



中国光储直柔建筑发展战略路径研究 (二期)

Research on the Strategic Path of PEDF Buildings in China (Phase II)

子课题 4：孤网系统光储直柔系统构建模式与示范研究 Task 4: Construction Mode and Demonstration Research of PEDF for Isolated Network System

国创能源互联网创新中心（广东）有限公司

2023年12月15日

National Energy Internet Innovation Center (Guangdong) Co., LTD

Dec 15, 2023

致谢

本研究由国创能源互联网创新中心(广东)有限公司统筹撰写,由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of National Energy Internet Innovation Center (Guangdong) Co., LTD and is funded by Energy Foundation China.

免责声明

- 若无特别声明,报告中陈述的观点仅代表作者个人意见,不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性,不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时,并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐,或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

执行摘要

1. 孤网系统的光储直柔应用场景分析

- “一带一路”国家无电人口基数大。全球无电人口总数 7.33 亿，占全球总人口的 9.28%；其中“一带一路”国家无电人口累计 5.5 亿，占全球无电人口的 75.03%。在无电人口数量排名前 20 的国家中，有 18 个是“一带一路”国家。主要分布在南亚、东南亚、撒哈拉以南的非洲等经济欠发达地区，如图 1、图 2。

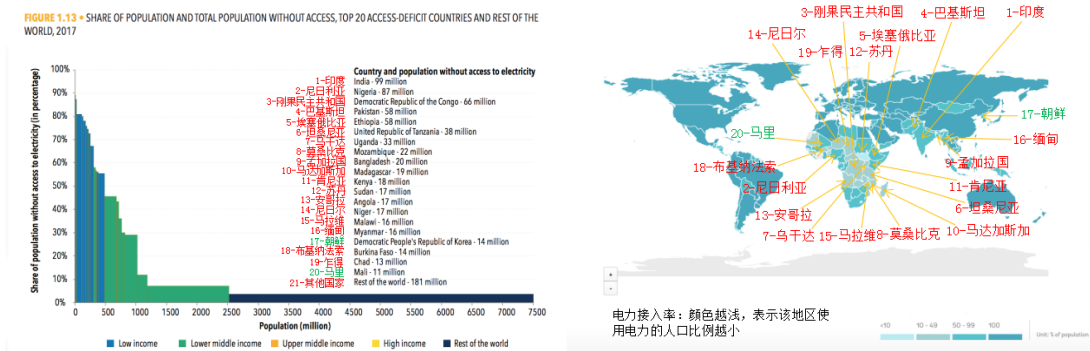


图 1（左） 无电人口数量排名全球前 20 的国家

图 2（右） 2020 年世界不同地区可使用电力的人口比例分布图

- 适合建设光伏发电系统。“一带一路”国家集中分布在热带气候区，如图 3，且太阳资源属于最丰富区，年太阳辐射总量在 1826~2300kWh/m²。其中非洲光伏技术可开发量 1374.8TW，年发电量 2670.2PWh；印度年日照时间为 2300~3000h，太阳光的年辐射量大约为 1600~2200kWh/m²，如图 4，处于最丰富区。光伏投资回收期短，约 2~3 年。

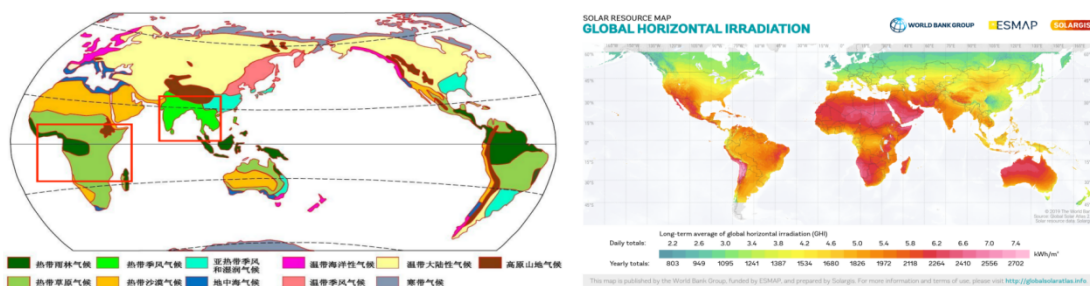


图 3（左） 全球气候分布图

图 4（右） 全球太阳辐射量分布图

- 多依靠化石能源解决用能需求，太阳资源利用率低。非洲地区，天然气、煤炭、石油等能源占据非洲电力供给来源约 80%，占比重，对外依存度高，如图 5。太阳能、风能、地热和现代生物能源发电合计仅占 3.7%，如图 6。印度的能源需求主要由煤炭、石油和生物质能来供应，其占比印度总能源需求的 80%以上。

