

无刷直流电动机模糊自适应PID控制策略研究

支长义, 王瑞玲, 唐道奎, 刘润田

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 提出了一种无刷直流电动机调速系统的模糊自适应PID控制方法。在Matlab/Simulink平台上建立了无刷直流电机模糊自适应PID控制的仿真模型, 对参数改变时无刷直流电动机模糊自适应PID仿真模型也进行了仿真, 并与模糊PID控制和传统PID控制的控制效果进行了比较。仿真结果表明: 建立的系统鲁棒性强、响应速度快、无超调, 且稳态精度高。

关键词: 无刷直流电动机; 模糊自适应; 仿真模型; 鲁棒性; 稳态精度

Study on fuzzy self-adaptive PID control strategy for brushless DC motor

ZHI Chang-yi, WANG Rui-ling, TANG Dao-kui, LIU Run-tian

(College of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A fuzzy self-adaptive PID control method is proposed for brushless DC motor speed adjustment system. First fuzzy self-adaptive PID control simulation model is established on Matlab / Simulink platform and then fuzzy self-adaptive PID of brushless DC motor model when parameters change is also simulated. The control results are compared with that of fuzzy PID and conventional PID control. The results of simulation indicate that the system has stronger robustness, faster response time and higher steady-state accuracy.

Key words: brushless DC motor; fuzzy self-adaptive; simulation model; robustness; steady-state accuracy

中图分类号: TM33 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)08-0035-03

0 引言

在电动机的控制系统中, 一般采用的是PID控制, 传统PID控制是通过调整参数获得良好控制效果的, 但参数整定值只具有一定局域性的优化值, 全局控制效果不是很理想。现今的PID控制已逐渐向智能化、自适应化、最优化的趋势发展, 如模糊自适应PID控制、神经元PID控制等。本文在无刷直流电动机数学模型的基础上, 讨论了模糊自适应PID控制在无刷直流电机驱动系统的应用。将模糊控制器和PID控制器通过自适应因子结合起来, 在线自动调整控制参数, 进一步完善了PID控制器的性能, 提高了系统的控制精度^[1]。

1 无刷直流电机的数学模型

为简化数学模型的建立, 在电机模型的建立时, 认为电机的气隙是均匀的。并作以下的假设^[2]:

- (1) 定子绕组为60°相带整矩集中绕组, Y形连接;
- (2) 忽略齿槽效应, 绕组均匀分布于光滑的定

子内表面;

- (3) 转子上没有阻尼绕组, 电机无阻尼作用;
- (4) 磁路不饱和;
- (5) 忽略高次空间磁势谐波的影响;
- (6) 忽略磁带、涡流的影响。

则根据BLDCM特性, 可建立其转矩、转速以及等效的BLDCM电路

电动机电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega} = \frac{\sum i_x e_x}{\omega} = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega} \quad (1)$$

$$\text{运动方程为: } T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

无刷直流电动机的动态结构图如图1。

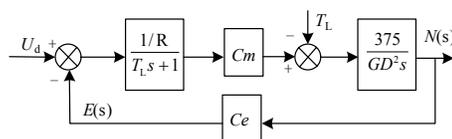


图1 无刷直流电动机的动态结构图

Fig.1 Dynamic structure of brushless DC motor

从图中可以导出系统的传递函数为:

$$n(s) = \frac{\frac{1}{Ce}}{\frac{LGD^2}{375}s^2 + \frac{RGD^2}{375CeCm}s + 1} U_d(s) - \frac{\frac{L}{CeCm}s + \frac{R}{CeCm}}{\frac{LGD^2}{375}s^2 + \frac{RGD^2}{375CeCm}s + 1} T_L(s) = \frac{K_1}{T_m T_1 s^2 + T_m s + 1} U_d(s) - \frac{K_2 s + K_3}{T_m T_1 s^2 + T_m s + 1} T_L(s) \quad (3)$$

