·实验教学与教学实验·

风力发电系统探究性实验教学平台设计与应用

赵建勇[1]，陈磊磊[2*]，于彦雪[1]，年　珩[1]，吴　敏[1]，孙　丹[1]

（1. 浙江大学 电气工程学院，杭州 310027；2. 杭州电子科技大学 信息工程学院，杭州 311305）

摘要：现阶段风力发电系统以纯软件、半实物的实验教学平台为主，实验平台缺乏完整性、拓展性和创新性，不利于学生实践能力训练。针对存在的问题设计了风力发电系统探究性实验教学平台，同时具备可扩展虚拟仿真实验、半实物仿真实验和纯实物实验功能，可以丰富电力电子技术、电机控制等电气工程专业课程实验。实验平台具有完善的实物模块、通信模块和控制模块，也具备开发性和拓展性，可通过代码自动生成对风电控制算法的优化和完善，对于电气工程专业的实验教学改革有很大促进作用。

关　键　词：电力电子；电机控制；风力发电；实验教学

中图分类号：G640　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12179/1672-4550.20240406

Design and Application of an Inquiry-Based Experimental Platform for Wind Power Generation Systems

ZHAO Jianyong[1], CHEN Leilei[2*], YU Yanxue[1], NIAN Heng[1], WU Min[1], SUN Dan[1]

（1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. School of Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 311305, China）

Abstract: Currently, experimental platforms for wind power generation systems are predominantly purely software-based or hardware-in-the-Loop. However, these platforms often lack comprehensiveness, scalability, and innovation, which hinders the effective development of students' practical skills. To tackle these issues, this paper presents the design of an inquiry-based experimental platform for wind power generation systems. The platform integrates three modes: scalable virtual simulation experiments, hardware-in-the-Loop simulation experiments, and fully physical experiments. This integration significantly expands the scope of experiments for core electrical engineering courses, such as Power Electronics and Motor Control. The platform is equipped with integrated physical, communication, and control modules, and is characterized by its openness and scalability. It enables the refinement and optimization of wind power control algorithms through automated code generation, thus significantly contributing to the pedagogical reform in experimental teaching for electrical engineering.

Key words: power electronics; motor control; wind power generation; experimental teaching

“双一流”战略统筹发展中，实验教学是重点关注内容之一，可提高学生理论与实际相结合的水平，为高校人才培养、科学研究和社会服务职能提供有力保障[1−2]。电气工程专业涉及电力电子技术、电机控制等多门核心课程，具备综合程度高和工程应用强的特点，学生教学需注重实践能力和创新能力的培养[3]。但是，目前该类课程实验多为验证性实验，实验装置落后于当前工业应用的相关设备，难以满足“新工科”对实验教学综合性、创新性和工程实践性等指标的要求[4]。随着新能源并网渗透率的提高，风力发电成为电气领域的研究热点，风力发电技术是涵盖电力电子、电机控制、电气控制等的综合应用技术[5−7]。因此，设计风力发电系统探究性实验平台具有重要的教学和科研意义[8]。

现阶段，在风力发电系统实验平台方面已有

收稿日期：2024−08−06

基金项目：国家杰出青年科学基金资助项目 (52325702)；浙江大学实验技术研究项目（SYBJS202407）；浙江省教育厅科研项目（Y202250621）。

作者简介：赵建勇，博士，讲师，主要从事新能源发电、电机控制技术及相关实验教学的研究。E-mall: jyzhao@zju.edu.cn

*** 通信作者：**陈磊磊，硕士，工程师，主要从事微网控制技术及相关实验教学的研究。 E-mall: chenleilei@hdu.edu.cn

高校开展相关的设计工作，依据平台类型可分为纯软件、半实物和实物。纯软件实验平台包括文献 [9] 设计的一套风力发电虚拟仿真实验平台，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；文献 [10] 通过 LabVIEW、Microsoft.Net Core 和 MATLAB/Simulink 开发可再生能源微电网虚拟实验室，涉及太阳能和风能、DC-DC 转换器、电池管理和微电网等内容；文献 [11] 基于 MATLAB 和 Labview 平台设计的一个风力发电虚拟实验教学平台，通过纯软件仿真的形式进行教学。纯软件实验平台虽然能清楚介绍风力发电原理，但学生缺乏直观感受，不利于理论与实际结合。半实物实验平台，如文献 [12] 依托实时数字仿真器构建的半实物风力发电仿真系统，用以开展次/超同步振荡评估实验；文献 [13] 设计的可编程模块化的双馈风力发电实验教学平台，硬件电路采用模块化方案，软件部分为学生提供简单易用的编程接口，便于学生自主编写核心控制算法；文献 [14] 设计的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。半实物实验平台虽然能够加深控制模块学习深度，但系统整体运行效果体验仍然不足。实物平台，如文献 [15] 设计的双馈感应风发电机虚拟仿真实验平台及实物教学平台，可以从最大功率点跟踪控制策略的角度以及所产生的贡献来分析风力发电机调节系统的有效性；文献 [16] 设计了全尺度变速风力发电机评价实验平台，涉及设备连接、传感和调节阶段、控制算法和故障应用系统；文献 [17] 设计了智能微电网教育实验室，涉及电力电子接口、控制方案和监控和自动化基础设施。现有实物平台虽然可以提高学生实践技能和理论课程学习的热情，但均未配置储能相关技术，不利于风力发电的系统学习。

