



深圳市建筑科学研究院股份有限公司
Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd.



ENERGY FOUNDATION
能源基金会

中国光储直柔工程应用 案例调研

Surveys of China's PEDF Building Engineering Application

深圳市建筑科学研究院股份有限公司

2023年10月31日

Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd

October 31 2023

关于作者

康 靖 深圳市建筑科学研究院股份有限公司高级技术经理
李婉溢 深圳市建筑科学研究院股份有限公司助理主任

ABOUT THE AUTHORS

Kang Jing Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd
Li Wanyi Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd

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（课题编号：G-2206-33942）。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd and is funded by Energy Foundation China (Grant Number: G-2206-33942).

免责声明

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

Disclaimer

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

摘要

双碳目标下，建立新型电力系统是中国深化能源结构改革的重大战略方针。为了实现以上战略目标，国家与地方政府相继颁布了多项提高可再生能源发电占比、强化光伏产业及用户侧应用的相关规定，而如何应对分布式可再生能源快速发展和高比例接入是电力系统需要应对的挑战。光储直柔建筑是以直流配电为基础，集成可再生能源发电以及分布式储能的新型建筑。在以太阳能光伏和储能电池为主的分布式电源以及电动汽车大比例接入建筑的趋势背景下，直流配电系统可通过减少交直流变换环节降低能量损失，以实现可再生能源本地消纳的形式减少电网供电压力。因此，光储直柔建筑能有效提升系统能量使用和管控效率，并提高建筑微电网的供电安全性与可靠性。该应用可作为一种以净零能耗为目标的全新适宜技术，实现建筑节能和减排，以及城市可持续发展的长远战略目标。

近年来在全国各地政府的支持下，更多的光储直柔建筑项目开始投建并逐步进入运行阶段，为这项初生的技术注入了强劲的活力。中国光储直柔工程应用案例调研报告采用分析结合案例调研的方法，旨在多方面的介绍这一工程技术在中国的应用基础，发展现状，内在驱动力和技术障碍，以及未来发展方向。报告正文共四个章节，章节一对相关政策基础和工程标准现状做了总结。章节二描述了目前的六十余项光储直柔项目的调研结果，分析应用特征与技术现状，并对技术特点与不足进行了总结与评价。针对工程利益主体所关心内容进行分析，总结出了技术发展的优势和劣势，更重要的是根据述求归纳政策引导方向，这部分内容体现在章节三中。章节四为本报告结论，讨论了中国光储直柔工程应用特点以及引导该技术发展的政策方向。该报告不仅是对中国光储直柔建筑技术应用的阶段性总结，同时也是对该领域不同工程技术的调研与适用性分析，结论可为意向建设光储直柔项目的同行提供参考。

Executive Summary

In response to the carbon peaking and carbon neutrality goals, it is a critical strategic guideline for deepening the reform of energy structure in China and set up a new power system. To achieve the above strategic goal, the State and local governments have issued multiple regulations to increase the proportion of renewable energy generation, further develop PV industry, and strengthen user-side application. However, the power system still faces challenges in the approach to addressing the rapid development and high-proportion access to distributed renewable energy. As a new mode of energy application, PEDF buildings are based on DC distribution system while integrating renewable energy generation and distributed energy storage. It has become a trend that the distributed generation with solar PV and battery energy storage (BES) as the mainstays, and electric vehicles are accessing the buildings as new energy consumers. As a result, DC distribution system can reduce energy loss by lessening the conversions from DC to AC, and thereby alleviates the pressure of renewable energy impacts to utility grid. Therefore, PEDF buildings can effectively improve the system energy usage and control efficiency and provide more security and reliability for building microgrid energy consumption. The application of PEDF buildings can be used as a brand-new appropriate technology to achieve the long-term strategic targets of building energy conservation, emission reduction, and urban sustainable development, with a goal of net-zero energy consumption.

With the support of local governments in China, more PEDF building projects have gradually been constructed and operated recently, injecting strong impetus for this emerging technology. This paper intends to make an introduction to this engineering technology from multiple aspects such as its application basis, development status, internal driving strength, and technical barriers in China. Section 1 summarizes relevant policies and standards which support development of PEDF building industries. The investigation results we conducted for more than 60 PEDF projects and their application characteristics, technology status are summarized and estimated in section 2. Section 3 focuses on analyzing what concerns the engineering stakeholders, summarizing the strengths and weaknesses of the technology during development, and more importantly, identifying the policy guiding directions according to the appeals for this technology. Conclusions of this research are presented in Section 4. This report not only makes a periodic summary of the application of PEDF building technology in China, but also investigates and analyzes the applicability of different technologies in this field. The conclusions can be referred by building practitioners who intend to be engaged in PEDF projects as engineering experiences.

目 录

1	政策与标准现状	1
1.1	政策环境	1
1.2	光储直柔标准	3
2	光储直柔建筑工程应用	6
2.1	项目分布情况	6
2.2	主要技术应用情况	8
2.2.1	太阳能光伏	8
2.2.2	用户侧储能	10
2.2.3	直流配电系统设计	12
2.2.4	用能柔性控制技术	15
3	工程利益主体态度	18
3.1	项目发展动机	18
3.1.1	发展驱动力	18
3.1.2	经济性收益	18
3.2	主要技术障碍	19
3.3	对引导型政策的需求	20
4	结论	21

1 政策与标准现状

光储直柔建筑技术的研究与工程实践离不开政策支持。本章节回顾了近年来中国政府发布的对光储直柔建筑技术应用有实质性推动作用的利好政策，以及它们带来的发展机遇。而标准的建立，是一项新技术走向工程实施所做努力的第一步。值得让所有投资者高兴的是，这项技术在发展初期已经具备了基本标准框架，使工程建设并非“无迹可寻”。

1.1 政策环境

可再生能源应用、用能结构改变是促进电力系统技术改革的根本原因。在过去十几年里，中国政府相继出台了太阳能光伏产业的激励政策与调整能源结构的规范。清洁能源应用得到了规模化发展，而其发电不确定性和电气特性也为应用带来了新挑战。

早在 2020 年 9 月中国在第七十五届联合国大会上提出将采取有力的政策和措施，于 2030 年前达到碳达峰，并力争于 2060 年前实现碳中和的国家目标（简称“双碳目标”），政策密集出台深化布局绿色低碳产业，促使能源结构逐步由高碳向低碳甚至无碳转变。2021 年 10 月 24 日，中共中央国务院发布《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》（以下简称《意见》），作为碳达峰碳中和“1+N”政策体系中首份纲领性文件，明确了我国实现碳达峰碳中和的时间表、路线图，为碳达峰碳中和进行了系统谋划和总体部署，也是中国碳达峰碳中和的顶层设计。《意见》明确提出：以能源绿色低碳发展是关键，加快形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局，坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达峰、碳中和。

新时期电气化发展是推动能源绿色低碳转型，助力实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。作为“双碳目标”路径实施中为首的政策文件，《2030 年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23 号）中明确提出：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。到 2025 年，城镇建筑可再生能源替代率达到 8%，新建公共机构建筑、新建厂房