2 模糊自适应PID控制原理

2.1 模糊自适应PID参数控制策略

以常规PID控制为基础, 采用模糊推理思想根据不同的 e 和 ec 对PID参数进行在线自整定。按这种思想构成的控制系统由两部分组成, 即常规PID控制部分和模糊推理的参数校正部分^[5], 结构图如图2。

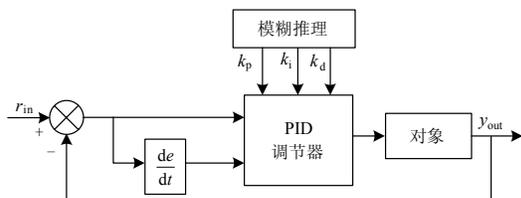


图2 模糊自适应PID控制结构图

Fig. 2 Charts of fuzzy self-adaptive PID control

根据误差信号不断在线调整模糊控制和PID控制的复合度, 对PID的三个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行在线修改, 满足变化的误差对控制参数的要求, 从而使被控对象具有良好的动、静态性能。

PID参数的调整必须考虑到在不同时刻三个参数的作用以及相互之间的互连关系。根据 K_p 、 K_i 、 K_d 对系统输出特性的影响情况, 在不同的 $|e|$ 和 $|ec|$ 时, 被控过程对参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的自整定要求为: 当 e 较大时, 为使系统具有良好的快速跟踪性能, 避免因 e 瞬间变化大而引起微分饱和, 应取较大的 K_p 与较小的 K_d 。同时为避免系统响应出现较大的超调, 应对积分作用加以限制, 通常取 $K_i=0$, 根据实际情况也可直接采取P控制。

当 e 处于中等大小时, 为了减小系统的超调, 同时保证系统的响应速度, K_p 应取得小些, K_i 的取值要适当。在这种情况下, K_d 的取值对系统响应的影响较大, 一般根据 ec 的取值经验; 当 ec 较

大时, K_d 可取稍小; ec 较小时, K_d 可取稍大。实际中也可直接采用PD控制。

当 e 较小时, 为使系统具有较好的稳态性能, 提高系统的抗干扰性, 避免系统振荡, K_p 与 K_i 均应取得大些。同时为避免系统在设定值附近出现振荡, K_d 值的选择很关键, 可根据 ec 来决定, 即当 ec 较大时, K_d 可取稍小, ec 较小时, K_d 可取稍大。

2.2 模糊控制器的算法设计

模糊自适应PID控制器的输入变量仍选取速度反馈值和给定转速值的误差 e 、误差的变化 ec , 输出变量定为经过调整后的PID的三个参量 K_p 、 K_i 、

表1 K_p 控制规则表

Tab.1 K_p control rules table

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

表2 K_i 控制规则表

Tab.2 K_i control rules table

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

表3 K_d 控制规则表

Tab.3 K_d control rules table

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

K_d 。论域取为 $[-6, 6]$, 模糊语言变量选择7个: NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB。解模糊方法为重心法, 模糊推理方法为Mamdani。对 K_p 、 K_i 、 K_d 分别进行整定, 三者各自的模糊控制规则如表1~表3。

3 模糊自适应PID控制系统仿真

模糊自适应PID控制系统仿真图如图3。

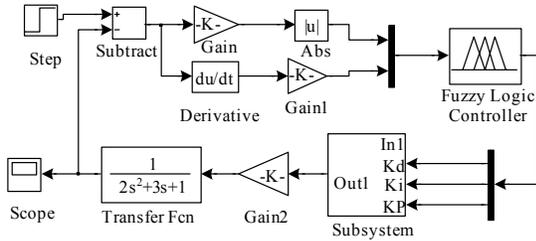


图3 模糊自适应PID控制系统仿真框图

Fig.3 Fuzzy self-adaptive PID control system simulation diagram

设被控对象的传递函数为 $G(S) = \frac{1}{\alpha s^2 + 3s + 1}$, $\alpha=2$ 时, 首先将模糊自适应PID控制与模糊控制、PID控制进行比较, 然后对发生模型失配情况下的三者的控制效果进行比较, 假设模型失配时 α 增大变化。对参数可控式PID控制器进行封装, 建立起来的仿真模型如下: 根据模糊控制规则和算法, 在Matlab/Simulink下对被控系统进行仿真, 设定目标转速为 $n=1500$ r/min, 其响应曲线分别如图4、图5所示。

