

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.01.020

开关磁阻电机的模糊自适应简化控制

马云龙, 章 玮*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决开关磁阻电机运行中存在的强耦合、非线性等问题,将模糊自适应控制技术应用到开关磁阻电机调速控制中。通过分析运行中速度误差和误差增量对模糊控制输出量的影响,同时考虑到开关磁阻电机自身的特性,建立了带有校正因子的输出量与误差、误差变量之间的关系,在兼顾计算量和性能的基础上,提出了一种简化的校正因子选择方法,从而实现了根据运行条件在线改变模糊规则。同时,在一台 8/6 四相关关磁阻电机上分别采用传统 PI 控制和简化模糊自适应方法进行了试验验证。对比研究结果证明,简化的模糊自适应方法能够有效提高开关磁阻电机调速的鲁棒性。通过使用 Matlab 仿真,验证了校正因子对模糊控制的影响,简化的模糊自适应方法能够应用于不同的情况,具有较好的动静态性能。

关键词:开关磁阻电机;校正因子;模糊自适应控制

中图分类号:TH39;TM3;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)01-0093-04

Simplified self-adaptive fuzzy control of SRM

MA Yun-long, ZHANG Wei

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of coupling and nonlinearity of the switched reluctance motor (SRM) drives, the self-adaptive fuzzy control was investigated. After the analysis of the influences of errors and incremental errors in speed control, and the characteristics of SRM, the function between calibration factor and errors and incremental errors was established. A simplified method was presented to find the calibration factor to change fuzzy rules online, and its calculations and performances were also considered. The simulations were evaluated on Matlab. The simplified self-adaptive fuzzy control and PI control were tested on an 8/6 SRM. The results indicate that the robustness of the system can be improved with the simplified self-adaptive fuzzy control. The results indicate the influences of the calibration factor in fuzzy control, and the simplified self-adaptive fuzzy control's adaptabilities in different situations.

Key words: switched reluctance motor (SRM); calibration factor; self-adaptive fuzzy control

0 引 言

近年来随着电力电子和微电子技术的发展,开关磁阻电机 (SRM) 越来越受到关注。相对于其他电机,其具有结构简单、成本低廉、运行可靠、调速范围广、各相独立等特点,在航空、汽车等领域得到了大量应用。但是由于 SRM 特有的开关特性,在运行过程中伴随着较大的转矩波动,由此产生的严重的噪声和振动会对

SRM 的应用产生较大的制约^[1-3]。因此,国内外学者都对 SRM 的控制策略进行了很多研究。

模糊控制是一种不需要了解被控对象精确数学模型的智能控制方法,对被控对象参数变化不敏感,非常适合应用于 SRM 的控制。针对 SRM 的特点,学者们进行了很多关于模糊控制的研究,文献[4]研究了一种查表方式的模糊控制,在低成本的单片机上也有较好的性能;文献[5-6]对模糊 PI 控制进行了研究,得到

收稿日期:2013-09-04

作者简介:马云龙(1988-),男,新疆库尔勒人,主要从事开关磁阻电机调速方面的研究。E-mail:myl8858@zju.edu.cn

通信联系人:章 玮,女,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:weizhang@zju.edu.cn

了较好的性能。上述方法的模糊规则一旦选定无法更改,而模糊自适应能够根据不同场合实现在线改变模糊规则,该方法的核心在于校正因子的选择,对于校正因子的选择,文献[7-8]分别采用了遗传算法和神经网络算法,都有很好的动态和静态响应;文献[9]中提出了一种校正因子进行模糊计算的方法,有较好的响应性能。但是上述方法在线改变模糊规则的同时,带来了较大的计算量,给模糊自适应的实现带来了困难。

本研究结合模糊自适应方法,讨论自适应因子对控制的影响,提出一种简化的校正因子选择方法,实现根据特定场合在线改变模糊规则,通过仿真和实验验证模糊自适应控制方法对 SRM 调速控制具有良好的性能。

1 开关磁阻电机控制模型

1.1 系统框架

以 8/6 为例的 SRM 控制框图如图 1 所示,基本的控制方法采用 PWM 斩波控制。

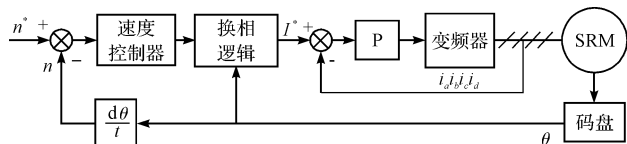


图 1 SRM 控制框图

为了使控制更灵活,变流器拓扑结构采用四相不对称半桥结构,不对称半桥拓扑如图 2 所示。

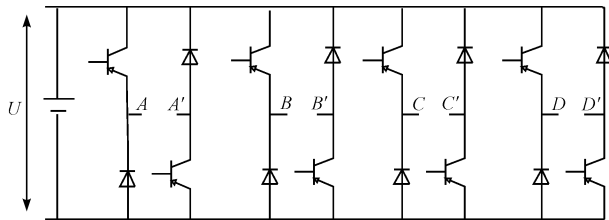


图 2 不对称半桥拓扑

1.2 模糊控制器设计

模糊自适应控制框图如图 3 所示。模糊自适应控制基本结构采取双输入单输出的方式,其中输入量为误差 E ,误差的变化量 EC ,输出 U ,校正因子 α 。根据系统控制的要求选取不同的 α ,可以实现在线对模糊规则表的改变。