综上分析，现有纯软件、半实物和实物风力发电系统实验教学平台不利于学生学习，需要完善现有系统配套开展教学改革，提升学生风力发电系统掌握度。因此，本文结合现阶段风电系统、储能研究及应用需求，设计了一套综合性强、集成度高和算法先进的风力发电系统探究性实验教学平台，可以为电气工程专业多门课程同时提供服务。

1　实验平台硬件设计

风力发电实验系统探究性实验教学平台硬件部分主要包括原动机(模拟风力机)、永磁同步发电机 PMSG、双脉冲宽度调制(pulse width modulation，PWM)变流器(包括机侧变流器、网侧变流器)、储能系统、DC-DC 变流器、上位机、传感器(电压、电流)、转速编码盘等，如图 1 所示。机侧变流器负责 PMSG 电能输出，网侧变流器负责电能并网，DC-DC 变流器控制储能系统充放电。

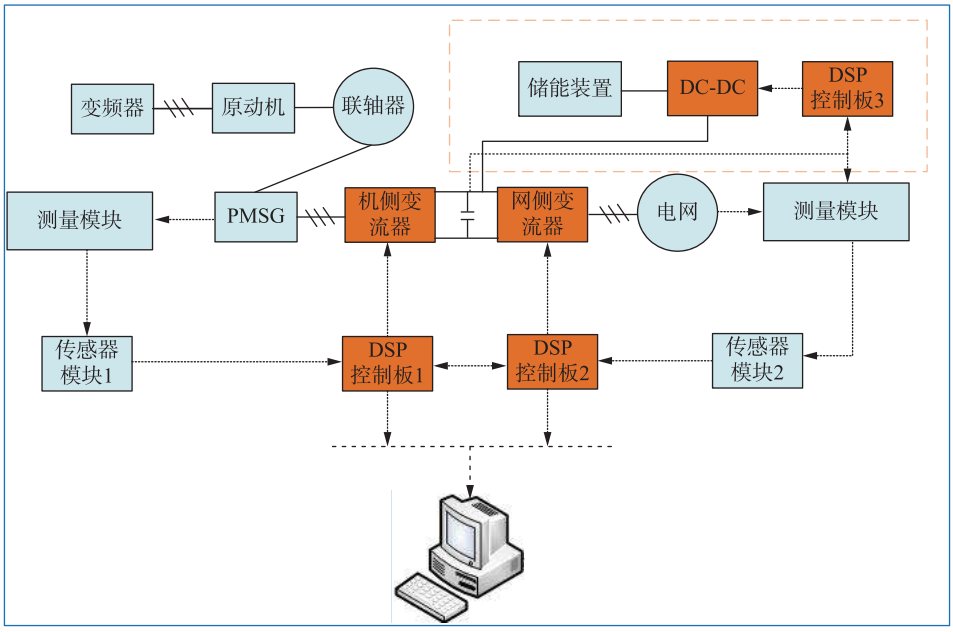


图 1　实验平台架构图

实验平台以电脑和触摸屏作为上位机，实现控制指令发送和数据状态显示，涉及机侧变流器、网侧变流器、变频器等模块。控制指令包括有功功率输出、无功功率输出、直流侧母线电压、PWM 信号等。数据显示包括有功功率、无功功率、母线电压等。上位机通过通信模块与双 PWM 变流器控制板交互信号，实现控制和返回系统实时数据、状态，双 PWM 变流器控制板之间也可通过 CAN 信号交互。双 PWM 变流器的控制板接收到控制指令后通过控制算法计算，输出 ADC 控制信号实现系统控制，如图 2 所示。