从仿真结果来看, 系统的控制性能较传统PID和模糊PID有显著的提高, 响应速度快, 稳态精度高, 而且没有超调和振荡, 尤其是在系统参数发生改变的情况下模糊自适应PID控制具有更佳的控制效果。因此, 模糊自适应PID控制器在改善被控过程的动态和稳态性能、提高抗干扰能力以及参数时变的鲁棒性等方面均优于常规PID控制器和模糊PID控制器。

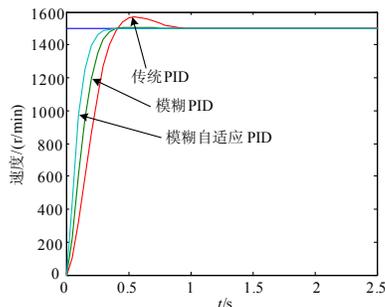


图4 参数未改变时控制比较图

Fig. 4 Control comparison chart when parameters unchange

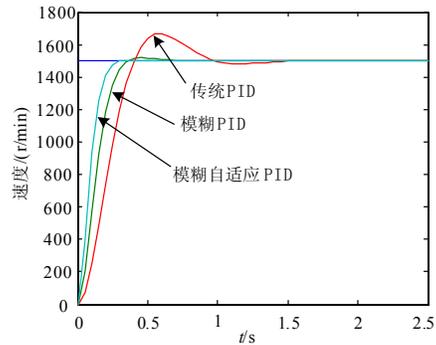


图5 参数改变时控制比较图

Fig.5 Control comparison chart when parameters change

4 结论

传统的PID控制系统在被控对象发生变化时, 定好的参数不能随之调整, 因此控制效果在此种情况下不是很好, 同时由于参数整定要求被控对象的数学模型要很精确, 但在实际中很难做到这一点; 模糊PID在超调量、响应速度等方面均优于传统PID, 但是在参数改变时存在一定误差; 模糊自适应PID控制策略将模糊控制和常规的PID控制相结合, 是基于模糊推理的PID参数自整定, 它将常规PID控制经验的优点和模糊控制的灵活性、自适应性相结合, 扬长避短。仿真结果表明, 模糊自适应PID控制策略比常规PID和模糊PID控制策略优越, 可以取得较好的动态性能和稳态精度。总之, 应用先进控制算法, 开发全数字化的智能电动机控制系统将成为新一代电动机控制系统设计的发展方向。

参考文献

- [1] 张国良. 模糊控制及其MATLAB应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
ZHANG Guo-liang. MATLAB Fuzzy Control and Its Application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [2] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
ZHANG Chen. Brushless DC Motor Principle and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [3] 周渊深. 交直流调速系统与MATLAB仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
ZHOU Yuan-shen. AC Speed Regulation System and Matlab Simulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [4] 叶振锋, 雷淮刚. 基于Matlab的无刷直流电动机控制系统仿真[J]. 微特电机, 2006(3): 19-21.

(下转第 42 页 continued on page 42)

平,有效定位故障,并对错误现象予以提示。既能从管理角度实现对信息准确性的定量评估,以 web、报表等方式显示及存储,又能指导运行维护,减轻人员的工作量。该系统在广东省调的运行结果表明,该方法可行有效,对调度自动化水平的评估和系统维护起到了积极作用。

2) 根据厂站、测点的得分规律可以进一步挖掘错误数据产生的主要原因,如结合设备台帐可以评估不同厂家的测控装置可靠性水平,有利于对有普遍性的装置缺陷制定全省的反事故措施。

3) 具有推广意义,适用于各级电网调度自动化系统,有利于提升全省的厂站自动化水平,已在茂名等地实施推广。

4) 采用 CIM/XML 和 E 格式规范进行模型和数据的导入导出,解决了异构的自动化系统之间数据交换和共享困难的问题,使得构建省地互联的信息准确率评估体系成为可能。

参考文献

[1] 卢建刚,黄凯,张辉,等. 电网调度自动化信息分析考核系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 89-93. LU Jian-gang, HUANG Kai, ZHANG Hui, et al. Information Analysis and Assessment System for the Power Network Dispatching Automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 89-93.

