

文章编号: 2095-2163(2023)10-0092-06

中图分类号: TM743

文献标志码: A

基于新工科理念微电网仿真实验平台研究

许莹¹, 郝正航², 李庆生³, 陈卓², 韩松²

(1 贵州电网有限责任公司 安顺供电局, 贵州 安顺 561099; 2 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025;

3 贵州电网有限责任公司 电网规划研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 依据电气前沿领域发展趋势及新工科建设要求, 本文提出了以电气信息实时仿真器为核心的电力系统新工科实验平台建设方案, 将需求分析、系统设计、镜像仿真和产品定义各个环节全程打通, 训练培养学生项目开发能力, 梳理贯通多课程的碎片知识; 基于智能微电网实验项目教学案例, 研究模型搭建、离线仿真、实时仿真、半实物仿真整个流程。教学实践证明, 该平台可支撑新工科教学电气实验教学模式, 对培养学生大工程观、工程思维和创新素质有重要意义, 是对新型电力系统背景下电气新工科建设的有益探索。

关键词: 新工科教学; 半实物仿真; 智能微电网实验; 电气实验教学

Research on micro-grid experiment simulation platform based on new engineering concept

XU Ying¹, HAO Zhenghang², LI Qingsheng³, CHEN Zhuo², HAN Song²

(1 Guizhou Power Grid Limited Liability Company Anshun Power Supply Bureau, Anshun Guizhou 561099, China;

2 Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3 Power Grid Planning Research Center of Guizhou Power Grid Co., LTD, Guiyang 550025, China)

[Abstract] According to the development trend of electrical frontier fields and the requirements of new engineering construction, this paper puts forward the construction scheme of new engineering experiment platform of electric power system with electrical information real-time simulator as the core, which connects all aspects such as demand analysis, system design, image simulation and product definition. It helps students to develop the project ability and to combine fragmented knowledge of multiple courses. Based on the teaching case of intelligent microgrid experiment project, the whole process of model building, offline simulation, real-time simulation and semi-physical simulation is studied. The teaching practice proves that the platform can support the electrical experiment teaching mode of new engineering teaching, which is of great significance to developing students' concept of large engineering, engineering logic and innovation quality, and is beneficial to the exploration of the construction of new electrical engineering under the background of new power system.

[Key words] new engineering teaching; hardware-in-the-loop simulation; smart micro-grid experiment; electric experiment teaching

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”国家能源战略目标的提出, 能源转型力度持续加大, 逐步形成了大量新能源接入电力系统的局面, 新型电力系统将在很长时期成为电气学科确定无疑的前沿领域^[1]。新型电力系统以分布式、集中式新能源为主, 大量新能源的接入使发电系统变得不可控, 用户负荷预测准确性下

降, 严重影响了电力系统的稳定^[2]。同时, 新型电力系统在技术领域呈现出电气、自动化、通信等新技术高度融合的趋势^[3]。因此电力系统构建以新能源为主体的新型电力系统, 必然造成传统电力系统技术领域的深刻变革, 客观上也要求电力系统学科必须做出重大调整, 相应的教学科研活动和人才培养方式也必须适应新的要求。

基金项目: 第二批国家级新工科研究与实践项目(E-NYDQHGC20202227)。

作者简介: 许莹(1997-), 女, 硕士, 主要研究方向: 电力系统及其自动化; 郝正航(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统实时仿真; 李庆生(1970-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向: 主动配电网; 陈卓(1980-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制; 韩松(1978-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 交直流电力系统分析。

通讯作者: 郝正航 Email: haozhenghang@163.com

收稿日期: 2022-10-27

1 电气新工科的提出

未来电气领域更加强调从业人员的知识全貌、整体素质和创新实践能力,更加注重电力电子、信息技术和新能源技术。然而,电力行业数十年稳定体制和技术范式形成了该专业人才培养的固定模式,既有的课程体系和实践环节已经无法适应产业需求,高校人才培养与国家战略需求脱节问题突出^[4]。对于电气类新工科而言,面向新型电力系统的技术体系和发展趋势,开展教学及实践环节改革,正是对新工科内涵的响应和落实^[5]。

