



基于 PI 控制的三相交直交变频器 实验案例构建

徐 航, 郭颖奇

(四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 变频器具有优异的调速功能、高效的起制动效率以及良好的节能效果, 无论是在工业生产、科学研究还是实验教学等领域都得到了广泛的应用。但由于其集成度高、内部结构复杂以及价格高、配套数少等原因, 在实验室只能辅助学生做电动机调速等基本操作, 很难将整流、滤波、逆变、比例积分控制和脉冲宽度调制波控制等理论知识与其结合讲解给学生。该文利用 Simulink 设计了一种交-直-交变频调速系统的仿真模型, 将工频电源转换成为频率可调的交流电压, 并结合 PI 控制、调制波控制技术, 实现三相异步电机调速控制。基于此教学仿真模型, 学生可以对不同 PI、滤波以及调制波控制参数进行仿真分析, 既可以让将变频器涉及的重要理论知识通过仿真分析得以验证, 进一步加深对控制理论的理解, 同时也为电机控制实验教学奠定良好的基础, 并可显著提高学生设计电路、仿真分析以及解决问题的能力。

关键词: PI 控制; Simulink 仿真; 交直交变频器; 实验教学仿真

中图分类号: TM921.51

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20200279](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20200279)

Design of Three-phase AC-DC-AC Frequency Converter Construction of Experimental Cases Based on PI Control

XU Hang, GUO Yingqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Due to excellent speed regulation function, efficient starting and braking efficiency and sound energy saving effect, the frequency converter has been widely applied in industrial production, scientific research and experimental teaching. However, due to its high integration, complicated internal structure, high cost and small quantity, it can only be used to assist students to do basic operations in the laboratory such as motor speed adjustment, and it is difficult to teach the theories of rectification, filtering, inverter, proportional-integral (PI) control, and sinusoidal pulse width modulation (SPWM) wave to students. This paper has designed a AC-DC-AC variable frequency speed control system using Simulink, and converted fundamental frequency power supply to frequency-varying alternating voltage, and achieved three-phase asynchronous motor speed control by combining with PI control and control techniques of modulated wave. Based on this teaching simulation model, students can perform simulation analysis on different PI, filtering and modulation wave control parameters, namely, allowing students to verify the important theoretical knowledge related to the frequency converter through simulation analysis. This helps further deepen the students' understanding of the control theory, lay a good foundation for the experimental teaching of motor control, and improve the students' ability to design circuits, simulate analysis and solve problems.

Key words: PI control; Simulink simulation; AC-DC converter; experimental teaching simulation

电机调速实践课是电工技术专业课程的必备环节, 是课堂知识的延伸与拓展, 使课本知识与实际应用得以相互衔接^[1-3]。通过课程实验使学生加深理解整流、逆变、三相异步电动机的工作原理和运行特性, 学会综合运用专业知识分析电机运行

状态, 培养分析问题和解决问题的能力, 为后续的工作及专业研究奠定一定的基础是非常重要的^[4]。

通用变频器的理论基础融合了电动机、电力电子、交流调速以及自动控制原理等, 而交流调速系统是电力拖动自动控制系统的内容之

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2020-09-17

基金项目: 四川大学教改项目(SCU201094)。

作者简介: 徐航(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事中低压配电网防雷、电工电路的实验教学工作。

通信作者: 郭颖奇(1975-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气信息实验技术方面的研究。E-mail: 2601024236@qq.com

一^[5-7]。在交流调速系统的实践教学过程中,通用变频器作为关键环节,学生应该充分掌握其工作原理以及应用关键技术^[8-9]。但由于变频器集成化高、内部结构复杂以及价格高配套台数少等多种原因,四川大学电工实验室只能提供少数几台变频器辅助学生做电动机调速等基本操作,很难将整流、滤波、逆变、自适应 PI 调节、SPWM 波控制等理论知识与其结合,讲解给学生^[10-13]。为了解决这个问题,我们设计了自适应控制的三相电压型交直交变频器实验教学案例。