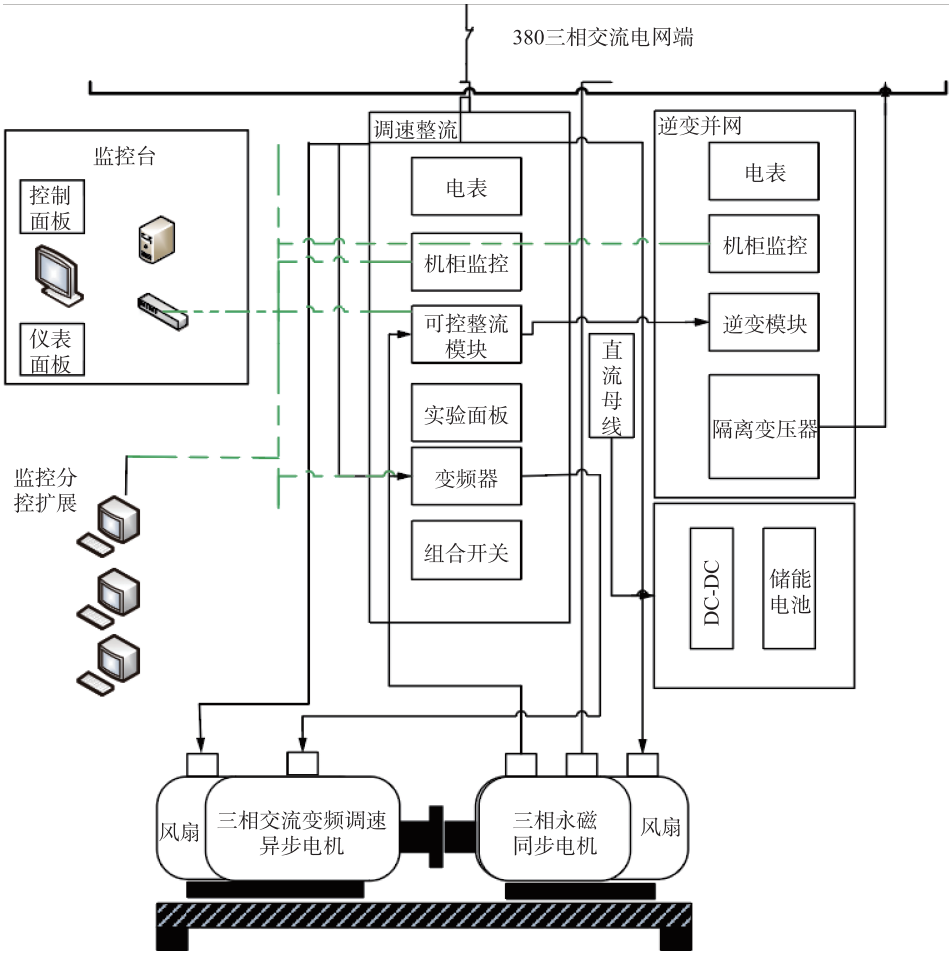
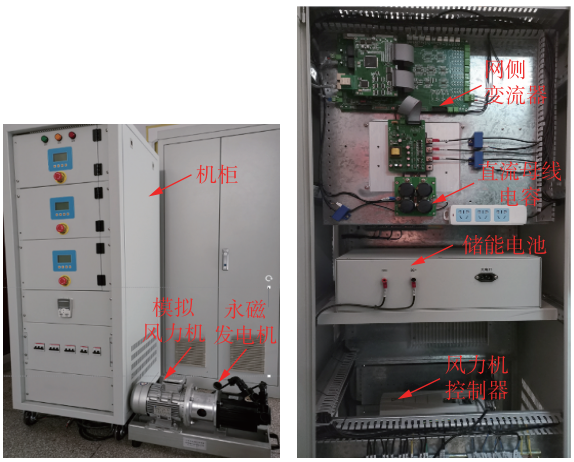


图 2　实验平台原理图

实验装置实物如图 3 所示，主要包括机柜和电机对拖平台两部分组成，机柜包括了机侧和网侧变流器、DC-DC 变流器、储能电池系统、风力机调速器等组成部分，电机对拖平台有三相异步电机和永磁同步电机组成，其中三相异步电机用于模拟风力机，由机柜的风力机调速器进行控制，可以模拟各类风速曲线的运行场景。



