

基于四象限变流器组的新型供电台区试验技术

李超¹, 郝正航¹, 曹雪娇²

¹贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

²云南电网有限公司大理供电局, 云南 大理

收稿日期: 2023年9月12日; 录用日期: 2023年11月6日; 发布日期: 2023年11月14日

摘要

新型台区是指未来低压配电网中含有较多分布式光伏、储能、充电桩等元素, 且支持柔性互联的交直流新型供电架构。为满足未来新型台区的工程化设计、研制和集成, 本文基于四象限变流器设计了高效率新型台区实验平台, 该平台可以根据负荷密度、负荷性质、能源禀赋的不同来构建不同的供用电拓扑结构, 可模拟新型台区的负荷互济、故障转供、容灾备份、直流配电、绿电接入等优势。结合UREP实时仿真机形成闭环控制实验平台, 该实验平台可作为企业研发工具, 也可作为培养学生创新实践能力的实验平台。

关键词

新型台区, 四象限变流器, UREP, 实时仿真

Test and Verification Technology of New Power Supply Station Area Based on Four Quadrant Converters

Chao Li¹, Zhenghang Hao¹, Xuejiao Cao²

¹College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Dali Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Dali Yunnan

Received: Sep. 12th, 2023; accepted: Nov. 6th, 2023; published: Nov. 14th, 2023

Abstract

The new platform area refers to the new AC/DC power supply architecture that contains more distributed photovoltaic, energy storage, charging piles and other elements in the future low-voltage

distribution network, and supports flexible interconnection. In order to meet the engineering design, development and integration of the new platform in the future, this paper designs a high-efficiency experimental platform for the new platform based on the four-quadrant converter, which can construct different power supply topologies according to different load density, load properties and energy endowments. It can simulate the advantages of load sharing, fault switching, disaster recovery backup, DC power distribution, and green power access of the new platform area. Combined with UREP real-time simulator, a closed-loop control experimental platform is formed, which can be used as a research and development tool for enterprises and an experimental platform for cultivating students' innovative practical ability.

Keywords

New Platform Area, Four Quadrant Converter, UREP, Real Time Simulation Format

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

供电台区是新型电力系统中的基本单元，是保障新型电力“落得下”和“用得上”的关键环节[1]。为统筹好新型电力系统中“源随荷动”的电力高效利用关系，提出了新型台区的概念。新型台区可以发挥本地高比例新能源的优势，构建可持续供电、安全供电和经济供电[2] [3]。新型台区本质上属于大规模商用微电网，其设计、研发和系统集成具有较高的技术门槛[4] [5]。与传统低压配电网不同，新型台区无法给出具有普适性的典型设计和固定模式，基本属于定制化的供用电方案[6] [7] [8] [9]。而定制化设计则要求有高效率的工具和平台才能胜任，新型台区包含较多电力电子设备和复杂的控制系统，通常情况定制难度很高。因此，为满足未来新型台区的工程化设计、研制和集成，急需研制一种高效率的开发工具和试验平台，为快速制定新型台区的设计、调试和集成方案提供工具化平台。

文献[10]基于 LabVIEW 设计了多端口直流微电网实验平台，该实验平台可以完成风光互补、直流微电网保护等实验，但可扩展性和通用性较差；文献[11]结合 RT-LAB 和 OPNET 仿真套件设计了新型直流微电网信息物理系统的实时仿真平台，但主要侧重于人机交互界面；文献[12]搭建了模块化的低压微电网实验平台，但其电压等级只有 36 V，而且没有集成的多组变流器；文献[13]基于 DSP 设计了可控微电网实验平台，其主要设计模块包括了底层电路和上位机控制等，但是通用性差，没有多组集成的变流器；文献[14]搭建了光伏并网的数字物理混合仿真实验平台，但该实验平台仅适用于光伏并网；文献[15]基于 RT-LAB 实时仿真机搭建了微电网硬件在环实验平台，主要侧重于数字侧验证，并未在实验中加入实际光伏板、蓄电池等底层硬件电路进行验证；文献[16] [17]基于 RT-LAB 或者 RTDS 实时仿真机，提出了微电网实时仿真平台，利用图形化数字模型代替实际变流器，但实际变流器与数学模型之间不可能完全等同；

本文基于四象限变流器组以及结合通用型实时仿真机(UREP)设计了新型台区实验平台，该平台属于集成的紧凑型实验平台，控制机箱可以同时控制 9 组四象限变流器工作，每组变流器可以实现新型台区内的一种元素的硬件在环实验。可以实现复杂台区的动态运行，控制与调度，能有效解决新型台区内多元素联合仿真系统复杂导致无法实现多元素实时仿真的问题。

2. 新型台区拓扑特点

新型台区除了用户负荷外还含有较多分布式光伏、储能、充电桩等元素，如图 1 所示是一种新型台区典型示例，整个新型台区包含了四组四象限变流器，每台变压器带不同类型和大小的负荷，台区间通过直流母线相连。新型台区之所以称之为“新型”，是因为各个台区间通过电力电子设备密切联系，实现各台区之间的负荷互济，故障转供及分布式电源接入等功能，是传统供电网无法胜任的。