屋顶光伏覆盖率力争达到 50%。可再生能源的随机性、波动性将对城市电网的安全、稳定运行带来极大的挑战，制约可再生能源大规模的应用。建筑中采用“光储直柔”技术不仅是解决分布式光伏接入和消纳问题的重要手段，而且是面向新型电力系统实现“荷随源动”的重要技术支撑，对于零碳建筑和零碳电力的实现具有重要作用。住房和城乡建设部发布《关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知》（建标〔2022〕24号），提出建筑用能电力替代行动、新型建筑电力系统建设两项建筑电气化重点工程。其中，建筑用能电力替代行动以减少建筑温室气体直接排放为目标，扩大建筑终端用能清洁电力替代，积极推动以电代气、以电代油，推进炊事、生活热水与采暖等建筑用能电气化，推广高效建筑用电设备、产品。到 2025 年，建筑用能中电力消费比例超过 55%。“十四五”期间积极开展新型建筑电力系统建设试点，逐步完善相关政策、技术、标准，以及产业生态。这同样为以建筑电气化作为基础的光储直柔技术发展指明了路径与方向。

在政策指导作为应用基础下，经过一系列实验和工程验证，光储直柔建筑技术可以有效解决大规模可再生能源发电接入电网系统所引发的问题，这点在中国工程界成为了普遍共识。双碳目标提出以来，国家和地方政府有意加快电力改革步伐，相继出台了多项有利于可再生能源应用和电力市场交易相关政策（表 1.1）。种种迹象表明，加速可再生能源发电本地消纳和实现用户与电网灵活互动是用户侧电力系统未来建设的重点，这些正是推动光储直柔建筑技术的关键契机。

表 1.1 有利于光储直柔技术发展的相关政策

政策名称	时间	颁布者	内容
电力系统辅助服务管理办法	2021.8	国家能源局	推动有偿电力辅助服务政策出台，促进建筑柔性技术发展
智能光伏产业创新发展行动计划	2022.1	国家能源局等五部门	统筹推进居民屋面智能光伏系统，鼓励新建政府投资公益性建筑推广太阳能屋顶系统。 开展以智能光伏系统为核心，以储能、建筑电力需求响应等新技术为载体的区域级光伏分布式应用示范。
关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见	2022.1	国家发改委、国家能源局	强调要遵循电力市场运行规律和市场经济规律，优化电力市场总体设计，加快形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系。
关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政	2022.2	国家发改委、国家能源局	完善建筑绿色用能和清洁取暖政策、电力需求响应机制，健全能源法律和

策措施的意见			标准体系
“十四五”能源领域科技创新规划	2022.4	国家能源局、科学技术部	引领新能源占比逐渐提高的新型电力系统建设。发展先进可再生能源发电及综合利用与新型电力系统及其支撑技术

1.2 光储直柔标准

直流配电技术是光储直柔在工程应用中的重点与难点之一。实际上，我国低压直流已在许多行业得到了广泛应用，主要以专用场景为主，照明、数据中心供电、工业电压暂降治理，舰船、航空器供电等，同时也积累一定标准化基础，例如电力行业的《电力工程直流系统设计技术规程》（DL/T 5044-2004）和通信行业的《240V 直流供电系统工程技术规范》（YD 5210-2014）等，并且我国已于 2017 年颁布了国标《中低压直流配电电压导则》（GB/T 35727-2017），其中规定了直流配电系统的电压等级及电压偏差要求。此外，中国工程建设标准化协会标准还推出了《直流照明系统技术规程》（T/CECS 705-2020），为直流照明工程应用提供指导。更多相关标准详见表 1.2。

表 1.2 低压直流技术相关标准

标委会名称	相关标准名称
全国电压电流等级和频率标准化技术委员会	GB 156-2007 《标准电压》
全国电工仪器仪表标准化技术委员会	GB/T 18216-2010 《交流 1000V 和直流 1500V 以下低压配电系统电气安全》
全国建筑物电气装置标准化技术委员会	GB/T 16895 《低压电气装置》
	GB/T 13870.1-2008 《电流对人类和家畜的影响》
全国绝缘配合标准化技术委员会	GB/T 16935 《低压系统内设备的绝缘配合》
能源行业发电设计标准化技术委员会	DL/T 5044 《电力工程直流系统设计技术规程》
全国低压电器标准化技术委员会	GB/T 14048 系列 《低压开关设备和控制设备》
全国低压电器标准化技术委员会	GB/T 10963.2-2016 《交直流断路器》
全国低压电器标准化技术委员会	GB/T 10963.3-2016 《直流断路器》
全国熔断器标准化技术委员会	GB/T 13539.6 《太阳能光伏系统保护用直流熔断器》
全国避雷器标准化技术委员会	GB/T 18802.31 《用于光伏系统直流侧的电涌保护器》
全国照明电器标准化技术委员会	GB/T 24823-2009 《普通照明用 LED 模块性能要求》
全国旋转电机标准化技术委员会	GB/T 22716-2008 《直流电机电枢绕组间绝缘试验规范》

全国汽车标准化技术委员会	GB/T 18487-2001 《电动车辆传导充电系统》
建设部标准定额研究所	GB/T 10411-2005 《城市轨道交通直流牵引供电系统》
中国通信标准化协会	YD/T 2387-2011 《通信用 240V 直流供电系统》
中国通信标准化协会	YD/T 2378/2089 《通信用 240V/336V 直流供电系统》
中国通信标准化协会	YD/T 3091-2016 《通信用 240V/336V 直流供电系统运行后评估要求与方法》
中国通信标准化协会	YD/T 2555-2013 《通信用 240V 直流供电系统配电设备》
中国通信标准化协会	YD/T 2556-2013 《通信用 240V 直流供电系统维护技术要求》
中国通信标准化协会	YD/T 2656-2013 《基于 240V/336V 直流供电的通信设备电源输入接口技术要求与试验方法》

近五年内，整体关于光储直柔配电的工程技术标准编制工作取得了突破性进展（如图 1.1 所示）。电压的选择是这项全新供配电技术的基础，国家标准《中低压直流配电电压导则》（GB/T 35727-2017）定义了低压配电系统中电压的推荐值，这些规定更符合工程应用实际。在配电设计与评价方面上，建筑与电力领域同时颁布了首个民用建筑直流配电设计标准《民用建筑直流配电设计标准》（T/CABEE 030-2022）以及系统性能综合评估方法《低压直流配电系统能效与电能质量综合评估方法》（T/CPSS 1008-2021），为项目落地提供依据。2020 年出台的《直流系统用故障电弧检测模块动作特性试验方法》（T/CEEIA 468-2020），描述了直流故障防护方案，有针对性的指导电气设备研发。同时，直流配电保护标准也进一步得到了完善，考虑到交直流配电的区别，阻抗扫频装置技术（《低压直流配用电系统阻抗扫频装置技术规范》（T/CPSS 1005-2021））、系统保护配合设计（《有源低压直流配电系统保护与配合设计规范》（T/CSEE 0277-2021））以及剩余电流动作继电器（《直流系统用剩余电流动作继电器（DC-RCR）》（T/CEEIA 469-2020））的技术规范弥补了安全方面的空缺。由能源基金会支持，深圳市建筑科学研究院股份有限公司主编的《建筑光储直柔系统评价标准》也进入了征求意见阶段。该标准定义了光伏、储能、直流配电、柔性用电在建筑项目应用的技术模式与评价方法，为建筑光储直柔性能要求提供技术指导。总的来说，虽然还在起步阶段，但是光储直柔技术领域的标准编制工作在多方面得到了发展并取得实质性成果，已经奠定了工程应用基础。

