





# 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 2: 城市建筑光储直柔系统构建模式与工程示范

# Task 2: PEDF Building System Construction Mode and Engineering Demonstration in Urban Area

深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2023年12月15日

Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd Dec 15, 2023

#### 致谢

本研究由深圳市建筑科学研究院股份有限公司统筹撰写,由能源基金会提供资金支持。

#### **ACKNOWLEDGEMENT**

This report is a product of Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd and is funded by Energy Foundation China.

#### <u>免责声明</u>

- 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

## 一、背景与总体进展

城市建筑逐步成为能源的消费主体。根据清华大学建筑节能研究中心发布的《中国建筑节能年度发展研究报告 2022》显示,2020年全国建筑运行能耗总量为10.6亿 tce,占全国能源消费总量比重为21%。2020年全国建筑运行碳排放总量为21.8亿 tCO<sub>2</sub>,其中直接碳排放占比27%,电力相关间接碳排放占比52%。随着经济结构调整,上述比例未来还会进一步提高。

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确到 2060 年我国非化石能源消费比重达到80%以上。同时,《2030 年前碳达峰行动方案》明确提出要提高建筑终端电气化水平,建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的"光储直柔"建筑。《城乡建设领域碳达峰实施方案》也明确提出推动智能微电网、"光储直柔"、蓄冷蓄热、负荷灵活调节、虚拟电厂等技术应用,优先消纳可再生能源电力,主动参与电力需求侧响应。光储直柔既是建筑实现建筑自身减排、减少间接碳排放的重要技术,更是与电网互动、解决电力平衡的关键技术。

《中国光储直柔建筑战略发展路径研究》一期成果表明:目前以煤电为主的电力系统和未来以风光电为主的电力系统,均可通过光储直柔技术提供柔性负载解决灵活电源严重不足的问题,且光储直柔将着力解决电力日平衡需求。

因此,本项目拟开展城市建筑光储直柔以"柔"为主,从系统构建方法和示范工程应用推广两个方面开展研究工作,具体包括城市建筑光储直柔技术方案、光储直柔工程方案咨询和工程案例集编制

等三项具体活动。项目执行周期为 2022 年 8 月至 2023 年 9 月。按照任务书约定,项目已完成城市建筑光储直柔技术方案、完成光储直柔工程方案咨询 6 项,并完成光储直柔案例集的编制和出版。本项目得到了能源基金会和多位行业专家的支持,执行进展顺利,完成任务书约定的工作计划。

## 二、城市建筑光储直柔技术方案

项目组以形成"只进不出"的城市光储直柔技术方案为目标,首先以城市片区(配电台区)为研究对象,分析了不同片区建筑规划条件下,区域分布式屋顶光伏的安装、利用潜力,明确了城市高密度的城市形态下,区域屋顶光伏的安装容量上限和本地消纳能力;其次分析了配电台区负荷形态对配电台区一次能源利用效率和配电线路损耗的影响,再次针对某城市规划片区进行了案例分析,确定区域光伏安装容量和本地自消纳能力,确定了区域配电系统架构和需要配置储能进行光伏消纳的重点项目。通过上述研究,明确了城市区域条件下"只进不出"光储直柔技术方案的光伏消纳目标,并结合实际工程项目规划和设计对区域"光储直柔"系统应用进行方案规划,形成经济合理的光储直柔配置方案。

#### 2.1 城市区域光伏安装潜力评估

高密度城市形态下屋顶光伏安装容量受到建筑相互遮挡关系的影响。整体而言,区域开发强度越大,建筑之间的遮挡情况越严重,即建筑容积率和建筑密度越大,屋顶可利用布置太阳能光伏的面积越小。在不同太阳能资源区域内受遮挡影响的程度不同,在全年太阳能总辐射量较大的 I 类区域内,光伏经济利用比例受遮挡的影响较小,只在容积率大于 2.5 和建筑密度大于 35%的情况下会有轻微的影响。对于全年太阳能总辐射量较小的 III、IV 类区域,遮挡的影响非

常显著。同时,也发现在相同太阳能资源区内,屋顶光伏经济利用 比例9′与太阳高度角呈正相关,即太阳高度角越大,屋顶光伏经济 利用比例9′越高。

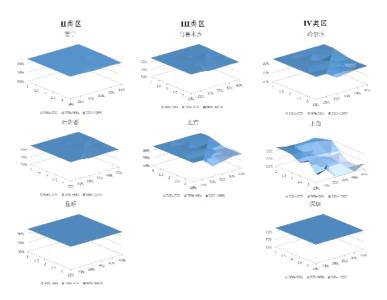


图 1 城市形态对典型城市屋顶光伏利用潜力影响

#### 2.2 城市区域光伏消纳能力分析

本项目以深圳市为例,采用深圳市典型建筑模型,通过改变规划设计参数得到不同城市区域的规划方案,并对其全年运行进行模拟,计算不同城市规划方案的光伏自给率与自用率,比较分析城市形态对可再生能源可利用潜力的影响。整体来看,高开发强度的区域太阳能光伏发电量能够得到充分的利用,而低开发强度的区域通常会由于区域建筑用电负荷同光伏发电曲线的不匹配导致弃电现象或向电网大量返送电力。其中商业型区域的自用率可高达 98%,说明从充分利用光伏发电的角度来看,商业建筑具有明显的优势。其次是居住建筑,居住建筑白天负荷较为均匀,并不存在白天大量浪费光伏发电的情形,因此自用率较高。相比其他类型区域,办公型区域的光伏自用率只有 86%。办公类型的建筑虽然在天的时间尺度上用电负荷同光伏发电曲线匹配较好,但在周末和节假日时间办公类型的建筑用电负荷小,因此从全年的角度来看,办公建筑为主的区域

会出现明显光伏弃电现象。

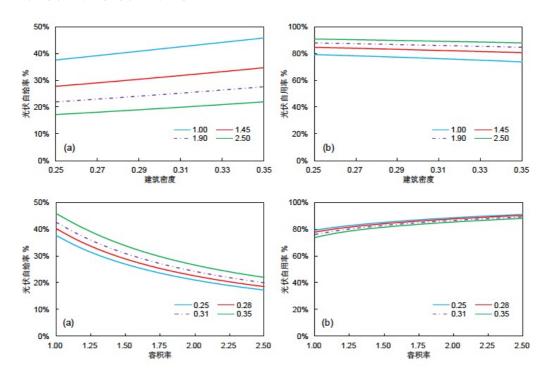


图 2 城市形态对办公型区域的光伏自给率和自用率

#### 2.3 城市区域光储直柔配置案例

本研究以深圳市某片区面积约 1.9 平方公里为研究对象,区域建筑面积约 337 万m²,其中北区总建筑面积约 41 万m²,包含国际会议区及其高端配套酒店、园林会议区和精品会议楼,南区总建筑面积约 296 万m²,布局高层办公、特色商业、酒店、文化、居住及配套设施。

本研究首先对区域能耗量和负荷时空分布情况进行了情景分析。根据各类建筑用电负荷情况测算得到区域总体用电量为37432万kWh,北区占区域总用电量 13%;中区占区域总用电量 87%,负荷呈现北低南高的态势。北区建筑以会展类建筑负荷为主,全年波动性较大。整体从需求侧角度评估,在包括充电桩负荷影响下,该片区尖峰负荷特征明显,20%尖峰负荷运行时间<100h,全年时间占比约 1.1%,有较大的削峰潜力和储能应用潜力。

在建筑光伏安装利用潜力方面,依据规划情景,综合考虑经济性、

片区低碳规划要求,可实现片区可再生能源利用率 5.6%。整体来看,区域光伏安装容量占区域建筑能耗比例较小,光伏发电都可在本地消纳。但区域内会展类型建筑,由于屋顶光伏安装容量大,使用不规律,因此在非空调季节会有现状的光伏余电。



图 3 案例片区负荷波动和建筑光伏消纳情况

通过对区域负荷和光伏发电的规律的分析,根据每个规划单元或地块的建筑负荷特征、光伏资源条件、建筑功能特点,综合考虑电化学储能的规划布局,提出了交直流混合的区域新型配电系统方案。方案根据削峰填谷、容量管理、需求响应、备用电源、光伏消纳等不同的应用目的,规划了各规划单元或地块的用户侧储能形式和容量配置。根据深圳市分时电价政策,在目前不同储能系统成本条件下,静态回收期约为7.4年,后继结合用户侧储能峰谷套利与容量管理,随着电力辅助服务市场的逐步成熟,需求响应次数的增加,系统的静态回收期将大幅度缩减。

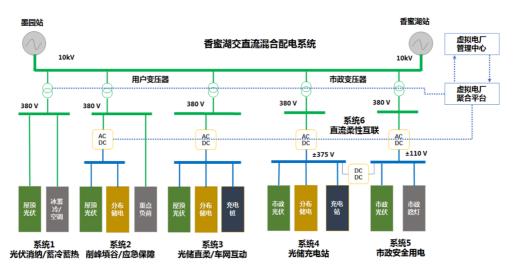


图 4 案例片区配电系统规划方案

## 三、光储直柔示范工程方案咨询

本项目依托中国建筑节能协会光储直柔专委会组建了行业专家库。基于光储直柔工程应用案例调研,开展了6项工程光储直柔技术方案研讨与论证。针对每一个工程项目特点及光储直柔建设目标,在技术方案设计阶段定期组织专家评审,识别建筑光伏、建筑储能、直流配电设计、柔性控制策略等技术应用情况与系统方案的适用性、可行性、经济性等,提出论证意见与方案优化建议,推动项目建设方实现光储直柔技术落地实践。

#### 3.1 行业专家库组建

本项目 2022 年 10 月完成"光储直柔"行业专家库第一批专家入库。第一批 33 位专家,其中 52%来自设计研究院、18%来自高等院校、18%来自终端设备厂家、9%来自地产商、3%来自学协会。

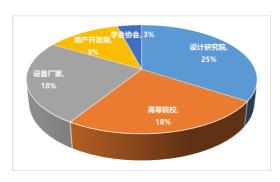


图 5 光储直柔专委会智库专家构成

#### 3.2 光储直柔工程论证

本项目分别于2022年10月、2023年4月和2023年7月在北京、深圳和青岛三地召开了光储直柔工程技术方案研讨与论证会,分别对6项光储直柔示范工程方案进行了论证,示范工程类型涵盖了教育建筑、商业建筑、办公建筑、居住社区、实验建筑和市政设施等六类城市建筑。



图 6 光储直柔示范工程论证项目

#### 3.3 推广宣传

本项目依托直流建筑联盟公众号对光储直柔工程技术方案专家 论证会分别进行了推送,得到了行业内外的广泛关注和支持,对项 目落地具有积极的推动作用。除此以外,论证会的成功举办激发了 社会对光储直柔的关注和认识。这将鼓励企事业单位建设以"光储直 柔"为主要特征的新型建筑电力系统,发展柔性用电建筑,推广可再 生能源建筑应用,为实现能源的高效利用和可持续发展做出了积极 贡献。

#### 四、光储直柔工程案例集编制

本项目于 2023 年 3 月面向全国调研处于已竣工或运行阶段的光 储直柔工程应用案例,了解工程分布情况、光储直柔技术应用现状; 调研共收集了 69 个建筑"光储直柔"案例项目信息。本项目重点选取运行阶段的 26 个建筑案例和 1 个即将完成施工的建筑案例开展文案调研,收集了 27 个项目的文字介绍资料。综合考虑项目建筑类型代表性、项目资料完整性、项目运行效果及项目特色等多方面因素,从已收集文字介绍的 27 个项目案例中筛选 17 个典型案例开展现场调研考察与数据核实,分析工程案例的技术特点与应用方案等,探讨了建筑光储直柔技术发展路径,同时开展了项目建设者及专家访谈,倾听建设者及专家对于光储直柔建筑规模化发展的建议,并于完成《建筑光储直柔技术与工程案例》编制和出版,并入选住房和城乡建设领域"十四五"重点培训教材。



图 7 建筑光储直柔工程与案例集

#### 4.1 "光储直柔"系统应用分布

从太阳能资源利用角度来看,"光储直柔"主要适用于我国大部分地区,尤其是太阳能资源很丰富的北方严寒寒冷地区和太阳能资源丰富的夏热冬冷(除四川盆地)和夏热冬暖地区。从建筑类型和建筑规模来看,建筑"光储直柔"系统正在逐步从新建建筑扩展到既有建筑,从城市办公建筑推广至商业建筑、校园、产业园区及农村住宅建筑,从中小型的单体建筑向校园、产业园区规模化应用发展。从负载直流化的成熟度来看,建筑中的照明、空调、IT类办公设备及监测展示设备、家用电器及充电桩可以率先直流化。

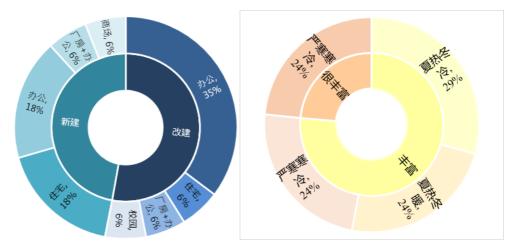


图 8 调研项目类型和气候区分布

#### 4.2 光伏、储能技术应用特征

调研的建筑均采用了太阳能光伏技术,并采用与市政电网并网连接方式,光伏系统形式以BAPV(光伏附着在建筑上)形式为主,主要是由于 BAPV 形式光伏组件及安装成本较低,但随着光伏技术的发展进步,光伏组件的效率逐步提高且成本逐渐下降,BIPV(光伏建筑一体化)将成为未来发展趋势。光伏组件安装方式以平面安装(建筑屋顶或地面停车棚)为主,且多采用高效单晶硅双面组件,主要是由于水平面上接收到的太阳辐射量大,单晶硅双面组件效率高,单位面积发电量较大,且单晶硅组件成本较低,投资收益高。

调研的"光储直柔"建筑储能系统以电池储能为主,电池类型以磷酸铁锂电池为主,其次为钛酸锂电池,最后是铅酸电池和铅碳电池,说明电化学储能已成为建筑储能的主要形式,磷酸铁锂、钛酸锂等锂离子电池是建筑中应用较广泛的电化学储能类型。储能系统设计时宜根据储能系统设计目的和应用场景不同,综合考虑储能电池的技术性能及经济性合理选择电池类型,对于消纳光伏、削峰填谷等能量型储能系统,宜选择能量密度高、放电时间较长的电池,对于参与调峰调频电力辅助服务等功率型储能系统,宜选择功率密度大、放电时间较短的电池。

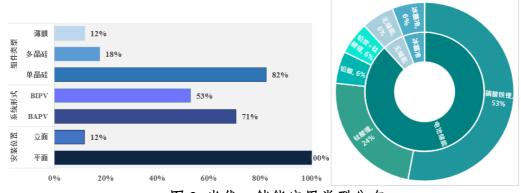
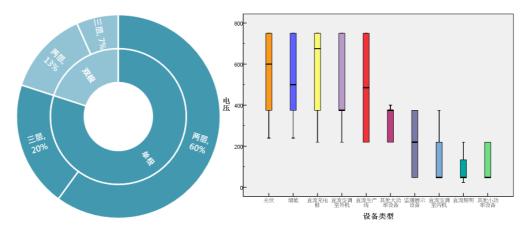


图 9 光伏、储能应用类型分布

#### 4.3 直流配电系统技术特征

调研的建筑直流配电系统拓扑结构以单极系统为主,电压层级以两层为主,不超过三个层级。直流配电系统的拓扑结构、电压层级和电压等级的选择,与系统接入的直流电源(光伏、储能)和直流用电设备的类型、额定功率、工作电压范围存在较大的相关性。当建筑直流用电设备的类型较少、额定功率及电压范围差异不大时,宜选择单级拓扑结构,反之,可根据项目实际情况选择双极拓扑结构或根据实际情况增加电压层级。总体原则:一是用尽可能少的电压等级满足尽可能多的用电设备需求;二是大功率用电设备尽可能选择工作电压范围的较大值,降低电流,减小线缆截面积和线路损耗;三是人员活动区域的小功率设备,尽可能选择工作电压范围的较小值,避免电击事故可能带来的人身伤害。



(a) 拓扑结构和电压层级

(b) 不同直流设备额定电压

图 10 建筑直流配电系统拓扑结构与电压分布

#### 4.4 "光储直柔"系统容量配置

建筑中储能系统配置的目的主要是解决日内建筑用电负荷需求与电力供应不平衡的问题,主要的优化目标通常有节能减排(提高光伏本地消纳比例)、经济性(基于分时电价削峰填谷运行)、电网友好性(减小建筑光伏发电上网对电网的影响,参与电力需求响应及辅助服务提高供电可靠性等)。储能系统设计时,需综合考虑不同的优化目标,在进行建筑用电负荷、光伏发电功率逐时预测的基础上,选取典型日进行光伏发电、用电负荷、市政电网及储能充/放电功率四者的能量平衡分析,按照日平衡原则来配置储能容量。建筑与电网交互入口 AC/DC 变换器容量与建筑光伏发电量、建筑用电负荷的关系及建筑光伏消纳方式有关,对于光伏发电采用自发自用、本地消纳方式的城市建筑,AC/DC 变换器容量需根据典型日从电网取电功率来配置,对于光伏发电采用自发自用、上网输出为主方式的农村建筑,AC/DC 变换器容量需根据典型日光伏发电上网功率来配置。

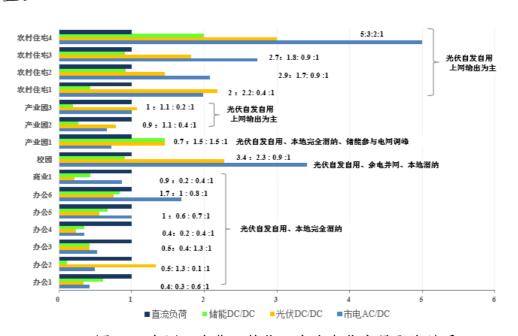


图 11 电网、光伏、储能、直流负载容量配比关系

## **Executive Summary**

#### 1. Overall Progress Report

This research project focuses on the study of PEDF systems for urban buildings and includes two primary aspects: system construction methodologies and the promotion of demonstration projects. Specific project activities include formulating urban building PEDF technology solutions for urban buildings, consulting on PEDF engineering plans, and compiling and publishing PEDF case studies. The project is scheduled to run from August 2022 to September 2023. At the current stage, we have successfully completed the development of PEDF technology solutions tailored to urban buildings, provided consultation on six PEDF engineering plans, and completed the compilation and publication of a collection of PEDF case studies. With the support of the Energy Foundation and various industry experts, the project has progressed smoothly and met the tasks and timelines outlined in the project brief.

Activity	Interim completion	final completion
Activity 1: PEDF Technology	Complete regional PV	Completed the case analysis of
Solutions for Urban Buildings	installation and	PEDF system, and completed
	consumption capacity	the preparation of technical
	analysis.	schemes.
Activity 2: Consultations on	1) Complete the	Completed 6 project
PEDF Engineering Solutions	establishment of expert	consultations for PEDF system
	database;	solutions.
	2) Completed 4 project	
	consultations for PEDF	
	system solutions.	
Activity 3: Compilation of	1) Complete the case	Complete the final draft of the
PEDF Building Case Studies	collection, text research and	PEDF building cases collection,
	site inspection;	and complete the publication.
	2) Complete the preparation	
	of the first draft of the	
	PEDF building cases	
	collection.	

Activity 1: PEDF Technology Solutions for Urban Buildings. The project team aims to develop a PEDF technology solution for urban buildings that focuses on 'inflow-only and without outflow.' We first targeted specific urban districts (electricity distribution substation areas) as the subjects of our study. The analysis evaluated the installation and utilization potential of regional distributed rooftop photovoltaic systems under varying architectural planning conditions for different districts. We determined the upper limit of installation capacities and local absorption capacities for rooftop photovoltaics under high-density urban forms. We then analyzed the impact of load patterns in the distribution substation area on primary energy use efficiency and distribution line losses. A case study focusing on a specific urban planning district was conducted to determine regional photovoltaic installation capacities and local absorption capabilities, as well as to identify key projects that require energy storage for photovoltaic absorption. Through the above research on the distribution substation level, we have clarified the photovoltaic absorption targets of PEDF technology solutions under urban conditions that operate on an 'inflow-only and without outflow' principle. In conjunction with actual engineering project planning and design, we conducted solution planning for the application of regional PEDF systems, resulting in economically rational PEDF configuration solutions.

Activity 2: Consultations on PEDF Engineering Solutions. The project team worked with the Photovoltaic, Energy Storage, Direct Current, Flexible (PEDF) Committee of the China Association of Building Energy Efficiency (CABEE) to establish a multidisciplinary expert think tank. By soliciting industrial demonstration cases, we invited experts from the think tank to deliberate on the technical solutions. We organized three phases of the "PEDF Engineering Technical Solution Expert Review Meetings," where six PEDF demonstration projects were reviewed by experts. These six PEDF demonstration projects cover a range of building types, including commercial, educational, residential, and existing office building renovations. Collectively, these projects illustrate the

challenges of applying PEDF technology to different building types.

Activity 3: Compilation of PEDF Building Case Studies. In order to summarize and compile the research and successful implementation experiences in the field of PEDF buildings, and to provide technical support and practical references for the large-scale promotion of PEDF buildings, the project team, in cooperation with the Photovoltaic, Energy Storage, Direct Current, Flexible (PEDF) Committee of the China Association of Building Energy Efficiency (CABEE), undertook the task of collecting, investigating and compiling case studies of PEDF buildings. A total of 17 exemplary case studies were selected for this compilation through a nationwide case collection and focused on-site investigations of key projects. These cases represent PEDF applications in different climate zones and building types. The compilation process involved more than 80 participants, including project developers and industry experts, ensuring widespread impact and recognition...

#### 2. PEDF Technical Solutions for Urban Buildings

The project team aims to develop a PEDF technology solution for urban buildings that focuses on 'inflow-only and without outflow.' We first targeted specific urban districts (electricity distribution substation areas) as the subjects of our study. The analysis evaluated the installation and utilization potential of regional distributed rooftop photovoltaic systems under varying architectural planning conditions for different districts. We determined the upper limit of installation capacities and local absorption capacities for rooftop photovoltaics under high-density urban forms. We then analyzed the impact of load patterns in the distribution substation area on primary energy use efficiency and distribution line losses. A case study focusing on a specific urban planning district was conducted to determine regional photovoltaic installation capacities and local absorption capabilities, as well as to identify key projects that require energy storage for photovoltaic absorption. Through the above research, we have clarified the photovoltaic absorption targets of PEDF technology solutions under urban conditions that operate on an 'inflow-

only and without outflow' principle. In conjunction with actual engineering project planning and design, we conducted solution planning for the application of regional PEDF systems, resulting in economically rational PEDF configuration solutions.

#### 2.1 Assessment of PV Installation Potential in Urban Areas

In high-density urban configurations, the rooftop PV installation capacity is affected by the mutual shading between buildings. In general, the higher the development intensity of the area, the more severe the shading conditions between buildings. In other words, higher plot ratios and building densities result in less rooftop area that can be effectively used for PV installations. The degree of shading impact varies across different solar resource zones. In Zone I, where annual total solar irradiance is relatively high, the economic utilization rate of PV is minimally affected by shading, but only in cases where the plot ratio exceeds 2.5 and building density exceeds 35%. For zones with lower total annual solar irradiance, such as Zone III and IV, the impact of shading is significantly pronounced. Moreover, it was also found that within the same solar resource zone, the economic utilization rate  $\theta'$  of rooftop PV is positively correlated with the solar elevation angle. That is, the higher the solar elevation angle, the higher the economic utilization rate of rooftop PV.

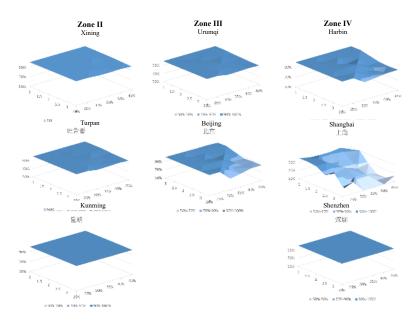


Figure 1. Impact of Urban Morphology on the Potential Use of Rooftop PVs in Typical Cities

#### 2.2 Analysis of PV Absorption Capacity in Urban Areas

For this study, Shenzhen serves as the primary case, using typical building models from the city. By changing the planning and design parameters, we generated different urban planning scenarios and simulated their year-round operation. We calculated the self-sufficiency and self-consumption rates of PV energy under these different urban planning schemes, and analyzed the influence of urban morphology on the potential for renewable energy use. Overall, high development intensity areas can fully utilize solar PV electricity generation. In contrast, areas with low development intensity often face electricity curtailment or large electricity return to the grid due to the mismatch between regional building electricity loads and PV generation curves. In commercial areas, self-consumption can be as high as 98%, indicating a significant advantage for commercial buildings in fully utilizing solar PV energy. Residential buildings follow closely, as their daily loads are fairly constant and there is no significant waste of solar PV power, resulting in high selfconsumption rates. Compared to other zone types, office space has a PV selfconsumption rate of only 86%. While office buildings generally follow PV generation curves well on a daily time scale, they experience lower electricity loads during weekends and holidays. As a result, on an annual basis, zones dominated by office buildings are more likely to experience significant wasted or discarded PV energy.

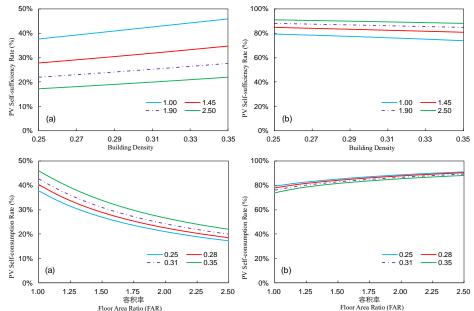


Figure 2: Impact of Urban Morphology on the Self-Sufficiency and Self-Consumption Rates of PV Energy in Office Zones

#### 2.3 Case Studies on PEDF Configuration in Urban Areas

This study focuses on a specific area in Shenzhen City, covering about 1.9 square kilometers, with a total built-up area of about 3.37 million square meters. The northern section of this area has a built-up area of about 410,000 square meters, which includes international conference zones, high-end supporting hotels, garden conference areas, and boutique conference buildings. The southern section has a built-up area of about 2.96 million square meters, housing high-rise offices, specialty commercial spaces, hotels, cultural venues, residential areas and supporting facilities.

This study first conducted a scenario analysis of the area's energy consumption and the spatiotemporal distribution of the electrical load. According to the load profile of various building types, the total electricity consumption for the area is calculated to be 374.32 million kWh, with the northern section accounting for 13% of the total and the central section accounting for 87%. The load distribution shows a lower pattern in the north and a higher pattern in the south. The northern section consists mainly of buildings with exhibition-related loads, which show significant fluctuations throughout the year. An overall assessment of the demand side, including the impact of electric vehicle charging stations, shows that this area has

significant peak load characteristics - 20 percent of the peak load operates for less than 100 hours, or about 1.1 percent of the total annual time, revealing significant peak shaving and energy storage potential.

Regarding the potential for PV installation in buildings, under planning scenarios that consider both economic feasibility and low-carbon area requirements, the area can achieve a renewable energy utilization rate of 5.6%. Overall, the proportion of installed PV capacity to the area's total energy consumption is relatively low, allowing all generated PV electricity to be consumed locally. However, exhibition-type buildings in the area pose challenges due to their substantial rooftop PV capacity and irregular usage patterns, leading to surplus PV electricity during non-air-conditioning seasons.

