

# 面向新工科人才培养的风力发电虚拟仿真实验平台设计及应用

苗磊, 李擎, 杨旭, 崔家瑞, 郭典雨  
(北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了从新工科人才培养的角度助力“双碳计划”, 设计了一套风力发电虚拟仿真实验平台, 并在实践教学应用中应用。首先, 构建虚拟仿真平台整体框架。其次, 以风力机变桨距控制、整流器及逆变器矢量控制作为基础实验项目, 并在分析实际工程背景的前提下, 设计了发电机低耗运行和不平衡电压下的逆变器控制拓展实验。最后, 完成包括课前预习测验自动计分、课中实验结果即时评判以及课后总结报告自动初评等环节在内的实验教学全流程考核。虚仿平台实际应用效果表明, 作为理论课教学内容的有力补充, 该平台有助于提升学生创造性解决风力发电领域复杂工程问题的能力。

**关键词:** 风力发电; “双碳”目标; 新工科; 虚拟仿真; 复杂工程问题; 人才培养

中图分类号: TM614-4;G642

文献标识码: A

文章编号: 2096-5206(2023)03(b)-0045-03

## Design and Application of Wind Power Virtual Experimental Platform for the New Engineering Talent Cultivation

MIAO Lei, LI Qing, YANG Xu, CUI Jiarui, GUO Dianyu

(School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** A set of virtual simulation experimental platform of wind power generation is designed and applied in practical teaching for assisting carbon reduction from the perspective of new engineering talent cultivation. Firstly, the overall framework of the virtual simulation platform is built. Then, the basic experiments are set up, which include variable pitch control experiment, rectifier and inverter vector control experiments. Moreover, the low-loss operation of generator and control strategy for grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions are designed as developed experiments, which on the premise of analyzing the actual engineering background. Finally, the artificial intelligent technology is adopted to complete the whole assessment of the experimental courses, which including experiment preparation test, real-time evaluation of experimental results and automatic preliminary evaluation of summary report. The practical application results show that the virtual simulation experimental platform complements the theory course effectively, and improves innovation ability of students' for solving complex engineering problems in the field of wind power generation.

**Key words:** Wind power; Carbon peak and neutrality targets; New engineering; Virtual simulation; Complex engineering problems; Training of talents

**基金项目:** 教育部第二批新工科研究与实践项目(E-ZDH20201602); 教学部产学研合作协同育人新工科建设项目(2021010460001, 202101320001); 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会专业教育教学改革研究课题(202104, 202149); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-TP-20-060A1)。

**作者简介:** 苗磊(1984-), 男, 河北邯郸人, 博士, 工程师, 研究方向: 实验教学与实验室建设。

**通讯作者:** 李擎(1971-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 研究方向: 人工智能、本科教学与管理、实验室建设与管理, 通讯邮箱: liqing@ies.ustb.edu.cn。

新工科建设以学科交叉融合为途径, 以信息技术运用为特征<sup>[1-2]</sup>, 虚拟仿真(以下简称“虚仿”)实验教学作为教育信息化的重要发展举措之一, 拓展了实验内容的深度和广度、延伸了实验授课的时间和空间<sup>[3-4]</sup>。近年来, 相关文献对于虚仿在风电实验教学中的应用进行了较为深入的研究与探索<sup>[5-6]</sup>, 但总体来看, 这些虚仿平台仍然存在以下不足之处: 首先, 实验内容往往关注风力发电系统运行过程中的单个环节, 未能贯穿从风能捕获到电能平稳并网全部过程, 系统性不足<sup>[7-8]</sup>; 其次, 虚仿平台实验项目多为理论验证型

实验,如:发电机机械特性分析<sup>[9]</sup>、变流装置运行原理验证<sup>[10]</sup>等,风电系统实际运行中存在的发电机低损耗运行<sup>[11]</sup>、不平衡电压下的逆变器多目标控制等问题<sup>[12]</sup>均未体现,实践性不足;最后,实验教学考核评价手段单一,且大多依靠人工完成<sup>[13-14]</sup>,智能性不足。

针对上述问题,本文设计了一套风力发电虚仿实验平台。在项目设置方面,为了增强实验内容的系统性,基础实验项目覆盖风能捕获到电能并网全流程;为了更好地贴合工程实际情况,增强实践性,设计发电机低损耗运行和不平衡电压下的逆变器控制2个拓展实验项目。在实验教学管理方面,采用预习测验题目随机抽取、工况参数随机设定等方式,确保每位学生的答题内容、实验结果互不相同,从而杜绝抄袭,提高学生诚信意识;采用课前测验自动计分、课中实验即时评判以及课后报告自动初评等方式,较大幅度降低教师工作强度。