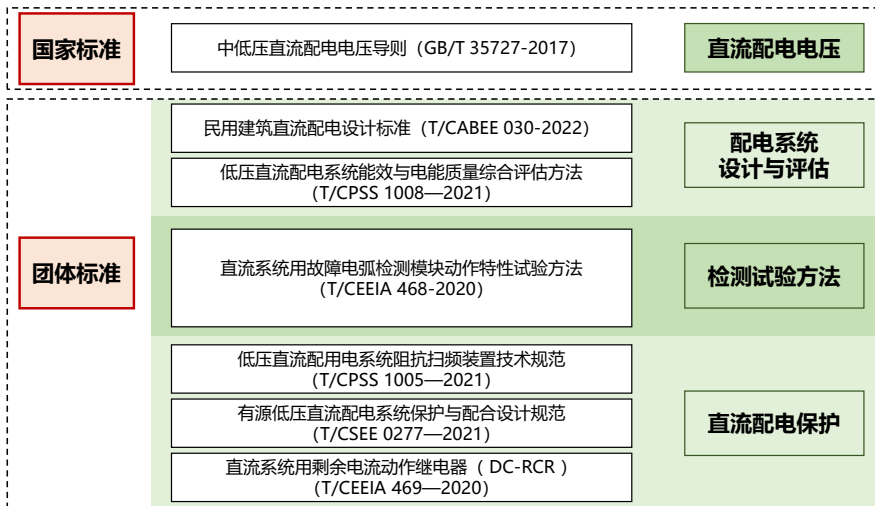


图 1.1 新编光储直柔技术标准

2 光储直柔建筑工程应用

2022 年是中国光储直柔建筑技术路线提出的第二年，实际上具有这种技术特点的工程项目应用早在十年前就已经设计并实施。本研究对已建成投运、工程施工、设计及意向阶段的光储直柔工程项目开展调研，通过问卷形式在全国范围内进行征集。最后共收集了处于不同工程实施阶段共 68 项建筑光储直柔工程，具体分布如下表 2.1。处于运行阶段的项目数量最多，占总数的 39%，绝大多数于 2020 年左右投入使用，早期项目于 2018 年便已经运行，如南京市联东 U 谷园区光储直柔楼宇。施工阶段项目占比 21%，这些项目包括了不同建筑应用场景与不同的工程规模（单体建筑或者园区），工程正在向多元化趋势发展。设计及意向阶段项目共占比 40%，其中不乏如三里屯太古里北区直流微电网工程的商业项目，大部分计划 2022 年底进入施工阶段。

表 2.1 光储直柔项目现状

项目状态	数量	比例
运行阶段	27	39%
施工阶段	14	21%
设计阶段	13	19%
意向阶段	14	21%

2.1 项目分布情况

根据所有案例的类型分析，办公与商业型建筑项目占比 50%；居住型建筑与科教文卫建筑项目分各占比 19.1%；其他工程应用包括酒店、公园、停车场、直流微电网等（如图 2.1）。整体上来看，光储直柔项目的建设目标以工程示范应用为主，同时结合实际情况，提高本地可再生能源消纳并降低建筑运行能耗与碳排放。办公建筑项目多数来源于电网与建筑技术公司的示范项目，如深圳建科院未来大厦 R3 全直流建筑示范。其中科技园区与新农村建设也有光储直柔示范，如：雄安未来城市科技发展中心项目和芮城新能源装备产业园，主要目的在于探索可再生能源应用的新能源系统。部分房地产公司也将光储直柔技术创新用于商业建筑，进一步将该技术推向市场。

在居住建筑方面，已有以太阳光伏应用为主的光储直柔项目投入运行使用。苏州同里湖嘉苑别墅项目是早期由国家电网牵头的直流配电住宅示范，建设了集成储能电池、充电桩综合能源系统的建筑直流微电网。山西芮城县庄上

村建设了光伏装机容量达 2MW 的农村能源微电网，成为近年来典型住宅类光储直柔示范项目。高等院校和某些对公众开放的科教文卫场所也具有项目示范，这些主要带有一定技术探索与科研性质，以此验证不同路径的可行性。

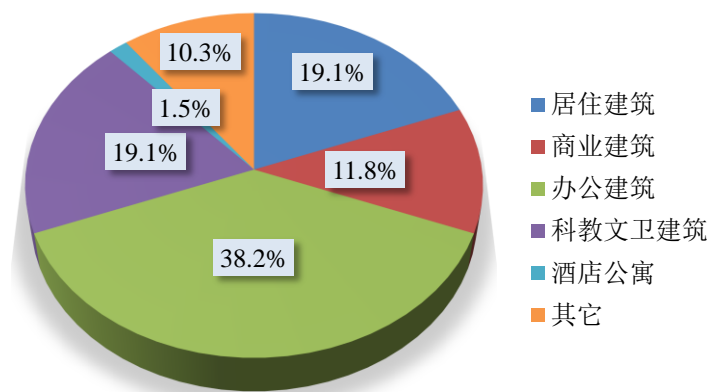


图 2.1 光储直柔项目在建筑类型上的占比

从项目地域分布来看，光储直柔项目多分布于经济较好的珠三角、长三角、北京、上海等地区（如图 2.2）。其中广东省项目数量位列第一，共 14 项，主要因为粤港澳大湾区的低碳发展方针为光储直柔项目落地带来了更多政策支持。北京和江苏省也是光储直柔项目试点的先驱，分别有 10 项，项目包括研究性质实验楼和技术试点示范。山西省在乡镇与农村光储直柔技术应用方面走在前列，共 7 项，其中运城市芮城庄上村项目具有 MW 规模。值得一提的是，除了经济较为发达地区，湖北、江西、贵州省也都有相应案例。意味着光储直柔技术作为重点发展的低碳路径获得了更多的地方政府认可与支持，在“双碳”目标背景下成为了未来关键能源应用技术之一。

