

文章编号: 1671- 251X(2010)03- 0057- 04

# 直流双闭环调速系统及其模糊控制的仿真

欧卫斌

(宝鸡文理学院电子电气工程系, 陕西 宝鸡 721007)

**摘要:** 给出了常规直流双闭环调速系统的仿真模型, 采用 Matlab 对该模型进行了仿真, 得出结论: 常规直流双闭环调速系统具有较好的动态与静态特性, 可以很好地抑制扰动量对电动机转速的影响, 但该系统依赖精确数学模型, 在增加解决环节的同时, 系统模型趋于复杂, 可能还会影响系统的可靠性。在该分析结果的基础上, 提出了一种基于模糊控制+ PI 转速调节器的直流双闭环调速系统的设计方案, 该方案中电流环仍采用常规 PI 调节, 转速环改为模糊控制器与常规 PI 调节分时作用方式。仿真结果表明, 引入模糊控制器的新系统响应速度高、过渡稳定、系统超调得到改善。

**关键词:** 直流电动机; 直流调速; 双闭环; 电流环; 转速环; 模糊控制; PID 控制

中图分类号: TD614; TP273. 4 文献标识码: A

## Simulation of DC Double Closed-loop Speed regulation System and Its Fuzzy Control

OU Weibin

(Dept. of Electronic and Electrical Engineering of Baoji University of Arts and Sciences,  
Baoji 721007, China)

**Abstract:** The paper gave a simulation model of common DC double closed-loop speed regulation system and used Matlab to simulate the model, and made a conclusion: the common DC double closed-loop speed regulation system has a better dynamic and static characteristics and can restrain influence of disturbance on rotation speed of motor. But the system depends on accurate mathematical model, which not only increases solution links but also makes system's model more complex and may affect reliability of the system. On the basis of the analysis result, the paper proposed a design scheme of DC double closed-loop speed regulation system based on fuzzy control + PI rotation speed regulator. In the scheme, the current loop still uses common PI regulation and rotation speed loop uses time-sharing action mode of fuzzy controller and common PI regulation. The simulation result showed that the new system introduced in

收稿日期: 2009- 10- 27

基金项目: 宝鸡文理学院 2008 年重点项目(ZK08132), 宝鸡文理学院 07 年科研项目(YK0711)

作者简介: 欧卫斌(1977- ), 男, 陕西宝鸡人, 讲师, 研究方向为电力电子及传动智能控制。E-mail: oywb2006@163. com

- [5] 袁川, 杨洪耕. 三相电压畸变且不对称时电流基波正序有功分量的改进瞬时检测方法研究[J]. 继电器, 2005(14): 52-60.
- [6] CUTRI R, LOURENO M J. A New Instantaneous Method for Harmonics, Positive and Negative Sequence Detection for Compensation of Distorted Currents with Static Converters Using Pulse width

Modulation [C]//11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2004: 374-378.

- [7] 马大铭, 朱东起, 高景德. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(4): 210.
- [8] 李红雨, 吴隆辉, 卓放, 等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13).

fuzzy controller has advantages of high response speed, steady transition and improves system overshoot.

Key words: DC motor, DC speed regulation, double closed-loop, current loop, rotation speed loop, fuzzy control, PID control

## 0 引言

直流电动机具有启动转矩大、调速范围宽等优势,在轧钢机、电力机车等方面仍广泛采用。直流调速系统在理论上和实践上都比较成熟,从控制技术的角度来看,它又是交流调速系统的基础;电力电子技术、计算机控制技术、智能控制理论的发展,更为直流调速系统继续发展和应用提供了契机。进入21世纪后国外一些公司(西门子的6R24-27系列、ABB的DCV700系列等)仍在不断推出高性能直流调速系统。因此,对直流调速系统的研究仍具有重要意义。

直流调速系统中最典型的控制方式就是速度、电流双闭环调速<sup>[1]</sup>。由于受参数时变和不确定性等因素的影响,传统的控制方法常受到很大的局限。另外,PID控制方法往往在系统快速性与稳定性之间不能两者兼顾。模糊控制不依赖于被控对象的精确数学模型,既能克服非线性因素的影响,又具有较强的鲁棒性。因此,笔者给直流电动机双闭环调速系统引入模糊控制器,以改善系统性能。

