

中图分类号: TM 306; TP 391

文献标识码: A

Matlab 仿真在双闭环直流调速实验教学中的应用

胡明忠, 徐志宇, 余有灵

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 电力拖动运动控制系统是自动化专业的核心课程之一。高性能的直流调速系统多采用双闭环串级控制的结构: 外环为转速反馈, 实现转速调节; 内环为电流反馈, 加快瞬态过程。由于原理的复杂性, 历来是教学的难点。Matlab 是一种强大的仿真工具, 已广泛应用于高校教学活动。以双闭环直流调速为例, 将 Matlab 仿真技术引入运动控制实验教学。利用 SimPowerSystem 模块搭建系统模型; 通过仿真, 对比分析系统在突加给定和突增负载时的动态响应特性; 验证了双闭环结构相对于开环、单闭环系统的优势。与传统实物实验相结合, 更有利于学生加深对相应知识点的理解和掌握。

关键词: 直流双闭环调速; Matlab 仿真; 动态特性分析; 实验教学

DOI:10.16812/j.cnki.cn31-1945.2016.02.012

Application of Matlab Simulation on Experimental Courses of Dual-Loop DC Motor Control

HU Mingzhong, XU Zhiyu, YU Youling

(School of Electronics & Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Electric drive motion control system is one of the key courses for students majoring in Automation. High performance DC motor control systems generally utilize the scheme of dual-loop cascade control: the outer loop implements speed regulation and the inner loop controls the current to shorten the transient process. Normally it's a stumbling block in teaching due to the fundamental complexity. Matlab is a powerful simulation tool which is widely adopted in university education activities. This paper takes the dual-loop DC motor control as an instance, and applies the Matlab simulation technology to the experimental courses of motion control. The system model is built with SimPowerSystem modules. The dynamic response characteristics are investigated and compared given the step reference and load. It is verified that the dual-loop system is superior to open-loop and single-loop systems. This approach can be applied to supplement the conventional hardware experiment, so as to help students establish better understanding on relevant knowledge.

Key words: dual-loop DC motor control; matlab simulation; dynamics analysis; experimental course

基金项目: 上海市重点课程项目, 同济大学精品实验项目

1 引言

直流调速系统是以直流电动机为对象的运动控制系统,由于其精度高、应用广、控制简单等优势,在调速领域长期处于主导地位^[1];直流调速系统也是运动控制实验教学中的重要内容^[2]。传统的直流调速实验中,各组学生按照预设方案和规定步骤完成实验,主要训练线路连接、系统调试、仪表测量等动手操作能力,在综合、分析、设计方面存在不足^[3]。为此,我们在实验教学中引入 Matlab 技术^[4],利用计算机数值仿真,拓展实验内容,加深知识理解^[5-6]。其中主要用到控制仿真 (Simulink) 和电力系统仿真 (SimPowerSystems) 2 大工具箱。

2 双闭环调速简介

如图 1 所示,双闭环直流调速系统由转速、电流两个反馈闭环嵌套而成,其中转速为外环、电流为内环。转速调节器 (ASR) 根据转速给定和测速装置 (TG) 的转速反馈,给出控制量;电流调节器 (ACR) 根据电流给定和互感装置 (TA) 的电流检测,给出控制量。双闭环直流调速系统具有以下特点^[1]:

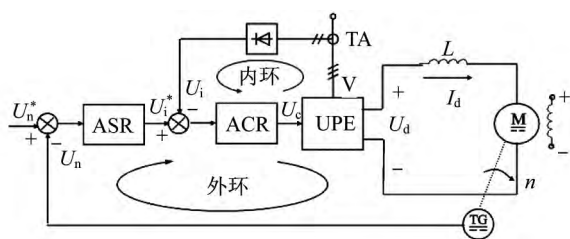


图 1 转速-电流双闭环直流调速系统

Fig. 1 Speed-current dual-loop DC motor control system

- (1) 转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 是串联关系,ASR 的输出作为 ACR 的给定;
- (2) 外环调节电机转速,起主导作用;内环调节电枢电流,起辅助作用;
- (3) ASR、ACR 一般都采用 PI 调节器,提高系统的动静态特性;

(4) ASR、ACR 的输出都带有限幅,分别决定了电枢电流和整流电压的最大允许值。

3 数值仿真分析

在 Matlab/Simulink 环境中搭建双闭环直流调速系统的仿真模型(如图 2 所示)。主电路包括他励式直流电机、三相对称交流电源、三相整流桥、同步 6 脉波触发器、平波电抗器等。控制电路包括给定输入、ASR、ACR、比较器、转速检测、电流检测,以及相应的一阶惯性滤波。