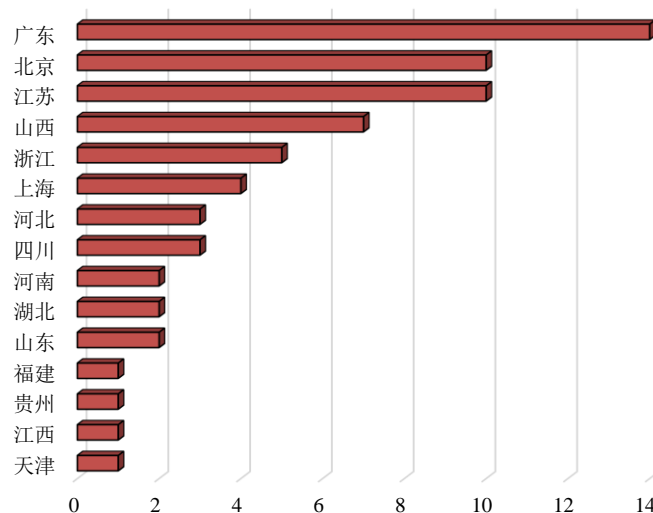


图 2.2 光储直柔项目的地域分布

2.2 主要技术应用情况

2.2.1 太阳能光伏

城市建筑体量大，建筑的屋顶、立面和阳台等部件都可以与光伏组件相结合，具有很大的利用潜力。而这样结合形成的建筑一体化光伏系统，既不影响建筑物的正常使用功能，又能获得电力供应，而且光伏系统在电网末端接入，从而无需对输电线路进行扩容改造，因此该系统将成为城市发展分布式光伏能源的重要方式。

光伏组件与建筑有多种结合方式，如光伏屋顶、光伏立面和光伏构件等，如图所示。但是不论哪种形式都必须考虑不同立面朝向、立面倾角、日照时间、太阳辐射量等根本性影响因素。

建筑屋顶用于光伏发电的优势尤为明显。首先，屋顶是建筑外表面中接受太阳辐射最多的地方。其次，屋顶是建筑外表面中闲置面积最大、最完整的地方。再次，屋顶安装光伏系统不影响建筑美观。最后，光伏屋顶技术成熟，安装维修方便。采用建筑屋顶光伏系统，不仅可以产生大量的电力供给建筑使用，而且减少了太阳直射辐射得热，因此可以减少顶层空调能耗，还起到建筑节能的作用。



图 2.3 建筑屋顶光伏系统

光伏系统还可以安装在**建筑立面**，形成光伏墙体系统，类似于屋顶光伏系统，光伏墙体系统也可以减少墙体的太阳辐射得热，从而减少建筑空调能耗。研究表明，在香港地区相比于普通南向墙体，光伏墙体夏季可以减少 51%的热量，在冬季的白天和晚上分别可以减少 69%和 32%通过墙体的热量。另外，如果将光伏组件与墙体之间通道内的热量收集起来，还可以作为热源直接或间接的供建筑使用，进一步起到建筑节能的作用。对于光伏电站，光伏组件通常都

是蓝色或黑色，而在光伏建筑一体化中，为了让光伏组件与建筑更加协调美观，彩色组件应运而生。如图所示，种类繁多的彩色组件类型，不仅可以满足建筑美观需求，还可以根据需求定制，从而增强与建筑的协调性，满足建筑美观时尚的目的。虽然彩色光伏组件会对发电效率产生负面影响，但是对于建筑一体化光伏系统来说，除了发电效率之外，更应该考虑其他方面的评价指标。对于建筑一体化光伏系统，按照重要性排序应该是先确保系统安全性、再尽可能追求美观性和建筑的协调性、最后再兼顾发电效率提升，这是建筑一体化光伏系统与传统光伏系统的一个重要区别所在。



图 2.4 建筑立面光伏系统

光储直柔建筑项目的最主要特点就是太阳能光伏发电在建筑侧的应用，因此都遵从了可再生能源利用最大化的原则：即尽可能利用建筑屋顶、立面等可利用空间安装太阳能光伏板。根据项目规模，光伏安装容量在 100 kWp 以上的项目数量为 25，占比 36.8%。华为数字能源技术有限公司安托山园区的光伏安装容量为 2670 kWp，光伏板全部安装在建筑屋顶和立面，是 MW 级别的自发自用光伏项目。值得注意的是超过 100 kWp 光伏安装容量的项目大多都选择了发电上网，而 100 kWp 以下项目将近半数选择自发自用。这是由于建筑用电和光伏发电曲线存在不匹配造成的，光伏装机容量越大这种不匹配程度越明显，因此考虑到经济效益选择了发电上网的运行策略（如图 2.5）。

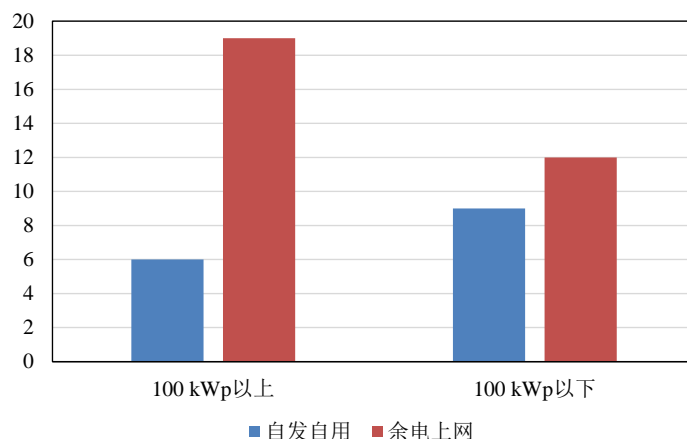


图 2.5 光伏并网项目分布情况

2.2.2 用户侧储能

随着储能技术的发展以及多年来对工程应用的验证，用户侧储能应用案例以及技术选择逐步增加。除了相变材料、蓄水蓄冰等热储能之外，以电池为主的电化学储能也是绿色建筑常用的节能/增效方案。

建筑储能指建设在建筑内部或外部（包括附属构筑物）接入建筑直流配电系统的储能系统。建筑可以根据自身能源系统特点和能耗情况来配置储能装置，并控制其运行，实现用电柔性。蓄电池可以将电网和分布式光伏的富余电能储存并在必要时释放，有效解决可再生电力供给和建筑用电需求在时间上的不匹配问题。同时，蓄电池还具有响应速度快、效率高及对安装维护的要求低等优势，因此受到建筑用户的欢迎。从电池产业的终端需求看，蓄电池作为备用电源和移动电源的应用较多，用于削峰填谷的储能电池在城市电网中有应用，而专门应用于建筑削峰填谷的储能电池还比较少。建筑场景对储能电池在布置和消防方面有特殊要求，与其他用户的储能技术不尽相同，因此建筑储能电池技术还处于初级发展阶段。

常见储能形式根据原理可以分为电化学储能、电磁储能、机械储能、热储能等多种形式，如表所示。从建筑电气化趋势和储能技术成熟度来看，建筑储能更适宜采用电化学能储能。

表 2.2 常见储能形式

储能技术	分类	优点	缺点
电化学能	锂离子电池	能量效率高、使用寿命长、充放电倍率高	成本略高
	铅酸/铅碳电池	应用最早、技术最成熟、成本低廉	能量密度低、循环寿命略低

储能技术	分类	优点	缺点
	全钒液流电池	能量效率高、使用寿命长、电化学极化小	投资成本高、占地面积大
机械能	抽水蓄能	成熟、容量规模大	受地理因素制约、基础投资大
	压缩空气	能量密度大	受地理因素制约
	飞轮储能	使用寿命长、瞬时功率大、响应速度快	试验阶段、造价成本高、噪声大
电磁能	超级电容储能	功率密度高、循环寿命长	试验阶段
	超导储能	功率密度高、循环寿命长、响应速度快	试验阶段、技术不成熟