## 1 虚仿平台设计思路

### 1.1 平台功能框架

以进一步提升虚仿实验项目的系统性、实践性以及实验教学管理智能性为出发点,搭建了虚仿实验平台,该平台涵盖课前、课中及课后三大环节,其中,课前环节包括运行原理认知及理论知识测验等功能;课中环节包括全流程风力发电虚拟仿真功能;课后环节主要包括实验报告提交及自动批改等功能。

在平台后端,主要包括认知内容调用、测试题库读取、仿真模块调用、随机工况参数生成、模型运行计算、实验报告自动批改以及成绩计算等功能模块。

### 1.2 实验项目设计

实验项目主要围绕风力发电全流程展开,以系统性为原则,设计了风力机变桨距控制、整流器及逆变器矢量控制3个基础实验项目;以实践性为导向,设计了发电机低损耗运行方案探索和不平衡电压下的逆变器控制方法研究2个拓展实验项目。

基础实验项目旨在使学生熟悉风力机变桨距控制、整流器及逆变器矢量控制等常见运行控制方法,掌握其控制结构特点及参数设置要领,从而进一步夯实理论知识;拓展实验项目则通过融入工程实际中的发电机运行效率提升和逆变器故障穿越性能改善等问题,帮助学生进一步拓宽工程视野,了解解决风力发电领域工程实际问题的思路和方法,为今后走上相关工作岗位打下基础。

## 2 虚拟仿真平台教学实践

### (1) 风力机变桨距控制。

在实验过程中,需要根据变桨距控制结构连接仿

真模块、编写模块程序代码,在此基础上,结合后台随机设定的如叶轮半径、空气密度以及平均风速等工况参数,整定变桨距PI控制参数,从而实现输出功率保持在额定功率附近,同时,该输出功率作为变流器的输入功率。

### (2) 整流器矢量控制。

在实验过程中,学生需根据双闭环控制结构搭建并连接仿真模型,编写程序代码,并通过反复优化转速环和电流环中的3组控制参数,实现理想的运行效果,即风力机保持额定转速、发电机运行在高功率因数下。

### (3) 逆变器矢量控制。

逆变器矢量控制与整流器矢量控制类似,在实验过程中,学生需根据双闭环控制结构搭建并连接仿真模型,编写程序代码,并通过反复优化电压环和功率环中的控制参数,实现理想的运行效果,即直流母线电压保持稳定、单位功率因数并网。

### (4) 发电机低损耗运行。

本实验项目在设计发电机低损耗运行总体思路及实施方案的基础上,首先需建立永磁同步发电机运行损耗数学模型并写入预置仿真模块,其次将该仿真模块与电机控制模块相连,通过在仿真中调节损耗模块的运行参数实现发电机的低损耗运行。

### (5) 平衡电压下的逆变器控制。

首先,需结合不平衡电压产生的原因和带来的影响,明确总体思路;其次,按照总体构思,搭建各环节仿真模块,考虑到实验难度及该实验的侧重点,部分仿真模块或模块输入输出接口已提前封装好;最后,完成仿真模块外部接线,并反复优化控制参数,实现并网电流幅值安全限制下的有功与无功功率无波动、输出电流正弦等控制目标。

## 3 考核评价

课前预习测验以客观题为主,主要围绕与此次实验相关的基本概念、原理等方面展开。预习测试采取随机组题的形式,完成答题后,可即时得到预习成绩。为了督促学生独立完成预习任务,更好地熟悉此次实验课的重点内容,快速把握知识点,预习成绩需高于一定分数后,才可进入下一实验环节,具体分数阈值可由教师在后台自行设定。

在课中实验环节,管理后台针对实验项目制定了不同的实验结果考核标准,主要包括调节时间、最大超调量、稳态误差等。为充分考查并反映学生对理论知识、操作过程等方面的具体熟练程度,拉开分数差距,对赋分规则分段细化,若调节时间、超调量等接近理想值,则该实验项目成绩会接近满分;若实验结果仅满