3.1 仿真设置

三相电源的电压有效值为 220 V,频率 50 Hz,A、B、C 三相的初相分别为 0° 、 120° 、 240° ;整流桥内阻 $R_s = 0.3 \Omega$,电动机负载转矩 $T_L = 130 \text{ N} \cdot \text{m}$,转动惯量 $J = 0.573 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电枢回路电阻 $R_a = 0.2 \Omega$,电感 $L_a = 15 \text{ mH}$;励磁回路电阻 $R_f = 240 \Omega$,电感 $L_f = 1.4 \text{ H}$ 。采用工程设计法,依次确定 ACR、ASR 的 PI 参数值。仿真算法采用 ode45。

3.2 突加给定的起动过程仿真

如图 3 中 $0 \sim 0.15 \text{ s}$ 时间段,为突加给定时电机起动的全过程。仿真结果显示,整个起动过程大致分为三个阶段,分别对应了 ASR 的三个状态。

(1) 电流上升阶段 (ASR 不饱和): 由于电机较大的机械惯性,在突加给定 U_n^* 后,转速 n 及其反馈电压 U_n 增长缓慢,因此转速偏差 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 很大。ASR 的积分迅速饱和,输出达到并保持为限幅值 U_{im}^* 。电流环整流触发角 α 立即减小到 0° 并保持,使电枢电流急剧增大至 I_{dm} ,亦即使电机达到以最大允许加速度。

(2) 恒流升速阶段 (ASR 饱和): ASR 始终饱和,转速环等效于开环,电枢电流几乎保持其最大值 I_{dm} ,使电机以最大加速度加速。考虑到与转速上升相伴的反电动势上升,电流环的输入偏差应维持为一恒定值,故实际电枢电流接近而略低于 I_{dm} ,整流触发角 α 逐渐调整。