目前，可能应用于建筑的电化学储能主要有锂电池、铅酸电池、锌溴液流电池、镍镉电池、钠离子电池等。其中铅酸电池在过去几十年中应用广泛，但由于其放电深度受到限制且存在环境污染等问题，锂离子电池得益于近些年的技术发展和成本降低，钠离子电池材料具备显著成本优势，更具发展潜力。

在所有光储直柔项目中，90%以上工程采用了用户侧储能，其中4项选择了蓄冷/热储能技术，3项同时采用了电池储能与蓄冷/热储能，其余40项采用了电池储能（如图2.6）。蓄冷/热储能通常采用蓄冷水箱+空调制冷的联动模式，在夏季夜间利用热容进行蓄冷，制冷高峰时段进行释放。设置储热+储电技术的项目要面临能量分配优化以及系统集成控制问题，相对来说将面临更大的技术挑战。

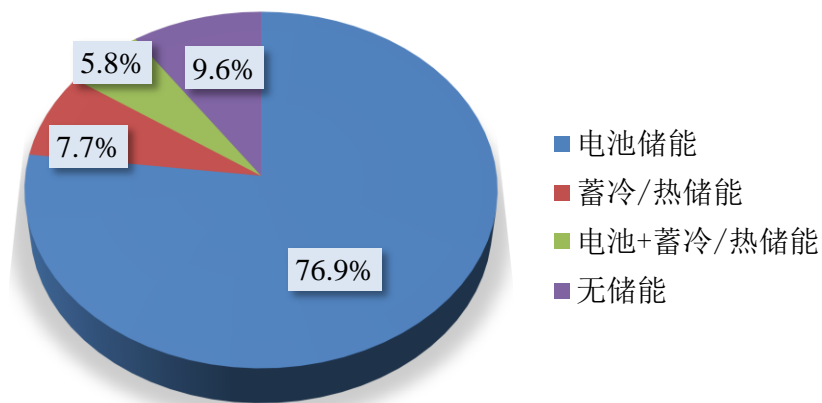


图 2.6 项目储能技术应用分布

案例中电化学储能系统选择的电池类型分布如下图 2.7。约 3/4 项目选择使用磷酸铁锂电池，该类电池在建筑储能应用上有着明显优势。磷酸铁锂电池的寿命长，能量密度高，安全性能较好，因此成为最有可能大规模应用的建筑储能技术。11.6%项目选择使用铅酸/铅炭类型电池。选择铅酸电池是因为其资源

环保可回收、高稳定性和安全性以及价格便宜的特性。而其在放电倍率、循环寿命上的劣势意味着这种电池将难以满足建筑储能大功率、高频率的使用要求，将逐渐退出这一技术应用舞台。其他类型包括钠离子电池与钛酸锂电池。在实际光储直柔工程中，电化学储能设备的安全保障措施值得关注。另外，还需保障用户侧储能使用环境可控，配合合理的电池管理降低电池热失控风险。

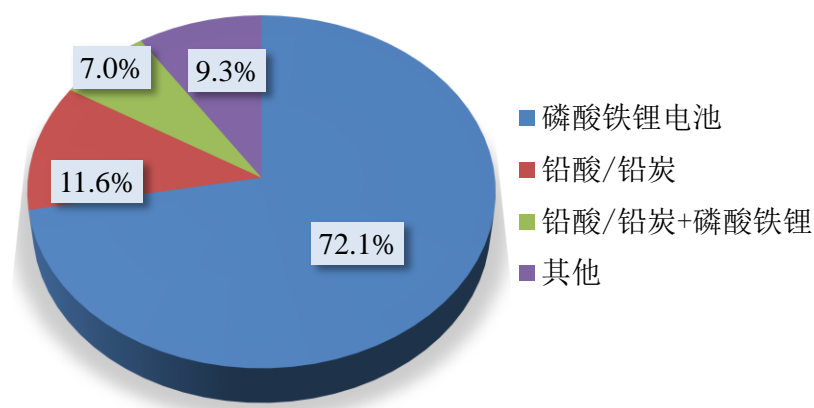


图 2.7 电化学储能技术占比

2.2.3 直流配电系统设计

直流母线是直流配电系统的关键环节之一，其不仅能实现能量输送和分布式电源接入的功能，还承载着部分控制信息传递功能。在建筑应用场景下，母线拓扑一般选择与交流系统相同的树干式拓扑结构，形式简单、成本低，保护配合、故障定位相对容易。

在母线极性方面，存在单极性和双极性母线两种形式。如图 2.8 所示，单极性母线指采用一个交直流变换器产生正负两极，双极性母线指在正负两极之间增加中性线，可取单极与中性线之间的电压，也可取正负极之间的电压对负载进行供电。从目前的研究和工程实践来看，单极性和双极性两种方式各有利弊。

单极母线架构结构简单、控制方便，在交直流换流器成本造价方面也比双极母线换流器低。单极母线提供单一电压等级，对于不同电压等级负荷的需求，要采用分层母线形式，增加了变换器数量和配电层级。双极母线能够提供两种电压选择，采用真双极母线的系统能够正负两极独立运行，为用户负载接入提供了更大的灵活性和可靠性。当然双极母线在负荷平衡、系统控制以及运维上

难度会显著增加。因此，建筑直流配电系统可根据系统供电规模、用电负载、分布式电源接入容量等情况，平衡供电可靠性和成本造价，灵活选择单极或双极母线形式。

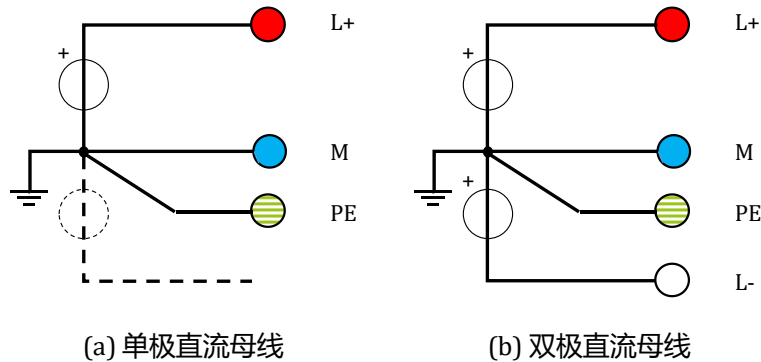


图 2.8 单极/双极直流母线示意图

从配电形式来看，项目中的直流配电系统分为交直流混合配电系统和全直流配电系统。从拓扑结构来看，可分为单极结构和双极结构。项目对配电系统架构的选择如图 2.9 所示。35 项工程选择了交直流混合配电系统，是全直流配电系统（14 项）的 2.5 倍。之所以倾向选择混合配电系统很大程度是因为目前直流配电技术不如交流配电技术成熟。现阶段在某些场景及电器应用中，还不能离开交流配电，因此混合配电系统的适用性大于全直流配电系统。而在拓扑结构选择上，一般情况双极结构的电压等级较单极结构更多，能接入不同功率大小的用电设备（如空调采用 750V，热水器采用 375V），因此在全直流配电系统应用更为合适。但是双极结构的系统更为复杂，其保护与能量管理技术难度较大，实际工程建议优先采用单极结构。