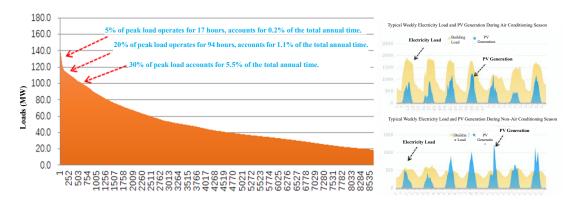


Figure 3. Load Fluctuation and PV Absorption in the Case Area

Through an analysis of regional load patterns and PV generation trends, a novel regional power distribution system that employs a hybrid of alternating current (AC) and direct current (DC) has been developed. This design is tailored to the specific architectural load characteristics, solar resource availability, and functional attributes of each planning unit or parcel. It incorporates electrochemical energy storage planning and is versatile, aimed at multiple application objectives such as peak shaving, capacity management, demand response, backup power sources, and PV absorption. Based on Shenzhen's time-of-use electricity pricing policy, the static payback period of the storage systems under current cost conditions is estimated to be about 7.4 years. In the future, as user-side storage is used for peak-valley arbitrage and capacity management, and as ancillary electricity service

markets mature, the frequency of demand response is expected to increase. As a result, the static payback period of the system is expected to decrease significantly.

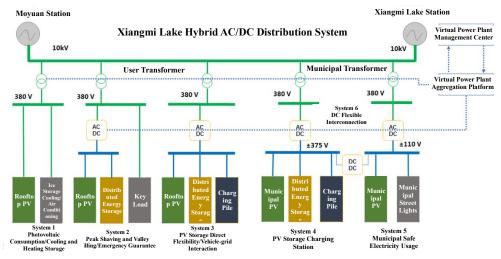


Figure 4. Power Distribution System Planning Scheme for the Case Area

#### 3. Consulting on PEDF Demonstration Engineering Solutions

This project relies on an expert database assembled by the Photovoltaic, Energy Storage, Direct Current, Flexible (PEDF) Committee of the China Association of Building Energy Efficiency (CABEE). Drawing upon research and investigation into real-world applications of PEDF engineering, six technical solutions were developed and discussed. For the unique characteristics of each engineering project and the objectives of PEDF construction, expert reviews are regularly organized during the technical solution design phase. These reviews examine the suitability, feasibility, and cost-effectiveness of building photovoltaic installations, architectural energy storage solutions, DC power distribution design, and flexible control strategies. Expert opinions and suggestions for system optimization are provided to facilitate the real-world implementation of PEDF technologies by project developers.

#### 3.1 Formation of Industry Expert Database

The first phase of the PEDF Industry Expert Database was completed in October 2022. The initial cadre consists of 33 experts, of which 52% are from design and

research institutes, 18% from higher education institutions, 18% from end-user device manufacturers, 9% from real estate developers, and 3% from academic associations.

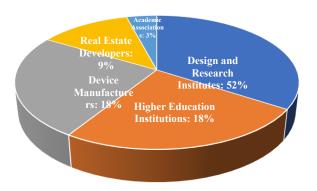


Figure 5. Composition of Experts in the PEDF Special Committee Think Tank

#### 3.2 PEDF Engineering Evaluation

This project organized discussion and evaluation meetings on the technical solutions of the PEDF engineering in Beijing, Shenzhen, and Qingdao in October 2022, April 2023, and July 2023, respectively. In these meetings, 6 PEDF demonstration engineering solutions were evaluated. The types of demonstration projects covered six categories of urban buildings: educational buildings, commercial buildings, office buildings, residential communities, experimental buildings, and municipal facilities.

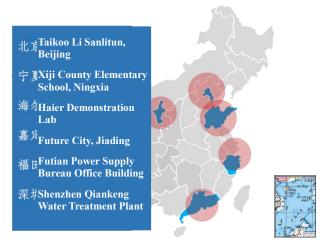


Figure 6. Expert Evaluation Project for the PEDF Demonstration Engineering

#### 3.3 Promotion and Publicity

Using the WeChat Official Account of the Direct Current Buildings Alliance (直流 建筑联盟), this project disseminated information about the expert evaluation meeting on the PEDF engineering technical solutions. This garnered extensive attention and support both within and outside of the industry, which actively promoted the project's implementation. In addition to this, the successful conduct of the expert meeting has raised public awareness and understanding of PEDF systems. This will encourage businesses and public institutions to construct new building power systems that are mainly characterized by PEDF, promote flexible electricity consumption in buildings, expand the application of renewable energy in architecture, and make a positive contribution to the efficient use of energy and sustainable development.

#### 4. Compilation of PEDF Engineering Case Studies

In March 2023, this project conducted a nationwide survey to investigate completed or operational applications of PEDF engineering projects. The goal was to understand the distribution of these projects and the current status of PEDF technology applications. The survey collected information on 69 building projects that feature PEDF systems. This project specifically selected 26 operational building cases and one building case nearing construction completion for detailed research. Documentation for these 27 projects was collected, including textual descriptions. After comprehensive evaluation of various factors such as the representativeness of the building types, completeness of the project data, operational performance, and unique features, 17 exemplary cases were selected for on-site research, verification, and data analysis. This allowed for a detailed exploration into the technical characteristics and application schemes of these engineering cases. Furthermore, interviews were conducted with both the developers and field experts. The interviews aimed to gather insights and recommendations concerning the scaled development of PEDF buildings. Upon completion of this phase, this project compiled and published a book titled "PEDF Technology and Engineering Case Studies in Building Applications," which has been included as a key training material for the "14th Five-Year Plan" in the field of housing and urban-rural development.



Figure 7. Compilation of PEDF Engineering and Case Studies in Buildings

#### 4.1 Distribution of PEDF System Applications

From the perspective of solar energy resource utilization, PEDF systems are primarily suitable for most regions in China, especially in the northern regions with harsh cold climates abundant in solar resources, as well as in areas with hot summers and cold winters (excluding the Sichuan Basin) and hot-summer and warm-winter areas. In terms of building types and scales, PEDF systems are gradually expanding from new constructions to existing buildings, and from urban office buildings to commercial properties, educational campuses, industrial parks, and rural residential architecture. The application is also growing in scale from individual medium and small-sized buildings to larger campuses and industrial parks. Regarding the maturity level of DC load, building systems such as lighting, air conditioning, IT office equipment, monitoring and display devices, home appliances, and charging stations can be among the first to be converted to direct current (DC).

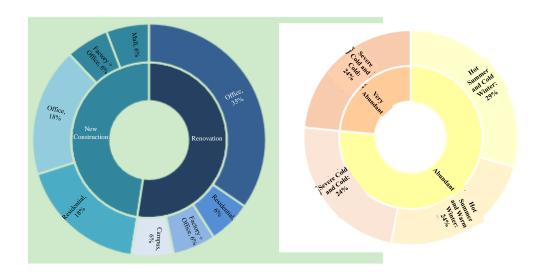


Figure 8. Distribution of Surveyed Project Types and Climate Zones

## 4.2 Characteristics of Photovoltaic and Energy Storage Technology Applications

All of the buildings surveyed in this study utilize solar photovoltaic technology and are grid-connected to municipal electricity networks. The predominant form of photovoltaic system is Building-Attached Photovoltaics (BAPV), primarily due to its cost-effective installation and component costs. However, as advancements in photovoltaic technology continue to push the efficiency of solar modules higher while driving costs down, Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) are poised to become the future trend. The main installation methods for solar modules are flat surface installations, such as building rooftops or ground-level carports. The modules employed are mainly high-efficiency monocrystalline silicon bifacial panels. This choice was driven by the greater amount of solar irradiance received on horizontal surfaces, coupled with the high-efficiency and cost-effectiveness of monocrystalline silicon components, leading to higher returns on investment.

Regarding the energy storage systems in these PEDF Buildings, battery storage is primarily employed. Iron phosphate lithium batteries are the most commonly used, followed by lithium titanate batteries, and lastly lead-acid and lead-carbon batteries. This indicates that electrochemical energy storage has become the main form of energy storage in buildings. Iron phosphate lithium and lithium titanate are among

the most extensively applied electrochemical storage types in buildings. When designing energy storage systems, considerations of the battery's technical performance and economic viability shall be thoroughly evaluated based on the purpose and application scenario. For energy storage systems intended to absorb excess photovoltaic output and manage peak shaving, batteries with high energy density and longer discharge times are preferable. For power-based storage systems that participate in peak load and frequency regulation services, batteries with high power density and shorter discharge times are preferable.

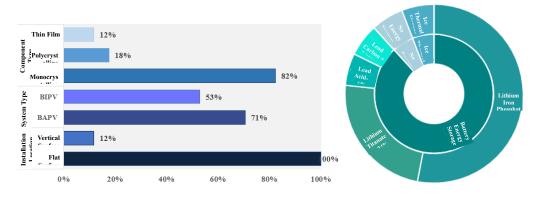
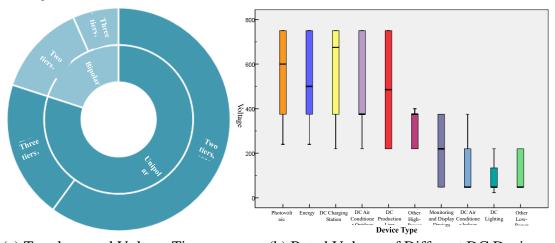


Figure 9. Distribution of Photovoltaic and Energy Storage Application Types

#### 4.3 Technical Characteristics of Direct Current (DC) Distribution Systems

The DC distribution systems in the buildings surveyed predominantly employ unipolar topologies, with voltage levels primarily set at two tiers and not exceeding three tiers. The choices regarding topology, voltage tiers, and voltage ratings of the DC distribution system are strongly correlated with the types of DC sources (photovoltaics, energy storage) and DC load equipment in terms of their types, rated power, and operating voltage range. When the variety of DC load equipment in the building is limited, and there is little disparity in rated power and voltage range, a unipolar topology is recommended. Conversely, a bipolar topology or additional voltage tiers can be considered based on the project's specific requirements. The overall guiding principles are as follows: Utilize as few voltage ratings as possible to meet the demands of as many electrical devices as possible; for high-power load equipment, opt for the upper range of the operating voltage to

reduce current, thereby minimizing cable cross-sectional area and line losses; and for low-power devices located in areas where people are active, opt for the lower range of the operating voltage to avoid the risk of electric shock and associated injuries.



(a) Topology and Voltage Tiers (b) Rated Voltage of Different DC Devices Figure 10. Topological Structure and Voltage Distribution in Building DC Distribution Systems

#### 4.4 Capacity Configuration of the PEDF System

The primary purpose of energy storage system configuration within buildings is to resolve the imbalance between intraday building electricity load demand and electricity supply. Key optimization objectives typically include energy savings and emission reduction (by increasing the local absorption rate of photovoltaic power), economic considerations (peak-shaving operations based on time-of-use electricity pricing), and grid-friendliness (minimizing the impact of building photovoltaic power generation on the grid, participating in demand response and auxiliary services to improve supply reliability). During the design phase of the energy storage system, it is essential to consider these various optimization objectives collectively. An energy balance analysis of photovoltaic power generation, electricity load, grid supply, and storage charge/discharge rates shall be conducted based on hourly forecasts on building electricity load and photovoltaic power generation for a typical day. The energy storage capacity shall be configured according to daily balance principles. The capacity of the AC/DC converter at the building-grid interface is influenced by the relationship between building

photovoltaic power generation and building electricity load, as well as the manner in which photovoltaic power is consumed within the building. For urban buildings where photovoltaic power generation is mostly for self-consumption and local absorption, the AC/DC converter capacity shall be configured based on the power drawn from the grid for a typical day. For rural buildings where photovoltaic power generation is mostly for self-consumption and grid export, the AC/DC converter capacity shall be configured based on the photovoltaic power fed into the grid for a typical day.

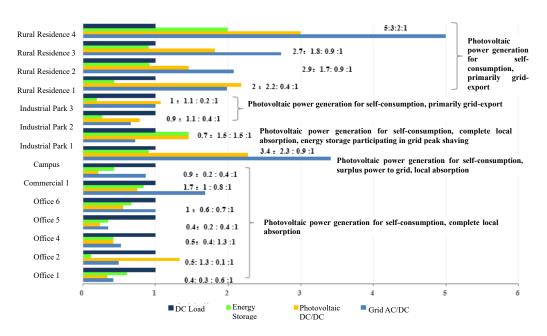


Figure 11. Ratio of Grid, Photovoltaic, Energy Storage, and DC Load Capacities

## 目录

一、研究背景与课题任务	2
1.1 研究背景	2
1.2 课题任务	2
二、城市建筑光储直柔技术方案	3
2.1 城市区域光伏安装潜力分析	3
2.2 城市区域光伏消纳潜力分析	5
2.3 城市光储直柔系统规划案例分析	12
三、光储直柔示范工程方案咨询	35
3.1 总体执行情况	35
3.2 工程方案情况	38
四、光储直柔工程案例集编制	65
4.1 案例集编制背景与进展	65
4.2 光储直柔建筑案例特征分析	67
4.3 部分项目情况简介	78
五、执行情况总结与后期计划	88
附件1:工程方案咨询会专家意见	90
附件 2: 工程案例项目调研清单	96
附件3:光储直柔工程案例集封面和目录	99

#### 一、研究背景与课题任务

#### 1.1 研究背景

城市建筑逐步成为能源的消费主体。根据清华大学建筑节能研究中心发布的《中国建筑节能年度发展研究报告 2022》显示,2020 年全国建筑运行能耗总量为10.6亿 tce,占全国能源消费总量比重为21%。2020 年全国建筑运行碳排放总量为21.8亿 tCO<sub>2</sub>,其中直接碳排放占比27%,电力相关间接碳排放占比52%。随着经济结构调整,上述比例未来还会进一步提高。

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确到 2060 年我国非化石能源消费比重达到 80%以上。同时,

《2030年前碳达峰行动方案》明确提出要提高建筑终端电气化水平,建设集光 伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的"光储直柔"建筑。《城乡建设 领域碳达峰实施方案》也明确提出推动智能微电网、"光储直柔"、蓄冷蓄 热、负荷灵活调节、虚拟电厂等技术应用,优先消纳可再生能源电力,主动参 与电力需求侧响应。光储直柔既是建筑实现建筑自身减排、减少间接碳排放的 重要技术,更是与电网互动、解决电力平衡的关键技术。

《中国光储直柔建筑战略发展路径研究》一期成果表明:目前以煤电为主的电力系统和未来以风光电为主的电力系统,均可通过光储直柔技术提供柔性负载解决灵活电源严重不足的问题,且光储直柔将着力解决电力日平衡需求。

因此,本项目拟开展城市建筑光储直柔以"柔"为主,重点研究"只进不出"柔性调控技术和建筑电力交互模式,分析不同建筑类型根据电网指令柔性调节的潜力和技术经济可行性,并开展光储直柔应用工程案例调研。

## 1.2 课题任务

本项目开展的具体研究工作包含三项活动: ①"只进不出"光储直柔技术方案; ②中国光储直柔工程应用案例集; ③光储直柔工程技术方案咨询。旨在通过研究不同类型建筑"只进不出"柔性调节的潜力和技术经济可行性,推动城市建筑光储直柔技术应用;通过光储直柔应用工程案例调研,了解中国光储直柔工程应用现状,更好地支撑建筑领域碳达峰碳中和目标落实。

活动一: "只进不出"光储直柔技术方案

主要产出:不同建筑场景"只进不出"光储直柔技术方案

主要活动:基于高负荷密度的城市建筑和未来新型电力系统的主要特征,研究①建筑光伏与不同类型建筑负荷在电量和逐时规律两个维度的匹配关系,以及光伏就地消纳的技术路径;②在建筑光伏自发自用的基础上,研究不同类型建筑根据电网指令柔性调节的潜力和技术经济可行性。

活动二: 中国光储直柔工程应用案例集

主要产出:中国光储直柔工程应用案例集

主要活动:面向全国调研处于已竣工或运行阶段的光储直柔工程应用案例,了解工程分布情况、光储直柔技术应用现状;分析不少于10项光储直柔工程案例的技术特点与经济性等,完成中国光储直柔工程应用案例集。

活动三:光储直柔工程技术方案咨询

主要产出:光储直柔工程技术方案论证会

主要活动:基于光储直柔工程应用案例调研,开展不少于5项工程光储直柔技术方案论证。召开专家评审会,识别建筑光伏、建筑储能、直流配电设计、柔性控制策略等技术应用情况与系统方案的适用性、可行性、经济性等。

## 二、城市建筑光储直柔技术方案

## 2.1 城市区域光伏安装潜力分析

城市建筑群(区域)光伏可再生能源利用潜力和消纳能力评估,即通过理 想模型分析了不同规划条件下,区域建筑可利用屋顶光伏潜力和区域光伏本地 消纳情况。研究城市规划层面的协同措施,即在同一供配电台区下通过规划参 数的调整,提出有利于光伏本地消纳的规划原则。

#### 2.1.1 城市条件下区域光伏安装潜力

在复杂城市条件下,建筑之间的相互遮挡关系对建筑屋顶受到的辐射量有显著的影响。从光伏经济性角度考虑,并非所有的空闲屋面安装太阳能光伏都能够在系统寿命周期内产生正收益。在受到遮挡的屋面安装光伏,有可能其发电经济收益难于覆盖其设备初投资,或回收期过长,导致内部收益率低于建设的资金成本,使得屋顶光伏在经济上不可行。因此,影响光伏安装潜力的因素

包括了建筑之间的遮挡关系、光伏系统单位装机功率发电收益和光伏系统单位装机功率初投资三个因素。从环境角度考虑,建筑之间的遮挡关系同样影响着光伏系统在生命周期内的碳减排效果。如果在受到遮挡严重的屋面上安装光伏系统,其生命周期中的发电量难以抵消其在生产过程消耗的能量,其生命周期的减排量有可能是负值。这与利用光伏系统可再生能源的出发点背道而驰。因此,在城市建筑遮挡关系复杂的条件下,屋顶光伏系统的经济价值和环境价值都将呈现不均匀分布,不同屋顶的光伏系统安装潜力也并不相同。因此,需要对光伏系统在生命周期内光伏发电量收益和光伏系统投资平衡所需要的全年累计辐射量,即太阳能光伏经济辐射强度进行计算分析。

本文选择光伏经济安装比例作为评价区域光伏可安装容量潜力的指标,具体如下式所示:

$$\vartheta = \frac{A_R}{A\delta} \tag{1}$$

9----建筑密度, %:

A——区域场地面积,  $m^2$ :

δ——建筑密度,%;

 $A_R$ ——全年辐射量达到经济辐射强度的屋顶面积,  $m^2$ ;

公式(1)中经济辐射强度的确定受到光伏转换效率、组件寿命、初投资和电价机制或补贴程度等多方面的因素。在本文中为了简化模型,突出城市形态与可安装潜力的定量关系,将对相关因素做简化处理。具体来说,光伏组件转化效率按照普遍行业准入标准为 18%,光伏组件寿命周期为 15 年;采用分布式光伏系统普遍采用的"自发自用,余电上网"模式,光伏发电替代市政电源平均电价为 0.6 元/kWh,光伏系统初投资为 1080~1800 元/m²。在上述假设条件下,光伏的经济辐射强度计算为 1112kWh/(m²·a)。

#### 2.1.2 城市条件下区域光伏可利用潜力

光伏发电可利用潜力一般采用光伏发电的自用率和自给率两个指标描述。 自给率8′是在一定时段内,光伏发电直接被建筑利用的量与建筑用电总量的比值;自用率9″是光伏直接被建筑利用的量与光伏发电总量的比值,如下式。 自给率越高,说明建筑用电中光伏占比越大,利用可再生能源的比例越高。自 用率越高,说明光伏发电被利用的占比越大,可再生能源利用率越高。

$$\vartheta' = \frac{\sum P_{pv,use}}{\sum load} \tag{2}$$

$$\vartheta'' = \frac{\sum P_{pv,use}}{\sum P_{pv,generate}} \tag{3}$$

其中

θ'——为光伏发电自给率,%;

 $\sum P_{nv,use}$  ——为一段时间内光伏发电中被建筑直接利用的电量, kWh;

 $\sum load$  ——为一段时间内建筑用电量, kWh;

9"——光伏发电自用率,%;

 $\sum P_{pv,qenerate}$  ——为一段时间内光伏系统的理论发电量, kWh;

结合图 2-1 所示太阳能光伏系统发电量与建筑负荷曲线之间的关系可更好的理解自用率和自给率两者之间的关系。其中 c 区域为建筑用电负荷中由电网供电的电量, b 区域为光伏发电被建筑直接利用的电量, a 区域为光伏发电向电网输送的电量。由于受天气的影响,光伏发电的出力也会有很大的随机性和波动性。即使同一天,太阳能辐射强度变化都不一样。在分布式光伏大规模利用的情景下,向电网输送波动性的光伏发电会对电网的母线电压、调频、潮流、调峰等造成严重的影响。因此,在光伏规模化利用的情景下,应优先考虑光伏发电在建筑本地消纳,尽可能减小向电网的送电,即优先提高光伏发电的自给率约。

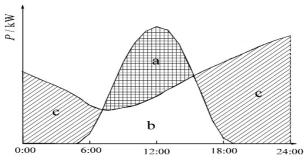


图 2-1 光伏发电出力和用电负荷之间的关系曲线

## 2.2 城市区域光伏消纳潜力分析

本节将以深圳市为例,采用深圳市典型建筑模型,通过改变规划设计参数得到不同城市区域的规划方案,用上述模型对其全年运行进行模拟,计算不同城市规划方案的光伏自给率与自用率,比较分析城市形态对可再生能源可利用

潜力的影响。

对于一个城市区域而言,是多种类型建筑混合分布。不同类型(或功能) 的区域建筑密度及容积率也会有差别。例如办公型和商业型区域,为了增加建 筑面积会提高规划的建筑密度或者容积率。城市区域主要可分为以下四类:

- 1、居住型:以居住建筑为主的区域空间(比例高于60%),同时为了保障居民生活需求,配套部分办公建筑(如物业)以及商业建筑(如超市);
- 2、商业型:以商业建筑为主的区域空间(比例高于60%),同时配套部分 办公建筑以及少量居住建筑:
- 3、办公型:以办公建筑为主的区域空间(比例高于60%),同时配套部分 商业建筑以及少量居住建筑:
- 4、混合型: 商业、办公、居住三类建筑面积都比较平均的区域(比例在 20%~40%)

表 5 所示为四种典型区域的规划设计参数:建筑混合比例、建筑密度、容积率范围。通过上述模型求解可以得出光伏发电量,从而来分析规划设计参数对能源应用的影响

区域类型	建筑密度	容积率	混合度
			居住: 商业: 办公
居住型	25 <sup>~</sup> 35%	1. 0 <sup>~</sup> 2. 5	80%: 10%: 10%%
商业型	25 <sup>~</sup> 35%	1. 0 <sup>~</sup> 2. 5	10%%: 80%: 10%%
办公型	25~35%	1. 0 <sup>~</sup> 2. 5	10%: 10%: 80%
混合型	25~35%	1. 0 <sup>2</sup> . 5	30%: 30%: 40%

表 2-4 区域类型对应的建筑混合比例

#### 2.2.1 建筑密度对光伏利用潜力的影响

图 2-8 所示居住型区域的光伏自给率和自用率受建筑密度的影响情况。可以看出光伏自给率随建筑密度增加而升高,自用率随着建筑密度增加而下降。对于相同的建筑规模,建筑密度越大意味着建筑屋顶面积的增加,光伏安装面积与发电量随之增加,提高了建筑光伏发电的自给比例。同时光伏发电量增加意味着光伏发电曲线与负荷不重合的比例进一步提高,更多的发电无法被使用从而导致自用率下降。当容积率为1时,光伏自给率随着建筑密度增加了 2.2%

(从 17.4%到 19.6%), 自用率下降了 2.1%(从 22.1%到 19.0%)。当容积率为 2.5 时, 光伏自给率同样增加了近 2.5%(从 11.7%到 13.2%), 而自用率下降了 5.2%(从 37.2%到 32.0%)。

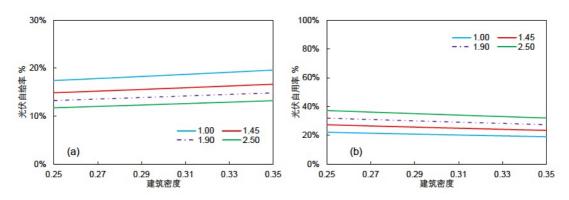


图 2-8 居住型区域的光伏自给率和自用率, 曲线代表不同容积率

图 2-9 所示商业型区域的光伏自给率和自用率受建筑密度的影响情况。对比可以看出商业型的光伏自给率高于居住型,且自用率较高。主要原因是商业建筑的负荷曲线与光伏发电曲线更吻合,因此自给率和自用率更高。自给率最高可达到 47.1%,最低情形自用率也能达到 93.0%。建筑密度对太阳能光伏利用的影响并不显著,尤其是对容积率很高的情形。当容积率为 2.5 时,自给率提升了 4%,自用率几乎不受影响。

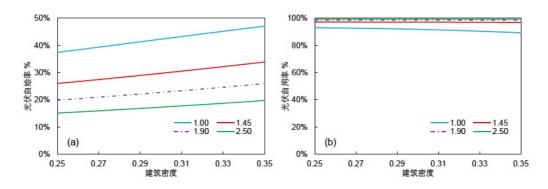


图 2-9 商业型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同容积率图 2-10 所示办公型区域的光伏自给率和自用率受建筑密度的影响情况。对比发现办公型和商业型光伏利用受建筑密度的影响趋势相同,办公型的自给率较高且自用率较低。这是因为即使办公建筑和商业建筑有着相似的负荷曲线(白天负荷高且平稳,夜晚负荷低),而办公建筑在周末会处于负荷较小的休息状态,因此总负荷小于商业建筑。该区域可达到 50%以上的自给率,而自用率则为 80%左右。

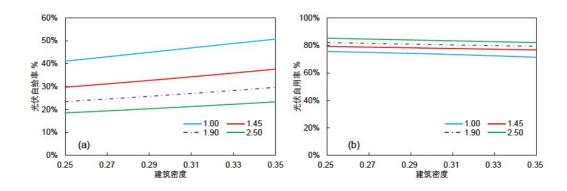


图 2-10 办公型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同容积率图 2-11 所示混合型区域的光伏自给率和自用率受建筑密度的影响情况。可以看出混合型区域既能保持较高的光伏自给率,又能保持光伏自用率不至下降过快。当容积率为 1.0 时,自给率由 34.3%上升到 42.3%,自用率在 65.7%到62.0%之间变化。当容积率为 2.5 时,自给率由 15.5%上升到 19.5%,自用率则不低于 72.0%。

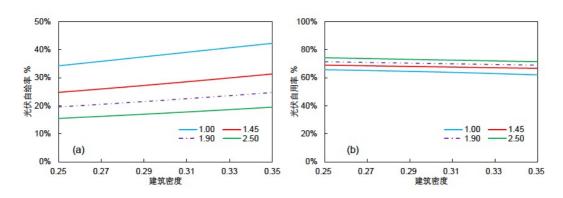


图 2-11 混合型区域的光伏自给率和自用率, 曲线代表不同容积率

#### 2.2.2 容积率对光伏利用潜力的影响

图 2-12 所示居住型区域的光伏自给率和自用率受容积率的影响情况。对比可发现,建筑容积率的影响将远大于建筑密度,并且光伏自给率随容积率增加而下降,自用率随容积率增加而升高。这是因为容积率越大意味着建筑负荷越大,而光伏面积和发电量不发生变化,所以该参数的提高降低了光伏发电自给率,提高了自用率。可以看出容积率的增加降低了 7%左右的自给率,同时提高了 13%左右的自用率。

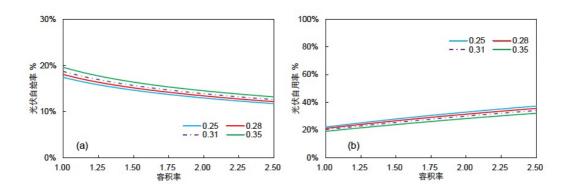


图 2-12 居住型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同建筑密度图 2-13 所示商业型区域的光伏自给率和自用率受容积率的影响情况。可以看出商业型区域光伏利用受建筑容积率影响小于居住型区域。这是因为商业建筑的光伏利用率比居住建筑高,建筑负荷的增加对改变这一比值作用不大。因此自用率的增加仅为 7%,几乎为居住建筑的一半。