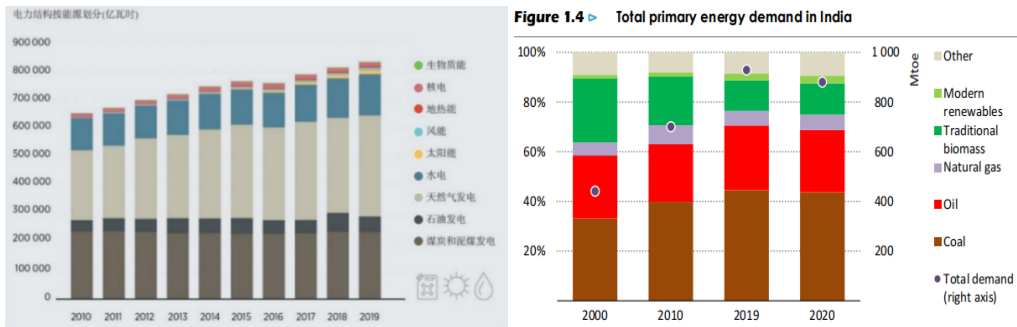


图 5（左） 2010~2019 年非洲电力结构按能源划分

图 6（右） 印度主要能源需求总量

- 用电电器主要以照明、小家电为主。无电网接入农村地区的主要照明工具为煤油灯和太阳能手电筒。埃塞俄比亚地区，主要家电为冰箱、收音机和手机，且收音机、手机电池都是可利用太阳能充电；尼日利亚地区，冰箱、榨汁机、烹饪炊具、冷冻机的拥有率排名前四位，且太阳能风扇、太阳能灯在该地区也具有一定的使用率，如图 7 和图 8。印度地区，电视机在无电地区的采用率是四种家具中最高的，其次为冰箱、空调或空气冷却器以及洗衣机，如图 9。

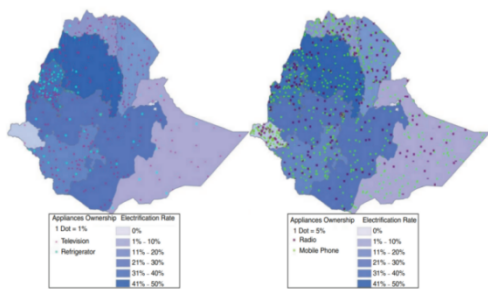


图 7（左） 埃塞俄比亚模型设备所有权的表示以及各州农村电气化率

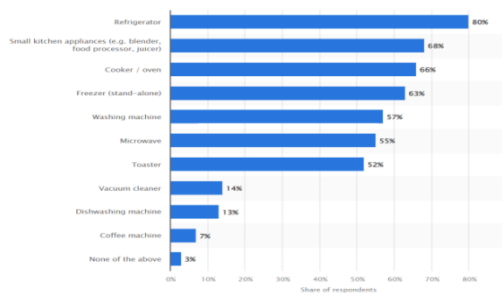


图 8（右） 2022 年尼日利亚家用电器拥有率

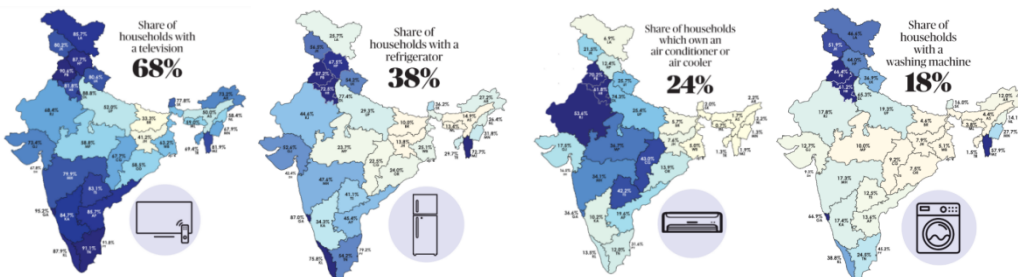


图 9 印度拥有家电人口

2. 孤网系统的研究现状与发展

- **标准建设。**标准建设方面，目前国内外建立了相关微电网的标准，其中涉及部分独立型微电网系统，如表 1、表 2 所示。IEC 在微电网领域已发布的国际标准 IEC TS 62898-1: 2017 ED1、IEC TS 62898-2: 2018 ED1 由中国牵头，同步国内转换为 NB/T 10148-2019、NB/T 10149-2019。尽管微电网技术

前景广阔，由于相关行业标准和规范的缺失，严重滞绊了这一产业的快速健康发展。目前已开展的微电网领域标准化活动主要集中在并网型交流微电网的规划设计、运行、保护、能量管理以及内部负荷调度。用于解决偏远地区供电问题的独立型微电网在全球范围内呈现出快速增长势头，同时直流微电网的应用也在不断增多。因此，未来孤网光储直柔系统相关技术要求和系统及设备功能检测要求将是重点方向，诸如孤网光储直柔系统标准（可规定孤网光储直柔系统供电电能质量、电压调节、信息通信、黑启动等方面应满足的技术要求）、系统及设备功能检测标准（柔性响应系统、直流电器、能源路由器等指标及检测方法）、运行特性、经济性评价标准（提供已投入运行的微电网项目的功能、性能和经济性评价依据）。