本次实验教改结合三相异步电机电压调速系统,将三相交流电整流滤波后,由逆变器转换成 SPWM 波,再经过 LC 滤波输出,通过控制 SPWM 波频率和调制深度调节输出电压波形的幅值和频率,以达到在交流传动乃至其他能量变换系统中将调速模型得到充分的应用,同时加入自适应控制环节进一步达到平稳改变电机转速以及能量交换的目的。本次实验教学改革基于 Simulink 仿真工具,搭建自适应电机变频调速仿真平台,主要目的是将实物实验和虚拟仿真实验相结合,让学生在掌握 AC-DC-AC 变换器相关基本控制理论的前提下,充分理解计算机仿真在工科学学习中的重要性。这种三相交流变换电机仿真平台是学习和理解交流变频技术、电机控制方法以及自适应控制非常有效的途径,相比集成度高的实物平台,更加适合电工电路相关的实验教学。

1 三相交流电机控制仿真实验总体设计

三相交流电机变频调速系统原理框图如图 1 所示,实质上是一套 AC-DC-AC 变频系统并联自适应调节反馈系统,用来控制交流电动机的转速。实验教学改革设计主要包括以下 4 个部分。

1) 整流。将三相交流电源采用三相不可控整流桥整流滤波变换为直流电源,为了抑制整流桥直流侧电压中的高次谐波和逆变电路产生的电压波动,整流桥后方并联了大电容,作为滤波和储能使用;

2) 逆变。核心是一个 6 路 SPWM 控制器和 6 个 IGBT 开关管,通过 SPWM 波控制三相桥式电路在任意时刻都有且仅有一组共阴极和共阳极 IGBT 开关管按照一定的规律导通,将直流电变换为频率、幅值均可调的交流电,最终控制电动机的转速;

3) 自适应控制电路。PI 自适应调节电路实现

电路的闭环可控并产生相应调制波;

4) 负载。交流电动机控制部分,仿真参数尽量接近实验室实际电机参数。

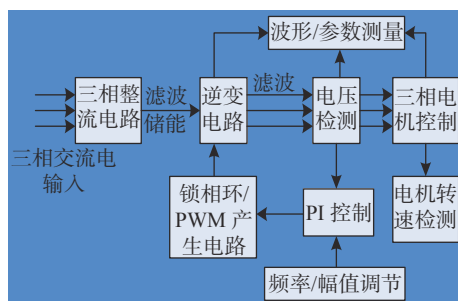


图 1 电压型交直交变频器控制电机实验框图

实验仿真系统包括逆变器、三相交流电机控制以及反馈控制电路设计,相比实验室硬件电路系统,具有理论原理清晰、实验时间灵活、不局限硬件平台等特点。而且便于学生测量系统关键点电压、电流波形,以及电动机转速等参数,易于理解系统工作原理,能更好地建立对实际系统进行调试、分析的综合素养,可以更加深刻地理解相关专业课程知识。

2 实验教改设计关键问题解决

2.1 三相整流滤波电路选择

实验选择三相不可控整流电路中的三相桥式结构,在 Simulink 中有固定的模块(universal bridge, 振流桥)可以直接选择。滤波储能电路可以根据参数计算选择合适的 LC 电路或者 RC 电路,分别如图 2 和图 3 所示。如果学生选择 RC 电路,需要额外添加一个压控电路,使电阻 R 在负载电压达到某个定值时自动短路。这部分的难点在于学生对部分元件参数的计算、选择以及继电器的应用。

