



基于 Simulink 和低代码控制器的储能控制实验教学方法

董树锋¹, 刘灵冲^{1,2}, 唐坤杰¹, 赵海祺^{1,2}, 徐成司¹, 林立亨¹

(¹浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; ²浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015)

摘 要: 针对储能学科实验教学存在的问题, 本文利用硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)仿真技术, 将具体的实际工程项目融入到实验教学当中, 使用 Simulink 对储能被控对象建模, 采用自主设计制作的低代码控制器进行控制, 提出基于 Simulink 和低代码控制器的储能控制实验教学方法。该方法具体流程为: 在实验准备阶段, 教师提前向学生布置了解实验背景的任务; 实验进行中按照控制策略设计、被控对象模型搭建、控制策略实现和运行结果分析四部分进行引导教学; 实验结束后鼓励学生发散思维, 将所学知识拓展延伸应用到其他控制策略中。然后引入所用的实验设备低代码控制器, 并对其需使用的配置文件进行了详细说明, 学生只需填写相应 EXCEL 配置文件即可实现控制策略, 降低了对学生编程能力的要求, 从而抓住实验课程的重要目标更透彻地理解控制策略本身。最后以储能功率分配优化控制为案例设计实验, 从整体认知、重点强化、难点分析和深度启发四个方面具体展开, 完成储能电池组充放电实时仿真, 实现了储能功率分配的控制目标, 验证了硬件在环仿真技术的仿真精度和所提出的储能控制实验教学方法的有效性。

关键词: 硬件在环; 储能; 低代码控制器; AOE 网络; 控制策略

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0723

中图分类号: TM 732; G 484

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 07-2386-12

The teaching method of energy storage control experiment based on Simulink and low-code controller

DONG Shufeng¹, LIU Lingchong^{1,2}, TANG Kunjie¹, ZHAO Haiqi^{1,2}, XU Chengsi¹, LIN Liheng¹

(¹College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

²Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, Zhejiang, China)

Abstract: Aiming at the problems in the experimental teaching of energy storage, this paper uses hardware-in-the-loop simulation technology to incorporate specific actual engineering projects into the experimental teaching. The authors use Simulink to model the energy storage controlled object, use the designed low-code controller for control, and propose an experimental teaching method for energy storage control based on Simulink and low-code controller. The specific process of the method is as follows: in the preparation phase of the experiment, the teacher assigns the students the task of understanding the background of the experiment in advance. During the experiment, it is divided into four parts: control strategy design, controlled object model construction, control strategy realization and result analysis. After the experiment, students are encouraged to deep thinking and extend to other control strategies. Then authors introduce the low-code controller and explain the configuration files in detail. Students only need to fill in the corresponding EXCEL configuration file to realize the control

收稿日期: 2021-12-31; 修改稿日期: 2022-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52077193)。

第一作者及通讯联系人: 董树锋 (1982—), 男, 博士后, 副教授、博

导, 研究方向为综合能源系统优化控制, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn。

strategy, which reduces the requirements for programming ability and helps them understand the control strategy more thoroughly. Finally, taking the optimization control of energy storage power allocation as an example, it is carried out from four aspects: overall cognition, key enhancement, difficulty analysis and in-depth enlightenment. It completes the real-time simulation of energy storage battery pack charging and discharging, realizes the control goal of energy storage power distribution, verifies the accuracy of hardware-in-the-loop simulation technology and the validity of the proposed energy storage control experiment teaching method.

Key words: hardware-in-the-loop; energy storage; low-code controller; AOE network; control strategy

随着储能技术成本的降低和各地储能激励政策的出台, 储能技术已从工程示范阶段转入商业应用阶段, 储能专业人才的需求呈现爆发式增长^[1]。2020 年初, 教育部、国家发改委和国家能源局联合印发《储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024 年)》, 要求培养储能专业人才, 增强产业关键核心技术攻关和自主创新能力, 以产教融合发展推动储能产业高质量发展^[2]。

作为一个面向实际工程应用的学科, 实验课程在储能专业学科体系中占据重要的地位, 各高校一般采用自行设计的教学实验平台进行实验教学。各大高校对实验平台的设计进行了诸多探索, 从原来的实物实验平台、全数字仿真实验平台, 逐渐过渡到硬件在环的混合仿真实验平台。对于实物仿真实验平台, 潘春鹏等^[3]介绍了一种以小型永磁同步发电系统为基础设计的风力发电教学实验平台, 学生可以直观地了解风电发电具体过程, 但是存在依赖于固定的拓扑结构, 以演示实验为主, 缺乏扩展性、创新性等不足。对于全数字仿真实验平台, 江岳文等^[4]在多机实验平台网架的基础上, 设计了一个风光氢燃储混合多能源系统实验平台; Hao 等^[5]基于 LabVIEW 和 Matlab 设计了风力发电虚拟教学实验平台, 该种实验平台不受设备、场地等限制, 内容丰富形式多样且成本较低, 可以让学生验证所学习的控制策略, 但是存在难以训练学生实践动手能力、对实际的控制器缺乏直观认识的不足。近年来硬件在环的混合仿真实验平台逐渐成为研究的热点, 张强等^[6]采用模块化硬件拓扑和开放式软件架构, 设计了光伏发电与储能一体化实验设备; 孟超等^[7]设计了一种由储能电池、光伏板和 RTDS 数字仿真系统等设备组成的实验平台, 由 DSP 板、控

制板、采集板和驱动板构成控制电路实现系统控制; 田春笋等^[8]基于 RT-LAB 的数模混合仿真应用储能和光伏等装置搭建一个新的实验平台进行实验, 需要学生将滤波算法嵌入 PLC, 构建基于 PLC 的能量管理系统; 吴肖龙等^[9]设计了一种燃料电池发电系统动态模拟教学实验平台, 通过将温度传感器与 PLC 控制器相连接控制电池温度在合理范围; 刘平等^[10]搭建了飞轮阵列储能实验系统, 通过 PLC 控制飞轮对拖充放电验证了系统的有效性。该种实验平台利用 HIL 仿真技术, 将实际控制器作为仿真环节重要设备, 使输出结果更接近实际情况, 更具有说服力, 且混合仿真实验软硬件结合, 提高了学生实践动手能力。但是目前还存在底层代码较为复杂的问题, 对于控制策略的实现需要学生有一定的编程基础, 编程能力的欠缺限制了学生对控制策略深层次的理解, 提高了学生进行仿真实验的难度; 且大多采用专用硬件, 功能单一价格昂贵。关于市场上主流控制器对比结果如表 1 所示。

