

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.009

开关磁阻电机自抗扰控制研究

李建忠¹, 瞿遂春², 周飞², 朱宏基¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 开关磁阻电机具有很多优良的特性, 但存在较大的转矩脉动。以开关磁阻电机的数学模型和自抗扰控制理论为基础, 设计了开关磁阻电机自抗扰控制系统, 并采用 Matlab 对系统进行了仿真。仿真结果表明, 该自抗扰控制方案对系统参数变化具有很强的鲁棒性, 可以有效地抑制开关磁阻电机的转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机; 自抗扰控制; 转矩脉动; 鲁棒性

中图分类号: TM301.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0037-04

Research on Active Disturbance Rejection Control of Switched Reluctance Motor

Li Jianzhong¹, Qu Suichun², Zhou Fei², Zhu Hongji¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. College of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: The switched reluctance motor has many excellent characteristics, but large torque ripple exists. Based on the mathematical model of SRM and the theory of active disturbance rejection control, designs a ADRC system of SRM, and the simulation with Matlab indicates that the ADRC scheme has strong robustness to the changes of system parameter, and can effectively restrain the torque ripple of SRM.

Keywords: switched reluctance motor; active disturbance rejection control; torque ripple; robustness

0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 具有结构简单、制造成本低、工作可靠等优点, 是一种很有潜力的调速电机。然而, 由于自身的双凸极结构、开关形式的供电方式、以及铁心磁路的高度饱和等特点, 使 SRM 存在较大的转矩脉动和噪声, 直接制约了它的广泛应用^[1]。因此, 抑制 SRM 转矩脉动一直是国内外学者研究的热点。采用模糊控制^[2]、神经网络控制^[3]等控制方案, 可在一定程度上抑制转矩的脉动, 但是这些控制策略较为复杂, 计算量较大, 实时控制性较差。

本文将自抗扰控制技术 (active disturbance rejection control, ADRC) 应用到 SRM 控制方案中, 发现 ADRC 对系统所受扰动及系统参数变化均具有很强的鲁棒性, 同时能有效地抑制转矩脉动。

ADRC 对系统所受扰动及系统参数变化均具有很强的鲁棒性, 同时能有效地抑制转矩脉动。

1 自抗扰控制理论

自抗扰控制是一种估计补偿不确定因素的控制技术, 它不依赖于被控对象的精确数学模型, 能实时估计出系统所受扰动, 并能及时进行补偿。

自抗扰控制器由以下 4 部分组成: 跟踪微分器 (tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO)、非线性状态误差反馈 (nonlinear states error feedback, NLSEF) 和扰动补

收稿日期: 2012-09-19

作者简介: 李建忠 (1988-), 男, 湖南桂阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型电机及其控制,

E-mail: sanquankou@163.com

偿^[4]，一阶ADRC系统如图1虚线框内所示。针对自抗扰控制理论中的fhan函数，文献[5]提出了真正的离散系统最速控制综合函数——fsun函数，进一步完善了自抗扰控制技术的理论。采用fsun函数可使二阶离散系统的状态变量无超调地到达稳态，且所用步数比采用fhan函数时少。这样既减小了系统的能量损耗，又提高了系统控制性能。函数fsun(x₁,x₂,r,h)的具体表达式为

$$\begin{cases} y=x_1+hx_2; \\ k'=\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+\frac{8|y|}{h^2r}}+1\right); \\ k=\text{sgn}(k'-\text{fix}(k'))+\text{fix}(k'); \\ \text{fsun}(x_1,x_2,r,h)= \\ \begin{cases} -r \text{sat}\left(\left(1-\frac{k}{2}\right)\text{sgn}(y)-\frac{x_1+kx_2}{(k-1)h^2r},1\right), |y|>h^2r; \\ -r \text{sat}\left(x_2+\frac{y}{h},hr\right), |y|\leq h^2r. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中：r决定跟踪的速度，r越大，跟踪的速度越快；h为采样时间；x₁、x₂为状态变量；sgn(·)表示符号函数；fix(·)表示取整函数；sat(·)表示饱和函数。