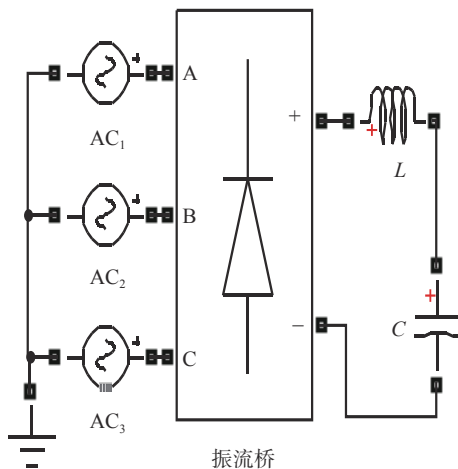


图 2 LC 型整流电路

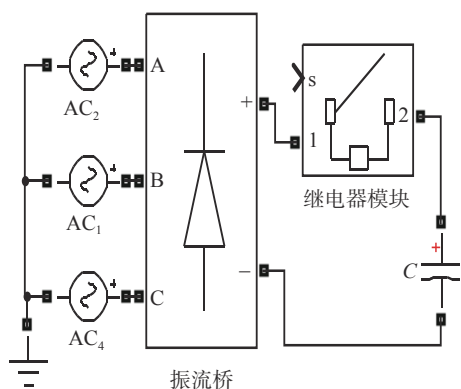


图3 RC型整流电路

以LC滤波电路为例,从整流前后直流电压波形仿真分析可以看出:经过整流滤波后,电压波动可以从50V左右降低至0.01V,效果较为明显。

对比滤波前后直流部分电压波形,如图4所示,在这一部分学生可以充分掌握滤波电路参数的计算方法以及滤波电路在实际电路中的作用。

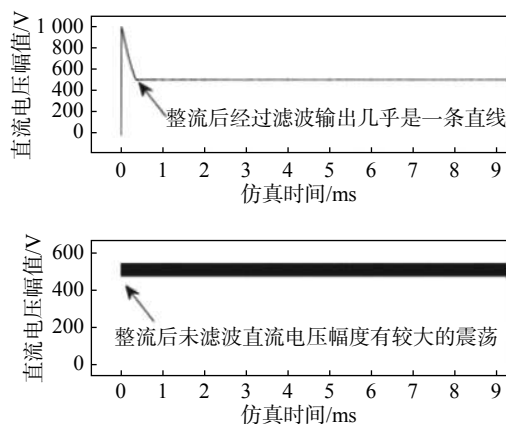


图4 整流前后直流电压波形对比

2.2 三相逆变以及控制电路设计

逆变器采用3对IGBT(insulated gate bipolar transistor)开关管构成三相逆变桥(DC-AC converter模块),控制方式采用SPWM(脉宽调制)进行三相六拍控制方式,使6个IGBT功率开关器件有规则地导通、关断,从而将直流功率变换为电压和频率都可调的交流输出功率。同一时刻上下每组IGBT的控制PWM波相位相差180°,左右3组IGBT的控制PWM波相位相差120°,就可以保证每个时刻上下两组开关管只有一个共阳极和一个共阴极开关管同时导通。逆变器交流输出端接LC串联谐振滤波电路,使输出电压转换为规则的正弦波,逆变后输出的三相交流电压波形如图5所示。

2.3 输出6路SPWM控制信号

为了改善输出电压、电流波形,降低电源谐

波,实验采用了SPWM技术。在传统的PWM调制方式的基础上改变了调制脉宽方式,将脉冲宽度时间按正弦规律变化,再经过LC滤波就可以做到平滑的正弦波输出。实验中的SPWM波采用正弦波和三角波自然正交生成,如图6所示,每路SPWM波分别控制一个IGBT开关管。