[2] 兰华,李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J]. 继电器, 2007, 35(10): 78-81. LAN Hua, LI Ji-jie. Status Quo and Prospect of Algorithm of Power System State Estimation[J]. Relay, 2007, 35(10): 78-81.

[3] 李大虎,曹一家. 基于 SCADA/PMU 混合量测的广域动态实时状态估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(6):

72-78.

LI Da-hu, CAO Yi-jia. Wide-area Real-time Dynamic State Estimation Method based on Hybrid SCADA/PMU Measurements[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 72-78.

[4] 周苏荃,张艳军. 新息图状态估计中多相关不良数据辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 1-6. ZHOU Su-quan, ZHANG Yan-jun. Multiple Interacting Bad Data Identification for Innovation Graph Technique [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(4): 1-6.

[5] 钱锋,唐国庆,顾全. 基于 CIM 标准的多级电网模型集成分析[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 69-73. QIAN Feng, TANG Guo-qing, GU Quan. Analysis on Integration of Multilevel Power Network Model Based on CIM[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 69-73.

[6] IEC 61970-40 : EMS API-Part 1 301, Common Information Model (CIM) Base[S].

[7] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10. XIN Yao-zhong. Development of Trend of Power System Dispatching Automation Technique in 21st Century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.

收稿日期: 2009-06-04; 修回日期: 2009-10-10

作者简介: 刘洋(1982-),女,工程师,工学硕士,主要从事电网调度自动化系统的运行维护工作; E-mail: judy_liuy@126.com

卢建刚(1970-),男,高级工程师,主要从事调度自动化系统的开发、运行、管理工作;

黄凯(1978-),男,工程师,工学硕士,主要从事 EMS 应用软件开发工作。

(上接第 37 页 continued from page 37)

YE Zhen-feng, LEI Huai-gang. Brushless DC Motor Control System Based on the Matlab Simulation [J]. Micro-electrical Motor, 2006(3): 19-21.

[5] 唐宗全. 基于模糊控制的无刷直流电机调速系统的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007. TANG Zong-quan. Brushless DC Motor Control System Based on the Fuzzy Control[D]. Xi'an: Northwest Industrial University, 2007.

[6] 邵桂荣. 基于Matlab的模糊控制系统的设计及仿真[J]. 重庆工学院学报, 2007(5): 51-54. SHAO Gui-rong. Design and Simulation of Matlab Based Fuzzy Control System[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2007(5): 51-54.

[7] 马晓光,孟伟,朱昌东. 模糊控制技术在电动机节能中的应用[J]. 继电器, 2001,29(1): 34-35,49.

MA Xiao-guang, MENG Wei, ZHU Chang-dong. Application of Fuzzy Control Technique in Energy Saving of Motor [J]. Relay, 2001,29(1): 34-35,49.

[8] 金岫,邓志良,张鸿鸣. 基于模糊PID控制的同步发电机励磁控制系统仿真研究[J]. 继电器, 2007,35(19): 13-15,21. JIN Xiu, DENG Zhi-liang, ZHANG Hong-ming. Simulation of Synchronous Excitation Controller Based on Fuzzy-PID Control[J]. Relay, 2007, 35(19): 13-15,21.

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2009-09-02

作者简介: 支长义(1964-),男,硕士,副教授,从事电测仪表与控制方面的研究与开发;

王瑞玲(1981-),女,硕士研究生,从事电机控制方面的研究. E-mail: wrling@163.com