



基于 dSPACE 的微电网教学实验平台设计

李高翔¹, 黄晶晶¹, 潘鸿志¹, 刘 潇^{2*}

(1. 广西大学 电气工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 计算机与电子信息工程学院, 南宁 530004)

摘要: 为提高学生对微电网的认知, 设计并实现了基于 dSPACE 的微电网教学实验平台。该平台利用 dSPACE 控制器可以快速建立并完成各类控制算法的设计和验证, 灵活搭配硬件电路, 包括变流器电源模块、储能模块和负载模块, 构建了适用于工程类实验教学的微电网实验系统。所设计的微电网教学实验平台使用模块化设计, 提高系统组件的可扩展性与设计灵活性; 所搭建的微电网拓扑结构灵活可变, 学生可根据需要对平台进行二次开发。该平台可有效锻炼学生软、硬件设计和控制算法设计的能力, 加深对微电网运行机理、控制方式的理解, 提高创新实践能力。

关键词: 微电网; 变流器; 硬件电路; 控制算法; 实验平台

中图分类号: TM74

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230473

Design of Microgrid Teaching Experimental Platform Based on dSPACE

LI Gaoxiang¹, HUANG Jingjing¹, PAN Hongzhi¹, LIU Xiao^{2*}

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. School of Computer and Electronic Information Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To enhance students' understanding of microgrids, a dSPACE based microgrid teaching experimental platform is designed and implemented. On this platform, by using the dSPACE controller, the design and verification of various control algorithms can be quickly established and completed, and a microgrid experimental system suitable for engineering experimental teaching can be constructed. This system can be flexibly set up with various hardware circuits, including the converter power module, energy storage module and load module, etc. The designed micro-grid teaching experiment platform uses modular design to improve the scalability and design flexibility of system components, and the constructed microgrid topology structure is flexible and variable. Students can conduct secondary development on the platform, which can effectively train students' abilities in software and hardware design and control algorithm design, deepen their understanding of the operating mechanism and control methods of microgrids, and improve their innovative practical abilities.

Key words: microgrid; converter; hardware circuit; control algorithm; experimental platform

随着新能源发电技术的出现, 人们可以利用可再生清洁能源来缓解能源短缺问题及相关的环境问题, 但是新能源发电存在技术不成熟、发电不可控、发电方式受地理条件限制等发展困境。新能源发电能以分布式电源的形式接入微电网, 微电网中所应用的电力电子技术、运行控制技术能够解决新能源应用中非线性器件造成的振荡问题、能源转换效率问题等, 在一定程度上突破

新能源发电的发展困境。因此, 在新能源发电的发展进程中, 微电网装机容量不断增多, 微电网技术发展速度加快。

微电网是指由分布式发电装置、储能装置、能量转换装置、负载以及监控保护装置组成的小型发电系统^[1], 其结构如图 1 所示。微电网既可以孤岛运行, 又能在并网时作为配电网中的电源和负荷, 在一定区域内实现自我控制、保护和管理等功能^[2]。

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52307197); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD23026154); 广西大学研究生课程建设及教育教学改革项目(2024)。

