



“光储柔直系统”创新实验项目设计与实践

印 月, 冷敏瑞*, 徐 航, 周 群

(四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 为推动科研成果和技术创新反哺人才培养, 将光储柔直系统设计与控制领域的产业难题及已取得的科研成果引入实验教学, 经过有机重构与设计, 将其转化为与实验知识点相关的教学资源。设计“光储柔直系统”创新实验项目, 促使本科生从电力系统源侧变换器角度切入, 了解新能源系统, 加深对光伏接口直流-直流(DC-DC)转换器设计、储能变换器设计等前沿开关电源设计问题以及新能源控制等前沿知识的理解, 拓宽学生对实际生产过程中的工程技术难题的认知。采用模块化硬件拓扑结构和控制构架开展实验教学, 引导学生进行科学探索和知识拓展。同时, 为学生专业知识的综合运用和解决复杂实际工程问题提供了一个功能多样、设计灵活的实验平台。

关键词: 光伏发电; 储能; 电子技术实验; 教学模式

中图分类号: TN79

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230567

Design and Practice of Innovative Experimental Project of “Flexible and Optical Storage System”

YIN Yue, LENG Minrui*, XU Hang, ZHOU Qun

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to foster talent and promote scientific research and technological innovation, the industrial problems in the field of design and control of light storage flexible and direct systems are integrated into our experimental teaching. This allows us to transform scientific research achievements into teaching resources that are relevant to the knowledge points covered in experiments. The designed innovative experimental project, light storage flexible and direct system, encourages undergraduate students to approach the topic from the perspective of power system source-side converters. In this way, students can learn about new energy systems and deepen their understanding of cutting-edge switching power supply design issues, such as photovoltaic interface DC-DC converter design and energy storage converter design. They also gain knowledge in new energy control and expand their awareness of engineering and technical problems that arise in actual production processes. The experimental teaching is carried out by utilizing the modular hardware topology and control structure to guide students to conduct scientific exploration and knowledge expansion. Meanwhile, it provides a multi-functional and flexibly designed experimental platform for students to comprehensively apply their professional knowledge and solve complex practical engineering problems.

Key words: photovoltaic power generation; energy storage; electronic technology experiment; teaching mode

2022 年 10 月, 习近平总书记在党的二十大报告中指出“有计划分步骤实施碳达峰行动”“加快规划建设新型能源体系”^[1]。这一系列新思想和新要求, 为我国能源清洁低碳转型指明了方向, 擘画了具体路线图, 开辟了中国特色能源发展新道路。为贯彻落实党的二十大精神和习近平总书

记关于教育的重要论述, 统筹推进教育科技人才“三位一体”协同发展^[2-4], 推动科研成果和技术创新反哺人才培养, 将科研成果和产业企业的新观点、新技术、新方法和新项目及时融入实验教学, 增强电子技术实验教学内容的高阶性、创新性和挑战度, 激发学生的创新意识和创新思维,

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 2022 年四川大学实验技术立项(SCU221040); 四川大学高等教育教学改革工程(第十期)研究项目(SCU10284)。

作者简介: 印月, 博士, 高级实验师, 主要从事电工理论及新技术方向的研究。E-mail: 10072371@qq.com

* 通信作者: 冷敏瑞, 博士, 讲师, 主要从事电工电子技术方面的教学。E-mail: 1250208516@qq.com

为加快培养拔尖创新人才提供有力支撑，切实提升高校服务国家重大战略和地方经济社会发展的能力。

电气工程学科建设应紧跟国家能源领域的重大战略需求和科研前沿热点，培育新型工科人才，将“双碳”理念融入课程实验教学，切实提高学生的知识技能运用能力和创新能力，为实现“双碳”发展目标提供人才储备与技术支持^[5-7]。模拟电子技术实验是电气工程学科专业教学 and 高质量人才培养方案中的一门重要实验课程^[8-9]。该课程容量大、专业知识涉及广、工程实践需求高。在当前全面推进新型电力系统建设的学科背景下，课程教学内容存在重基础、轻前沿的痛点，现有实验教学集中于传统电子电路设计，与学科发展的前沿成果及工程实践结合不足。

