

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.012

基于模糊神经网络 PID 的开关磁阻电机控制系统研究

陆朱卫, 黄其新

(三江学院 机械与电气工程学院, 江苏 南京 210012)

摘要:针对开关磁阻电机存在的转矩脉动大、噪声大、速度不稳定等问题,对开关磁阻电机的启动、运行、调速等方面进行了研究,提出了一种基于模糊神经网络 PID 的控制方法,将模糊控制理论与 BP 神经网络相结合,构成了模糊 BP 神经网络,根据系统误差,误差的变化,以及误差变化的变化实时调整 PID 控制参数,使电机在整个转速范围内获得了最优的 PID 参数。实验采用 DSP 作为控制核心,不对称逆变桥作为功率变换器,驱动一台 2 kW 的开关磁阻电机运行。研究结果表明,该方法大大改善了开关磁阻电机控制系统的动、静态性能,控制精度高、转矩脉动小,对干扰有较高的鲁棒性。

关键词:开关磁阻电机;模糊控制;神经网络;比例-积分-微分控制

中图分类号:TM352;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0058-04

Research on switched reluctance motor control system based on fuzzy neural network PID

LU Zhu-wei, HUANG Qi-xin

(School of mechanical and electrical engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: Aiming at the problem of torque ripple, large noise and speed instability of switched reluctance motor, the starting, running and adjusting speed of switched reluctance motor were studied, and a new approach was proposed based on fuzzy neural network PID control. Fuzzy control theory and BP neural network was combined to form a fuzzy BP neural network, which could adjust the parameters of PID according to the system error E, the change of the error of EC, and the change of the change of the error ECC. DSP was used as a control core and the asymmetric inverter bridge was used as a power converter, which could drive a 2 kW switched reluctance motor. The results indicate that this method can greatly improve the dynamic and static performance of switched reluctance motor control system. It has high control precision, small torque ripple, and high robustness to interference.

Key words: switched reluctance motor(SRM); fuzzy control; neural network; proportion integration differentiation control

0 引言

近些年来,为了减少人类对传统能源的依赖,国家投入大量资金来发展电动汽车。开关磁阻电机(SRM)是一种定、转子两边均为凸级结构的磁阻电动机,结构简单、可靠性高、成本低、性能优异,非常适合作为电动汽车的驱动电机使用,在未来市场占有重要地位^[1-4]。

尽管开关磁阻电机在原理和结构上具有优势,但是其调速系统是一个时变、非线性、多变量的系统,难以得到其精确的数学模型。由于常规的线性控制器具有固定的参数,很难在整个调速范围内满足其动、静态性能要求^[5-8],要想提高调速性能,必须采用变化参数的控制器。

本研究提出一种基于模糊神经网络 PID 的开关磁

阻电机控制方案,将转速调节器由常规 PID 替换为模糊神经网络自适应 PID 调节器。将模糊控制的非线性控制作用和 BP 神经网络的学习能力及适应力相结合,根据系统的运行状态对 PID 的 3 个参数进行在线实时整定,以提高系统的动、静态性能。

1 开关磁阻电机控制系统

开关磁阻电机主要由开关磁阻电机本体(SRM)、功率变换器、控制器、电流检测模块、位置检测模块等部分组成。开关磁阻电机控制系统(SRD)如图 1 所示。

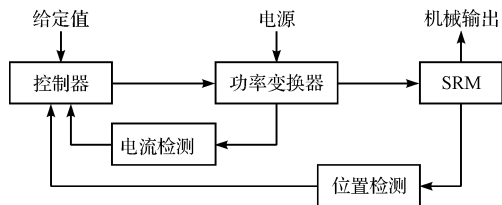


图 1 开关磁阻电机控制系统

功率变换器连接直流电源,为开关磁阻电机供电,它根据转子的位置控制各相绕组电压的通断,并为绕组储能提供回馈路径;控制器将传感器反馈回来的速度信号、电流信号、位置信号通过控制芯片进行分析和处理,得到各相导通和关断的时刻,然后输出各相的控制信号,对功率变换器的每一相电路进行控制,以实现 SRM 的控制;电流检测模块用于检测功率变换器的电流信息,位置检测模块用于检测转子的位置信息,控制器综合这些反馈信息给出控制信号,控制信号经过隔离驱动来控制功率变换器运行。

开关磁阻电机虽然结构简单,但是其控制系统的可控因素多,控制方法灵活,无论采用哪种控制方法,要实现大范围内连续调速,必须引入速度反馈,根据实际转速和给定转速的偏差来控制系统的工作。速度反馈中一般使用 PID 控制器,为了保证系统在调速过程中始终保持优良的性能,固定参数的 PID 调节器通常无法满足要求,PID 参数还需要根据电动机的实时转速加以适当的调整,以满足不同转速的需求。

