

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.016

开关磁阻电机混合模糊 PI 控制研究

李海瑞, 颜钢锋*

(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强非线性、多变量耦合、精确模型不易获得等问题,将传统模糊控制和 PI 控制技术综合应用到转速控制器的设计中。开展控制系统模型分析,建立控制量和被控对象之间的线性与非线性关系,提出了开关磁阻电机混合模糊 PI 控制方法;设计了基于 Ansoft 和 Matlab-simulink 的开关磁阻电机电力拖动系统仿真程序;研究了不同反馈误差情况下,混杂模糊控制器的控制行为和电机性能之间的关系,并对控制器镇定能力和电机动静态性能进行了评价,进行了实物验证试验。仿真和实验结果均表明,应用此种方法的开关磁阻电机调速系统动静态性能和鲁棒性都得到了有效提升。

关键词:开关磁阻电机;混合型模糊 PI;转速控制器

中图分类号:TM352;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0373-06

Hybrid fuzzy PI speed controller for switched reluctance motor

LI Hai-rui, YAN Gang-feng

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

Abstract: In order to solve the problems of strongly nonlinear, multivariable coupling and complexities of the exact analytical model for the switched reluctance motor(SRM), the traditional fuzzy and PI control methods were investigated. After the analysis of system model, the linearly and nonlinearly relationship were established between the plant and controller. A method called hybrid fuzzy PI arithmetic was presented to design a speed controller. A simulation program of switched reluctance drive system (SRD) based on Ansoft and Matlab-simulink was developed. The relationship between behavior of hybrid fuzzy PI controller and SRM performance was studied under different feedback error circumstances. The controller stabilization performance and SRM static/dynamic performance were evaluated at the same time. The physical verification experimental results indicate that both static/dynamic performance and robustness of SRD are improved.

Key words: switched reluctance motor(SRM); hybrid fuzzy PI controller; ASR

0 引 言

开关磁阻电机具有结构简单,易于散热;各相独立,容错运行能力强,可靠性高,鲁棒性强;易实现四象限运行等一系列优点。电机模型提出之初,便吸引了大量专家学者进行研究。但由于电机本体双凸极结构,使得当定子、转子凸极接近或远离时,磁边缘效应会引起严重的切向转矩脉动和径向振动噪声,造成了电机模型的严重非线性;为了提高电机的转矩体积比,

一般将 SRM 设计工作于深度磁饱情况下^[1-3]。这使得磁链和转矩都是转子位置与定子电流的强耦合非线性函数,转矩-电流-转子位置的显式函数关系不易获取,且不可逆,也就是说对于给定转矩所对应的定子参考电流无解析解^[4]。因此,利用常规的控制方法,很难获得满意效果。

模糊控制在数学本质上属于非线性控制,具有很强的自适应能力和鲁棒性,在无需知道电机的精确模型情况下,便能得到良好的控制效果,且控制方案易于

收稿日期:2014-10-09

作者简介:李海瑞(1989-),男,河北沧州人,主要从事电力电子与电力传动方面的研究. E-mail:lhrdls2012@163.com

通信联系人:颜钢锋,男,教授,博士生导师. E-mail:ygf@zju.edu.cn

实施,因此采用模糊控制等智能控制手段设计 SRM 控制器,是解决模型不确定和非线性控制问题的有效途径之一^[5]。混合型模糊 PI 控制器,不仅可以消除极限环振荡,而且完全消除了系统的静态误差,使整个系统成为无差的模糊控制系统。

本研究将传统模糊控制和 PI 控制技术综合应用到转速控制器的设计中。

1 开关磁阻电机数学模型

1.1 电机运行原理

笔者研究的 SRM 如图 1 所示,它是一台 8/6 极四相内转子电机,转子和定子均由硅钢片垛叠而成,双凸极性质明显,绕组完全位于定子侧,转子结构简单,保证了高速运行的可靠性。

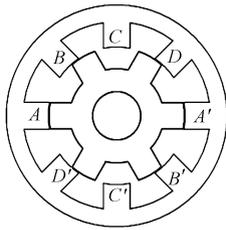


图 1 8/6 极开关磁阻电机截面图

当转子位于图 1 所示位置时,A 相电感达到峰值,该相电流应已复位,防止产生局部制动转矩,而 B 相励磁出力,转子逆时针转动一个步距角。定子绕组依次顺时针励磁,顺序为 D - > A - > B - > C - > D;转子便可连续逆时针转动。定子励磁经历一个电周期,转子转过一个齿距角。

