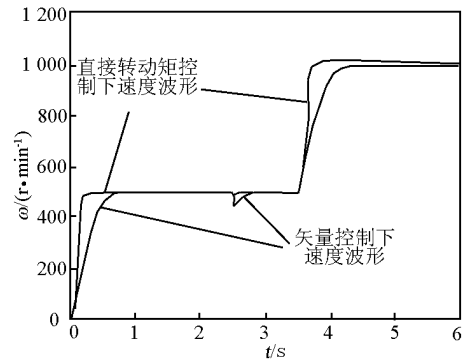


图6 直接转矩 ADRC 控制与
矢量 ADRC 控制波形对比

Fig. 6 The waveform comparison between DTC ADRC and FOC ADRC

出了参数扰动下电机速度波形,其指令转速仍为 500 r/min,1 s 时改变电机参数,1.5 s 突加负载 10 N·m。从图 5 中曲线可以看出,空载情况下,当参数扰动时,无论是 PID 控制还是 ADRC 控制,电机转速经过短暂波动后均能恢复到设定值。在 1.5 s 突加负载以后,由于参数扰动的影响,电机运行到稳态后其转速比设定值要小,但也明显看出,采取 ADRC 控制条件下,其相对指令转速的偏差比 PID 控制下小得多,从而进一步验证了 ADRC 控制的优越性能。图 6 给出了直接转矩 ADRC 控制与矢量 ADRC 控制下的电机性能比较。矢量控制系统基于转子磁链定向,采用电流控制 PWM 逆变器,含有速度调节器,转子磁链计算环节,电流转矩分量、励磁分量计算环节等。考虑自抗扰控制器作为速度调节环节,在与直接转矩 ADRC 控制作性能比较时,选用相同电机,均在 2.5 s 突加负载 10 N·m,3.5 s 时指令转速由 500 r/min 变为 1 000 r/min。由图 6 可以看出,在上述试验条件下,当电机负载变化时,矢量 ADRC 控制的性能好于直接转矩 ADRC 控制,指令速度变化时,直接转矩 ADRC 控制下电机响应快于矢量 ADRC 控制。需要指出的是,上述性能的差

异除受 ADRC 控制器影响外,还受到各自其他控制环节的影响。仿真时也发现,矢量控制中,采用 ADRC 作为速度调节器要比采用 PID 作为速度调节器性能更优越。

5 结语

将自抗扰控制原理应用于感应电机直接转矩控制系统中,设计了速度 ADRC 调节器和基于 MRAS 的速度估计器,建立了无速度传感器整体控制系统。仿真分析表明,系统的动态响应快,抗扰动能力强,对参数扰动具有一定的鲁棒性。带载情况下,参数扰动会造成电机运行速度与指令速度的偏差,这一情况可采取参数辨识技术加以解决。相对 PID 控制,ADRC 算法稍显复杂,但采用高速 DSP 后,其性能可得到充分发挥。

参考文献

- [1] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2002
- [2] Takahashi, Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1986,22(5):820-827
- [3] 刘志远,吕剑虹,陈来九. 智能PID控制器在电热厂过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报,2002,22(8):128-134
- [4] 谈英姿,沈炯,吕震中. 免疫PID控制器在汽温控制系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):148-152
- [5] 王爽心,姜研,李亚光. 基于混合混沌优化策略的汽轮机调速系统模糊免疫PID控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):70-74
- [6] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998, 13(1): 19-23
- [7] 夏长亮,俞卫,李志强. 永磁无刷直流电机转矩波动的自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(24): 137-142
- [8] 孙凯,许镇琳,盖廓,等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):43-46
- [9] 冯光,黄立培,朱东起. 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究[J]. 清华大学学报,1999,39(3):30-33
- [10] 白晶,李华德,郝智红. 自抗扰控制器ADRC实现的感应电机变频调速系统[J]. 电工技术学报,2005,20(6):73-76
- [11] 刘鸣,邵诚. 异步电动机的自抗扰控制器及其参数整定[J]. 控制与决策,2003,18(5):540-544
- [12] 苏位峰,孙旭东,李发海. 基于自抗扰控制器的异步电机矢量控制[J]. 清华大学学报,2004,44(10):1329-1332

Study on auto-disturbances-rejection AC adjustable speed based on speed sensorless direct torque control

Dai Juchuan¹, Wu Xinkai², Wen Li²

(1. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. College of Electric-information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[Abstract] In direct torque control system, the PID controller is often adopted to be the speed adjuster. When disturbances are thrown to the motor, a long time is taken to renew the motor to steady state. In this paper, new auto-disturbance-rejection controller (ADRC) is introduced into direct torque control system. Instead of PID speed adjuster, ADRC speed adjuster is designed. The speed observer is designed based on model reference adaptive system (MRAS), too. The performance difference is analyzed between PID controller and ADRC in speed sensorless direct torque control system. The simulation results show that the AC speed adjustable system has speedier response performance, stronger disturbance-rejection performance when ADRC is adopted. Moreover, according to simulation results, there is smaller warp between motor command speed and actual speed when motor parameters perturb.

[Key words] direct torque control; active disturbances rejection control; speed observer; speed sensorless; induction motor