作者简介: 李高翔, 博士, 副教授, 主要从事电力电子技术及新能源发电技术等方面的研究。E-mail: ligaoxiang5@163.com

* 通信作者: 刘潇, 博士, 副教授, 主要从事新能源发电及网络安全等方面的研究。E-mail: liuxiao@gxu.edu.cn

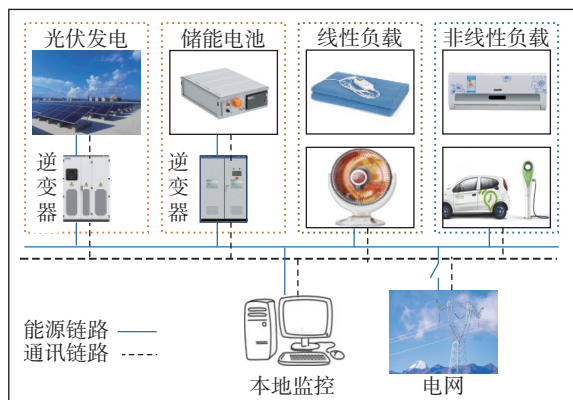


图 1 微电网结构示意图

微电网技术可以有效提高能源利用率、减轻环境污染、增强电力系统稳定性，在国内外受到广泛的关注与重视^[3]。我国的微电网研究起步较早，在关键技术方面已经取得了一些突破，但仍然处于初级阶段，尚且没有形成完整的技术体系。因此，我国对微电网技术研究给予了极大的重视与支持，如提出了“973”计划、重点研发计划、加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划等，以鼓励各高校、企业和科研院所展开微电网技术研究。高校作为人才培养高地，在相关专业人才培养方面需要与时俱进，将微电网研究的需求加入高校课程教学，全面提升学生动手实践、创新设计的能力。但是微电网控制设备具有电压等级高、电流大、电器设备种类繁多等问题，使得实验资源变得十分有限，微电网实验难以在课程内得到普及，影响了高校对微电网的教学与研究。基于安全、可操作性等多方面的考虑，高校实验室通常选择通过建立微电网虚拟仿真实验平台来进行实验教学。这种方式虽然可以提供大量完整的可操作平台，但是学生无法通过虚拟仿真实验平台的实践操作体验真实的交互过程，难以获得微电网运行的实际经验。同时，要想熟练地进行实验，需要大量的时间成本和学习积累，降低了实验教学的效率。近年来，已有大量关于微电网系统仿真和实验平台建设的研究。文献 [4] 构建了新能源微电网综合实验平台，可以用于进行多种验证性实验和控制策略设计实验。文献 [5] 基于数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 单元设计了微电网泛能控制实验平台，能够针对微电网内部各种新能源发电模块和储能模块进行相应的控制实验。文献 [6] 利用 LabVIEW 搭建了直流微网电能调度与监控系统，可进行风光互

补、风光储互补、多储能互补等实验。以上这些方案虽然在一定程度上满足了微电网实践教学的需求，但其构建的微电网实验平台或控制电路结构固定，无法满足学生独立设计电路的需要，或代码编写困难，不利于学生短时间内了解多种经典控制方法的特性。

本文设计了一个基于 dSPACE 的微电网教学实验平台，该平台的装置结构清晰，微电网主电路拓扑结构灵活可变。每个学生不仅能够独立进行微电网运行方式测试、控制策略设计等实验，而且可以对实验装置进行二次开发，有效提高了实验教学中学生的参与度和课程教学的效果。同时，本平台选择采用 MATLAB/Simulink 进行编程，简化了编程过程，相较于 DSP 对专业知识和软硬件结合能力要求较高的情况，MATLAB/Simulink 的模块化编程不仅能降低了解和验证多种算法的难度，而且支持学生设计更复杂、先进的算法。

1 微电网教学实验平台设计

1.1 微电网主电路结构设计

平台所搭建的微电网主电路拓扑结构如图 2 所示。变流器在 SPWM 波驱动下运行三相全桥逆变电路，将由光伏发电系统或储能电池发出的电流进行 DC-AC 转换；输出的交流电经 LC 滤波器滤波后得到正弦波交流电，此时，电能既可以直接向线性负载和非线性负载供电，也可以回馈至公共电网，提高微电网的适应性。装置利用信号采集器实现电压、电流瞬时采集的实时采样功能，之后将采样信号反馈至 dSPACE 控制器，形成闭环系统，实现系统状态监控、显示和处理。