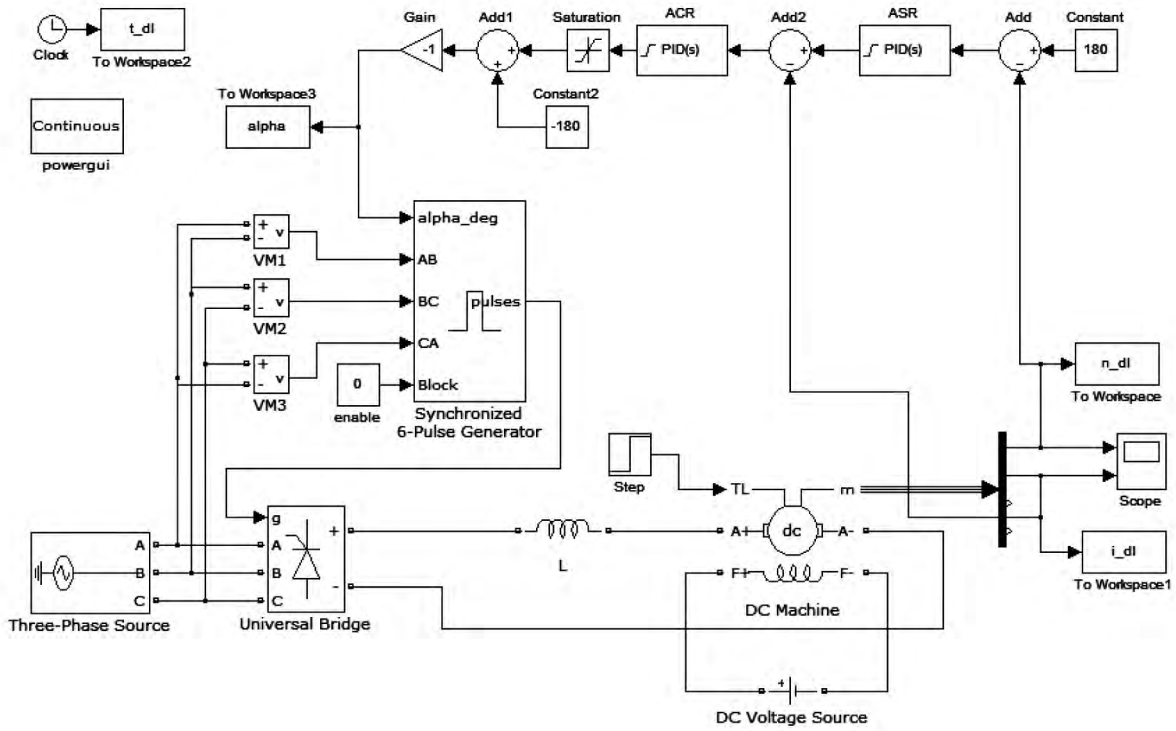


图2 双闭环直流调速系统的 Matlab 仿真模型

Fig.2 Matlab simulation model of dual-loop DC motor control system

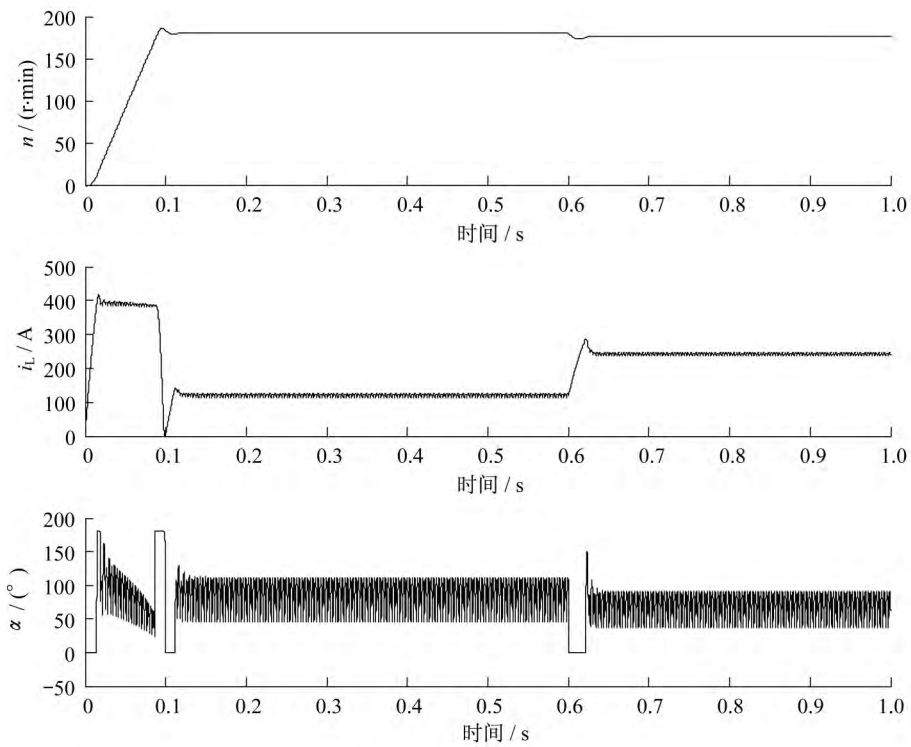


图3 双闭环直流调速系统在突加给定、突增负载时的过渡过程

Fig.3 Transient process of dual-loop DC motor control system under reference/load step

(3) 转速调整阶段(ASR 退出饱和): 当转速上升至给定值时,电机仍继续加速; 由于实际转速超过给定值,ASR 的输入偏差 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 变为负值,从而使 ASR 退出饱和,输出下降,继而使电枢电流下降。当电枢电流低于负载转矩时,电机减速; 经过一段调整最终达到给定值,整流触发角 α 逐渐趋于平稳。

3.3 突增负载的过渡过程仿真

如图 3 中 0.6~0.65 s 时间段,为突加负载时电机的动态调整过程。设置在 0.6 s 时刻,负载电流 T_L 由 200 N·m 突增至 400 N·m。在此瞬间电机转速跌落,整流触发角 α 立即减小到 0° ,电枢电流 I_d 随之急剧上升,使电机加速; 经过一次超调,转速迅速恢复到给定值 180 r/min,电枢电流也再次稳定在与负载转矩相平衡的数值。

3.4 双闭环与开环、单闭环的对比仿真

图 4 进一步给出了在上述过渡过程中,开环、转速单闭环、转速-电流双闭环系统的转速响应曲线。其中蓝色粗实线为双闭环,绿色虚线为单闭环,红色点划线为开环。当突加给定时,开环结构的转速上升最慢,经过单峰超调后最终收敛值与给定值之间的稳态误差显著; 单闭环结构的转速上升最快,但超调大,调节时间长,在 0.6 s 内始终未收敛到给定值; 双闭环结构最快地达到给定值,且超调很小。当突加负载时,三者的调速性能对比结果类似。综上,采用转速-电流双闭环结构的直流调速系统比采用开环结构、转速单闭环结构具有更好的动态特性,能够在更短的时间内结束过渡过程,达到新的平衡状态。