本文针对现有实验平台存在的问题, 引入了 HIL 仿真技术, HIL 是通过实物控制器来控制被控对象仿真模型的仿真技术^[11], 本文涉及的实验平台采用 Simulink 对储能等被控对象的仿真模型进行搭建, 采用基于 AOE 网络和事件驱动的低代码控制器进行控制^[12]。对学生, 低代码控制器的使用让学生几乎不用进行代码编写, 只需要进行相关 EXCEL 配置文件的编写, 即可完成控制器的配置, 设计降低了对编程能力的要求, 使学生在实验课程中着重于理解控制策略本身, 同时通过 HIL 技术软硬件结合可以获得接近物理实际的仿真结果和实践动手经历; 并以简化实际工程案例为教学内容, 培养学生工程意识和多学科的知识应用能力; 同时采

表1 控制器对比
Table 1 Comparison of controllers

控制器型号	低代码控制器	倍福 PLC	西门子 SIMATIC
硬件平台	通用硬件	基于 PC/专用硬件	基于 PC/PLC
开发方式	无门槛低代码配置	需学习专用软件	需学习专用软件/代码编程
控制场景	适用各种控制场景	需扩展硬件	针对特定控制场景
数学运算	方程组求解	逻辑运算 定时和算术运算	逻辑运算 定时和算术运算
	优化控制		
	逻辑运算		
	定时和算术运算		

用通用硬件，成本较低。对教学者，采用 HIL 技术可以降低发生实验安全事故的概率，可以设计更为贴近工程实际的教学实验，推动高校“新工科”建设^[13]。

本文首先介绍储能实验教学的教学目的以及设计思路，之后介绍低代码控制器的使用原理，最后结合储能功率分配优化控制案例，运用基于 Simulink 和低代码控制器的 HIL 仿真技术进行阐述。

1 储能控制教学实验设计

1.1 实验教学目的

储能控制教学实验设计面向国家“新工科”六问^[14]，面向工程实际，为了让同学们更深入了解储能学科的特点，引入自主设计制作的低代码控制器，以储能功率分配、削峰填谷、调频、备用电源等实际储能工程项目为基础，开展实验教学、逐步将相关实际工程成果融入到 HIL 仿真实验教学当中，理论联系实际，从实际实验深化知识理解。引入的主要用意在于：整体认知、重点强化、难点分析和深度启发^[15]。

1.2 实验教学过程

储能控制实验教学的流程如图 1 所示，教师在实验开始之前编制实验指导书，向学生布置了解实验背景任务。实验进行中按照控制策略设计、被控对象模型搭建、控制策略实现和运行结果分析四部分进行引导教学，实验结束后鼓励学生发散思维，为有完备创新方案的团队提供实验机会。

1.2.1 控制策略设计

基于控制相关理论，将储能控制实验被控模型抽象化，根据控制目标设计控制策略，将控制流程分解为多个事件和动作按照一定的逻辑关系组合而成的事件驱动架构，之后将控制流程以流程图的形式

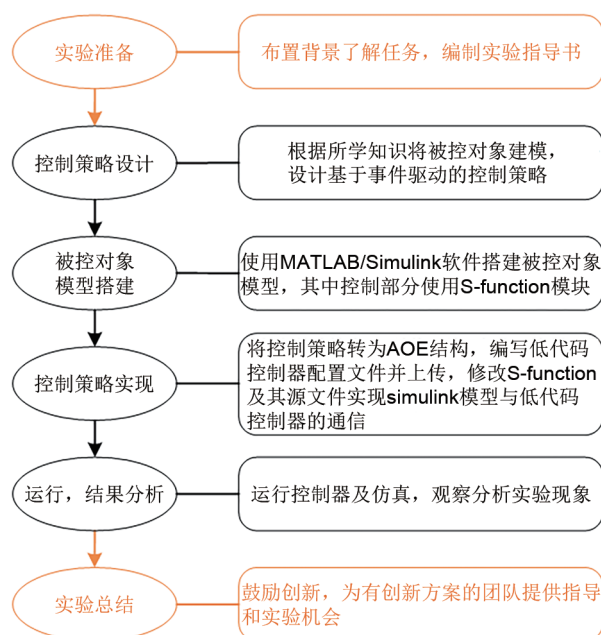


图1 实验教学过程
Fig. 1 Experimental teaching process

式表示，再转换为 AOE 网络结构。AOE 网络是由节点和边组成的有向无环图，其中每个节点表示一个事件，每条边表示一个动作，边的方向表示节点所表示的事件之间的递进和迁移关系，这种关系由该条边所表示的动作决定^[16]。AOE 网络与流程图的对应关系如图 2 所示。将储能的控制策略以 AOE 网络的形式进行表达，可将晦涩难懂的控制策略转化为流程图的形式，使控制策略更加简练清晰、易于理解，有助于学生检查自己的设计是否有错误，同时也有助于启发学生对控制策略加以完善改进。

1.2.2 控制策略实现

本文引入低代码控制器对被控对象的 Simulink 仿真模型进行控制，在完成 AOE 网络的设计之后，编写控制器配置文件，对实现控制策略所需的变量、事件和动作进行定义，将配置文件上传至控制

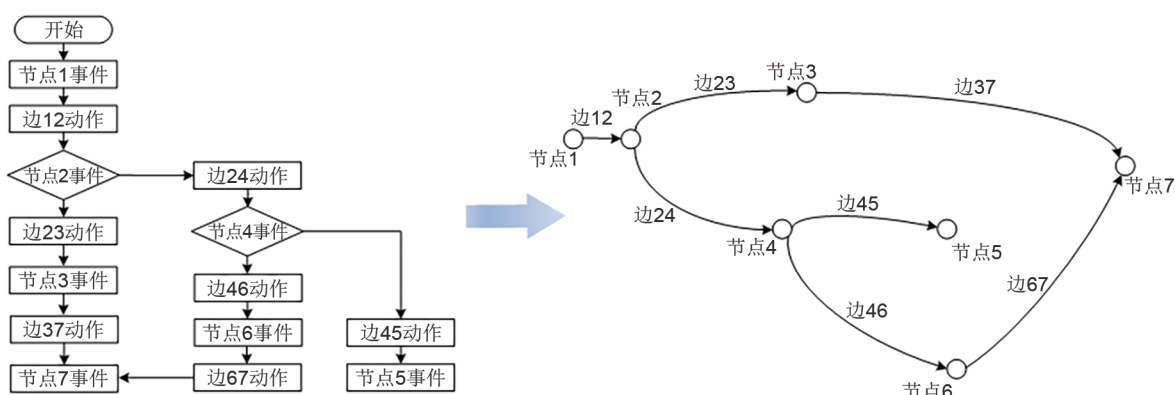


图 2 控制策略流程图与 AOE 网络对应关系

Fig. 2 Correspondence between control strategy flow chart and AOE network

器完成控制器配置, 进而完成 HIL 仿真实验。在配置文件编写过程中, 可以让学生自主独立完成所有配置文件的编写, 也可以选择老师编写一个作为范例, 留下剩余文件供学生自主填写, 使实验流程更加灵活多变。