本文拟将“光储柔直系统”相关科研成果转化为实验教学项目，在现有实验教学内容的基础上，顺应新型电力系统发展趋势，强调可再生能源不确定性特征，补充新能源并网控制新特征、新规律的探究环节。提出以科研项目驱动、著作论文进课堂的研教融合教学方法，以案例教学、小班化研讨、科研训练为载体，以光储柔直系统设计与控制等产业问题为切入点，以丰富实操经验、解决实际工程问题为导向，提升课程实验高阶性和挑战度^[10-12]，引导学生明确学科前沿及专业发展方向，拓展知识的广度与深度，培养“知识水平深”“实践能力强”“职业素养高”的新工科复合型人才^[13-15]。

1 光储柔直系统创新实验项目总体规划

光储柔直系统创新实验项目立足工程实际，以课程知识点为基础，将产业难题分解、重构、

再设计，引导学生多角度分析实际工程问题。通过实验教学，帮助学生掌握光储柔直系统设计原理与控制技术，以及现代工程计算、分析、仿真、设计等应用软硬件工具的使用方法。

在实验教学过程中，采用进阶式实验教学方式，开展光储柔直系统设计实验教学。第 1 阶段从总体上了解光储柔直系统拓扑结构及各单元电路功能；第 2 阶段根据光储柔直系统设计要求，逐级完成各子模块电路调试与数据测试；第 3 阶段根据各子模块的级联关系，进行子模块电路逐级联调，实现光储柔直系统的各项功能，并进行相关数据测试。3 个阶段的实验内容逐级递增，调试难度逐级增大，同时学生对实验内容的理解程度也得到递进式提升。

在电路调试过程中，针对功率单元各子模块电路主要测试 DC-DC 变换装置的输出电压精度、输出纹波电压、电压调整率、负载调整率和变换器效率，并记录电感电流波形、金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)反向电压波形以及输出电压波形，将硬件电路数据与仿真数据进行对比分析，让学生深入理解光储柔直系统中光伏并网 DC-DC 变换器与线性稳压电源的工作原理，以及开关电源的设计方法与测试方法，锻炼其电路系统的综合调试能力。

2 光储柔直系统实验设计

光储柔直系统创新实验项目包括功率电路单元、控制单元及检测单元 3 个部分。其中功率电路单元为该实验项目的核心，控制单元是该实验项目的高阶任务，检测单元则是对功率电路单元和控制单元的数据测试。该实验项目实施的技术路线如图 1 所示。

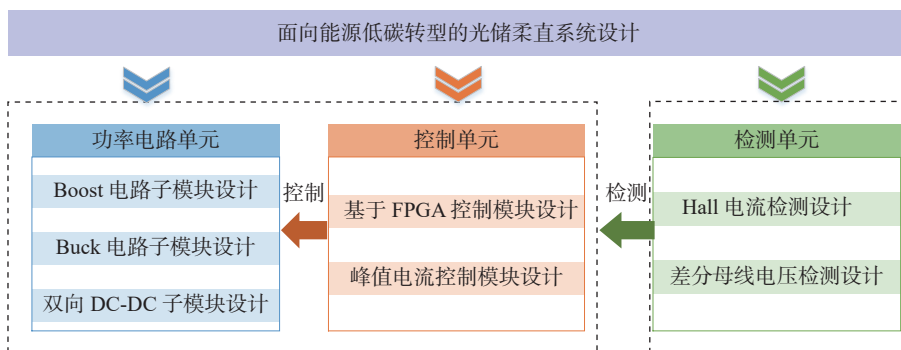


图 1 实验项目实施的技术路线图

2.1 功率电路单元

光储柔直系统的功率电路单元主要由 Boost 电路、Buck 电路以及双向 DC-DC 变换器 3 个子模块构成, 拓扑结构如图 2 所示。其中, Boost 变换器具有高效率、控制简单的特性, 采用其作为光储柔直系统的升压变换器模块; Buck 开关变换器具有拓扑与控制简单、转换效率高特性, 基于 Buck 变换器拓扑设计并制作光储柔直系统的电源转换装置; 双向 DC-DC 变换器则用于实现储能装置的充电电压和充放电电流可调的高性能变换装置, 各子模块设计思路如图 2 所示。