2 模糊神经网络自适应 PID 控制器设计

模糊神经网络自适应 PID 控制器是采用模糊控制理论与 BP 神经网络相结合,实时调整 PID 控制参数,使系统整个转速范围内得到优良的动、静态性能。本研究采用增量式 PID 控制,控制规律如下:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

令: $k_p = k_{p0} + \Delta k_p$; $k_i = k_{i0} + \Delta k_i$; $k_d = k_{d0} + \Delta k_d$, 则上式可以写成:

$$u(t) = (k_{p0} + \Delta k_p) e(t) + (k_{i0} + \Delta k_i) \int_0^t e(t) dt + (k_{d0} + \Delta k_d) \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} —PID 控制器的初始参数; $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ —调整参数,它由模糊神经网络根据系统的运行状态计算得到。

根据上述规律,模糊神经网络 PID 控制器的结构如图 2 所示。

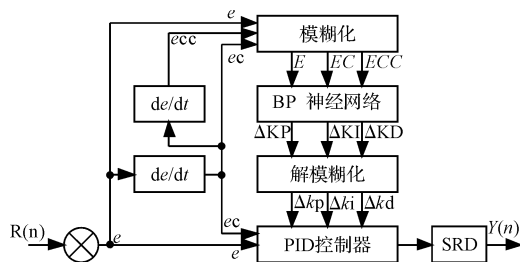


图 2 模糊神经网络 PID 控制器

系统误差 e , 误差的变化 ec , 以及误差变化的变化 ecc 经模糊化后作为 BP 神经网络的输入, BP 神经网络起到模糊推理的作用, 根据其输入进行自我学习, 并进行解模糊输出, 不断调整 PID 参数的 3 个调节量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d , 以达到最优控制。

取开关磁阻电机的给定转速 n_r 与实际转速 n 的偏差 e 、偏差的变化 ec ($ec = de/dt$)、以及偏差变化的变化 ecc ($ecc = dec/dt$) 作为输入, 将 3 个输入均乘以相应的缩减系数使三者归到区间 $[-1, 1]$, 并将其量化到模糊集上的论域, 根据模糊论域对应相应的模糊子集, 模糊化后的输入变量用 E, EC, ECC 表示。

本研究将 E, EC, ECC 作为 BP 神经网络的 3 个输入值, $\Delta KP, \Delta KI, \Delta KD$ 为网络的 3 个输出值, 考虑到收敛的速率, 因此隐含层选择 4 个节点, 故采用 3-4-3 三层网络结构^[9-11]。

BP 神经网络结构如图 3 所示。

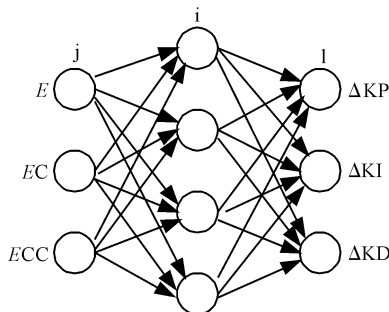


图 3 BP 神经网络结构

输入层的输入函数为:

$$O_j^{(1)} = x(j), j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: $O_1^{(1)} = e, O_2^{(1)} = ec, O_3^{(1)} = ecc$ 。

隐含层的神经元活化函数采用 Sigmoid 函数, 则输入与输出函数分别为:

$$\begin{cases} YR_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^3 \omega_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \\ O_i^{(2)}(k) = f(YR_i^{(2)}(k)) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

由于输出层各个节点的输出为 ΔKP 、 ΔKI 、 ΔKD , 三者为固定参数 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 调节量的模糊值, 因此输出层的神经元活化函数仍然采用正负对称的 Sigmoid 函数。则输出层输入与输出函数分别为:

$$\begin{cases} SR_l^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^4 \omega_{li}^{(3)} O_i^{(2)} \\ O_l^{(3)}(k) = f(SR_l^{(3)}(k)) \end{cases} \quad l = 1, 2, 3 \quad (5)$$

上述公式中, 上标 (1)、(2) 和 (3) 分别代表输入层、隐含层和输出层; $\omega_{ij}^{(2)}$ 和 $\omega_{li}^{(3)}$ 分别为隐含层和输出层的加权系数。

由于 BP 神经网络的输出值 ΔKP 、 ΔKI 、 ΔKD 都是模糊量, 需要进行解模糊。该系统中采用重心法解模糊化并且乘以相应系数, 得到明确的实际输出量 Δk_i 、 Δk_d 、 Δk_p 。该系统采用上述算法, 对已整定好的常规 PID 的 3 个固定参数进行在线微调, 以达到优化控制的目的。

