

基于半实物仿真的风力发电实验教学平台

潘春鹏,郝正航*
(贵州大学 电气工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘 要:针对传统的风力发电教学实验平台功能单一、难以完全满足新工科建设对学生多维能力培养需求的现状,基于半实物仿真技术,设计了一种产学研一体化的风力发电控制装置研发及教学实验平台。以 OBE(基于学习产出的教育模式,Outcomes-Based Education)理念为指导,依托贵州大学通用实时仿真平台,以培养科学素养高、创新能力强、实践能力强的三位一体的复合型高级工程技术人才为目标,参考企业实际产品研发测试流程,通过采用先进的实时仿真技术,构建了适用于新工科建设的新一代实验教学平台,探索了产学研一体化的新工科人才培养路径。

关键词:风力发电;硬件在环;产学研一体化;新工科

中图分类号:TM614; G642.423 **文献标识码:** A

风能是一种清洁的可再生能源,风力发电是风能利用的主要形式^[1]。一个完整的风力发电系统涉及的专业知识包括电机学、电力电子技术、自动控制、电力拖动等,而这些知识对应的是电气工程及其自动化专业的重要专业课。因此,有必要把风力发电系统作为该专业创新综合应用类课程的实验教学实例^[2]。

传统实物风力发电教学实验平台功能单一,多依托于固定的实物拓扑,以操作演示为主,缺乏创新性与拓展性;而纯数字仿真平台可以实现对控制算法的研究,却难以培养学生动手实践的能力。为了实现学生创新、实践与科研多维能力的全面发展,高校自行研制基于半实物仿真技术的新型实验教学平台,已成为当前风力发电实验平台建设探索的热点。

1 风力发电实验教学平台建设现状

目前国内外对风力发电实验教学平台建设进行了很多的探索,但大多是实物实验平台或纯数字仿真实验平台。文献[3]中建设了以小型永磁同步发电系统和 LabVIEW 监控系统组成的风力发电实验平台,可以实现完整风力发电过程的演示,帮助学生风力发电建立直观的概念;文献[4]中通

过对实际运行大型风力机进行实时数据的采集,配合 3D 动画技术,建立了一个交互式风力学习实验平台,形象地展示了风力发电的过程,让学生学习过程充满趣味性;文献[5]中建设了以可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、电机、风机和蓄电池组成的小型风力实验平台,学生通过调节风速按钮,可以观察风力发电功率曲线的变化,较为形象地展示了风力发电的实际情况。以上 3 种风力教学实验平台功能都比较单一,主要以操作演示为主。学生只能对风力发电的整体过程大致了解,对少部分原理进行简单验证,学生参与度低。

文献[6]中基于德国 Lucas-nuelle 公司的双馈风力发电教学实验平台,设计了一些典型实验,通过软硬件结合模拟风机运行,结合计算机辅助测量控制,帮助学生形象理解各种晦涩的理论知识。通过风速模拟、风力机控制、双馈风力发电并网、双馈风力发电功率控制与双馈风力发电低电压穿越等实验操作过程,加深了学生对课堂知识的理解。但由于是采用现成的实物实验平台,控制器对学生是不开放的,学生无法研究与运用最新的控制技术,实验过程缺乏创新性与拓展性。

收稿日期:2019-11-16
基金项目:国家自然科学基金项目资助(51567005)
作者简介:潘春鹏(1996-),男,在读硕士,研究方向:配电网自动化和智能电网,Email:2777853818@qq.com.
* 通讯作者:郝正航,Email:haozhenghang@163.com.

文献[7]中以 MATLAB 软件为基础,采用模块化思想,设计了一种风力发电仿真平台;文献[8]中基于 MATLAB 与 LabVIEW 设计了一个风力发电虚拟实验教学平台,突破了实验环境、场地、仪器设备等条件的限制,教学内容丰富形象且成本低。虽然纯软件仿真能够帮助学生学习和验证控制理论与算法,但较难培养学生的实际动手能力,学生对实际的控制器也很难有直观的认识。

总的来说,传统的实物和纯数字仿真风力发电实验平台较难满足新工科建设下对学生科研能力、创新能力与实践能力培养的要求^[9-12]。因此,本文面向新工科建设内涵要求^[13],对风力发电实验平台进行了探索,研制了一种基于半实物仿真技术的实践教学平台。