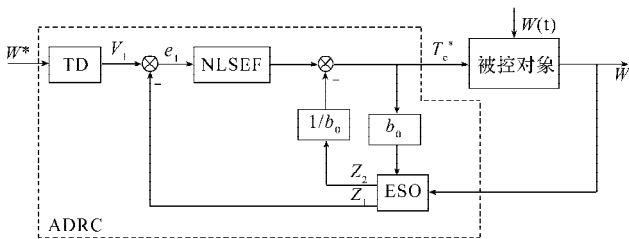


图1 基于ADRC速度调节器的系统框图

Fig.1 The block diagram of speed controller Based on ADRC

2 基于ADRC的控制器设计

开关磁阻电机的运动方程为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e}{J} - \frac{T_L}{J} - \frac{B\omega}{J}, \quad (2)$$

式中：ω为转子角速度；J为转动惯量；T_e为电磁转矩；T_L为负载转矩；B为阻尼系数。

由此可见，J、T_L、B的变化均对控制精度产生影响。可以将这种影响看成扰动，把J的变化视为系统的内部扰动，把T_L和B的变化视为系统的外部扰动，将系统所受内外扰动总和记为w(t)，故式(2)可以表示为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e}{J} + w(t). \quad (3)$$

对于总扰动w(t)，只需由ESO估计出扰动随时间

变化的量，并将其补偿到控制量中即可。

以速度给定值ω*作为跟踪微分器的输入信号，采用fsun函数设计一阶跟踪微分器，其数学模型如式(4)所示，

$$\dot{v}_1 = \text{fsun}(v_1 - \omega^*, r, h). \quad (4)$$

TD将根据被控对象的承受能力合理安排过渡过程，输出给定转速ω*的跟踪值v₁，从而解决了系统超调与快速性之间的矛盾。

取电机的实际转速ω为输入信号，通过二阶扩张状态观测器处理后，得到实际转速ω的观测值z₁和系统所受总扰动的估计值z₂。ESO方程为

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - \omega, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \text{fal}(e, 0.5, \delta) + b_0 u, \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \text{fal}(e, 0.25, \delta). \end{cases} \quad (5)$$

式中：β₁、β₂为反馈增益，其取值影响ESO的收敛速度，β₁一般取积分步长的倒数，β₂的取值一般比β₁高1~2个数量级^[6]；b₀为补偿因子；fal为非线性函数，其表达式为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta; \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (6)$$

其中：e为误差信号；α为滤波因子；δ表示线性区间的宽度，一般取值为0.01左右。

由给定转速ω*的跟踪值v₁和实际转速ω的观测值z₁得到状态误差v₁-z₁。采用fsun函数构成非线性状态误差反馈控制律

$$u_0 = -\text{fsun}(v_1 - z_1, r_1, h), \quad (7)$$

再由ESO实时估计出的扰动z₂进行补偿，得到最终的输出控制量为

$$T_e^* = u_0 - \frac{z_2}{b_0}. \quad (8)$$

3 仿真与结果分析

本文采用Matlab/simulink对ADRC控制器的SRM调速系统进行了仿真实验^[7-8]，分别对电机空载启动、突加负载、转动惯量变化等情况下的转速波形，带负载运行下的转矩波形进行了仿真。并与相同情况下的PI调节进行了仿真结果对比。样机为三相6/4 SRM，额定功率为60 kW，B=0.02 N·m·s，J=0.005 kg·m²。