3 仿真分析

为了减少转矩脉动, 本研究采用直接瞬时转矩控

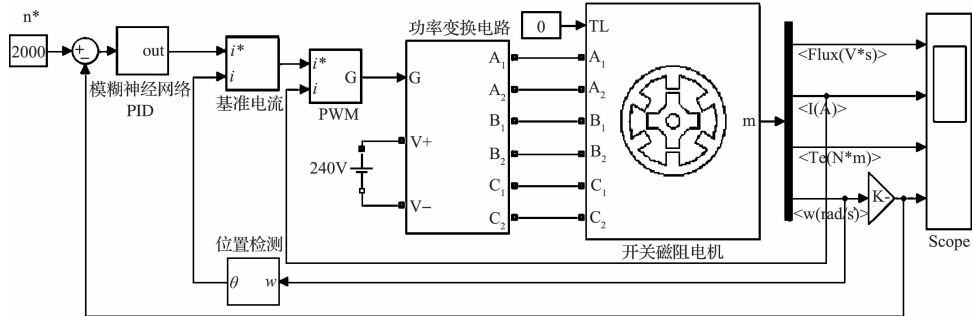


图 5 控制系统仿真模型

该仿真模型参数如下: 额定功率为 2 kW, 额定电压为 240 V, 额定转速为 2 000 r/min, PID 参数初始设

制方式^[12], 该方法将各相绕组的瞬时转矩作为控制对象, 在确定的导通角内, 通过转矩滞环的方法来产生控制信号, 调节各相功率电路的开关状态。同时在该方法中加入模糊 BP 神经网络 PID 控制, 进一步加强系统的各项性能。系统框图如图 4 所示。

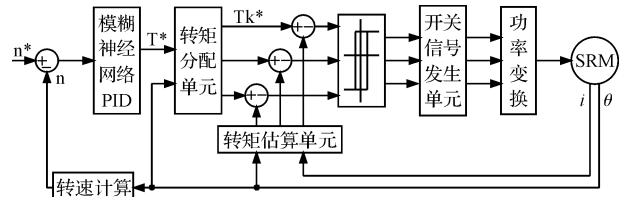
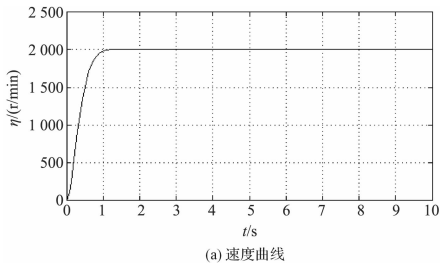


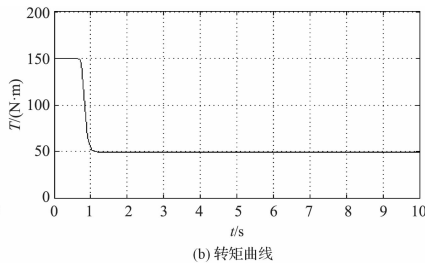
图 4 开关磁阻电机控制系统框图

在图 4 中, 转速计算模块用来根据实时的转子位置信息计算当前的实际转速 n , 给定速度 n^* 与实际速度 n 的偏差 Δn 经模糊神经网络 PID 控制器后计算出当前的参考转矩 T^* ; 转矩估算单元根据当前的转子位置和相电流查表得到各相的瞬时转矩; 转矩分配单元将总的参考转矩 T^* 分配到电机各相, 得到各相的参考转矩 T_k^* ; 转矩滞环单元根据各相参考转矩 T_k^* 和瞬时转矩 T_k 的差值 ΔT_k , 与系统允许的转矩误差阈值 ε 比较之后产生相开关信号; 开关信号驱动电机, 调整电机的转速和转矩。

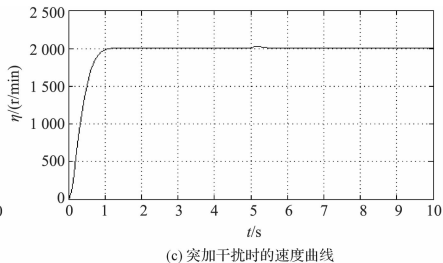
根据控制系统框图, 该系统中外环为速度环, 内环为转矩环, 通过滞环比较单元形成开关信号来控制功率开关电路, 功率开关电路驱动开关磁阻电机工作。采用 Matlab/Simulink 建立的仿真模型如图 5 所示。