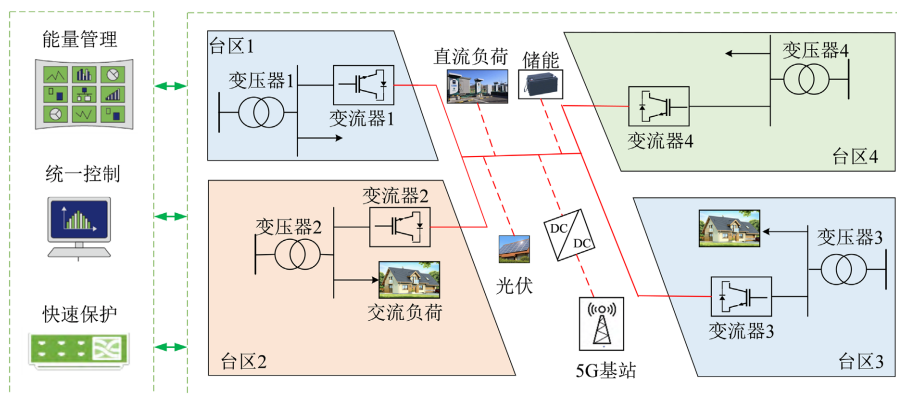


Figure 1. An example of a new type of platform

图 1. 一种新型台区示例

因此，搭建的实验平台就需要集成一个多变流器系统，而且变流器之间既实现单独带交、直流负载稳定运行，也要能够实现变流器间有功功率传输。更重要的是新型台区没有固定模式，无法给出固定的拓扑结构，这就需要实验平台具有高度灵活性，可以按照具体电网拓给出与之对应的实验方案。

3. 实验平台设计方案

虽然新型台区的形态表现为各种各样，但本质都是基于变流器元件组成的积木式系统，其底层技术仍然具有较大的共性，这使研制开发支撑工具和试验平台成为可能。基于四象限变流器组，通过不同组态可以构建各式各样的供用电拓扑，实现方案如图 2 所示。

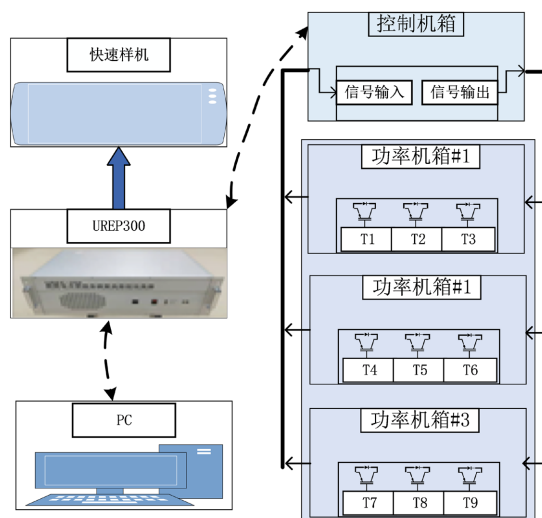


Figure 2. Hardware topology of the experiment platform

图 2. 实验平台硬件拓扑

整个实验平台包含上位机、通用型实时仿真器(UREP)、控制机箱和三台功率机箱(IPM)。其中 UREP 是数字孪生平台的核心工具,用于在图形化环境下(MATLAB/Simulink)搭建新型台区的实时仿真模型,在全数字模拟的基础上,快速形成复杂变流器系统的控制策略,并直接驱动变流器组运行,简单快捷实现各种新型台区拓扑要求和控制要求。试验成功后,UREP 数字孪生平台可以将验证过的代码直接下载到样机硬件系统,实现快速样机的生成,极大加速新型台区所需的新型设备的研制进程。

3.1. 控制机箱

控制机箱内部包括两大模块,分别是 PWM 控制板和 ADC 采集器。PWM 控制板由 DSP 和 FPGA 的双核控制板组成,由 DSP 接收实时仿真机通过网口发送的数据包,解析后发送给 FPGA 产生 PWM 波形。ADC 采集器同样使用 DSP 和 FPGA 相互配合,不同的是 DSP 在系统中起桥接作用,由 FPGA 控制 8 路 ADC 同步采集,可将模拟量采集到上位机。两块控制板独立工作,互不影响,但是经过功率机箱桥接使得两块控制板之间是闭环系统。

3.2. 功率机箱

每个功率机箱包括 3 组功率电路以及电压电流传感器,完整的一套功率机箱总共 9 组变流器。其中每一组变流器基本原理图如图 3 所示,由四象限功率变流装置组成,直流最高电压可达 1200 V,最大电流为 50 A。直流侧电容值为 1000 μF ,滤波电感值为 3 mH,滤波电容值为 4.7 μF 。