表 1 国内微电网相关标准

序号	标准号	标准名称
1	GB/T 41995-2022	并网型微电网运行特性评价技术规范
2	GB/T 38953-2020	微电网继电保护技术规定
3	GB/T 51341-2018	微电网工程设计标准
4	GB/T 36274-2018	微电网能量管理系统技术规范
5	GB/T 36270-2018	微电网监控系统技术规范
6	GB/T 34930-2017	微电网接入配电网运行控制规范
7	GB/Z 34161-2017	智能微电网保护设备技术导则
8	GB/T 34129-2017	微电网接入配电网测试规范
9	GB/T 51250-2017	微电网接入配电网系统调试与验收规范
10	GB/T 33589-2017	微电网接入电力系统技术规定
11	NB/T 10148-2019	微电网 第 1 部分：微电网规划设计导则
12	NB/T 10149-2019	微电网 第 2 部分：微电网运行导则

表 2 国际微电网相关标准

序号	标准号	标准名称
1	IEC TS 62898-1: 2017 ED1	Microgrids-Part1:Guidelines for microgrid projects planning and specification
2	IEC TS 62898-2: 2018 ED1	Microgrids-Part2:Guidelines for operation
3	IEC TS 62898-3-1 ED1	Microgrids-Technical Requirements-Protection and dynamic control
4	IEC TS 62898-3-2 ED1	Microgrids-Technical Requirements-Energy Management Systems
5	IEC TS 62898-3-3 ED1	Microgrids-Technical Requirements-Self-regulation of dispatchable loads
6	IEEE 2030.9:2019	Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid
7	IEEE 1547.4:2011	Guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems

- **工程建设。**表 3 列举了国内外典型独立型微电网示范工程，国内外的独立型微电网应用主要先考虑应用于一些海岛、农村等偏远不适合或没有并入大电力系统条件的地区。到目前为止，独立型微电网项目主要集中于验证安全可持续运行、提供可接受的电能质量、并离网无缝切换以及即插即用运行方面的能力。在运独立型微电网大多能够不依赖公共电网而独立运行，光伏和风力发电是微电网中最常见的可再生能源发电形式。同时，为提高

独立型微电网的安全可靠供电能力，柴油发电机和燃料电池通常被用作微电网内部的可控发电设备。此外，由于可再生能源发电出力的间歇性和不可控性，独立型微电网通常利用储能设备来补偿可再生能源发电的波动性，如蓄电池、飞轮、储氢罐等储能设备。因此，未来孤网光储直柔系统相关应用在“源储网荷”中考虑引入“备用”电，形成“源储网荷备”系统、源-荷互动调节等将是重点方向。

表 3 国内外示范工程

配置	Kythnos 微电网	Hawaii 微电网	蒙东微电网	Utsira 微电网
光伏发电	12kW	10kW	110kW	/
风电	/	7.5kW	50kW	1200kW
储能电池	85kWh	85kWh	50kWh	35kWh
飞轮储能	/	/	/	5kWh
氢燃料电池	/	5kW	/	10kW
旋转发电设备	5kVA	/	/	/

- **系统技术。**孤网光储直柔系统只能孤岛运行，且不能从公用电网获得电能，所以其自身必须配置黑启动。为了平抑由分布式能源和负荷产生的波动，孤网光储直柔系统必须配置足够的储能装置。在运行时除了考虑经济性外，电压响应也是必须要考虑的因素。孤岛运行时的控制策略至少可以采用集中控制、分散控制、分层控制、自主控制中的一种或数种，并且必须保证网内至少有一个分布式能源采用 U/f 控制，其他电源采用 P/Q 控制模式运行，以维持系统电压。
- **优化配置。**优化配置是孤网光储直柔系统研究的重点之一，目的是在对本地负荷需求和可再生能源资源情况进行充分分析预测的基础上，依据特定的系统优化运行目标和约束条件，确定系统结构及设备配置(包括分布式电源、储能设备类型、容量和位置)，尽可能实现系统经济性、可靠性及环保性等量化指标的优化。因此，微网系统优化配置包含优化变量、目标函数和约束条件三大要素。孤网光储直柔系统优化配置流程图 10 如所示。

