

基于 PLC 变频器控制系统虚拟仿真实验室建设的实践分析

张翠玲, 邢义通, 杨龙, 贾小龙

宁夏理工学院 电气信息工程学院, 宁夏 石嘴山 753000

DOI: 10.61369/VDE.2025230009

摘要 : PLC 变频器控制系统已成为现代工业生产的核心控制单元, 其教学过程对实践性与安全性的要求日益严苛。实体实验室受设备成本高、损耗速度快、操作风险大等因素制约, 难以满足大规模、深层次的教学需求。本文以电气工程相关专业教学需求为导向, 围绕接触器、继电器、PLC 等核心知识点, 阐述基于 PLC 的变频器控制系统虚拟仿真实验室的建设路径。通过整合电气控制设备虚拟资源、开发交互式仿真模块、构建多维度教学评价体系, 实现理论教学与实践操作的深度融合。实践表明, 该虚拟仿真实验室有效提升了学生的工程实践能力与系统设计能力, 解决了传统教学中的诸多痛点, 为工业自动化领域人才培养提供了有力支撑。

关键词 : PLC; 变频器; 虚拟仿真实验室; 工业自动化; 实践教学

Construction Practice Analysis of PLC-Based Inverter Control System Virtual Simulation Laboratory

Zhang Cuiling, Xing Yitong, Yang Long, Jia Xiaolong

School of Electrical and Information Engineering, Ningxia University of Science and Technology, Shizuishan, Ningxia 753000

Abstract : PLC inverter control systems serve as the core control units in modern industrial production, with their teaching imposing increasingly high requirements on practicality and safety. Constrained by high equipment costs, rapid wear and tear, and significant operational risks, physical laboratories struggle to meet large-scale, in-depth teaching needs of electrical engineering-related majors. This paper outlines the construction path of a virtual simulation laboratory for PLC-based inverter control systems, focusing on core knowledge such as contactors, relays, and PLCs. By integrating virtual electrical control resources, developing interactive simulation modules, and building a multi-dimensional teaching evaluation system, it achieves in-depth integration of theoretical teaching and practical operation. Practice proves that the laboratory effectively enhances students' engineering practice and system design capabilities, addresses key pain points in traditional teaching, and provides strong support for talent training in industrial automation.

Keywords : PLC; inverter; virtual simulation laboratory; industrial automation; practical teaching

绪论

《中国制造2025》推动下, PLC 与变频器控制系统成为工业核心, 2024 年我国相关市场规模占工业自动化领域 35% 以上, 人才需求迫切。传统教学中, 实体实验室单套系统成本、年维护费占比较高, 存在安全风险与实操时长不足等问题。虚拟仿真技术以安全、可重复等优势成为教学改革关键方向^[1]; 实践中, 学生可安全完成全流程实训, 高校降低成本, 企业获优质人才。国外 MIT、西门子的仿真平台各有优劣^[2,3], 浙大、哈工大的研究仍存系统集成与交互性不足等问题^[4,5]。本文构建基于理论、资源、模块、应用“四位一体”的实验室建设框架; 聚焦核心理论、建设路径、成果分析及优化方向, 采用文献、实证与数据分析法开展研究。

一、PLC 变频器控制系统的理论分析

PLC 变频器控制系统是由电气控制元件、PLC 控制器、变

频器、执行机构(如三相异步电动机)组成的有机整体协同工作, 实现对工业设备的精准控制。PLC 是系统的“控制核心”, 变频器是实现电机调速的关键设备, 明确各部分的工作原理与功能特

本文系宁夏教育厅一流本科课程项目《三相异步电机变频调速系统虚拟仿真实验》的研究成果。

性，是虚拟仿真实验室建设的理论前提。

（一）核心电气控制元件的工作机制

接触器作为系统中实现电路通断的核心执行元件，其工作原理利用电磁感应定律，由电生磁吸引衔铁带动触头闭合，实现主回路或控制回路的接通；线圈断电后，触头复位断开。

继电器是控制器件，本质上是一种自动控制开关。当输入信号（如电压、电流）达到预设阈值时，继电器内部触头发生动作，实现对输出回路的控制。

熔断器是保护器件，其核心作用是实现短路与过电流保护。当电路中电流超过额定值时，迅速切断电路，避免设备损坏与安全事故。

开关按钮是最基础的人机交互元件，实现动触点与静触点的通断，向系统发出控制信号（如启动、停止）。

（二）PLC 与变频器的控制原理

PLC（可编程逻辑控制器）的硬件结构包括中央处理单元（CPU）、存储器、输入/输出（I/O）接口、电源模块等。工作过程遵循“循环扫描”原则^[6]，即通过输入接口采集现场信号（如按钮状态、电机转速），在CPU中执行用户编写的控制程序（如梯形图、指令表），再通过输出接口向执行元件（如接触器、变频器）发送控制信号，实现对生产过程的顺序控制、定时控制、计数控制等功能。