1.2 电机数学模型

由于开关磁阻电机磁路的严重非线性,使得其数学模型也将是一个多变量、强耦合、时变、非线性的复杂方程组。

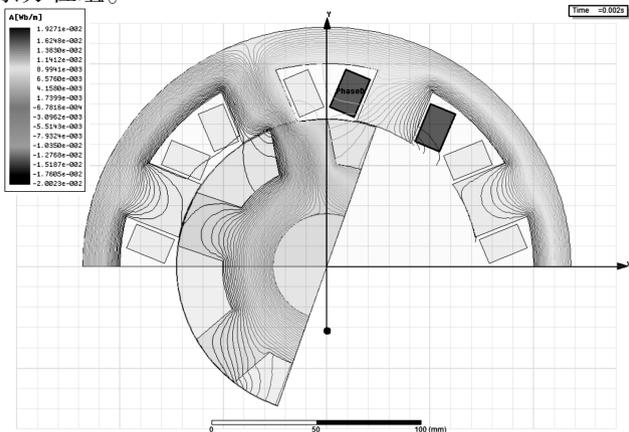


图 2 D 相励磁时磁力线分布情况

但是从控制角度,可将开关磁阻电机视为一个电气子系统和机械子系统的级联。实际中,两个子系统带宽相差数十倍到数百倍^[6],所以从频域上可以将其视为两个动态独立系统,机电耦合靠磁场联系。这给控制系统的设计和分析带来了方便。

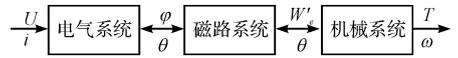


图 3 开关磁阻电机逻辑框图

其中,电气系统的数学描述为:

$$u_k = Ri_k + \frac{d\varphi_k(i_k, \theta_k)}{dt}, k = 1, 2 \dots m \quad (1)$$

机电耦合磁系路统系统数学描述为:

$$T_k(i, \theta) = \frac{\partial W'_e(i, \theta)}{\partial \theta} \Big|_{i=const}, k = 1, 2 \dots m \quad (2)$$

而磁共能表达式如下:

$$W'_e(i, \theta) = \int_0^i \varphi_k(i, \theta) di \Big|_{\theta=const} \quad (3)$$

$$\varphi_k(i, \theta) = \varphi_k(i_1, i_2 \dots i_m, \theta), \quad (4)$$

如果实际应用中,有足够充分的约束条件,可以忽略不同相之间磁路耦合关系,则式(4)可简化为:

$$\varphi_k(i, \theta) = \varphi_k(i_k, \theta), \quad (5)$$

机械系统数学描述为:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(T_k(i, \theta) - B\omega - T_l) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:J—机械系统转动惯量;B—摩擦系数;T_l—负载转矩。

式(1~6),构成了开关磁阻电机调速系统完整的数学描述^[7]。

2 开关磁阻电机控制系统模型

整个调速系统框图如图 4 所示。

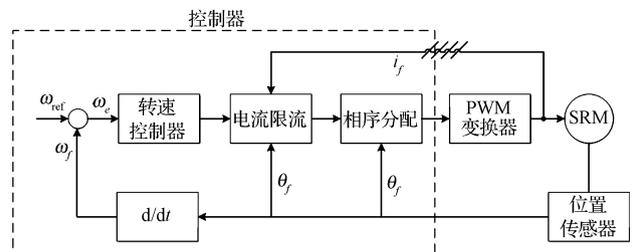


图 4 整个调速系统框图

转速控制器为单输入单输出系统,输入为给定转速和反馈转速的差,输出为控制量;电流限流为最大电流抑制单元,防止启动时,电流过大烧毁 PWM 变换器;相序分配单元根据转子位置,合理分配每相励磁区

间;PWM 变换器根据驱动信号,将直流母线能量分配至各相绕组。

2.1 主回路驱动拓扑及控制

电机驱动采用不对称半桥拓扑如图5所示。图5中用有铁心的可变电感表征电枢的磁阻可变特性。该拓扑虽然开关管利用率不高,但控制灵活各相完全独立。PWM 控制策略可以选择如下方式:

- (1) S_1, S_2 同时开关进行 PWM 斩波, $0.5 < D < 1$;
 - (2) S_2 常通, S_1 进行 PWM 斩波, $0 < D < 1$;
 - (3) S_1 常通, S_2 进行 PWM 斩波, $0 < D < 1$;
- 其中: D —占空比。

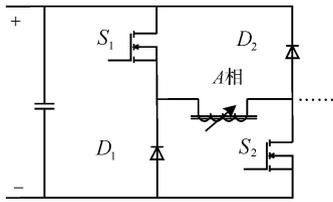


图5 开关磁阻电机 A 相主回路驱动拓扑

PWM 控制策略,电流变化率大,开关回路处理不当易有开关干扰,母线电压较高时尤其明显;PWM 控制策略2和3,均有因开关频率不一,引起的驱动板局部过热的问題,可选某一周期 T ,轮流使用 PWM 控制策略2和3。以上3种均为定频斩波方式,另外,也可以电流为控制目标,采取变频斩波方式,如电压 PWM 配合过流抑制、电流滞环控制等^[8-9]。

2.2 转速外环模糊控制器

本研究将常规模糊控制用于电机控制中,由于控制程序时间复杂度和空间复杂度的约束,常采用 E 和 EC 作为模糊控制器的输入,类似于线性控制理论中的 PD^[10],因而可获得良好的动态性能,但无法消除净差,保证稳态特性,故引入模糊积分环节。混合型模糊 PI 转速控制器如图6所示。

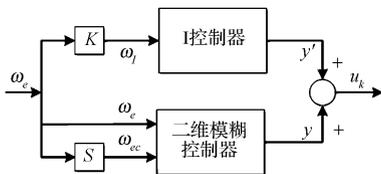


图6 混合型模糊PI转速控制器

其中二维模糊控制器结构如图7所示。

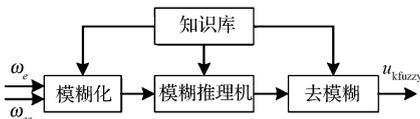


图7 二维模糊控制器

(1)在进行模糊化之前需将输入、输出变量进行尺度变换,使之落入模糊控制器的基本论域内。此处误差、误差变化率以及控制量输出 $\omega_e, \omega_{ec}, u_{kfuzzy}$ 的离散论域均取为 $S = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。而实际应用中:

- 转速误差范围为: $-1\ 500\ \text{r/min} \sim 1\ 500\ \text{r/min}$;
 - 转速误差变化率范围为: $-100\ \text{r/min} \sim 100\ \text{r/min}$;
 - 控制量范围为: $-0.15 \sim 0.15$;
- 设输入变量范围为 $x \in [a, b]$, 则变换规则为:

$$x' = \frac{12}{b-a} x - \frac{a+b}{2} \quad (7)$$

输出控制量变换规则为:

$$y = y' \frac{u_H - u_L}{2n} + \frac{u_H + u_L}{2} = \frac{y'}{40} \quad (8)$$

式中: $x', y' \in [-6, 6]$ 。

(2)将经过论域变换的输入变量模糊化。将基本论域模糊分割为7个模糊集合:正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZE)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)。误差、误差变化率以及控制量隶属度函数采用如图8所示的三角形函数。

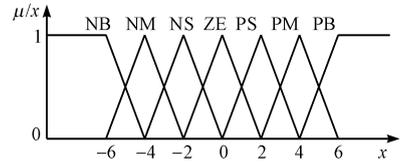


图8 模糊集合划分及隶属函数

(3)模糊控制规则库是模糊控制设计的关键,本研究采用的模糊规则是根据系统对阶跃响应的特点及其与控制变量的关系得出的^[11]。规则表如表1所示。

表1 模糊控制规则表

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

(4)推理机采用 mamdani 推理模型如图9所示。解模糊采用加权平均法($A/A'B/B'C/C'$ 属于基本论域模糊集合)。

解模糊加权平均法:

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^n u_{B'}(\mu_j) \mu_j}{\sum_{j=1}^n u_{B'}(\mu_j)} B'j \quad (9)$$