采用 Modbus 通信协议^[7], 建立 Simulink 仿真模型与低代码控制器的通信, 其基本架构如图 3 所示。

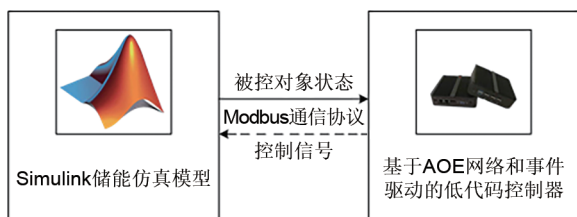


图 3 Simulink 仿真模型和低代码控制器的通信架构

Fig. 3 The communication architecture of Simulink simulation model and low-code controller

通过 Modbus 通信协议实现 Simulink 仿真模型与低代码控制器通信的具体方法为: ①搭建储能实验被控对象时控制部分采用 S-function(System function, 系统函数)模块替代; ②在 Matlab 界面中输入“edit sfuntmpl.m”命令打开 S-function 的模板源文件, 修改函数名为自定义(例如 modbusCom), 依据储能实验情况修改模板代码中的输入输出变量数, 添加 Modbus 函数调用、允许被控对象状态写入控制器、从控制器中读出控制信号等相关指令; ③切换到 Simulink 模型界面, 双击 S-function 模块打开参数编辑对话框, 将其名称修改为前面自定义的函数名并点击编辑以连接此函数文件。

2 储能控制实验设备

2.1 实验设备介绍

作者研制了一种低代码控制器设备, 如图 4 所示, 它采用事件驱动方式, 通过将控制策略表达为 AOE 网络式结构, 基于此填写标准配置文件并导入控制器, 从而实现无需编写代码的硬件在环仿真对象控制。该低代码控制器具备逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等现有可编程控制器功能, 同时还支持方程组求解和优化模型求解功能, 通过多个低代码控制器协同, 基于边缘计算技术, 可实现大规模分布式系统实时调控。



图 4 低代码控制器实物

Fig. 4 Low-code controller sample

2.2 低代码控制器的使用

低代码控制器通过与被控对象进行通信, 得到被控对象的测点信息, 以此作为输入, 执行控制策略并输出控制信息至被控对象, 从而完成控制过程。在整个过程中采集点的信息和相关的控制策略均通过填写标准 EXCEL 配置文件的方式进行配置。配置文件分为三个部分: 测点配置、AOE 配置和通信通道配置, 下面对上述三个配置文件进行简要介绍。

2.2.1 测点配置文件

测点配置用于配置控制器输入和输出信号点的参数,所述测点配置文件的编写是将描述一个测点所需要的属性列举出来,包括所有测点的序号、点号、名称、别名、是否离散、是否计算点、默认值和备注等。

2.2.2 AOE 配置文件

AOE 配置是建立 AOE 网络来实现所需的控制逻辑和功能,利用 AOE 网络配置文件定义 AOE 网络的基本信息、变量、事件和动作,从而描述构建的 AOE 网络和设计的控制策略。AOE 配置可以分为 AOE 网络定义、AOE 变量定义、AOE 事件定义、AOE 动作定义四个部分。各配置文件组成如表 2 所示。

表 2 AOE 配置文件组成

Table 2 The composition of the AOE configuration file

AOE 配置文件	组成
AOE 网络	AOE ID、是否启用、名称、触发条件、触发条件参数、变量初始值等
AOE 变量	AOE ID、变量定义等
AOE 事件	AOE ID、节点 ID、节点名称、节点类型、超时时间、事件表达式等
AOE 动作	AOE ID、首尾节点、动作名称、失败模式、动作类型、动作参数等

2.2.3 通信配置文件

通信配置文件用于描述控制器与被控对象的通信方式,并依据测点配置文件中的测点属性,给出保存测点值的寄存器信息和地址。通信配置文件包括通信方式配置和测点寄存器配置两部分,支持 Modbus、IEC104、MQTT、串口作为通信方式。通信方式配置包括端口号、波特率、校验位、数据位、停止位;测点寄存器配置用于给出存储测点数据的地址信息,包括序号、寄存器类型、起始地址、数据类型、新请求标志、轮询周期、点号。

3 教学案例实现

3.1 整体认知

在教学实验设计和实验设备介绍的基础上,以实际工程项目为基础,将该控制方法应用到实际教学当中,本文以储能功率分配优化控制为教学案例进行详细阐述,目前许多地区主要以火电机组进行调频,而储能电池的 AGC 调频效果远好于火电机

组,引入相对少量的储能系统,将有效地解决调频资源不足的问题。本案例中低代码控制器接收主控系统下发的遥调指令,根据 8 个储能电池的 SOC、充放电总里程等条件,通过优化求解下发出力指令,控制八个储能的出力,从而达到储能辅助调频的目的。此案例大致流程为:首先列写考虑储能 SOC 均衡度^[18]和储能功率跳变惩罚指标的目标函数;其次结合储能容量约束、SOC 约束、指令精确跟随约束建立优化模型;然后将优化模型线性化,将其转化为混合整数线性规划问题;最后以事件驱动逻辑建立 AOE 网络,按照控制策略计算功率,并下发到对应测点,从而让学生对该案例有一个整体认知。

3.1.1 储能功率分配模型建立

模型原理:以 SOC 均衡度和功率变动惩罚最小为目标建立目标函数,考虑到方差优化的复杂性,尽量避免将二次式作为优化目标,以 SOC 相对平均值的总偏差的绝对值和功率相对平均值的偏差绝对值作为目标函数。

$$\min_P \omega_1 \sum_{i=1}^8 |SOC_i - SOC_{mean}| |SOC_i^0 - SOC_{mean}| + \omega_2 \sum_{i=1}^8 e^{|SOC_i^0 - SOC_{mean}|} |P_i - P_{mean}| \quad (1)$$