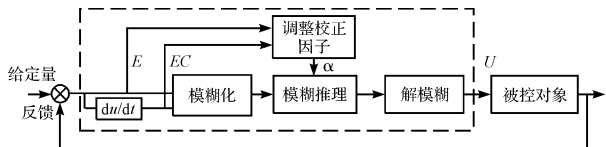


图 3 模糊自适应控制框图

模糊化的过程主要是将精确的输入量转化为模糊控制识别的模糊子集中。这里 E 、 EC 、 U 整数化的论域为 $\{\pm 7, \pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\}$ 。当输入量被转化到模糊论域后,需要转化到模糊子集才能进行模糊推理,此处 E 、 EC 、 U 都采用 7 档,即 $\{\text{负大}(\text{NB}), \text{负中}(\text{NM}), \text{负小}(\text{NS}), \text{零}(\text{Z}), \text{正小}(\text{PS}), \text{正中}(\text{PM}), \text{正大}(\text{PB})\}$,模糊子集可以通过隶属度函数描述,采用的三角形隶属度函数如图 4 所示。本研究采取的模糊推理方式为 Mamdani 模糊推理方法。

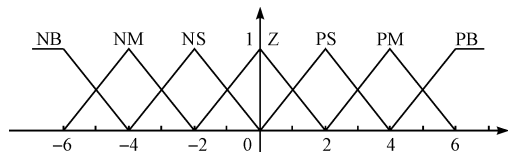


图 4 隶属度函数

带有校正因子的模糊规则一般可以用下式的控制规则表示:

$$U = [\alpha E + (1 - \alpha) EC], 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

输出量对计算结果进行取整运算,式中的 α 称为校正因子,通过改变 α 的值,可以改变偏差和偏差变化的不同加权程度,避免规则定义中过大的不平滑性^[10]。对于 SRM 的运行,由转矩平衡式可知:

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

在启动或者大范围速度变化时,调节器输出指令电流 I^* 一般输出值较大,导致输出电磁转矩 T_e 较大,而摩擦阻力 $B\omega$ 和负载转矩 T_L 的影响较小,加速过程可视为匀加速,而转矩脉动对转矩影响较小可视为有较大的 E 而 EC 近似不变,最优的控制量应选择较大的 α 值,随着转速的升高,误差 E 也在减小,控制量的 α 值不再增加,此过程中最优 α 可以近似与 E 呈线性关系;而在稳态运行时, T_e 可视为恒定值,而实际转矩会由于 SRM 的开关特性有一定抖动,可视为扰动量 ΔT_e ,转矩平衡式中其他量基本不变,因此,稳态运行时影响控制量较大的是 EC ,应选用较小的 α 值,为了简化运算,可认为最优的 α 值与 EC 呈线性关系,由此当扰动出现后 α 值变小,并保持该值。同时为了避免模糊规则表频繁改变,需要在变化中设置阈值,并且采用增量的形式,具体的表达式如下式所示:

$$\alpha(k) = \begin{cases} \alpha(k-1) - |k_1 EC|, & |E| < \varepsilon \text{ and } |EC| > \delta \\ \alpha(k-1) + |k_2 E|, & |E| > \sigma \\ \alpha(k-1), & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1, k_2 —需要保证校正因子的增量在 0~1 之间; $\sigma, \delta, \varepsilon$ —误差和误差偏差量的门阈值; $\alpha(0)$ —可以设为 0.5。

此时的模糊规则表如表 1 所示。

表 1 $\alpha=0.5$ 时模糊规则表

U	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
EC	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z
	NM	NB	NM	NS	NS	Z	PS
	NS	NM	NM	NS	Z	PS	PS
	Z	NM	NS	NS	Z	PS	PM
	PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM
	PM	NS	Z	PS	PM	PM	PB
	PB	Z	PS	PS	PM	PB	PB

本研究解模糊采用的是重心算法,即取隶属度函数曲线在连续域上与横轴所包围的面积的重心为模糊推理的输出值,如下式:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_i(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i(u_i)}$$

(4)