单规则多前提: if E is A and EC is B, then U is C

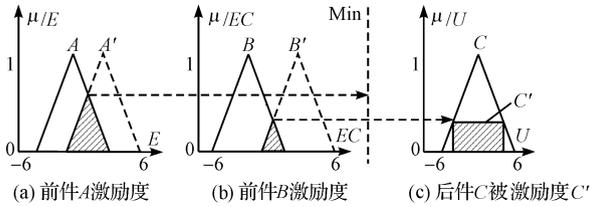


图 9 推理机(Mamdani 模糊蕴含和 Max-Min 复合运算)

式中: $u_{B'}(\mu_j)$ —输出量模糊集合 B' 中, 第 j 个元素 μ_j 所对应的隶属度。得到的控制量 y' 经式(8)便可求得实际控制范围内的控制量 y 。

另外, 该设计有 49 条规则, 在模糊化、模糊推理和解模糊等整个过程中将会由于计算繁琐而严重增加控制程序的时间复杂度, 如果在线进行可能无法满足 SRM 调速系统的实时性要求。因此, 笔者采用离线计算, 生成模糊控制总表的方式获得控制量。模糊控制总图如图 10 所示。

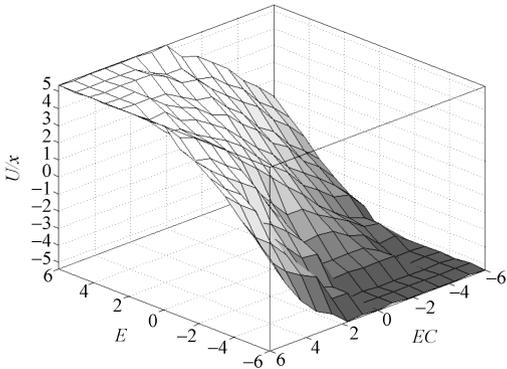


图 10 模糊控制总图

3 仿真与实验结果

本研究采用 Ansoft + Matlab_simulink 仿真和实验的方法对整个调速系统进行验证。

3.1 仿真与验证

(1) 从 Ansoft 中获得电机的磁链-位置-电流关系数据。利用三角形三次插值, 得到的磁链特性曲线如图 11 所示。

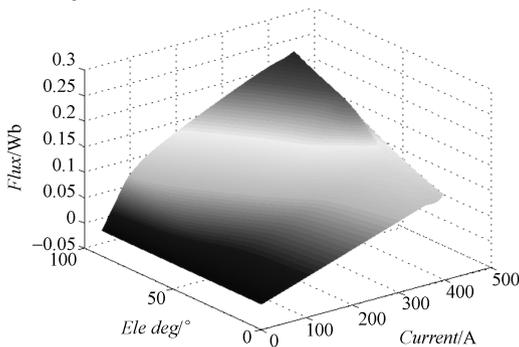


图 11 SRM 磁链特性

(2) 由公式(2,3,5) 并结合插值和曲线拟合的方法得到的转矩特性如图 12 所示。

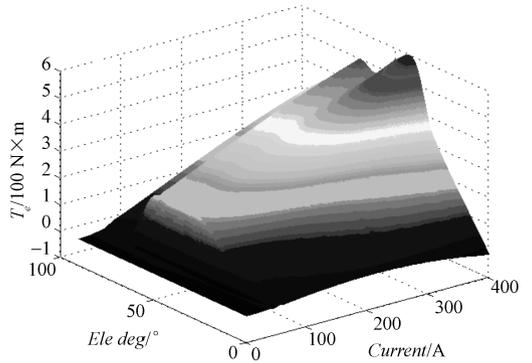


图 12 SRM 转矩特性

(3) 由所得数据建立实验用 SRM 在 Simulink 环境下的仿真模型^[12], 并搭建混合型模糊 PI 控制算法仿真环境如图 13 所示。

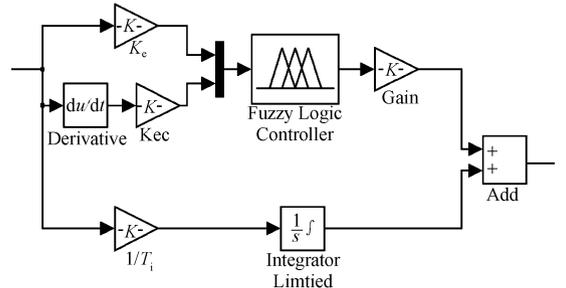


图 13 混合型模糊 PI 控制器仿真

仿真参数设置为: 开通角 30° , 关断角 52.5° (A 相对齐位置为 0°); 母线电压 $V_{bus} = 514 \text{ V}$ 。给定转速 $n = 1500 \text{ r/min}$, 负载转矩 $150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