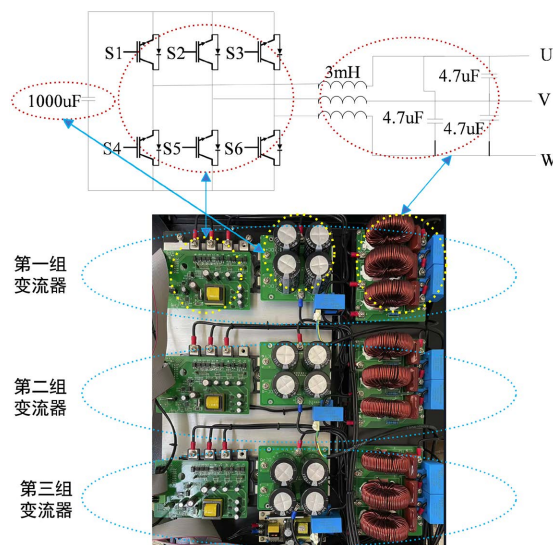


Figure 3. Basic schematic diagram of the power chassis

图 3. 功率机箱基本原理图

4. 实验平台多功能目标实现原理

4.1. 柔性互联原理

在配电网中,柔性互联装置也称为智能软开关(SOP),在配电网中通常安装在联络线上。如图 4 所示,在节点 i 和节点 j 之间安装了背靠背变流器,依靠直流母线进行功率传输。

其中,示意图和实物图相互对应,柔性互联装置由背靠背变流器组成,在变流器控制层上,两组变流器可以在 U_{dc_Q} 控制策略[18]、 P_Q 控制策略[19]和 V/f 控制策略[20]等控制策略下进行无缝切换。直流稳压电容采用外部互联的方式进行,可在任意变流器组之间柔性互联,也可以多端口之间进行柔性

互联。功率机箱里安装了高精度电压互感器(PT)和电流互感器(CT)，可实时采集网侧电压电流、变流器输出侧电压电流和直流侧电压电流。变流器接受来自控制机箱 SPWM 控制脉冲形成闭环系统，从而实现整个柔性互联系统的稳定控制。

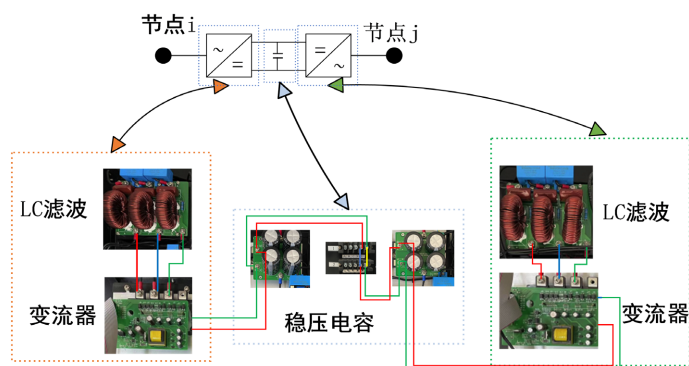


Figure 4. Schematic diagram of flexible interconnection
图 4. 柔性互联原理图

4.2. 分布式电源接入原理

新型配电网包含高比例新能源，图 5 为 DG 接入配电网原理图，光伏板经过 Boost 升压电路后由并网逆变器并入 380 V 的真实电网，单相光伏并网控制策略[21]由上位机编译到仿真机进行实时控制，接入真实光伏板后通过最大功率追踪控制策略可以在该实验平台上实现光伏并网稳定运行。与此同时，该实验平台也可以模拟光伏孤岛带负载运行实验，切换相应的控制策略后改变变流器输出连接点即可。

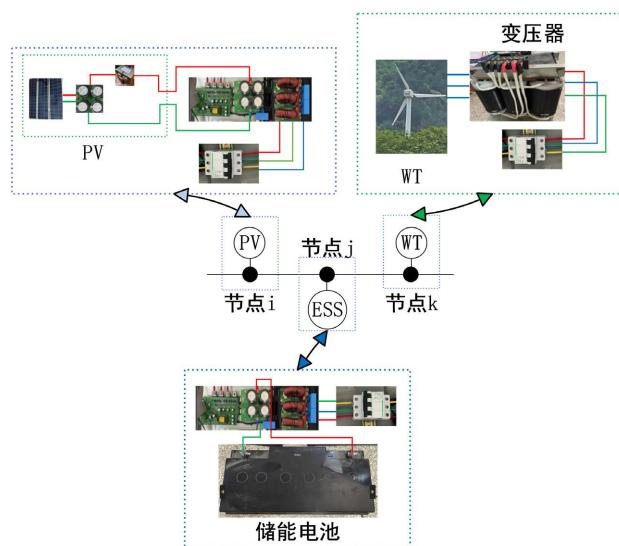


Figure 5. Schematic diagram of DG access
图 5. DG 接入原理图

在风电场仿真实验中，采用混合仿真[22]是较为准确有效的方式之一。将风机等效为三相交流源并网，通过上位机模拟控制风速，该实验平台在混合仿真方面表现优异。

储能电池经过 DC/AC 后并网运行，也可以在相同电压等级下接入直流母线。新型配电网包含光伏、

风机和储能电池，在模拟风光储协同出力是可根据风光储系统中 BESS 的平滑控制策略[23]实现风、光、储联合实时仿真。

4.3. 拓扑多样化定制原理

如图 6 所示，各变流器交直流引出线统一接到拓扑转接面板上。在转接面板上可以通过外接线的方式实现两变流器间或者多变流器间的“交-交”、“直-直”互联。交流侧互联可模拟供电台区辐射状供电架构，直流侧互联可以模拟供电台区柔性互联。因此，不管是供电台区还是供电台区内均可实现定制仿真，真正实现有拓扑就有相应仿真平台。