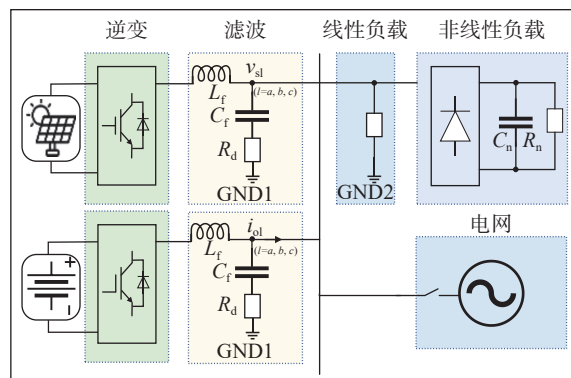


图 2 微电网主电路拓扑图

1.2 微电网控制算法设计

本平台能够对微电网多种先进控制算法快速

验证、设计。基于 dSPACE 的微电网控制算法设计流程如图 3 所示。

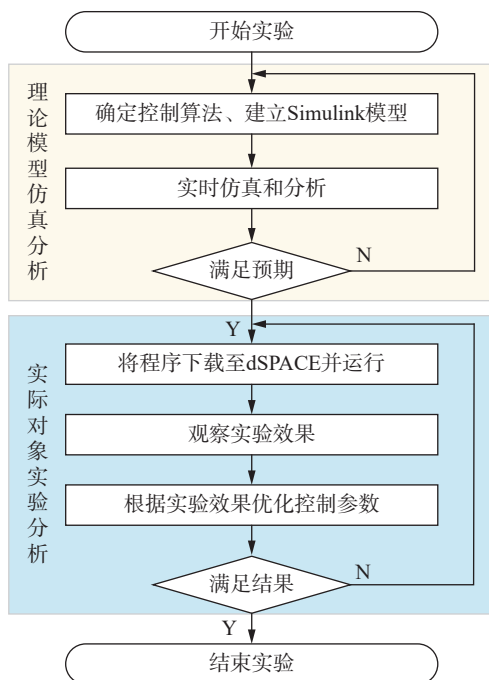


图 3 微电网控制算法设计流程图

dSPACE 控制的具体流程是: 根据实验内容确定控制算法, 建立控制对象的 Simulink 模型, dSPACE 先通过 MATLAB 对初步控制系统进行设计与优化, 利用 Simulink 实现实时仿真与分析; 当仿真结果满足预期, 则根据实际要求优化模

型, 继而初始化端口, 通过 Simulink 代码自动生成技术快速将控制算法生成控制代码, dSPACE ControlDesk 软件将生成的.sdf 文件下载至 dSPACE 控制器中并实时运行; 最后根据对实际控制对象的实验效果来优化控制参数, 直至满足结果, 结束实验。dSPACE 的应用不仅为硬件调试带来了极大的便利, 而且能够快速验证变流器控制算法在实际控制中的性能, 提高控制算法在微电网实验系统中应用的效率。

1.3 实验平台软、硬件设计

基于 dSPACE 的微电网教学实验平台软硬件设计如图 4 所示, 分为变流器主电路设计部分和变流器控制系统设计部分^[7]。

变流器主电路由直流电源、变流器、LC 滤波器、负载柜组成。在变流器主电路设计中, 可以使用 Altium Designer 进行电路设计和 PCB 板的绘制。变流器控制系统主要由电压、电流采样电路, dSPACE 控制器和 SPWM 驱动电路组成, 与控制系统相关的软件有 MATLAB/Simulink 和 dSPACE ControlDesk 软件。主电路结构灵活, 可以自主设计、自由组合, 其所采用的模块化设计具有降低维修成本、缩短学习时间、提高设计灵活性等优点。变流器控制系统不仅可以实现复杂算法, 还可以快速验证控制算法。

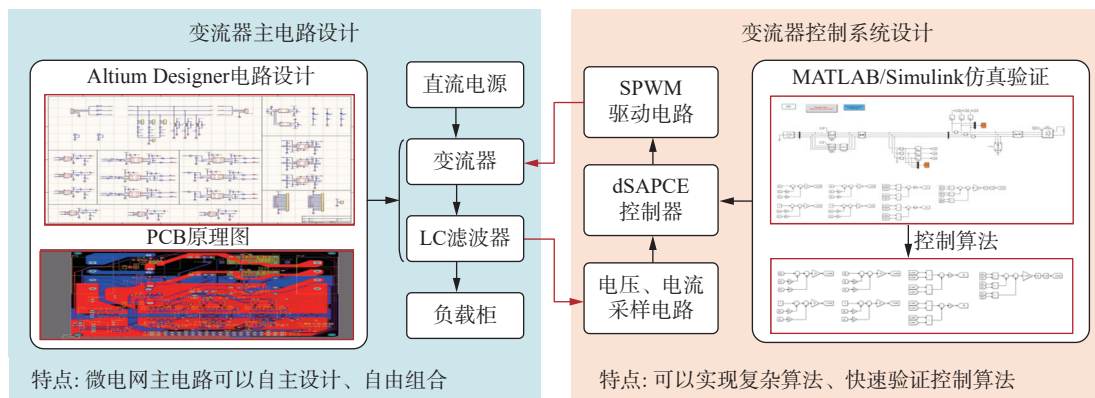


图 4 微电网实验平台软硬件设计图

1.3.1 硬件设计

变流器的组成包括 SPWM 调制电路和三相全桥逆变电路。该模块负责模拟量输入输出这类快速信号的处理, 降低了 dSPACE 控制器的运算负担, 提高控制器的运算速率; 三相全桥逆变电路则在 SPWM 波驱动下, 实现直流电到交流电的转