式中: $\mu(u_i)$ —输出元素的隶属度函数, u_i —输出函数的语言值。

2 仿真和实验结果

2.1 仿真验证结果

为了验证前述方法的正确性,本研究分别采用仿真和实验的方法对 SRM 进行调试。仿真采用 Matlab 的 Simulink 组件,被控对象为一台 8/6 的开关磁阻电机,驱动器采用四相不对称半桥。

仿真时设定条件如下:

开通角 0° ;关断角 30° ;给定转速为 500 r/min ;分别采用 $\alpha=0.2, 0.8$ 和 $f(E, EC)$, $\alpha=f(E, EC)$ 为式 (3) 所给定函数。

其中,3 种情况进行启动时不同 α 速度响应如图 5 所示。由图 5 可以发现,在启动时由于误差较大,对控制起主要影响的是 E ,因此 $\alpha=0.8$ 的速度响应速度最快,而 $\alpha=0.2$ 的上升最慢,而 $\alpha=f(E, EC)$ 性能介于二者之间。

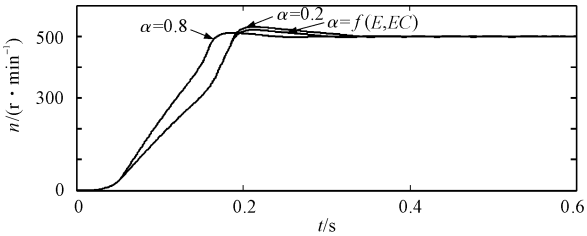
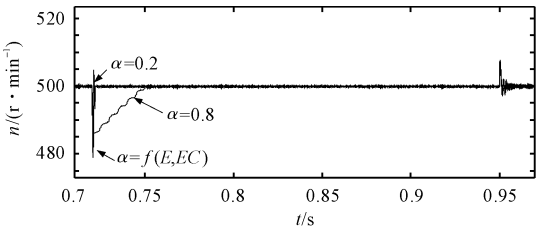


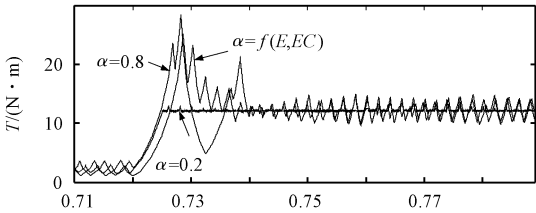
图 5 启动时不同 α 速度响应

为了验证不同 α 值对突加负载的响应,设置在稳定运行在 500 r/min 时,电机突加突卸负载时转速波形

如图 6(a) 所示,突加负载时转矩响应放大如图 6(b) 所示。从图 6 中可以发现,使用变校正因子的方法能够对扰动有很好的抑制作用。



(a) 稳定运行时加载速度响应

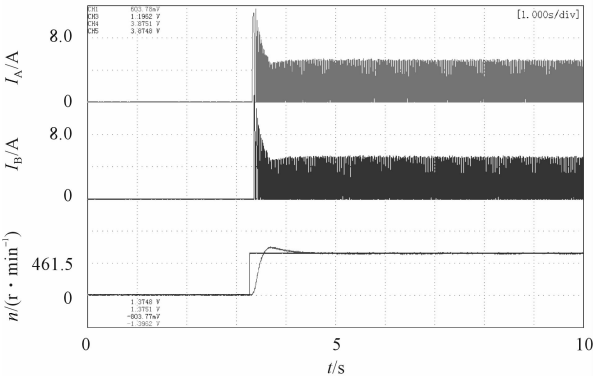


(b) 转矩响应

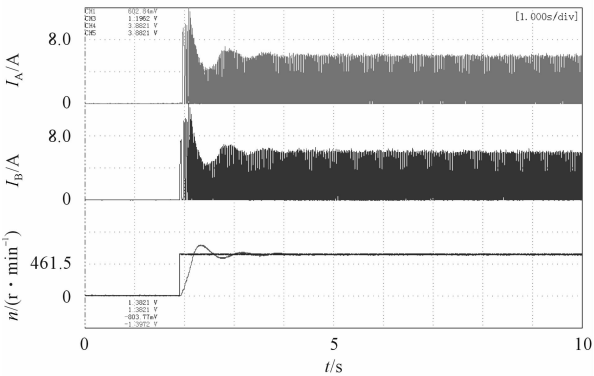
图 6 稳定运行时加载速度的响应及转矩响应

2.2 实验验证结果

实验采用 8/6 四相 SRM, 不对称半桥驱动电路。电机最大电感 $0.226\,03\text{ H}$, 最小电感 $0.028\,65\text{ H}$, 最大磁链为 $0.273\,44\text{ Wb}$, 额定转矩 $0.95\text{ N}\cdot\text{m}$, 额定转速 $1\,500\text{ r/min}$, 额定电压 132 V , 额定功率 150 W , 控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F28335, 光栅码盘线数为