图2是电机空载运行、给定转速为方波条件下，采用自抗扰控制所得到的转速跟踪波形。

由图2可以看出，实际转速能够很好地跟踪给定

值, 整个转速调节过程中超调小、响应快, 具有良好的动态性能。

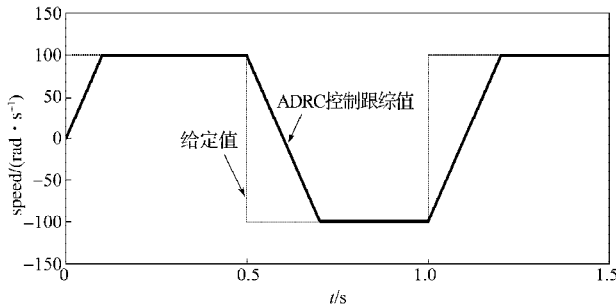


图2 转速跟踪波形

Fig. 2 Speed tracking waveform

当给定电机转速为 100 rad/s、负载转矩由 0 突变为 12 N·m 时, 基于 PI 调节器的转速波形如图 3 所示, 基于 ADRC 调节器的转速波形如图 4 所示。

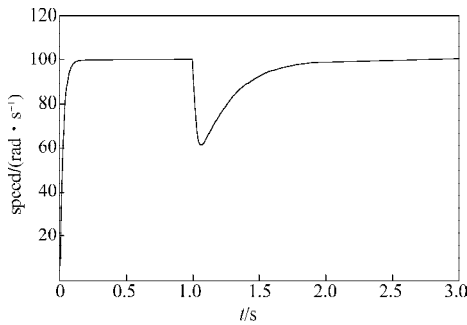


图3 基于PI调节器下的转速波形

Fig. 3 The speed waveform based on PI controller

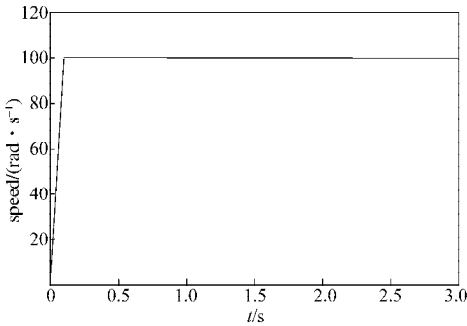


图4 基于ADRC调节器下的转速波形

Fig. 4 The speed waveform based on ADRC controller

对比图 3、图 4 可知, 电机空载启动时的转速响应均较快, 在 0.1 s 时就跟踪上了给定转速, ADRC 调节器的优势不明显。在负载转矩突变时, 基于 PI 调节下, 转速下降了 40% 左右, 且经过 1.2 s 后才重新回到稳态; 而基于 ADRC 调节下, 转速略有下降, 经过 0.02 s 即回到稳态。由此可以看出, ADRC 动态响应快、抗干扰能力强。

空载情况下, 给定转速为 100 rad/s, 基于 PI 调节器的转动惯量变化前后的转速波形, 如图 5 所示, 基于 ADRC 调节器的转动惯量变化前后的转速波形如图 6 所示。

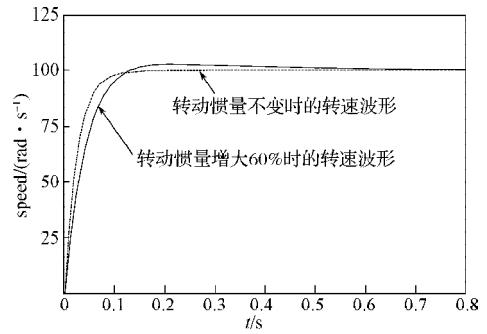


图5 基于PI调节器, 转动惯量变化前后的转速波形

Fig. 5 The speed waveform before and after the moment of inertia changes based on PI controller

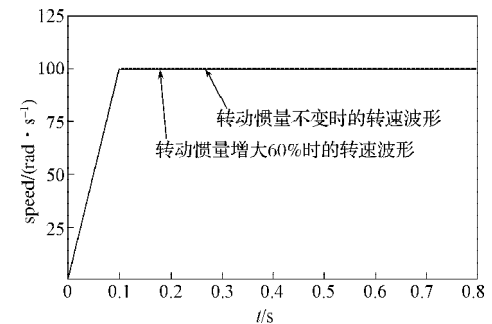
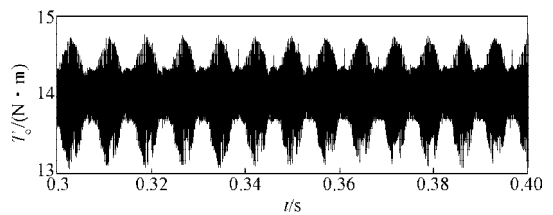