式中, ω_1 表示 SOC 均衡的影响权重; ω_2 表示功率变动带来的代价权重; SOC_{mean} 表示 SOC 均值; SOC_i^0 表示当前电池的 SOC 值; P_i 表示当前电池的功率值; P_{mean} 表示当前电池功率的平均值; SOC_i 表示在功率分配策略所计算出的功率工作下,下一时刻第 i 个电池的 SOC 值,具体计算式如下:

$$SOC_i = SOC_i^0 - \frac{P_i \Delta t}{E_{act,i}} \quad (2)$$

式中, $E_{act,i}$ 表示电池 i 的实际容量; Δt 表示某功率下的充电或放电时间。

设 $P_i = u_i - v_i$, 其中 u_i 表示放电功率, v_i 表示充电功率,在式(1)所述的含绝对值的混合整数规划问题可以通过线性化的方式转变为不含绝对值的混合整数线性规划问题,具体方法是将绝对值部分设为新的变量 α_i 和 β_i , 并加入约束:

$$\alpha_i \geq SOC_i^0 - \frac{u_i}{Q_R} dt + \frac{v_i}{Q_R} dt - SOC_{mean} \quad (3)$$

$$\alpha_i \geq -SOC_i^0 + \frac{u_i}{Q_R} dt - \frac{v_i}{Q_R} dt + SOC_{mean} \quad (4)$$

$$\beta_i \geq u_i - v_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (u_j - v_j) \quad (5)$$

$$\beta_i \geq -u_i + v_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (u_j - v_j) \quad (6)$$

Q_R 表示电池满充电量, n 表示调度总时间点数。目标函数转化为:

$$\min_{\alpha, \beta, u, v} \omega_1 \sum_{i=1}^8 |\text{SOC}_i^0 - \text{SOC}_{\text{mean}}| \alpha_i + \omega_2 \sum_{i=1}^8 e^{|\text{SOC}_i - \text{SOC}_{\text{mean}}|} \beta_i \quad (7)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 (u_i - v_i) = P_D \\ u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max}, v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \\ \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_i(t) + (u_i - v_i) \frac{dt}{Q_R} \leq \text{SOC}_{\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (8)$$

式中, i 表示储能电池序号; P_D 表示储能电池组净放电功率总和; u_i^{\min} 、 u_i^{\max} 表示放电功率的下限和上限; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 表示储能电池 SOC 值的下限和上限。

储能电池采用 PQ 控制策略逆变并网, 其电路结构如图 5 所示。主电路主要由三相全桥电路和滤波器部分组成, 控制部分主要由功率计算模块、

表 3 储能每个储能单元的控制参数

Table 3 Control parameter for each DES unit

参数符号	数值
Q_R	1000 kWh
v_i^{\max}, u_i^{\max}	1500 kW
v_i^{\min}, u_i^{\min}	100 kW
SOC_{\min}	0.1
SOC_{\max}	0.9

PQ 控制模块和调制模块组成。功率计算模块通过采样逆变器侧三相电压和电流计算逆变器输出的有功功率和无功功率; 锁相环通过获得网侧电压的相位, 实现逆变器侧输出电流和网侧电压的同步; PQ 控制模块发出调制信号给调制模块, 产生三相全桥逆变电路的驱动信号。在控制部分中, 功率计算模块得到功率 P_m 、 Q_m , 并与给定的参考功率 P_{ref} 、 Q_{ref} 进行比较, 经过 PI 调节器和 PARK 变换得到电流控制器参考值 i_{d0} 、 i_{q0} , 再与实际电流值 i_d 、 i_q 进行比较做差后, 经 PI 控制器调节, 发出调制信号给调制模块。

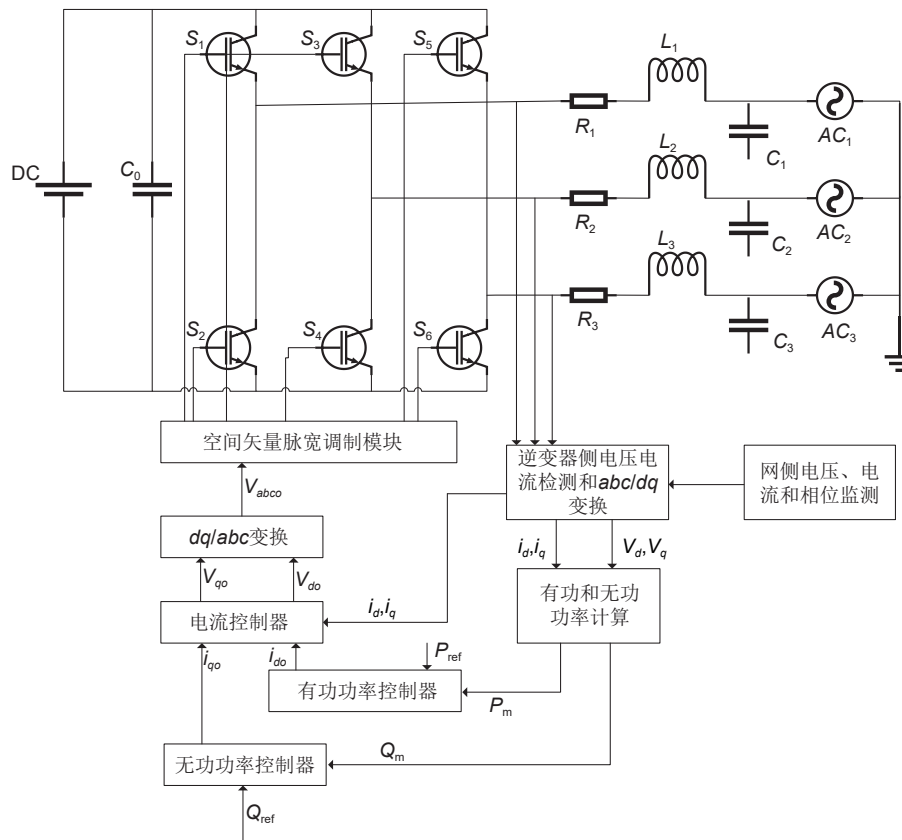


图 5 采用 PQ 控制策略逆变并网的储能电池电路结构

Fig. 5 Circuit structure of energy storage battery connected to grid using PQ control strategy