## 1 双闭环系统分析

电流、转速双闭环直流调速系统由电流调节器(ACR)和转速调节器(ASR)串级联接,电流负反馈为内环、转速反馈为外环,如图1所示,其中E为电

动机在励磁作用下的电枢反电动势。

ASR的输出作为ACR的输入,ACR的输出去控制晶闸管整流器的触发装置;通过设置转速调节器的输出限幅并配合调节转速反馈通道的增益,可得到电动机启动、制动等过程中的电枢回路的最大电流值,使得电动机快速地启动和制动。通过电流、转速双闭环结构可以很好地抑制电网电压波动和负载变化等扰动量对电动机转速的影响。

### 1.1 常规双闭环直流调速系统设计与仿真

已知某直流双闭环调速系统,其控制系统主回路与直流电动机的主要参数如下:

电动机:  $P_{\text{nom}} = 150 \text{ kW}$ ,  $I_{\text{nom}} = 700 \text{ A}$ ,  $n_{\text{nom}} = 1000 \text{ r/min}$ ,  $R_a = 0.05 \Omega$ 。

主回路:  $R_d = 0.08 \Omega$ ,  $L_d = 2 \text{ mH}$ , 全控桥式整流输出端的脉动波头数  $m = 6$ 。

负载及电动机转动惯量:  $GD^2 = 125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

电流反馈系数  $B = 0.0095 \text{ V/A}$ , 转速反馈系数  $A = 0.01 \text{ V/min/r}$ 。电动机机电时间常数  $T_m = 0.8 \text{ s}$ , 电动机电磁时间常数  $T_i = 0.025 \text{ s}$ , 转速反馈通道滤波时间常数  $T_{on} = 0.001 \text{ s}$ , 电流反馈通道滤波时间常数  $T_{oi} = 0.002 \text{ s}$ , 晶闸管放大系数  $K_s = 23$ , 时间常数  $T_s = 0.0017 \text{ s}$ 。启动电流取1050A(为额定值的1.5倍)。其它参数工程计算从略。依据图1可在Matlab下建立直流双闭环调速系统仿真模型,如图2所示。

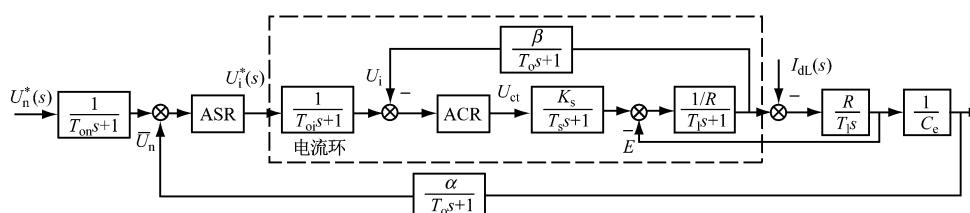


图1 直流双闭环调速系统结构

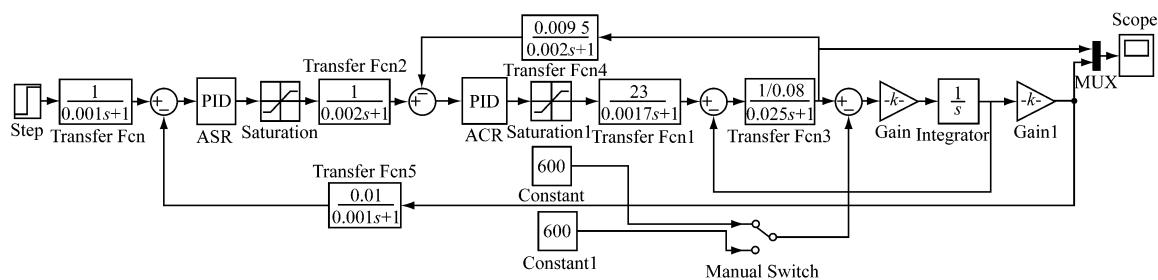
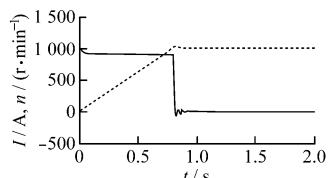


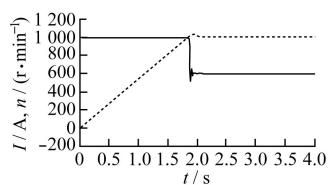
图2 直流双闭环调速系统仿真模型

ASR 的参数设置:  $K_p = 60.5$ ,  $K_i = 11.5$ , 限幅值为  $[-10, 10]$ ; ACR 的参数设置:  $K_p = 1.24$ ,  $K_i = 40$ , 限幅值为  $[-10, 105]$ 。