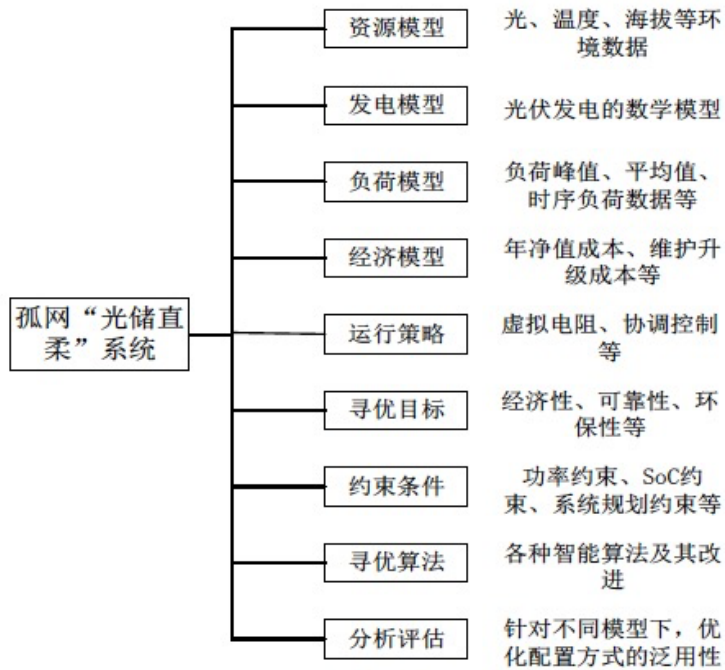


图 10 微网系统配置流程

- **协调运行。**孤网光储直柔系统的运行控制亦是研究的重点，其包含设备级控制和系统级控制两个层次。设备级控制的主要目标是维持直流母线电压稳定，实现系统功率平衡，保证孤网光储直柔系统稳定运行。系统级控制的主要目的是对系统进行集中管理和能量优化，提升整体运行效率和可靠性，实现最优运行。对设备级和系统级的分层控制体系如图 11 所示。该体系在不同时间尺度上分别实现设备级控制(对应第 1 层控制)和系统级控制(对应第 2 和第 3 层控制)策略，完成电气量控制、电能质量调节以及经济运行控制。

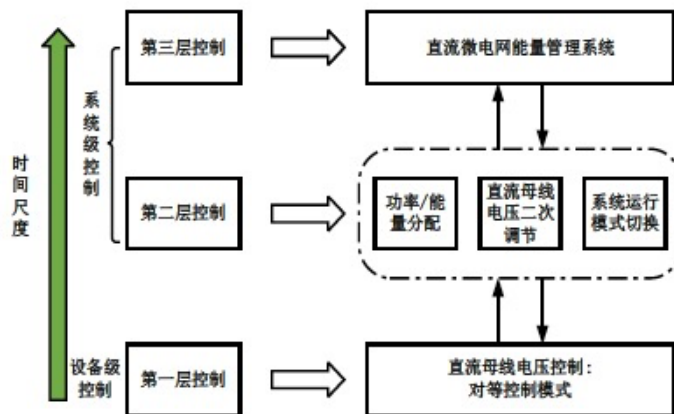


图 11 分层控制体系

3. 孤网系统的光储直柔设计

- **设计思路。**通过研究边境小镇、游牧民蒙古包、海岛、旅居驿站、房车、临建等区域孤网系统的光储直柔应用场景的太阳能辐照量、环境温度和光

伏可安装面积，确定光伏系统的配置；通过具体研究应用场景下用户的用电需求、用电行为特性和持续阴雨天数情况，确定储能系统的优化配置设计。调研分析孤网光储直柔系统的造价成本和电网架空线路在不同地形的造价成本，通过对比分析两者造价成本与距离的关系，得到孤网光储直柔系统在不同地形、距离下建设的经济驱动力。

- **地形增加系数**。根据用户的需求分析，孤网光储直柔系统可按保障型、经济型和舒适型三类需求考虑配置。而电网架空线路的敷设，在不同地形条件下，其投资成本是不一样的，研究均以平地为主，其他地形根据《20kV及以下配电网工程预算定额》中的地形增加系统进行调整研究。地形增加系统如表 4。

表 4 地形增加系数

地形类别	丘陵	一般山地、泥沼地带、沙漠	高山
调整系统	15%	60%	120%

4. 孤网光储直柔系统配置及建设成本分析

- **孤网光储直柔系统配置**。光伏系统配置时，为使光伏系统能发出满足相应负载需求的功能和电量，应考虑天气差、太阳辐照较低的情况下也能保证系统的供电可靠性，同时也许考虑组件自身性能衰减导致的系统发电量降低的情况。考虑到实际应用情况，通过分析，对于不同保障类型的孤网光储直柔系统，光伏系统、储能系统配置如表 5。

表 5 不同保障类型孤网光储直柔系统配置

系统类型	负载需求	光伏系统配置	储能系统配置
保障型	120W, 0.96kWh	300W, 1.19kWh	1kWh
经济型	1.96kW, 6.68kWh	2kW, 7.9kWh	8kWh
舒适型	4.48kW, 16.4kWh	4.5kW, 17.8kWh	17kWh

- **孤网光储直柔系统配置分析**。孤网光储直柔系统成本主要由光伏系统成本、储能系统成本、安装辅材及安装费组成，根据现行的市场行情，光伏系统成本约为 3 元/W，储能系统成本约为 3 元/Wh，安装辅材及安装费约为 2 元/W。不同保障类型孤网光储直柔系统造价如表 6。

表 6 不同保障类型孤网光储直柔系统造价

系统类型	光伏系统 (W)	储能系统配置 (Wh)	光伏系统成本 (元)	储能系统成本 (元)	系统总成本 (万元)
保障型	300	1000	1500	3000	0.45
经济型	2000	8000	10000	30000	4
舒适型	4500	17000	22500	67500	9

5. 电网延伸方式及成本分析

- **电网延伸供方式。**用电网延伸方式向无电地区供电，通常面临线路架设难度大、投资高、收益少等问题。在负荷较低的无电地区，配供电网络多采用网架结线简单、投资小、维护方便但供电可靠性较低的 10kV 辐射式结线，如图 12 所示。