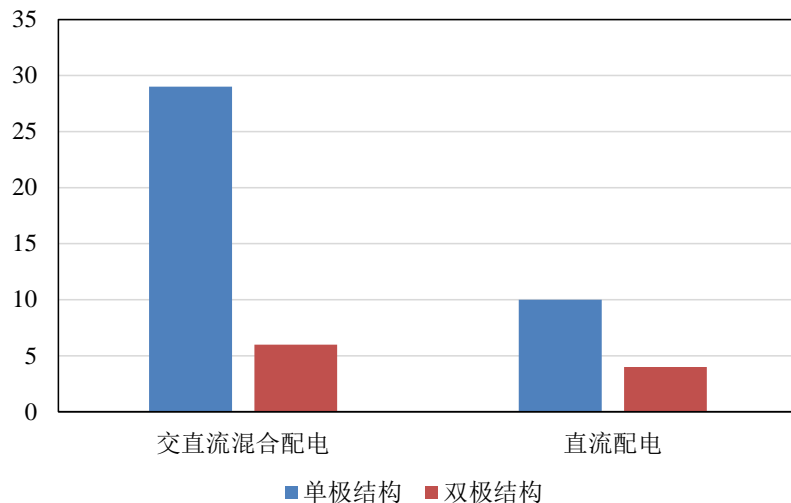


图 2.9 配电系统架构选择

直流母线电压等级是配电系统设计的另一个关键要素。低压直流特指 1500V 以下的直流电压，确定合理的建筑低压直流电压是直流系统发展的迫切工作之一。目前我国 GB/T 35727-2017《中低压直流配电电压导则》、GB/T 156-2017《标准电压》均给出直流电配电电压及相应传输能量的推荐值或范围，但国内外尚未有建筑低压直流配电电压等级标准提出。

针对低压直流电压等级的讨论主要集中在不同电压等级对用电安全、负载需求、既有交流产品设备兼容性、输配效率等方面的影响。根据 2017 年 IEC 针对直流负载电压的调研可知，如图 2.10 所示，目前应用的案例多数集中在 48V 以下、350V~450V、600V~900V 三个电压范围，对应占比约为 31%、27%和 23%。从我国已建成的几个示范项目看，目前采用的电压等级也多集中在这三个电压范围中。

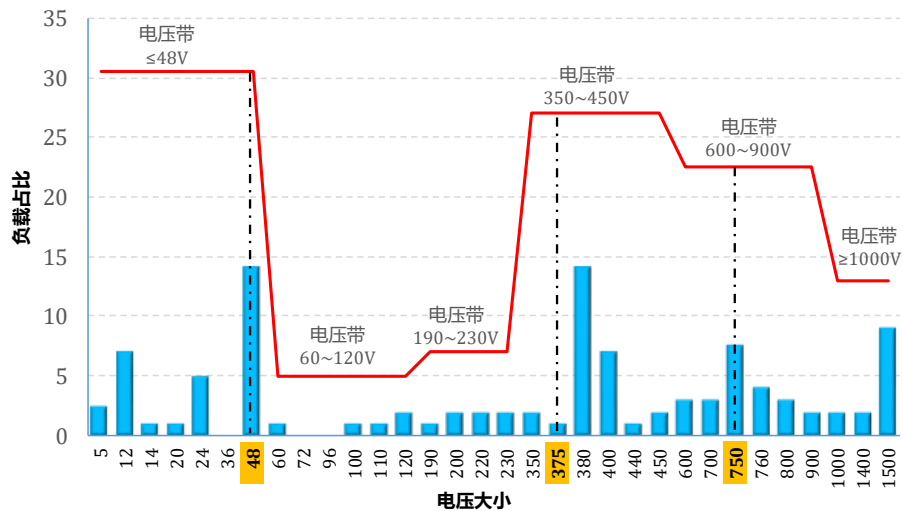


图 2.10 IEC 调研的直流负载电压分布情况

结合工程项目中对的不同功率电器的要求，已调研案例选择了以下电压等级：750 V，400 /375 V，220 V，48V；分别对应：1) 5kW 及以上大功率电器，2) 500W~5kW 功率电器以及 3) 500W 及以下小功率电器。电压选择往往和应用场景有关联。如公园和住宅项目通常选择 750V 与 220V 电压等级配电，因为目前市面上的市政和家用用电设备普遍能接入 220V 直流电。办公商业建筑选择 750V 与 400/375V 电压等级配电，这样做是为了降低电流及其线缆损耗，提高用电能效。48V 更安全而且基本满足 LED 照明、桌面设备用电供电要求，因此所有涉及到小功率用电（功率<1000 W）项目都选择了该电压等级。

2.2.4 用能柔性控制技术

一般来说，交流电系统的电能控制包括电压、频率以及相位的控制，过程复杂且控制难度增加。相比之下直流电系统的电能控制只涉及电压控制，很大程度的降低了控制难度以及成本，同时该特性意味着系统运行中直流电压可在很大的范围内波动。如图 2.11 (a) 所示，直流母线电压设置为 375V，该额定电压可以在 360V~400V 区间波动，且末端用电设备不受影响。电压继续上升到 410V，或下降到 330V 是滞环区，直流电器在该缓冲区域依然可以工作。而超过了这两个上限才会触发欠压、过压保护。由此可见直流配电控制可基于宽工作电压带的特性，利用电压与功率的特性来调控配电系统能量。图 2.11 (b) 所示为典型双向 DC/DC 变换器的下垂控制曲线，其输出功率随着母线电压发生变化。当母线电压低于 U_L 时，变换器以 P_{max} 对母线发电；电压高于 U_L 且低于 U_{BES} 时，变换器发电功率 P_{ref} 随着电压升高而下降。当电压高于 U_{BES} 且低于 U_H 时，变换器转为充电且功率升高；电压高于后充电功率达到 $-P_{max}$ 且不再变化。

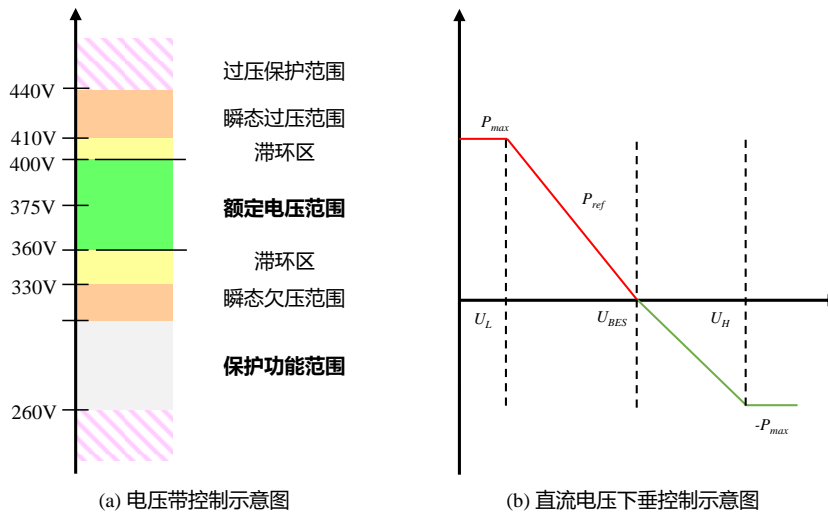


图 2.11 直流配电系统的控制原理

以某光储直柔示范建筑为例，所采用的系统控制逻辑如图 2.12 所示，展示不同母线电压下电网、储能、光伏三者电源的输出功率关系。当母线电压在 415V 以下时，光伏开始发电并随着电压下降而升高发电功率，在 390V 时达到最大输出。此时储能以恒功率进行充电。当母线电压在 390V 到 375V 时，储能充电功率开始随着电压下降而减少，直到 380V 功率为 0，然后转为放电并在 375V 上升到最大值。当电压下降到 375V 以下时，电网开始输出功率并在