换。在 SPWM 驱动电路的设计中, 我们采用了英飞凌公司的 IR2110 芯片, 并使用自举电路对上管进行驱动。

在自主设计的负载柜中, 通过三相电阻模拟线性负载, 通过整流器以及电阻、电感、电容组合来模拟非线性负载。学生可通过实验模拟微电

网的两种不同工况，并直接观察系统运行特性，获得相应的运行数据和实际操作经验，提高对微电网系统的全面了解。

主电路中采用的智能直流电源模块能够模拟分布式电源和储能电池。电源辅助模块负责对驱动电路、控制电路等的芯片进行供电，该模块输入 5 V 电压，同时提供隔离 5 V 供电，总功率为 3 W，具有较高的效率。此外，它还具有直流侧的电源输入和输出接口属性，为其他各个模块的供电提供了便利。

1.3.2 控制算法设计

在 dSPACE 控制器运行控制算法之前，需要对主电路的瞬时电压、电流进行采样。电流测量使用的元器件主要是霍尔电流传感器和电流检测电阻，其中霍尔电流传感器采用电路简单，方便电流的测量；而电流检测电阻配 AMC1200 隔离放大器可测量较小的电流，具有准确度较高和温漂较低的优点。为了测量电压，我们主要是选用 AMC1200 隔离放大器来构成隔离式电压测量电路。

在进行软件设计前，可以使用 Simulink 进行算法的实时仿真和硬件在环实验。首先，在 Simulink 中搭建仿真模型，并调节控制参数，然后使用 dSPACE 快速验证算法。本实验平台使用的是 dSPACE1103 控制器与 MATLAB R2020a 版本配合进行实验与设计，dSPACE1103 能够兼容 MATLAB R2013a 及以上的版本。该控制器不仅可以结合 MATLAB 设计控制方案，进行模型的分析、设计、优化和数据的离线处理，还可配合

Simulink 进行基于方框图的控制系统离线仿真，这大大方便了算法的快速验证、设计以及系统的仿真。同时，还可以利用 Simulink 的代码自动生成技术，将算法快速转换为代码，简化了算法编程过程，快速验证算法的正确性和性能。

2 基于本平台的实验案例

所搭建的微电网实验平台主要参数如表 1 所示，外观及其拓扑如图 5 所示。本实验平台所采用的逆变器为两电平三相全桥式逆变电路，相较于三电平或多电平逆变电路，三相全桥逆变电路的输出结构简单，所用的开关器件较少，动态相应快，减少了电路设计、搭建和维护成本；在相同的直流母线电压和输出功率下，两电平逆变电路的开关器件承受的电压应力较高，因此可以选用电压等级较低、电流等级较高的开关器件，从而在一定程度上提高了功率密度。

表 1 微电网实验平台主要参数

参数	数值
最大输出功率(P_{max})	100 W
最大输出电流(I_{max})	5 A
直流输入电压(U_{dc})	70 V
开关频率(f_{sw})	5~150 kHz
输出滤波电感(L_f)	5 mH
输出滤波电容(C_f)	10 μ F
阻尼电阻(R_d)	1.01 Ω
网测电感(L_g)	0.5 mH
网侧电阻(R_g)	0.01 Ω
电网频率(f_g)	50 Hz