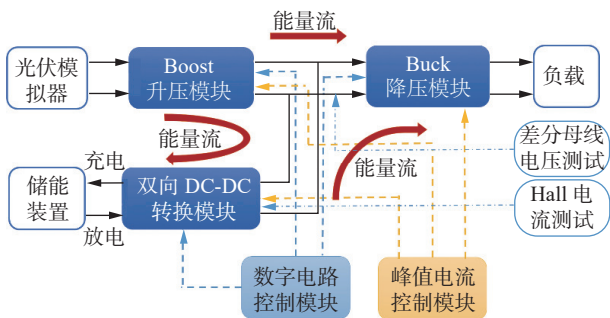


图 2 光储柔直系统拓扑结构图

1) Boost 电路子模块设计

首先基于光伏模拟器设备参数, 设计 Boost 电路元件参数; 然后根据 DC-DC 电源转换芯片的基本功能及引脚说明, 设计 Boost 电路拓扑结构; 基于所设计的 Boost 电路拓扑结构, 绘制印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 电路图, 完成电路焊接和调试。

2) Buck 电路子模块设计

与 Boost 电路类似, 根据光储柔直系统应用需求, 设计 Buck 电路元件参数; 然后基于所选定的 DC-DC 变换器芯片引脚功能, 设计 Buck 电路拓扑结构, 绘制 Buck 电路 PCB 电路图, 完成电路焊接和调试。

3) 双向 DC-DC 子模块设计

该模块电路设计中, 首先分析光储柔直系统储能装置的充放电特性及充放电方式, 选择光储柔直系统实验模块的充放电方式, 确定子模块电路整体设计方案; 然后根据光储柔直系统设计实验模块硬件设计指标, 选择 DC-DC 控制芯片, 设计开关电源电路及主电路参数设计, 再结合 DC-DC 控制芯片性能特性, 设计恒流恒压调节环路, 实现充电电压和放电电流的可调性; 最后绘制双

向 DC-DC 电路的 PCB 电路图, 完成电路焊接和调试。

单向 DC-DC 变换器只能将能量由一个方向向另一个方向传输, 而双向 DC-DC 变换器可实现能量的双向传输口。本文采用双向 Buck-Boost 变换器实现光储柔直系统的储能装置的充放电功能。双向 Buck-Boost 变换器是将单向 Buck-Boost 变换器中的开关元件和二极管分别并联反向二极管和开关元件从而实现能量的双向流动, 其拓扑如图 3 所示。

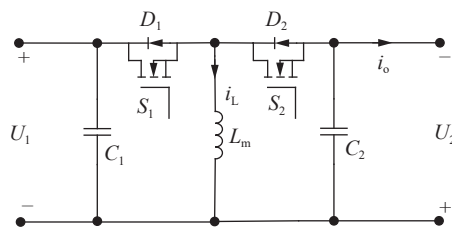


图 3 双向 Buck-Boost 变换器拓扑图

双向 Buck-Boost 变换器有 3 种工作模式: Boost 模式、Buck 模式、交替工作模式。若规定电流从 U_1 侧流向 U_2 侧是正向传输模式, 电感电流始终为正, 反之为反向传输模式, 为了保证电流的双向传输, 开关管 S_1 和 S_2 不能同时导通; 还有一种是交替工作模式, 在一个周期内电流交替地在 U_1 和 U_2 之间流动, 此时的开关模式与双向 Buck/Boost 变换器相同, 平均能量传输方向取决于 i_L 的平均值, 当 i_L 平均值为正时, 为正向传输, 反之为反向传输^[16]。