混合模糊 PI 控制 SRM 启动过程如图 14 所示。

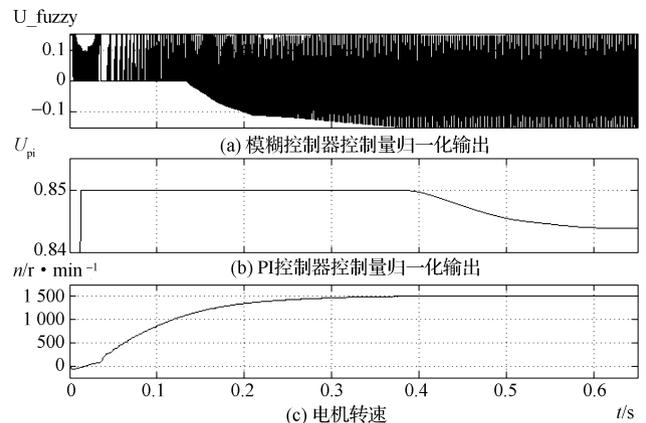


图 14 混合模糊 PI 控制 SRM 启动过程

由图 14 可知, 当转速反馈误差较大时, PI 调节器饱和输出, 不参与动态调节过程; 而模糊控制器输出动态变化, 快速补偿非线性误差, 保证了电机的动态性能, 电机转速曲线上升时间 $T_r = 0.3 \text{ s}$, 无超调; 稳态

时,PI退饱和参与调节,保证稳态精度,无静差。

不同控制模式下加卸载系统响应如图15所示,控制模式和负载跳变设置为:模糊控制模式下,负载变化100%—33%—100%;混合模糊控制模式下,负载变化100%—33%—100%。由图15可知,当只有模糊控制器作用时,转速阶跃响应稳态误差 $n_{err} = -100 \text{ r/min}$ (转速给定 $n_{ref} = 1500 \text{ r/min}$),负载变化时,输出转速稳态误差 $\Delta n = 120 \text{ r/min}$;而当系统切换为混合模糊PI控制模式时,输出转速在0.2 s内迅速收敛于给定转速 n_{ref} ,且在加卸载时,至多经过0.4 s进入无差稳态。由此可见,采用混合模糊PI控制的SRM调速系统有良好的动静态性能。

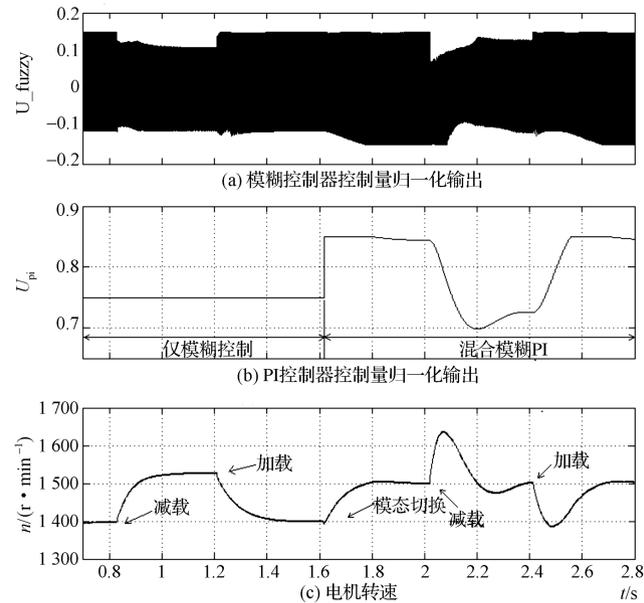


图15 不同控制模式下加卸载系统响应

将转速给定设为 500 r/min ,负载为 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。电流限流点为 400 A ,滞环宽为 $\pm 50 \text{ A}$,电流采样率和开关频率均为 20 kHz 。