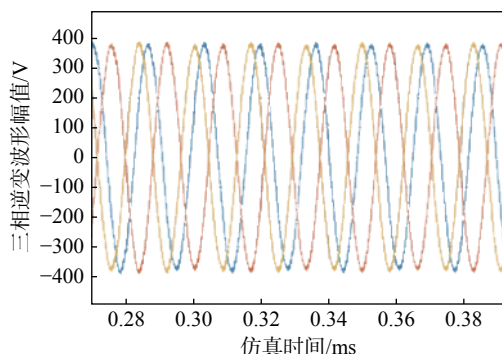


图5 逆变交流电压波形

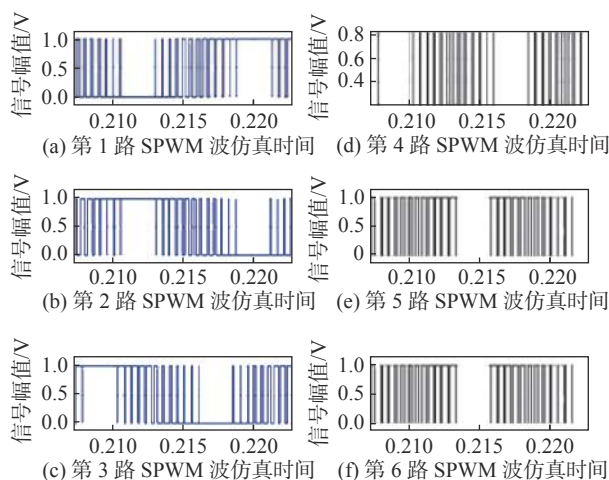


图6 6路SPWM驱动信号

2.4 自适应控制电路设计与仿真

控制反馈在实际电路中必不可少,是控制设计的核心内容之一^[14-15],加入自适应策略后,可以很大程度降低系统的响应时间,减少系统的震荡,降低系统的超调量,增加系统的稳定性。本次实验教学改革采用的是PI调节控制,可以实现转速和电流无静差调速,主要对 K_p 和 K_i 两个参数进行设置,学生在充分掌握PI调节的理论知识的前提下也可以自行设计PD或者PID控制部分,并对3种控制方法进行对比。本次实验教学改革对应的是大一下学期或者大二上学期的工科大类学生,有很多学生并不是很了解控制参数的计算方法,因此实验是通过工程整定法,将两个参数的大概值以及实验调节基

本方法都告诉学生，让学生结合输出波形对参数进行局部调整，进而达到让学生理解自适应控制方法在电机控制领域应用的目的。PI 控制部分参数根据实际仿真选择，这里选取比例系数 $K_p=0.4$ 、 $K_i=500$ ，设置仿真时间为 3.5 s，确保电动机等其他参数正常时启动仿真模型，从示波器可以得到闭环交流调速系统的电动机转速与仿真时间的关系。

3 通过 Simulink 搭建完整的交流调速仿真自适应模型

仿真模型主电路由三相交流电源、整流电路、逆变电路、滤波电路和电动机负载模块 5 个部分组成。主电路功能是：将三相交流电压进行全波整

流，变为直流电压并滤波；再用逆变电路将其转换为频率、电压均可调的交流电压；最后用可调的交流信号控制电动机的转速。控制电路主要包括控制信号的产生以及 PI 控制两部分：系统用三角波与特定频率的正弦波产生控制信号 SPWM 波；控制反馈部分采用 PI 控制，主要对 K_p 和 K_i 两个参数进行设置。三相交流电动机仿真模块的主要参数设置为：电动机额定电枢电压 $U_N=220$ V；额定电枢功率 $P=3$ kW；定子电阻 $R_s=0.43$ Ω ；定子电感 $L_s=4.2$ mH；转子电阻 $R_r=0.81$ Ω ；转子电感 $L_r=2.0$ mH；电枢电感 $L_a=69.5$ mH；飞轮惯量 $J=23$ N·m²；额定转速 $N=1400$ r/min。尽量与实验室三相交流电机铭牌参数以及实测参数一致，具体仿真电路如图 7 所示。