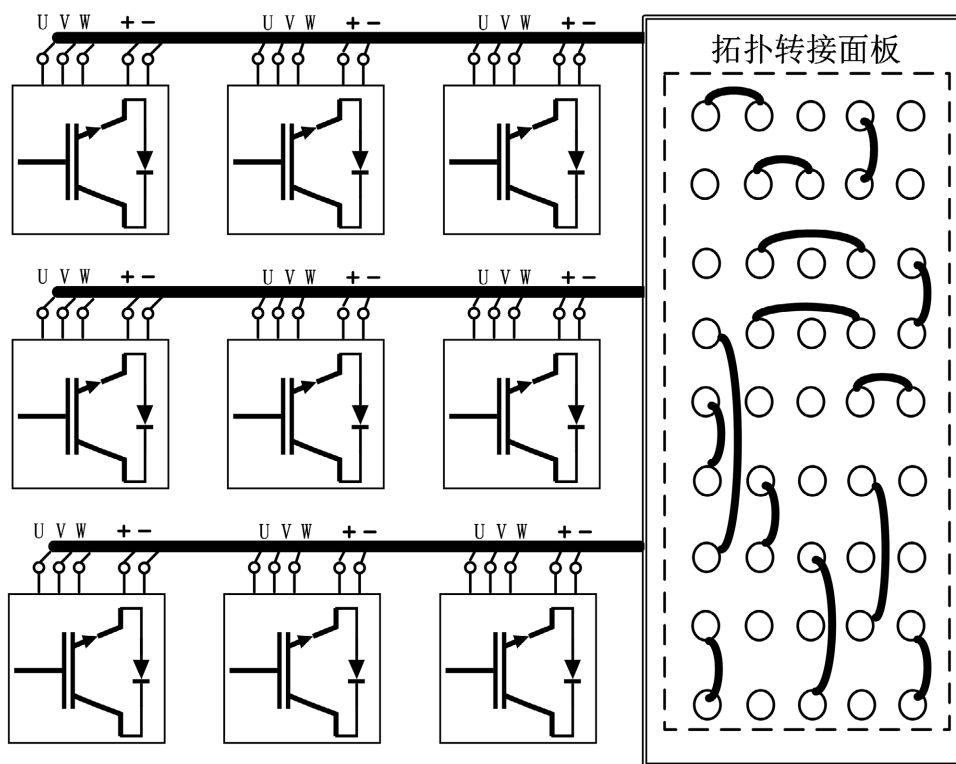


Figure 6. Topology customization principle

图 6. 拓扑可定制原理

新型配电台区从台区内部拓扑结构形态来看可以分为三种：交流型、交直流柔性混合型和交直流柔性集成型。从台区间互联方式来看可以分为三种：集中式互联型、链式互联型和环网互联型[24]。要实现新型配电台区的仿真验证就必须包含一定数量变流器并且能够对所有的变流器进行正确有效的控制，本文所设计的仿真实验平台便可以轻松胜任。

5. 实验平台功能示例

搭建如图 7 所示的 4 节点互联新型台区仿真模型，四个变流器的控制策略通过 MATLAB/Simulink 编译到 UREP 实时仿真机，UREP 实时仿真机将 PWM 脉冲发送到控制机箱，控制机箱最终以 ± 5 V 模拟量发送到变流器上对其进行控制，除此之外其余硬件均为实物。本文通过模拟新型台区负荷互济、故障转供和光伏接入三种工况来验证新型台区实验平台的正确性。为更好的模拟真实电网，本文中根据不同的工况设置不同的负荷大小，硬件主要参数如表 1 所示：