2 建模方案

2.1 实验平台基础架构

实验平台基础架构采用通用实时仿真器(Universal Real-time Experimental Platform, UREP)。UREP 是自主研发的基于模型化的工程设计应用平台,其基础构架如图 1 所示。UREP 包括主控计算机和实时仿真目标机:主控计算机用于离线建模和实时监控、在线调参;实时仿真目标机用于运行实时模型,并与外部设备接口形成半实物闭环系统。目标机包含多核处理器仿真主板、高速通信单元、智能 I/O 接口单元、协调优化硬件解算器和实时操作系统,是实验平台的核心部分。利用 MATLAB/Simulink 建立动态系统数学模型,经代码转换为 C 代码后,编译下载到实时仿真器内运行,可以进行实时数字仿真、半实物仿真及控制、测量与系统控制等。UREP 具有快速控制原型(Rapid Control Prototyping, RCP)、功率级快速控制原型(Power Rapid Control Prototyping, PRCP)、硬件在环(Hardware In the Loop, HIL)和功率级硬件在环(Power Hardware In the Loop, PHIL)等 4 项基本功能,仿真步长最短可达 30 μ s,完全能够满足风力发电仿真与控制装置研发一体化实验平台建设的基本需求^[14]。

2.2 实验平台的层次化设计

实验平台采用层次化设计思想,如图 2 所示,分为离线仿真、实时仿真和半实物仿真等 3 个层次。第一层次为离线仿真,是指在 PC 端实现功率主系统以及控制算法的建模,并进行离线仿真。该

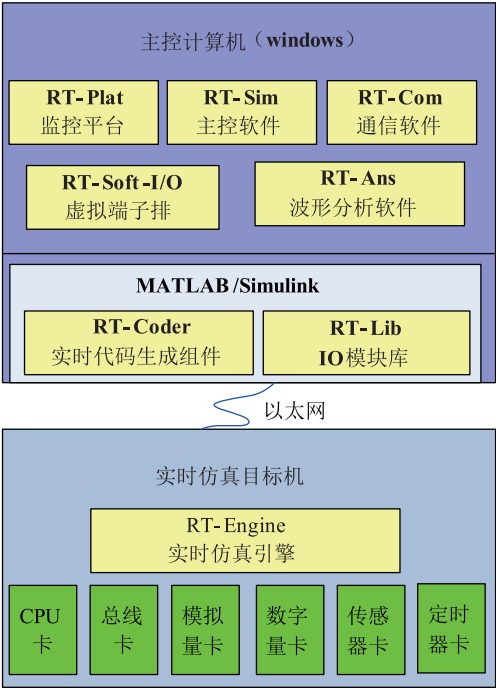


图 1 实验平台的基础架构

Fig.1 Infrastructure of experimental platform

层的主要功能是验证风力发电系统的整体方案是否可行。第二层次是全数字实时仿真,是指将离线模型实时化后导入 UREP 实时运行。功率主系统和控制器两部分的模型分别搭建为硬件在环(HIL)子系统和快速控制原型(RCP)子系统。HIL 和 RCP 均在 UREP 中运行,二者交换的信号通过 UREP 的输入输出端口实现连接。该层的主要功能是通过长时间运行(如几小时至几天甚至更长),验证数字系统的稳定性和可靠性。这是第一层次无法完成的。第三层次是半实物仿真,是指将 RCP 子系统模型通过 Simulink 代码自动生成技术导入嵌入式开发平台(STX-N39),使 RCP 转变为实际控制器,并对主系统进行控制,验证控制算法在实际控制中的性能,可以消除在实际控制中存在的缺陷,并测试极端情况、故障情况下控制器的功能是否完善。该层的主要功能是培养学生基于嵌入式平台开发实际控制器的能力,是半实物仿真平台的最终目标。