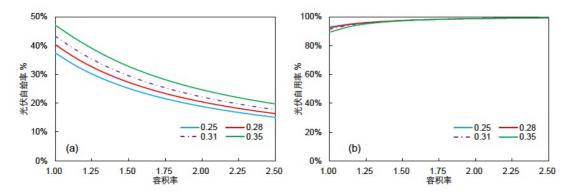


图 2-13 商业型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同建筑密度图 2-14 所示办公型区域的光伏自给率和自用率受容积率的影响情况。值得一提的是该区域的光伏自给率高于 20%,自用率甚至低于 80%。进一步证明了办公类建筑在周末休息日负荷较小时浪费了大量的光伏发电,可以有针对性的在规划中降低办公建筑比例来提高光伏自用率。

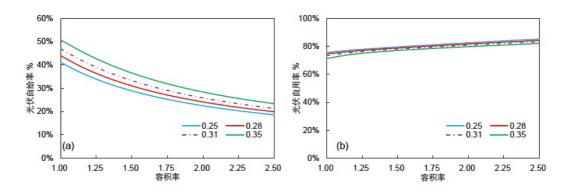


图 2-14 办公型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同建筑密度 图 2-15 所示混合型区域的光伏自给率和自用率受容积率的影响情况。该类区域光伏自给率大于 15%,自用率大于 62%。随着容积率的增加,自用率可以达到 71.4%。

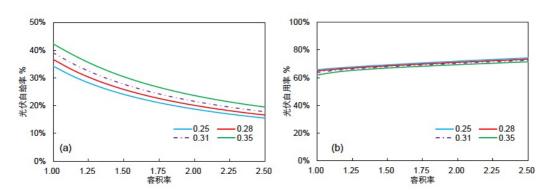


图 2-15 混合型区域的光伏自给率和自用率,曲线代表不同建筑密度

# 2.2.3 混合度对光伏利用潜力的影响

建筑混合度的变化与区域类型有关。分别为每种区域类型选择两种不同的混合度组合,因此四种类型共对应有八种案例,具体的建筑比例见表6所示。例如案例1、2同属于居住型区域,其中案例1表示混合度不高,更偏向居住功能的区域;案例2表示居住比例不高,更偏向混合型的区域。定义案例1和2是居住型;案例3和4是商业型;案例5和6是办公型;案例7和8是混合型。以此类推确定案例中建筑比例,规定区域的容积率为2.5,通过模拟计算全年区可再生能源利用情况。

表 2-5 不同建筑混合度下的区域光伏自给率和自用率

	混合度	建筑			密度			
号 -	居住: 商业: 办公	0. 25		0.	0.30		0. 35	
		自给率 自用率		自给率	自用率	自给率	自用率	

1	80%: 10%: 10%	12.6%	49.5%	13.1%	48.4%	13.7%	47.3%
2	60%: 20%: 20%	13.6%	60.4%	14.2%	59.5%	15.0%	58.5%
3	10%: 80%: 10%	14.2%	92.5%	15.1%	92.3%	16.1%	92.0%
4	20%: 60%: 20%	14.4%	84.9%	15.2%	84.5%	16.1%	84.1%
5	10%: 10%: 80%	16.6%	82.7%	17.5%	82.0%	18.5%	81.2%
6	20%: 20%: 60%	15.7%	79.4%	16.6%	78.6%	17.5%	77.9%
7	33%: 33%: 33%	14.6%	75.0%	15.4%	74.3%	16.3%	73.5%
8	40%: 30%: 30%	14.4%	71.3%	15.1%	70.5%	16.0%	69.8%

图 2-16、2-17 分别展示了光伏自给率和自用率受区域建筑混合度的影响。可以看出光伏自给率不超过 35%,且办公型区域的光伏自给率最高(案例 5、6),这与前文分析结果一致。居住型区域的光伏自给率最低(案例 1、2),这是由于该类型建筑的负荷与光伏发电曲线不一致导致。商业型和混合型区域的光伏自给率受建筑混合度的影响不大。

对于光伏自用率而言,除了居住型区域(案例 1、2),其他情形的自用率都在 60%以上。其中商业型区域的自用率可高达 90.4%,说明从充分利用光伏发电的角度来看,商业建筑具有明显的优势。其次是办公建筑,这是因为该建筑也具有白天负荷量大的特点,并不存在大量浪费光伏发电的情形,因此自用率较高。居住建筑白天负荷较低,则会因为光伏发电无法被使用降低其自用率,因此居住型区域的光伏用电只有 37%~51%。考虑上述光伏浪费的情形,可以采用储能对其剩余电能进行储存,夜间再释放给用户从而提高光伏利用率。同时也可以采用上网售电作为解决方案。

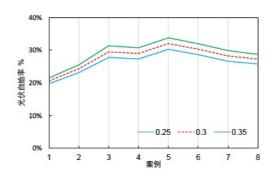


图 2-16 混合度对区域光伏自给率的影响

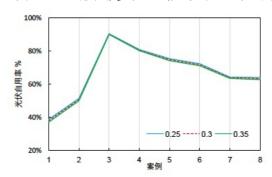


图 2-17 混合度对区域光伏自用率的影响

# 2.3 城市光储直柔系统规划案例分析

## 2.3.1 规划范围与市政条件

示范片区城市设计研究范围主要包括示范片区北、中两个片区。北至侨香路、南至深南大道、西至示范片区路、东至香梅路,包括示范片区北区(不含现状居住区)、中区,面积约1.9平方公里,建筑面积约337万m²,其中北区总建筑面积约41万m²,南区总建筑面积约296万m²。

北区目标为复合型高端会议交流平台,包含国际会议区及其高端配套酒店、园林会议区和精品会议楼,总建筑面积41万m²。会议中心主要用于承接重大国事活动,主席团圆桌会议、会议配套高端酒店,满足市、区两会要求。

中区功能布局及主导功能分为东、中、西三部分,总占地面积 68.5 公顷。中区目标为"品字形"公共文化设施的三大场馆,三大场馆包括改革开放博物馆、金融文化中心、国际演艺中心,紧邻深南大道,呈"品"字型在中区排列。中区西侧布局办公、商业、酒店、文化及配套设施。中区东侧布局办公、特色商业、酒店、文化、居住及配套设施;现状规划大厦南侧布局低密度、特色鲜明的商业活力街区。



图 2-18 总体布局

福田区示范片区供电面积 4.9 平方公里,2021 年区域最高用电负荷 75.78 兆瓦,均为 A+类供电区域,示范片区电网 CO2 排放量约为 4.09 万吨,绿电比例约为 75%。片区内部暂无电源,福田区内仅有一座电源,为南天燃气电厂,装机总容量为 243MW。现状区域供电变电站共计 10 座,实际供电能力1444.5MW。供电中压网格有 4 个,中压供电线路 28 回。低压网格有 39 个,配变 203 台,配变容量为 192.92MVA。

为支撑示范片区发展,总体供电保障策略分为近期和中远期。近期目标保障过渡期间重点项目高质量供电需求,重点打通现有电力通道堵点,特别是示范片区新金融区外围主干道、跨主干道、地铁通道的十字路口等,满足重要用户或敏感用户供电高可靠性要求,保障区域重要用户和敏感用户供电电源或线路来自不同路径。

中远期结合实际发展情况按需及时投产变电站。"十五五"期间亟需投产 3 座 110 千伏变电站,建议先投产金融街#1 站,其次金融街#2 站,最后投产金

融街南站并配套建设电力廊道,以保障近期重要公共建筑安全可靠用电需求和前期开发建设顺畅实施;构建清洁低碳、安全高效的能源体系。从"源网荷储"侧挖掘低碳手段,打造新型以新能源为主体的国际领先智慧新型电力系统,持续保障重要用户或敏感用户供电高可靠性要求。

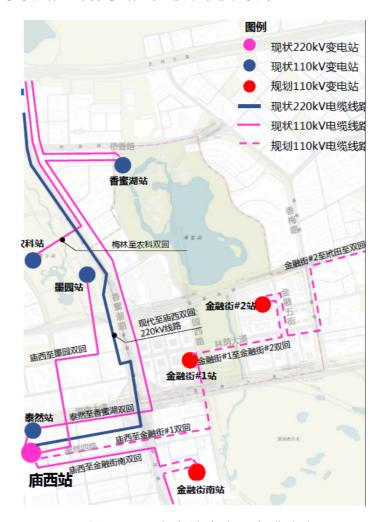


图 2-19 变电站分布及电缆路线

片区停车泊位按低值配建,考虑会议会展等特殊的功能需求,部分地块配建标准相应提高,北区和中区总配建停车泊位约1.4万个。北区停车配建:考虑到满足国务与政务会议期间停车供应,配建停车位取上限,停车位约为1500个;中区停车配建:经测算,示范片区中区停车泊位需求在1.08万-1.6万之间,考虑周边轨道公交发展,道路供应有限,建议适度控制停车配建,并通过公共停车场平衡,则示范片区中区停车泊位约为1.25万个泊位。示范片区中区在低配建标准基础上,利用公共停车场进行调控,以支撑金融街有效运作,建议设公共停车泊位约600个,分2处设置。

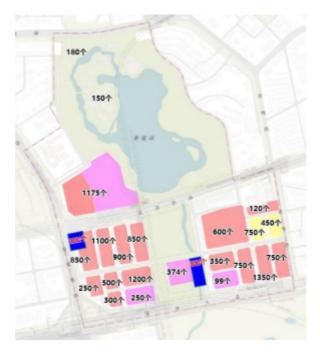


图 2-20 各地块停车位数量规划

# 2.3.2 区域用电负荷测算分析

### 2.3.2.1 各类建筑用电负荷情况

本项目建筑用电负荷强度主要依据深圳市大型公共建筑能耗监测平台数据。建筑类型涵盖了办公建筑、商业建筑、会议展览建筑、文化建筑、综合建筑以及其他建筑等。结合本项目建筑类型特点,分析各类建筑全年能耗情况,如图 2-21 所示。

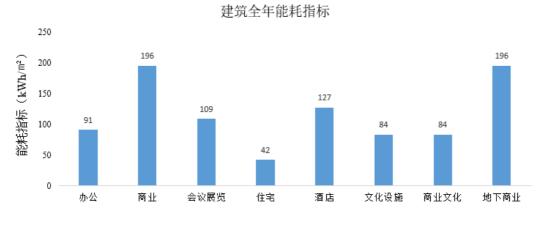


图 2-21 各类建筑全年能耗指标

从图 2-21 中可看出,商业建筑全年能耗最高,约 196kWh/m²;其次为酒店建筑,全年建筑能耗约 127kWh/m²;住宅建筑全年能耗最低,约 42kWh/m²。

基于深圳市大型公建能耗监测平台的建筑全年逐时能耗数据, 对不同类型

建筑的典型日(夏至日及冬至日)及典型日所在周逐时用电负荷特征进行分析,如图 2-22 所示。

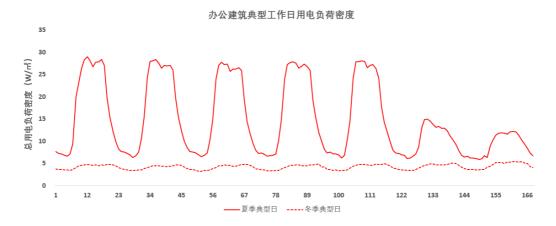


图 2-22a 办公建筑典型日用电负荷特征

商业建筑典型周用电负荷密度

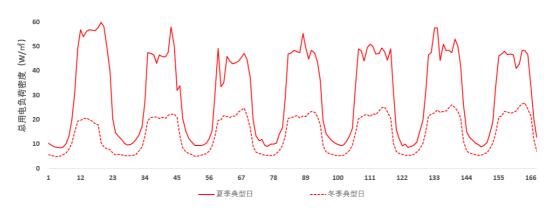


图 2-22b 商业建筑典型日用电负荷特征

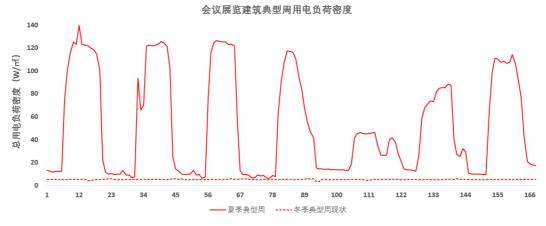


图 2-22c 会议展览建筑典型日用电负荷特征

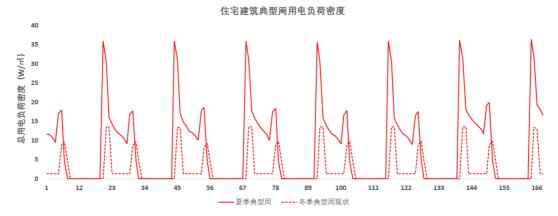


图 2-22d 住宅建筑典型日用电负荷特征

酒店建筑典型周用电负荷密度

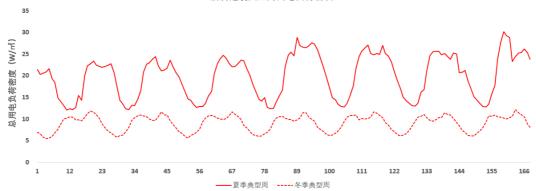


图 2-22e 酒店建筑典型日用电负荷特征

文化建筑典型周用电负荷密度

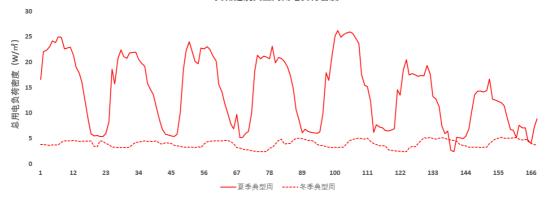


图 2-22f 文化建筑典型日用电负荷特征

从图 2-22 中可看出,办公建筑夏季典型工作日负荷最高时刻主要在 13 点,用电负荷密度约为 29W/m²,非工作日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,负荷最高时刻用电负荷密度约为 15W/m²;冬季典型日逐时用电负荷特征曲线相对平缓,整体用电负荷密度约为 5W/m²。商业建筑夏季典型日负荷最高时刻主要在 19 点,用电负荷密度约为 59W/m²;冬季典型日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,最高时刻用电负荷密度约为 28W/m²。会议展览建筑夏季典型

工作日负荷最高时刻主要在 12 点,用电负荷密度约为 50~140W/m², 当有展览活动时,用电负荷强度较大,无展览活动时,用电负荷强度较小; 冬季典型日逐时用电负荷特征曲线相对平缓,整体用电负荷密度约为 5W/m²。住宅建筑夏季典型日负荷最高时刻主要在 20 点,用电负荷密度约为 35W/m², 7 点至 19 点因大部分住宅人员不在室内,基本上无建筑能耗; 冬季典型日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,最高时刻用电负荷密度约为 14W/m²。酒店建筑夏季典型日负荷最高时刻主要在 22 点,用电负荷密度约为 28W/m²; 冬季典型日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,最高时刻用电负荷密度约为 10W/m²。文化建筑夏季典型工作日负荷最高时刻主要在 9 点,用电负荷密度约为 25W/m², 非工作日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,负荷最高时刻用电负荷密度约为 20W/m²; 冬季典型日逐时用电负荷特征曲线与工作日相似,负荷最高时刻用电负荷密度约为 5W/m²; 冬季典型日逐时用电负荷特征曲线相对平缓,整体用电负荷密度约为 5W/m²。整体上各类建筑的峰谷比相对较大,低谷时段负荷较低,有较大的削峰潜力和储能应用潜力。

### 3.2.2.2 区域用电负荷空间分布

本项目设计研究范围主要包括示范片区北、中两个片区,总用地面积约52万m²,总建筑面积约358万m²。其中,北区用电面积约18万m²,总建筑面积约41万m²;中区用电面积约34万m²,总建筑面积约317万m²。根据各类建筑用电负荷情况测算得到区域总体用电量为37432万kWh,北区年总用电量为4825万kWh,占区域总用电量13%;中区年总用电量为32607万kWh,占区域总用电量87%。项目各地块建筑用电负荷情况如图2-23所示。

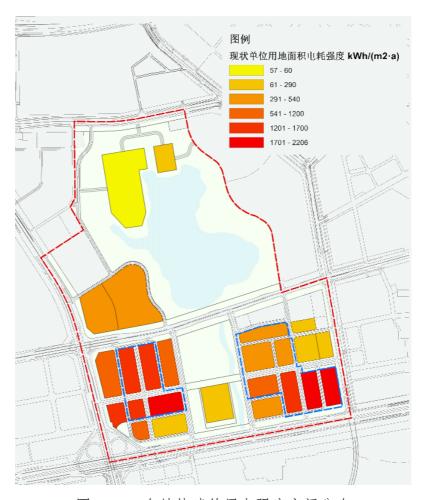


图 2-23 各地块建筑用电强度空间分布

### 2.3.2.3 区域用电负荷时间分布

由于项目区域各地块建设时序不同,国家、广东省及深圳市等相关绿色低碳政策和规定持续更新,为贯彻落实国家和地方相关政策要求,进一步提升本市建筑节能水平,根据各类建筑用电负荷情况,分析不同情景之下各类建筑用电负荷情况,如表 2-6 及图 2-24 所示。其中,情景 1 为满足《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB55015-2021 要求的区域用电负荷情况,情景 2 和情景3分别为满足《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019 中超低能耗建筑和近零能耗建筑要求的区域用电负荷情况。

表 2-6 不同情景下各类建筑全年能耗指标

建筑类型	办公	商业	会议展览	住宅	酒店	文化设施	商业文化	地下商业
现状值(kWh/m²)	91	196	109	42	127	84	84	196
情景1(kWh/m²)	73	157	87	34	102	67	67	157
情景 2(kWh/m²)	64	137	76	30	89	58	58	137
情景 3(kWh/m²)	55	118	66	25	76	50	50	118

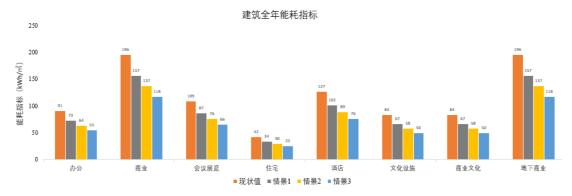


图 2-24 不同情景下各类建筑全年能耗情况

根据不同情景下各类建筑全年能耗情况,分析不同情景下区域建筑用电负荷情况,如表 2-7 及图 2-25 所示。其中,区域总体监测现状年用电量为 37432 万 kWh,峰值负荷 122.8MW;情景 1 年用电量为 30103 万 kWh,峰值负荷 98.2MW;情景 2 年用电量为 26418 万 kWh,峰值负荷 85.9MW;情景 3 年用电量为 22633 万 kWh,峰值负荷 73.6MW。北区监测现状年用电量为 4828 万 kWh,峰值负荷 39.3MW;情景 1 年用电量为 3860 万 kWh,峰值负荷 31.9MW;情景 2 年用电量为 3377 万 kWh,峰值负荷 27.9MW;情景 3 年用电量为 2895 万 kWh;峰值负荷 23.9MW。中区监测现状年用电量为 32607 万 kWh,峰值负荷 91.5MW;情景 1 年用电量为 26244 万 kWh,峰值负荷 73.2MW;情景 2 年用电量为 23041 万 kWh,峰值负荷 64.1MW;情景 3 年用电量为 19738 万 kWh;峰值负荷 54.9MW。

表 2-7 不同情景下各区域建筑用电负荷分布情况

地块分区	监测现状值	情景 1	情景 2	情景 3
北区(万 kWh)	4825	3860	3377	2895
中区(万 kWh)	32607	26244	23041	19738
区域总体(万	37432	30103	26418	22633
kWh)				

北区全年用电负荷

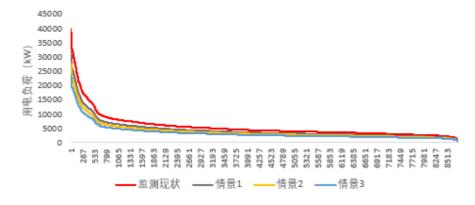


图 2-25a 不同情景下北区建筑全年用电负荷密度

# 中区全年用电负荷

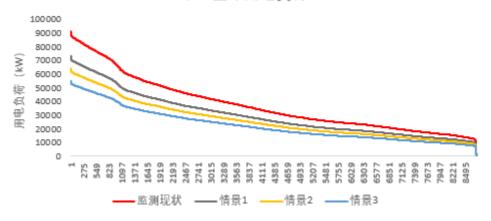


图 2-25b 不同情景下中区建筑全年用电负荷密度

# 区域总体全年用电负荷

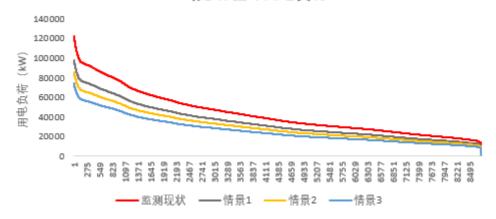


图 2-25c 不同情景下区域总体建筑全年用电负荷密度 根据电力规划,电力需求持续增长,至 2025年,示范片区负荷约为 157兆 瓦,至 2035年负荷约为 305兆瓦。从需求侧角度评估,在包括充电桩负荷影响 下,示范片区尖峰负荷特征明显,20%尖峰负荷运行时间<100h,全年时间占比约 1.1%。

#### 香蜜湖片区建筑负荷时间分布趋势

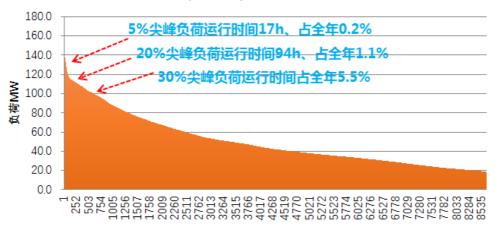


图 2-26 示范片区建筑负荷时间分布趋势

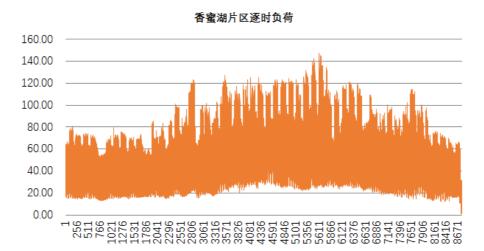


图 2-27 示范片区全年建筑逐时负荷分布

# 2.3.3 区域建筑太阳能光伏容量和消纳分析

本项目屋顶光伏安装面积为85151 m²(按可利用屋顶面积的50%),立面光伏安装面积为33331 m²(按立面年辐射量大于850kWh/m²的立面面积的10%)。根据屋顶及立面的全年太阳辐射模拟分析结果(如图2-28 所示),按屋面光伏组件发电效率20%及立面光伏组件发电效率15%进行计算,得到项目北区整体光伏装机容量为3.67MWp,年光伏发电量为409.46万kWh;中区整体光伏装机容量为13.32MWp,年光伏发电量为1179.56万kWh;项目整体光伏装机容量为16.99MWp,年光伏发电量为1589.02万kWh。

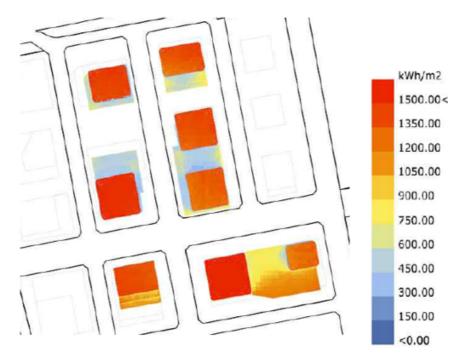


图 2-28a 屋面太阳辐射模拟示意图

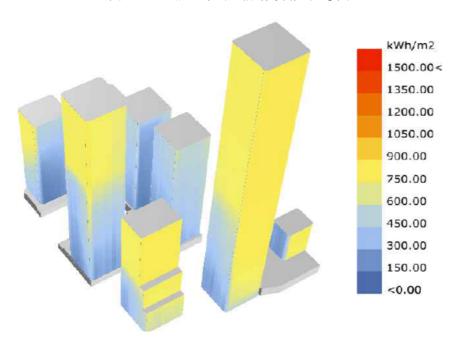


图 2-28b 立面太阳辐射模拟示意图

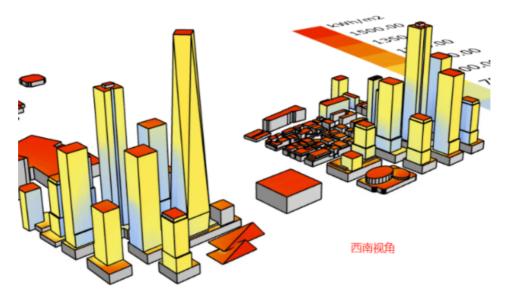


图 2-28c 片区整体太阳辐射模拟示意图 表 2-8 区域建筑光伏发电情况

	北	区整体光伏测算情况									
	光伏安装面积(m²)	装机容量 (MWp)	光伏发电量(万 kWh)								
屋面	20645	4.13	403.06								
立面	0	0	0								
整体	20645	403.06									
中区整体光伏测算情况											
	光伏安装面积(m²)	装机容量 (MWp)	光伏发电量(万 kWh)								
屋面	64506	12.90	1217.49								
立面	33331	5.00	342.62								
整体	97837	17.90	1560.11								
	项	目整体光伏测算情况									
	光伏安装面积(m²)	装机容量(MWp)	光伏发电量(万 kWh)								
屋面	85151	17.03	1620.55								
立面	33331	5.00	342.62								
整体	118482	22.03	1963.17								

根据建筑光伏发电情况,结合各地块深圳市《公共建筑节能设计标准》 (深标情景)及规划定位要求(规划情景)要求,分析得到各地块太阳能光伏 装机容量及可再生能源利用情况,如表 2-8 及图 2-29、图 2-30、图 2-31 所示。



图 2-29 各地块规划情景下光伏装机容量



图 2-30 各地块规划情景下可再生能源利用率



图 2-31 各地块规划情景下可再生能源潜力布局示意图

# 2.3.4 用户侧储能系统

### 2.3.4.1 储能应用场景

用户侧储能应用场景主要包括:削峰填谷、容量管理、需求响应、备用电源、光伏消纳等。示范片区根据每个柔性单元或地块的建筑负荷特征、光伏资源条件、建筑功能特点,综合考虑电化学储能的规划布局。根据不同的应用场景与目的,储能主要分为功率型应用、容量型应用、以及作为备用电源的应急保障型应用。

表 2-9 用户侧储能应用场景

商业模式	应用场景	应用类型
削峰填谷	商业/办公建筑	容量型
需量调节	会展类建筑	功率型
需求侧响应	各类建筑	功率型/容量型
新能源消纳	用能强度低/光伏容量大	容量型

削峰填谷: 2022 年开始深圳的电价增加尖峰期,对应的时间段也进行了相应的调整。峰时段为 10-12 点、14-19 点;谷时段为 0-8 点;其余时段为平段。深圳地区峰平谷比价为 1.53:1:0.32。非深圳地区峰平谷比价为 1.7:1:0.38。尖段电价执行时间为 7 月、8 月和 9 月三个整月,以及其他月份中日最高气温达到 35℃及以上的高温天。执行时段为 11-12 时、15-17 时共三个小时。尖段电价在上述峰谷分时电价的峰段电价基础上上浮 25%。用户侧储能系统在电价谷时从电网购买低价电能,在电价峰时或尖峰时供给给负载使用,从而减少企业电费支出。

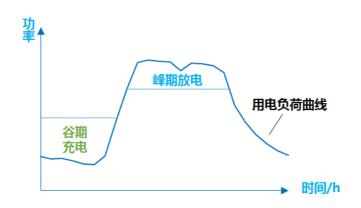


图 2-32 削峰填谷场景示意

容量管理: 两部制电价包含电量电价和容量电价, 电量电价根据用户的实际用电量计算, 容量电价可以选择按照变压器固定容量计算或者按照变压器最大需量计算。两种电费分别计算后相加, 即为用户所应付的全部电费。