(a) 实验平台整体组成架构　(b) 实验平台内部模块布局

图 3　实验平台硬件实物图

2　实验平台软件设计

实验平台软件设计时充分考虑探究性实验教学需求，通过搭建的实验教学平台可以解决以下 5 项关键问题：

1）把风力发电相关技术转换为教学实验，丰富实验内容，提升实验覆盖面；

2）将虚拟仿真实验和半实物仿真实验内容转换为实物教学平台；

3）设计风力发电系统最大功率跟踪控制、低电压穿越等多个创新实验项目；

4）通过该实验平台的实验课程教学，引导学生先学后做、先模仿再创新；

5）平台保证开放性和可拓展性功能，给学生保留充分的后续开发和设计空间。

根据以上设计目标，结合课程教学内容和风力发电系统关键技术，平台设计了和实验教学内容对应的上位机界面：包括风速模拟、控制策略调试和数据采集显示。依托上位机操作，可实现风速、风类型等环境数据模拟，可实现 V/F、矢量控制等风机控制策略选择，可监控电压、电流、功率、功率因数、发电量、荷电状态等运行数据，可显示各类仿真算法的实时计算数据。实验平台主界面如图 4 所示，主要显示实验平台中各类主要模块的运行状态，以及当下运行的实验内容及其对应的各类数据和曲线，主要包括机侧及网侧电压、电流波形，输入及输出功率、频率、功率因素数据，保护装置动作情况等。

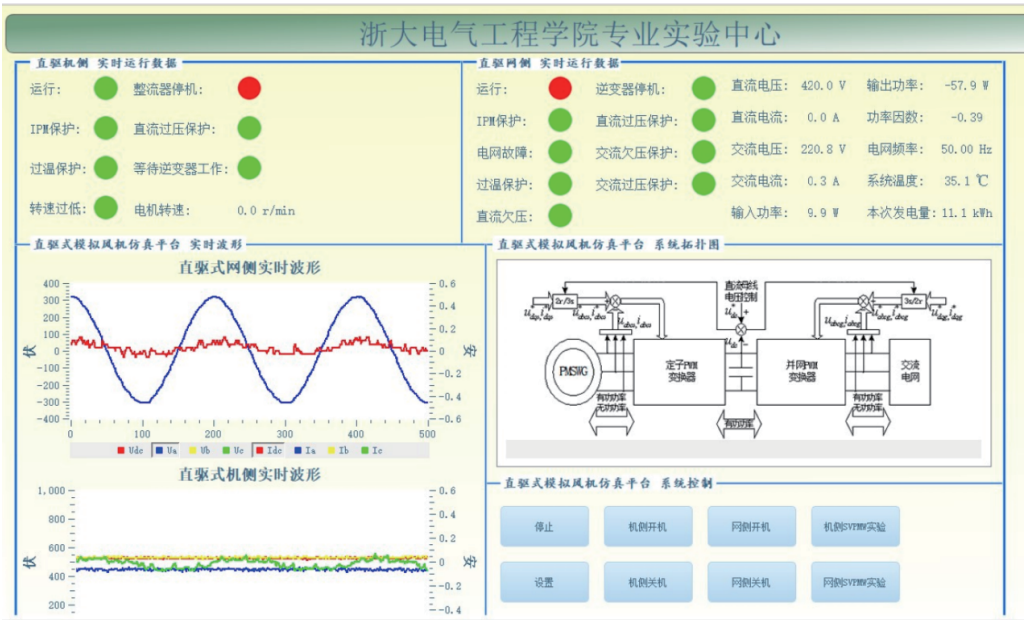


图 4　实验平台上位机主界面

风速模拟曲线设置界面如图 5 所示，风速设置部分可以完成风力发电系统各类典型运行场景的风速模型设计，如渐变风、阵风等。界面可直接编辑风速、风机特性等参数，风机发电功率可直接通过曲线观测。

风电运行采用电压空间矢量调制技术（space vector pulse width modulation，SVPWM）调制技术，系统运行时直流侧反馈电压和给定电压比较，偏差信号经过电流 PI 调节器 ACR，输出值经过电网电压前馈补偿以及电流的耦合补偿之后作为调制电压的参考值与直流侧检测到的电压信号送入 SVPWM 控制模块进行调制，生成六路驱动脉冲控制三相主电路工作，如图 6 所示。

风电运行算法设计界面包含网侧变流器算法设计和机侧变流器算法设计两大部分，可以分别开展网侧和机侧变流器典型控制策略的学习以及新型控制策略的实验，并直观展示各类实验结果，如图 7 所示。