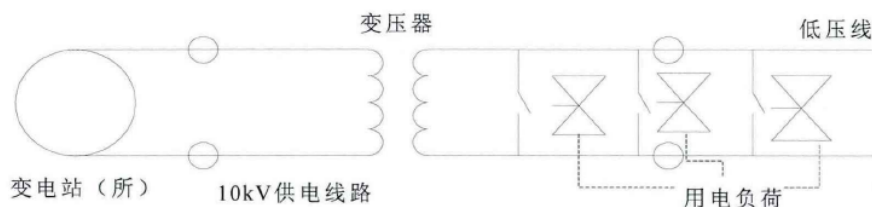


图 12 无电地区配电网供电示意图

- **电网延伸成本分析。**按照目前典型配电网线路和变压器价格，参考《南方电网（广东）配网工程标准设计和典型造价》-第二册 架空线路典型造价说明，平地供电线路投资为 10kV 线路 5~9 万元/公里（计算时取均值 7 万元/公里），配变（10kVA）及周边设施 4 万元，低压线（2.5mm²）1 万元/公里。

6. 孤网光储直柔系统建设经济性分析

- **保障型孤网光储直柔系统。**对于保障型孤网光储直柔系统，当电网延伸距离超过 10km 时，在平地、丘陵、山地、高山上建设孤网光储直柔系统，均具有经济性；
- **经济型孤网光储直柔系统。**对于经济型孤网光储直柔系统，地形不同、村落户数不一样时，电网延伸具有经济性的最短距离见图 13，超过电网延伸最短距离时，建设孤网光储直柔系统更具经济性。

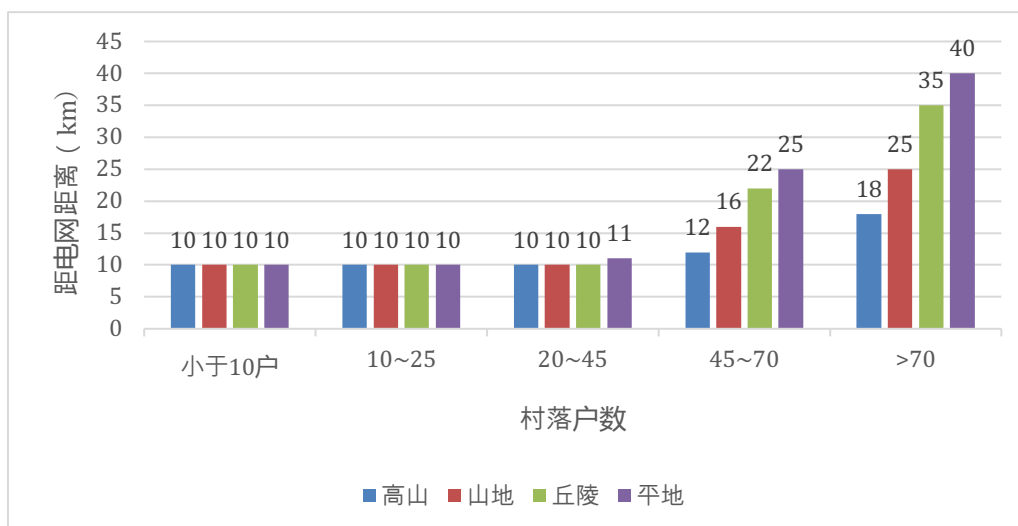


图 13 经济型电网延伸具有经济性的最短距离

- **舒适型孤网光储直柔系统。**对于舒适型孤网光储直柔系统，地形不同、村落户数不一样时，电网延伸具有经济性的最短距离见图 14，超过电网延伸最短距离时，建设孤网光储直柔系统更具经济性。