当前基于传统电力系统的实践教学,教学对象局限于传统能源及传统输配电网,实验手段和实验项目单一陈旧^[6]。虽然有高校已开展新能源发电等相关课程,但缺乏规范化、系统性可以支撑理论教学的实验平台^[7]。有些演示型实验平台,由于实验内容固定,实验项目缺乏可拓展性,实验教学缺乏深度,与实际产业脱节^[8]。现有的操作型实验平台,无法支持探索性实验,限制了学生的想象空间,不利于创新素质和动手能力的培养^[9]。

根据新工科内涵建设要求,本文提出了新型电力系统下实验平台的研制路线,力求在教学方式上对接产业场景,科学浓缩产业流程后对接课堂、实验室,既联系生产实际又避免简单照搬和移植。基于该实验平台,学生可以经历产品研发的全过程,克服了脱离产业的诟病,实现产、研、教高水平融合。同时结合项目化教学案例,形成新工科创新实践新模式,对于培养适应新型电力系统发展的工程技术人才具有重要价值和示范效果。

2 实验平台建设方案

2.1 总体架构

新型电力系统技术前沿表现为新能源发电并网、智能微电网、柔性配电网等领域。实验平台总体架构设计紧紧围绕趋势性热点领域,设计数字化研究对象,在此基础上设计实验项目和教学案例。

实验平台包括上位机、电气信息实时仿真器(UREP300)、实际工业装置、可编程工业装置等,整体架构如图 1 所示。其中,电气信息实时仿真器为该平台核心仪器,系本校自主研制的大型教学科研设备,是对进口设备的国产化替代,结合嵌入式开发平台承载实验模型的实时运行;实际工业装置为控制和保护的标准化物理装置,其软件已经固化;可编程工业装置提供学生自由开发和实验的空间,支持

自由的软件定义,并与实际工业装置比对效果;监控界面用于显示实验模型的运行状态。

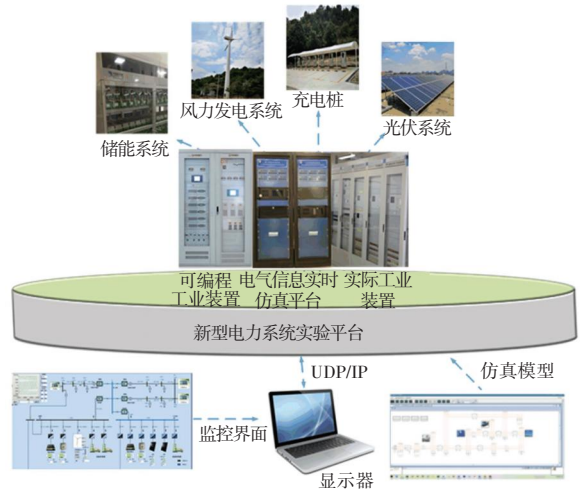


图 1 实验平台整体架构

Fig. 1 The overall structure of the experiment platform

2.2 实验平台的核心硬件

实验平台的核心硬件为电气信息实时仿真器,其仿真执行进度和实际时间严格对应,用于教学实验,可使实践课程更加贴合产业实际。电气信息实时仿真器由多核 CPU 插件、输入输出接口板、嵌入式硬件开发平台、教学案例包和监控软件等部分组成。平台中基于 FPGA 的嵌入式模块具有高效的网络求解器,可求解复杂电气网络。软件平台支持 C 代码移植与编译,结合平台硬件形成闭环,实现各种应用场景的实时仿真和半实物仿真。上位机与仿真机进行实时数据交互,实时运行由图形化仿真模型编译的代码,用多核心多 CPU 的高效并行技术,计算效率和仿真规模能够支持当前和未来新能源电力系统发展需要。平台最小仿真步长 $20 \mu\text{s}$,可模拟新型电力系统的复杂电磁暂态行为,提升电网全电磁暂态建模效率。

实际工业装置在实际电网中用作微机保护、测量控制及系统优化等。实际工业装置介入实验系统,可以更好的体现与产业的融合,更加接近现实中的配电网及微电网装备,对于教学科研和实训实习具有重要价值。实际工业装置屏柜包括低压保护测控装置、中高压保护测控装置、现场数据接口等子系统。实时仿真器通过实际 I/O 设备与实际工业装置连接,实现快速控制仿真。实际工业装置的硬件主处理器模块基于多核 CPU 和 FPGA 架构设计,确保即便由单个处理器模块构成的低压保护及测控设备,同样具有强大的处理能力,以实现其需要的控制保护及通信功能。