3　实验平台功能拓展

基于实验平台软件、硬件功能，还设计了永磁同步风力发电系统离线自动代码生成功能的模型设计以及在线自动代码生成及在线调试功能的模型设计工作[13]。

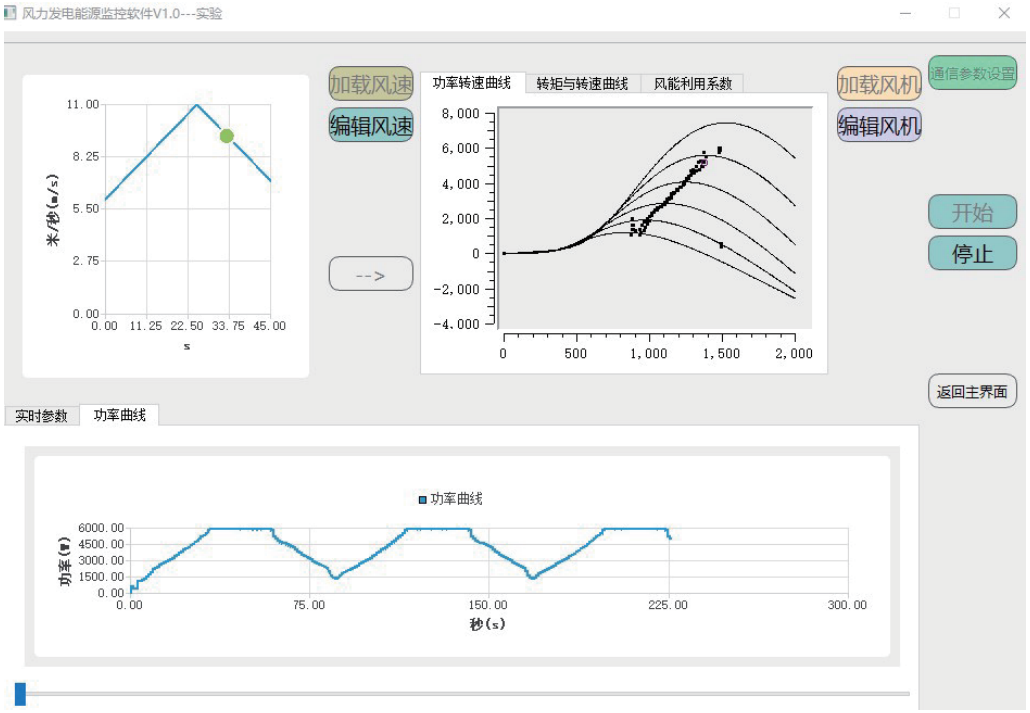


图 5　风速模拟曲线设置界面

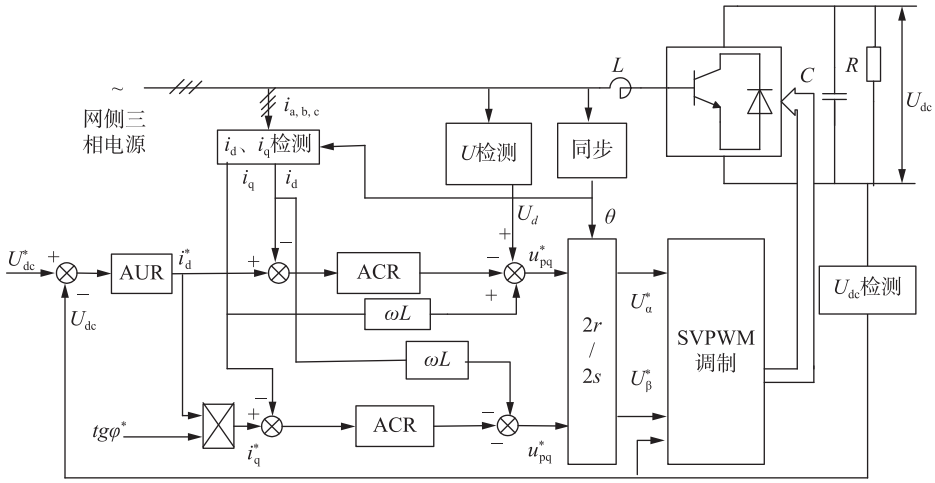


图 6　电压、电流双闭环系统结构图

MATLAB 软件中 Embedded Coder 工具箱集成 DSP C2000 系列的各种模块，使得 DSP 编程可以在 Simulink 中通过调用模块实现，模块包括 PWM、ADC、SCI 等，也可以调用算法搭建的模型。相较于传统手写的代码，开发效率高不容易出现低级错误，更利于算法的修正与更新，大大提升开发效率[18]。