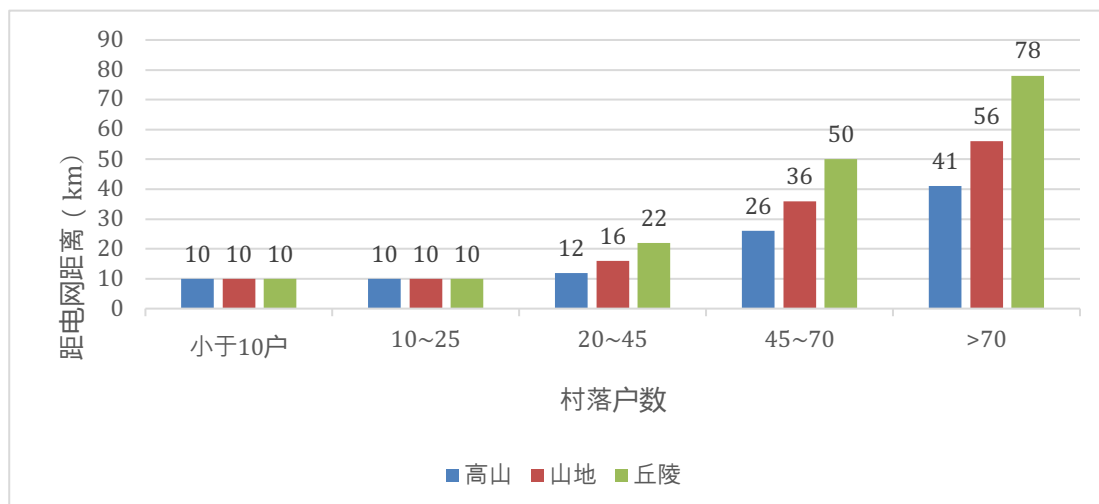


图 14 舒适型电网延伸具有经济性的最短距离

7. 光伏未来屋直流社区孤网光储直柔系统实证基地

- **项目概况。**光伏未来屋V直流社区位于广东省珠海市香洲区格力电器股份有限公司内，在原有IV代基础上加装，共计4个集装箱，建筑面积180m²，为纯直流办公场景。项目结合光伏、储能等多能源综合配置，发、储、网、用电高效利用，形成能源自给自足的直流供用电生态系统，搭建完成后效果如图15。



图 15 光伏未来屋V直流社区项目

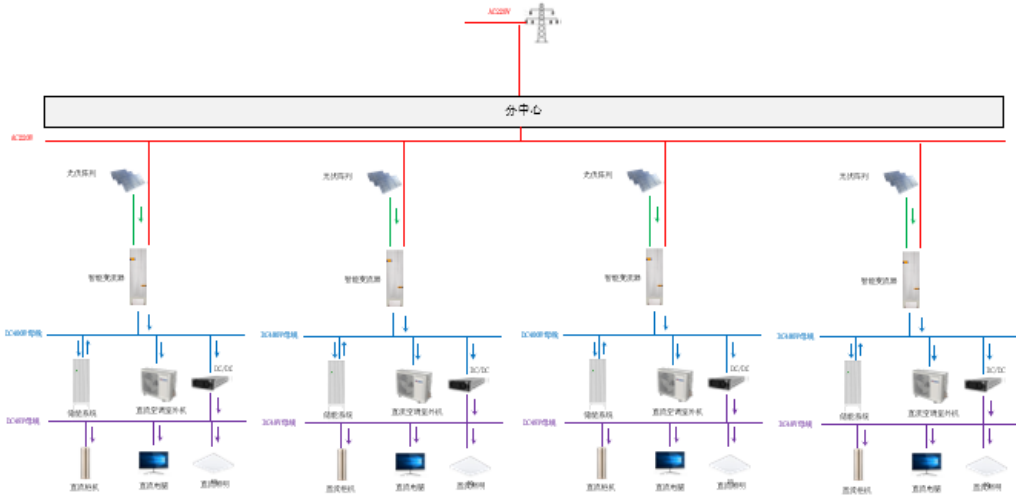


图 16 光伏未来屋直流社区系统架构

- **项目技术方案。**如图 16 所示系统屋顶配备光伏组件 2.85kWp，配备户用储能系统 24kW/36.6kWh，搭载直流空调、电脑、空气净化器等直流电器设备为主的用电负荷 17.625kW。V 代采用两个等级电压供电，分别为 400VDC、48VDC，实现高低压分类分区。V 代以智慧能源管理系统 (IEMS) 平台为支撑，实现精细化能源应用，可实现对灯光、空调的实时控制，也可实时监控各区域、各类设备的运行状态电流、电压、运行功率等数据，可实现远程运行控制和故障预警等功能。该系统还可以显示“光储直柔”系统各建筑单元的碳排放量、光伏发电及上网电量、储能累计充放量、电网供电、建筑用电负荷等实时数据和历史数据。

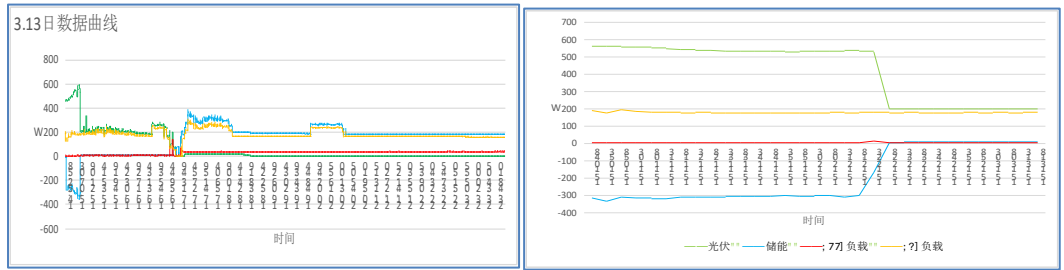


图 17 珠海光伏未来屋直流社区典型日实证数据

- **工程实证意义。**为了验证孤网光储直柔系统在办公场景的可行性及可靠性。建设了光伏未来屋 V 直流社区，如图 17 所示，验证了在日常办公场景下，系统通过光伏发电、储能充放电保证室内负载正常运行，在储能电量放至 20% 时自动关闭大功率负载（空调）设备，系统自持力可达 5 天及以上，并对整体办公无影响。由此可知，光储直柔系统可覆盖社区办公场景，实现孤网运行。