为了使该平台具有更大的灵活性,支撑各种实验模式和实验项目,可编程工业装置采用与实际工业装置类似的硬件配置,但其软件可以灵活修改,给研究者和学习者更大的使用空间,发挥实验平台最大效益。可编程工业装置的硬件采用多核 CPU 架构设计,具有较强的数据处理能力,满足各种应用场景,甚至较为苛刻的需求。

3 实验平台应用

3.1 新工科实验模式

新工科内涵强调实践能力,实践能力的培养是全面而非局部的,是逻辑关联的而非碎片化的^[10]。新工科电气实验平台围绕新工科内涵要义,结合新型电力系统产业需求和技术发展方向,创建新工科实验模式。

在产业需求方面,新型电力系统电源运维、电网运维、电气制造及试验研发等领域都给新工科人才赋予了新的要求,因此实验教学需要涵盖《新能源发电技术》、《智能配电网》、《智能微电网》、《电力电子技术》等课程,满足实际产业的人才需求。

在技术前沿方面,新型电力系统建设涵盖交叉学科知识,信息通信技术、嵌入式开发与应用等领域的技术前沿。实验平台在清洁能源、智能电网、智能制造、综合能源等领域开展产业化实验与研究,通过信息物理融合,结合产业研发方式,串联打通碎片化知识,贯彻工程思维、问题导向、产品导向,让学生经历电气自动化装备先进研发模式和整个流程,新工科实验模式如图 2 所示。

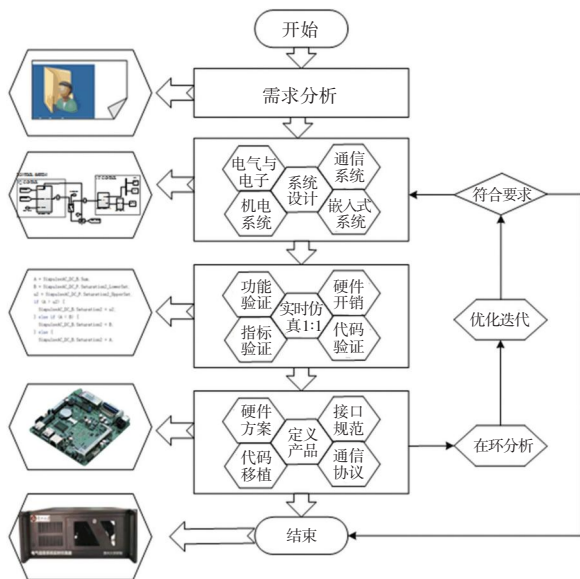


图 2 新工科实验模式

Fig. 2 New engineering experiment model

(1) 对创新型实验或研发项目开展需求分析,弄清楚项目的实际需求和指标要求,制定总体实施方案;

(2) 开展系统设计,包括电气与电子、机电系统、通信系统、嵌入式系统等设计内容,此环节可训练学生解决复杂工程问题的能力;

(3) 针对第二步的系统设计,开展 1:1 实时仿真,此环节的作用在于验证基本功能、技术指标和软件代码,同时评估硬件开销;

(4) 进行产品设计,确定硬件方案并设计产品硬件部分,接口规范和通信协议应符合相关标准,通过代码移植技术加载软件。在此基础上,通过环仿真分析和优化迭代,进一步完善设计成果,直至完全符合要求。

基于这种模式,学生和教师还可以开展面向新型电力系统多个方向、不同层次的创新课题,快速抓住学科发展的先机,推动教学和科研水平同步提升。

3.2 案例设计

以智能微电网为例,基于该平台开展项目化教学。智能微电网拓扑如图 3 所示,由 750 V 直流微电网、380 V 交流微电网与一条 380 V 馈线构成。其中,交流微电网主要由蓄电池系统、直驱风力发电系统、交流负载与直流负载构成;直流微电网主要由蓄电池系统、光伏发电系统与直流负载构成;两个微电网通过联络变流器连接,互为备用。