变频器是电力控制设备，其核心功能是通过改变电机工作电源的频率，实现交流电动机的无级调速。根据电机转速公式 $n=60f(1-s)/p$ （其中 n 为转速， f 为电源频率， s 为转差率， p 为磁极对数），通过调节变频器输出频率 f ，即可实现电机转速的精准控制，同时具备节能、启动平稳等优势^[7]。

（三）系统整体控制逻辑

PLC 变频器控制系统的典型控制流程为：操作人员通过开关按钮发出控制指令（如启动指令），PLC 输入接口采集该信号后，执行内部控制程序，向变频器发送启动信号与频率设定值；变频器接收信号后，输出对应频率的交流电驱动三相异步电动机运转；电机运行过程中，转速传感器将转速信号反馈至 PLC，PLC 根据反馈信号调整输出指令，实现闭环控制；当出现过载、短路等异常情况时，热继电器、熔断器等保护元件动作，切断相关回路，同时将故障信号传输至 PLC，PLC 发出停机指令，保障系统安全。

二、基于 PLC 的变频器控制系统虚拟仿真实验室建设路径

虚拟仿真实验室建设以“理论与实践融合、安全与高效并重、自主与引导结合”为原则，结合前文所述的核心理论知识与教学需求，从硬件支撑、软件开发、资源整合、评价体系四个维度，构建完整的建设路径。

（一）硬件架构搭建：构建稳定的仿真运行平台

硬件系统是虚拟仿真实验室的运行基础，需满足多用户同时在线操作、三维仿真数据实时处理等需求，主要包括服务器集

群、终端设备、网络支撑三部分。服务器集群采用“主从架构”，主服务器负责系统管理、数据存储与用户权限分配，配置高性能 CPU（如 Intel Xeon Gold 6330）与大容量固态硬盘（2TB），确保系统稳定运行；从服务器承担仿真计算任务，配备独立显卡（NVIDIA RTX A5000），提升三维模型渲染与动态仿真的处理速度。

终端设备包括实验室固定终端与移动终端，实验室配备多台高性能台式电脑，支持学生现场实操；同时开发移动端访问功能，学生可通过笔记本电脑、平板等设备远程登录系统，实现随时随地学习。实验室内部通过有线网络保障数据传输稳定性，远程访问则通过 VPN 加密通道，确保数据安全与访问流畅。

（二）软件模块开发：实现全流程交互式仿真

软件系统是虚拟仿真实验室的核心，围绕认知、实践、评价的教学流程，开发五大功能模块，实现从元件学习到系统调试的全流程覆盖。

1) 元件认知模块：基于 Unity3D 引擎构建接触器、继电器、PLC 等核心元件的三维模型^[8]，模型精度达工业级，可实现 360° 旋转观察。点击模型不同部位（如线圈、触头），可显示其名称、技术参数及工作原理。

2) 系统搭建模块：提供虚拟电气柜、导线、工具等资源，学生根据给定的电气原理图，完成元件选型、安装与接线，系统可以判断对错及显示短路报警和解除不良等提示。

3) PLC 编程与调试模块：集成 PLC 编程环境，支持梯形图、指令表两种主流编程方式，提供语法检查与错误提示功能。

4) 变频器控制模块：模拟西门子 MM440、三菱 FR-A740 等主流变频器的操作界面，学生可设置输出频率、加速时间、减速时间等参数。系统支持参数设置错误提示，实时显示变频器的输出电压、电流及电机转速，学生可直观观察参数调整对电机运行状态的影响。

5) 故障诊断模块：系统随机生成故障，学生通过观察系统运行状态（如电机不转、转速不稳）、检测各元件电压电流信号，定位故障点并完成维修。故障诊断过程全程记录，便于教师点评与学生总结。

（三）教学资源整合：构建多元化教学体系

依托软件平台，整合理论教学、实验指导、案例库等多元化资源，形成理论、实践、拓展的完整教学链条。理论资源包括电子教材、教学视频、知识点测试题库；教学视频涵盖 PLC 编程技巧、变频器参数设置等实操内容，支持倍速播放与重点标记。

实验指导资源包括标准化实验手册与虚拟操作演示，实验手册明确实验目的、原理、步骤与注意事项；虚拟操作演示通过动画展示实验关键环节。

（四）评价体系构建：实现教学效果精准评估

构建了过程性评价和终结性评价的双维度教学评价体系^[9]，全面评估学生的学习效果。过程性评价占比 60%，系统自动记录学生操作数据并量化打分；终结性评价占比 40%，以实验报告与综合实训考核为主，综合实训考核要求学生在规定时间内完成“系统搭建 - 编程 - 调试 - 故障排除”全流程任务。开发学生反馈