风力发电系统控制的核心是以 PWM 模块触发 ADC 转换，转换完成之后触发中断，中断后调用滑模控制、I/F 控制、电压计算、滑模观测等模型，实现 ADC 采样、算法计算、PWM 占空比更新的同步进行，具体如图 8 所示。

实验平台采用 SCI 通信方法，可以实现 MATLAB 多模型之间的交互。本实验中在 Simulink 界面中搭建操作、显示模块，可发送有转速指令、转速环 PI 参数等信息，实现对电机转速、响应的控制；可接受 DSP 传输的电压、电流、转速信号，显示在上位机界面中，如图 9 所示。除 MATLAB 软件外，实验平台还可以配合 SimuNPS 等国产化全电磁暂态建模仿真软件进行多层级实验，实现虚拟仿真实验与实物实验的衔接验证。

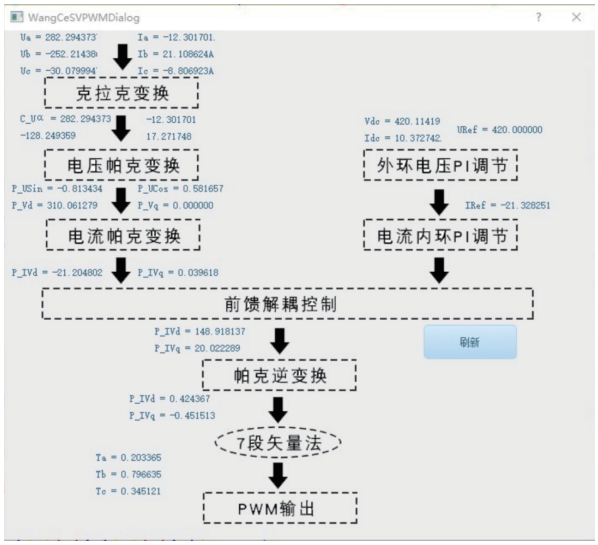


图 7　风电运行算法设计界面

4　实验平台的特点及意义

4.1　技术特点

该实验平台搭建结合了电力电子、电机控制、电机学专业内容，保证了实验设备的最大利用，同时利于扩大实验平台的使用范围，提高学生的受益率，全面提升电力电子、电机控制、电机学及运动控制相关课程的实验教学质量。实验平台在浙江大学电气学院实验室以及南京研旭自动化设备有限公司进行了调试验证，可以支撑各种新型控制策略进行实验探究和创新开发。平台功能结合了企业实际需求，囊括了各种应用场景和研究需求，可加深对理论知识的理解，达到科研入门水平，增加了学生在实验过程中的收获。