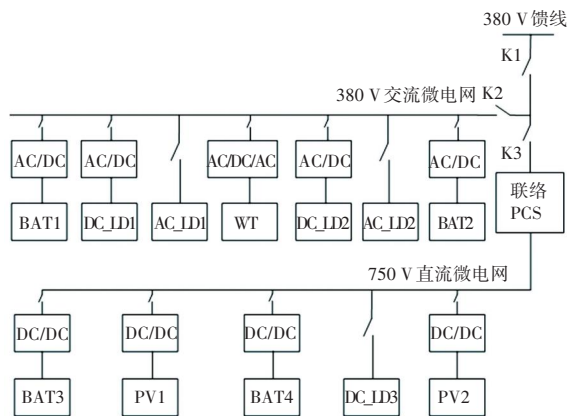


图 3 智能微电网拓扑图

Fig. 3 Smart micro-grid topology

实践教学步骤:

(1) 离线仿真。实验平台支持 MATLAB/Simulink 建模,建模环境为图形化界面,涵盖各种电气设备及元件,一次及二次装备均可数字化模拟。学生根据微电网拓扑图通过 Matlab/Simulink 搭建离线仿真模型,如图 4 所示。根据实验需求编写交

流微电网同期并网程序和有功无功控制策略、直流微电网的并网程序及功率控制策略、微电网能量管理软件和优化计算程序、交流微电网孤岛运行时电

压和频率控制系统、直流微电网孤岛运行时电压稳定控制系统。学生可以掌握基本原理,对系统拥有整体概念及认知。

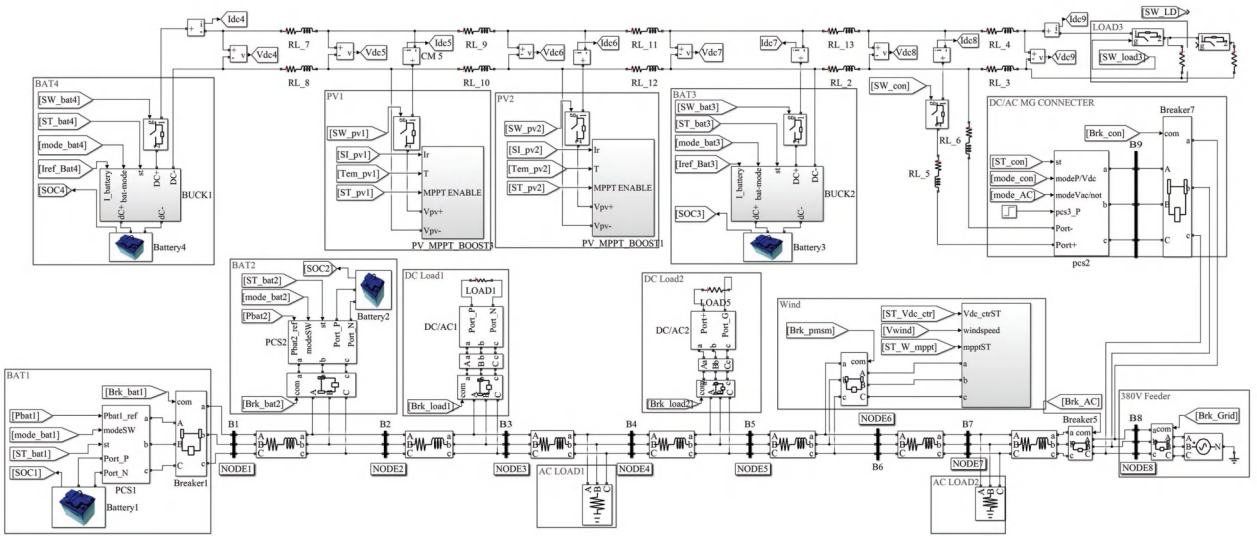


图 4 智能微电网仿真模型

Fig. 4 Simulation model of intelligent micro-grid

(2) 实时仿真。上位机离线仿真达到预设目标后,将仿真模型编译后下载至电气信息实时仿真器中开展实时仿真,不间断运行 48 小时以上且结果正确,则认为实时仿真验证通过,同时记录 CPU 硬件开销情况。电气信息实时仿真器面对新型电力系统的“双高”特点,可通过详细的电磁暂态和机电暂态仿真分析电网各种动态特征,评估和优化技术方案,验证控制策略,辅助新型电力系统设计与集成。