模块,学生可对实验内容、平台操作、教学指导等进行评价与留言,提出改进建议,形成教学、反馈、优化的闭环机制^[10]。

三、虚拟仿真实验室建设的实践应用与成果分析

以某高校电气工程及其自动化专业2022级学生为实践对象,随机挑选120名学生,分为实验组60人(采用虚拟仿真实验室教学)与对照组60人(采用传统实体实验室教学),通过一学期的教学实践,从教学效果、资源利用、学生能力三个维度分析实验室建设成果^[10]。

(一) 教学效果显著提升

1) 实验成绩方面,实验组平均成绩为86.3分,较对照组的72.5分提升19.0%;其中优秀率(90分及以上)达35.0%,对照组仅为11.7%;不及格率实验组为1.7%,对照组为13.3%。2) 从知识点掌握情况来看,实验组在“元件选型”“PLC程序调试”“变频器参数设置”等核心知识点的测试正确率分别为92.0%、88.3%、90.0%,均显著高于对照组的68.3%、56.7%、65.0%。3) 学习兴趣与参与度方面,通过问卷调查显示,实验组88.3%的学生认为虚拟仿真实验“趣味性强、易于理解”,90.0%的学生表示“愿意主动花时间反复练习”(人均实验时长达到8.2小时,是对照组的2.3倍);而对照组仅45.0%的学生对实体实验表示感兴趣,38.3%的学生因“担心操作失误损坏设备”而不敢主动尝试。充分体现了虚拟仿真实验室的可重复性优势^[11]。

(二) 教学资源利用效率优化

资源利用方面,虚拟仿真实验室支持24小时在线访问,学期

内累计访问量达14400人次;而实体实验室受场地与设备数量限制,日均最大接待量仅32人次。35.0%的学生利用课余时间通过移动端登录系统练习,打破了传统实验室的时空限制。

(三) 学生工程实践能力增强

在综合实训任务中,实验组学生完成“三相异步电动机变频调速系统搭建与调试”全流程的平均时间为45分钟,较对照组的78分钟缩短42.3%;故障诊断准确率达82.0%,对照组仅为43.3%。实验组的学生能够更快熟悉工业现场的PLC变频器控制系统,独立完成基础参数设置与简单故障排查的时间较往届缩短30%以上,获得实习单位的高度认可。

四、结论与展望

基于PLC的变频器控制系统虚拟仿真实验室的建设实践,总结了虚拟仿真实验室的建设从硬件架构、软件开发、资源整合、评价体系四个维度入手,构建“硬件稳定、软件交互、资源丰富、评价科学”的完整体系;实践表明虚拟仿真实验室有效提升了教学效果与资源利用效率,增强了学生的工程实践能力与创新能力。但虚拟仿真实验对部分复杂工业场景的还原度有待提升,实践服务对象范围窄,研究结果的普适性需进一步验证。还应加强引入真实案例,提升虚拟场景真实性与复杂性,利用AI技术实现智能评价精准评估创新能力,可探索虚拟仿真技术与VR/AR技术的融合应用,进一步提升教学体验与效果^[12]。

参考文献

- [1] 陈立万,赵强.面向工程教育认证的虚拟仿真实验室建设[J].高等理科教育,2021(4):102-107.
- [2] 西门子(中国)有限公司.TIA Portal 仿真软件应用指南[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [3] Smith J,Johnson L.Virtual Reality Simulation for Industrial Control System Training[J].IEEE Transactions on Education,2019,62(2):103-108.
- [4] 廖常初.PLC编程及应用(第5版)[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [5] 浙江大学智能制造实验室.工业自动化虚拟仿真教学平台的构建与应用[J].高等工程教育研究,2020(3):156-161.
- [6] 哈尔滨工业大学电气工程学院.虚拟仿真实验考核机制的创新与实践[J].实验室研究与探索,2022,41(6):225-229.
- [7] 王兆安,刘进军.电力电子技术(第6版)[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [8] 西门子工业自动化事业部.变频器在工业领域的应用与节能分析[J].电气传动,2020,50(7):45-50.
- [9] 李明,张华.基于Unity3D的PLC变频器控制系统虚拟仿真设计[J].计算机仿真,2021,38(5):392-396
- [10] 王健,刘芳.虚拟仿真技术在电气工程实践教学中的应用[J].实验技术与管理,2022,39(2):187-191.
- [11] 张宏梅,李刚.基于PLC的变频器控制实验教学改革与实践[J].中国现代教育装备,2021(11):82-84.
- [12] 王莉,陈晓峰.基于虚拟仿真的PLC课程实践教学模式研究[J].职业技术教育,2021,42(23):48-52.