2.3 半实物仿真实验平台的组成

实验室现场的半实物仿真实验平台如图 3 所示,由 UREP、PC 上位机、嵌入式开发平台(N39 控制器)、机柜等设备组成。相对于传统操作演示型

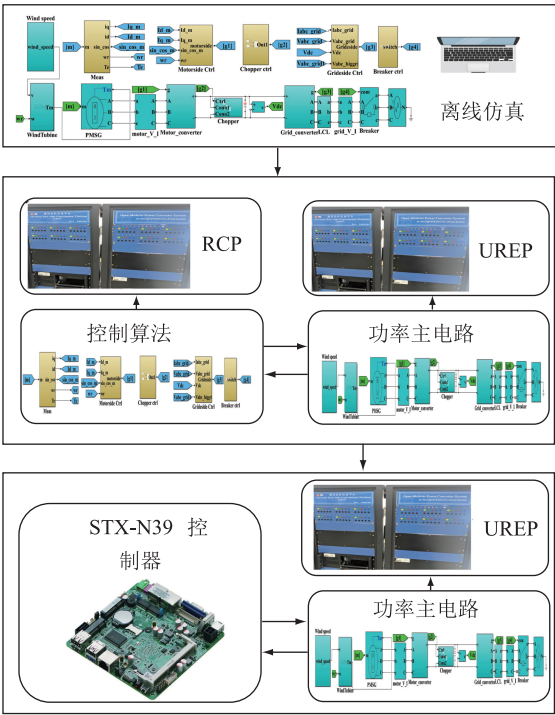


图 2 实验平台的 3 个层次
Fig.2 Three levels of experimental platform

的实物风力教学实验平台,基于半实物实时仿真技术的实验平台,控制器对学生不再是一个黑匣子,学生可以对各种先进的控制算法进行研究与运用,实验过程更具有创新性与拓展性。相对于传统纯数字风力发电仿真实验平台,利用半实物实时仿真技术,将控制器硬件纳入到仿真回路中进行测试,其仿真效果更趋近真实情况,仿真结果更具说服力。并且通过对实际控制器的研发与测试,学生可以真正地接触真实的硬件,学习从理论算法到实际