控制模块、交直流微电网控制模块、协调控制模块等控制模型转换为代码移植到嵌入式开发平台运行,通过调试达到与步骤二相同的效果,此步骤体现了控制器的物理实现,具有显著的教学示范效果。同时仿真器配备大量 I/O 口,通过 I/O 板与控制对象连接,验证算法的可靠性和准确度,提高系统开发效率,同时遵循了当前国际主流研发流程,使课堂教学主动对接国际标准。此外,还可以将智能微电网仿真实验监控界面的设计纳入本科教学项目,增强实践效果展示,如图 5 所示。

(3) 半实物仿真。基于可编程工业装置,将并网

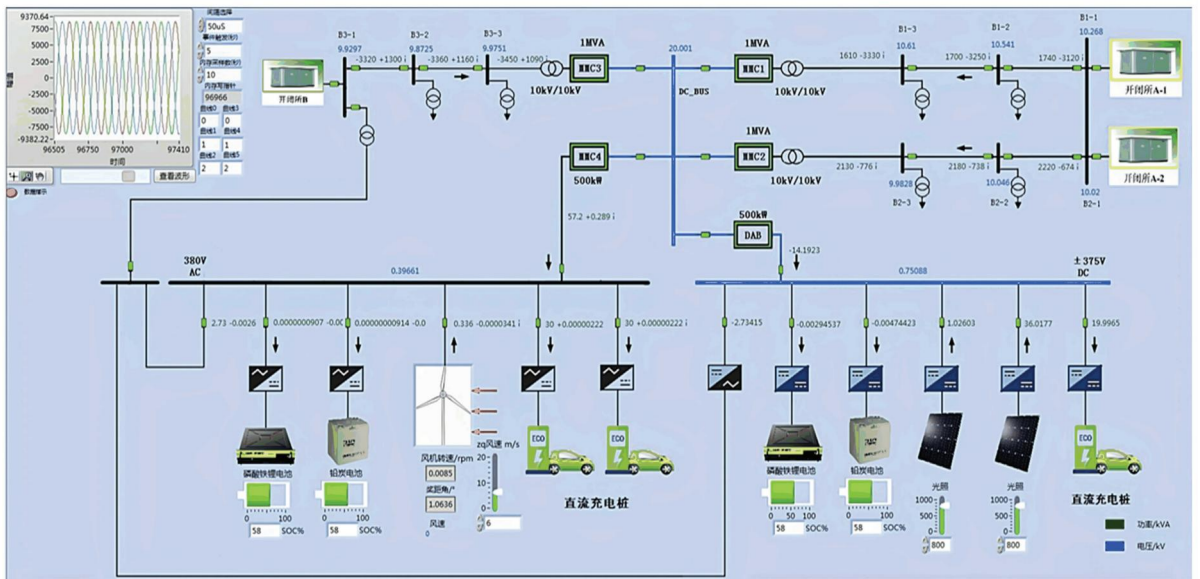


图 5 智能微电网仿真实验监控界面

Fig. 5 Intelligent micro-grid simulation experiment monitoring interface

(4)对比可编程工业装置与实际工业装置的运行效果,当二者达到完全一致时,认为整个实验流程成功完成。通过以上4个步骤,学生经历了产品开发的全过程,可初步培养学生的系统集成能力和研发能力。

3.3 效果分析

(1)交直流微电网并网模式下参数设置见表1。

表1 并网运行系统基本参数设置

Tab. 1 Basic parameters of the grid-connected system

储能1	直流负荷1	交流负荷1	风机	直流负荷2	交流负荷2	储能2
100 kW	30 kW	1 kW	109 kW	30 kW	1 kW	-100 kW
储能3	光伏1	储能4	直流负荷3	光伏2	U_{AC}	U_{DC}
电压控制	38 kW	16 kW	可调负载	38 kW	380 V	750 V

