中国光储直柔建筑

战略发展路径研究

综合课题

中国光储直柔建筑战略发展路径研究
项目组

2022 年 7 月

关于作者

中国光储直柔建筑战略发展路径研究项目组

ABOUT THE AUTHORS

(Research group of China's PEDF Building System Development)

致谢

本研究由清华大学建筑节能研究中心统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Building Energy Research Center of Tsinghua University, and is funded by Energy Foundation China.

免责声明

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

Disclaimer

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

目 录

1. 研究背景与目标 5
1.1. 农村以屋顶光伏为基础的新型能源系统 5
1.2. 开发利用私家电动车电池资源的智能有序充电桩系统 5
1.3. 城镇建筑的“光储直柔”配电 6
1.4. 课题设置 8
2. 项目实施情况 10
2.1. 专题技术研讨会 10
2.2. 区域级示范应用 10
2.3. 公众宣传推广 11
2.4. 宣传推广取得的主要成果 12
3. 项目研究总结 13
3.1. 标准体系 13
3.2. 技术体系 13
3.3. 示范工程 16
3.4. 政策机制 24
3.4.1. 农村地区光储直柔的商业模式 24
3.4.2. 城市地区光储直柔的商业模式 25
4. 存在问题与进一步对策 28
4.1. 农村的光储直柔发展 28
4.2. 城市的光储直柔发展 29
4.3. 核心问题是光储直柔与电网的协调 30
4.4. 技术推广中的障碍 31
4.5. 未来需要进一步开展的工作 31
5. 课题技术报告摘要 33
课题 2：中国“光储直柔”建筑未来发展实施路径研究 33
课题 3：“光储直柔”建筑与电网的关系技术及相关政策研究 38
课题 4：中国光储直柔建筑中直流关键技术体系研究 40
课题 5：建筑电器直流化技术及接口标准研究 42
课题 6：“光储直柔”直流建筑标准体系研究 45

课题 7：中国光储直柔建筑发展的关键政策机制研究.....51
课题 8：“光伏+智能充电桩”可行性分析与示范.....54
课题 9：芮城城镇地区光储直柔建筑示范项目.....56
课题 10：农村光储直柔系统示范项目技术方案及商业模式研究.....58
课题 11：浙江电网湖州鲁能公馆示范项目.....60
课题 12：青岛奥帆中心建筑光储直柔改造示范研究.....63
课题 13：深圳未来大厦“光储直柔”工程实践与示范研究.....65

1. 研究背景与目标

针对要实现能源革命、把以化石能源为基础的碳基能源系统转型为以可再生能源为基础的零碳能源系统这一伟大任务，本项目提出要通过全面建设“光储直柔”的建筑新型配电系统，使建筑在电力系统中从目前扮演的单一的消费者的角色转型为“产、消、调蓄”三位一体的新角色，从而有效解决发展零碳的新型电力系统中面对的缺少风电光电安装空间、缺少有效的调蓄能力等关键问题；也使建筑领域在全社会低碳发展大战略下，不仅继续在建筑节能上持续努力，同时还助力于新型电力系统的建设，在开发可再生电力资源、实现可再生电力调蓄、有效消纳风电光电等方面辟出新径，破解零碳新型电力发展中的难题。

