

基于模糊自整定 PID 开关磁阻电机速度控制系统的建模与仿真研究

陆文龙, 张晓江, 张涛

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 在 Matlab 2008a/Simulink 环境下, 建立了三相(6/4 极)的开关磁阻电机的速度控制系统动态仿真模型, 对基于模糊自整定 PID 的开关磁阻电机速度控制系统进行了仿真研究, 并与基于常规 PID 的开关磁阻电机速度控制系统仿真结果进行了对比。对比结果表明, 采用模糊自整定 PID 控制算法, 系统速度控制性能明显优于常规 PID 控制算法。

关键词: 开关磁阻电机; 模糊自整定 PID 控制; 速度控制系统

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)23-0082-03

Modeling and simulation on SRM speed control system based on fuzzy self-tuning PID

Lu Wenlong, Zhang Xiaojiang, Zhang Tao

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A dynamic simulation model for SRM (Switched Reluctance Motor) speed control system was established in the environment of Matlab 2008a/Simulink, and the SRM speed control system based on fuzzy self-tuning PID was studied and simulated, and the simulation results were compared with that of SRM speed control system based on conventional PID, which indicated that the performance of SRM speed control system by fuzzy self-tuning PID control algorithm is obviously better than that by conventional PID control algorithm.

Key words: switched reluctance motor; fuzzy self-tuning PID control; speed control system

开关磁阻电机具有结构简单、可靠性高、成本低、功率电路简单可靠等优点。但是由于开关磁阻电机的双凸极结构和开关形式的供电电源使其成为强耦合的非线性系统, 采用常规的 PID 控制算法已经不能达到理想的控制效果。而模糊控制是一种典型的智能控制方法, 在速度控制应用方面, 对于参数的非线性变化有着较强的适应性。本系统为了提高开关磁阻电机的速度控制性能, 引用了模糊算法和 PID 算法相结合的控制算法, 即模糊自整定 PID 控制算法, 充分利用两者的优点, 从而使 SRM 速度控制系统获得很好的控制效果。

1 开关磁阻电机系统的数学模型

常用的求解 SRM 的基本方程的方法有三种: 线性化法、准线性化法和非线性化法。本文采用线性化法对 SRM 各变量的解析式求解, 其电路方程、磁链方程、机

械方程、转子角速度、机电联系方程如式(1)~式(5)所示^[1]:

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

$$\psi_k = L_k(\theta_k, i_k) i_k \quad (2)$$

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T_e = \frac{\partial W'_m(\theta, i_1, i_2, \dots, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

式中, U_k 为第 k 相电机绕组电压; i_k 为第 k 相绕组的电流; R_k 为第 k 相绕组的电阻; ψ_k 为 k 相绕组的磁链; ω 为转子角速度; D 表示粘性摩擦系数; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩。

由于开关磁阻电机运行时内部磁路高度非线性, 电

《微型机与应用》2011 年第 30 卷第 23 期

技术与方法 Technique and Method

磁关系非常复杂,为了探究电机内部基本的电磁关系,需要对磁阻电机进行线性分析。在线性模型中,为了简化分析作出了以下假设^[1]:不计磁路的饱和影响,绕组的电感和电流的大小无关;忽略磁路的非线性和磁通边缘效应;忽略铁芯的磁滞效应和涡流效应,忽略所有功率损耗;半导体开关器件为理想开关,开关动作是瞬间完成的;电机转速恒定;电源电压恒定。

图1所示为理想线性模型中,电机的定子绕组电感随转子位置角周期性变化的关系。

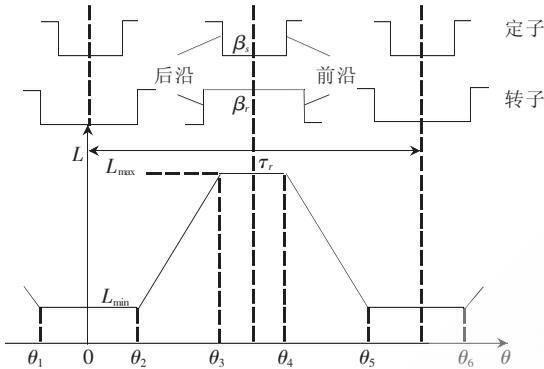


图1 线性模型中相电感与转子位置角的关系

从图1中可以看出,SRM的基于线性模型的绕组电感的分段解析式为:

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) \\ K(\theta - \theta_2) + L_{\min} & (\theta_2 \leq \theta < \theta_3) \\ L_{\max} & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & (\theta_4 \leq \theta < \theta_5) \end{cases} \quad (6)$$

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_3 - \theta_2} \quad (7)$$

由式(6)对式(5)进行简化:

$$T_e = \frac{\partial W'_m(\theta, i)}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}} \quad (8)$$

$$W_m = W'_m = \frac{1}{2} i \psi = \frac{1}{2} L i^2 \quad (9)$$

由式(6)、式(8)、式(9),可得:

$$T_e = \begin{cases} 0 & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) \\ \frac{1}{2} K i^2 & (\theta_2 \leq \theta < \theta_3) \\ 0 & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) \\ \frac{1}{2} K i^2 & (\theta_4 \leq \theta < \theta_5) \end{cases} \quad (10)$$

2 开关磁阻电机控制系统建模

常规的PID控制器的算法简单、可靠性高、稳定性好,而且设计比较容易、适应面宽广,在过程控制中应用非常广泛。但是,在工业过程中,被控对象复杂多变且干扰因素复杂,要获得满意的控制效果,就需要不断地对PID参数进行实时调整。而这些参数有时变化无常,往往没有确定不变的数学模型和规律可循,而使用模糊控制器来调节PID参数则是可行且非常实用的选择。模糊控制器可以充

分利用操作人员进行实时非线性调节的成功实践操作经验,同时充分发挥PID控制器的优良控制作用,最终使整个系统达到最佳控制效果。文本引用了这种将模糊控制和PID控制结合的控制算法即模糊自整定PID控制。

2.1 隶属函数与控制规则的确定

模糊自整定PID控制器的原理是把输入PID控制器的偏差e和偏差变化率e_c同时输入到模糊控制器中,经过模糊逻辑推理规则得出3个修正参数ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d,分别输入到PID控制器中,对PID控制器的参数K_p、K_i、K_d进行实时在线修正,计算方法为ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d分别与PID控制器初始值K'_p、K'_i、K'_d相加后再输入到PID控制器,即:K_p=K'_p+ΔK_p;K_i=K'_i+ΔK_i;K_d=K'_d+ΔK_d^[2]。以此来满足PID控制器在不同时刻所需参数的要求,使之具有良好的控制性能。

本文将给定转速值和实际输出转速值的差值e及其变化率e_c作为模糊自整定PID控制器的输入变量,经量化因子转换至输入变量论域范围内,之后根据相应的隶属函数转换到模糊控制器输入论域中。偏差e、偏差变化率e_c及模糊输出ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d论域{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6},各变量模糊集均为:{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},记为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}。

ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d的模糊控制规则表,如表1、表2、表3所示^[3]。

表1 ΔK_p的模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i的模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d的模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

技术与方法

Technique and Method

2.2 量化因子和比例因子的确定

在模糊自整定控制器中, 量化因子 k_e 、 k_{ec} 和比例因子 k_p 、 k_i 、 k_d 对模糊控制系统的动态性能有较大的影响。量化因子和比例因子由下列公式确定^[4]:

量化因子=模糊论域值/物理论域范围值

比例因子=物理论域范围值/模糊论域值

本文中, 量化因子 k_e 、 k_{ec} 和比例因子 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊论域为 $[-6, 6]$, 模糊论域值为 12, 而 k_e 、 k_{ec} 、 k_p 、 k_i 、 k_d 的物理论域范围值则不同。在实验中经过反复的观察和摸索, 并进行多次调整, 本文所设计的模糊自整定 PID 控制器的量化因子为 $k_e=0.006$, $k_{ec}=0.001$; 比例因子为 $k_p=0.033$, $k_i=0.024$, $k_d=0.166$ 。且将初始 PID 参数设为: $k_p=0.5$, $k_i=3.5$, $k_d=0.005$ 。