2.2 控制单元

光储柔直系统的控制单元中, DC-DC 变换器包含开环和闭环两种控制方式。其中开环控制作为基础实验; 闭环控制方式的设计作为高阶训练, 又分为模拟和数字控制两种方式, 如图 4 所示。在该实验项目中, 模拟控制方式主要指峰值控制, 包括标准峰值控制和自制峰值控制电路; 数字控制主要是指通过 FPGA 进行数字编程来实现 DC-DC 变换器的控制。此外, 还有自定义控制方式, 这种控制方式要求学生灵活应用模拟、数字控制方式, 自行设计控制方法。

1) 峰值电流控制模块

DC-DC 变换器的峰值电流控制是在每一个开关周期开始时, 时钟信号使触发器置位, U_p 为高电平, 开关管 S_1 导通, i_L 由初始值线性增大, 采

样得到的电流信号 $k_1 i_L$ 也线性增大。当该信号增大到控制电压 u_e 时，比较器翻转，使触发器复位， U_p 为低电平， S_1 关断，直到下一个时钟脉冲到来，开始一个新的开关周期。 u_e 由检测到的输出电压 U_o 与参考电压 U_{ref} 的差值经误差放大器后生成。峰值电流控制除了采用 i_L 作为内环控制外，还可以采用开关电流 i_s 。Boost 变换器峰值电流控制拓扑如图 5 所示。

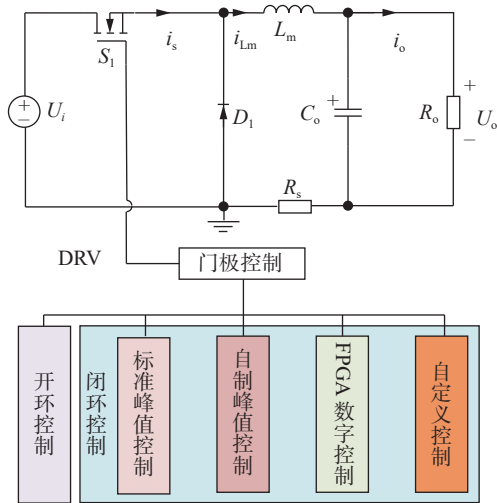


图 4 DC-DC 变换器控制方式

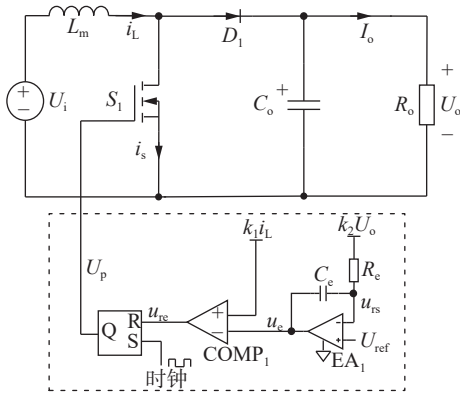


图 5 Boost 变换器峰值电流控制拓扑图

为实现对输出功率的精确控制，实验中可通过电压电流双重控制方式。其中，电压外环采样输出电压，通过 PI 控制器精准控制电压；电流环采样电感电流，利用电感电流纹波控制开关通断，提高变换器的动态响应特性。以 Boost 变换器为例，在调试过程中，可设置一个阶跃信号与采样电压进行比较，标么化后经过 PI 调节器，与采样电流峰值进行比较，再经过 RS 触发器，得到开关信号，从而实现输出电压和电流的精确控制。

2) 数字电路控制模块

该实验中，DC-DC 变换器的数字控制方式是指由 FPGA 实现 DC-DC 变换器的控制。在设计过程中，将整个控制系统划分为 AD 采样模块、智能 PID 算法模块以及 DPWM 输出模块，分别编写形成 symbol 模块，最后使用原理图的顶层文件将各 symbol 模块联立起来实现对 DC-DC 变换器的控制。基于 FPGA 的控制系统结构如图 6 所示。