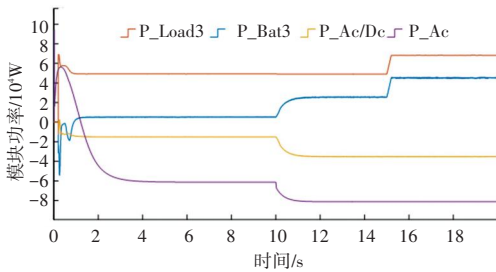


图6 并网运行结束后系统各模块功率

Fig. 6 Power of each module after the grid connection

由图6可知联络变流器功率 $P_{Ac/Dc}$ 在10s时由15kW变为35kW;10s时公共电网 P_{Ac} 吸收功率由61kW变为81kW,等于联络变流器给定功率差值;10s时直流储能系统放电功率 P_{Bat3} 由5kW变为25kW,15s时放电功率为由20kW变为45kW,可见源、网、储各元件功率变化均符合调节预期。系统并网运行结束后直流母线电压如图7所示,可知在上述功率调节及负荷突变下,直流电压能够稳定在750V左右。

U_{AC} 为交流微电网额定电压, U_{DC} 为直流微电网额定电压。联络变流器工作模式为恒功率模式,10s时给定功率由15kW变为35kW。直流侧储能系统BAT3为直流微电网提供电压支撑;交流侧储能电池工作模式为恒功率模式,只进行功率交换。在15s时直流可调负载 P_{Load3} 由50kW变为70kW。并网运行结束后各模块功率如图6所示。

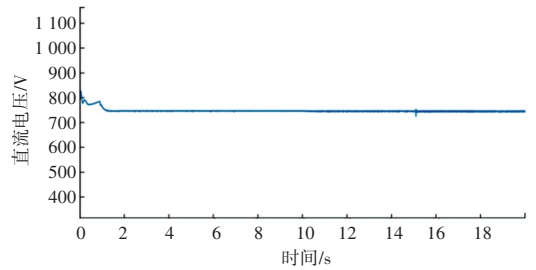


图7 系统并网运行结束后直流母线电压

Fig. 7 Dc bus voltage after the grid connection

直流微电网反馈给公共电网的功率与联络变流器给定功率相同,联络变流器控制系统实现了恒功率控制。当联络变流器给定功率增加,直流可调负载消耗电量增加时,直流储能系统合理调整工作模式,为直流微电网提供电压支撑,直流微电网系统电压维持在750V,储能系统控制模式实现了对直流微电网的电压控制,使整个系统的能量流动处于动态平衡。

(2)交直流微电网孤岛模式下参数设置见表2。联络变流器工作模式为V/F恒压恒频。交直流微电网储能系统设置与并网运行时相同。

表2 孤岛运行系统基本参数设置

Tab. 2 Basic parameters of the isolated island operating system

BAT1	DC_LD1	AC_LD1	Wind	DC_LD2	AC_LD2	BAT2
100 kW	30 kW	1 kW	风速	30 kW	1 kW	-100 kW
BAT3	PV1	BAT4	DC_LD3	PV2	UAC	UDC
电压控制	38 kW	16 kW	50 kW	38 kW	380 V	750 V

孤岛运行系统各模块功率如图8所示,可知光伏发电系统稳态功率 P_{Pv} 为38kW。6s时风力发电系统风速由8m/s增加至10m/s,风力发电系统发出功率 P_{Wind} 由77kW增至148.6kW,同时直流储能系统6s时充电功率由24kW变为93kW,储能系统增加的充电功率近似等于风力发电系统出

力差值;14s时风速由10m/s变为6m/s, P_{Wind} 由148.6kW减少至32.5kW,同时直流储能系统由充电状态变为放电状态,放电功率21kW,此时储能系统充放电功率的差值近似等于风力发电系统减少的功率。系统孤岛运行时6s、14s的交流电压如图9所示,风速变化时,交流电压稳定在380V左右。