电压为 315V 时达到最大输出。根据以上策略，可以通过调节母线电压及变换器工作电压决定电源的出力先后顺序，实现不同能量控制与管理策略。

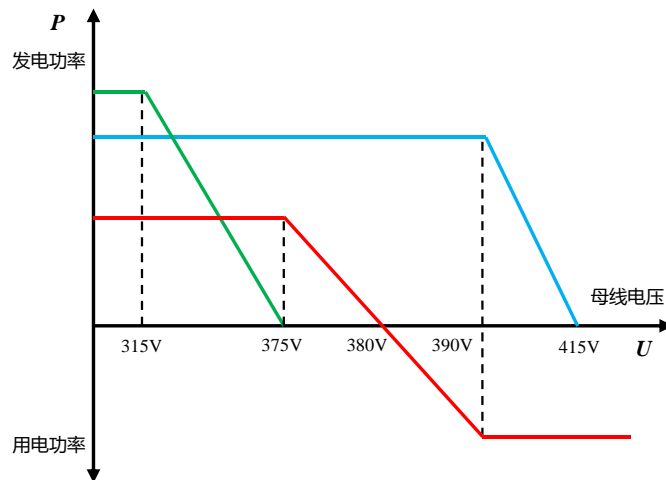


图 2.12 直流建筑电源的电压下垂控制

由于直流电压下垂控制方法的简洁性，超过 50% 的项目（35 项）采用通过母线电压调节的功率主动调节技术来实现建筑用能柔性控制。20% 项目采用了包括冰蓄冷、电动车有序充放电、能源路由器技术的功率控制方案，另外有 21 项目没考虑用能柔性调节功能。从用电设备柔性控制的角度来看，配合双向充电桩的电动汽车可视为建筑电储能的一部分，可统筹充分考虑这部分的负荷调节潜力。在所有案例中，拥有充电桩的项目为 28 项，其中 10 个项目充电桩有双向充放电功能。该技术在实际应用中面临着通讯协议、运营模式以及电动车用户参与度等问题，离全面普及还有很长的路要走。

对于光储直柔项目而言，柔性调节内容不仅仅包括控制方法，还应包括能够进行柔性调节的机电设备/建筑负荷。针对 27 项已投入运行的项目进行调研，统计项目中的可调负荷类型结果如图 2.13 所示。对于建筑负荷而言，插座电器、安防设备以及动力设备与人员的日常活动行为有关，是难以改变的刚性负载；家用电器的使用频率较低，使用规律也不易预测，同样不好参与调节。而空调与照明为室内环境服务，在人员可接受的舒适度范围以内，这两种负荷可进行一定程度的功率调节。因此超过半数的项目在柔性实现中选择了调节建筑空调系统和照明，结合蓄热技术增加空调调节柔性。随着充电桩在建筑中集成度的增加，越来越多的电动车接入建筑并成为了负荷的一部分。有序充电在未来也将成为建筑实现柔性的重要方式之一，光储直柔项目也利用这点作为可调资源，参与更多的建筑-电网互动。2 项工程采用了储能及蓄热技术（如相变材料蓄热）

来作为建筑柔性负荷，5 项工程则认为建筑用电负荷为刚性需求，不应参与功率调节，建筑用电柔性完全由储能电池实现。

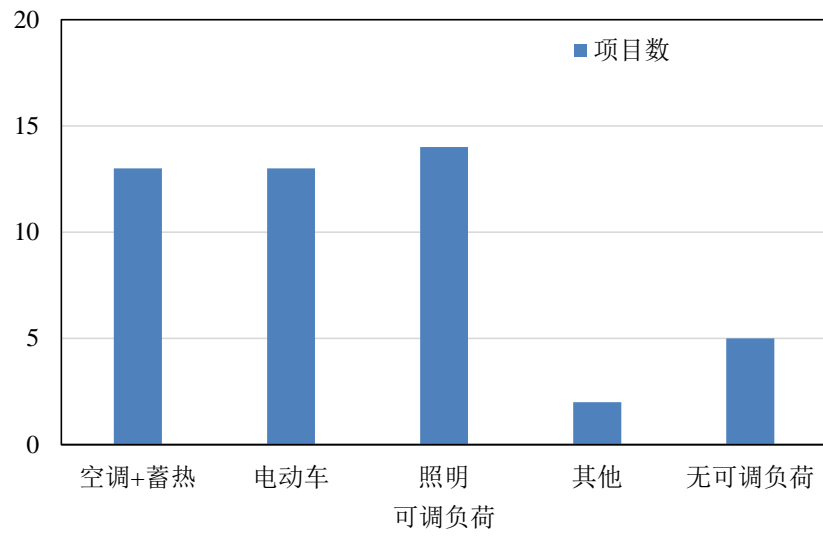


图 2.13 项目柔性可调负荷的选择

3 工程利益主体态度


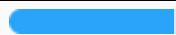





光储直柔建筑技术的应用不仅涉及建筑和电力领域，甚至能源、环保、交通等都存在技术相关性，工程项目落地需要各方面的协同合作，同时也涉及到各方面的利益。本研究对所有项目的利益主体展开调研，其中包括高校与科研机构、咨询单位和设计公司、机电设备制造企业、政府机构以及工程公司。调研目的在于初步确定不同主体对光储直柔新技术应用的态度及对技术推广的相关需求，内容包括技术实施的动机、主要障碍以及希望获得的支持，以此确定未来发展方向。

3.1 项目发展动机

3.1.1 发展驱动力

政策与经济性是新工程技术发展的驱动力，对于光储直柔技术发展的初衷也是如此。约 3/4 的受访者认为光储直柔工程目的是开展科研示范，响应国家号召，同时有利于与综合能源服务的商业模式进行融合，创造新的盈利机会（见表 3.1）。从技术本身来说，光储直柔配电在一定程度（特定应用场景）上能提高供电可靠性和电能质量，降低用电成本。建筑从业者认为该技术为行业发展寻得了新增长点。从分布式能源应用角度来看，直流配电应用更经济，提高光伏发电收益同时还能解决电网承载力问题。