采用两部制电价的电费成本计算方法工商业储能系统功率可以在负载用电峰值时,可以替代变压器容量,降低变压器总体容量需求的作用,从而减少变压器扩容建设成本以及后期的固定容量电费或者最大需量电费。针对电力负荷容量不充足,又有大量充电桩建设的工商业场景,可以免除变压器扩容带来的长周期和高昂费用,通过储能系统即可实现动态扩容。



图 2-33 需量管理场景示意

备用电源:示范片区包含金融总部、国际会议、高端酒店等重点场所,对电网连续性要求较高,用户侧储能系统在极端情况电网停电时,可以作为备用电源,可以替代传统的 UPS 电源的功能,为建筑的重点负荷提供后备电源保障,应对突发停电事故。

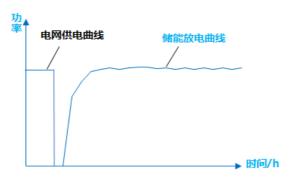


图 2-34 备用电源场景示意

光伏消纳:针对光伏发电出力曲线和负载消耗曲线存在时空上的不匹配,在光伏发电输出较大时,将暂时无法自用的电能储存到电池中,在光伏发电输出不足时,将电池中的电能释放给电力负荷使用,实现对光伏电源的"削峰填谷",最大化提升光伏发电的自发自用比例,最大化降低用电成本。

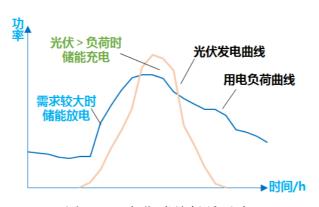


图 2-35 光伏消纳场景示意

需求响应: 片区内用户侧储能通过一体化负荷聚合平台, 根据需求响应指

令,参与电力市场、辅助服务市场等交易,进一步提升投资收益。

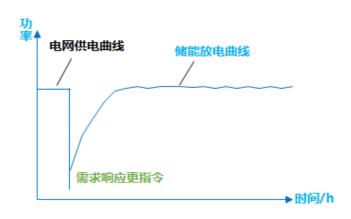


图 2-36 需求响应场景示意

### 2.3.4.2 储能经济性分析

用户侧储能系统不同于大规模储能调峰调频电站,它的主要目的是利用电 网峰谷差价来实现投资回报,主要负荷是满足自身内部的电力需求,实现光伏 发电最大化自发自用,或者通过峰谷价差套利。

在全国各地区峰谷价差拉大、增设尖峰电价的政策下,用户侧安装储能的 经济性已显著增强。未来,随着电力市场的加速构建、虚拟电厂技术的成熟应 用,电力现货交易及电力辅助服务也将成为用户侧储能的盈利渠道。随着储能 电池成本的降低,储能系统的投资成本必然更加优化,用户侧储能的市场的潜 力将会进一步得到激发。

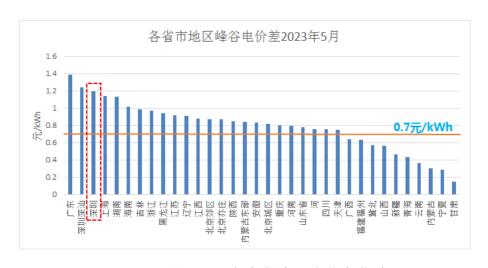


图 2-37 各省市地区峰谷电价差

根据深圳市分时电价政策,结合用户侧储能峰谷套利与容量管理,随着需求响应次数的增加,用户侧储能系统的静态回收期将大幅度缩减,在目前不同储能系统成本条件下,静态回收期约为7.4年 $^{\sim}1.3$ 年。

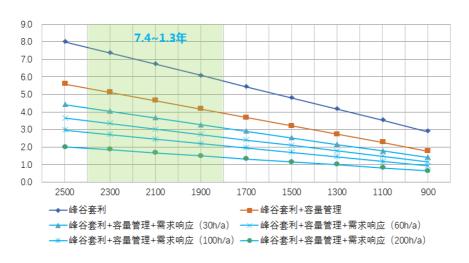


图 2-38 储能不同盈利模式 (静态回收期)

### 2.3.4.3 储能系统容量测算

以北区某地块为例,建筑功能主要为会议中心与酒店,总建筑面积约37万m²,容积率分别为4.24和1.99。项目太阳能光伏装机容量约1.8MW,酒店负荷稳定,基础负荷有利于光伏消纳,可实现光伏本地100%消纳。同时会展典型日负荷峰值高、用电负荷波动性较大,对光伏消纳和经济运行都有不利影响,其尖峰负荷特征如下图所示,基于削峰容量管理与应急保障需求,建议配置功率型储能(2MW/2MWh)。

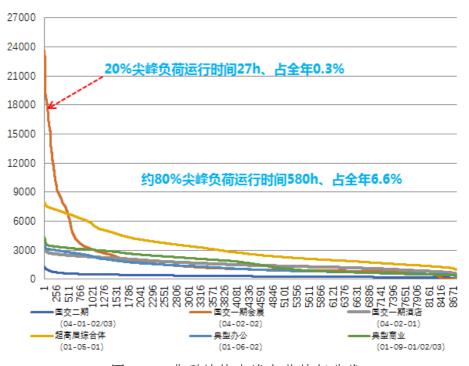


图 2-39 典型地块尖峰负荷特征曲线



图 2-40 空调季典型周用电负荷与光伏发电

表 2-10 储能配置建议

20%尖 峰负荷	地块内光 伏出力		期 性互联	储能配置 (功率型)	盈利模式
4.7MW	O. 9MW	光伏功率支持 1MW	储能功率支持 1MW	2MW/2MWh	峰谷套利 容量管理需 求响应

以北区二期某地块为例,建筑功能为主为国际会议中心与酒店,总建筑面积约4.1万m²,容积率分别为0.45和0.57。建筑布局分散、用电强度低,根据太阳能光伏布局潜力分析,该地块合计规划太阳能光伏装机容量1.8MW,因此对于过渡季、非空调季,光伏发电量高于建筑用电量,需要重点考虑容量型储能移峰填谷。

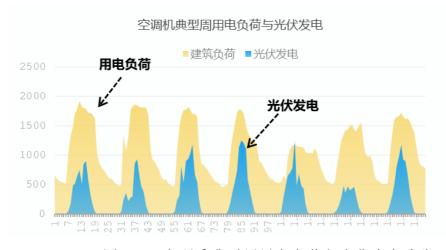


图 2-41 空调季典型周用电负荷与光伏发电曲线



图 2-42 非空调季典型周用电负荷与光伏发电曲线

典型日	建筑用 电量 KWh/d	光伏发 电量 KWh/d	光伏余 量 KWh/d	直流柔 性互联 (5G基 站用 电)	剩余余量	无日照期 间建筑用 电量 KWh/d	储能配 置 (容量 型)	盈利模式
夏季最 大负荷 日	15251	7766	-646	1600		4479		峰谷 套利
过渡季 典型日	5678	6149	-3414	1600	1814	2256	1MW/2MWh	+ 需求
冬季典 型日	5582	5571	-3208	1600	1608	2869		响应

示范片区中区主要功能为金融总部、商业办公等,对电网连续性要求较高,用户侧储能系统在极端情况电网停电时,可以作为备用电源,可以替代传统的 UPS 电源的功能,为建筑的重点负荷提供后备电源保障,应对突发停电事故。因此对于中区内地块,通过设置应急保障型电化学储能,以满足其备用电源的需求。为保障中区约 10%重点负荷,连续供电 60 分钟以上,中区合计配置6.4MW/6.4NMh 电化学储能。结合柔性单元调节需求与配电系统架构,预留储能配置空间,引导多元储能场景,片区电化学储能规划布局约 9.7MW/10.7MWh。

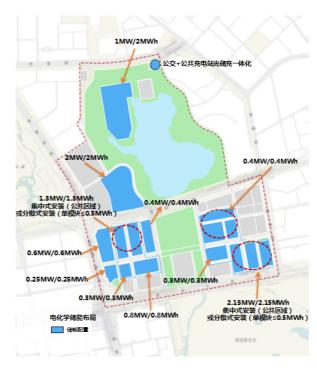


图 2-43 各地块电化学储能布局示意图

### 2.3.4.4 充电桩等效储能容量测算

示范片区根据交通规划将设置 1.4万个停车位, 北区预计设置 1500 个停车位, 包含一个超级快充站和一个光储充一体化站; 中区预计设置 1.25万个停车位, 包含中区和西区的两个公共停车场停车位。电力规划按照 7800 个充电桩进行规划, 我们将 7800 个充电桩分配到每个地块。充电桩全部按照有序充电桩设计, 其中每个地块 10%的充电桩为 20kW 的双向直流充电桩; 其余 90%的充电桩均为 7kW 的交流充电桩; 超级快充站配置有 4 个充电功率为 600kW 的超充桩; 光储充一体化站有 8 个 120kW 的公共交通充电桩和 8 个 60kW 的快充充电桩。

充电桩考虑同时使用情况,设置同时使用系数 0.4,即充电桩的峰值充电功率为该地块总容量的 40%。有序充电最低功率为各类充电桩功率的 50%,放电功率为 100%,各类充电桩充电功率、有序充电功率和放电功率如下表所示。

充电桩类型	充电功率	有序充电最低 功率	放电功率
7kW 交流充电桩	7kW	3.5kW	-
10kW 直流充电桩	10kW	5 kW	10kW
60kW 社会快充桩	60kW	30 kW	60kW
120kW 公共快充桩	120kW	60 kW	120kW
600kW 超充桩	600kW	300 kW	600kW

有序充电时间和有序放电时间设置为 8: 00  $^{\sim}$ 19:00,假定在电力紧张的峰价时间  $10^{\sim}$ 12 时和  $14^{\sim}$ 18 时的有序充电功率为最低值 50%,平价时间有序充电功率为 70%;在电力紧张的峰价时间  $10^{\sim}$ 12 时和  $14^{\sim}$ 18 时的有序放电功率为最大值 100%,平价时间有序放电功率为 70%。

示范片区在有序充放电基础上,试点 V2B/V2G 模式,挖掘充电桩可调资源,规划可调负荷约 10MW。充分利用建筑变压器容量资源,通过电动车有序充电、双向充放电与建筑用电负荷协同,增加建筑用电柔性,并提升建筑用电应急保障、减少电网增容压力。



图 2-44 有序充电与 V2G 布局示意

# 2.3.5 区域"光储直柔"新型能源系统架构

构建城市区域"光储直柔"新型能源系统,通过技术引领、项目支撑、先行先试、场景示范,体现世界一流未来城市发展理念,推动能源高质量发展。示范片区新型能源系统,通过区域负荷聚集与虚拟电厂建设,聚合片区 50MW 以上柔性资源,消除区域 30%以上尖峰负荷,优化电网峰谷负荷,延缓或减少电

网投资建设。

- 聚合区域可调资源潜力≥50MW (消除区域 30%以上尖峰负荷)
- 可再生能源利用率达到 5.6%
- 主动有效降低度电成本及动态碳排放责任因子

通过对区域负荷和光伏发电的规律的分析,根据每个规划单元或地块的建筑负荷特征、光伏资源条件、建筑功能特点,综合考虑电化学储能的规划布局,提出了交直流混合的区域新型配电系统方案。方案根据削峰填谷、容量管理、需求响应、备用电源、光伏消纳等不同的应用目的,规划了各规划单元或地块的用户侧储能形式和容量配置。根据深圳市分时电价政策,在目前不同储能系统成本条件下,静态回收期约为7.4年,后继结合用户侧储能峰谷套利与容量管理,随着电力辅助服务市场的逐步成熟,需求响应次数的增加,系统的静态回收期将大幅度缩减。

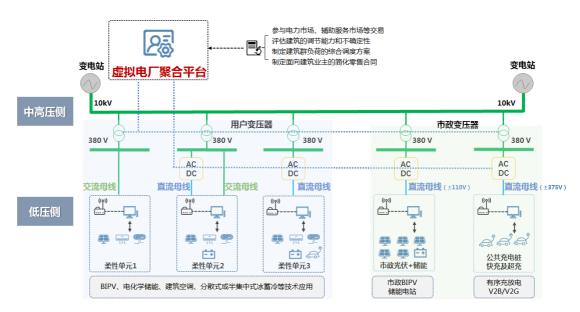


图 2-45 新型能源系统架构

# 三、光储直柔示范工程方案咨询

# 3.1 执行组织情况

# 3.1.1 方案论证会组织

随着国家双碳"1+N"政策体系的构建,光储直柔作为城乡建设领域绿色节能低碳发展的重要技术日益受到关注。为更好地响应《国务院关于印发 2030 年

前碳达峰行动方案的通知》"提高建筑终端电气化水平,建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的'光储直柔'建筑"的相关要求。截至 2023 年 4 月,在能源基金会支持下,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会共组织两期"光储直柔工程技术方案专家论证会",通过征集行业内工程示范案例,邀请专家对技术方案进行论证,推进光储直柔技术在工程上的应用与推广。

2022年10月20日,光储直柔工程技术方案专家论证会(第一期)在北京召开。论证会由中国建筑节能协会光储直柔专业委员会郝斌秘书长主持。论证会邀请了9位行业专家,分别为清华大学江亿院士、中国建筑节能协会倪江波副会长、清华大学杨旭东教授、清华大学刘晓华教授、北京交通大学童亦斌副教授、中国中建设计研究院有限公司电气总工韩占强、北京市建筑设计研究院有限公司副总工逄京、国网能源研究院教授级高工代贤忠、中国建筑节能协会光储直柔专业委员会郝斌秘书长。



图 3-1 第一期专家论证会现场专家

第一期论证会就北京三里屯太古里北区直流微电网工程项目以及宁夏回族自治区西吉县偏城乡中心小学光储直柔项目的技术方案展开了专家论证。



图 3-2 北京三里屯太古里和宁夏西吉县偏城乡中心小学汇报

2023年4月14日,光储直柔工程技术方案专家论证会(第二期)在深圳未来大厦召开。论证会由中国建筑节能协会光储直柔专业委员会郝斌秘书长主持,能源基金会高级项目专员付颖雨进行了致辞。会议邀请了9位行业专家,

分别为清华大学杨旭东教授、香港理工大学王盛卫教授、北京交通大学童亦斌 副教授、中国家用电器研究院刘挺院长、国家发展和改革委员会能源研究所张 建国副研究员、中国科学院广州能源研究所舒杰研究员、中国工程研究院有限 公司周辉副所长、中国建筑科学研究院陈曦教授级高级工程师、大金(中国) 投资有限公司钟鸣部长。



图 3-3 第二期专家论证会现场专家

第二期论证会由深圳供电局有限公司技术专家王静对深圳市福田供电局办 公楼光储直柔改造项目进行了汇报,万科集团技术经理吴轶群及技术支撑单位 电气部负责人邓梓荃对嘉定未来城市光储直柔项目进行了汇报。

各位专家在听取了项目汇报后,对项目技术方案进行了质询,项目组与专家充分交换了意见,同时专家对项目下一步工作提出了宝贵的优化建议,为行业提供更多可参考的工程应用经验,助推光储直柔行业发展。

2023 年 8 月 2 日第三期"光储直柔工程技术方案专家论证会在青岛海尔国创实验室召开,论证会对"深圳茜坑水厂光储直柔项目"及"海尔光储直柔工程示范实验室"分别进行方案论证。

## 3.1.2 宣传推广情况

直流建筑联盟公众号对两期光储直柔工程技术方案专家论证会分别进行了 推送,得到了行业内外的广泛关注和支持,对项目落地具有积极的推动作用, 为光储直柔技术的实际应用提供了有力的支持和推广。

除此以外,论证会的成功举办激发了社会对光储直柔的关注和认识。这将鼓励企事业单位建设以"光储直柔"为主要特征的新型建筑电力系统,发展柔性用电建筑,推广可再生能源建筑应用,为实现能源的高效利用和可持续发展做出了积极贡献。



## 新闻|光储直柔工程技术方案专家论证会(第一...原创

助推光储直柔技术落地实践!

...直柔工程技术方案专家论证会(第一期)"(以下简称论证会)顺利召...

① 1,107

 $\bigcap$  0



# 新闻 | 光储直柔工程技术方案专家论证会(第... 原创

相会未来大厦,光储直桑工程技术方案专家论证会第二期召开

...直柔工程技术方案专家论证会(第二期)"(以下简称论证会)顺利召...

758

\$ 2 ₺ 6 🗔 0

图 3-6 光储直柔工程技术方案专家论证会推送情况

# 3.2 工程方案情况

### 3.2.1 三里屯太古里直流微电网设计

### (1) 项目概况

三里屯太古里是由太古房地产开发的商业综合体项目,位于北京市朝阳区 工体北路与三里屯路交汇处,项目占地 5.3 万平方米,由 19 座低密度的当代建 筑布局而成。三里屯太古里的定位是综合休闲娱乐区, 它包括了世界一、二线 知名品牌的旗舰店、各国美食以及独具特色的五星级精品酒店,吸引着来自四 面八方的艺术家、文人和游客。

三里屯太古里直流微电网项目包含三里屯太古里北区 15#楼、红馆及北区 地下车库直流配电间。其中15号楼,建筑高度16.78米,地上4层,地下1 层, 总建筑面积 2141.51 平方米, 地上 1727.63 平方米, 地下 413.88 平方米, 为 原址重建商业建筑。红馆地上2层,地下0层,总建筑面积989平方米,为既 有建筑。北区地下车库为二期建设内容包含直流控制室和地下车库直流双向充 申桩。

三里屯太古里直流微电网项目光储直柔范围覆盖两栋商业建筑和部分地下 车库,配电系统采用交直流混合供电,其中直流系统采用交流电网、光伏、储 能等多种能源接入, 为楼宇的供申可靠性提供保障: 项目整体定位不仅能实现 基本的光伏发电和直流供电功能,还具备开放的控制接口,可根据园区需要灵 活设计和调整控制策略来实现园区互联互通,满足建筑电网取电与直流配电系 统的联合调度。各组成部分通过直流母线相连,在光储直柔控制器的协调下运

行工作,提升光伏发电就地消纳利用率,降低各设备电能变换损耗,且可形成 柔性可控的电网微节点,成为未来智能电网的重要组成部分,具有科技示范意 义和推广价值。

本项目选取能源资源消费和碳排放相对集中、建筑业态功能多样、负荷需求波动大及社会影响力大的商业建筑场景,集成应用零碳规划设计方法、超低能耗建筑技术、可再生能源利用以及"光储直柔"新型电力系统等零碳建筑关键技术,实现运行阶段零碳商业建筑建设目标。本项目达到国内首个"光储直柔"三星级标准的商业示范建筑,同时项目运行按照"峰、谷、尖、平"电价柔性调节,实现用电经济性建筑与城市电网互动,通过柔性电网取电消纳绿色电力。

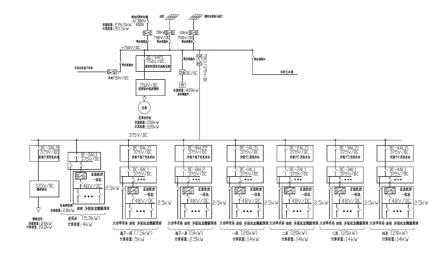


图 3-7 三里屯太古里项目位置

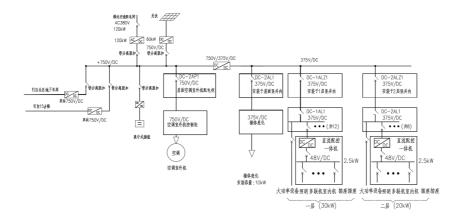
本项目采用环形联接园区型直流微电网,进一步提高供电可靠性,后期系统扩展更加灵活。各楼间采用双向隔离型 DC/DC 进行互联,将大型直流微网隔离区分为互不直连的小型直流微网,降低一处故障导致全网瘫痪的概率,同时 DC/DC 可以精准的控制功率的流向和大小,软硬件协同充分保障项目可靠运行。

#### (2) 光储直柔架构

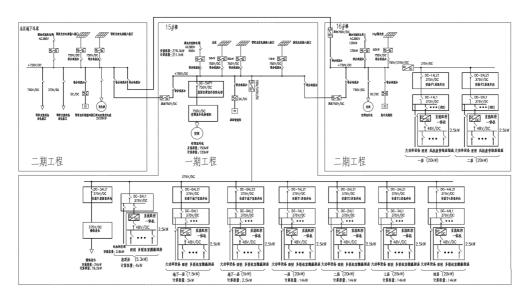
15#楼直流配电架构如下图:



16#楼直流配电系统架构如下图:



园区光储直柔架构如下:



#### (3) 系统配置

15 号楼直流母线通过七台 30kW AC/DC 变换器连接交流侧三相 AC380V; 通过一台 50kW DC/DC 变换器连接 15 号楼屋顶光伏汇流箱,通过一台 10kW

DC/DC 变换器连接 15 号楼屋顶测试区光伏;通过五台 30kW DC/DC 储能变换器连接储能电源;通过四台 30kW DC/DC 变换器转换母线电压;预留两台 30kWDC/DC 变换器,正向 30kW,反向 30kW,为园区互联使用。

红馆直流母线通过四台 30kW AC/DC 变换器连接交流侧三相 AC380V;通过一台 50kW DC/DC 变换器连接屋顶光伏汇流箱;通过一台 30kW DC/DC 变换器转换母线电压;预留四台 30kWDC/DC 变换器,正向 60kW,反向 60kW,为与15号楼互联使用;预留四台 30kWDC/DC 变换器,正向 60kW,反向 60kW,为与北区地库互联使用。

### (4) 经济性分析

根据北京市非居民销售电价表可知一般工商业 1-10 千伏电压等级的电价及 业主下半年的直购电价,光伏发电时间大部分处于高峰电价时段,可估算本项 目自用电价平均约为 0.992 元/KWh;

15#楼屋顶安装太阳能发电组件 240 m²,安装容量约 46.965 KWp,年发电量 5.17 万 KWh; 16#屋顶安装太阳能发电组件 300 m²,安装容量约 51.59KWp,年 发电量 5.72 万 KWh。总计年节约电费 10.8 万元。

					其中		分日	寸电度用电价料	(元/千瓦时	<del>)</del>	容(喬) 1	k用电价格
用电分类		电压等级	电度用电价格 (元/千瓦时)	代理购电 价格	电度 输配电价	政府性基金及附加	尖峰时段	高峰时段	平时段	低谷时段	最大需量 (元/千瓦·月)	变压器容量 (元/千伏 安·月)
		不満1千伏	0.850220		0.406000	0.027168	1.208258	1.138764	0.850220	0.590124		
	一般工商业	1~10 千伏	0.833320	1 1	0.389100	0.027168	1.195829	1.125928	0.833320	0.573224		
		35 千伏	0.809120	] [	0.364900	0.027168	1.176099	1.105792	0.809120	0.540896		
	_1.101 SE	110 千伏	0.762320	[	0.318100	0.027168	1.145352	1.067120	0.762320	0.490032		
城区		220 千伏及以上	0.722320	0.417052	0.278100	0.027168	1.109863	1.031184	0.722320	0.441904		
		1~10 千伏	0.648420		0.204200	0.027168	0.917050	0.855684	0.648420	0.449284	48	32
	大工业	35 千伏	0.627920		0.183700	0.027168	0.896550	0.835184	0.627920	0.424720	48	32
	VT-W	110 千伏	0.603620		0.159400	0.027168	0.876721	0.814948	0.603620	0.396356	48	32
	1	220 千伏及以上	0.602120		0.157900	0.027168	0.884162	0.821576	0.602120	0.390792	48	32

注 表中城区指东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区。

柔性电网取电,灵活运用集中式储能削峰填谷平抑电价,实现度电成本最低,储能电池在电价低谷充电,高峰及尖峰供电,按照度电节约0.611元估算,年节约电费6.69万元。

# 3.2.2 宁夏回族自治区西吉县偏城乡中心小学项目

### (1) 项目概况

1 栋教学楼,包括#1 号教学楼、#2 号教学楼和连廊,建筑面积 3193.26 m²。建筑层数地上 3 层,建筑高度 15.468 米,项目建成后包括 24 间教室,3

间办公室, 3 间卫生间, 可满足 600 多名师生日常教学活动及行政办公。

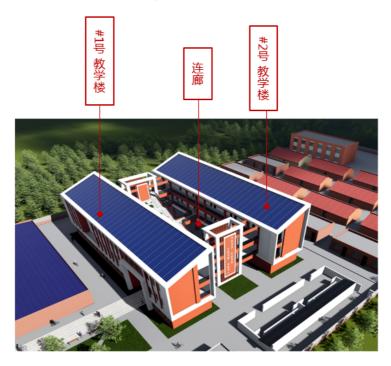


图 3-8 小学项目外观

本项目在充分借鉴了传统建筑的能源利用方式和建造方式的基础上,拟集成采用六项主要技术,分别为: DC&AC 配电系统、光伏直驱采暖、太阳能+水源热泵+空气源热泵采暖、光伏直流照明、建筑光伏一体化模块化设计与应用和建筑主体结构关键节点模块化设计与应用。



图 3-9 小学项目技术应用示意图

六项主要技术的应用的设想主要包括:

通过建筑直流配电、储能和光伏直驱终端设备等技术的应用,不断提高建

筑光伏电力的效率和灵活性,持续挖掘建筑光伏电力的价值幅度;

研究适宜于乡村建设领域应用的光伏建筑一体化产品,通过模块化设计方式提高建筑光伏一体化工程技术水平、降低建筑光伏一体化综合建设成本,致力于创造出一种可代替当前乡村建筑的集成化建筑光伏成套房屋产品,引领一种新的房屋建造和消费理念。

### (2) 主要技术

本项目拟采用市电交流电源和光伏直流电源相结合、以光伏直流电源为主,配置一定容量储能电源的供电方式。教学楼配电系统设置为 DC220V 和AC380V 双母线, DC220V 母线为楼内的主要负荷即直流电暖器和直流灯具供电, AC380V 母线为除主要负荷以外的其他一般设备供电;光伏直流电源(装机容量约 158.4kW)通过光伏 DC/DC 变换器接入直流母线,储能电源通过双向 DC/DC 换流器接入直流母线;光伏电源优先向直流母线供电,多余时可向储能电源充电或并网发电;本项目储能容量为 38kWh。

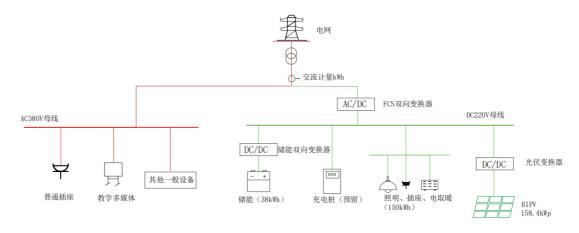


图 3-10 小学项目配电系统示意图

### 1) 光伏直驱供暖

本项目#1 号教学楼拟全部采用光伏直驱供暖,供暖总面积 1166.5 m²,终端取暖设备为石墨烯直流电直热器。

序号	房间	房间尺寸 长×宽 (m²)	单间面 积 (m²)	房间 数量	采暖设备选型	供电电压	功率	设备 数量
1	教室	9x7.2m	64.8	4间	796*190*670mm	DC220- 300V	1600w (12- 15 m²)	12 台
2	会议室	9.0x10.2m	91.8	1间	796*190*670mm	DC220- 300V	1600w (12- 15 m²)	4 台

1	教室	9x7.2m	64.8	4间	796*190*670mm	DC220- 300V	1600w (12- 15 m²)	12 台
1	教室	9x7.2m	64.8	5间	796*190*670mm	DC220- 300V	1600w (12- 15 m²)	15 台
2	教室休 息室	9x4.3m	38.7	1 间	786*210*526mm	DC220- 300V	2000w (18- 20 m²)	2 台