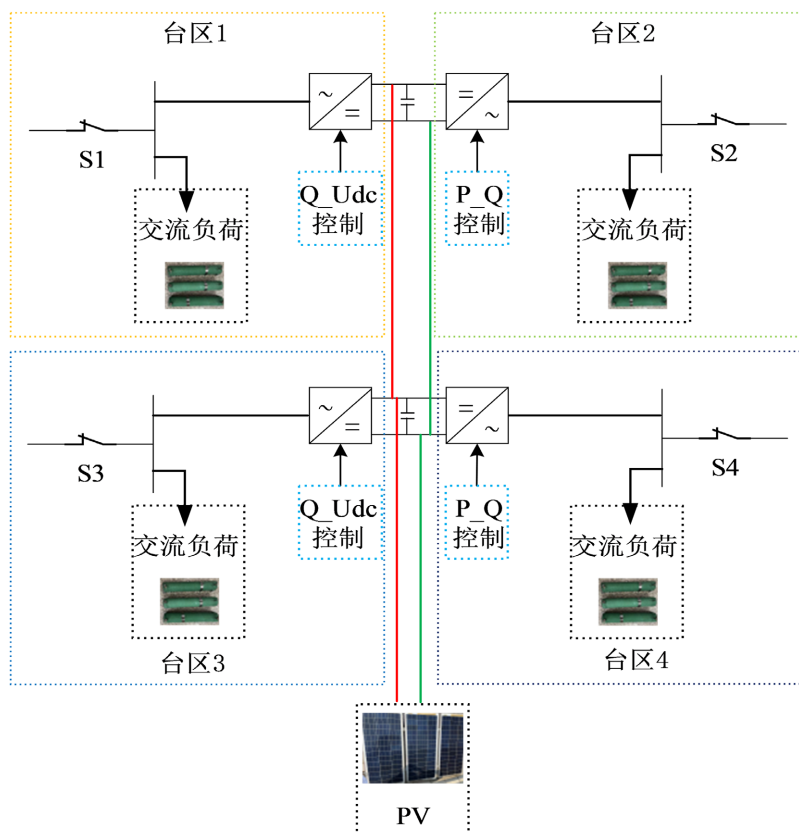


Figure 7. Experimental example diagram
图 7. 实验示例图

Table 1. Main circuit parameters
表 1. 主电路参数

参数名称	参数值
电网电压	410 V
变压器	5 kVA、380 V/150V
直流侧电容	1000 uF
直流电压	350 V
滤波电感	3000 uH
滤波电容	4.7 uF
负荷视在功率	<5000 VA
光伏板功率	3000 W
变流器容量	20 KVA

5.1. 负荷互济

本文以台区 2 和台区 4 出现重载，台区 1 和台区 3 轻载来完成负荷互济工况的模拟。轻载台区的变

流器工作在 Q_Udc 模式，一方面为本台区提供无功补偿，另一方面为其他台区提供有功。重载台区的变流器工作在 P_Q 模式，将来自其他台区的直流功率逆变后补给本台区，从而达到“互济”的效果。四台区稳定启动后直流电压和交流电压波形如图 8 所示：

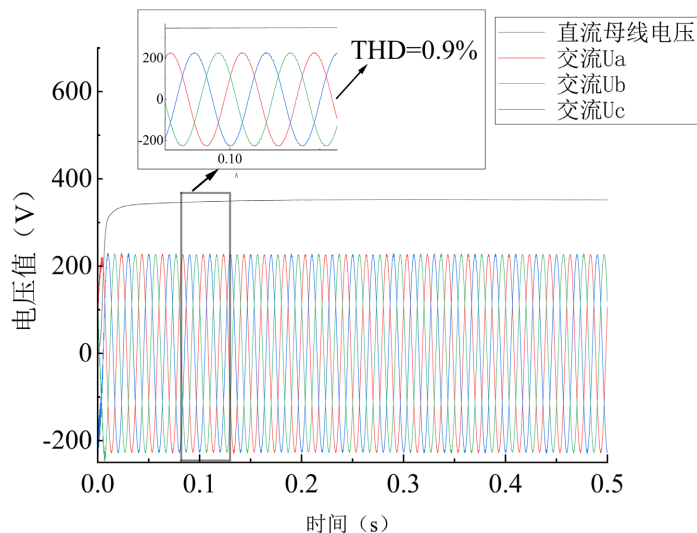


Figure 8. AC side voltage and DC side voltage waveform
图 8. 交流侧电压和直流侧电压波形

设定台区 2 和台区 4 轻载，台区 1 和台区 3 重载，有功分别缺额 3000 VA 和 5000 VA。各节点变流器有功功率和无功功率传输大小如图 9 所示：由图中可看出，台区 2 和台区 4 的变流器共同承担负荷互济的任务。台区 1 和台区 3 按照本各自台区负荷需求发出有功功率和无功功率。

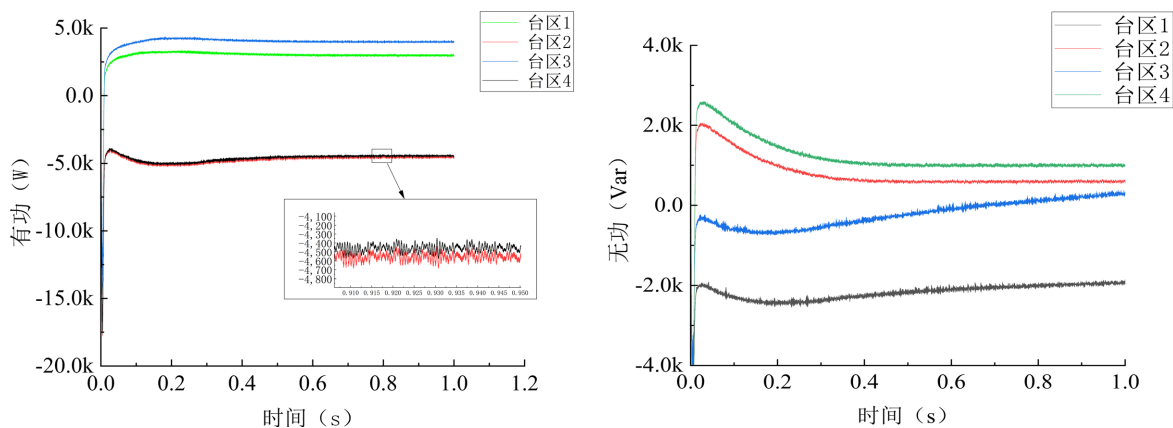


Figure 9. Power transmission of converter under alternating load condition
图 9. 负荷互济工况变流器功率传输