控制设备运行代码的转换过程,自己动手联合软硬件进行调试,大大提高了学生实验的参与度。

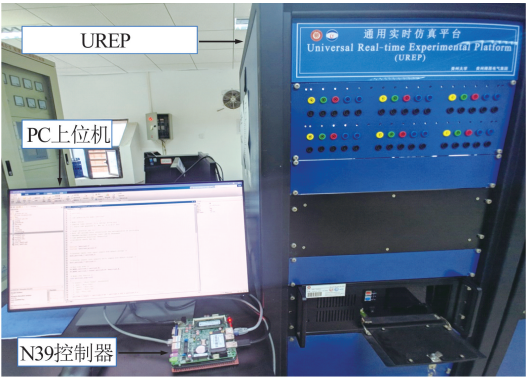


图 3 半实物仿真实验平台
Fig.3 HIL simulation experiment platform

3 风力发电项目实验流程设计

项目式风力发电控制装置研发的实验实践教学主要分为 3 个阶段:控制器研发的理论学习与贯通阶段,控制算法快速验证与创新阶段和实物控制器验证与实践能力提升阶段。

3.1 控制器研发的基础理论验证

本阶段主要通过风力发电系统的 Simulink 仿真模型搭建(图 4),对风力发电的过程形成整体的认识,融会贯通风力发电相关的基础理论知识。

如图 4 所示,实验主要包括:风轮机模型搭建实验,风力发电机侧与网侧变流器控制实验,风力发电最大功率追踪实验,风力发电并网控制实验,LVRT 电压跌落测试实验。

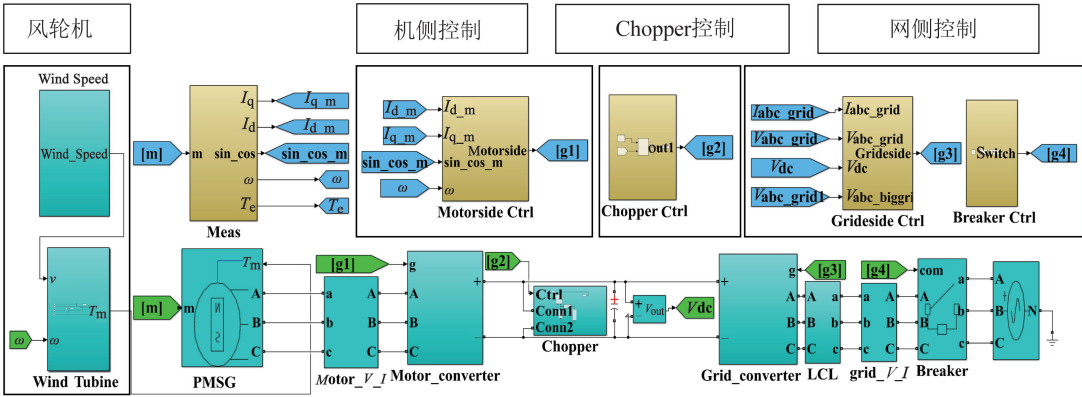


图 4 Simulink 离线仿真模型搭建
Fig.4 The building of offline Simulink simulation model

3.2 控制算法快速验证与创新阶段

风电系统的控制器主要通过嵌入式硬件进行开发,底层代码大都比较复杂,对于编程基础薄弱的电气工程专业学生很难快速适应。为此研制了具有代码快速转化、调试简单的 RCP 快速原型控制器,大大提高控制器开发的效率。如图 5 所示,将第一阶段搭建的控制算法模型与功率主电路模型分别导入 RCP 与 UREP 中运行,进行 RCP+HIL 半实物仿真闭环测试实验,利用先进的半实物仿真技术快速验证所搭建的控制算法的有效性。然后学生根据自己想法对控制算法进行优化,不断试错,不断验证,快速地对控制算法进行创新。

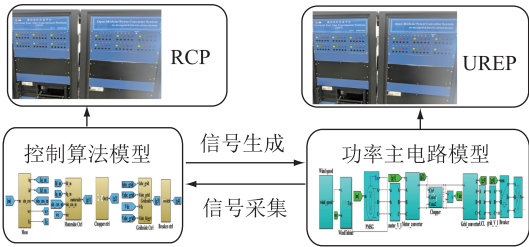


图 5 RCP+HIL 两个半实物仿真闭环测试

Fig.5 Two closed loop tests of RCP + HIL

3.3 实物控制器验证

如图 6 所示,首先在 STX-N39 控制器中刷入 Ubuntu 系统,然后利用 Simulink 代码自动生成技术将控制算法模型转化为 C 代码,并将代码移植到控制器中,同时也需要学会电压电流数据如何采集、PWM 脉冲如何产生等硬件知识。最后将实际的控制器与实时仿真器连接,对控制器进行硬件在环实时仿真测试,真正地实现了产学研一体化。

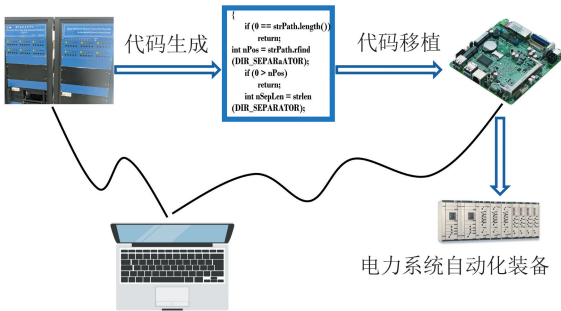


图 6 实际控制器的硬件在环测试

Fig.6 Hardware in the loop test of the real controller

LVRT 电压跌落测试:

电压跌落时,永磁直驱风电机组的主要问题是输出功率不平衡引起的直流母线电压上升,可通过

储存或消耗多余能量的方法,解决功率平衡问题,抑制冲击压^[15]。采用 Chopper 电路实现 LVRT,对直流电压进行监测。当直流电压超过限值 2 000 V 时,触发 Chopper 中的 IGBT,泄放直流母线的能量。

初始风速为 0,在 0.01 s 跳变到 8 m/s;0.2 s 交流断路器合闸,开始并网运行;0.3 s 风速跳变到 12 m/s;0.5 s 交流电压跌落到 0.2 pu,持续 625 ms;1.5 s 仿真结束。

如图 7 所示,0.2 s 前,断路器两侧电压 V_{abc_g} 与 V_{abc_gl} 已基本重合,此时合闸,由图 8 看到其冲击电流很小。

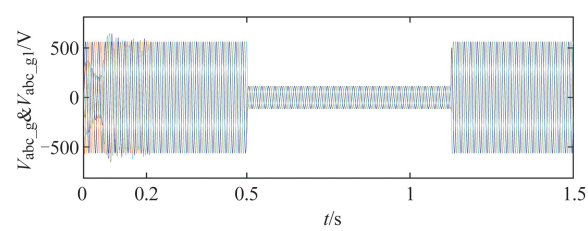


图 7 断路器两侧电压

Fig.7 Voltage on both sides of the circuit breaker

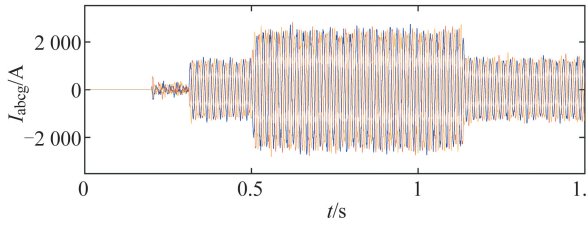


图 8 电网侧电流

Fig.8 Grid side current

如图 9 所示,0.5 s 交流电压跌落时,直流母线电压急剧上升,此时 Chopper 电路被触发,将 V_{dc} 限制在 2 000 V 左右,并且可持续 625 ms 运行,满足 LVRT 测试标准。