名称	直流石墨烯取暖气
功率	2000W
尺寸	宽786*厚210*高526 ( mm )
1	供电电压: DC220~DC300V



名称	直流蓄热式电暖气
功率	1600W
尺寸	796*190*670mm
供电电压: DC220V~DC300V	

图 3-11 光伏直驱取暖器产品示意图

石墨烯直流电直热器主要由光伏直流电源通过 DC220V 母线向其供电。光伏电站装机容量 158.4kW,石墨烯电直热器总功率 72.8kW,光伏输出效率达到 50%的情况下即可完全满足光伏直驱供暖的用电需求;同时,通过室内温控以及同开率等智能化控制方式,可一进步节约供暖电力。按照本项目 2:1 的配置比例,直驱供暖可实现 100%由光伏供给。

## 2) 太阳能+空气源热泵+水源热泵供暖

太阳能+水源热泵+空气源热泵清洁供热系统由平板式太阳能热水器、水源热泵及空气源热泵组成,平板式太阳能热水器是系统的主要低温热源,空气源热泵为辅助热源。本项目#2号教学楼拟采用太阳能+水源热泵+空气源热泵供暖,供暖总面积1165.5 m²,终端散热设备普通暖气片。

序号	设备/材料	规格型号	单位	数量
1	平板式太阳能集热器	2000*1000*85	m²	140
2	水源热泵	30 匹	台	1
3	空气源热泵	60 匹	台	1

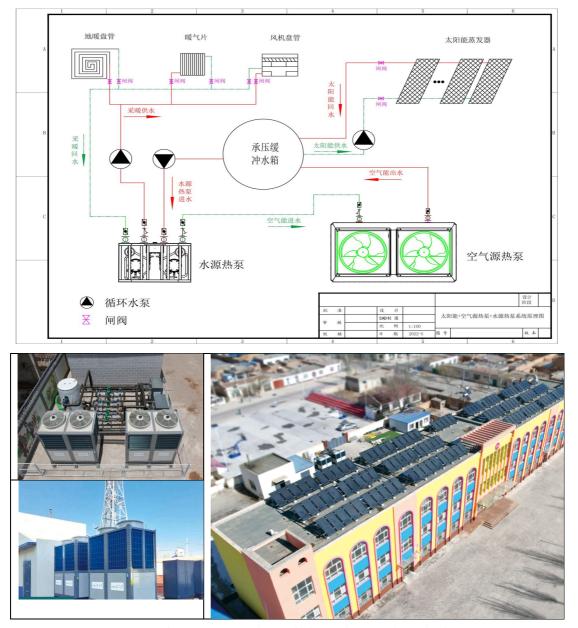


图 3-12 太阳能+水源热泵+空气源热泵清洁供热系统

# 3) 光伏直流照明

本项目#1号教学楼、#2号教学楼、连廊以及应急和消防照明全部采用直流

灯具,并使用光伏直流电源供电。直流灯具主要由光伏直流电源通过 DC220V 母 线向其供电。光伏电站装机容量 158.4kW,直流灯具总功率 15.07kW,光伏电站对直流灯具完全可实现 100%的充足电力保证。

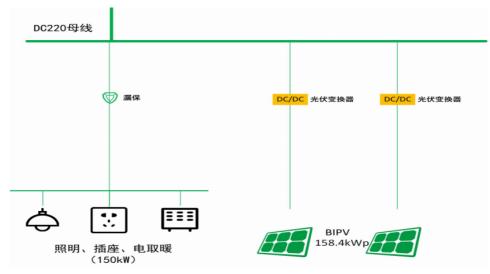


图 3-13 光伏直流照明

### 4) 建筑光伏一体化模块化设计与应用

本项目中,光伏建筑一体化技术是指光伏组件作为建筑材料,替代传统瓦 片与建筑屋面一体化结合。

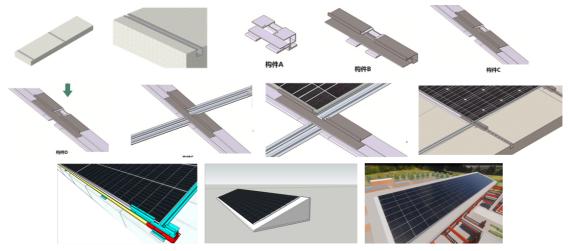


图 3-14 光伏建筑一体化实现方式

本技术借鉴了传统瓦片通过搭接方式实现防水功能的特点,通过模块化设计思路进行了光伏瓦构件的创新设计和产品开发。

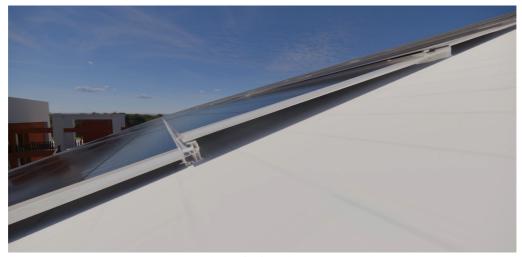


图 3-15 光伏建筑一体化实现方式

### 5) 建筑主体结构关键节点模块化设计与应用

为了实现由砌筑式建筑向成套房屋产品的转变,基于模块化设计理念,本项目在采用钢结构作为主体结构的基础上,拟对结构连接的关键节点实施模块 化改造和新产品开发。

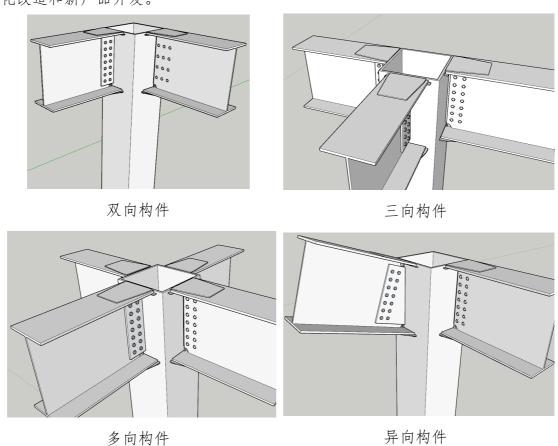


图 3-17 建筑主体结构关键节点

### (3) 经济性分析

### 1) 光伏直驱供暖

A建设费用:光伏装机容量与直流电散热器功率比为 2:1,即每 2kW 光伏可 100%满足 1kW 直流电散热器的电能需求;同时,由于冬季采暖期光伏出力占全年总量的比例为 30%(冬季日照时间约为全年的 30%),即将光伏电站总投资的 30%折算为采暖设备建设投资,则每 1kW 光伏直驱采暖总投资(含配套光伏电站)约为 3300 元,72.8kW 总投资约为 24 万元。

B运行费用:按照当前光伏电力 0.15 元/kWh 的光伏度电成本,以及学校每天供热时间 8小时计算,1kW 电直热器每天的的运行费用约为 1.2 元,本项目光伏直驱供暖年运营费用约为 1.3 万元。

### 2) 太阳能+空气源热泵+水源热泵供暖

A建设费用:本项目太阳能+空气源热泵+水源热泵总投资约45万元,约为电采暖总费用支出的1.87倍。

B运行费用:按照居民电价 0.4486 元/kWh 计算,系统年耗电量约为 3.6 万 kWh,年运行费用约为 1.6 万元,约为光伏直驱电采暖的 1.23 倍。

#### 3) 建筑光伏一体化模块化设计与应用

材料和成本优势:光伏瓦构件选用了ASA+PVC材料,强度、使用寿命等完全符合建筑瓦片的要求,但相对于现行的金属光伏瓦构件,具有显著的成本优势。

产品名称	关键性能指 标名称	计划达到的指标 指	材质规格	备注
光伏覆叠 瓦	精密精度	≤150 微米	ASA+PVC/ABS/铝合 金	光伏与建筑实现 高精密度一体化
光伏竖向 导水瓦	精密精度	≤150 微米	ASA+PVC/ABS/铝合 金	结合,防水性能超过传统建材。
光伏专用 连接件	精密精度	≤150 微米	ABS	

### 4) 光伏直驱供暖的优势和发展方向

### A 本项目两种供暖方式对比

对比项目	建设费用	运行费用	对比结论
技术类型			

光伏直驱采暖	24 万元	1.3万 元/年	① 光伏直驱采暖建设费用与空气源
			热泵基本持平,约为太阳能+水源热
太阳能+水源热泵+	45 万元	1.6万 元/年	泵+空气源热泵的 55%
空气源热泵			② 光伏直驱采暖的运行费用最低,
空气源热泵采暖	25 万元	3.0万 元/年	约为空气与热泵的 43%, 太阳能+水
			源热泵+空气源热泵的 81%

- **B光伏直驱供暖运行费用优势:**长期来看,能源价格总体上将处于上涨态势、常规能源价格涨幅将高于光伏电力的上涨比例,光伏电力与常规电力的相对价差将持续扩大,即光伏直驱采暖运行费用的优势将愈加显著。
- C光伏直驱供暖未来的发展方向:空气源热泵的输出效率可以达到 200% (COP大于 2)以上,未来还将不断提高,但电直热转换效率永远不可能超过 100%。光伏电力的度电成本优势和空气源热泵的效率优势相结合,将使得光伏直驱动采暖运行费用进一步凸显,从而成为最具市场前景的清洁能源供热方式。因此,未来光伏直驱采暖的研究方向将重点聚焦于光伏直驱+直流空气源热泵的技术研究和示范应用。

### (4) 社会效益

本项目所述的六项主要技术不仅适合于公共建筑,更适合应用在乡村住宅建设领域,多项先进技术集成应用,既可以弥补农村建筑尤其是乡村住宅在能源利用条件方面的短板,有效提高乡村住宅的居住舒适性,也可优化我国实施乡村振兴战略的基础条件;又可大幅提高建筑本体的质量和安全标准,提升乡村建筑的资产价值。具有显著的经济和社会效益。

**A有助于促进乡村建筑产业的变革:**乡村建筑业可实现由传统建造方式向 可再生能源模块化建筑成套房屋产品的转变。

- **B有助于节约社会资源:** 可促使能源、建筑材料等在乡村建设领域实现集 约化、高质量的发展, 大幅节约社会资源。
- **C有助于刺激、释放社会消费总需求**: 我国正在全面实施乡村振兴战略,城乡经济差异日益缩小,农村居民文化素质日益提升,具有提高消费水平的潜力和改善生活条件的能力。本产品作为资产类别的家庭开支,能有效刺激社会消费总需求,促进乡村经济的发展进步。

### 3.2.3 上海嘉定未来城市项目

### (1) 项目概况

本项目为上海万科嘉定未来城市项目 A20 地块市集,为 2 层公共建筑,建筑面积约 3100 平方米,建筑高度 14.5米;业态为社区配套商业,主要为餐饮、休闲为主。本工程在地下1 层设一个直流配电间,一个储能电池室。

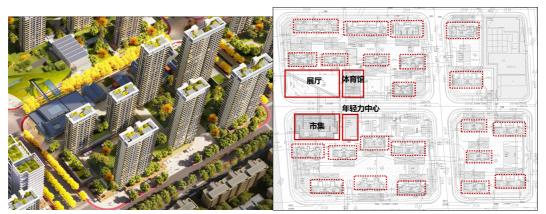


图 3-18 嘉定未来城市项目总平面

### (2) 建设目标

万科作为房地产头部企业在现阶段在上海率先实践实验光储直柔商业化应用,回应政府碳达峰政策要求,顺应引领行业发展趋势,同时也为日后规模化强制应用阶段积累经验。

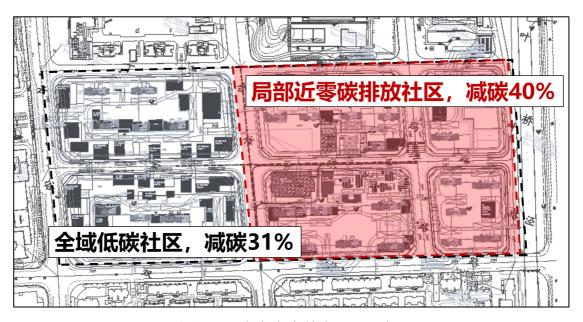


图 3-19 嘉定未来城市项目目标

### (3) 光储直柔架构

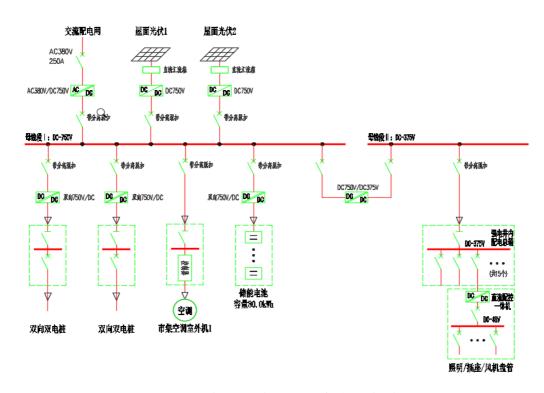


图 3-20 嘉定未来城市项目直流配电系统图

## (4) 配置清单

增量	子系统名称	子系统容量	子系统单价	子系统估价
投资	7 尔犹石你	(kW)/项	(元)	(万元)
	AC/DC 变换器	250.0	300.0	7.5
	AC750/DC375 变换器	90.0	500.0	4.5
	光伏 DC/DC 变换器	180.0	500.0	9.0
直流	储能 DC/DC 变换器	40.0	500.0	2.0
配电	DC750 出线柜	2.0	200000.0	40.0
	DC375 出线柜	1.0	150000.0	15.0
	控制系统	1.0	250000.0	25.0
	合计			103.0

# (5) 系统投资与收益估算

序号	号    增量投资	金额	单位面积 增量成本	使用寿命
		(万元)	(元/平米)	(年)
1	直流配电系统	103.0	332	20

2	电化学储能	20.0	65	8
3	直流终端电器 (空调、照明、插座)	55.8	180	20
4	充电桩	20.0	65	20
5	屋顶光伏	101.4	327	20
合 计:	合计:	199	641	1

备注:投资统计不含光伏系统,光伏按园区统一考虑。

### 表 光储直柔系统收益估算

	年基础能耗 电费	基本容量费	光伏直接上 网收益	不含光伏上 网后电费	扣除光伏上 网后电费	
114	(万元/年)	(万元)	(万元/年)	(万元/年)	(万元/年)	
投资	24.0	11.9	6.1	35.9	29.8	
收益	储能减少基 本容量费	光伏减少基 本容量费	光伏自用收 益	蓄能峰谷收 益	光储直柔后 电费	合计节 约电费
	(万元/年)	(万元/年)	(万元/年)	(万元/年)	(万元/年)	(万元/ 年)
	1.9	2.9	11.4	5.2	14.6	15.2

# 3.2.4 福田供电局大楼光储直柔项目

### (1) 项目概况

深圳福田供电局办公楼位于福田区中航路 44号,占地面积 5065 平方米。本次可改造区域为办公楼 1~9层的办公楼部分(不包括 220kV 变电站设备用房)和宿舍楼一层,可改造区域总建筑面积约 4383 平方米。其中:办公楼地上9层,建筑面积为 3996 平方米,其中地上1层主要为营业厅,2~8层为办公区域,9层为展厅及员工活动室。建筑现状立面图如图 3-26 所示。



图 3-21 建筑现状立面图

### (2) 项目目标

综合考虑既有建筑近零碳改造技术示范和南网科技项目新技术实验示范要求, 开展光储直柔近零碳建筑技术、建筑低压直流配电技术、建与筑电网柔性 互动技术、电动车与电网互动技术的综合应用示范和验证。具体如下:

- ① 光储直柔建筑,针对以新能源为主体新型电力系统对城市电网的要求,充分利用城市建筑既有条件,通过增加光伏发电装机容量和电动车直接消纳等方式主动降低碳排放,同时利用电动车充电和空调等负荷的柔性控制,改善建筑负荷参与电网需求响应的性能:
- ② 低压直流配用电,采用直流连接光伏、电动车充电桩、储能和直流电器,发挥直流系统效率优势,降低光伏发电、储能和电动车充电等用电环节间的损耗,提高光伏发电利用效率;
- ③ **电网-建筑-光伏-电动车多元互动,**充分发挥低压直流系统高效和灵活的特点,针对用户侧电网电能质量治理、高品质供电、负荷特性优化等多样化需求,构建更加简洁灵活的多元互动关系,提升综合能源服务内涵和收益;
- ④ 直流安全可靠用电,采用 IT 接地、特低电压和智能化保护等措施,更好地满足民用建筑对用电安全性能的要求,利用储能提高重要负荷的供电可靠性,改善用户体验:
- ⑤ 支持开放接入的直流系统智能控制和保护策略,基于通用变换器模块采取模块化方式组合,利用复合节点控制、暂态功率补偿和最简单保护技术,解决开放直流母线系统复杂工况、多变换器功率协调控制和故障保护问题,提高系统的稳定性和可靠性;
- ⑥ 功率主动响应,利用直流母线电压变化传递功率需求信息,实现分布式发电、储能和用电设备主动响应,简化用户侧能量管理和功率调节实现方式,更好地适应建筑场景应用的要求;
- ⑦综合监控,对系统的总体运行情况进行集中监控,通过指标显示系统的整体运行状态,具备控制策略开放接口,满足建筑负荷柔性控制和 V2G 技术研究和实验分析要求。

### (3) 预期效果

光储直柔系统主要通过采用光伏系统接入直流系统方式,同时接入直流负

载可控设备,每年光伏发电量 4.84 万 kWh,可使建筑总能耗比改造前降低 7%,年节约用电量 4.84 万 kWh,每年减少二氧化碳排放 22 吨。

### (4) 光储直柔系统架构

本项目计划设计建设一套"光储直柔"系统,实现建筑低压直流配用电技术、电动车 V2G 技术,以及建筑与电网柔性互动技术综合应用,通过实验示范对相关技术进行检验。本项目光储直柔系统采用单极结构,直流母线电压采用 DC750V/DC375V/DC48V 三级。"光储直柔"系统整体结构如下图 3-22 所示。

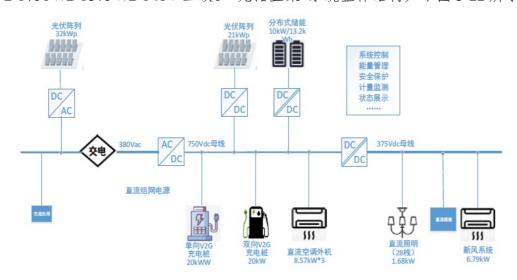


图 3-22 光储直柔系统拓扑结构示意图

#### (5) 系统配置

本项目拟建设的"光储直柔"系统以直流组网电源为核心,通过直流连接光伏阵列、分布式储能、单向和双向 V2G 充电桩、直流空调、直流照明以及直流展示区的直流电器等设备,其中光伏部分分为两个区域,办公楼屋顶光伏组件通过交流逆变器直接与办公楼交流配电系统相连接,容量为 32kWp, 篮球场车顶光伏与消防室西立面光伏接入直流系统中,容量为 21kWp。

表 3-6 光储直柔系统容量配置

序号	名称	规格/功能
1	直流组网电源	• AC380V/DC750V:100kW
		• DC750V/DC375V:60kW
2	光伏发电	• 交流光伏 32kWp
		• 直流光伏 21kWp
3	分布式储能	• 13.2kWh/10kW 钛酸锂电池

4	V2G 充电桩	• 单向柔性充电桩,1桩2枪×20kW
		• 双向 V2G 充电桩, 1 桩 2 枪×20kW
5	直流电器	直流电器设备总功率:约 53kW
		• DC750V, 空调室外机: 3*13.02kW
		• DC375V,新风室外机: 2*6.2kW
		● DC375V,新风室内机: 2*0.35kW
		• DC48V, 空调室内机: 0.672kW
6	直流路灯智能箱	• 供电电压 48V, 功率 2.5kW

### ①直流组网电源

直流组网电源是"光储直柔"各部分单元的能量核心,由直流组网电源建立750Vdc 和 375Vdc 两级开放式直流母线,电网额定功率 60kW,配置10kW/13.2kWh 锂离子电池储能,接入实际光伏 21kWp,满足 1 个 20kW V2G 充电终端、1 个单项充电终端、25.71kW/750V 直流空调、2.5kW/375V 直流照明供电、直流新风系统 6.72kW 要求,并预留 10kW/375V 直流电器供电功率。

直流组网电源是"光储直柔"系统的控制核心,采用一体化设计,利用直流 母线实现市电、光伏和储能等多种电源高效互联和灵活控制,支持开放直流母 线,为直流设备提供安全、可靠和高质量供电。

直流组网电源内部集成控制、管理、保护、计量、监测、展示等功能,适应用户侧应用特点,采用功率主动响应技术等实现负荷柔性调节和稳定运行。

### ②光伏发电单元

光伏发电单元拟计划布置于 6 楼透明行政楼屋顶、6 楼花池周围、篮球场车棚,以及篮球场消防室西立面,布置一定规模的光伏池板,拟计划接入"光储直柔"系统的光伏装机容量为 21kWp,位置采用多组串接入形式,每一组串开路电压设计为 600VDC~650VDC,在光伏池板安装位置就近布置光伏变换器(PVC),集中汇流后统一接入直流组网电源 750VDC 直流母线,计划接入交流测系统容量为 32kWp,位置位于 6 楼透明行政楼屋顶、6 楼花池周围,逆变器布置于支架下端。

### ③分布式储能单元

分布式储能单元主要用于实现平抑波动和暂态功率调节功能, 在孤岛情况

下,还可以为重要负荷提供应急或后备供电。

分布式储能单元按照"光储直柔"系统容量的 10%设计,考虑建筑消防安全和平抑波动应用对电池循环寿命的要求,采用户外安装方式,优先采用钛酸锂电池,容量 10kW/13.2kWh,接入至直流组网电源 750VDC 直流母线。

#### ④V2G 充电桩

计划划出 2 个停车位做为电动车停车位,布置 1 个具备 V2G 功能的充电桩,1 个单向直流柔性充电桩,充电终端功率额定充电功率均为 20kW,合计功率 40kW。单向柔性充电桩为 2 个停车位电动汽车进行充电,单向柔性充电桩均接入至直流组网电源 750Vdc 直流母线,并接受直流组网电源的柔性控制。双向充电桩具有 1 个充电终端,双向充电桩为 2 个停车位电动汽车进行充电,双向充电桩接入至直流组网电源 750Vdc 直流母线,并接受直流组网电源的柔性控制和功率双向流动。

#### ⑤直流空调展示

项目在 3 楼建筑内安装光伏直驱变频多联式空调 3 台和 1 台光伏直驱变频 多联式新风机组,其中:多联式空调外机功率为 6.79kW\*3,直流新风系统最大功率为 6.79kW,合计 27.16kW。直流多联式空调室外机和直流多联式新风机组室外机接入直流 750V 母线,与直流用电设备共同实现"光储直柔"技术目标。

#### ⑥ 直流照明系统

项目在 3 楼建筑内改造 28 栈灯具,采用直流 48V 供电,总共功率约为 1.68kW,项目配置 2.5kW 直流照明电源。

### (6) 经济性分析

本项目光储直柔系统总投资 362.62 万元, 其中光储直柔电源设备、储能、直流照明系统、直流空调、薄膜光伏、传感器等设备 338.76 万元, 施工安装费用 23.86 万元。

## 3.2.5 深圳茜坑水厂光储直柔项目

#### (1) 项目概况

深圳市龙华区茜坑水厂综合楼为茜坑自来水厂新厂区内一栋新建办公楼, 总建筑面积 23163.29 平方米。地上十层,主要为会堂,会议,办公,值班,食 堂等。地下三层,主要为车库及设备房。建筑效果图如图 3-23 所示。



图 3-23 综合楼建筑效果图

### (2) 项目目标

综合考虑既有建筑近零碳改造技术示范和南网科技项目新技术实验示范要求, 开展光储直柔近零碳建筑技术、建筑低压直流配电技术、建与筑电网柔性 互动技术、电动车与电网互动技术的综合应用示范和验证。具体如下:

- ① 光储直柔建筑,针对以新能源为主体新型电力系统对城市电网的要求,充分利用城市建筑既有条件,通过增加光伏发电装机容量和电动车直接消纳等方式主动降低碳排放,同时利用电动车充电和空调等负荷的柔性控制,改善建筑负荷参与电网需求响应的性能:
- ②低压直流配用电,采用直流连接光伏、电动车充电桩、储能和直流电器,发挥直流系统效率优势,降低光伏发电、储能和电动车充电等用电环节间的损耗,提高光伏发电利用效率;
- ③ **电网-建筑-光伏-电动车多元互动,**充分发挥低压直流系统高效和灵活的特点,针对用户侧电网电能质量治理、高品质供电、负荷特性优化等多样化需求,构建更加简洁灵活的多元互动关系,提升综合能源服务内涵和收益;
- ④ 直流安全可靠用电,采用 IT 接地、特低电压和智能化保护等措施,更 好地满足民用建筑对用电安全性能的要求,利用储能提高重要负荷的供电可靠 性,改善用户体验;
  - ⑤ 支持开放接入的直流系统智能控制和保护策略,基于通用变换器模块采

取模块化方式组合,利用复合节点控制、暂态功率补偿和最简单保护技术,解决开放直流母线系统复杂工况、多变换器功率协调控制和故障保护问题,提高系统的稳定性和可靠性;

- ⑥ 功率主动响应,利用直流母线电压变化传递功率需求信息,实现分布式发电、储能和用电设备主动响应,简化用户侧能量管理和功率调节实现方式,更好地适应建筑场景应用的要求;
- ⑦综合监控,对系统的总体运行情况进行集中监控,通过指标显示系统的整体运行状态,具备控制策略开放接口,满足建筑负荷柔性控制和 V2G 技术研究和实验分析要求。

### (3) 预期效果

光储直柔系统主要通过采用光伏系统接入直流系统方式,同时接入直流负载可控设备,每年光伏发电量 36.9 万 kWh,年节约电费 51.6%,每年减少二氧化碳排放 44%。

### (4) 光储直柔系统架构

本项目计划设计建设一套"光储直柔"系统,实现建筑低压直流配用电技术、电动车 V2G 技术,以及建筑与电网柔性互动技术综合应用,通过实验示范对相关技术进行检验。本项目光储直柔系统采用单极结构,直流母线电压采用 DC750V/DC375V/DC48V 三级。"光储直柔"系统整体结构如下图 3-24 所示。

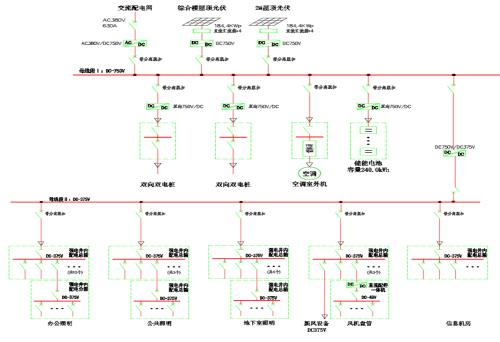


图 3-24 光储直柔系统拓扑结构示意图

### (5) 系统配置

本项目拟建设的"光储直柔"系统以直流组网电源为核心,通过直流连接光伏阵列、分布式储能、单向和双向 V2G 充电桩、直流空调、直流照明以及直流展示区的直流电器等设备,其中光伏部分分为两个区域,综合楼屋顶光伏组件接入直流系统中,容量为 184.8kWp,综合楼旁沉淀水池光伏组件接入直流系统中,容量为 184.8kWp。

表 3-7 光储直柔系统容量配置

序号	名称	规格/功能
1	直流组网电源	• AC380V/DC750V:300kW
		• DC750V/DC375V:90kW
2	光伏发电	• 直流光伏 369.6kWp
3	分布式储能	• 320kWh/80kW 铅酸固态蓄电池
4	V2G 充电桩	• 双向 V2G 充电桩, 10 桩 2 枪×20kW
5	直流电器	直流电器设备总功率:约 567.0kW
		• DC750V, 空调室外机: 277kW
		• DC375V, 新风室外机: 13kW
		• DC375V,照明: 145kW
		• DC375V, 信息机房: 120kW
		• DC48V, 空调室内机: 12kW