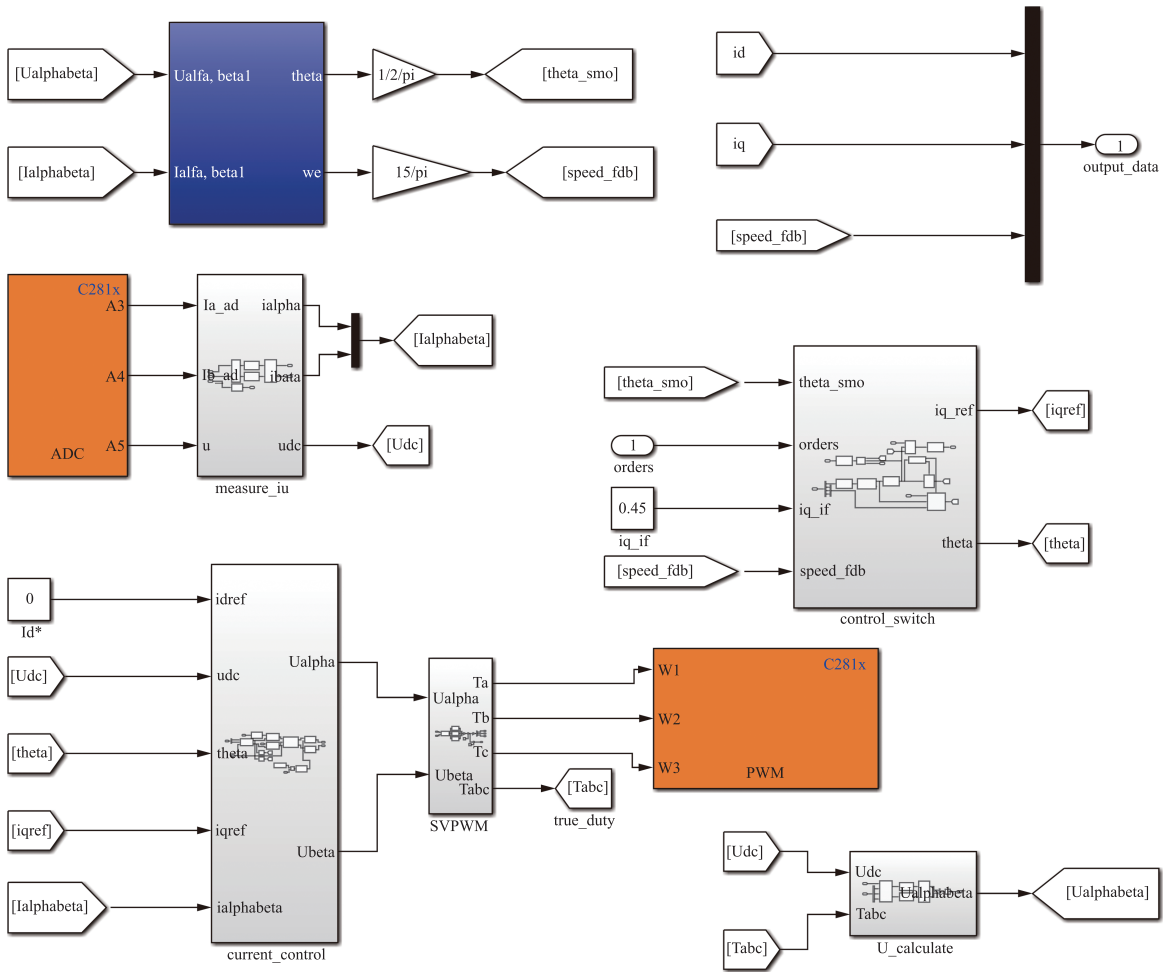


图 8　ADC 中断程序代码模型图

4.2　课程覆盖面

该实验平台可以完成永磁风力发电系统相关的多种探究性实验设计，包括最大功率跟踪、低电压穿越、孤岛运行实验、并网实验等多项内容，覆盖电力电子技术和电机控制的多个核心知识点，具有综合性、配套性、开放性、创新性等

特点。实验内容涵盖风力发电及储能系统等新能源发电领域热门的研究方向。

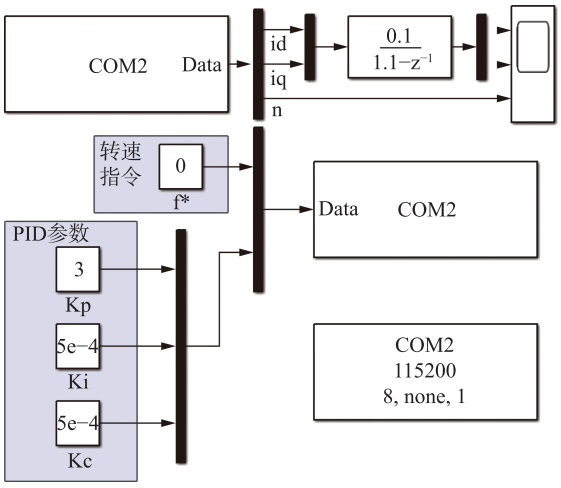


图 9 实验平台与 MATLAB 交互界面

1）实验平台电力电子方向

主要用于电力电子技术等课程中的探究性实验项目，包含：储能变流器、永磁风力发电系统网侧变流器控制等实验内容。

2）实验平台电机驱动方向

主要用于电机控制等课程中的探究性实验项目，包含：永磁风力发电系统最大功率跟踪控制等实验内容。

3）课外实践

该实验平台可面向电气相关专业大二、大三、大四同学提供大学生科研训练计划（student research training program，SRTP）科研训练平台；面向电气工程及其自动化专业大四学生提供毕业设计平台，可完成多项与电力电子及电机控制相关的毕业课题；同时，结合该实验平台可指导学生完成“电子设计竞赛”“节能减排竞赛”等相关学科竞赛项目。

4.3 独特优势

实验平台的独立模块化设计和封装结构在保证安全性的前提下极大提高了学生对硬件电路的直观认识，基本达到了科研实验的水平。独立装置设计模式使平台能够面对不同的专业课程，保证了实验平台的最大程度利用。