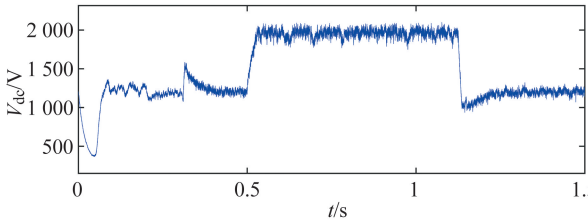


图 9 直流母线电压

Fig.9 DC bus voltage

4 结语

依托自主研发的 UREP 构建了新型风力发电实验平台,将教学-科研-装置研发有机结合起来。通过项目式学习,让学生学会利用全局工程意识来统筹多门学科的知识,学习重心由课本知识转移到了个人能力。通过实际装置的研发,让学生了解了企业电力系统自动化装备的开发流程,实现了由知识传授向企业所需的职业能力过渡。

参考文献:

- [1] 李振东. 直驱永磁同步风力发电实验系统的构建与实验[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(12): 47-49.
- [2] 郝雯娟, 张祺. 教学用风力发电系统虚拟实验台的设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(2): 97-99.
- [3] 严干贵, 于文杰, 戴武昌, 等. 永磁风力发电教学实验平台的研制[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(4): 67-71.
- [4] BUSH J, KANE M, SEGRUD K, et al. An interactive approach to renewable energy research and education [C]//2011 Frontiers in Education Conference, Rapid City, SD, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2011: S3F-1-S3F-5.
- [5] 张儒, 陈志军. 风力发电模拟实验装置设计[J]. 自动化仪表, 2011, 32(9): 35-37.
- [6] 梅柏杉, 吴迪, 冯江波. 双馈风电实验平台在实践教学中的应用研究[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(5): 101-103, 106.

- [7] 王鹏, 王武, 张元敏. 风力发电仿真实验平台开发及应用[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4): 81-83.
- [8] HAO W, LIU H, WANG Y, et al. The design and simulation of a teaching virtual platform by combining LabVIEW and Simulink for undergraduates of electrical engineering [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, Sydney, NAW, Australia. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [9] 姚春光, 潘卫明, 徐殿国, 等. 基于鼠笼式异步电机的风机模拟实验平台研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 23-25.
- [10] 程俊杰, 郑晓丹, 凌松盛, 等. 风力发电综合实验系统研制与应用[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(11): 74-77, 86.
- [11] 李振东. 直驱永磁同步风力发电实验系统的构建与实验[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(12): 47-49, 107.
- [12] 陈明亮, 袁雷, 肖飞, 等. 兆瓦级永磁直驱风力发电模拟实验系统设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 132-136.
- [13] 张爱华, 于忠党, 张志强. 创新教育与专业教育深度融合的教学模式研究与实践——以《模拟电子技术》为例[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 167-173.
- [14] 黄绍书, 郝正航, 余敏, 等. 基于通用实时仿真平台的电流保护仿真研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2018, 35(3): 76-80.
- [15] CHAD A, GZA J. Super capacitor energy storage for wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.

(责任编辑: 曾 晶)

Wind Power Experiment Teaching Platform Based on Hardware-in-the-loop Simulation

PAN Chunpeng, HAO Zhenghang*

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The function of traditional wind power experiment teaching platform is single, so it could not fully meet the needs of developing students' multi-dimensional ability in the construction of emerging engineering education. This research and teaching experiment platform was designed. Based on the hardware-in-the-loop simulation technology that applied a wind-power control device integrating industry, education and research. Guided by the concept of OBE, it was supported by the Universal Real-time Experimental Platform of Guizhou University, aiming at training high-level engineering and technical personnel with strong scientific, innovative and practical ability. The new experimental teaching platform was constructed according to the real product R&D and testing process of enterprises by using advanced real-time simulation technology, exploring a new training path of engineering talents in the integration of industry, education and research.

Key words: wind power generation; HIL; integration of industry, education and research; emerging engineering education