围绕这一目标，经过几年的研究和工程尝试，认识到近阶段光储直柔工作可从如下三方面重点突破：

1.1. 农村以屋顶光伏为基础的新型能源系统

通过识别分析卫星高分辨图片，我国农村可安装屋顶光伏 20 亿 kW，年发电量 2.5 万亿 kWh，为未来农村实现全面电气化后需要用电量的 3~4 倍。在山西芮城农村现场调查，每户可安装光伏的容量在 20~40kW 之间，全年可发电 2.5~4.0 万 kWh。目前每户全年用电量不超过 3000kWh，即使全面推广生产和交通电气化，也将有大量剩余电力。全面推广农机电气化，有可能使每户拥有 60kWh 以上的储电能力（各类可移动农机和车辆的电池），这就为调蓄每户屋顶光伏的电力提供了合适的储能资源，既可以协调发电与各种用电之间在时间上的不匹配，还可以协调剩余电力与电网输电能力及希望的输电时间段之间的矛盾，从而有可能实现一个配电台区或一个村庄电力的“**只出不进**”，也就是只通过农网向大电网输出电力，而在任何时刻都不从电网获取电力。一个村庄成为一个发电厂。这将彻底改变农村电力系统状况：对农民来说，屋顶光伏将成为其新的经济收入；对电力系统来说，农网将从长期以来依靠财政补贴的包袱转身变为可对电网起一定支撑作用的新型电源。这是从来没有过的电力系统架构，需要从每户、每个台区变压器以下的供电区、每个村庄的电力系统结构设计、安全分析、运行调度等多方面进行全面研究、创新和工程尝试与示范。

1.2. 开发利用私家电动车电池资源的智能有序充电桩系统

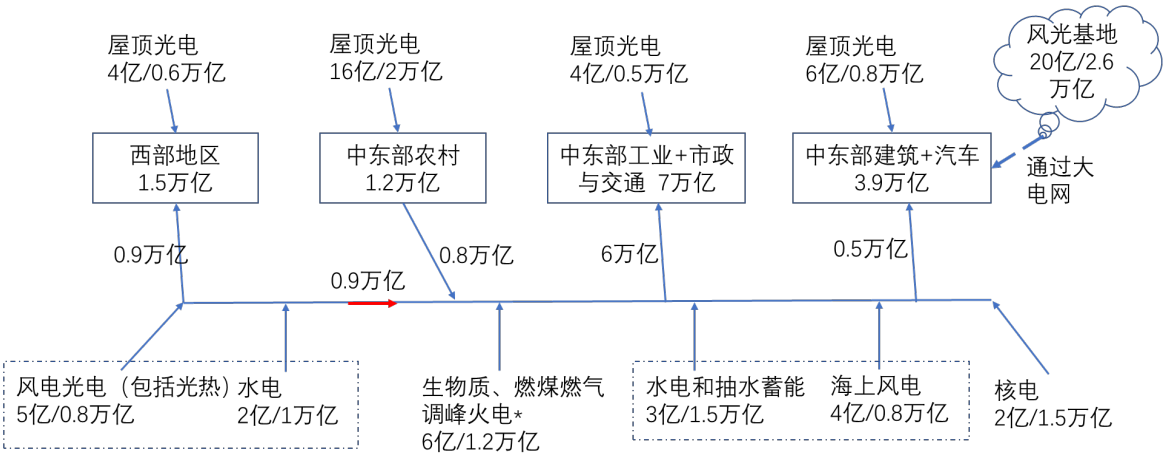
大比例发展风电光电电源的瓶颈是由于缺少足够储能资源导致的大幅度弃风弃光。而我国到 2040 年将拥有 3 亿辆私家电动车，日储能能力 150 亿 kWh 以上，可满足未来中东部地区风电光电消纳任务的 70%。私家车 85%以上的时间停在住区或工作地点的停车场内，如果实行“一位一桩”、“既停既插”，就有可能使停靠车辆的车载电池服务于电网的峰谷差调节和风光电消纳。停车场旁边必然是居住或上班的建筑，我国城镇的高层、多层建筑屋顶光伏仅能提供建筑用电的 15%~30%，再加上附近停车场通过充电桩连接的车载电池，可以在电网电力富足时（由于风电光电富足或处于用电低谷期）通过建筑对停车场车载电池充电，而在电网电力不足时由车辆放电满足建筑用能。这样就使光伏建筑成为“只进不出”模式，使城镇建筑加上其周边停靠的电动车仅在电网电力富足时从电网取电，满足其需求，而在电网电力不足时则停止或最少的从电网取电。既协助电网削峰填谷，又不由于反向送电给电网带来麻烦。1 万平方米的办公建筑+100 辆 5 座电动车，全年用电约 100 万 kWh (建筑 80 万 kWh，车辆 20 万 kWh)，自身光伏发电 10 万 kWh (1000 平方米)，日最大发电量 1000kWh，不到车辆可使用储电量的 30%；通过车辆的储能每天可以吸收低谷电力 2000~3000kWh，转移到电力负荷高峰期为建筑供电，从而助力电网的削峰填谷或消纳外界风电光电 0.5~1MW，同时维持“只进不出”，不影响电网的潮流。在目前电力系统电源仍以火电为主时，停车场车辆仅是消纳建筑自身光伏；而未来电网电源大比例为风电光电、停车场车辆也主要是电动车之后，则白天通过电网储存外界多出的风电光电，夜间在驻地停车场通过充电桩放电，为居住建筑供电。