8. 纳木措圣象天门光伏驿站孤网光储直柔系统实证基地

- **项目概况。**纳木措光伏驿站位于新疆纳木措圣象天门景区，建筑高度 2.9m，建筑面积 14.9m²。是国创在高寒高海拔地区打造的一个集使用与参观一体

的孤网光储直柔系统驿站场景示范基地，具有科技示范意义和推广价值，搭建完成后效果如图 18。



图 18 纳木措光伏驿站



图 19 光伏驿站系统架构

- **项目技术方案。**光伏驿站系统架构如图 19，驿站不连接市电，纯孤网运行，屋顶配备光伏组件 2.46kWp，配备户用储能系统 3kW/6.6kWh，具备多路直流输出回路，满足 2.55kW 直流空调、直流照明、直流电脑供电要求。光伏 DC/DC 变换器具备 MPPT 自动运行控制和限功率运行功能。

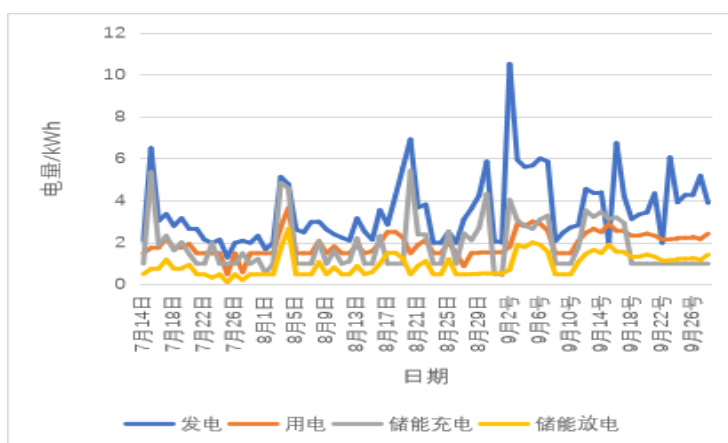


图 20 纳木措光伏驿站雨季发电、用电、充放电情况

- **工程实证意义。**为了验证孤网光储直柔系统高寒高海拔场景下售卖驿站的可行性及可靠性。建设了纳木措光伏驿站示范项目，如图 20。在高寒高海拔场景下，高远边无地区，连续阴雨天气等异常情况会极大影响发电量，孤网系统的设计应进行实际场景提前勘察，考量场景特性，做好配置设计。目前项目正可靠运行，圣象天门的售票人员驻扎于此，解决了其工作空间的舒适性及能源供给问题。

9. 珠海荷包岛离网 5G 基站示范项目

- **项目概况。**珠海联通基站荷包岛试点地处黄茅海太平洋的交界，位于珠海市的西南端，该站为国创联合联通公司打造的光储直柔离网微波站一体化机柜的基站，是国创在海岛场景下打造的一个孤网光储直柔系统基站示范点，如图 21。



图 21 珠海荷包岛离网 5G 基站示范项目

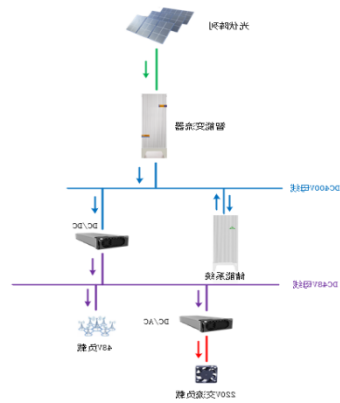


图 22 5G 基站系统架构

- 项目技术方案。5G 基站系统架构如图 22，系统以储能系统为核心，配备光伏组件 3.6kWp，配备户用储能系统 3kW/6.6kWh，为基站内部微波及传输设备直流设备供电，支撑基站离网运行。

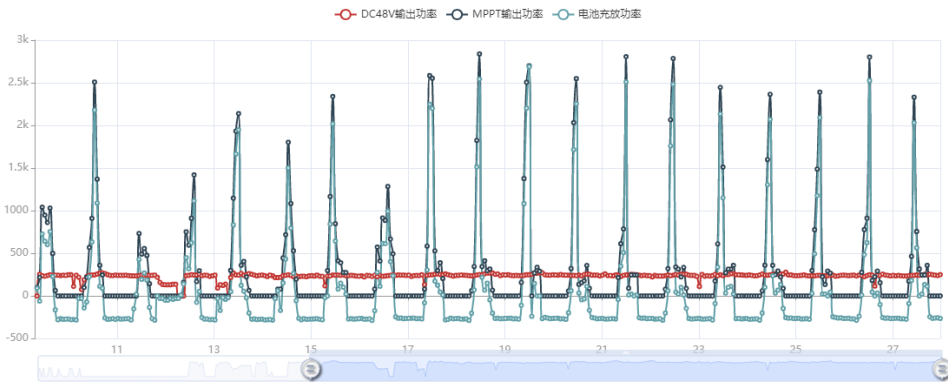


图 23 珠海荷包岛离网 5G 基站示范项目典型月光储用数据

- 工程实证意义。为了验证孤网光储直柔系统海岛场景下 5G 基站的可行性及可靠性。国创与联通联合建设了珠海荷包岛离网 5G 基站示范项目，由图 23 可知典型日，珠海荷包岛离网 5G 基站光储直柔系统在孤网模式下根据负载，光储持续出力，5G 通讯设备稳定运行。验证了孤网光储直柔系统可在此场景下可保障系统可靠运行，而在连续阴雨天及各种极端天气下，备电系统（柴油发电机等）的发挥可保障系统稳定运行。在无电或市电拉电困难区域，采用光储一体化供能，柴发备电的光储直柔系统，有望解决孤网系统的基站部署问题。