#### ① 直流组网电源

直流组网电源是"光储直柔"各部分单元的能量核心,由直流组网电源建立750Vdc 和 375Vdc 两级开放式直流母线,电网额定功率 90kW,配置80kW/320kWh 铅酸固态电池储能,接入实际光伏 369.6kWp,满足 10 个 20kW V2G 充电终端、277kW/750V 直流空调、145kW/375V 直流照明供电、13kW/375V 直流空调供电、120kW/375V 信息机房供电要求。

直流组网电源是"光储直柔"系统的控制核心,采用一体化设计,利用直流 母线实现市电、光伏和储能等多种电源高效互联和灵活控制,支持开放直流母 线,为直流设备提供安全、可靠和高质量供电。

直流组网电源内部集成控制、管理、保护、计量、监测、展示等功能,适

应用户侧应用特点,采用功率主动响应技术等实现负荷柔性调节和稳定运行。

### ② 光伏发电单元

光伏发电单元布置于综合楼屋顶、沉淀池水池上方,接入"光储直柔"系统的光伏装机容量为369.6kWp,位置采用多组串接入形式,每一组串开路电压设计为600VDC~650VDC,在光伏池板安装位置就近布置光伏变换器(PVC),集中汇流后统一接入直流组网电源750VDC直流母线。

### ③分布式储能单元

分布式储能单元主要用于实现平抑波动和暂态功率调节功能,在孤岛情况下,还可以为重要负荷提供应急或后备供申。

分布式储能单元按照"光储直柔"系统容量的 20%设计,考虑建筑消防安全的要求,优先采用固态铅酸电池,容量 80kW/320kWh,接入至直流组网电源750VDC 直流母线。

#### ③ V2G 充电桩

划出 10 个停车位做为电动车停车位,布置 10 个具备 V2G 功能的充电桩,,充电终端功率额定充电功率均为 20kW,合计功率 200kW。双向充电桩具有 1 个充电终端,双向充电桩为 2 个停车位电动汽车进行充电,双向充电桩接入至直流组网电源 750Vdc 直流母线,并接受直流组网电源的柔性控制和功率双向流动。

#### ④ 直流空调展示

项目在每层楼的公共区域设置直流新风机及多联机,其中:多联式空调外机功率为277kw,直流新风系统最大功率为0.86kW,合计17.2kW。直流多联式空调室外机和直流多联式新风机组室外机接入直流750V母线,与直流用电设备共同实现"光储直柔"技术目标。

#### ⑤ 直流照明系统

项目在建筑内采用全直流照明,采用直流 375V 供电,总共功率约为145kW。

### (6) 经济性分析

本项目光储直柔系统总投资 505.37 万元,其中光储直柔电源设备、储能、直流照明系统、直流空调、薄膜光伏、传感器等设备 470 万元,施工安装费用

35.37万元。

### 3.2.6 国创中心光储直柔实验室项目

### (1) 项目概况

国家高端智能家电创新中心位于山东省青岛市崂山区松岭路 169 号国际创新园。单层面积 1000 m²,本次可改造区域为办公楼 1~4 层的办公楼部分,可改造区域总建筑面积约 4000 平方米。建设光储直柔实验室-多功能零碳智慧区域,打造家庭侧绿色智慧能源应用展示场景,提供光储直柔系统和柔性家电等设备的开发验证平台,支撑柔性家电产业升级,并为生态链伙伴提供高效智慧的能源供应和相关增值服务。建筑现状立面图如下图所示。

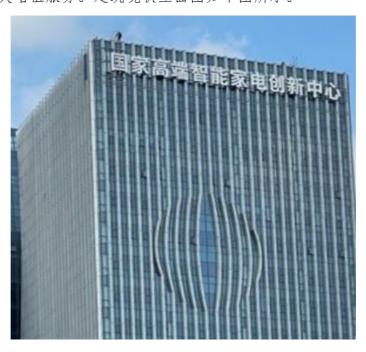


图3-25 建筑现状立面图

#### (2) 项目目标

项目整体目标是加速 HEMS、光储、柔性家电等智慧家庭能源关键技术的突破,为产业化落地提供有力的支撑。综合考虑零碳建筑示范和光储直柔实验室示范,开展家庭能源管理技术、柔性家电及光储家电关键技术、建筑光储直柔技术等的综合开发、应用、示范、验证。

①家庭能源管理系统。进行光伏、储能、负荷预测和控制。搭建模拟家庭实际运行场景,进行光伏、储能、柔性家电的集控监测及云端调控,实时显示系统运行状态,达到建筑负荷柔性控制、从而实现削峰填谷的目的。

实验室搭建 HEMS 开发测试平台,通过 HEMS 实验室的测试设备与仪器,实现光伏、储能、柔性家电运行数据采集与分析。

②柔性家电。研发可蓄能/可时移柔性家电,实现家电柔性调控,也即对柔性可控负荷进行调节(如空调、热水器等),可以在电力高峰时期减少系统负荷压力,在电力低谷时期增加负荷,实现电力系统的稳定可靠。

同时,实验室搭建柔性家电开发与控制平台,对柔性家电的柔性调节功能 (蓄能、时移等)进行仿真测试,进行电控板、关键部件、整机产品的功能调 试和室温环境下基本性能测试,确保产品性能

③光储家电。光储家电实现光伏、储能、家电集成,研究多模式供电控制、安全供电、稳定运行、高效转换和热控制等应用技术,开发满足电压波动的光储家电产品并进行关键模块及家电测试。

实验室搭建光、储技术开发和产品性能评估服务平台,进行基本性能、安规、环境适应性等测试:使用 Matlab、Simulink 和 Simscape,进行新能源系统架构建模、执行并网规范研究、以及新能源和储能系统的控制仿真;

- ④搭建"光储直柔"系统实验室。增加光伏发电装机容量,电力就地消纳 (储能、充电桩等),同时通过电动汽车和可柔性调度负载(空调、热水器、 热泵、洗衣机等)的响应,实现能源调控,从而达到减碳节能的效果。
- ⑤ 低压直流配电。对太阳能光伏、电动车充电桩、储能设备以及柔性直流家电进行电气连接。减少供电环节能量损耗,提高光伏用电效率。同时,电系统采用 IT 接地形式,采用直流灭弧、过流、过压保护技术;储能、市电、光伏、空气能等多能互补,共同实现供电的可靠性与安全性。
- ⑥光储充一体化建设。电网、柔性家电、光伏、充电桩多元互动,共同搭建综合能源智慧解决方案,实现电网侧-用户侧的电能供给品质优化,构建灵活互动关系,获取能源服务收益。

### (3) 预期效果

实现多家庭场景模拟设备、家庭、微网多层次关键技术开发与检测。通过电能-储能-光电-空气能-光热-燃气多能互补,满足用户需求的前提下实现新能源高效利用。每年光伏发电量 14万 kWh,年节约用电量 14万 kWh,每年减少二氧化碳排放 64 吨。

### (4) 光储直柔系统架构

本系统以交流 380V、220V、110V 和直流 750V、375V、48V 进行交直流 联合供电,并通过 HEMS 与家电设备的智慧互联实现供用能的交互控制。整体能源——电气系统框架如下图所示:

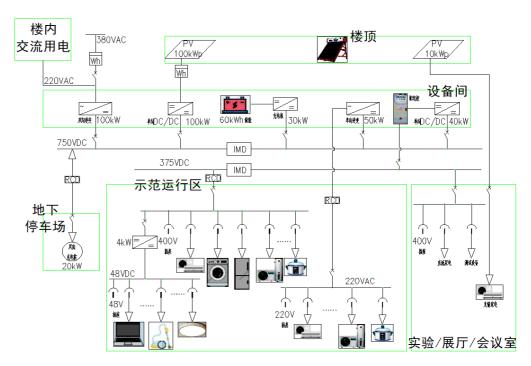


图3-26 实验室电气框架图

### (5) 系统配置

本项目拟建设的"光储直柔"系统以家庭能源管理系统和柔性家电为核心,通过直流组网电源连接光伏阵列、分布式储能、充电桩以及示范运行区的直流电器等设备,实现家庭场景的能源供给与调控。

序号	名称	规格/功能
1	直流组网电源	• AC380V/DC750V:100kW
		• DC750V/DC375V:40kW
2	光伏发电	• 直流光伏 100kWp
		• 光储家电 10kWp
3	分布式储能	• 30kW/60kWh 磷酸铁锂电池

表 3-8 光储直柔系统容量配置

4	充电桩	DC/DC 30kW
5	直流家电	<ul><li>DC375V直流家电约26.7kW</li><li>DC48V直流家电约2.7kW</li></ul>

### ① 直流组网电源

直流组网电源由 750Vdc 和 375Vdc 两级开放式直流母线组成,电网额定功率 40kW , 配置 60kWh 锂离子电池储能,接入实际光伏 100kWp , 满足 1 个 30kW 充电桩、32.7kW 直流家电等功率要求,并预留一定的 DC375V 直流电器供电功率。

直流电源利用直流母线实现市电、光伏和储能等多种电源高效互联和灵活控制,为直流设备提供安全、可靠和高质量供电。

### ② 伏发电单元

光伏发电单元拟计划布置于国创楼顶,拟计划接入"光储直柔"系统的光伏装机容量为100kWp,用于直流家电等设备供能。计划单独接入光储家电侧装机容量为10kWp。

### ③ 分布式储能单元

分布式储能单元主要用于实现平抑波动和暂态功率调节功能,在孤岛情况下,还可以为重要负荷提供应急或后备供电。

选用 60kWh 磷酸铁锂电池,接入至直流组网电源 750VDC 直流母线。

### ④ 充电桩

充电终端功率额定充电功率 30kW,接入至直流组网电源 750Vdc 直流母线, 并接受直流组网电源的柔性控制。

#### ⑤ 直流家电展示

项目在示范运行区安装直流设备及功率如下表,总功率 29.38 kW。其中,吊灯、笔记本电脑等采用 48V 直流供电,总计 2.68kW;空调、油烟机,电磁炉等采用 375V 直流供电,总计 26.7kW。

表 3-9 示范运行区家电及功率

序号	供电电压	家电	总功率/W
1	DC48V	吊灯	1080
2		笔记本电脑	100
3		吸尘器	1500
4	DC375V	油烟机	220
5		电磁炉	3400
6		电饭煲	600
7		烤箱	3280
8		咖啡机	1450
9		冰箱	300
10		空调	7000
11		电视机	190
12		饮水机	1475
13		电热水器	3300
14		洗衣机	500
15		热泵	5000

### (6) 经济性分析

本项目光储直柔的光伏、储能、直流家电、测试设备等设备概算 400 万元, 总体费用(含基建费:光伏、充电桩、实验室施工等工程费)共计 1000 万。

# 四、光储直柔工程案例集编制

# 4.1 案例集编制背景与进展

### 4.1.1 编制背景

构建以新能源为主体的"光储直柔"建筑新型能源系统是实现建筑能源系统转型升级的重要方向,也是实现我国"双碳"战略目标的关键技术途径。近年来,国家出台了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《2030年前碳达峰行动方案》等一系列支持"光储直柔"建筑发展的政策,为"光储直柔"建筑的发展指明了方向,全国各地也陆续开始了"光储直柔"建筑项目建设,建成了一批"光储直柔"建筑示范工程。为了解我国"光储直柔"建筑技术研究和实践探索的动态,总结梳理"光储直柔"建筑技术研究和实践探索的动态,总结梳理"光储直柔"建筑技术研究和成功案例实践经验,为规模化推动"光储直柔"建筑发展提供技术支撑和实践经验参考,项目组依托中国建筑节能协会光储直柔专业委员会开展了建筑"光储直柔"案例征集、调研及案例集编写工作。

#### 4.1.2 编制进展

案例集编制过程与进展情况如下:

2022年3月-5月,开展了建筑"光储直柔"案例网络问卷征集,共收集了69个建筑"光储直柔"案例项目信息,其中:运行阶段26个、施工阶段12个、设计阶段13个、意向阶段18个。问卷征集的光储直柔建筑案例基本信息详见附件2。

2022年6月-8月,重点选取运行阶段的26个建筑案例和1个即将完成施工的建筑案例开展文案调研,收集了27个项目的文字介绍资料。

2022年8月-9月,综合考虑项目建筑类型代表性、项目资料完整性、项目运行效果及项目特色等多方面因素,从已收集文字介绍的27个项目案例中筛选17个典型案例开展现场调研考察与数据核实。

2022年10月-12月,开展建筑光储直柔技术与工程案例书稿撰写,包括背景与意义、现状与趋势、方法与技术、探索与实践四个章节,重点对17个典型建筑案例特征进行分析,总结建筑光储直柔工程案例建筑与技术应用特征,探讨了建筑光储直柔技术发展路径,同时开展了项目建设者及专家访谈,倾听建设者及专家对于光储直柔建筑规模化发展的建议,完成《建筑光储直柔技术与工程案例》(征求意见稿)。

2023年1月-3月,开展《建筑光储直柔技术与工程案例》征求意见及修改完善,完成《建筑光储直柔技术与工程案例》(送审稿),并提交出版社。

2023年3月-6月,开展《建筑光储直柔技术与工程案例》出版校审与排版设计,并于于2023年6月底在中国建筑工业出版社出版,书籍封面及目录见附件3。



# 4.2 光储直柔建筑案例特征分析

### 4.2.1 建筑分布特征

### (1) 项目位置分布

从太阳能资源分布来看,位于太阳能资源很丰富地区的建筑占 24%,太阳能资源丰富地区的建筑占 76%;从气候区域分布来看,严寒寒冷地区的建筑占 47%,夏热冬冷地区的建筑占 29%,夏热冬暖地区的建筑占 24%。可见建筑"光储直柔"适用于我国大部分地区,尤其是太阳能资源很丰富的严寒寒冷地区和太阳能资源丰富的夏热冬冷地区(除四川盆地)及夏热冬暖地区。



图 4-2 光储直柔建筑案例位置分布

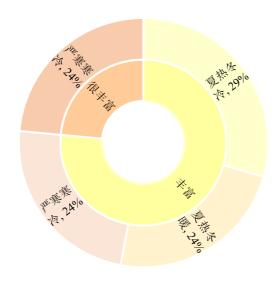


图 3-25 项目气候区域分布

### (2) 建筑类型分布

从建设类型来看,新建"光储直柔"建筑占 47%,既有建筑直流化改造的"光储直柔"建筑占 53%;从建筑功能来看,办公建筑数量最多,占 53%,其次是农村住宅建筑,占 24%;再次是产业园区(厂房+办公),占 12%,校园建筑和商场建筑各占 6%。可见,建筑"光储直柔"系统正在逐步从新建建筑扩展到既有建筑、从城市办公建筑推广至商业建筑、校园、产业园区及农村住宅建筑。

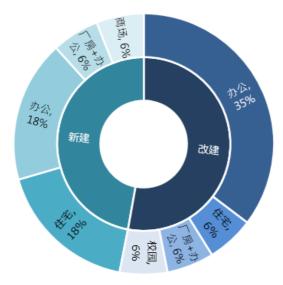


图 4-3 光储直柔建筑类型分布

# (3) 项目规模分布

建筑面积≤500m²的建筑数量占 24%; 建筑面积在 500 m²~3000m² 的占 35%; 建筑面积在 3000 m²~5000m² 的占 12%; 建筑面积在 5000 m²~10000m² 的占 18%; 建筑面积>10000 m² 的占 12%。可见,虽然目前"光储直柔"建筑项目以中小型示范建筑为主,但已有部分产业园区、大型商业综合体建筑开始应用"光储直柔"系统,建筑规模达几十万平方米数量级,说明"光储直柔"建筑应用规模正在从中小型单体建筑向校园、产业园区规模化应用发展。

### 光储直柔案例建筑面积分布

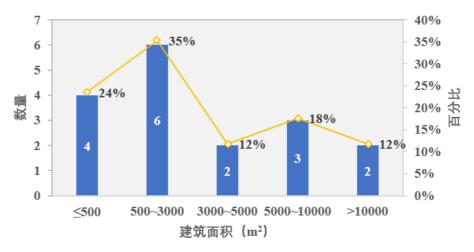


图 4-4 光储直柔案例建筑面积分布

### (4) 直流负载类型

调研的"光储直柔"建筑案例中,88%的建筑采用了直流空调、直流照明,71%的建筑采用了直流监测展示设备(大功率展示屏、服务器等)及其他小功率直流设备(直流办公设备、冰箱、饮水机、电风扇、无线充电器等),65%的建筑采用了其他大功率直流设备(微波炉、电磁炉、烧水壶等),59%的建筑采用了直流充电桩,12%的建筑采用了直流生产线设备(主要是工业园区厂房建筑)。可见,建筑中的照明、空调、IT类办公设备及监测展示设备、家用电器及充电桩可以率先直流化,主要是由于这些用电设备的内部结构本身是直流驱动的或者变频器是直流驱动的,具备直流化的良好基础条件。

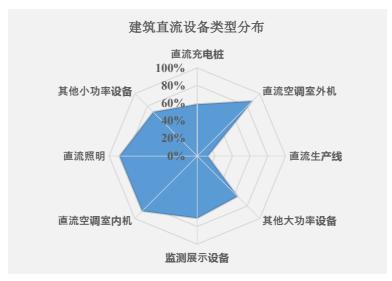


图 4-5 建筑直流用电设备类型分布

综上所述:从太阳能资源利用角度来看,"光储直柔"系统对我国大部分

区域都适用,尤其是太阳能资源很丰富的北方严寒寒冷地区和太阳能资源丰富的夏热冬冷(除四川盆地)及夏热冬暖地区。从建筑类型和建筑规模来看,建筑"光储直柔"系统正在逐步从新建建筑扩展到既有建筑,从城市办公建筑推广至商业建筑、校园、产业园区及农村住宅建筑,从中小型的单体建筑向校园、产业园区规模化应用发展。从负载直流化的成熟度来看,建筑中的照明、空调、IT类办公设备及监测展示设备、家用电器及充电桩可以率先直流化。

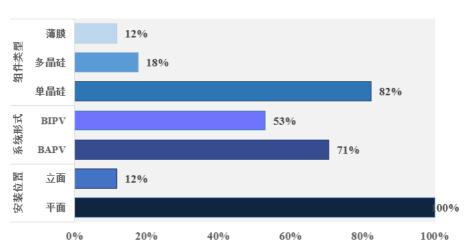
### 4.2.2 技术特征分析

#### (1) 光伏技术应用特征

调研的建筑全部采用了太阳能光伏技术,并采用与市政电网并网连接方式。从光伏组件安装位置来看:平面安装(建筑屋顶或地面停车棚)的比例为100%,同时在建筑屋顶和立面安装(玻璃幕墙或外墙)安装的仅12%。主要是由于屋面接收到的太阳辐射量大、光伏发电量大,且屋面光伏组件成本较低,投资收益高。

从光伏系统形式来看: 71%的建筑采用 BAPV (光伏附着在建筑上)的形式,53%的建筑采用了 BIPV (光伏建筑一体化)形式。主要是由于 BAPV形式光伏组件及安装成本较低,但随着光伏技术的发展进步,光伏组件的效率逐步提高且成本逐渐下降,BIPV(光伏建筑一体化)将成为未来发展趋势。

从光伏组件类型来看: 82%的建筑采用了单晶硅双面高效组件, 18%的建筑采用了多晶硅组件, 12%的建筑采用了碲化镉薄膜组件。主要是由于单晶硅双面组件效率较高, 单位组件面积发电量较大; 薄膜组件主要是为了兼顾建筑屋顶或立面玻璃采光及色彩的需要, 单位组件面积发电量较低。



光伏技术应用特征

### (2) 储能技术应用特征

采用电池储能的建筑有 15 栋,占建筑总数量的 88%;采用冰蓄冷的建筑有 1 栋,占 6%;有 1 栋建筑未采用储能系统。在采用电池储能的建筑中,53%的建筑采用磷酸铁锂电池,24%的建筑采用钛酸锂电池,6%的建筑采用铅酸电池,6%的建筑采用铅碳电池和钛酸锂电池。可见,电化学储能已成为建筑储能的主要形式,磷酸铁锂、钛酸锂等锂离子电池是建筑中应用较广泛的电化学储能类型。

磷酸铁锂的电池额定容量在 20kWh~717kWh 之间,额定功率在 8kW~400kW 之间,额定充放电小时率在 0.5h~5h; 钛酸锂电池的额定容量在 6.6kWh~1600kWh 之间,额定功率在 3.3kW~560kW 之间,额定充放电小时率在 0.1h~3h; 铅碳电池的 20 小时率额定容量为 140kWh,最大放电功率为 120kW,充放电小时率在 1h~20h; 铅酸电池的 10 小时率额定容量为 150kWh,最大放电功率为 120kW,充放电小时率在 4h~10h。因此,储能系统设计时宜根据不同的储能系统配置目的,综合考虑储能电池的技术性能及经济性合理选择电池类型,对于消纳光伏、削峰填谷等能量型储能系统,宜选择能量密度高、放电时间较长的电池;对于参与调峰调频电力辅助服务等功率型储能系统,宜选择功率密度大、放电时间较短的电池。

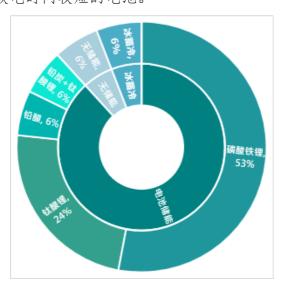


图 4-7 储能系统应用类型分布

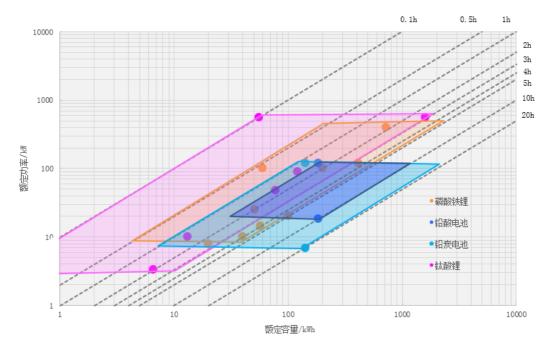


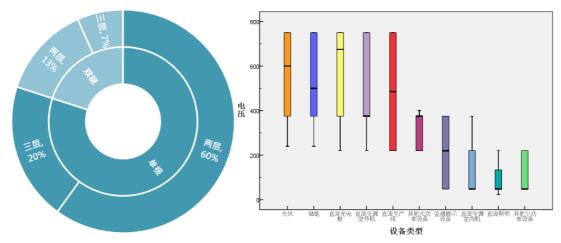
图 4-8 不同储能电池的额定容量、功率及平均放电时间

### (3) 直流配电系统技术特征

- ① 建筑直流配电系统拓扑结构以单极系统为主(占 80%), 个别建筑采用了 双极系统用于实验探索研究。
- ② 建筑直流配电系统的电压层级以两个电压层级为主(73%),不超过三个电压层级,且电压主要集中在三个区间段,即:第一个层级在 375V~750V,主要为光伏、电池储能、直流充电桩、直流空调室外机及直流生产线设备等大功率设备供电;第二个层级在 220V~375V,主要为其他大功率直流设备(主要指微波炉、电磁炉、烧水壶等)、直流监测展示设备(大功率展示屏、服务器等);第三个层级在 48V~220V,主要为直流空调室内机、直流照明及其他小功率设备(直流办公设备、冰箱、饮水机、电风扇、无线充电器等)供电。

可见,直流配电系统的拓扑结构、电压层级和电压等级的选择与系统接入的直流设备的类型、额定功率及电压范围存在较大的相关性。当建筑直流用电设备的类型较少、额定功率及电压范围差异不大时,宜选择单级拓扑结构;反之,当建筑直流用电设备的类型较多、额定功率及电压范围差异较大时,可选择双极拓扑结构或根据实际情况增加电压层级。总体原则是:一是用尽可能少的电压等级满足尽可能多的用电设备需求;二是大功率用电设备尽可能选择工作电压范围的较大值,降低电流,减小线缆截面积和线路损耗;三是人员活动区域的小功率设备,尽可能选择工作电压范围的较小值,避免电击事故可能带

### 来的人身伤害。



(a) 拓扑结构和电压层级

(b) 不同直流设备额定电压

图 4-9 建筑直流配电系统拓扑结构与电压分布

### 4.2.3 发展路径讨论

图 4-10 是建筑光伏本地消纳率(光伏年发电量中供建筑本地消纳的电量/光伏年发电量)、光伏自给率(光伏年发电量中供建筑本地消纳的电量/建筑年用电量)分布图。从图可知:

①城市办公、商场建筑的用电负荷需求大,建筑屋顶空间资源有限,光伏年发电量通常小于建筑年用电量,光伏发电采用自发自用、本地消纳方式,"光储直柔"系统设计时需重点关注"储"和"柔",充分利用建筑分布式储能、电动车及柔性负荷等灵活性资源,跟随电网需求主动调节建筑负荷,降低市政电网用电负荷峰谷差,在保障电网供电安全性、可靠性和稳定性的同时,提高建筑光伏本地消纳比例。

②农村建筑由于用电负荷需求较小,且有大量的建筑屋顶及庭院空间铺设太阳能光伏板,建筑光伏年发电量通常大于建筑年用电量,光伏发电采用自发自用、余电上网方式。"光储直柔"系统设计时需重点关注建筑光伏本地消纳和上网输出问题,针对光伏本地消纳问题,可通过推动农村用能电气化,发展光伏+电动车、农用电机具等"光伏+"系统,促进本地光伏消纳,助力实现零碳建筑,针对余电上网输出问题,可通过建设村级直流配电网和蓄电蓄热设施,实现不同台区之间的电力优化调度,优化匹配不同用户的发电资源与用电需求,将多余的光伏电力在电网需要的时候集中上网,不仅有助于提高电网可靠性,提高电网中绿色电力比例,还能使用户获得一定的电力需求响应经济激

励。

③产业园区工业厂房及办公建筑,由于存在 24h 运转的生产线负荷,单纯采用光伏系统无法满足建筑用电负荷需求,完全采用储能来平抑供需差异的经济性较差,通常需要从电网取电,但光伏发电量是否上网取决于光伏发电量与建筑用电量的大小。对于中小型厂房建筑由于有大量的建筑屋顶空间铺设光伏板,光伏年发电量远大于建筑年用电量,光伏发电采用自发自用、余电上网消纳方式;大型工业厂房园区由于用电负荷需求大,光伏年发电量远小于建筑年用电量,光伏发电采用自发自用、本地消纳方式。

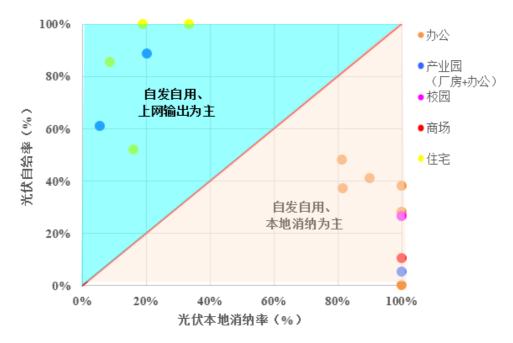


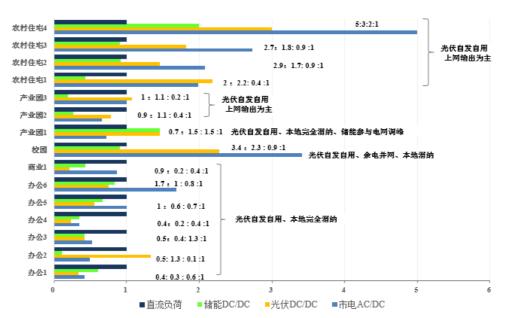
图 4-10 建筑光伏本地消纳率、光伏自给率分布

图 4-11 是建筑与电网交互入口 AC/DC、光伏 DC/DC、储能 DC/DC、直流 负载的容量配比关系。从图 4-11 可知:

①城市办公、商业建筑中光伏发电采用自发自用、本地消纳方式,配置储能系统的目的主要是解决日内建筑用电负荷需求与电力供应不平衡的问题,具有的目标包括促进建筑光伏本地消纳、电力负荷削峰填谷经济运行或参与电网柔性调节。因此,对于城市办公、商业建筑的储能 DC/DC 容量配置,需要根据不同的储能配置目的和优化目标,在进行建筑用电负荷与光伏发电功率逐时预测的基础上,进行典型日光伏发电、用电负荷、市政电网及储能充/放电功率四者的能量平衡分析,按照日平衡原则来配置储能容量。建筑与电网交互入口AC/DC 变换器容量需根据典型日从电网取电功率(从电网取电功率=建筑用电

负荷功率-光伏发电功率-储能放电功率)来配置,在合理配置储能容量的情况下,可以适当降低 AC/DC 变换器容量,本次调研的办公和商业建筑案例的AC/DC 变换器容量比直流用电设备功率降低 0%~65%,平均降低了 39%。

- ②农村住宅建筑光伏发电采用自发自用、上网输出为主方式,储能配置的目的也是为了解决日内供需不平衡问题,促进建筑光伏本地消纳,减少大量光伏发电上网对电网的影响。因此,储能 DC/DC 容量也需要根据典型日光伏发电、用电负荷、市政电网及储能充/放电功率四者的能量平衡分析,按照日平衡原则来配置。由于农村住宅建筑光伏发电以上网输出为主,建筑与电网交互入口的 AC/DC 变换器容量需要根据典型日光伏发电上网功率(光伏发电上网功率=光伏发电功率-建筑负荷功率-储能充电功率)来配置。
- ③产业园区建筑需要综合考虑园区可用于安装光伏的空间资源和用电负荷特性,分析典型日光伏发电功率与建筑用电负荷的关系,合理确定光伏消纳方式。储能 DC/DC 容量根据典型日光伏发电、用电负荷、市政电网及储能充/放电功率四者的能量平衡关系来配置。AC/DC 变换器容量与建筑光伏发电量、建筑用电负荷的关系及建筑光伏消纳方式有关,当园区光伏发电量远大于建筑用电量时,光伏发电以上网输出为主,AC/DC 变换器容量需要根据上网的光伏功率来配置;当园区光伏发电量远小于建筑用电量,光伏发电采用"自发自用、本地消纳"方式时,AC/DC 变换器容量需根据典型日从电网取电功率来配置,在合理配置储能容量的情况下,可以适当降低建筑 AC/DC 变换器容量。



市电:光伏:储能:直流负载容量配置比例

图 4-11 电网、光伏、储能、直流负载容量配比关系

### 4.2.4 案例小结

通过对调研的"光储直柔"建筑案例数据分析,得出以下结论:

- (1) "光储直柔"系统的适宜应用场景: 从太阳能资源利用角度来看,"光储直柔"主要适用于我国大部分地区,尤其是太阳能资源很丰富的北方严寒寒冷地区和太阳能资源丰富的夏热冬冷(除四川盆地)和夏热冬暖地区。从建筑类型和建筑规模来看,建筑"光储直柔"系统正在逐步从新建建筑扩展到既有建筑,从城市办公建筑推广至商业建筑、校园、产业园区及农村住宅建筑,从中小型的单体建筑向校园、产业园区规模化应用发展。从负载直流化的成熟度来看,建筑中的照明、空调、IT类办公设备及监测展示设备、家用电器及充电桩可以率先直流化。
- (2) 光伏技术应用特征:调研的建筑均采用了太阳能光伏技术,并采用与市政电网并网连接方式,光伏系统形式以BAPV(光伏附着在建筑上)形式为主,主要是由于BAPV形式光伏组件及安装成本较低,但随着光伏技术的发展进步,光伏组件的效率逐步提高且成本逐渐下降,BIPV(光伏建筑一体化)将成为未来发展趋势。光伏组件安装方式以平面安装(建筑屋顶或地面停车棚)为主,且多采用高效单晶硅双面组件,主要是由于水平面上接收到的太阳辐射量大,单晶硅双面组件效率高,单位面积发电量较大,且单晶硅组件成本较

低,投资收益高。

- (3) 储能技术应用特征:调研的"光储直柔"建筑储能系统以电池储能为主,电池类型以磷酸铁锂电池为主,其次为钛酸锂电池,最后是铅酸电池和铅碳电池,说明电化学储能已成为建筑储能的主要形式,磷酸铁锂、钛酸锂等锂离子电池是建筑中应用较广泛的电化学储能类型。储能系统设计时宜根据储能系统设计目的和应用场景不同,综合考虑储能电池的技术性能及经济性合理选择电池类型,对于消纳光伏、削峰填谷等能量型储能系统,宜选择能量密度高、放电时间较长的电池,对于参与调峰调频电力辅助服务等功率型储能系统,宜选择功率密度大、放电时间较短的电池。
- (4) 直流配电系统技术特征:调研的建筑直流配电系统拓扑结构以单极系统为主,电压层级以两层为主,不超过三个层级。直流配电系统的拓扑结构、电压层级和电压等级的选择,与系统接入的直流电源(光伏、储能)和直流用电设备的类型、额定功率、工作电压范围存在较大的相关性。当建筑直流用电设备的类型较少、额定功率及电压范围差异不大时,宜选择单级拓扑结构,反之,可根据项目实际情况选择双极拓扑结构或根据实际情况增加电压层级。总体原则:一是用尽可能少的电压等级满足尽可能多的用电设备需求;二是大功率用电设备尽可能选择工作电压范围的较大值,降低电流,减小线缆截面积和线路损耗;三是人员活动区域的小功率设备,尽可能选择工作电压范围的较小值,避免电击事故可能带来的人身伤害。
- (5) "光储直柔"系统容量配置:建筑中储能系统配置的目的主要是解决日内建筑用电负荷需求与电力供应不平衡的问题,主要的优化目标通常有节能减排(提高光伏本地消纳比例)、经济性(基于分时电价削峰填谷运行)、电网友好性(减小建筑光伏发电上网对电网的影响,参与电力需求响应及辅助服务提高供电可靠性等)。储能系统设计时,需综合考虑不同的优化目标,在进行建筑用电负荷、光伏发电功率逐时预测的基础上,选取典型日进行光伏发电、用电负荷、市政电网及储能充/放电功率四者的能量平衡分析,按照日平衡原则来配置储能容量。建筑与电网交互入口 AC/DC 变换器容量与建筑光伏发电量、建筑用电负荷的关系及建筑光伏消纳方式有关,对于光伏发电采用自发自用、本地消纳方式的城市建筑,AC/DC 变换器容量需根据典型日从电网取电功

率来配置,对于光伏发电采用自发自用、上网输出为主方式的农村建筑,AC/DC变换器容量需根据典型日光伏发电上网功率来配置。

(6) 建筑"光储直柔"系统发展路径:由于城市和农村建筑的用电负荷需 求和可再生能源资源条件的差异,决定了其"光储直柔"系统设计时的关注点 应有所不同。城市建筑用电负荷需求量大,建筑屋顶空间资源有限,建筑光伏 年发电量通常小于建筑年用电量,光伏发电宜采用自发自用、本地消纳方式。 城市建筑"光储直柔"系统设计时需重点关注"储"和"柔", 充分利用建筑 分布式储能、电动车及柔性负荷等灵活性资源,实现"荷随源动",在保障电 网供电安全性、可靠性和稳定性的同时,提高建筑光伏本地消纳比例,并通过 参与电力市场交易获得额外经济收益。农村建筑用电负荷需求量较小,建筑屋 顶及庭院为光伏敷设提供了充足的空间, 光伏年发电量通常大于建筑年用电 量,光伏发电宜采用自发自用、余电上网方式。农村建筑"光储直柔"系统设 计时需重点关注建筑光伏本地消纳和上网输出问题,一方面可通过推动农村用 能电气化,发展光伏+电动车、农用电机具等"光伏+"系统,促进本地光伏消 纳,助力实现零碳建筑,另一方面可通过建设村级直流配电网和蓄电蓄热设 施、进行不同台区之间的电力优化调度和不同用户的发电资源与用电需求的优 化匹配,将多余的光伏电力在电网需要的时候集中上网,提高电网可靠性和绿 色电力比例,同时使用户获得一定的电力需求响应经济收益。

# 4.3 部分项目情况简介

# 4.3.1 典型办公建筑——南京国臣办公楼

### (1) 项目概况

南京国臣办公楼位于江苏省南京市江宁高新园区福英路 1001 号联东 U谷, 共 2 栋建筑 (9号-10号楼), 建筑高度约 20米, 地上 3层,总建筑面积约 2000平方米,地上 2000平方米,地上 1层为展厅,2层和 3层为办公区域。



图 4-12 项目实景图

### (2) 建设目标

本项目以实现建筑低碳和全直流运行为目标,通过对楼宇交流配电系统及用电设备进行直流化改造,开展了楼宇直流配电系统的网络架构、系统保护、传输能效、电能质量、安全防护、潮流控制及直流设备优化控制等方面的应用研究与探索,实现了楼宇全直流配电及负荷全直流用电。同时,在9号楼及10号楼建筑屋顶安装分布式光伏系统降低建筑碳排放,并增加电池储能系统和充电桩调节建筑用能供需平衡,是对建筑"光储直柔"系统进行的一次较为全面的应用探索,为后续实际推广应用"光储直柔"系统提供了理论支撑和实践经验参考。

### (3) 建设内容

本项目"光储直柔"系统的建设内容包括:建筑光伏系统、储能系统、直流配电系统和柔性控制系统。直流配电系统采用交流电网、光伏、储能多种能源接入,为楼宇的供电可靠性提供保障;母线电压采用 DC600V,新能源发电直接消纳,减少能量变换层级、降低线路损耗,实现高效消纳;通过双向直流充电桩、分布式储能,平抑建筑用电峰谷波动、提高供电可靠性,同时具备电网侧需求响应能力;通过电压带调节,实现了无通讯、自适应的控制;系统运行数据可观、可测、可控,给楼宇智能化提供基础条件。项目建设内容及规模见图 4-13。



图 4-13 项目建设内容

### (4) 光储直柔系统架构

直流配电系统采用单级母线架构,配电系统设计容量为 80kW。太阳能电池阵列经汇流箱汇流后,通过光伏 DC/DC 变换器接入 DC600V 直流母线;铅酸电池储能系统通过双向 DC/DC 换流器接入 DC600V 直流母线;光伏发电优先供直流负荷消纳,光伏发电剩余时可给储能充电或是并入 AC380V 低压母线侧供交流负荷消纳;光伏发电不足时,由市电、储能补充供电。4 台 12kW 的空调设备通过主动式保护装置或一体化直流配电单元接入 DC600V 直流母线。直流充电桩通过 DC/DC 变换器接入 DC600V 直流母线。直流 DC600V 母线通过 DC/DC 变换器转换为 DC220V 直流电,为室内照明、办公电脑、投影仪、冰箱、电磁炉、饮水机等用电设备供电。

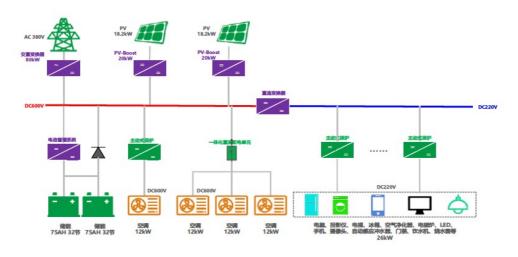


图 4-14 配电系统拓扑结构示意图

### 4.3.2 典型办公建筑——上海碳索能源办公楼

### (1) 工程概况

上海碳索办公楼"光储直柔"改造工程位于上海市闵行区春光路 99 弄,项目占地面积 2000 平方米,建筑面积 1287 平方米,建筑高度约 12 米,地上三层,其中一层为会议室及展厅,二层~三层为办公室。

本项目"光储直柔"系统应用范围为整栋大楼,应用建筑面积 1287 平方米, 其中一层照明系统和空调系统为全直流系统,二层~三层用电为光伏发电逆变成 交流电供电。



图 4-15 项目实景图

#### (2) 建设目标

本项目"光储直柔"系统建设积极响应国家"双碳"发展战略,遵循"以人为本、安全健康、绿色低碳、智慧高效"的基本原则,采用"光储直柔"新型电力系统关键技术,实现建筑楼宇高效消纳可再生能源、低压安全直流用电、精准响应电网需求,推动城市能源互联网建设,形成"光充储用"一体化及多能互补协同优化的全直流智慧建筑应用辐射示范。具体建筑目标为可再生能源渗透率(可再生能源配置功率与市电功率配置比例)不低于25%,年节电率(年可再生能源供电量占全年建筑用电量之比)不低于15%,综合节能率(设备改造前后节能量与改造前设备电耗量之比)不低于10%。

#### (3) 建设内容

本项目"光储直柔"系统的建设内容包括:建筑光伏系统、风电系统、储能系统、建筑直流配电系统、直流用电设备及"光储直柔"监控系统,建设内容示意图见图 4-16。



图 4-16 项目建设内容

## (4) 光储直柔系统架构

本系统采用电能路由器集成方案, 电能路由器提供三级母线电压, 一级母线为 DC750V, 二级母线为 DC375V, 三级末端供电系统为低压 DC48V。对于光伏、储能、风力发电机及电动车充电桩等大功率设备,接入 DC750V 母线,分体式空调设备接入 DC375V 母线,室内照明及直流办公设备接入 DC48V 母线。

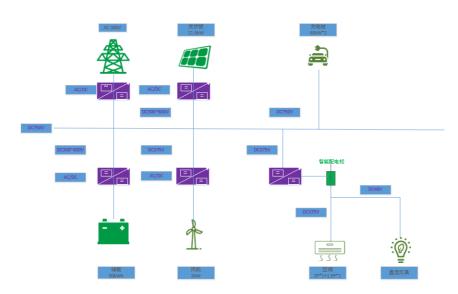


图 4-17 直流配电系统拓扑结构图

# 4.3.3 典型产业园区——大江东杭州格力产业园

### (1) 项目概况

大江东杭州格力产业园位于杭州市大江东产业集聚区临江高新技术产业园

内,园区总用地面积 908354.95m²,建筑总面积 796591.86m²,地上建筑面积 794307.36m²,地下建筑面积 2284.50m²。园区建筑功能以生产厂房为主,配套建设办公楼、员工宿舍及食堂等功能。

本项目依托江东柔直示范工程,搭建了杭州直流配电网示范区的主干网架"一套主干",在此基础上不断扩建和规划,并结合杭州大江东产业集聚区格力电器(杭州)有限公司产业园和氢电耦合示范等项目和工程,打造直流配网应用"四大场景":直流写字楼场景、直流工厂场景、直流家居场景、氢电耦合场景,覆盖了直流技术在日常生产生活应用的各个领域。目前,直流写字楼、直流工厂、光伏小屋已初步建成并投入运行。

建设分期	土地面积(m²)	土地面积(亩)	建筑面积(m²)
一期	343022	514.53	127241
二期	230482	345.72	234469
2.5 期	158508	237.76	188026
三期	176343	264.51	246856
合计	908355	1362.52	796592

表 4-1 项目基本信息表

### (2) 建设目标

杭州格力产业园依托"五环五化"的建设指导思想,全力打造技术领先、品质卓越、绿色生态、人文关怀、生产智造的行业领先的"自动化、敏捷化、智能化、定制化、信息化"的"智慧直流工厂",建设浙江首个直流楼宇及工厂全区应用示范系统。

#### (3) 建设内容

本项目"光储直柔"系统建设内容包括:柔性直流配电系统、分布式光伏系统、分布式储能系统、光储充驿站、光储空高效空调系统,打造直流办公、直流工厂、直流家居及氢电耦合四大直流应用场景。



图 4-18 项目建设内容示意图

#### (4) 光储直柔系统架构

本项目由江东高压直流变电站引直流专线到园区,建设 10KV/±DC375V 直流变电站,在园区内搭建柔性直流供电配网及直流末端负荷应用,实现工业园区直流配网应用示范。主要建设内容包括:

- A. 建设一座直流 10kV 转±DC375V 的 2MW 变流站。
- B. 搭建园区±DC375V/±DC 200V/±DC 24V 直流配电工程,主要包含直流 暖通系统、直流照明系统、直流办公系统。园区直流配电系统采用双 极母线架构,光伏系统、储能系统、直流空调室外机、直流生产线等 大功率用电设备接入±DC375 V 直流母线,通过 DC/DC 变换器转换成 ±DC200V,供户用储能、分体空调和 DC400V 插座等中等功率用电设备使用,再通过 DC/DC 变换器转换成±DC24V,供 DC48V 插座、展厅低压直流电器、空调内机和直流照明使用。
- C. 建设直流"零碳健康家"生态体验展厅。
- D. 与氢电直流系统互通互济。

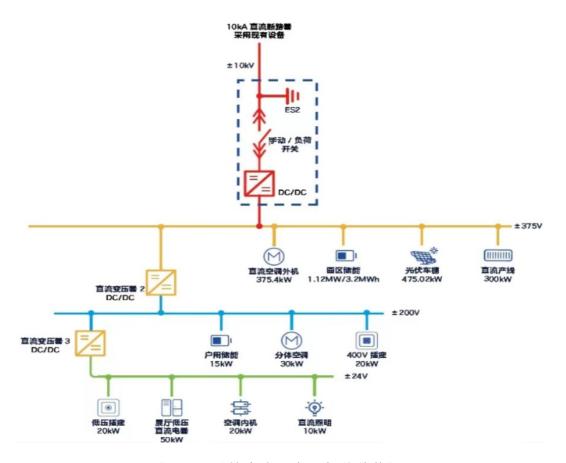


图 4-19 柔性直流配电网拓扑结构图

## 4.3.4 典型农村住宅——R-CELLS 小屋

#### (1) 项目概况

"R-CELLS:一生的健康生态住居"为天津大学参加 2022 年第三届中国国际太阳能十项全能竞赛的作品,项目荣获综合排名第一名、能源能效第一名、互动体验第一名、能源自给第一名、室内环境第一名、清洁取暖/制冷第一名、宣传推广第一名、建筑设计第一名、工程建造第一名、市场潜力第二名、成功挑战 48 小时离网的好成绩。

项目位于张家口市张北县德胜村,占地面积 400 平方米(含室外平台和景观),建筑面积为 160 平方米,地面上一层。建筑功能为住宅,并基于"定制+预制"的模块化设计,具有适应不同功能的潜力。"光储直柔"系统应用于整栋建筑,并在场地东南角设有双向直流充电桩。



图 4-20 项目外立面实景图 (拍摄者: 黄维旻)

### (2) 建设目标

本项目"光储直柔"系统建设积极响应国家"双碳"发展战略,采用"光储直柔"的新型建筑能源系统,以第三届中国国际太阳能十项全能竞赛评分标准为评价指标,实现零碳建筑可再生能源高效利用,源荷储灵活互动运行,建设集"产、学、研、用"于一体的"光储直柔"零碳建筑。

#### (3) 建设内容

本项目"光储直柔"系统的建设内容包括:**建筑光伏系统、储能系统、直流** 配电系统和能源管理系统。

- 建筑光伏系统采用 BIPV 和 PV-T 光伏系统,采用单晶硅、碲化镉光伏组件,安装于建筑屋顶,光伏系统总装机容量 35.4 kWp。
- 储能系统采用电化学储能,电池采用磷酸铁锂储能电池,储能容量为99.84kWh,充放电功率20kW,放电深度90%。
- 直流配电系统采用单级母线架构,建筑分布式光优通过 DC/DC变换器接入 DC240V 直流母线,储能系统通过 DC/DC 双向变换 器接入,外部电网通过 AC/DC 变换器接入直流母线。用户侧设置

DC220V/DC48V/AC220V 三种电压等级,通过整流/逆变设备为交直流用电设备供电。

• 能源管理系统主要监测"光储直柔"系统的电流、电压、功率等运行状态数据、电量及碳排放和室内温度、相对湿度、二氧化碳浓度及照度等环境参数,可以实现根据设定的能源调度策略自动进行设备状态远程控制。

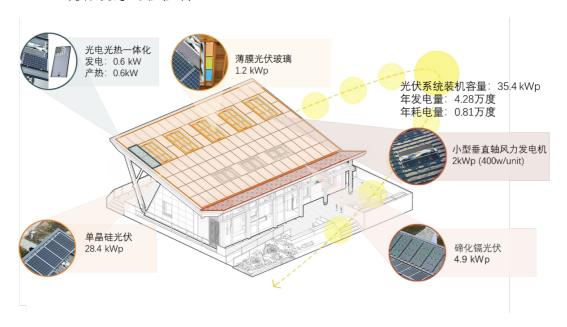


图 4-21 光储直柔系统应用范围

#### (4) 光储直柔系统架构

"光储直柔"系统采用单级母线架构,光伏和储能系统经 DC/DC 变换后可直接接入 DC240V 母线,给空调、计算机及部分办公设备供电; DC48V 为屋内照明和部分办公设备供电; 部分交流负荷通过逆变电源 220VAC 供电。系统采用浮地设计,DC240V 侧配置低压直流主动安全监控装置(LAP)进行直流绝缘及漏电流监测,并配置了直流集中式微机保护和漏电流保护装置。系统具备监测和计量功能,系统的运行情况可通过网口或者串口通讯方式传送到展厅和其它显示终端。

光储直柔系统在双向变换器内配置相应保护设备,可实现直流过压保护, 直流短路保护,交流过压保护,极性反接保护以及模块温度保护。同时配备直 流漏电流保护器,保护时间(工频)<10ms。

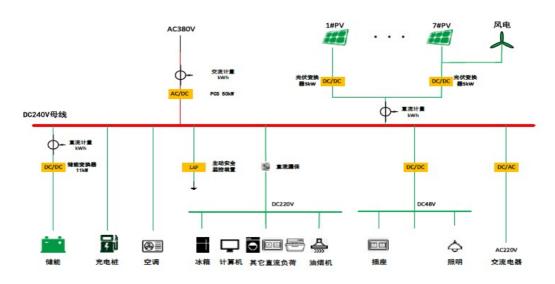


图 4-22 交直流配电系统拓扑示意图

# 五、执行情况总结

本课题围绕城市建筑光储直柔系统的研究,从系统构建方法和示范工程应 用推广两个方面开展研究工作,具体包括城市建筑光储直柔技术方案、光储直 柔工程方案咨询和工程案例集编制等三项具体活动。项目执行周期为 2022 年 8 月至 2023 年 9 月,目前已完成城市建筑光储直柔技术方案、完成光储直柔工程 方案咨询 6 项,并完成光储直柔案例集的编制和出版。本项目得到了能源基金 会和多位行业专家的支持,执行进展顺利,完成任务书约定的工作计划。

活动一城市建筑光储直柔技术方案。项目组以形成"只进不出"的城市光储直柔技术方案为目标,首先以城市片区(配电台区)为研究对象,分析了不同片区建筑规划条件下,区域分布式屋顶光伏的安装、利用潜力,明确了城市高密度的城市形态下,区域屋顶光伏的安装容量上限和本地消纳能力;其次分析了配电台区负荷形态对配电台区一次能源利用效率和配电线路损耗的影响,再次针对某城市规划片区进行了案例分析,确定区域光伏安装容量和本地自消纳能力,确定了需要配置储能进行光伏消纳的重点项目。通过上述配电台区层面的研究,明确了城市条件下"只进不出"光储直柔技术方案的光伏消纳目标,并结合实际工程项目规划和设计对区域"光储直柔"系统应用进行方案规划,形成经济合理的光储直柔配置方案。

活动二光储直柔工程方案咨询。项目组依托中国建筑节能协会光储直柔专

业委员会,组建了跨行业的专家智库,通过征集行业内工程示范案例,邀请专家库内专家对技术方案进行论证,共组织三期"光储直柔工程技术方案专家论证会",分别对 6 项光储直柔示范工程进行了专家论证。该 6 项光储直柔示范工程分别对应了商业建筑、教育建筑、居住建筑和既有办公建筑改造等建筑类型,从多方面反映了光储直柔技术在不同类型建筑中应用的难点。

活动三光储直柔建筑案例集编制。为了总结梳理"光储直柔"建筑技术研究和成功案例实践经验,为规模化推动"光储直柔"建筑发展提供技术支撑和实践经验参考,项目组依托中国建筑节能协会光储直柔专业委员会开展了建筑"光储直柔"案例征集、调研及案例集编写工作。通过全国范围内的案例征集和重点项目的现场调研,本次共选择了16个案例示范工程,分别代表了不同气候区、不同建筑类型的光储直柔应用案例。案例集编制邀请了项目建设者和行业内专家总计80余人参与案例集编制,形成了广泛的影响力。

整体来说,本项目得到了能源基金会和多位行业专家的支持,执行进展顺利,完成任务书约定的研究任务。后继,将进一步结合实际工程应用,凝练研究成果,扩大研究成果影响力。

# 附件1:工程方案咨询会专家意见

#### 光储直柔工程技术专家论证会专家组意见表

项目名称	北京三里屯太古里北 15#楼及红馆直流微电网工程项目
建设单位	太古地产有限公司、北京安业物业管理有限公司
设计单位	深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2022 年 10 月 20 日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在北京组织召开了"光储直柔工程技术方案专家论证会",专家组(名单见附件)听取了北京三里屯太古里北15#楼及红馆直流微电网工程项目建设单位和设计单位的汇报,审阅了相关资料,经质询和讨论,形成意见如下:

- 1、项目资料齐全,内容详实,符合评审要求:
- 2、项目采用"光储直柔"技术方案,示范面积 3130m²(北 15#楼 2141 m²,红馆 989 m²),整体技术方案、设计图纸和验收方案合理可行。
- 3、项目采用了建筑光伏和储能、涵盖了空调、照明、双向充电桩等直流负荷,具有在满足建筑正常用电的前提下可大范围调节从电网取电功率的能力,支撑按照"峰谷尖平"电价运行并与城市电网进行交互。
- 4、本项目是光储直柔技术在商业建筑的首次应用,对于推动光储直柔技术的应用 具有良好的示范作用。

专家一致同意通过评审,并建议:完善各个变换器的控制逻辑和系统总的调控算法,同时优化变换器容量。

专家组长签字: これ (

2022年10月20日

项目名称	宁夏西吉县偏城乡中心小学教学楼项目
承担单位	宁夏固原市西吉县偏城乡人民政府
技术咨询单位	宁夏新阜特能源服务有限公司

2022 年 10 月 20 日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在北京组织召开了"光储直柔工程技术方案专家论证会",专家组(名单见附件)听取了宁夏固原市西吉县偏城乡中心小学教学楼项目建设方和技术咨询单位的汇报,审阅了相关资料,经质询和讨论,形成意见如下:

- 1、项目采用"光储直柔"技术方案,示范面积 3193.26m<sup>2</sup>,整体技术方案、设计图 纸合理可行。
- 2、项目采用了建筑光伏一体化,涵盖了照明、供暖等负荷,能够有效就地消纳光 伏,自发自用、余电上网,实现光伏价值最大化。
- 3、本项目是光储直柔技术在农村地区科教文卫建筑的首次应用,对于推动光储直 柔技术的应用具有良好的示范作用。

专家一致同意通过评审,建议:进一步研究不同采暖方式下的室内采暖效果,在 有效消纳光伏的前提下提高采暖保障率;探讨非采暖季光伏有效消纳的技术措施;优 化设计参数,开展经济性分析。

专家组长签字: 🔪 ( 🍑

2022年10月20日

项目名称	福田供电局办公楼光储直柔改造项目
承担单位	福田供电局有限公司
技术咨询单位	南方电网深圳供电局电力科学研究院、深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2023年04月14日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在深圳组织召开了"光储直柔工程技术方案专家论证会",专家组(名单见附件)听取了福田供电局办公楼光储直柔改造项目技术方案的汇报,经质询和讨论,形成意见如下:

- 1、依托深圳市首批近零碳排放建筑试点项目,本项目在 4383 平方米的既有建筑中采用了"光储直柔"技术,整体技术方案合理可行。
- 2、项目在建筑用能特点和日照分析基础上,采用了屋顶光伏、建筑立面光伏等 可再生能源和交直流混合系统,直流负荷涵盖了照明、空调、充电桩等,能够有效就 地消纳光伏,技术路线具有创新性。
- 3、本项目是光储直柔技术在既有电力生产建筑改造中首次应用,探索光储直柔建筑协同电网友好互动,实现对碳中和贡献最大化有重要意义。

专家一致同意通过评审,建议:

- 1、增加对改造方案技术经济性评价;
- 2、强化与电网柔性互动的量化关系分析。

专家组长签字:

ford

2023年04月14日

项目名称	嘉定未来城市光储直柔项目
承担单位	上海嘉未来置业有限公司
技术咨询单位	深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2023年04月14日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在深圳组织召开了"光储直柔工程技术方案专家论证会",专家组(名单见附件)听取了嘉定未来城市光储直柔项目技术方案的汇报,经质询和讨论,形成意见如下:

- 1、本项目结合商业地产开发和应用,充分考虑了租赁关系、运行管理、客户体验等实际生产生活场景,整体技术方案合理可行,设计资料详实。
- 2、项目综合考虑了多方面因素,结合建筑方案设计和经济性分析,确定了光储直柔系统架构、容量配置和主要直流机电设备技术参数,技术路线具有创新性。
- 3、本项目作为光储直柔技术商业价值实现路径的积极探索,为其在地产领域规模化推广应用起到了良好的示范作用。

专家一致同意通过评审,建议:

- 1、增加实际商业地产项目中不同光伏占比的场景分析。
- 2、加强柔性负荷调节的量化分析。

专家组长签字:

fort

2023年04月14日

项目名称	龙华茜坑水厂改扩建工程
承担单位	深圳市深水龙华水务有限公司
技术咨询单位	深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2023 年 08 月 02 日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在青岛组织召开了 "光储直柔工程技术方案专家论证会",专家组(名单见附件)听取了龙华茜坑水厂 光储直柔项目技术方案的汇报,经讨论,形成意见如下:

- 1、项目资料详实,内容完整,技术方案合理可行。
- 2、项目考虑了综合楼办公与自来水厂工艺生产差异化应用,分别对水厂光伏应 用和综合楼光储直柔开展了方案设计和经济性分析。确定了综合楼光储直柔系统架 构、容量配置等技术参数,利用光储直柔技术成功实现了超过50%负荷和50%能耗的 直流化应用。
- 3、项目作为光储直柔技术在市政水厂实现路径的积极探索,实现了园区光伏的就地高效利用,为其在市政领域规模化推广应用起到了良好的示范作用。

专家一致同意通过评审,建议:

- 1. 进一步优化技术方案,尤其是水厂光伏的技术方案,缩短项目回收期。
- 2. 优化备用电池和储能电池方案。

专家组长签字:

2023年08月02日

# 海尔光储直柔智能家电实验室专家论证会专家组意见表

项目名称	海尔光储直柔智能家电实验室
项目承担单位	青岛海尔智能技术研发有限公司
技术咨询单位	青岛海尔智能技术研发有限公司

2023年08月02日,中国建筑节能协会光储直柔专业委员会在青岛组织召开了"光储直柔工程技术方案专家论证会"。专家组(名单见附件)听取了海尔光储直柔智能家电实验室的方案汇报,经讨论,形成意见如下:

- 1、项目资料详实,内容完整,技术方案合理可行。
- 2、确定了系统主要功能、系统容量配置和主要技术参数等,能够支撑多能互补、 HEMS、柔性家电等家庭智慧用能场景的关键技术开发和设备测试。
- 3、项目为柔性家电的开发提供了实验平台,对光储直柔技术在居住建筑的推广应用起到了重要的支撑。

## 专家一致同意通过评审,建议:

优化技术方案,细化交直流系统及电器的对比方案。

专家组长签字:

Jam'

2023年08月02日

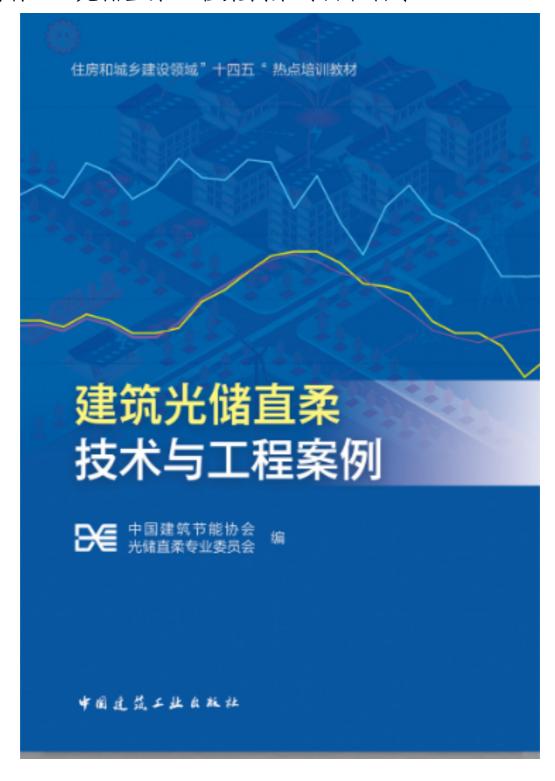
# 附件 2: 工程案例项目调研清单

序号	项目名称	建筑类型	建设阶段	项目地点	建筑面 积 (m²)
1	深圳未来大厦	办公建筑	运行阶段	广东深圳	6259
2	东莞南区局办公楼直流楼宇 改造	办公建筑	运行阶段	广东东莞	1950
3	上海市科委直流微电网技术 的智慧建筑能源系统应用示 范	办公建筑	运行阶段	上海市	2000
4	中建湖滨设计总部	办公建筑	运行阶段	四川成都	78700
5	深交所广场 (营运中心)	办公建筑	运行阶段	广东深圳	270000
6	国家能源集团 BIPV 中心	办公建筑	运行阶段	北京	1063
7	直流负荷舱	办公建筑	运行阶段	江苏南京	200
8	联东U谷园区光储直柔楼宇	办公建筑	运行阶段	江苏南京	1200
9	五方零碳楼	居住建筑	运行阶段	河南郑州	400
10	雄安淀上翡翠直流零碳健康 家	居住建筑	运行阶段	河北雄安	150
11	深圳国际低碳城光伏未来屋	居住建筑	运行阶段	深圳龙岗	15
12	江苏同里智慧直流别墅	居住建筑	运行阶段	江苏苏州	500
13	杭州萧山直流智慧家居体验 馆	居住建筑	运行阶段	浙江杭州	80
14	南京江北新区人才公寓	居住建筑	运行阶段	江苏南京	2400
15	庄上村光储直柔示范	居住建筑	运行阶段	山西芮城	7000
16	泰州经济开发区总部经济园	其他(工 厂、办公 )	运行阶段	江苏泰州	6000
17	芮城新能源装备产业园	其他(工 厂、办公 )	运行阶段	山西芮城	8000
18	上海长三角可持续发展研究 院	科教文卫 建筑	运行阶段	上海	1000
19	清华大学建筑节能研究中心	办公建筑	运行阶段	北京	3000
20	北京首都体育学院田径馆"光 储直柔"示范项目	科教文卫 建筑	运行阶段	北京	3000
21	北京昊天碳中和公园"光储直 柔"示范项目	其它〖公 园〗	运行阶段	北京	64000
22	深圳未来大厦 R1 "光储直柔"	办公建筑	运行阶段	广东深圳	6000
23	广州光使者科技应用有限公 司智慧光伏驿站	科教文卫 建筑	运行阶段	江西景德 镇	64
24	大同未来能源馆	科教文卫 建筑	运行阶段	山西大同	29998

序号	项目名称	建筑类型	建设阶段	项目地点	建筑面 积 (m²)
25	宁夏自治区固原市原州区头 营镇陶庄社区项目	其它	运行阶段	宁夏固原	200
26	大江东格力光储直柔示范工 厂	其他(工 厂、办公 )	运行阶段	浙江杭州	796638
27	菌恬书屋光储直柔项目	科教文卫 建筑	施工阶段	江苏江阴	100
28	光合能源 5.8MW 智能微电网 与柔性直流供电系统装备示 范	其它〖工 业产业园 〗	施工阶段	湖北咸宁	42420
29	鼓浪屿大德记开关电站智慧 直流	办公建筑	施工阶段	福建厦门	200
30	浙江湖州鲁能公馆"光储直 柔"	酒店公寓	施工阶段	浙江湖州	4000
31	武汉特斯联智慧产业园光储 直柔示范项目	科教文卫 建筑	施工阶段	湖北武汉	5000
32	苏州阳澄湖科创园"光储直 柔"示范项目建设	办公建筑	施工阶段	江苏苏州	2755
33	大上海时代广场办公楼	办公建筑	施工阶段	上海	30000
34	中石油西南总部大楼	办公建筑	施工阶段	四川成都	125000
35	临沂市河东区文体教育中心	科教文卫 建筑	施工阶段	山东临沂	50396
36	华为数字能源技术有限公司 安托山园区	其它〖办 公建筑+酒 店公寓〗	施工阶段	广东深圳	126300
37	人民银行光储直柔项目	办公建筑	施工阶段	山西芮城	1600
38	东夭村光储直柔项目	办公建筑	施工阶段	山西芮城	1200
39	国网延庆基地综合能源项目	其它〖科 研楼,中 央厨房, 实验室 等〗	设计阶段	北京	设计中
40	某高速公路服务区办公楼	办公建筑	设计阶段	某高速	2000
41	杭州格力光储直流屋项目	其它〖办 公、早餐 点〗	设计阶段	浙江杭州	252
42	贵阳光储直柔零碳示范空间 项目	商业建筑	设计阶段	贵州贵阳	600
43	苏州东吴黄金建筑光储直柔	办公建筑	设计阶段	江苏苏州	31800
44	雄安未来城市科技发展中心	办公建筑	设计阶段	河北雄安	12000
45	横琴供电局线路工区大楼直 流供用电系统建设工程	办公建筑	设计阶段	珠海	13962
46	中节能富阳环保产业园	办公建筑	设计阶段	浙江杭州	3770

序号	项目名称	建筑类型	建设阶段	项目地点	建筑面 积 (m²)
47	青岛奥帆中心博物馆直流改 造	科教文卫 建筑	设计阶段	山东青岛	3500
48	哈工大(深圳)校区原研究 生院 B 栋光储直柔零碳建筑	科教文卫 建筑	设计阶段	广东深圳	5000
49	三里屯太古里北区直流微电 网工程 15 号楼	商业建筑	设计阶段	北京	2141.51
50	国网江苏电科院科研实验用 房工程	科教文卫 建筑	设计阶段	江苏南京	29195
51	负碳厂区综合能源耦合技术 研究和示范验证	其它〖光 伏车棚〗	设计阶段	天津	1836
52	潞电低碳智慧园区建设	其它	意向阶段	北京	13000
53	北京煤热院西单办公区"光储 直柔"示范项目	商业建筑	意向阶段	北京	3000
54	国网新能源云电碳协同示范 工程	科教文卫建筑	意向阶段	浙江湖州	1000
55	香洲	商业建筑	意向阶段	广东珠海	500
56	深圳万科中心	商业建筑	意向阶段	广东深圳	1000
57	深圳翠湖零碳文体公园	科教文卫 建筑	意向阶段	广东深圳	1500
58	东莞国际商务区中心公园	科教文卫 建筑	意向阶段	广东东莞	300
59	广州太古汇	办公建筑	意向阶段	广东广州	1800
60	昌平供电局数据中心	其它	意向阶段	北京	1800
61	沈阳别墅	居住建筑	意向阶段	辽宁沈阳	203
62	万科商业广场光储直柔	居住建筑	意向阶段	上海	待定
63	芮城县整县分布式光伏	居住建筑	意向阶段	山西芮城	待定
64	永济市园区分布式光伏	居住建筑	意向阶段	山西永济	待定
65	蔚县整县分布式光伏	居住建筑	意向阶段	河北蔚县	待定
66	南乐县整县分布式光伏	居住建筑	意向阶段	河南南乐	待定
67	南中轴国际文化科技园	商业建筑	意向阶段	北京	待定
68	颐堤港二期光储直柔	商业建筑	意向阶段	北京	待定
69	深圳示范片区国际交流中心	商业建筑	意向阶段	广东深圳	待定

附件 3: 光储直柔工程案例集封面和目录



#### 中国国家版本馆 CIP 数器株字 (2023)第 081792 号 责任编辑。齐庆梅 责任投资。竞 前 技术整型。重 相 建筑光储直乘技术与工程案例 中国建筑产能协会光绘量主专业委员会 著 "国建筑工业出版社出版、爱行(北京海院三里网路 9 号) 各地场中形成。建筑中的结构 北京建筑工业出版社出版、爱行(北京海院三里网路 9 号) 各地场中形成。建筑中的结构 北京建筑工业出版村 制版 " 开本、790 毫米 1/102 毫米 1/16 印第 15½ 字歌 375千字 2023年6月第一版 2023年6月第一次印刷 宏价 154.09元 (41147) 据权所有 期印金宗 知有内及及印版图像网展。清联系本社读者服务中心退除 电话。(1019 3837283 9 09。924419132 (地址;北京海滨三型网路 9 号中国建筑工业出版社 604 第 那双编码,100037)

图书在凝编目 (CIP) 數据 建筑光緒直采技术与工程条例/中国建筑节能协会 光域直至专业委员会赛,一北京:中国建筑工业市级社 2023.6 任府和域乡建设领域"十四五" 热点培训教材 ISBN 978-7-112-28723-9

I. ①建··· Ⅱ. ①中··· Ⅲ. ①建筑光学一储能一案例 一数材 Ⅳ. ① TU113

```
顾问及作者名单
顾 问:
   江 亿 王威山 武 涌 马 钊 康艳兵
  陈其针 郭晓岩 孙正运 陈亦平 程韧俐
作 者:(按章节顺序排列)
    深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 前言, 第1章
   刘晓华
     清华大学,第1章,1.3,3.1.2.1,3.1.3.1,3.1.4.1
   孙冬梅
     深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 1.1, 1.2, 2.2.4, 2.4, 第 4 章, 4.1, 4.2.1
     深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 1.3.2, 1.3.3, 2.2.5, 3.3, 4.2.1
   赵宇明
     深圳供电局有限公司、第2章、24
   康靖
     深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 2.1, 2.2, 3.2.3, 3.3, 4.2.1
   马 钊、王昊晴
     山东大学、中国电力科学研究院有限公司, 2.1, 附录
     中科院深圳先进技术研究院, 2.1
   王振尚
     深圳供电局有限公司, 2.1
     北京交通大学, 2.2.1, 2.2.2
```

```
深圳供电局有限公司, 2.2.3
叶承晋
 浙江大学, 2.2.4
惠红勤
 澳门大学, 2.3
 华南理工大学建筑设计研究院有限公司,第3章
康 靖、孙 林、何联涛、孙冬梅、李雨桐、牛润卓
 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 421
刘晔华、张 涛、刘效辰、李少杰
 清华大学建筑节能研究中心, 4.2.2
黄 刚、陈文波
 南京国臣直流配电科技有限公司, 4.2.3, 4.2.11
袁金荣、廖俊豪、唐文强、黄穀翔
 珠海格力电器股份有限公司、国创能源互联网创新中心(广东)有限公司,4.2.4
刘贵平、秦建英、刘 洁、于海超
  北京安业物业管理有限公司(隶属太古地产有限公司)、深圳市建筑科学研究院
  股份有限公司, 4.2.5
潘毅群、朱 虹、闫凯丽、梁建铜
  长三角可持续发展研究院、同济大学、北京德意新能科技有限公司, 4.2.6
张智权、马利英、高小燕、侯院军
  上海碳索能源服务股份有限公司、上海大阀信息技术有限公司。4.2.7
曾志勇。周 祁、谢十涛
  深圳证券交易所营运服务与物业管理有限公司, 4.2.8
黄学劲、刘文豪、张 强
  广东电网有限责任公司东莞供电局, 4.2.9
赵志刚、王臣章、王 京、钱 博、李艳伟
  珠海格力电器股份有限公司、国创能源互联网创新中心(广东)有限公司、格力
  电器(杭州)有限公司, 4.2.10
```

```
杨 巌、郝 斌、陈文波、张嘉睿、刘魁星、任 军、田 喆、穆云飞、
尹宝泉、韩晨阳、王 琦、韩爱泽
 天津大学、深圳市建筑科学研究院股份有限公司、南京国臣直流配由科材有限公
  司, 4.3.1
李珺杰、张 文、黄字轩、刘媛卉、吴 炜、王毓乾、王鹏飞、赵如月、
边文彦、吴玺君
 北京交通大学、陈张敏聪夫人慈善基金、英国 BRE Trust 、拉夫堡大学、4.3.2
江海吴、褚冬什、黄海静、宗德新、黄招彬、李金波
 重庆大学、美的集团家用空调事业部、中国建筑西南设计研究院有限公司、上海
  霍普建筑设计事务所股份有限公司, 4.3.3
朱礼建、王新想、李 忠
  山西国臣直流配电工程技术有限公司、南京国臣直流配电科技有限公司, 4.3.4
伏彦彪、王晓锐、金亚东
  宁夏新阜特能源服务有限公司, 435
支持单位: 能源基金会
      能源行业低压直流设备与系统标准化技术委员会
```

#### 前 言

科研是求极值、工程是寻最优。新技术如何工程化是值得我们思考的问题。

"光緒頁案"技术是2020年6月3日江亿院士在线上会议正式提出的、很多人好奇为什么这项新技术在短短一年多的时间就能写入到国务院《2030年前碳达峰行动方案》 --方面我们要感谢众多幕后台前致力于推动建筑行业进步的工作者, --方面 我们要回顾其产生的时代背景。

早在2010年左右江亿院十就提出"直流建筑"概念,和国外提出的直流微网有异 有同。那时候行业内里多的是争论"为什么?"宣演与交流相比看什么优势。 在同。那时候行业内里多的是争论"为什么?"宣演与交流相比看什么优势。"直到今 天这些问题依然存在,只不过等案在实践中不断地丰富。2015 年当我们开始直流建筑 工程实践的时候,这一问题也不断被大家所提及,效率提升、特低电压安全、微网可靠性提升、自适应控制等优势不断地被挖掘,更重要的是我们有了"恒功率"取电的目 标。说到恒功率取电,一方面拟解决建筑配电设备大量冗余问题(满负荷利用率通常小于 1500h),一方面拟平抑建筑用能的波动性,从而得到电网的认可。幸运的是我们一

自有电闸的支持解降,不断对效表缩形或指针消毒性裁判。 不知识效别 是有电闸的支持解降,不断对效表缩形进行打力操作裁 对运行目标进行遗传化。 按照今天的说法,"恒功率"就是柔性。以火电为主导电源时,如果每个用户能 够按照恒功率用电的活、自然是好事。面向"双碳"目标,大量可再生能源成为主导 电源时,如果每个用户能够跟随风、光出力爆炸去用电的活、才是年事。之前我们练 就的"恒功率"技术本领自然也能适应新的要求,于是"恒功率"调整为"建筑电力

从构想的提出到工程实践,再到不断地打磨,事实上"光储直柔"已经发展了10 年之久。随着光伏和储能技术在建筑的大量应用、直流优势逐步凸显、以建筑电力交互 为目标,实现建筑和电力携手零碳逐步成为大家的共识。

#### 如何看待"光储直柔"?

"光储直柔"涵盖多项新技术,从技术就绪度角度来看,整体处于 TRL7 (形成整 机产品工程样机,在真实使用环境下通过试验验证)和 TRL8 (实际产品设计定规,通 过功能、性能测试;可进行产品小批量生产)阶段。 1. "光储直柔"不仅仅是技术集成,更需要原始创新

光伏组件效率等不是建筑行业要解决的技术,但光伏建筑一体化技术和光伏就地高效利用需要技术创新。电化学储能效率不是建筑行业要解决的技术问题,但蓄冷、蓄热 以及建筑电动汽车交互需要技术创新。直流配电和柔性交互更是从零开始,直流配电理 论基础、产品装备、柔性柔度以及建筑电力交互模式等需要技术创新

逐步得到了很好的解决,现在建设的光储直柔工程,"能不能用"已不再是问题。

2. 好不好用 评判"好不好用",一方面应关注系统的故障率和操作简洁性。"光储直柔"系统 的运行控制是基于直流母线电压的自适应系统,做好了不仅没有故障,甚至在电网故障时仍能保证用户的可靠用电。当然"光储直柔"系统也有其不同的特点与要求,比如在 检修时需要考虑系统电容残压释放问题等。另一方面应看是否达到设计目标,能够实现 柔性调节。我们不能苛求每个项目现在都能实现柔性,本书收录的案例也不是所有的I 目都能实现柔性,但我们应不忘初心,让我们的系统在硬件层面具备实施条件,在软件 尼而且各开放性。

负责灵活调节(柔性)就是价值,也是我们的初心。柔性价值的大小,很大程度上 决定"光翰直柔"系统"资不贵"。柔性价值变规,一方面通过峰谷电价价差实现。考 虑新能源的接入和发挥负荷侧的灵活性,国家发展改革委要求各地合理确定峰谷电价 偿。另一方面通过动态碳排放因子和碳市场实现。动态碳排放因子会告诉我们什么时候 的电碳排放因子高,什么时候低,我们通过柔性调节,在满足用户使用需求的同时实现 低碳用电。随着碳市场的完善, 低碳用电的价值逐步显现。

#### 关于收录室侧的说明

在案例编写的过程中,我们得到了业内同仁的大力支持,收集了已建成和在建的 "光储直柔"建筑示范项目共计27项。针对城市和农村、居住建筑和公共建筑等不同场 景,相关科研院所、高校、设备产品供应商等开展了大量的、卓有成效的探索与实践。 由于篇辐有限,本书设能收录所有的案例,在此致以歉意,并代表编写组感谢所有参与 者的辛勤付出。

我们尽可能全方位展示每一个项目,包括其建设目标、项目方案、技术特点和运行 效果等,也尝试请建设者分享建设过程的体会或背后的故事。我们深知每一个案例都有 其不完美甚至是缺陷的地方,但我们拥有同样的初心。 本书得到了能源基金会的"中国光储直柔建筑发展战略路径研究(二期)"项目

"城市建筑光储直柔标准协同与工程应用研究 ( G-2209-34126 )"资助,在此致以诚挚的

2022年12月于北京

2. "光储直柔" 诠释了工程的表象与内在, 或者说是兼顾了工程的过程和结果

"光·情况学 从字面上发现两样了新型建筑供用电影转的组成,使我们清楚地以识到工程元素的构成,但恰恰是看不见摸不着的"柔"体现了其工程价值。我们的传统思维 仅关注工程上"有没有""用没用",鲜少关注用的结果。"光储直柔"告诉我们应以结果为导向,用系统的思维去构建新型系统。

3. "先储直柔"是多学科。多领域、多行业融合的必然结果 "光储直柔"不仅涉及建筑、机电、暖通等专业,也涉及电力电子、电力工程、能 源经济甚至金融学等学科,对于推动新能源、数字经济、绿色消费等多领域的快速发 展,以及建筑、电力、交通多行业能源结构的转型具有重要的作用。

#### 工程怎么落地?

没有标准,设计师无从下手,《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030—2022 使之成为可能。工程实践是标准的源泉,本书收录的案例对于标准的形成发挥了举足轻重的作用。这本标准从立项到发布用了四年的时间,比如针对直流母线电压等级这一个 技术点就讨论了一年有余,在工程实践的基础上,结合已有相关标准、安全与效率、用 电设备需求、产业支撑与发展等多因素,确定了标准中推荐的电压等级。就直流配电这 项新技术而言,标准中的很多内容还需要大量工程实践的检验和进一步丰富与完善,正 如編制组所说,每三年完成一次修订,再来两次修订,十年能胜一剑。 由于设计标准中柔性定量刻画与检测检验不能完整体现,《建筑光储直柔评价标

准》针对"光储直柔"整体性能、尤其是柔性、提出了评价指标和检测方法、目前在征 求意见中。这本标准将有助于设计师更好地理解柔性、从而更好地进行"光储直柔"系 统设计

针对"光储直柔"系列产品的短板——直流机电与配电产品缺失,国内相关研究院 所和生产企业开展了大量的基础研究,目前解决了"0-1"的问题。随着国家重点研发 计划"建筑机电设备直流化产品研制与示范"的推进,"1-100"问题也将逐步解决,为 工程项目提供多元化的选择。

:品迭代也是多元化的组成。以直流双向智慧充电桩为例,需要车桩充放协议支 持、建筑能源管理系统与桩的协同、直流母线电压、充放电功率。电池剩余电量的自适 应,甚至与建筑防火分区、电池材料与安全、电动汽车出行规律以及使用文化等密不可 分。这就意味着"光鳞直柔"系统要具备开放性,更好地适应技术的发展。

#### 1. 能不能用

1. IRCPIE/III 对本书收录的案例而言,很多产品是定制的,甚至是被逼无奈自制的,建设时或多 或少都会存在担忧。这不是危音弦听,很多项目都是历过合不上闸、上电不工作、不明 原因跳闸、储能电池过放甚至电器烧毁等问题。一次次的失败使得"能不能用"的问题

#### 目 录

第1章	背景与	意义								00
1.1	什么是	建筑"	光储真	江柔"			 	 	 	00.
1.2	为什么!	要发展	建筑	"光似	直柔"			 	 	00
	1.2.1	符合国	家战功	各雷方			 	 	 	00.
	1.2.2	零碳电	力发	民雷京			 	 	 	00.
	1.2.3	零碳減	筑发	美安市				 	 	00
1.3	推广建	筑"光	储直线	E" B	价值。		 	 	 	01
	1.3.1	电网站	流.				 	 	 	01
	1.3.3									
本章	参考文献									02
第2章	现状与	趋势								02
	1-10-11-	e - 11 1 h								
2. 1	标准体									
	2. 1. 1									
	2. 1. 2									
2.2	关键技									
	2. 2. 2									
	2.2.5	直流用	电设行	j			 	 	 	033
2.3	政策与	市场机	制现制	Ř			 	 	 	033
	2.3.1	电力市	场现在	火筒介			 	 	 	033
	2.3.2	建筑负	荷参	与市场	的问题	į	 	 	 	039
2.4	挑战与:	发展趋	势				 	 	 	04
	2.4.1	实施排	战.				 	 	 	040
	2.4.2	发展建	议.				 			04
本章	参考文献						 	 	 	043

	045
第3章	<b>一注上技术</b>
3.1	<b>系統規划与设计</b>
5. 1	
	040
	002
2.2	
3. 2	
	001
2 3	
3.3	
	3.3.3 评价方法与流程 091 3.3.4 评价指标分析 096
水i	3.3.4 评价指标分析 096
第 4 章	> 40.45 E 57.93
-	
4.	
4.	
	130
	130
	145
	4.2.5 北京三里屯15 号楼
	4.2.6 长三角可持续发展研究院 159 4.2.7 上海碳素能源亦公楼 165
	4.2.7 上海碳素能源办公楼 165 4.2.8 深交所广场办公楼 170
	4.2.8 深交所广场办公楼 170 4.2.9 东莞供电局办公楼 176
	4.2.9 东莞供电局办公楼     176       4.2.10 大江东杭州格力产业园     188

	of a find with	筑"光储直柔"工程案例	
4.3	农村建	列 元明日来 1-1-4-1 1	4
	4.3.1	筑 "光緒直来" 工程条例 1 太阳能竞赛项目: R-CELLS 小屋 2	
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•
	4. 3. 3	山西芮城庄上村·····	
	4.3.4	山西芮城庄上村	,
	4.3.5	山西丙城圧上村 宁夏陶庄村社区办公楼	
财录			2
PI S			
附支	表1 "光	储直柔"建筑相关标准	,
附達	表2 术	储直柔"建筑相关标准 普和缩略语中英文对照表	