1.3. 城镇建筑的“光储直柔”配电

充分利用建筑外表面安装光伏，建筑内部设分布式蓄电，光伏、蓄电池、邻近停车场的充电桩和建筑的电器设备直接接入建筑内的直流配电网，通过直流配电网与外电网的 AC/DC 接口调节直流母线电压实现对从外电网取电功率的调节和控制。蓄电池、充电桩以及连接在直流母线上的各种用电设备都根据直流母线电压的变化自行调节自己的用电或充/放电功率，从而实现整个建筑从电网取电功率的调节。除了仓库、会展中心、体育场馆等特殊的可大比例安装屋顶光伏的建筑，一般城镇建筑都可以是“**只进不出**”，但却可大比例消纳外电网的风电光电。光储直柔建筑由此成为连接电网和有序充电桩之间的桥梁，并且在未来零碳的新型电力系统中起到“生产、调蓄、消费”三位一体的重要作用。如果未来中国城镇建筑中 350 亿平方米的居住建筑和 100 亿平方米的办公建筑都成为这种配电模式，与 3 亿辆私人电动车相配

合，就足以实现 40 亿 kW 风电光电的调蓄和消纳。这就解决了我国未来规划的 70 亿 kW 风光电的 60%的消纳问题。

未来我国建筑年运行耗电量 4 万亿 kWh，私家车 0.7 万亿 kWh，农村生产生活 0.5 万亿 kWh，农村为大电网提供 1 万亿 kWh，共 6.2 万亿 kWh，为规划的风电光电总量 9 万亿 kWh 的 70%。



注*：采用CCUS回收生物质、燃煤和燃气调峰火电排放的CO2 8亿吨，剩余排放量小于生物质燃料排放量

图 1 我国实现碳中和目标时电力系统的构成
（注：图中“a 亿/b 万亿”是指“a 亿 kW/b 万亿 kWh”）

图 1 给出规划的我国实现碳中和时的电力系统构成。其中东西部划分主要是依据胡焕庸线，仅在个别处有所修订。中间的四个方块为主要的电力负荷。其中中东部制造业和市政及交通供电依靠由核电、风光电、水电和调峰火电提供的电力供应，依靠水电和调峰火电可完全满足调峰的需要；中东部农村的屋顶光伏在满足自身电力需求的基础上，将剩余 0.8 万亿 kWh 电力经过调蓄在指定时间段送出，为电力主干网供电；而城市建筑及与其连接的私家电动车则要依靠自身屋顶光伏，并承担中东部集中的风电光电（20 亿 kW， 2.6 万亿 kWh）的消纳任务。因此城乡建筑光储直柔成为我国未来实现以风电光电为主要电源的零碳电力的主要任务，是消纳与调蓄风电光电的主要支撑。

上述目标是涉及城乡建筑、车辆、农机、和电力系统的巨型工程，需要 30 到 40 年的时间、15 万亿的投资、以及全社会用电文化革命性变化才能实现。本项目就是围绕这一目标，尝试其可行性，规划技术路线，厘清实现这一目标的技术、政策、机制、产业、金融、文化等各个方面的障碍，并通过几个不同类型的典型工程的策