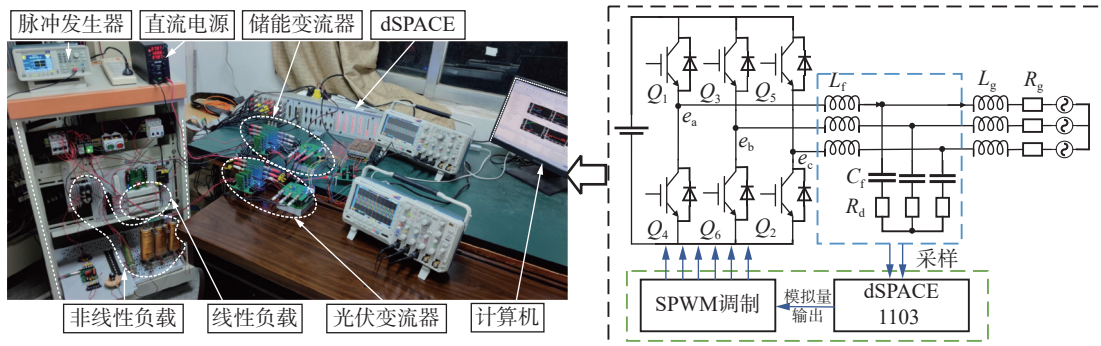


图 5 微电网实验平台外观及其拓扑

2.1 微电网谐波治理策略验证实验

在基于恒定电压和频率控制的孤岛微电网中，非线性负载很容易引起电压谐波，这将降低

孤岛微电网的功率质量^[8]。因此，本实验案例利用微电网综合治理储能装置作为教学实验平台，结合 MATLAB/Simulink 软件，验证一种抑制宽带谐

波的电池储能系统内部电压稳健控制方法对谐波治理的有效性^[9]。

在实验中, 我们将微电网电压水平等量地降低了 20 倍, LC 滤波器参数保持不变。控制算法采用 dSPACE1103 实现, 并设置采样周期为 $T_s=5e-5s$, 控制器参数与理论相同。此外, 实验中使用了强非线性负载 $R_n=40\ \Omega$, 实验结果如图 6 和图 7 所示。图 6 中显示了在突然增加强非线性负载的情况下, 改善恒压频控制之前的实验波形。可以观察到, 当非线性负载连接时, 并网点 (point of

common coupling, PCC) 电压发生畸变, 随着非线性程度的增强, 畸变程度更加显著。通过 V/F 控制改进后的实验波形, 如图 7 所示。相比之下, 强非线性负载引起的总谐波畸变率 (total harmonic distortion rate, THD) 从 6.03% 下降到 3.63%, 整体的谐波失真程度显著降低, 电流和电压的畸变情况得到改善。这表明采用抑制宽频带谐波的控制方法, 可以实现岛状微电网在负载扰动下的电压稳定控制, 有效提高了电能质量。因此, 该实验平台对于控制算法的实现与验证具有有效性和可靠性。

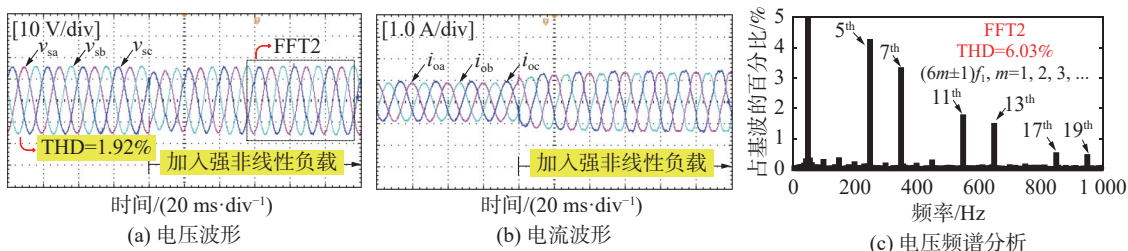


图 6 优化前 V/F 控制型微电网实验波形及电压频谱分析图

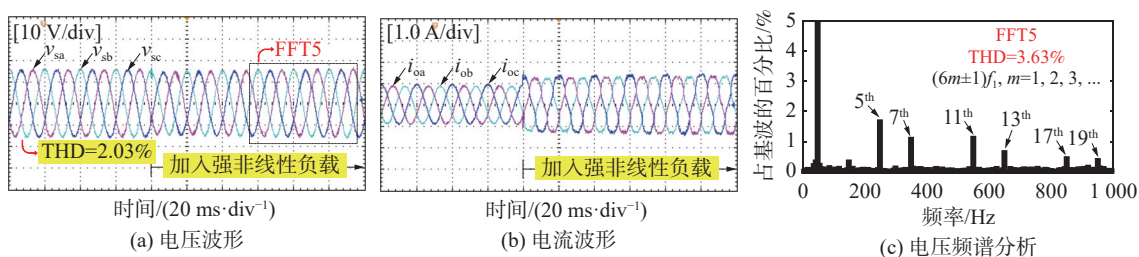


图 7 优化后 V/F 控制型微电网实验波形及电压频谱分析图

3 微电网实验平台教学目标

3.1 平台教学目标

本文所设计的微电网实验平台教学目标架构图如图 8 所示, 融合了多门本科教学课程, 将理论与实践结合, 包含了多维度多层次的实践教学内容, 实现对学生多方面的能力培养^[10]。