根据储能电池采用PQ控制策略逆变并网的电路结构,可搭建单个储能仿真模型如图6所示。

这里的储能按照式(2)模型,在图6所示仿真模型中采用积分器模拟储能长时间运行对SOC的影响。

响,储能容量设置为1000 kWh,功率进行积分计算后与初始SOC相减进行储能在运行过程中的仿真。这里的仿真仅涉及调度控制,故均采用数值模拟的方式进行。

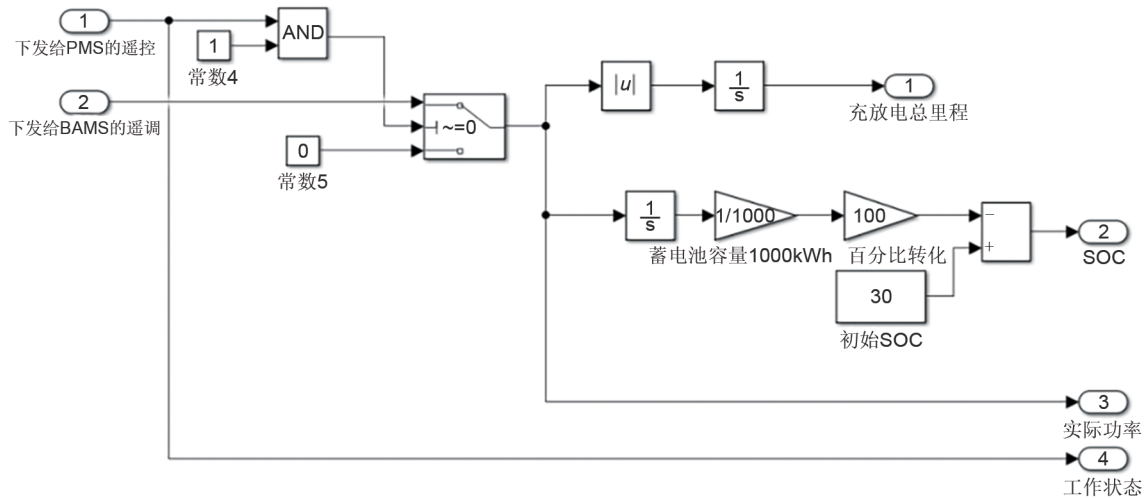


图6 储能电池模型

Fig. 6 Energy storage battery model

完成储能电池模型搭建后,对其进行封装,并建立S-函数,储能模块的测量输出传入S-函数模块,S-函数的输出与储能模块的功率指令相连,在S-函数中的初始化部分建立与控制器的通信连接,

并作为全局变量保存下来,实现与低代码控制器通信功能,S-函数中的输出部分通过连接获取控制器内的测点数值,接收主控系统下发的调遥,完成储能功率分配并下发,如图7所示。

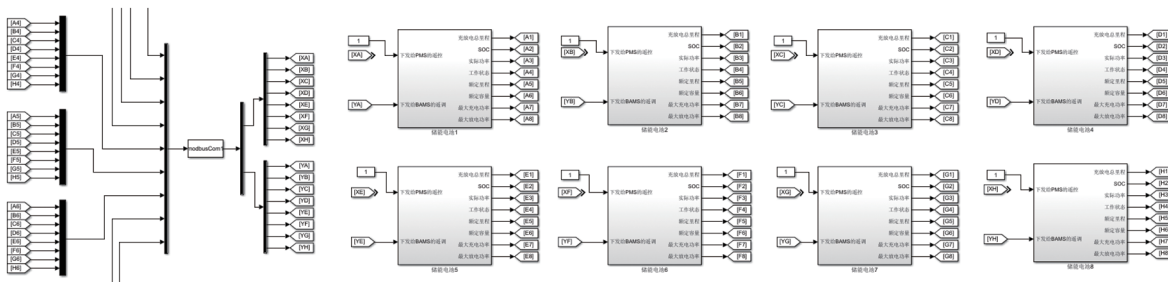


图7 储能整体仿真模型

Fig. 7 The overall simulation model of energy storage

3.1.2 控制策略AOE拓扑

根据建立的模型,设计基于AOE网络和事件驱动的储能功率分配控制策略如图8所示。

将该策略内容利用AOE拓扑进行表示,如图9所示。包含4个动作,动作1是计算中间量,在Simulink通信事件节点触发后被执行,计算电池的健康度(state of health, SOH),进而推算出电池当前实际容量;动作2为混合整数线性规划问题的优化求解,在节点2触发后被执行,通过低代码方式

优化问题模型;动作3是下发优化策略,动作类型为设点;动作4是下发默认策略,动作类型为设点。

3.2 重点强化

学生在教师完成模型建立与控制策略AOE拓扑讲解之后,对测点配置、AOE配置和通道配置三个重点内容进行强化训练,有助于学生了解该储能功率分配控制方法的原理,并进一步了解低代码控制器的使用方法。