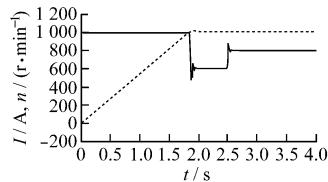
STEP 的 Step time 为 0, Initial value 为 0, Final value 为 10, 通过 Manual Switch 可很方便地实现仿真时负载的手动切换。将该直流双闭环调速系统在 Simulink 下运行后, 仿真结果如图 3 所示。



(a) 空载时的仿真结果



(b) 接近额定负载时的仿真结果



(c) 2.5 s 处增加负载时的仿真结果

图 3 常规直流电动机双闭环调速系统转速

与电流仿真结果

从图 3 可看出, 空载、额定负载、适当过载 3 种情况下, 系统均先以恒定大电流快速启动; 到额定转速后具有一定的超调; 稳态时速度曲线为水平线, 说明静态较好; 2.5 s 处突加过载干扰, 系统仍然平稳, 说明抗扰能力较好。综合看来, 直流双闭环调速系统具有较好的动态与静态特性, 可以很好地抑制扰动量对电动机转速的影响。

从图 3(b) 可看出, 该直流双闭环调速系统在突加给定电压  $U_n$  时, 整个启动的过渡过程可分为电流上升、恒流升速、转速调节 3 个阶段, 该期间 ASR 会经历不饱和、饱和、退饱和 3 个状态。ASR 饱和时, 转速环相当于开环, 系统为电流单闭环系统; ASR 不饱和时, 系统为无静差系统, 且由于 ASR 的自身特性, 系统超调难以避免。解决该问题的一个简单有效的办法是在 ASR 上引入转速微分负反馈, 这一环节可以抑制转速超调直到消除超调, 同时可以大大降低动态速降<sup>[1]</sup>, 但是恢复时间会延长, 还必须采取滤波措施以防止新的干扰; 另外, 因为初

始条件不同, 在求带微分负反馈双闭环系统的退饱和和过渡过程不能象普通双闭环系统那样借助于系统的抗扰性能曲线。总之, 常规直流双闭环调速方法是基于系统的精确数学模型的, 在增加解决环节的同时, 系统模型趋于复杂, 不利于实施, 可能还会影晌系统的可靠性, 为此, 笔者引入不依赖于系统精确数学模型的模糊控制方法。

### 1.2 基于 Fuzzy+ PI 转速调节器的双闭环系统

模糊控制由于其最大优点是不依赖于被控对象的精确数学模型, 能够克服非线性因素的影响, 对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性并且控制简单<sup>[2]</sup>, 因此, 笔者对 ASR 引入模糊控制, 以改善常规直流双闭环调速系统升速阶段的转速开环局面和动态性能。然而, 由于常规模糊控制相当于 PD 控制, 不具有积分能力, 导致基于模糊控制的系统调整阶段及稳定阶段又难以很好地消除稳态误差, 在变量分级不够多的情况下, 会在平衡点附近有振荡现象, 使得系统静特性下降。

基于以上分析, 将要给出的新直流双闭环直流调速系统在电流环仍采用常规 PI 调节的基础上, 转速环改为模糊控制器与常规 PI 分时作用。当偏差  $e$  大于设定阈值时, 采用模糊控制, 以提高系统的响应速度获得良好的动态特性, 而当偏差  $e$  小于设定阈值时, 系统切换至常规 PI 调节, 以发挥 PI 调节器静态特性好的特点。该直流双闭环调速系统模糊控制器的工作过程: 先依据检测到的转速计算转速偏差( $e$ )和转速偏差变化率( $ec$ ), 再将两者模糊化处理成模糊量并送给模糊控制器; 模糊控制器按照模糊推理规则计算得到控制量( $u$ )输出, 模糊控制量清晰化为精确量后去控制后级装置。如图 4 所示, 模糊控制器为单变量二维结构。

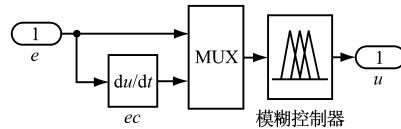


图 4 模糊控制器结构

在定义模糊子集时, 应注意使论域中任何一点对这些模糊子集的隶属度的最大值不能太小, 否则会在这些点附近出现不灵敏区, 以致造成失控使模糊控制器性能变坏; 同时要适当增加子集论域中的元素个数, 以获得模糊子集对论域较好的覆盖性, 但论域元素的增多会增大运算量, 一般选择误差论域的  $n \backslash 6$ , 选误差变化率论域的  $m \backslash 6$ , 输出控制量的论域  $p \backslash 7$ <sup>[2]</sup>。隶属度函数的曲线形状较尖时, 控制