流过各节点变流器的电流波形如图 10 所示：通过功率分析仪测得在负荷互济工况下电流波形畸变率均在 3% 以下。

5.2. 故障转供

本文以台区 2 故障为例，负荷功率为 3000 VA，故障时该节点电网不提供功率，负荷功率均由变流

器吸收其他节点剩余的功率为其供电。设定台区1轻载,台区3和4几乎没有剩余功率,所以台区2故障后基本由台区1供电。各节点变流器出力情况如图11所示。

流过各节点变流器的电流如图12所示:通过功率分析仪测得在故障转供工况下电流波形的畸变率有所上升,但远小于5%,能保证供电质量。

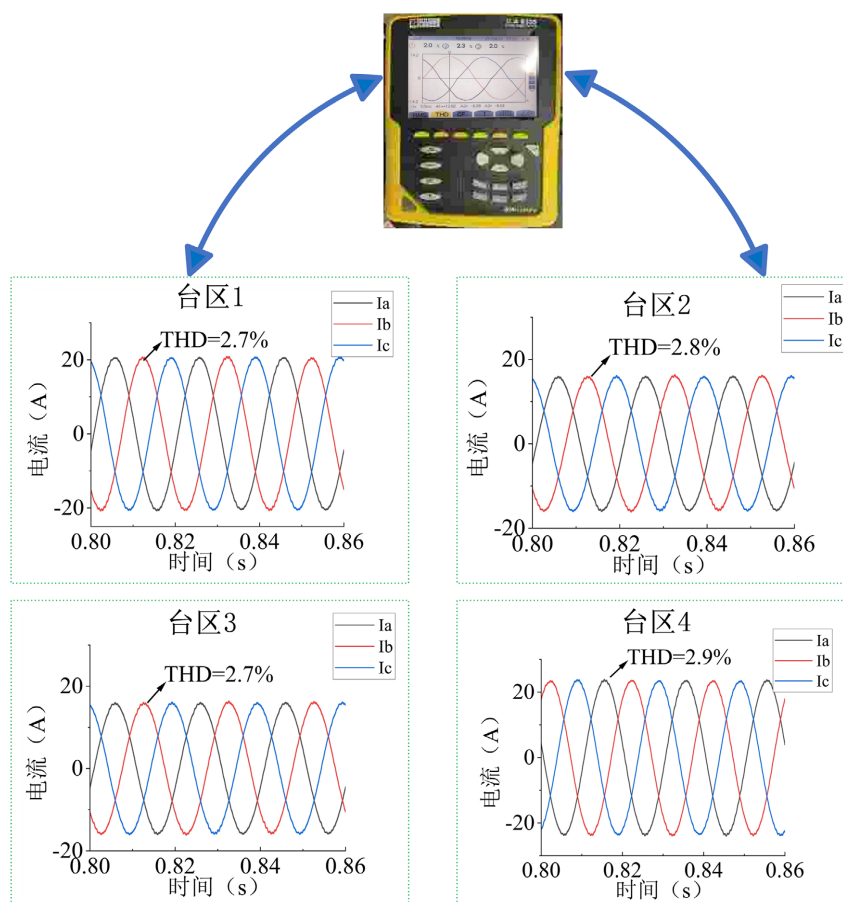


Figure 10. Current waveform under load exchange condition

图 10. 负荷互济工况电流波形

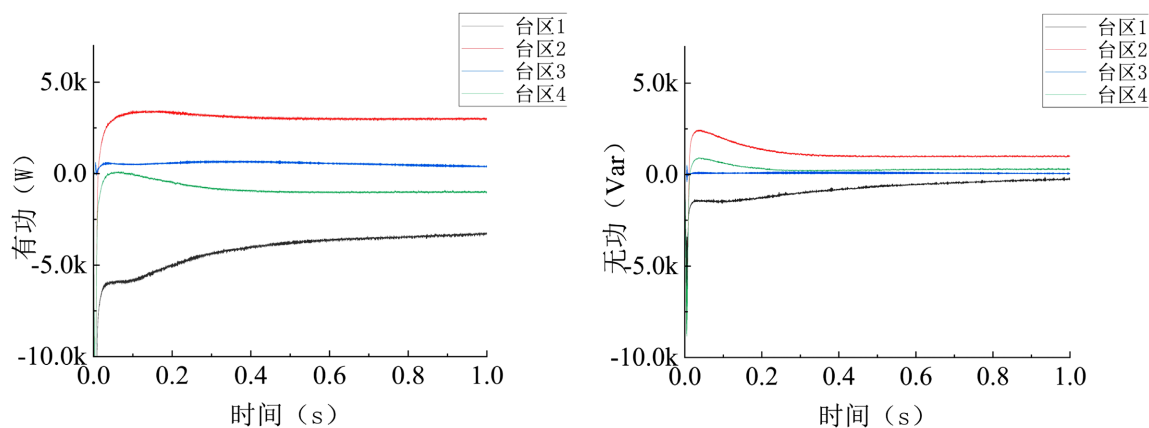


Figure 11. Converter power transmission under fault switching condition