划与实施过程探索克服这些障碍的途径，从而初步规划出我国实现上述目标的路线图。为这个宏伟目标的实现初步探讨其可行路径，是本项目的主要目的。

1.4. 课题设置

按照这样的思路，2021 年 5 月启动的“光储直柔”一期项目设计了 13 个课题，如表 1-1 所示。各课题已完成结题技术报告，报告摘要见第 5 部分。

表 1-1 光储直柔一期项目（2021 年 6 月到 2022 年 6 月）课题

课题编号	课题名称	所属类别	承担单位
1	综合管理、总报告、宣传推广	综合	清华大学，深圳建科院
2	宏观规划研究	规划	深圳建科院，清华大学
3	光储直柔与电网的关系	技术	南方电网深圳供电局
4	光储直柔配电系统	技术	南京国臣
5	建筑电器的直流化与柔性化	技术	珠海格力电器
6	光储直柔相关技术标准体系	标准	国网电科院
7	光储直柔政策机制	政策	中科华跃能源互联网研究院
8	有序充电桩系统	政策、技术	清华大学
9	芮城县城公共建筑光储直柔	示范	清华大学，深圳建科院
10	芮城县农村建筑光储直柔	示范	国臣，清华大学
11	湖州鲁能公馆光储直柔示范	示范	清华大学，国网湖州电力公司
12	青岛奥帆中心光储直柔改造	示范	清华大学，青岛奥帆中心
13	深圳未来大厦光储直柔	技术	深圳建科院

这一组课题设计的基本思路是通过课题 3、4、5 对光储直柔的关键技术进行进一步研究，弄清其中的逻辑关系、技术难点、可能的突破口。课题 13 则是围绕中国第一座全面按照本项目理念建成的光储直柔建筑进一步的测试分析和实验，说明本项目目标的可实现性和需要进一步解决的各种问题。这四个技术研究性课题既为示

范工程提供技术支持，同时也为国家有关部门设立相关重大科研项目初步探明技术方向。课题 9~12 则是不同场合的示范工程研究，分别包括农村以屋顶光伏为基础的新型农村能源系统（10），中小县城级通过光储直柔有效消纳外部风电光电从而实现零碳电力的可能性（9），新建商住综合体的光储直柔（11）、以及既有公建改造项目在改造中同时实现光储直柔（12）。这四个示范工程的初步探讨试图通过深入研究在各类工程项目立项初期，如何通过技术、经济和绿色发展愿景等作为推动力实现光储直柔技术的落地，梳理出在不同场合下推动光储直柔的动力和阻力、影响项目落地的瓶颈、障碍，可能的融资机制和经济回报。由于智能有序充电桩成为光储直柔建筑最主要的储能资源，所以又专门设置了课题 8 研究充电桩相关的技术、推广机制、以及如何改变目前的充电文化，从而能充分挖掘利用电动车车载电池的储能潜力。课题 2 则是以我国多个机构目前提出的中国未来低碳能源规划，研究和规划光储直柔在低碳能源系统中的作用，尤其是在建立零碳的新型电力系统中，对挖掘可再生能源开发所需要的空间资源、解决风电光电有效消纳所需要的电力调蓄能力所具有的重要作用。同时规划出需要与我国能源系统转型同步实施的建筑光储直柔实施路线图。希望这个项目的全面完成能够科学地回答发展光储直柔对我国实现低碳能源转型的意义和作用，初步厘清发展中必须解决的关键技术政策和机制问题，从而汇集各种资源，有计划有目的地解决这些问题，调动起全社会各相关方的积极性，通过全面利用各种资源，使建筑的光储直柔被全社会接受，并进入正常的研究、发展和推广轨道。

2. 项目实施情况

2.1. 专题技术研讨会

项目在 2021 年 5 月正式启动，由于新冠抗疫的要求，大多数交流和研讨活动只能在线上开展，但各个课题克服困难，基本上按照原计划进行，完成了原定计划中的各项工作。围绕本项目的开展，综合组协调组织了多次进展交流会和专题技术讨论会，疫情期间主要以线上会议方式进行，主要的线上交流活动如表 2-1。