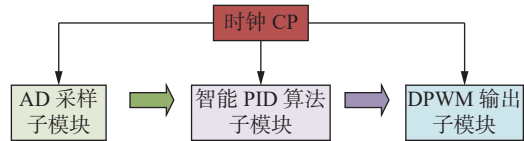


图 6 基于 FPGA 的控制系统结构图

2.3 检测单元

检测单元主要实现光储柔直系统的电流和母线电压检测功能。其中，采用霍尔(Hall)电流检测模块实现光储柔直系统的电流检测，采用差分隔离母线电压检测模块实现光储柔直系统母线电压检测。

1) Hall 电流测试模块

该实验采用直测式 Hall 电流检测方式。该方式是利用集磁环将原边导线周围产生的磁场通过气隙集中，提供给磁敏元件 H(GaAs)，再由磁敏元件 H 转换为弱电信号，经差分放大输出电压信号进行检测。电路原理如图 7 所示。

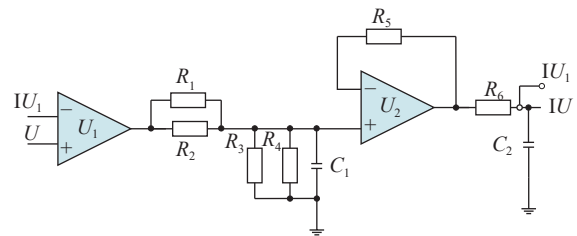


图 7 直测式 Hall 电流检测原理图

图中， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 根据电流定标进行分压调整；运放 U_2 构成跟随电路； C_1 和 C_2 为 Hall 输出的滤波电容。

2) 差分母线电压测试模块

差分母线电压检测电路是通过大电阻串联隔离高压母线电压与弱电，然后利用差分电路检测母线电压。差分电路由两个元件参数相同的放大电路构成，可实现两个输入电压的求差。其电路示意图如图 8 所示。

图中， R_1 、 R_3 由多个大电阻串联而得，用于

隔离高压母线电压与弱电; R_2 为平衡电阻; R_4 为增益设置电阻。

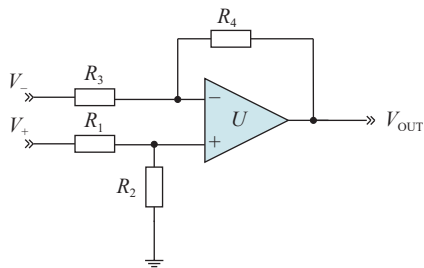


图8 差分检测电路示意图

3 实验效果

基于上述设计方案,以组为单位完成一套光储柔直系统设计,每小组由10名同学组成,每两名同学负责一个电路单元的设计与制作。“光储柔直系统”硬件电路如图9所示。

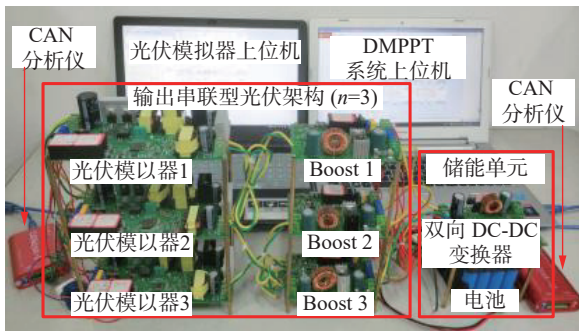


图9 光储柔直系统图

图中,光储直柔系统由3个Boost电路和1个双向DC-DC电路组成,源端接有蓄电池和光伏模拟器。以Boost变换器设计为例,展示学生电路设计成果。该电路采用扰动观察法实现光伏模拟器最大功率追踪,控制算法流程如图10所示。图中, P_k 为采样时刻光伏模拟器瞬时输出功率, U_k 和 I_k 分别为采样时刻光伏模拟器瞬时输出电压和瞬时输出电流, U_o 为Boost变换器输出电压给定值, ΔU 为电压增量。Boost变换器和Buck变换器模块均采用基于数字化增量式PI控制器的电压电流双闭环控制策略。