表 3.1 技术发展驱动力








项目	投票数	比例
开展科研示范，响应国家号召	73	 73%
建筑行业找寻的新增长点	59	 59%
有利于与综合能源服务商业模式融合	74	 74%
经济运行，提高光伏发电收益	54	 54%
提高电网承载力	43	 43%
提高供电可靠性和电能质量，降低用电成本	64	 64%
其他（请注明）	7	 7%

3.1.2 经济性收益

除了相应政策及行业发展外，各行业还希望从光储直柔建筑中发掘更多技术价值（见表 3.2）。最有潜力的价值便是可再生能源本地消纳技术为供电公司

降低了风光电并网所带来的难度以及投资成本，而这一措施契合新型电力系统技术示范。而特低电压安全供电的模式提升了民用建筑场景用电安全体验，实现微电网的离网运行。设备供应商认为新技术可作为企业的营销手段，光储直柔技术作为工程项目的宣传热点能吸引更多的潜在客户。未来随着电力市场的进一步开放以及调峰需求的提升，光储直柔技术还能通过参与电网的需求响应服务为建筑提供更多的调峰收益。

表 3.2 光储直柔建筑创造的价值

项目	投票数	比例
低电压，显著提升民用建筑场景用电安全体验	67	 67%
直流插座、使用方便	31	 31%
稳定供电、可离网	59	 59%
新型电力系统技术示范	74	 74%
降低了供电公司的消纳难度和消纳成本	74	 74%
有利于项目和企业的营销宣传	36	 36%
其他	4	 4%

3.2 主要技术障碍

除了技术驱动力，所面临的问题与技术缺失也是工程投资者必须了解的内容，方便采取正确的对策。总得来说，光储直柔建筑项目在推进过程中遇到的障碍来自于以下方面：规范、产品、安全、激励手段和运维手段（见表 3.3）。首先是规范缺失问题，缺少设计规范、产品标准以及相应建筑标准是目前工程应用面临着最大的难题。随着《民用建筑直流配电设计标准》（T/CABEE030-2022）的颁布，一定程度解决了上述部分问题，但还是有更多施工方法急需规范来指导。第二个问题则是产品缺乏，如直流设备、电器产品和专用变换器。未实现规模化生产导致产品定制价格高昂，供应商选择有限。光储直柔工程涉及到存量建筑中配电系统改造和分布式储能应用，这些极具创新的应用所带来的安全问题也不容忽视。财务激励方面缺少补贴政策，电力公司与非电网公司的投资方均缺乏工程实施的动力。运维管理方面，建筑直流配电系统需要配备专业技术人员进行运维管理，因此这部分的人才培养也是该领域发展的工作方向之一。

表 3.3 目前技术发展面临的障碍

项目	投票数	比例
缺少设计规范及产品标准	75	75%
直流设备、电器产品和专用变换器，供应商太少，价格高	74	74%
运维技术及人员能力要求提高	25	25%
储能安全问题尚无法解决	57	57%
用户看不到明显实效，认可度低	60	60%
无补贴政策，非电网公司的投资方积极性不高	42	42%
电力公司缺乏光储直柔建筑所带来效益的财务激励	43	43%
缺少可以参照执行的建设规范	35	35%
没有专业施工队伍	7	7%
离网系统存在直流设备的匹配问题	22	22%
缺少可供借鉴的应用经验	16	16%
存量建筑推广困难，需要重构整个配电系统	42	42%
其他（请注明）	2	2%

3.3 对引导型政策的需求

结合以上不同利益主体动机和技术难点分析，本研究总结出发展光储直柔建筑工程所需要的政策制定方向与必要的模式机制（见表 3.4）。

出台规范与政策：完成光储直柔建筑工程标准体系，重点解决工程实施所面临的实际问题。如施工方法，建筑光伏安装要求和建筑电池储能安全标准。

提高市场活力：基于新型电力系统技术发展，光储直柔建筑建设目的之一是参与电网调节，并纳入电力辅助服务市场。推行合适的价格机制，使建筑光伏消纳和参与电网调峰的收益回馈给建筑，让更多的用户实现技术获利。

经济优惠政策：组织科技攻关，扶持自主品牌高科技企业。尽快纳入双碳发展、清洁取暖等政策推动体系当中，实现效益叠加。利用农村建筑低密度的特点，单独出台农村光储直柔政策，实现太阳能发电并网的双赢。

表 3.4 有利技术发展的政策引导需求

项目	平均综合得分
光储直柔建筑参与电网调节、纳入电力辅助服务市场	6.01
价格机制，电网调峰成本无法传导到用户	5.48
出台光储直柔建筑工程建设规范标准	3.82
出台建筑光伏强制安装或建设光储直柔建筑的比例要求	3.2
储能的安全标准制约了用户侧使用	2.97
尽快纳入清洁取暖政策推动体系当中，或融合现有各类资金，单独出台农村政策	2.74
光伏补贴按照电量，不能体现消纳的价值	2.35

政府补贴高效能、智能化的直流产品	2.13
大力发展投资主体	1.85
组织科技攻关，扶持自主品牌高科技企业	1.68
加大示范工程支持力度和宣传推广	1.44
尽快出台碳税、碳交易规则	1.2

4 结论

从技术上来看，光储直柔是建筑领域中太阳能光伏、储能、直流配电和柔性交互四项技术集成应用的建筑能源全新模式。自《2030年前碳达峰行动方案》提出以来，在全国各地政府的支持下，更多的光储直柔建筑项目开始投建并逐步进入运行阶段。越来越多的实际案例为技术工程应用及推广提供了参考样板，同时也让人更进一步思考：究竟什么样的建筑场景更适合光储直柔技术，以及什么样的政策更能引导该技术正向发展。

通过对工程案例的分析及归纳，我们可以发现建筑光储直柔技术更多的应用在办公与商业型建筑中，这类建筑运行规律，用能总量大，因此能更充分发挥光储直柔能源利用优势。从项目地域分布来看，光储直柔项目多分布于经济较好的珠三角、长三角、北京、上海等地区，值得注意的是，光储直柔技术本身并不会过多受制于地理环境因素，并且各地的案例意味着光储直柔技术作为重点发展的低碳路径获得了更多的地方政府认可与支持，在“双碳”目标背景下成为了未来关键能源应用技术之一。总的来说，光储直柔的技术特征意味着有很多的技术路径选择，实际工程应该充分发挥技术灵活性，选择更适合本地可再生能源利用、提升经济性及低碳效益的技术方案。

从政策引导的方面看，更细化、更有针对性的工程标准体系是现阶段光储直柔推广应用急需的环境。尤其是能重点解决工程实施所面临实际问题的工程标准体系，如施工方法，建筑光伏安装要求和建筑电池储能安全标准等，能更有力的推动我国光储直柔项目落地实施。依靠于新型电力系统技术发展所催生的电力辅助服务市场，提高光储直柔建筑的经济市场活力，能大大提升业主参与项目建设的驱动力。同时，光储直柔本质上作为工程应用的科学创新，应鼓励实施对技术的经济优惠政策来扶持相关领域高科技企业，如直流配电、用户侧储能设备以及柔性用电管控技术。