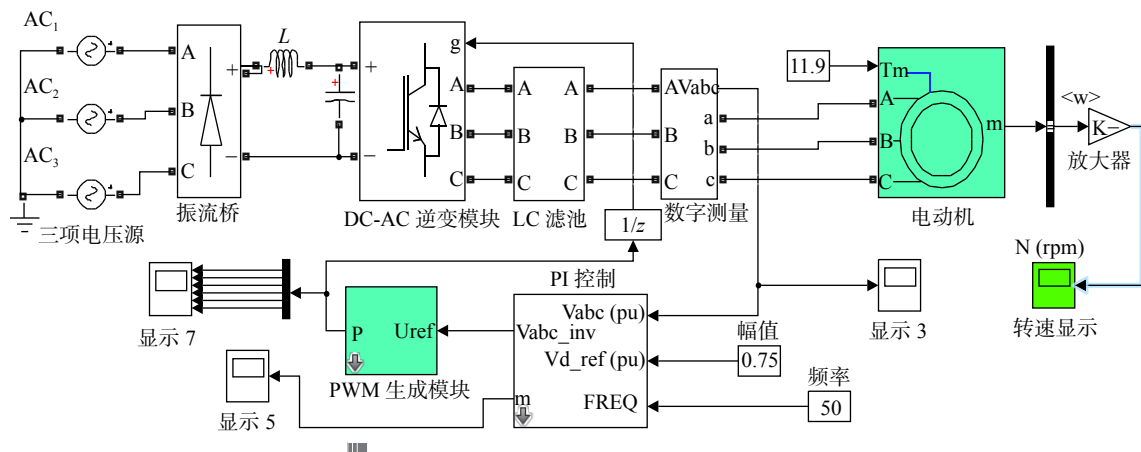


图 7 电压型交直交变频器控制电机仿真图

由实验数据计算：电路中储能电感 L_1 取 0.01 H，电容 C 取 0.0001 F，稳压电抗器 L_2 取 0.1 H。由实验仿真结果可知，输出电流与电压中含有大量高次谐波，且波形总畸变率很高，负载是感性的电动机负载，这样的输出电压理论可以驱动电机工作，但会使负载运行噪声增大，并缩短负载使用寿命。因此，在负载端加入了 LC 滤波模块，系统输出电压畸变率基本可以控制在 1% 以下。

对控制信号 SPWM 产生电路正弦波的频率和调制深度进行调节，可以得出，正弦信号的频率和电动机的转速是成正比的，并且频率越小电动机越容易达到稳定，如图 8 所示。调制深度也可以影响逆变输出波形幅值，进而影响电动机转速，但调制深度对电动机转速影响不明显，具体仿真结果如图 9 所示。

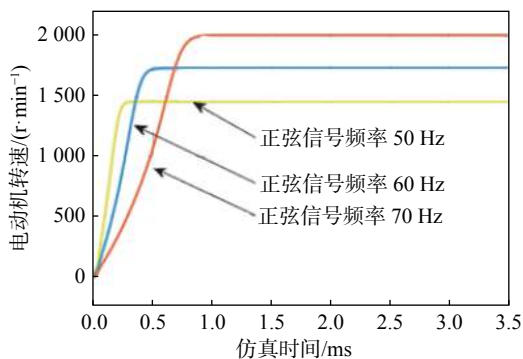


图 8 电动机转速随信号频率的变化情况

从图 10 可以看出：加入自适应控制系统前，电机转速经过 0.5 ms 可以基本稳定，并且在仿真初期会出现短暂的震荡，在实际控制电路中震荡可能会更加明显；加入自适应控制后，系统稳定下来基本用时 0.25 ms，电机转速随时间的增加迅速平滑提升，并没有出现任何震荡。结合以上结