2.3 基于模糊自整定 PID 控制的 SRM 仿真

本文构造了离散的 SRM 速度控制系统仿真模型, 为保证系统的仿真运行速度又不会失真, 将采样时间 T_s 设置为 2.5×10^{-5} s。

(1) 基于模糊自整定 PID 控制的 SRM 速度控制系统仿真模型

SRM 速度系统采用双闭环控制, 其中转速外环采用模糊自整定 PID 控制算法, 电流内环采用的是常规的 PID 控制算法。经过双闭环的模糊控制器和经典 PID 控制器输出的值与由位置传感器检测的三相位置信号的脉宽进行比较, 从而控制系统的功率变换电路的 IGBT 主开关的通断, 达到控制 SRM 的目的。基于模糊自整定 PID 控制的开关磁阻电机速度控制系统仿真模型如图 2 所示。

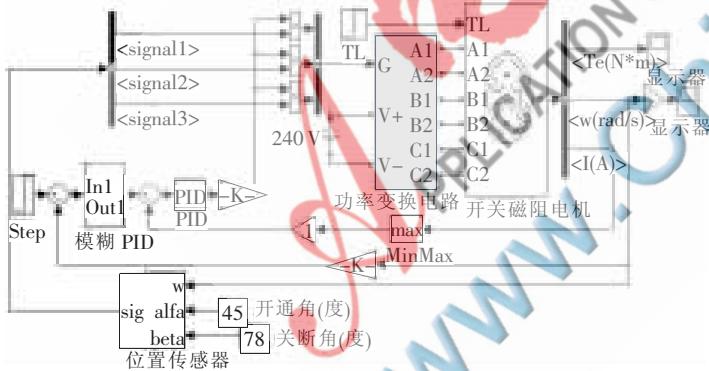


图2 基于模糊自整定PID控制的SRM仿真模型

(2) 模糊自整定PID(fuzzy self-tuning PID)模块

按照模糊自整定PID控制器的设计原理以及步骤, 搭建出模糊自整定PID控制算法的速度控制器仿真模型, 如图3所示。

(3) 位置检测模块

速度控制系统位置检测模块如图4所示, 通过检测开关磁阻电机的角速度 ω (rad/s), 根据 6/4 极磁阻电机定子、转子的特点, 假设初始位置有一相定子凸极中心线与转子凹槽中心线重合, 即该相相电感值最小, 则转子每转过 30° , 便会使得另一相的定子凸极中心线与转

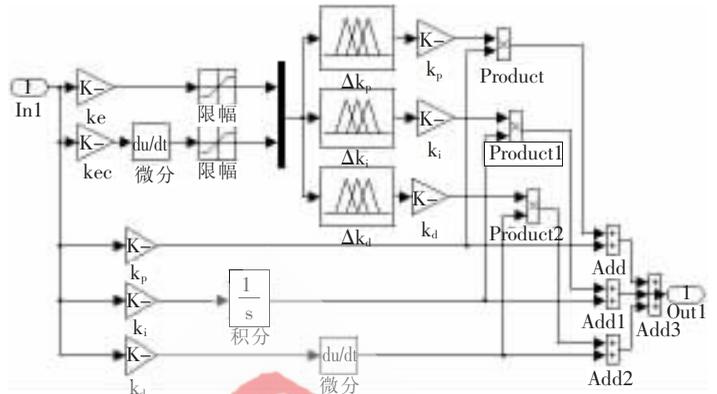


图3 转速模糊自整定PID仿真模型

子凹槽中心线重合, 达到最小相电感; 转子每转过 90° , 则回到初始状态。将 ω 乘以系数 $180/\pi$ 得出 SRM 转子每秒转过的角度, 通过 3 个初始状态分别为: $0, -30, -60$ 的离散积分函数则可得出三相各自对应的角度, 然后将该位置信号转换成脉冲信号输出。图中 α 和 β 分别为开通角和关断角, 分别设定为 45° 和 78° 。