表 2-1 项目专题交流与讨论会

时间	主题	主要议题与成果
2021 年 5 月 21 日	项目启动会	项目启动与整理研究计划
2021 年 8 月 20 日	专题学术沙龙	直流微网架构与技术体系
2021 年 11 月 8～9 日	各课题进展讨论会	各课题汇报研究计划与进展
2022 年 2 月 23 日	专题学术沙龙	智能充电桩关键技术专题研讨
2022 年 3 月 2 日	专题学术沙龙	光储直柔关键技术与示范项目
2022 年 3 月 16 日	专题学术沙龙	建筑配电系统关键技术专题研讨
2022 年 4 月 14 日	专题学术沙龙	标准体系和政策机制
2022 年 6 月 16 日	专题研讨	项目研究进展总结与研究展望
2022 年 6 月 23 日	专题研讨	项目研究关键总结与下阶段工作计划

2.2. 区域级示范应用

本项目依托的示范工程之一是山西芮城县。由县委县政府正式委托本研究团队承担芮城全县零碳规划。根据对全国能源零碳转型研究的认识，提出零碳能源的评价指标。一个区域由于能源使用导致的碳排放应为区域内直接燃烧化石燃料导致的碳排放和由于引入外界电力导致的间接碳排放之和。尽管芮城全年的光电和风电发电量已高于全年的用电量，但由于缺少调蓄能力，约 40%的用电量依然来自于山西电网，其主要成分为燃煤火电，因此并不能认为其实现了零碳。只有通过城乡建筑的“光储直柔”和全县车辆电气化与有序充电，获得足够的储能和调节能力，使全县不再依靠电网的燃煤火电，实现电力自给，才能真正成为零碳。由此明确了全县通过全面推广光储直柔技术要实现的目标：在 2025 年实现碳达峰，2035 年实现碳中和，并通过能源低碳转型拉动经济发展，使全县人均 GDP 从不到全国平均水平的 50%提高到全国平均水平。这个规划在 2021 年 9 月在芮城组织了专家审查评议会，由国内电力、能源、建筑等领域的专家和中央有关部委、山西省地方政府部门人员对规划进行了全面研讨和评审，高度认可了通过光储直柔实现碳中和目标这一发展

思路和实施路线。依据本项目课题 9 和 10 的成果，这一规划提出把农村通过光储直柔建设成在满足自身全面电气化的基础上实现净对外输出电力的基地，而县镇又依靠农村电力和多种储能措施，以及生物质调峰电厂实现电力供给的零碳和平衡。这可以认为是如何依靠光储直柔实现整个区域能源零碳，而不依靠 CCS 或 CCUS 的一个具体例证。

围绕有序充电桩系统建设，研究规划了海南岛电力系统的零碳方案，提出通过建成全岛的有序充电桩网络并实行全岛车辆电气化，就可以由岛上核电承担基荷、风电光电保证电量，车载电池满足储能和调节，使全岛电力零碳和自给。这一方案在 2021 年 4 月在海口“汽车百人论坛”上初步提出，在 2022 年 4 月海南绿色金融论坛上深入讲述，并几次向海南省有关部门汇报。2021 年 11 月应邀在北京市参事室就北京市建设智能有序充电桩系统做汇报，并形成参事室专门建议，上报北京市政府。

2.3. 公众宣传推广

（1） 光储直柔专业委员会

在本项目的支持下直流建筑联盟持续开展活动，并在中国建筑节能协会的支持下，成立了“光储直柔”专业委员会，全面组织光储直柔的技术交流、标准制定、以及相关宣传、推广工作。2021 年 5 月在成都的全国绿建大会上组织了专场报告会，受到参会者的高度关注。

（2） 直流联盟公众号

直流建筑联盟公众号自 2018 年 4 月发布以来，共推送直流建筑技术、建筑电气化、建筑柔性、光储直柔、专家报告分享等文章共 323 篇，其中原创文章 177 篇，累计阅读量 40 余万人次（截至 2022 年 6 月）。

（3） 重要会议报告

就光储直柔的发展及其对建设新型电力系统的重要意义，根据本项目研究结果，已分别写入中国工程院和中国科学院组织的中国实现碳达峰碳中和路径的两个重大咨询项目中，作为建议提交国务院。