单独PI作用下D相绕组电流电压如图16所示。

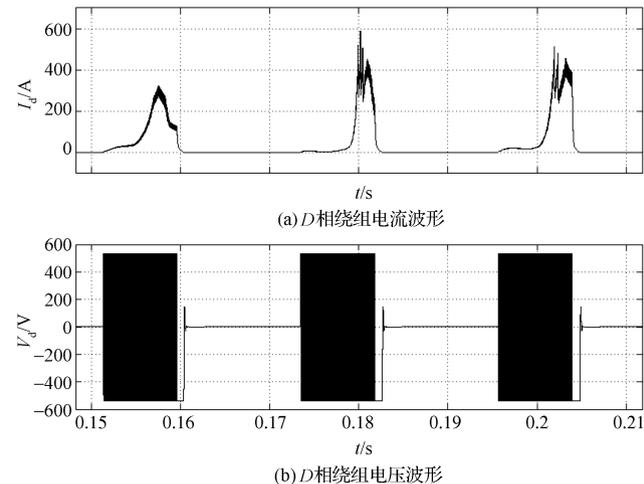


图16 单独PI作用下D相绕组电流电压

从图16的电流波形可以看出,在PI算法作用下,相电流响应波形可重复性差,PI调节器已经不能完全适应SRM的非线性。

在混合模糊控制下D相电流电压如图17所示。

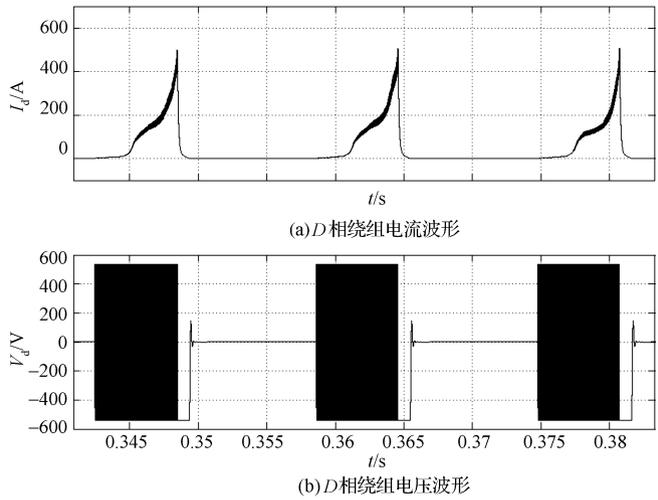


图17 混合模糊PI作用下D相绕组电流电压

由图17可见,励磁电流的一致性很好,说明了控制方法用于SRM控制的有效性。但是混合模糊PI控制仍不能很好地镇定由于磁饱和引起的电流过冲,故如图5所示仍需限流单元的配合。

3.1 实验与验证

测功平台加载装置为CZ-200型磁粉制动器,SRM电机与测功机间通过法兰、减速齿轮和传动轴联接。为了降低母线电压过高引起的开关干扰对系统的影响,使 $V_{bus} = 100 \text{ V}$,本研究采用2.1节中第2种斩波方式。