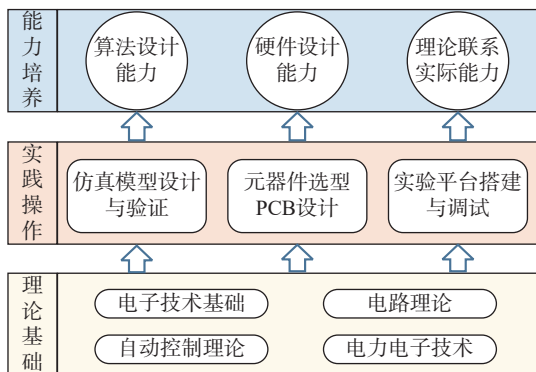


图 8 微电网实验平台教学目标架构图

1) 理论与实践结合

平台基于电力电子技术、自动控制理论、电路理论等教学课程, 设计了面向本科生的微电网实验平台, 通过学生在平台上设计与验证仿真模型, 进行元器件选型、PCB 设计以及搭建并调试实验平台等, 力求在实验教学中培养学生理论联系实际、掌握科学方法的能力^[11]。

2) 综合能力培养

本平台充分考虑本科生的能力水平, 所使用的装置模块综合性强、灵活性高, 能够提供验证性、创新型、综合型的实验内容, 综合培养学生的算法设计能力、硬件设计能力和理论联系实际能力。

3) 应用前景

本平台适用于电气工程及其自动化专业和自动化专业的微电网实验教学, 为学生快速掌握理

论知识、锻炼动手和创新能力、了解微电网运行特性提供实践基地^[12]。

3.2 平台教学效果

微电网教学实验平台在教学过程中获得了显著的效果,主要表现在 MATLAB 编程的简易性使得学生能够以高效的方式快速完成各类控制算法的验证与设计流程,不仅有效节约了大量的时间成本,还让学生得以从繁复的基础编程学习中解脱出来,将更多精力聚焦于算法设计本身,实现学习效益的最大化提升;其次是在知识系统性方面,本平台所开展的实验与理论课程相关联,从基础的理论知识到实际的系统设计,层层递进,符合教学规律,有效促进了学生多方面能力的提升^[13]。

4 结束语

本文搭建了基于 dSPACE 的微电网教学实验平台,详细介绍了微电网的主电路结构、控制算法和软、硬件的设计方案,并介绍了可开展的实验实例和实验平台的教学目标。该平台基于 MATLAB/Simulink 以及 Altium Designer 完成了大部分的建模、仿真和设计工作;运用硬件模块快速构建微电网,主要包括储能变流器、光伏变流器、负载 3 部分。本文所构建的实验平台利用 dSPACE 控制器实现多种复杂算法的设计与验证,克服了传统微电网实验装置硬件搭建不灵活、编程要求高等问题,对智能电网和微电网理论课程的实验教学具有重要意义。

参考文献

- [1] 潘挺. 微电网典型特征及关键技术探讨[J]. 电子元件与信息技术, 2022, 6(10): 187-190.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 魏楠楠. 分布式储能与微网实验系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [4] 宋关羽, 王智颖, 李鹏, 等. 新能源微电网综合实验平台及教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(1): 112-116.
- [5] 张建良, 吴越, 齐冬莲, 等. 基于 DSP 的微电网泛能控制实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(2): 83-86.
- [6] 李崎勇, 胡恒, 王纪港, 等. 基于 LabVIEW 的多端口直流微电网实验平台[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 116-119.
- [7] 陆玲霞, 万克厅, 于森, 等. 直流微电网信息物理系统实时仿真实验平台[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(7): 100-105.
- [8] LI G, TANG G, LIU X. An internal voltage robust control of battery energy storage system for suppressing wideband harmonics in VF control-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2320-2330.
- [9] YAZDAVAR A H, AZZOUZ M A, EI-SAADANY E F. A novel decentralized control scheme for enhanced nonlinear load sharing and power quality in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions, 2019, 10(1): 29-39.
- [10] 毕大强, 郭瑞光, 陈洪涛. 电力电子与电力传动 DSP-HIL 教学实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(1): 226-229.
- [11] 任君玉. 基于 Multisim 的模拟电子技术实验教学改革[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(3): 57-63.
- [12] 张国澎, 贾赞, 田世克, 等. 多端口直流微电网实验平台设计[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3): 1-5.
- [13] 吴葛, 邓春花, 冯学玲. 电气工程实践基础课程一体化改革与实践[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(6): 115-119.

编辑 钟晓