(a) 速度曲线



(b) 转矩曲线



(c) 突加干扰时的速度曲线

图 6 仿真波形

从图中可以看出,本研究设计的基于模糊神经网络PID控制方法,不仅使开关磁阻电机调速系统的响应速度快、转矩脉动小、超调量小、控制精度高,当外界加入干扰时能迅速恢复稳态,自适应能力很强,具有很好的适应性和鲁棒性。

4 实验验证

根据文中提出的控制方法,本研究搭建了一台2 kW开关磁阻电机实验平台。平台主要包含开关磁阻电机,不对称半桥式功率变换器和基于DSP的控制系统。

实验平台框图如图7所示。

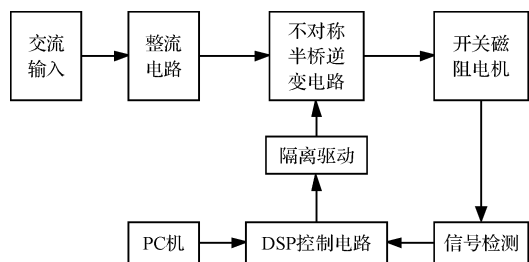
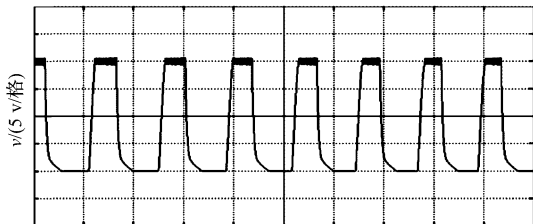
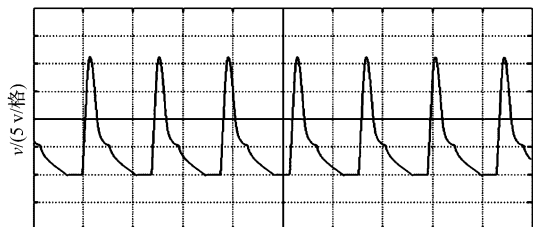


图7 实验平台框图

在实验中开关磁阻电机速度响应快,转矩平稳,噪音小,表现出良好的性能。实验波形如图8所示。



(a) 200 r/min时的电流波形



(b) 2000 r/min时的电流波形

图8 实验波形

从图中可以看出开关磁阻电机工作在低速时电流处于斩波状态,工作在高速时电流未达到斩波限,由开关角控制。

5 结束语

针对开关磁阻电机存在的转矩脉动、速度不稳定等问题,本研究提出了基于模糊神经网络PID的开关磁阻电机控制方法,它把BP神经网络和模糊控制结合起来,根据实际转速与给定转速的差值实时调整PID控制参数,在不同速度下都可以获得最佳参数以实现最优控制。仿真和实验结果表明该系统的控制精度高,响应速度快,转矩脉动小,超调量小,鲁棒性和适应性强,证明了该方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] 花为,华浩,赵桂书,等.一种用于电动自行车的高性能开关磁阻电机系统[J].南京航空航天大学学报,2014,46(1):37-43.
- [2] 陆朱卫,顾怀敏.开关磁阻电机控制系统仿真研究[J].电子测试,2015,24(24):14-16.
- [3] 王宏华.开关磁阻电动机调速控制技术(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [4] 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.
- [5] 夏长亮,陈自然,李斌.基于RBF神经网络的开关磁阻电机瞬时转矩控制[J].中国电机工程学报,2006,26(19):127-132.
- [6] MORON C, GARCIA A, TREMPES E, et al. Torque control of switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(4):1661-1664.
- [7] VLADAN P V. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2012, 27(1):388-399.
- [8] HIROKI ISHIKAWA, RYOKO KOMAKI, HARUO NAITOH, et al. Electric transfer function model of switched reluctance motors and model-based current control design[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 173(1):51-59.
- [9] 漆汉宏,张婷婷,李珍国,等.基于DITC的开关磁阻电机转矩脉动最小化研究[J].电工技术学报,2007,22(7):136-140.
- [10] 刘金琨.先进PID控制及其MATLAB仿真[M].2版.北京:电子工业出版社,2004.
- [11] 曾喆昭,肖强英,朱静涛.开关磁阻电机模糊神经网络PID转速控制[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3):30-34.
- [12] 戚永武.基于DSP的电动汽车用开关磁阻电机控制系统开发[D].合肥:合肥工业大学机械与汽车工程学院,2013.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

陆朱卫,黄其新.基于模糊神经网络PID的开关磁阻电机控制系统研究[J].机电工程,2017,34(1):58-61.

LU Zhu-wei, HUANG Qi-xin. Research on switched reluctance motor control system based on fuzzy neural network PID[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(1):58-61.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>