实验平台的探究性实验教学可以实现技术反哺，确保平台的可持续性开发，由实验教学内容辅助设备继续升级，保证了实验平台的长期有效性和先进性。

实验平台在风电系统常规硬件基础上引入了储能系统，在软件上结合了半实物仿真技术，丰富了实验教学内容的层次性和多样性，同时降低了实验投入成本。

5 实验平台实施成效

随着风力发电实验系统探究性实验教学平台逐步推广，越来越多的学生参与使用完成相关实验。目前已开设实验包括永磁风力发电系统离网控制策略探究实验、三相并网逆变器的直接功率控制实验、矢量控制实验、直接转矩控制实验、永磁风力发电系统最大功率跟踪控制实验、风/储互补微电网系统实验等。同时学生依据自己的兴趣，依托平台拓展了风电控制策略优化、风储协调控制等项目课题。这些实验及项目为学生提供了很好的学习与操作机会，学生反馈实验知识详尽充实，对于理论和实践水平都有很大提升，也增加了科研积极性。

6 结束语

基于现阶段电力电子技术、电机控制等相关课程的实验内容均为传统验证性实验，存在创新性欠缺等问题。通过梳理原有实验项目内容，设计了一套包含储能系统的风力发电系统探究性实验教学平台，可以开设电力电子、电机控制等专业多个探究性实验课程，激发学生的创新思维，克服传统实验的枯燥乏味；可以使学生在实验中体会到科研的乐趣，既巩固了基础实验又提高了学生科研素质；还可以培养学生独立分析问题、解决问题的能力。同时，利用该平台也可以在本科毕业设计、SRTP 等各类实践教学环节以及科研辅助方面起到良好的支撑，对于实验教学改革具有良好的引导作用。后续会进一步完善平台功能，逐步增加各种类型电源和负荷，包括光伏、制氢等，用于更复杂系统的协调控制研究，进一步满足学生科研需求。

参 考 文 献

[1] 谭潇, 冉栋刚, 王小宁. “双一流” 背景下高校实验技术队伍综合激励研究[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(2): 225−228.

[2] 肖源, 张卯, 马彦琪, 等. 新时代“双一流” 建设中实验教学中心的建设探究[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(1): 139−143.

［3］ 王玉斌, 于静, 王璠. 新工科背景下“电力电子技术”实践教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(2): 186−190.
［4］ 杨勇, 李红斌, 文劲宇, 等. 新工科电气工程实践教学体系重构与实践[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5074−5080.
［5］ 付兰芳, 孙鹤旭, 王华君, 等. 基于永磁双转子电机调速的新型风力发电系统设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 25−29.
［6］ 陈荣, 张胜涛. 新工科背景下“风力发电技术” 教学改革探索[J]. 电气电子教学学报, 2020, 42(1): 52−56.
［7］ 刘琦, 付宝鑫, 杨浩. 电力电子技术在风力发电中的应用[J]. 电子技术 (上海), 2023, 52(1): 230−231.
［8］ 张凤鸽, 陆继明, 易长松, 等. 双馈风力发电系统模拟实验平台的研制[J]. 实验科学与技术, 2016, 14(6): 77−81.
［9］ 苗磊, 李擎, 杨旭, 等. 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[J]. 创新创业理论研究与实践, 2023, 6(6): 45−47.
［10］ GUO L P, VENGALIL M, ABDUL N M M, et al. Design and implementation of virtual laboratory for a microgrid with renewable energy sources[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2022, 30(2): 349−361.
［11］ 吴政江, 李建贵, 黄玉祥. 永磁同步电机控制自动代码生成的研究[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 182−185.
［12］ 马宁宁, 陈永亭. 基于控制硬件在环的风电次/超同步振荡综合实验平台[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(11): 161−166.
［13］ 赵仁德, 袁诚, 何金奎, 等. 可编程模块化双馈风力发电实验教学平台设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 131−135.
［14］ 潘春鹏, 郝正航. 基于半实物仿真的风力发电实验教学平台[J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2020, 37(3): 53−57.
［15］ ARRIBAS J R, VEGANZONES C, BLAZQUEZ F, et al. Computer-based simulation and scaled laboratory bench system for the teaching and training of engineers on the control of doubly fed induction wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(3): 1534−1543.
［16］ ROCHA R V, SOUSA L A, MONARO R M. Experimental platform for evaluation of full-scale variable-speed wind generators under stator winding faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 800−812.
［17］ ABEDINI M, VAHABZADEH T, AHMADI S A, et al. Smart microgrid educational laboratory: An integrated electric and communications infrastructures platform[J]. Scientia Iranica, 2022, 29(5): 2552−2565.
［18］ 董靖川, 王太勇, 陆钢庆, 等. 基于模型的设计方法在运动控制实验中的研究[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(8): 171−175.

编辑　葛晋