自 2021 年 5 月本项目开题以来，江亿等先后在国家和省的电力部门、建筑部门和科技管理部门组织的各种会议和培训班上做了十八次报告（每次 20 分钟到 2 小

时）（配电大会 21.9.14，22.4.27，中关村论坛 21.11.25，海南绿色金融论坛 22.4.15，电力系统光储直柔论坛(江苏电网主持)22.4.11，山东科协低碳论坛 22.5.26，海南岛 21.9.15，横琴岛零碳能源 22.6.13，中国建筑节能协会 22.6.14，京能集团 22.4.29，天津科协 22.5.21，华润集团总部 21.12.11，全国政协常委会提案委员会学习会 22.3.23，五道口金融学院 22.4.22，清华经管学院 22.5.12，新华网绿色投资 22.4.25，电机工程学会 21.12.15，淄博市 21.12.9）。

2.4. 宣传推广取得的主要成果

通过本项目支持的各项活动，使各级政府和有关部门开始关注这一技术。2021 年 10 月国务院《2030 年前碳达峰行动方案》文件中明确写明“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”。2022 年 5 月国家发改委节能中心还专门举行了“光储直柔技术宣讲与推广会”，由各省地市两级发改委负责人员参加，宣讲和学习讨论光储直柔技术。

经过多年努力，国家科技部也已经把光储直柔正式列入“十四五”的重大科技支撑项目，目前已经发通知征集科研团队，2022 年将先支持建筑电器直流化产品，解决目前没有系列的建筑直流化产品问题，2023、2024 年将陆续立项光储直柔的架构与调控理论研究、以及示范工程建设。

国网公司、南网公司也相继在 2021、2022 年启动光储直柔重点研究项目，组织电力系统内外的科研团队合作，重点解决光储直柔系统的架构、调控、稳定性和安全保护等问题。各地政府和企业也积极响应国务院文件要求，相继筹划一些光储直柔工程示范项目。如：北京公交集团办公楼改造项目、太原机场 T3 航站楼项目、岳阳机场项目、雄安国网综合服务公司总部大楼项目、山西芮城县整村示范、保定市徐水童庄村项目、垣曲县项目等。

在全国积极响应中央的双碳战略的形势下，发展光储直柔建筑配电系统已成为实施建筑低碳发展的一个重要措施。

3. 项目研究总结

面对这样的形势，怎样能科学地掌握步调，不造成大炼钢铁式的“先是一哄而上，然后满地鸡毛”，就需要建立标准化体系，解决相应的技术关键，并通过各种示范工程揭示这类工程所可能遇到的技术、政策、资金、文化等各种问题，给出对策与方案。

3.1. 标准体系

本项目课题 6 围绕光储直柔的标准化体系开展研究。梳理了国内外此领域的相关技术标准，根据光储直柔发展需要，提出应该开发研究的光储直柔技术标准体系，以及按照轻重缓急确定的标准体系发展路线图，给出标准化问题的系统解决方案，为科学地、系统地发展光储直柔工作奠定了基础。在这一标准体系规划的指导下，相关标准工作也在紧锣密鼓地开展。《民用建筑直流配电设计标准》已正式发布，并准备在 2023 年开始进一步更新修订。根据发展需要，又由深圳建科院为主导，开始《光储直柔建筑性能评价方法》的编写，将在 2022 年内完成。此外，针对光储直柔系统的核心单元各类电力变换器，提出通用变换器平台的思路，并由北方交大主持编写《建筑光储直柔系统变换器通用技术条件》的标准。

3.2. 技术体系

针对光储直柔系统需要解决的技术问题，本项目课题 3、4、5 分别从与电网的协调方式，光储直柔系统架构和安全与调控，建筑直流电器接口和功率调节手段三方面进行梳理，并协助解决各个示范工程中出现的相关问题。