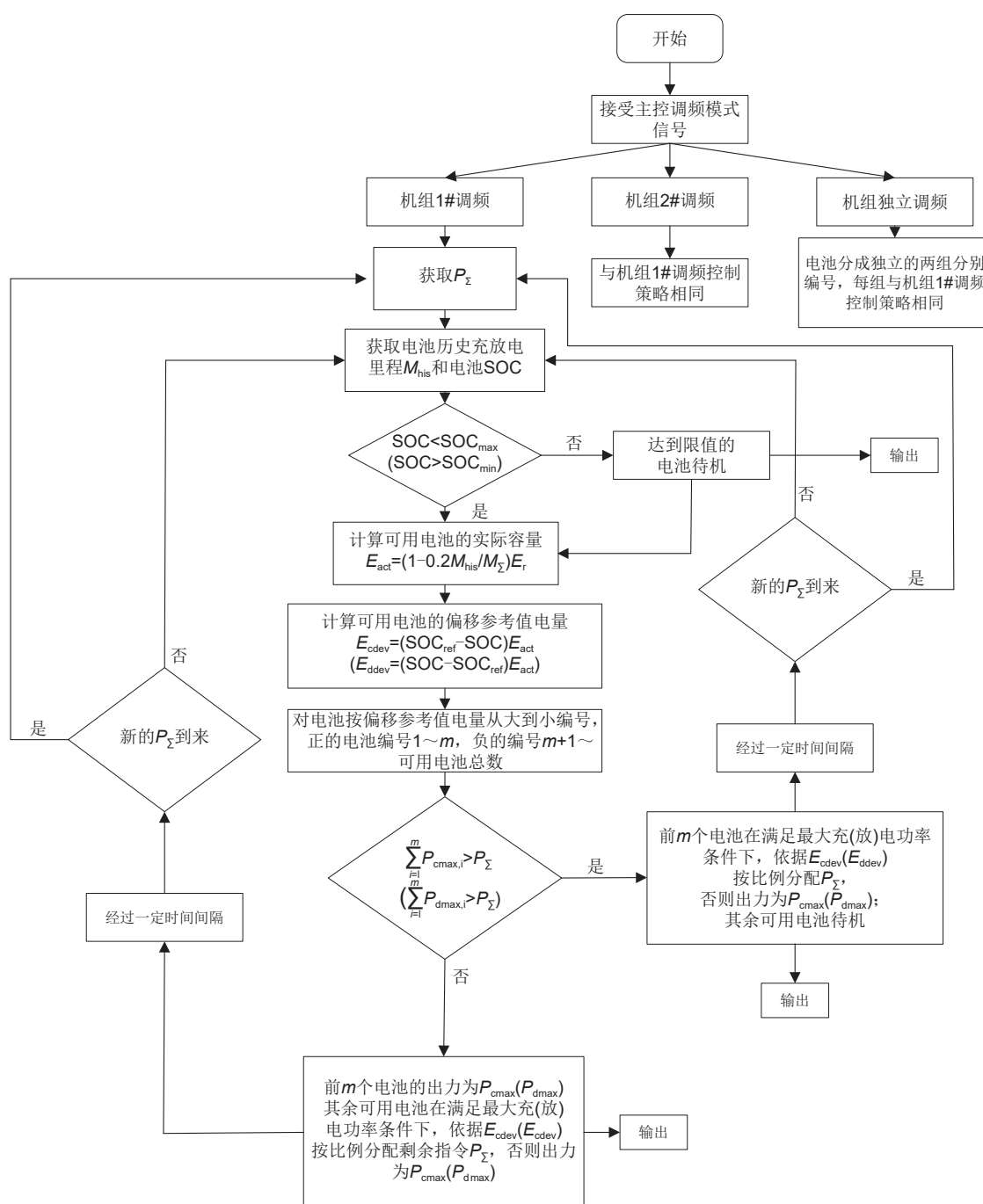


图8 控制策略流程图

Fig. 8 Control strategy flow chart

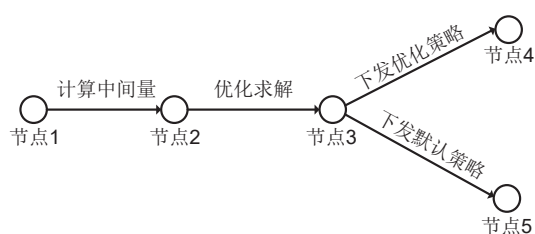


图9 控制策略AOE拓扑

Fig. 9 The AOE topology of control strategy

3.2.1 测点配置

本案例共有82个测点。其中测点1表示主控制系统下发的遥控即EMS模式；测点2表示主控制系统下发的遥调即系统有功指令；测点3-10表示下发给PMS的遥控；测点11~18表示充放电总里程；测点19~26表示SOC；测点27~34表示功率；测点35~42表示工作状态；测点43~50表示下发

给 BAMS 的遥调即工作状态；测点 51~58 表示额定里程；测点 59~66 表示容量；测点 67~74 表示最大充电功率；测点 75~82 表示最大放电功率。

3.2.2 AOE 配置

AOE 配置是建立 AOE 网络来实现所需的控制逻辑和功能，利用 AOE 网络配置文件定义 AOE 网络的基本信息、变量、事件和动作，从而描述构建的 AOE 网络及设计的控制策略。文件配置按照标准化格式，以表格信息录入的方式来完成，不需要编写代码。

第 1 个节点是 Simulink 通信事件节点，为事件触发类型，当储能工作在 EMS 控制模式时，该节点被触发，控制器控制储能进入 AGC 模式，运算流程启动。

第 2 个节点表示中间变量计算完成的事件，当考虑 SOH 因总充放电里程变化而减小时，计算并更新当前各储能的 SOH 以及储能运行寿命损耗导致的实际容量减少等，当计算动作完成后，节点 2 触发，开始进行优化计算。

第 3 个节点表示优化计算完成的事件，该节点类型为 Switch，根据标志变量的值判断优化求解是否成功，节点事件触发时表示超时时间内(未超时)找到问题的最优解，节点动作 1 被执行；否则发生超时之后，节点动作 2 被执行。

第 4 个节点表示优化问题已得到最优解的事件，该事件发生说明最优解被找到并下发，AOE 策略结束。

第 5 个节点表示优化问题没有找到最优解，这种情况发生说明发生以下两种情况：1.EMS 下发的 AGC 指令不合理；2.储能可调度容量太小。

3.2.3 通信通道配置

本案例中，控制器作为从站，具体的通道配置和寄存器配置如表 4 和表 5 所示。本案例中总共用到两种数据类型，TwoByteIntUnsigned 对应开关量，占据 1 位寄存器；EightByteFloat 对应连续或者离散的数据变量，占据 4 位寄存器。根据数据类型完成对起始地址的分配，即可完成通道文件的配置。

表 4 通道配置文件
Table 4 Channel configuration file

通道名称	server 测试道	连接名称	测试通道 1
连接个数	1	测点个数	82
服务端口	502	客户端 IP	127.0.0.1
		客户端端口	9999
		slave id	1
		通信协议	XA
		一次读寄存器数上限	125
		一次读开关数上限	2000

表 5 寄存器配置文件
Table 5 Register configuration file

序号	寄存器类型	起始地址	数据类型	新请求标志	轮询周期	点号
1	HOLDING	1	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1001
2	HOLDING	2	EightByteFloat	FALSE	2000	1002
3	HOLDING	6	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1003
4	HOLDING	7	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1004
5	HOLDING	8	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1005
6	HOLDING	9	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1006
7	HOLDING	10	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1007
8	HOLDING	11	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1008
9	HOLDING	12	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1009
11	HOLDING	13	TwoByteIntUnsigned	FALSE	2000	1010
12	HOLDING	17	EightByteFloat	FALSE	2000	1011
...