扰动观察法进行光伏最大功率追踪时,光伏模块最大功率点跟踪波形如图11所示。图中, P_{pv} 为光伏模拟器瞬时最大输出功率, V_{pv} 和 I_{pv} 分别为光伏模拟器瞬时输出电压和输出电流。当光照变化时,电压 V_{pv} 和电流 I_{pv} 受控制环节的作用快速变化,使得所检测到的瞬时最大输出功率 P_{pv} 也

相应变化,响应时间 $T=0.3\text{ s}$,从而实现了参考功率进行快速跟踪。

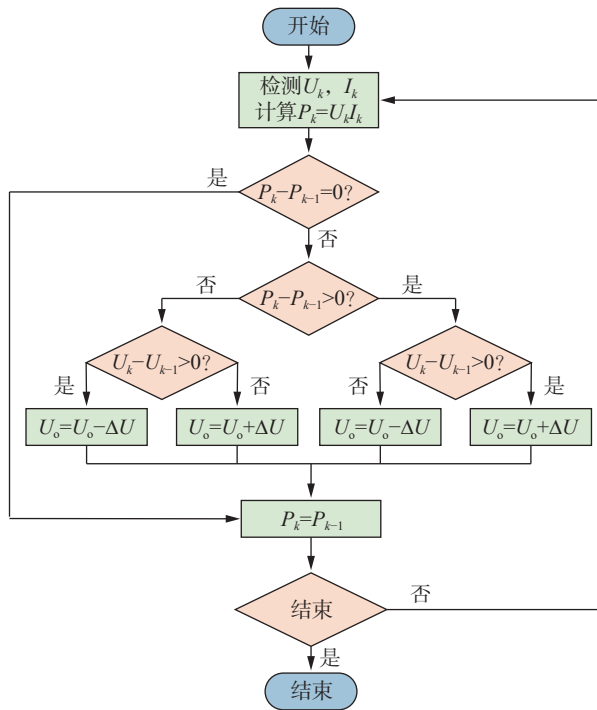


图10 基于扰动观察法的MPPT方法流程图

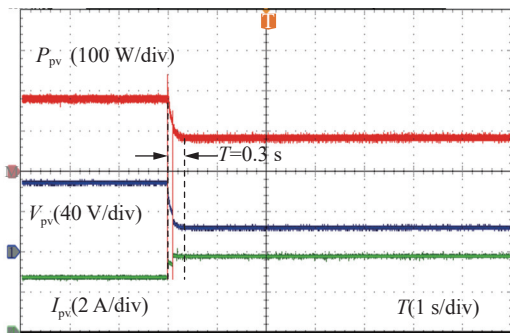


图11 光伏模块最大功率点跟踪波形图

光储柔直系统工作时,储能模块充放电电流波形如图12所示。当光照强度较强时,光伏模块不仅为负载提供能量,多余的能量也为储能模块充电。当光照减弱时,光伏模块无法为负载提供充足的能量,此时,储能模块的蓄电池通过双向DC-DC变换器放电,与光伏模块一起为负载提供能量,维持直流母线电压 V_{bus} 的稳定。因此,光储柔直系统的光伏模块、储能模块均能正常工作,实现能量互补。

通过该实验,加深了学生对光储柔直系统的协调运行的理解,使学生掌握光伏模块最大功率点跟踪的控制机理,锻炼学生控制算法设计和控

制策略数字化实现的能力。此外,光储柔直系统电路设计及调试均涉及电子技术中的模拟和数字理论知识实践,在锻炼学生理论结合实践的同时,还提升了学生课程交叉融合、课题创新的思维能力。