灵敏度较好<sup>[8]</sup>。在此:

$e$ 、 $ec$  和  $u$  的模糊集均为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB};

$e$  和  $u$  的论域均取为 {-10, , , +10};

$ec$  的论域均取为 {-6, , , +6}。

在 Matlab 下调用 FIS Editor 选择编辑输入量 ( $e$ 、 $ec$ ) 和输出变量 ( $u$ ) 的隶属函数, 确定论域内各元素对模糊语言变量的模糊语言值隶属度, 并将结果保存至工作空间以便仿真时模糊控制器调用; 由该输入量模糊集可得到 49 条模糊控制规则, 如表 1 所示。在常规直流双闭环控制系统模型的基础上引入模糊控制器, 如图 5 所示, 该模型的仿真结果如图 6 所示。

在仿真过程中应注意 Switch 跳变值的选择, 可根据仿真图形进行修改以获得最佳值, 若跳变过早

表 1 模糊控制器规则

$e$	$ec$						
	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

则不能发挥模糊控制器的作用。考虑到图 2 中的速度 PI 调节器在转速上升至接近稳态时, 经过开关跳变才起作用, 故可不用串限幅环节。仿真过程中发现, 若 Switch 跳变过早, ASR 会饱和。

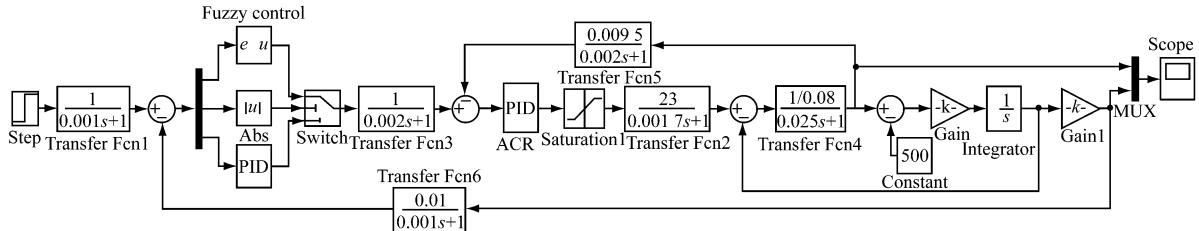


图 5 引入模糊控制器的直流双闭环调速系统模型

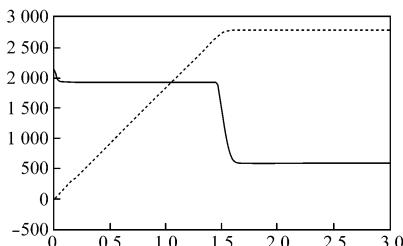


图 6 引入模糊控制器的直流双闭环调速系统的仿真结果

从图 6 可看出, 系统上升时间缩短; 升速段到稳定态过渡平稳; 速度超调明显改善; 与图 3 相比, 电流曲线下降段到稳定态由陡峭下降变为平滑过渡, 这也是系统能平稳过渡的主要原因。

## 2 结论

(1) 严格工程设计下的常规直流双闭环系统动、静态性能较好, 适用性强, 其理论体系为其它调速技术的基础;

(2) 借助 Matlab 的模糊逻辑工具箱不但能实现 Simulink 的无缝连接, 而且通过 Real2time Workshop 能生成 ANSIC 源代码, 从而易于实现模糊系统的实时应用;

(3) 比较而言, 引入模糊控制的新双闭环调速

系统响应速度提高、过渡稳定、系统超调得到改善, 为直流双闭环调速系统的又一可选策略。

## 参考文献:

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999: 7278.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 章丽红, 减小惠. 基于 FUZZY-PID 直流调速系统的仿真与分析 [J]. 计算机仿真, 2009(1): 15~156.
- [5] 张松兰, 张敬高. 基于模糊控制的直流双闭环调速系统仿真 [J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(10): 47~49.
- [6] 陈梅, 杨琳琳, 李鑫, 等. 直流调速系统的模糊/PID 速度控制器设计 [J]. 电气传动自动化, 2008, 30(2): 32~33.
- [7] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 李洪兴. 模糊控制器与 PID 调节器的关系 [J]. 中国科学: E 编, 1999(2).
- [9] 王磊, 王为民. 模糊控制理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 32~50.