3.3 难点分析

本案例的难点在于如何实现模型与控制器的通信，本案例通过 Modbus 通信方式建立 Simulink 模型与低代码控制器通信，本实验中的输入有 66 个，

包括八个储能的充放电总里程、SOC、输出功率、工作状态、额定里程、额定容量、最大充电功率、最大放电功率，以及系统收到的是否调频指令与调频功率指令。输出有 16 个，为 8 个储能的启停指令

与输出功率指令。通过设置输入输出值和 HIL 仿真步长，建立与控制器的通信。

3.4 深度启发

先运行低代码控制器，再运行 Simulink 模型，进行 HIL 仿真。利用低代码控制器进行优化求解，得到的控制结果如图 10~12 所示。

由图 10 可以看出，储能实际输出总功率跟随指令功率变动，两者之间的误差较小。图 11 展示了各个储能的功率变化曲线，可见各储能之间功率分配合理，当 SOC 达到基本均衡后储能之间的出力曲线基本相近。图 12(a) 表示储能 SOC 变化曲线，可见在控制器的作用下，仿真经过约 5 小时后储能 SOC 达成均衡，式(7)目标函数中后一项权重

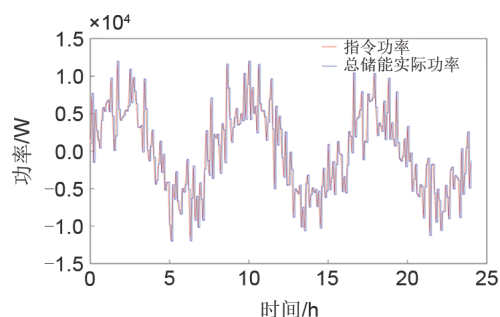


图 10 指令功率和总储能实际输出功率

Fig. 10 The command power and actual output power of all energy storage battery packs

增大，控制算法更倾向于实现功率一致，这样能够避免为实现 SOC 完全一致而导致的功率频繁跳变。

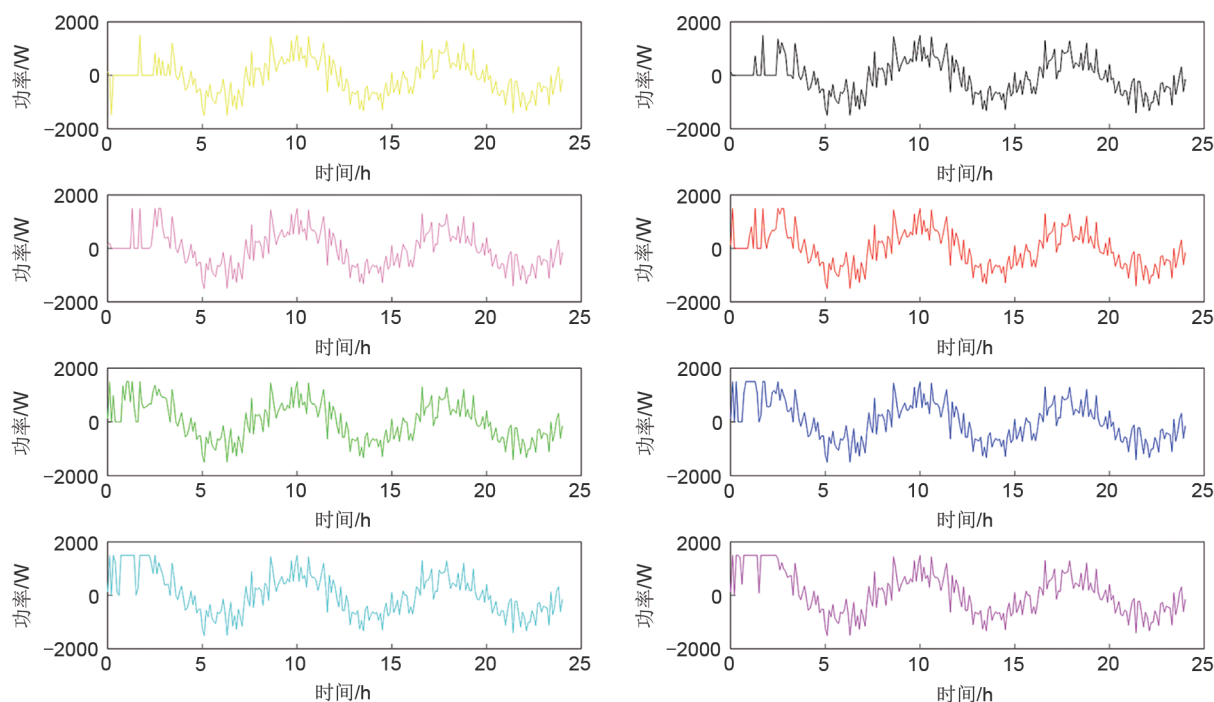


图 11 各储能电池实际输出功率

Fig. 11 The actual output power of each energy storage battery pack

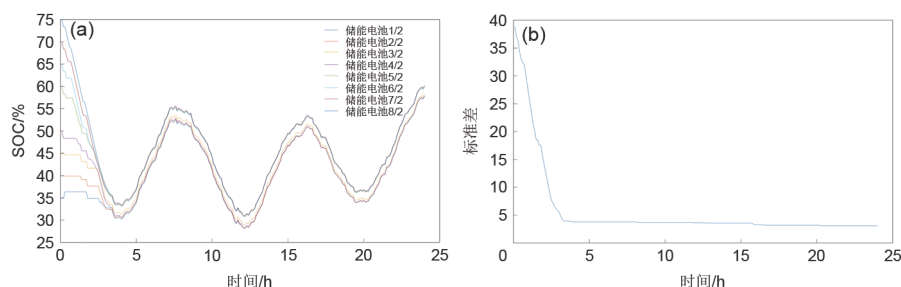


图 12 (a) 各储能 SOC 变化, (b) SOC 标准差变化曲线

Fig. 12 (a) The SOC change of each energy storage pack, (b) The curve of SOC standard deviation

图12(b)展示了运行过程中储能SOC标准差变化曲线,可见运行前标准差为38.73,仿真5小时左右时标准差下降为3.09,各储能功率和SOC曲线变化情况符合预期效果,实现了储能功率分配的控制目标,控制效果较好。相较于传统控制器,低代码控制器可以实现混合整数线性规划问题的优化求解,从而能有效实现储能出力对下发指令的跟踪,具有强大的功能。且该实验无需复杂编程,适合无编程基础人员学习。教师可引导学生以该案例为基础,启发学生们将其拓展延伸到储能其他控制策略中,进一步巩固理论知识。