10. 尼日利亚离网型别墅示范项目

- 项目概况。项目位于尼日利亚拉各斯，为一栋高端精装纯澳式轻钢结构别墅，如图 24，原有系统使用的是本地市政网以及柴油发电机双电源供电，存在供电不稳、经常停电，噪音大、污染环境，低效率、不稳定等问题：针对尼日利亚拉各斯的应用环境，该项目使用国创光储直柔系统，采用光伏、储能、市电、柴发的多能源互补架构，搭建一个 24h 不断电的孤网系统。



图 24 尼日利亚离网型别墅示范项目

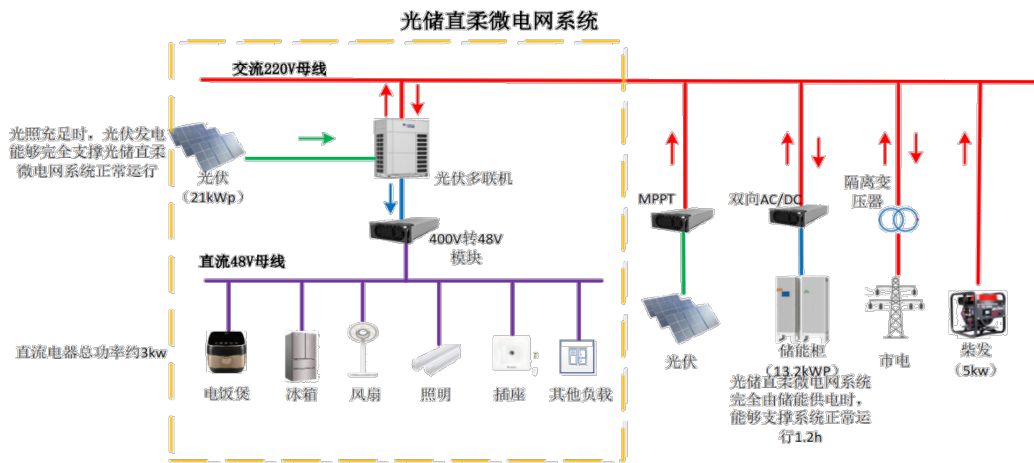


图 25 尼日利亚离网型别墅示范项目系统拓扑图

- 项目技术方案。尼日利亚离网型别墅示范项目系统拓扑图如图 25，系统以光储空系统为核心，配备光伏组件 18.16kWp，配备户用储能系统 12.5kW/34.5kWh，为别墅内部交直流设备直流设备供电，支撑别墅离网运行。

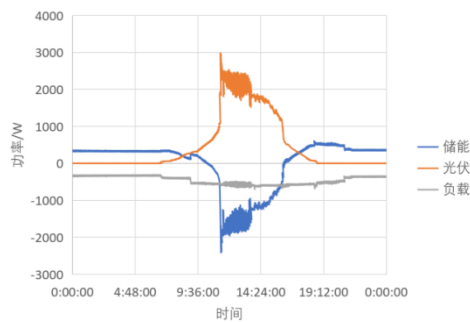


图 26 尼日利亚离网型别墅典型日系统运行情况

- 工程实证意义。建设了尼日利亚离网型别墅示范项目，验证了孤网光储直柔系统家居别墅场景下的可行性及可靠性。在别墅住宅场景下，用电设备种类多，用电形式多样化，其中空调是最主要的用电负荷，炊具等负荷表现出一定的集中性。本项目实现在白天光照充足时，光伏发电可以完全支持孤网光储直柔系统正常运行，并给储能充电。并实现了在住户外出情形下，冰箱等关键负荷的不间断运行，满足储藏食物所需。

11. 孤网光储直柔设计导则

- **孤网光储直柔设计导则。**完成了孤网光储直柔设计导则企业标准的下发，导则规定了孤网光储直柔系统的术语和定义，提供了设计总则、系统建设的目标要求与应用、资源禀赋分析与发电预测、负荷行为特性分析、系统设计等的指导，适用于新建、改建和扩建项目的孤网光储直柔系统的设计。

国创能源互联网创新中心(广东)有限公司 技术标准

QJ/NHY. NEIIC 3102. 01

孤网光储直柔系统设计导则

2023-08-26 发布

2023-08-26 实施

国创能源互联网创新中心(广东)有限公司 发布

目 次

前 言	II
孤网光储直柔系统设计导则	3
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 设计总则	4
5 孤网光储直柔系统建设的目标要求与应用	5
6 资源禀赋分析与发电预测	6
7 负荷行为特性分析	7
8 孤网光储直柔系统设计	8