图6 基于ADRC调节器, 转动惯量变化前后的转速波形

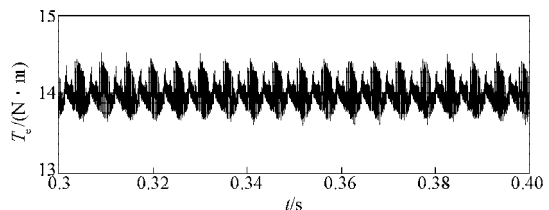
Fig. 6 The speed waveform before and after the moment of inertia changes based on ADRC controller

从图 5 可以看出, 基于 PI 调节器下, 系统动态响应明显变差, 上升时间由原来的 0.10 s 变为 0.14 s, 且出现超调; 由图 6 可以看出, 基于 ADRC 调节器下, 上升时间略有增大, 系统出现小幅超调, 但整体性能基本上保持不变, 可见自抗扰控制对系统参数变化具有很强的鲁棒性。

图 7 是负载转矩为 12 N·m 时不同控制方式下的转矩波形。



a) 基于PI调节器下的转矩波形



b) 基于ADRC调节器下的转矩波形

图7 负载转矩为 12 N·m, 不同控制方式下的转矩波形

Fig. 7 The torque waveform for different control methods at load torque of 12 N·m

从图7中可以看出, 给定负载转矩为 $12 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时, PI调节器下的转矩脉动范围是 $13.1\sim 14.8 \text{ N}\cdot\text{m}$; ADRC调节器下的转矩脉动范围是 $13.7\sim 14.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩脉动可以保持在 $\pm 0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以内。由此可见, 在抑制转矩脉动方面, 自抗扰控制比传统的PI调节器效果更好一点。

4 结语

本研究将自抗扰控制技术应用到开关磁阻电机调速系统中, 设计了自抗扰速度调节器, 并通过仿真分析验证了设计的有效性。仿真结果表明: 与传统的PI控制方式相比, 自抗扰控制增强了系统对各种扰动的鲁棒性, 有效地抑制了转矩脉动, 大大改善了系统的调速性能。

参考文献:

- [1] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-13.
Wu Hongxing. The Theory and Control Technology of Switched Reluctance Motor[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 1-13.
- [2] Bolognani S, Zigliotto M. Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1996, 32(5): 1063-1068.
- [3] Ehsani M, Rahman K M, Gopalakrishnan S, et al. Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at all Operational Regimes Using Neural Network[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2001, 37(3): 904-913.
- [4] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 255-262.
Han Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 255-262.
- [5] 孙彪, 孙秀霞. 离散系统最速控制综合函数[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 473-477.
Sun Biao, Sun Xiuxia. Optimal Control Synthesis Function of Discrete-Time System[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 473-477.
- [6] 文建平, 曹秉刚. 无速度传感器的内嵌式永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 58-62.
Wen Jianping, Cao Binggang. Active Disturbance Rejection Control Speed Control System for Sensorless IPMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 58-62.
- [7] 宋桂英, 孙鹤旭, 郑易, 等. 开关磁阻电动机直接转矩控制的研究[J]. 电气传动, 2004, 35(5): 9-11.
Song Guiying, Sun Hexu, Zheng Yi, et al. Research on DTC of Switched Reluctance Motor[J]. Electric Drive, 2004, 35(5): 9-11.
- [8] 刘英培. PMSM直接转矩控制方法及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Liu Yingpei. Research on Direct Torque Control Methods and Experiment of PMSM[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

(责任编辑: 申剑)