(a) 模糊自适应启动波形



(b) PI 控制启动波形

图 7 模糊及 PI 波形

2 500线,4 倍频后使用。

实验时,母线电压为 30 V,从静止开始空载给定转速 600 r/min,其中速度给定和速度响应曲线采用 DA 输出滤波后显示,示波器截屏的时间刻度都为 1 s/div。PI 控制的速度给定及响应曲线和 A、B 两相的电流波形如图 7(a)所示,带有校正因子的模糊控制波形如图 7(b)所示。突加突卸负载时模糊自适应和 PI 控制的波形如图 8(a)、8(b)所示。对比可以发现模糊自适应方法具有较好的动态和静态响应。

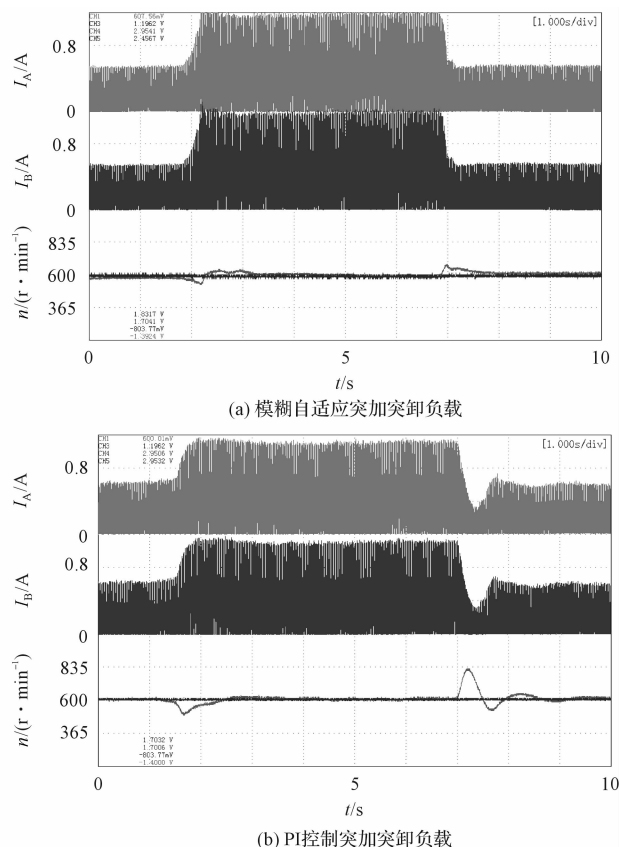


图 8 模糊自适应及 PI 控制突加突卸负载

3 结束语

针对 SRM 运行中的非线性和强耦合现象,本研究将模糊自适应控制应用到 SRM 调速控制中,通过仿真和实验,验证了带有校正因子的模糊自适应方法在 SRM

调速系统中有较好的动态和静态响应性能,对运行中开关特性造成的转矩波动有一定抑制作用。简化的校正因子选择方法兼顾了运算量和性能,实现了不同运行条件下的平稳切换。研究人员可以根据变化的需求,改变校正因子变化的系数,避免了模糊规则变化过快或者过慢的情况。同时笔者根据实际使用的情况设置了误差限,以避免采样等问题产生的小误差而引起系统的振荡现象。

参考文献 (References):

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[J]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [4] 王宏华. SR 电机模糊控制器设计研究[J]. 中小型电机, 2000,27(6):26-30.
- [5] TAHOUR A, AISSAOUI A G, MEGHERBI A C. Fuzzy PI control through optimization: A new method for PI control of switched reluctance motor[C]//Complex Systems (ICCS), 2012 International Conference on. Singapore:[s. n.], 2012: 1-7.
- [6] 孙建忠,白凤仙. 基于 DSP 的开关磁阻电机调速系统的模糊控制[J]. 电机与控制应用,2007,34(5):33-36.
- [7] 修杰,夏长亮. 基于遗传算法的开关磁阻电机自适应模糊控制[J]. 电工技术学报,2007,22(11):69-473.
- [8] MARSALINE B M, MARIMUTHU N S, SINGH N A. Optimizing the switching angles of SRM using adaptive neuro-fuzzy controller[C]// Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), 2007. ICTES. IET-UK International Conference on. 2007. Chennai, Tamilnadu, India:[s. n.], 2007:448-451.
- [9] 孙丹,贺益康,智大为. 基于非线性模型的开关磁阻电机自适应模糊控制[J]. 电工电能新技术,2001,20(4):9-13.
- [10] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

马云龙,章玮. 开关磁阻电机的模糊自适应简化控制[J]. 机电工程,2014,31(1):93-96.

MA Yun-long, ZHANG Wei. Simplified self-adaptive fuzzy control of SRM[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(1):93-96.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>