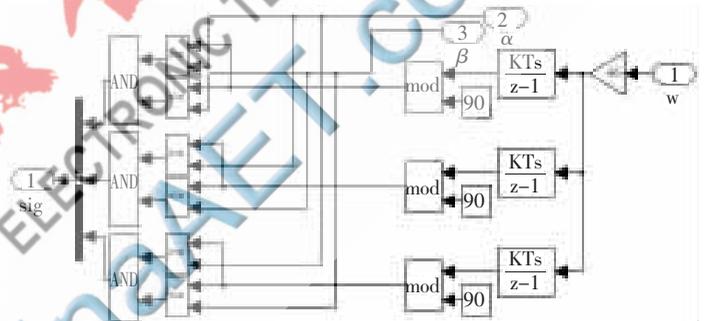


图4 位置检测仿真模型

(4) 系统的仿真参数设置

该系统开关磁阻电机的参数为: 类型 6/4 极; 初始速度和位置 $[0 \ 0]$; 额定功率 60; 额定转动惯量 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

3 仿真结果分析

将模型依照图 2 搭建好后, 把阶跃信号幅值改为 1000, 即给定速度为 1000 r/min。图 5 所示为模糊自整定 PID 控制与常规 PID 控制的转速仿真波形的对比, 可以看出, 基于模糊自整定 PID 控制的 SRM 速度控制系统的响应速度比基于常规 PID 控制的 SRM 速度控制系统的响应速度要快, 且前者的超调和振荡要比后者要明显减少。

图 6 所示为在突加负载时, 模糊自整定 PID 控制与常规 PID 控制各自的转速曲线图。相对于常规 PID 控制, 模糊自整定 PID 控制在突加负载时转速下降较小, 而且恢复得也比较快。所以, 基于模糊自整定 PID 的 SRM 速度控制系统抗扰动的能力较强, 在突加负载后, 转速能够得到很好的控制, 体现出模糊自整定 PID 控制的优点。

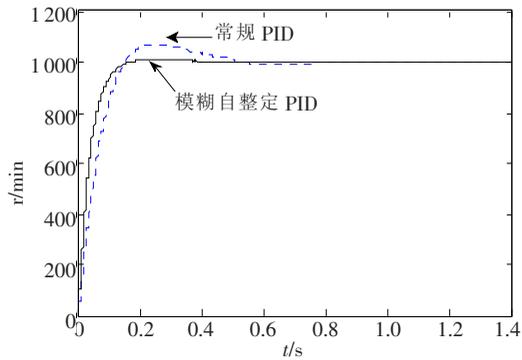


图5 模糊自整定PID与常规PID的转速对比曲线

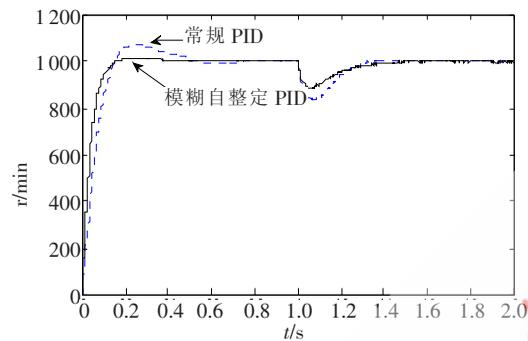


图6 突加负载时模糊自整定PID与常规PID转速对比曲线

通过仿真图可以发现,基于模糊自整定PID控制的开关磁阻电机速度控制系统的响应速度快、超调量小、调节时间短、抗干扰能力强,系统的动态性能得到全面改善。

本文研究了一种模糊自整定PID控制策略,并将模糊自整定PID控制器引入到开关磁阻电机速度控制系统中进行了建模和仿真,并与基于常规PID控制的SRM速度控制系统进行了对比。仿真结果表明,采用模糊自整定PID控制可以使开关磁阻电机速度控制系统获得良好的动态和静态性能,模糊自整定PID控制对于开关磁阻电机速度控制系统是一种很好的控制方法。

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.
- [2] 石辛民,赫整清.模糊控制及其MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2008.
- [3] 李楠,孟庆春,付晓峰.基于参数自整定模糊PID控制策略的电机模型仿真研究[J].机电工程技术,2004(9):55-57.
- [4] 丛望,米芳芳.基于模糊PID控制的开关磁阻电机调速系统的建模与仿真[J].航电技术,2008(1):39-42.

(收稿日期:2011-06-04)

作者简介:

陆文龙,男,1988年生,硕士,主要研究方向:复杂系统的建模与控制。

张晓江,男,1957年生,硕士,副教授,主要研究方向:控制理论与控制工程,计算机控制,智能控制系统。

张涛,男,1988年生,硕士,主要研究方向:复杂系统的建模与控制。