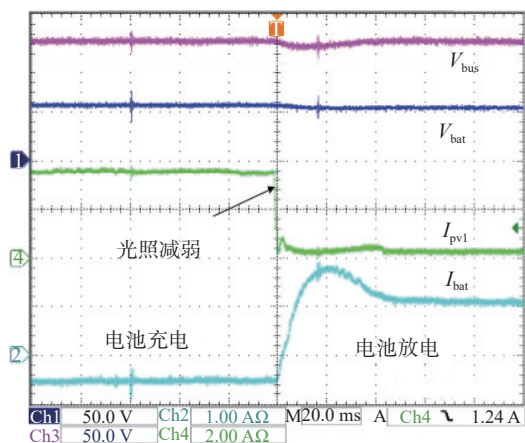


图 12 光储柔直系统工作波形图

4 结束语

“光储柔直系统”创新实验项目紧跟电子技术的发展现状和技术前沿,将先进前沿技术引入实验教学,让学生及时跟踪电子技术的最新动态和发展趋势,加深对理论知识的分析和理解,从而实现实验和理论的完美结合,进一步培养学生的综合分析能力和电子设计能力。该项目加强了电子技术实验与电力电子技术、控制理论等其他课程的联系,融会贯通,形成一个有效的知识体系,这对于学生掌握整个学科有着重要的意义,有利于提高电子技术课程实验教学的质量。

此外,“光储柔直系统”创新实验项目采用多模块组合的方式,可以根据不同的研究场景要求,对模块电路进行不同形式的组合,并广泛应用于学科竞赛、创新实验等模块的培训,为培养学生专业知识综合运用及解决新能源发电技术领域内的实际工程问题提供了一个功能多样、设计灵活的实验平台。

参考文献

[1] 习近平在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告:高举中国特色社会主义伟大旗帜,为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[EB/OL]. (2022-10-

25)[2023-11-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1747666968337407608&wfi=spider&for=pc>.

- [2] 教育部. 关于印发《高等学校碳中和科技创新行动计划》的通知[EB/OL]. (2021-07-12)[2023-11-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/29/content_5628172.htm.
- [3] 国务院. 关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-26)[2023-11-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [4] 章诚, 郑玉洁, 凌红. 中国的“双碳”目标与实践: 形成逻辑、现实挑战、社会风险及推进进路[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2022, 24(6): 78-87.
- [5] 张珍珍, 吕清泉, 张健美. “双碳”目标下分布式光伏发电技术的研究进展及展望[J]. 太阳能, 2023(1): 17-21.
- [6] 郝丽丽, 张广明, 崔行磊, 等. “双碳”目标下电气工程研究生跨学科培养模式探索[J]. 中国现代教育装备, 2022(21): 129-131.
- [7] 吕石磊, 王冉. “30 60”双碳目标下建环专业的教学改革与思考[J]. 高教学刊, 2021, 7(30): 62-65.
- [8] 张巧杰, 李慧, 张利, 等. 新工科背景下电力电子技术分层实践教学模式探索[J]. 中国现代教育装备, 2023(1): 99-101.
- [9] 陈斌, 方艺萍. “双碳”战略背景下环境类新工科“双创”人才培养与实践探究[J]. 高教学刊, 2021, 7(s1): 29-33.
- [10] 王杰, 王士国, 任佳, 等. 新形势下高校实验室安全管理体系建设探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 235-238.
- [11] 张明锐, 于猛, 王佳莹, 等. 电力系统综合实验平台的实验设计与教学应用[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(7): 189-191.
- [12] 庄文芹, 谢世朋, 邵文泽. 理工科高校院系实验室资源共享实践探究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(5): 209-211.
- [13] 白泽朴, 张继延. 实验教学在创新人才培养中的作用及其实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 5-7.
- [14] 刘贻新, 王成勇, 吴福根, 等. “协同创新”背景下高校实验室建设与管理思考与建议: 赴德法两所高校实验室考察的启示[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(8): 20-24.
- [15] 赵莹, 李静, 曲萍萍. 网络化、共享型、开放式电类专业基础课程平台的构建[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 225-228.
- [16] 陈亚爱, 梁新宇, 周京华. 双向 DC-DC 变换器拓扑结构综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(6): 1-6.

编辑 钟晓