图 11. 故障转供工况下变流器功率传输

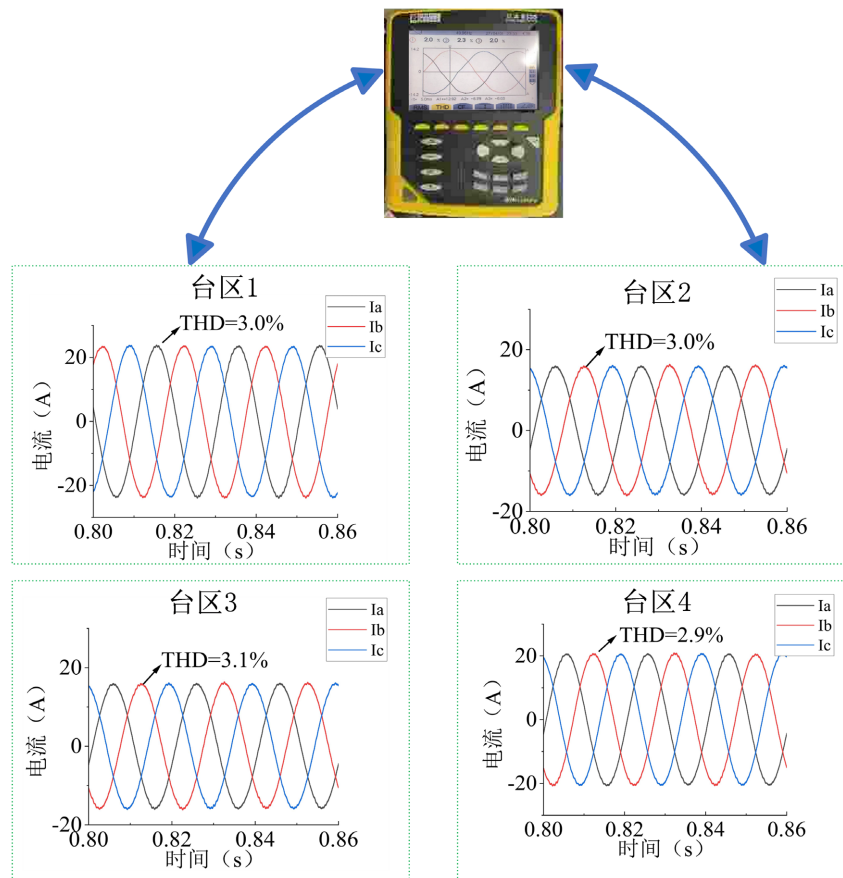


Figure 12. Current waveform under fault switching condition
图 12. 故障转供工况下电流波形

5.3. 光伏接入

考虑到新能源的消纳，本文将容量为 5 kW 的 PV 接入到直流母线上，其中台区 1、台区 2 和台区 4 别消纳有功 1 kW、3 kW 和 2 kW，无功则是按照台区负荷对无功的需求大小进行补偿。将光伏接入后各台区按照负荷需求吸收功率，变流器传输功率如图 13 所示：

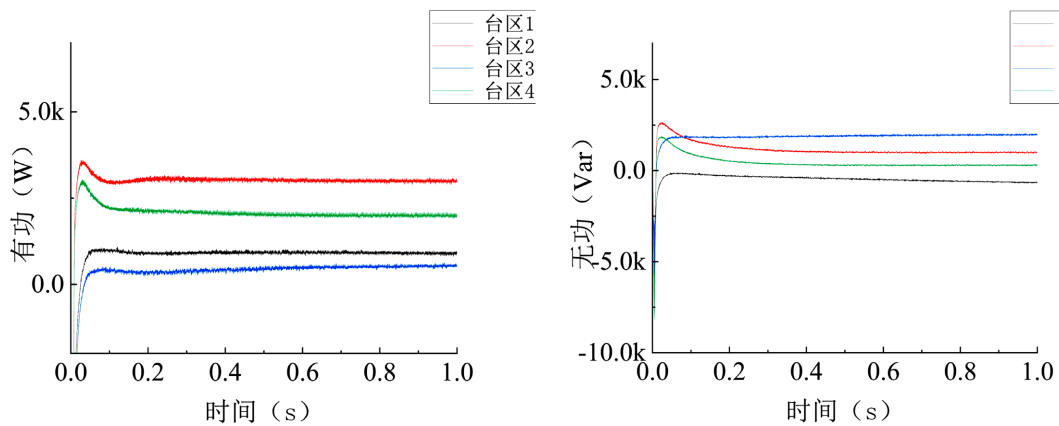


Figure 13. Converter power transmission under photovoltaic connection condition
图 13. 光伏接入工况下变流器功率传输