足基本要求或出现严重偏差,则该实验环节成绩会相对偏低。

总结报告重点包含基础理论理解、控制方案设计思路及具体实施流程、实验结果分析、实验收获等内容。总结报告采用关键字字符串匹配进行自动初评,系统在报告中查找预先设置的专业术语关键词,依次进行匹配,并在报告中高亮显示,同时根据关键词匹配度生成自动初评成绩,然后再由教师手动复评。

实验项目总成绩计算公式如下所示,其中,课前、课中及课后分别占比20%、50%、30%。

$$N_{\text{total}}=20\%N_{\text{课前}}+50\%N_{\text{课中}}+30\%N_{\text{课后}} \quad (1)$$

#### 4 实施效果

风力发电虚拟仿真实验平台为我校自动化、新能源科学与工程等工科专业350余名学生开展电机及拖动实验、分布式发电与微电网技术实验、运动控制系统设计等实验课程、课程设计提供了平台支撑,平均达到1200人时/学年,每学年为5~7名本科生、2~3名研究生进行毕业设计提供了必要的支持,同时,也为我校学生参加校外竞赛提供了平台保障。在近3年的“西门子杯”中国智能制造挑战赛中,参赛队伍取得了10余项省部级及以上奖项。

#### 5 结语

本文设计了一套面向新工科建设的风力发电虚拟仿真实验平台,利用信息化技术,再现并深化了实际工程中存在的科学问题。相对于传统虚仿实验平台,该平台具有较为明显的特点与优势,主要有以下几点:

(1) 系统性改善,实验项目涵盖了风能捕获、整流及逆变等环节,展示了风电系统发电并网全流程,有助于学生深入掌握风力发电基本理论知识。

(2) 实践性增强,本平台涉及的拓展实验项目全部来源于当前风力发电领域较为热点的复杂工程问题,有助于提升学生解决复杂工程实践问题的能力。

(3) 智能性提升,通过全流程实验信息采集、分析及发布,降低了教师的工作强度,全面客观地反映了学生学习能力与知识水平,也为实验教师改进和完善教学过程提供了参考。

#### 参考文献

[1] 刘冬霞. 基于工程管理专业人才培养的虚拟仿

真实实践教学模式研究[J]. 创新创业理论研究与实践,2021,4(8):110-111,114.

[2] 文娟. 虚拟仿真背景下《发电厂电气主系统》实验教学改革——以南华大学为例[J]. 创新创业理论研究与实践,2022,5(14):66-68.

[3] 阎群,李擎,崔家瑞,等. 新工科背景下实践类课程混合教学模式研究[J]. 实验技术与管理,2021,38(1):198-201.

[4] 许丽,王鸿鹏,高振元,等. 综合性高校虚拟仿真实验教学项目群建设初探[J]. 实验室研究与探索,2021,40(12):187-190.

[5] 吕庆功,许文婧,秦子. 基于钢铁生产虚拟仿真的工程实践课程建设[J]. 实验室研究与探索,2022,41(1):254-258.

[6] 王志琼,刘广武,刘津彤,等. 多维协同虚拟仿真创新实践教学体系构建[J]. 实验室研究与探索,2021,40(5):197-201.

[7] 张琦,彭志科,寇雨丰,等. 海洋工程试验的浮式风力发电机模型设计[J]. 实验室研究与探索,2019,38(6):9-12,17.

[8] 黄娜,关正伟,党晓圆,等. 直驱风力发电机翼型特性数值仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(10):124-127,132.

[9] 邢作霞,张新宇,刘洋,等. 风电机组运行功率特性原理验证型实验开发[J]. 实验技术与管理,2021,38(4):192-196,217.

[10] 王攀攀,晏夏瑜,徐瑞东,等. 基于重复+PI控制的LCL型并网逆变器仿真研究[J]. 实验室研究与探索,2020,39(5):90-97.

[11] 李进泽,梅恬语,赵震,等. 不同工况下3.3 MW永磁直驱风力发电机电磁场仿真分析及损耗修正[J]. 可再生能源,2022,40(3):338-343.

[12] 陈凯杰,赵葵银,任晓红,等. 不平衡电网电压下双馈异步风力发电机组控制策略研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2021,31(3):8-12,42.

[13] 姚吉,陈子坚,冯红岩,等. 可移动式风光互补发电实验实训系统设计与研究[J]. 实验技术与管理,2019,36(7):87-92.

[14] 艾萌萌,夏云彦,徐永明. 虚拟仿真实验在电气工程专业应用探究——以潜油电动机实验为例[J]. 中国现代教育装备,2022(9):20-22.