实验用SRM换向信号仅由光电传感器提供,采用M/T法测速,转速数据由串口输出,上位机采用Matlab编写串口程序接收并显示。仿真和实验数据如图18~20所示。

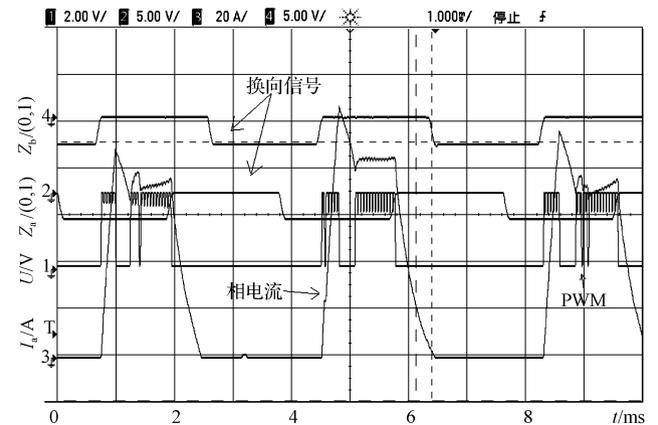


图18 PI与电流滞环控制模式下换向信号、PWM与相电流波形

由图18~20可知,应用混合模糊PI控制,可相对

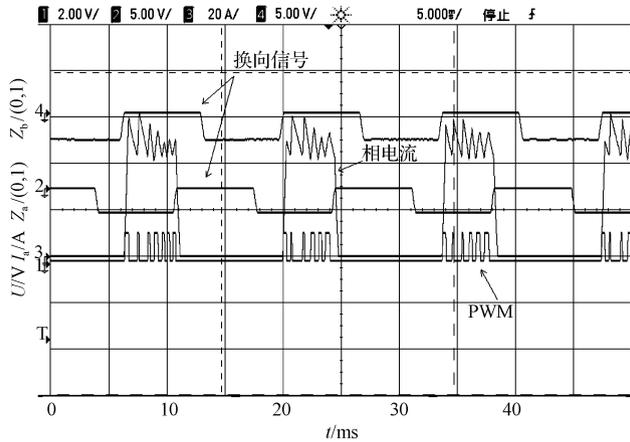


图 19 混合模糊 PI 与电流滞环控制模式下换向信号、PWM 与相电流波形

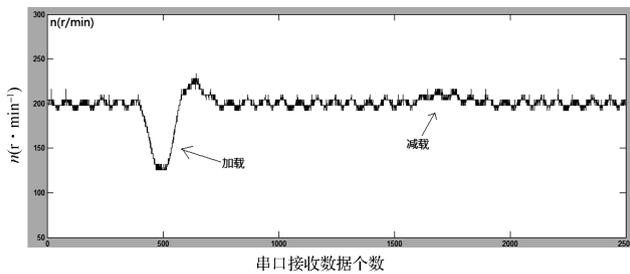


图 20 系统加卸载时转速响应

有效地解决 SRM 的非线性问题,并使 SRM 调速系统获得较好的动、静态性能。

4 结束语

针对开关磁阻电机的非线性控制问题,本研究提出了混合模糊 PI 控制方法,仿真和实验证明了该方法的有效性。

另外,利用查表法实现模糊控制,降低了对控制器的运算能力的要求,以空间成本换取时间开销,非常适合应用通用型 RISC 架构的 MCU 对 SRM 调速系统进行实时控制。所以,在成本敏感而对调速性能又有一定要求的 SRM 应用场合,本研究提出的调速系统设计方法有很大优势。

参考文献 (References):

- [1] RAFAEL S, SANTOS P J, PIRES J. An Adaptive PID Speed Controller for an 8/6 Switched Reluctance Machine [C]. Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, 2013:13-17.
- [2] WEN Hao, PAN Zai-ping. A Novel Dead-beat Torque Control of Switched Reluctance Machines [C]. Electrical Machines and Systems (ICEMS), Beijing: 2011 International Conference on, 2011:20-23.
- [3] KRISHNAN R. Switched Reluctance Motor Drives-Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [4] SAHOO S K, PANDA S K, XU Jian-xin. Indirect torque control of switched reluctance motors using iterative learning control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1):200-208.
- [5] 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.
- [6] SAHOO S K, PANDA S K, XU J X. Application of Spatial Iterative Learning Control for Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor Drive [C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007:24-28.
- [7] 温 浩. 开关磁阻电机调速系统研究与设计 [D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2012.
- [8] 王双红. 开关磁阻电机控制系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2005.
- [9] 马鹏宇, 王洪诚, 王秀娟. 基于粒子算法实现的开关磁阻电机调速系统 [J]. 兵工自动化, 2013(10):86-89.
- [10] 许 力. 智能控制与智能系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 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.
- [12] 严 利. 基于 Matlab/SIMULINK 开关磁阻电机非线性建模方法研究与实践 [D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2005.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

李海瑞, 颜钢锋. 开关磁阻电机混合模糊 PI 控制研究 [J]. 机电工程, 2015, 32(3):373-378.

LI Hai-rui, YAN Gang-feng, Hybrid fuzzy PI speed controller for switched reluctance motor [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(3):373-378.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>