4 结 论

本文针对储能学科实验教学困境,提出基于Simulink和低代码控制器的HIL教学实验方法,从实验贴近工程实际出发设计实验,并具体介绍低代码控制器的使用原理,最后结合储能功率分配优化案例从整体认知、重点强化、难点分析和深度启发四个方面具体展开,得到如下结论。

(1) 低代码控制器的使用降低了对学生编程能力的要求,只需进行EXCEL配置文件的编写,即可完成控制器的配置,经过调研相比原来代码编写方式将节约学生40%的课后练习时间。同时结合Simulink仿真环境和输出曲线,能更透彻地理解控制原理,启发学生们在课堂学习基础上有新的拓展延伸。

(2) 本文所提的控制算法,从储能参与AGC辅助调频服务的角度出发,考虑通过运行过程中实现SOC均衡来最大化储能可调度容量,提出了采用指数函数作为代价函数权重的方法,在储能SOC差距较大时以缩小SOC为目标进行功率分配,当SOC达到基本均衡后以保持SOC曲线均衡度作为目标,并控制SOC偏差在5%范围内,实现了SOC快速均衡,同时避免了SOC过度均衡而导致功率跳变的情况。

(3) 本文提出的教学实验设计思路可广泛应用于储能实验教学中,对复杂工业对象进行仿真控制,可以提升实验教学质量,加深学生对储能学科相关理论的理解。

参 考 文 献

[1] 饶中浩,刘臣臻,霍宇涛,等.面向储能技术的跨学科拔尖创新人才

培养教学实践与探索[J].储能科学与技术,2021,10(3):1206-1212.

RAO Z H, LIU C Z, HUO Y T, et al. Practice and exploration of teaching for interdisciplinary outstanding and innovative talents training oriented to energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1206-1212.

[2] 教育部,国家发展改革委,国家能源局.教育部 国家发展改革委 国家能源局关于印发《储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024年)》的通知[J].中华人民共和国教育部公报,2020(Z1): 55-58. Ministry of Education, National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on issuing the action plan for the development of energy storage technology professional discipline (2020-2024) [J]. Bulletin of the Ministry of Education of the People's Republic of China, 2020(Z1): 55-58.

[3] 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.

PAN C P, HAO Z H. Wind power experiment teaching platform based on hardware-in-the-loop simulation[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2020, 37(3): 53-57.

[4] 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.

JIANG Y W, JIANG X Q. Design on experimental platform of hybrid multi-energy system with "Wind-photovoltaic-hydrogen-fuel cell-battery"[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(5): 20-25.

[5] HAO W J, 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 (ICEMS). Sydney, Australia, IEEE, 2017: 1-4.

[6] 张强,张敬南,姚绪梁.光伏发电与储能一体化实验装置[J].实验技术与管理,2021,38(2): 100-104.

ZHANG Q, ZHANG J N, YAO X L. Integrated experimental device of photovoltaic power generation and energy storage[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(2): 100-104.

[7] 孟超,吴涛,刘平,等.光伏和储能并网物理数字混合仿真实验系统方案[J].电力系统自动化,2013,37(6): 90-95.

MENG C, WU T, LIU P, et al. A physical digital hybrid simulation experimental scheme for photovoltaic and energy storage grid-connected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 90-95.

[8] 田春笋,孙玉树,唐西胜,等.储能提高微网稳定性的仿真实验分析[J].电测与仪表,2018,55(5): 33-37.

TIAN C Z, SUN Y S, TANG X S, et al. Simulation experiment of energy storage improving micro-grid stability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 33-37.

[9] 吴肖龙,夏勇,胡凌燕,等.固体氧化物燃料电池发电系统动态模拟教学实验平台建设[J].实验室研究与探索,2021,40(8): 154-158.

WU X L, XIA Y, HU L Y, et al. Construction of dynamic simulation experiment platform for solid oxide fuel cell power generation system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(8): 154-158.

[10] 刘平,李树胜,李光军,等.基于磁悬浮储能飞轮阵列的地铁直流电

- 能循环利用系统及实验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 910-917.
- LIU P, LI S S, LI G J, et al. Experimental research on DC power recycling system in the subway based on the magnetically suspended energy-stored flywheel array[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 910-917.
- [11] 何舜, 张建文, 蔡旭. 风电变流器的 RT-LAB 硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 43-48.
- HE S, ZHANG J W, CAI X. Realization and design of wind power converter model based on RT-LAB HIL system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 43-48.
- [12] 浙江大学智能电网运行与优化实验室. 基于 AOE 事件驱动技术的低代码工业控制器[EB/OL]. [2021.11.25]. <http://sgool.zju.edu.cn/zh-CN/lcc/>.
- Zhejiang University Smart Grid Operation and Optimization Laboratory. Low-code industrial controller based on AOE event-driven technology [EB/OL]. [2021.11.25]. <http://sgool.zju.edu.cn/zh-CN/lcc/>.
- [13] "新工科"建设行动路线("天大行动")[J]. 高等工程教育研究, 2017(2): 24-25.
- "New Engineering " Construction route("TJU actions") [J]. Research in Higher Education of Engineering, 2017(2): 24-25.
- [14] 韦磊, 张宏, 杨睿, 等. 基于新工科六问构建研究型大学工科实践教学体系[J]. 高教学刊, 2021, 7(33): 98-101.
- WEI L, ZHANG H, YANG R, et al. Construction of engineering practice teaching system of research universities based on six items of new engineering[J]. Journal of Higher Education, 2021, 7(33): 98-101.
- [15] 牛天林, 樊波, 张强, 等. "电力电子技术"课程教学中虚实融合式手段实践[J]. 电气电子教学学报, 2018, 40(3): 119-122.
- NIU T L, FAN B, ZHANG Q, et al. Practice of virtuality and reality combination method in power electronic technology teaching[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2018, 40(3): 119-122.
- [16] YAO J S, LIN F T. Fuzzy critical path method based on signed distance ranking of fuzzy numbers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 2000, 30(1): 76-82.
- [17] GONZÁLEZ I, CALDERÓN A J, PORTALO J M. Innovative multi-layered architecture for heterogeneous automation and monitoring systems: Application case of a photovoltaic smart microgrid[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2234.
- [18] 李佳娜, 刘丹丹, 朱峰, 等. 基于电力调频的串联锂离子电池组均衡技术分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 468-476.
- LI J N, LIU D D, ZHU F, et al. Analysis of equalization technology of series lithium-ion battery pack based on power frequency modulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 468-476.