果:在DC-AC-DC电机调速电路中加入自适应控制系统,可以有效消除或者减小系统启动过程中的震荡,增加系统稳定性,并且可以有效缩短暂态过程。

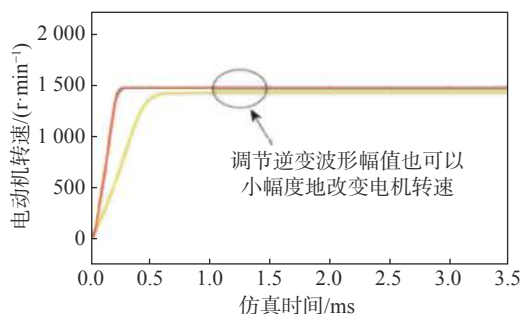


图9 逆变波形幅值对电机转速的影响

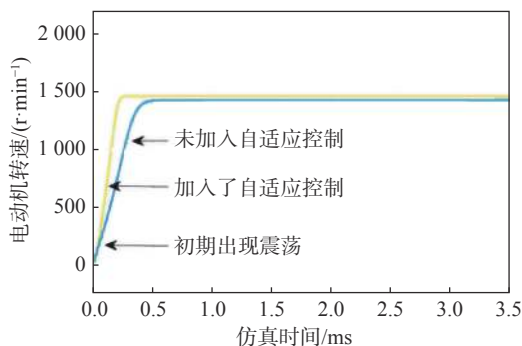


图10 加入自适应系统前后仿真对比

4 实验案例在具体教学中的应用

疫情下电工实验课应采用多种方式,以满足各种特殊情况下实验的顺利进行。电工实验中的绝大部分实验都需要用到220 V交流电,并不能简单地用口袋实验室或者一些远程实验模块代替。因此利用暑假时间,开发了这套Simulink仿真的三相交流电机调频实验方案,具体实施方案如表1所示。

表1 教改项目安排及学时分配

教改设计	实验内容	学时
实验项目	基于PI控制的三相交直交变频器实验案例构建	—
实验预习	让学生尽可能掌握整流滤波、三相逆变、PI控制、功率测量、电机转速测量以及信号频率与电机转速的关系等相关知识	2
软件仿真	Simulink仿真	4
实际数据测量	实测三相负载功率测量、三相交流电信号频率与电机转速之间的关系	4
实验报告	给定制式报告,填写结果并分析	4

此模型可以广泛应用在电机实验教学环节,并可以取得良好的教学效果:首先,学生在疫情严重时期或者预习阶段就可以依据给定的模型,通过修改相关参数,进而测量关键节点的电压、电流数据以及暂态波形,从而加深对理论知识的理解;在深刻理解理论知识以及实验操作的基础上再来实验室做实验,通过对比仿真结果与实测参数,可以更好地掌握和理解所学知识;其次,通过仿真实验与实物实验分开的模式,也可以有效地将学生进行分流,确保疫情下的实验安全、顺利地进行;最后,可以将复杂的实验仪器通过软件仿真的形式逐步讲明白各部分的原理,学生也可以通过改变电路参数的形式,进一步理解关键参数对设备性能的影响。

5 结束语

本文基于自适应控制方法构建了三相电压型交直交变频器设计实验案例。应用MATLAB软件仿真集成环境Simulink进行仿真,实验案例可以随时设置仿真参数而不受硬件环境影响,并且能够实时观察仿真结果随参数的变化情况,适用于电力电子技术的研究及高电压实验教学工作。将该实验教学仿真平台应用于实际实验教学中,相比传统的硬件平台,这种“硬件+软件仿真”的实验方式可以让学生更好地理解、掌握三相整流、谐波控制、IGBT逆变、自适应调节、改进PWM波控制等理论知识,有助于提高学生电路设计、仿真分析及解决问题的能力。此外,该实验平台仿真结果在实际工程设计中也有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 鲁西坤, 巩银苗, 杜庆楠, 等. 交交变频器自适应控制系统的设计及仿真[J]. 无线互联科技, 2018, 4(7): 40-42.
- [2] 冯兴田. 基于MATLAB的通用变频器仿真教学系统开发[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(9): 135-138.
- [3] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 刘柱, 卢剑锋, 王一达. 基于模糊控制的隧道射流风机变频器应用和仿真[J]. 现代机械, 2018(5): 69-71.
- [5] 潘洪亮, 姚建均. 专家PID控制器在电液伺服系统中的应用研究[J]. 自动化技术与应用, 2008(11): 29-32.

(下转第116页)