流过各节点变流器的电流波形如图 14 所示：通过功率分析仪测得光伏接入工况下电流波形畸变率较小，有较好的供电质量。

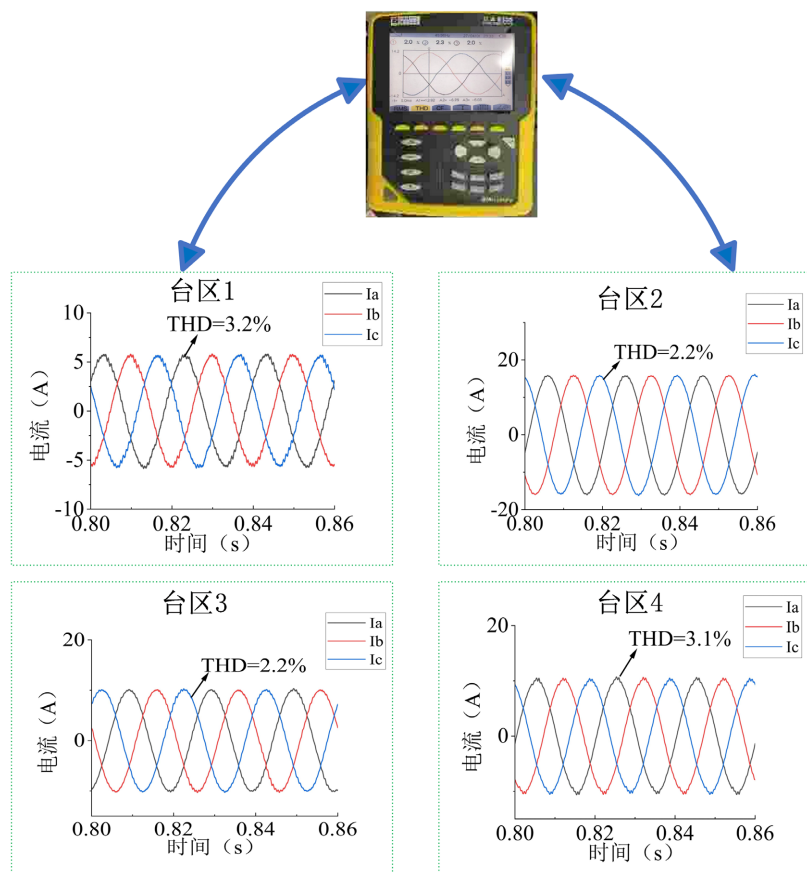


Figure 14. Current waveform under PV connection condition

图 14. 光伏接入工况下电流波形

6. 结论

本文阐明了新型台区的供电架构，并说明了新型台区柔性互联原理和新能源接入方法。最后设计了一个通用型新型台区实验平台，并且结合实际场景搭建 4 节点新型台区模型，通过本文所设计的实验平台对模型进行验证。结果表明：

- 1) 该实验平台与纯离线仿真不同，本文所设计的实验平台采用数字和物理相结合的混合仿真，仿真效果更加贴近实际工况。
- 2) 该实验平台具有较强的通用性和扩展性，非常适用于微电网和新型台区实验仿真。
- 3) 新型台区柔性互联可以实现“闭环控制，闭环运行”，可以实现新能源的就地消纳。

基金项目

第二批国家级新工科研究与实践项目(E-NYDQHGC20202227)。

参考文献

- [1] 段祥骏, 王金丽, 冯德志, 李运硕, 寇凌峰, 王利, 赵晓龙. 配电台区建设与改造智能决策系统设计和实现[J].

- 电网技术, 2017, 41(8): 2709-2715.
- [2] 张旭, 李阳, 刘晓, 韩捷, 李俊林, 林劝立, 张桂凯, 彭伟梁. 含高渗透率新能源的新型交直流储能系统的配电网规划[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 60-67.
- [3] 郑宇, 田兵, 雷金勇, 郭晓斌, 董朝阳, 李鹏. 能源互联网环境下用户侧微电网的形态及优化运行[J]. 南方电网技术, 2016, 10(8): 40-47+55.
- [4] 汤毅, 程乐峰, 李正佳, 余涛, 莫芸. 基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 150-158.
- [5] 俞刚, 王辉东, 徐晓影, 杨焕燕, 颜伟, 赵霞. 三相四线制台区电网的状态估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 79-84.
- [6] 高泽, 杨建华, 季宇, 刘海涛, 苏剑. 交直流混合微电网接口变换器双向下垂控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 82-87.
- [7] 刘畅, 袁荣湘, 刘斌, 赵树华, 陈建锋, 彭焱刚, 方永康. 微电网运行与发展研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(5): 43-47.
- [8] 班国邦, 蔡欢, 袁旭峰, 熊岩, 周月宾. 含柔性互联节点的高压配电网优化调控[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 55-62.
- [9] 杨为, 丁明, 毕锐, 高研, 丁银. 微电网实验平台的设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 38-41.
- [10] 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+143.
- [11] 陆玲霞, 万克斤, 于淼, 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.
- [12] 赵仁德, 宣丛丛, 何金奎, 等. 可编程模块化低压交流微电网实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(4): 98-103.
- [13] 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.
- [14] 闫桂杭, 郝正航, 陈卓, 等. 数字-物理混合仿真实验平台研发及应用[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(12): 138-141+145.
- [15] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 146-154.
- [16] Meng, J., Yi, W., Chen, W., et al. (2017) Design and Implementation of Hardware-in-the-Loop Simulation System for Testing Control and Operation of DC Microgrid with Multiple Distributed Generation Units. *IET Generation Transmission & Distribution*, 11, 3065-3072. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1571>
- [17] Wang, H. and Xu, E. (2019) Real-Time Simulation and Close-Loop Testing of Microgrids. 2019 *IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, Xi'an, 21-24 October 2019, 529-532. <https://doi.org/10.1109/APAP47170.2019.9224986>
- [18] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-139.
- [19] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.
- [20] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51+63.
- [21] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
- [22] 胡昱宙. 智能电网数字物理混合仿真系统理论及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [23] 苏强强. 风光储联合并网发电系统中电池储能单元的平滑控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海电机学院, 2015.
- [24] 刘文龙, 吕志鹏, 刘海涛. 电力电子化配电网台区形态发展以及运行控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4899-4922.