课题 3 通过对一些典型区域和工程用电特性的分析，说明电网面对的是两类不同的扰动：来自用电侧需求的变化和风电光电导致电源侧的变化。这两类变化特征不同，需要面对的调蓄任务也有很大不同。目前风电光电在电源中的比例很小，所以主要问题来自于负荷侧。而随着风电光电占比的增加，问题将出现大的变化。现在需要研究的是能够同时应对这两类需求的机制，以使得我们提出的电网与终端之间的协调方法能够可持续。研究了国网和南网目前推行的各种需求侧响应模式、虚拟电厂模式以及通过第三方在电力交易平台进行交易的模式。分析结果表明，现行的各种协调模式都不能有效解决光储直柔系统与电网的有效沟通和协调，不能实现通过光储直柔为电网提供柔性负载，从而解决大比例风电光电后的有效消纳问题。

在电价和交易机制上纠结，可能永远也不能找到有效的解决方案。必须利用全社会低碳发展的新需求，设计新的可以有效地实时反映出电网供需关系状况和电源碳排放状况的参数，使光储直柔建筑可以根据这一参数自主地调控。这将是光储直柔实现其最终目标的技术关键。

课题 4 详细研究论证了光储直柔系统架构。从系统的基本构成，电源、变换器、光伏和各类直流负载的性能到构成系统、连接之后的相互影响，都做了深入分析。由此给出系统的基本控制策略，包括分层协调控制模式和依靠母线电压变化进行调控的模式。安全保护和用电安全是电力系统首要目标，对于直流系统，可能的故障、保护方式、接地方式等都有所不同，并且由于没有过零点切断触头还存在电弧现象。设计合理可靠的保护系统，是保证光储直柔系统能够正常运行从而被社会所接受的基本条件。课题 4 对此做了深入研究，并结合研究者在此领域多年的研究和工程实践，全面梳理了基础架构平台的各方面问题和经验，对一些关键问题提出独到的解决方法，既满足安全可靠要求又具有突出的经济性。针对办公与商业建筑、居住建筑和制造工厂三种不同的应用场合，课题 4 分别提出推荐的光储直柔结构，并给出关键参数和装置的建议。在课题 4 的基础上，进一步通过大量工程现场实测和仿真平台的模拟分析，将系统地建立光储直柔系统分析和工程设计方法，完成各类光储直柔工程的导则、指南和标准。

课题 5 则是突出在建筑直流电器接口方式和“交改直”的可行性，为建筑电器领域实现直流化做先期工作。分析表明，随着建筑电器电子化和智能化的发展，直流供电是必然的发展趋势。从电梯、空调和风机水泵，到照明、冰箱、炊具和各类小家电，直流化最终都可以降低生产成本，提高产品性能，并且通过减少电量变换环节来减少损耗。面对技术发展大趋势，只有积极地从接口、标准、调控方式等各方面引导建筑电器的直流化，主动地发展直流产品，而不是维持传统，守旧、消极地等待市场需求的变化，才能保持我国在建筑电器领域目前的领先状态，也才能进一步由家电大国发展到家电强国。消极等待、贻误战机，很可能会由于直流化变革而失去机会，失掉建筑电器市场。课题 5 具体研究了不同功率、不同电压等级下直流电器的接口要求，并探讨了通过直流电压来改变其用电功率的可能性和具体方法，以及终端电器使用者参与该设备柔性调节深度的方式。课题 5 针对接口问题提出系列的标准建议。

课题 13 是利用建成于 2019 年 12 月的深圳未来大厦对上述研究结果的全面检验。未来大厦是已建成的完整的光储直柔项目。通过全面测试系统性能，包括各环

节损耗，通过多种分析和实验检验其用电安全性、可靠性、电能质量，按照不同的调控策略检验其调控效果，并考察使用者可接受性、经济性、和社会效益。研究结果表明：

（1） 可靠性和供电质量。运行实践表明，光储直柔这种新型配电方式实现了更好的供电可靠性和更高的供电质量。在孤网到并网运行的相互转换、大功率设备的启停等转换操作时，蓄电池、光伏、AC/DC 等主要影响系统状态的部件可自行重新分配功率，使系统在 0.1~0.6 秒内实现转换、恢复稳定，且电压波动范围小于 5%；在外电网停电时，系统自动转为孤网运行，对用电侧无任何干扰；

（2） 各种用电保护措施。保护系统所采用的接地方式，几种短路保护、触电保护、灭弧等措施都十分有效。当按照规定方法严格实施各环节的安全保护措施时，直流系统可以获得优于交流系统的安全性；