系统孤岛运行结束后直流母线电压如图 10 所示,电压维持在 750 V。

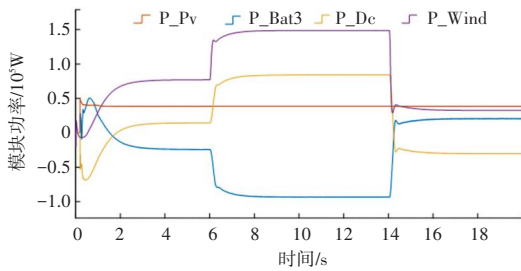


图 8 孤岛运行系统各模块功率

Fig. 8 Power of each module in the isolated island operation system

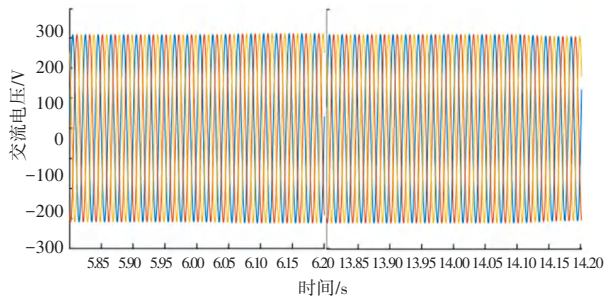


图 9 孤岛运行时 6 s、14 s 的交流电压

Fig. 9 Ac voltage of 6 s and 14 s when the isolated island is running

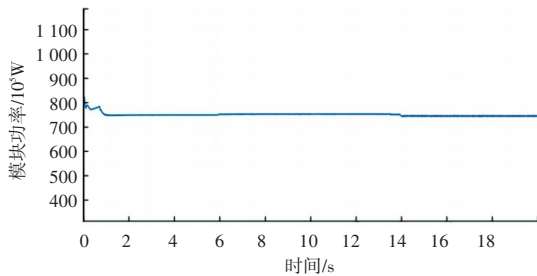


图 10 系统孤岛运行结束后直流母线电压

Fig. 10 Dc bus voltage after the isolated islands

孤岛运行时交流微电网出现功率缺额或盈余时,通过联络变流器反馈给直流微电网,联络变流器为交流微电网提供电压支撑,交流电压稳定在 380 V 左右,满足实验要求。同时直流储能系统为直流微

电网提供电压支撑,直流电压稳定在 750 V。

综上,在该实验项目中,学生经历了电气主系统离线建模和实时仿真平台搭建过程,开发了联络变流器控制器、风机及光伏并网控制器、储能控制器等自动化装置,并以样机的形态实时在环运行,看到了正确运行效果和调节效果,全程体验了研发型创新实验的过程。

4 结束语

本文提出新型电力系统下新工科教学实验平台,综合运用实时仿真、快速控制原型、硬件在环等多种手段,开发精益化项目案例,用于全程体验式创新实践教学。该实验平台在项目内容安排上突出了对新型电力系统的全面支撑,在实验模式设计上,体现了新工科内涵对创新性实践教学的要求。

参考文献

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
- [2] 梅林,孙玲玲,钟嘉庆,等. 新工科背景下电力系统综合实验教学改革[J]. 实验室研究与探索,2021,40(8):145-149,158.
- [3] 周孝信. 以互联网思维审视和改变传统电力系统[J]. 电气应用,2019,38(7):4-8.
- [4] 胡蔓,曹利华,刘健,等. 新工科背景下高校工程训练中心建设探索与实践[J]. 实验室研究与探索,2021,40(5):154-157,196.
- [5] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究,2017,164(3):1-6.
- [6] 江岳文,江新琴. 含“风-光-氢-燃-储”的混合多能源系统实验平台设计[J]. 实验技术与管理,2021,38(5):20-25.
- [7] 姚志树,周云龙,胡国文,等. 电气与新能源综合实验教学中心建设探究[J]. 实验室研究与探索,2015,34(11):140-144.
- [8] 袁小平,娄承芝,田浩,等. 新能源利用综合演示实验平台研制[J]. 实验技术与管理,2017,34(1):98-103.
- [9] 顾佩华. 新工科与新范式:概念、框架和实施路径[J]. 高等工程教育研究,2017,167(6):1-13.
- [10] 姜晓坤,朱泓,李志义. 新工科人才培养新模式[J]. 高教发展与评估,2018,34(2):17-24,103.

(上接第 91 页)

- [7] 吕秀品,李林,陈洁,等. 大学物理实验虚拟仿真教学平台的建设与教学体会[J]. 大学物理实验,2020,33(4):114-116.
- [8] 王吉秀,李祖然,湛方栋,等. 土壤-生态综合实验课程虚拟仿真

教学体系构建与实践[J]. 智慧农业导刊,2023,3(5):99-102.

- [9] 杨庆,龚彬,俞翔,等. 断路器虚拟仿真教学系统的设计和应用[J]. 中国现代教育装备,2023,405(5):36-38.