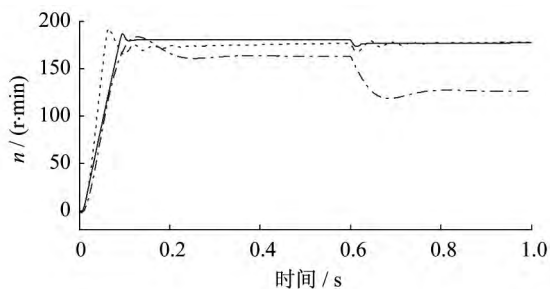


图 4 双闭环与开环、单闭环的调速性能对比

Fig. 4 Performance comparison: open-loop, single-loop and dual-loop

4 结束语

转速-电流双闭环系统是本科生专业课《电力电子与运动控制》中的教学重点与难点。本文应用 Matlab 软件,针对该系统进行数值仿真与理论分析相结合的研究探讨。对照仿真曲线,更加深入地阐释了双闭环系统在突加给定和突加负载情况下,转速、电枢电流、整流触发角的关键状态的过渡过程; 通过对比,说明了双闭环系统较之开环、单闭环结构,具有更优的动态性能。

参考文献:

- [1] 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统(第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
RUAN Yi, CHEN Boshi. Electric drive control system (4th Ed.) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [2] 冯兴田,王平,胡慧慧. “直流调速系统”课程的教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2014, 36(1): 18-22.
FENG Xingtian, WANG Ping, HU Huihui. Curriculum innovation of the “DC motor control system”. [J] Journal of Electric and Electronics Education, 2014, 36(1): 18-22.
- [3] 木合亚提·伊克山. “电力拖动自动控制系统”课程实验的改革[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(12): 131-133.
MUHETIYA ·Yikeshan. Experiment innovation of “Electric drive control system”. [J] Laboratory Research and Exploration 2010 29(12): 131-133.
- [4] 彭燕. 基于 SIMULINK 的直流调速自动控制系统的仿真实验[J]. 渭南师范学院学报, 2013, 28(2): 39-42.
PENG Yan. Simulation experiment of DC motor control system based on SIMULINK [J]. Journal of Weinan Normal School 2013 28(2): 39-42.
- [5] 卢卫娜,陈秀敏,马玉泉,等. 仿真技术在电力拖动实验教学中的应用[J]. 大学物理实验, 2011, 24(6): 55-58.

(下转第 155 页)

- [M]. Beijing: LanTian Press. 2014.
- [2] 李俊峰 张雄. 理论力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010 8: 206 - 243.
LI Junfeng ZHANG Xiong. Theoretical mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press 2010 8: 206 - 243.
- [3] 方振平 陈万春, 张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 2005.
FANG Zhenping ,CHEN Wanchun ,ZHANG Shuguang. Flight dynamics of aircraft [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press: 2005.
- [4] 李鹏. 轻型飞行模拟器飞行仿真建模研究[D]. 南京航空航天大学 2008.
LI Peng. Research of modeling of flight simulation about prototype of light weight flight simulator [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2008.
- [5] 李林, 翁冬冬等. 飞行模拟器[M]. 北京: 北京理工大学出版社 2012.
LI Lin ,WENG Dongdong. Flight simulator [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press , 2012.
- [6] 薛毅. 数学建模基础[M]. 北京: 北京工业大学出版社 2004.
- [7] XUE Yi. Foundation of mathematical modeling [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press 2004.
- [8] 卢惠民. 飞行仿真数学建模与实践[M]. 北京: 航空工业出版社. 2007.
- [9] LU Huimin. Mathematical modeling and practice of flight simulation [M]. Beijing: Aviation Industry Press 2007.
- [10] 许颖慧 杨峰. GL Studio 在仪表仿真开发中的关键技术研究[J]. 仪器仪表与检测技术, 2008, 10(27): 76 - 80.
- [11] XU Yinghui , YANG Feng. Instrument Simulation development based on GL Studio [J]. Techniques of Automation & Applications 2008 ,10(27) : 76 - 80.
- [12] 刘丽娇. 基于 GL-Studio 的飞行模拟机虚拟座舱开发[D]. 哈尔滨工业大学 2009.
- [13] LIU Lijiao. The development of virtual cockpit for a flight simulator based on GL-Studio [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2009.



周晓光 男(1982 -), 吉林蛟河人, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行仿真, 作战建模。



刘洋 男(1982 -), 辽宁鞍山人, 工程师, 主要研究方向为飞行仿真, 模拟训练。

(上接第 143 页)

- LU Weina , CHEN Xiumin , MA Yuquan , et al. Applications of simulation on electric drive experiments [J]. University Physics Experiments , 2011 , 24 (6) : 55 - 58.
- [6] 陈荣. 《电力拖动自动控制系统》虚拟实验系统设计[J]. 实验科学与技术 2013 , 11(6) : 13 - 16.
CHEN Rong. Design of virtual experimental systems for 《electric drive control systems》 [J]. Experimental Science and Technology 2013 , 11(6) : 13 - 16.



胡明忠 男(1968 -), 硕士, 实验师, 主要研究方向为电力电子技术, 电机与电力拖动控制系统。



徐志宇 男(1982 -), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为仿真技术在电力电子与运动控制系统中的应用。