（3） 系统的电量损耗。通过仔细测试，发现系统主要的能量损失来自蓄电池管理模块，每日充放电电量差高达 15%~30%。这主要是不适当的电池管理控制方式所造成。改进电池控制管理模块电路，改善其算法，把充放电环节一律改为电流控制，可以大幅度降低这部分损耗。此外，就是出现较大弃光现象，这也与蓄电池控制管理逻辑有关，需要提前预测出未来可能需要储存的光伏电量，在蓄电池留下足够的储能容量。各个变换器的损耗约占总用电量的 7%，其中约一半是入口 AC/DC 所耗。这是由于入口容量为 2×100kW，而平均输入功率不到 40kW，整流器基本上处在 20%左右的负荷状态下运行，待机电耗相对就高。仔细选择各变换器容量，并在小负载时主动切断一些回路，使各工作环节都处在较高的负荷率，是减少变换器损耗的重要措施。在优化各变换器容量、优化控制调节各个变换器后，光储直柔系统总的损耗可以控制在 5%以内，优于交流系统。

（4） 直流电压等级。楼内采用±375V 和 48V 两种电压等级，375V 为空调等大功率设备供电，48V 则进入工作区，解决各种小功率用电设备的接入。实践表明双边 375V 仅是增加了系统复杂性而并无优势，所以可以改为单边 375V 或单边 750V。48V 低压配电大大提高了办公室用电安全性和灵活性，受到使用者的欢迎。

（5） 系统的柔性调节能力。主要对利用自备蓄电池和多联机空调的需求侧相应模式两个可调蓄设备的调蓄能力进行了测试、实验和分析；研究这两个

设备有效消纳光伏电力的能力和按照电网调度动态调节入口功率的能力。实验和分析表明，尽管这一系统仅接入 2×75kWh 储能，约为其日电总量的 20%，但与需求侧响应方式运行的空调系统相配合，已具有很强的对入口功率的调节作用。可以实现如下模式调节：a)恒功率取电模式，根据预测的全天光伏和需要的用电量，确定全天需要的用电总量，按照恒定功率方式从电网取电；b)根据分时电价，只在低谷电价时从网上取电，避开高电价时段，从而在现行条件下获得最大的经济效益；c)按照电网调度提前一天给定的全天取电功率曲线从电网取电，参与电网调节。这三种方式都进行了实验，出现的主要问题还是储能容量不足。现在已经连接两个双向有序充电桩，如果在 70%的时间内有两辆电动车与其连接，提供 100kWh 的储电容量，则可以完全满足上述三类调节要求。

（6） 与电网的协调。目前此系统已实现与深圳供电局调度的实时通讯，可以随时响应电网调度要求的各种调节。但是，怎样根据电网供需矛盾的变化和消纳风电光电的需要对其进行调度，目前尚未给出适当的原则和策略。当光储直柔建筑大量兴建，其拥有的调蓄能力已经超过抽水蓄能电站时，与电网的协调问题就将成为发展光储直柔要解决的核心问题了。

3.3. 示范工程

课题 9~12 是在上述技术研究基础上的示范工程。本期的示范工程研究是通过考察各类不同性质的工程立项和实施过程，研究光储直柔项目实施过程中可能遇到的各种障碍，可能破解这些问题的途径，并总结出共性的政策、机制、经济和技术措施。

课题 9 和 10 都是以山西省芮城县全县的零碳能源系统为目标，是全县实现 2025 年碳达峰、2035 年碳中和要完成的一系列任务中的核心任务。课题 9 的目标是全县电力系统怎样实现零碳。通过分析现行的碳排放评估方法，本研究指出，当不存在真正有效的碳汇资源或 CCS 时，真正的碳中和不能仅仅是电量的平衡（全年零碳电力的产量大于全年用电量），而必须是每个瞬间的电力平衡（每个瞬间零碳电力系统提供的功率不小于瞬态负载功率）。在区域外电网尚不能实现碳中和时，单独一个区域的电力系统碳中和不仅要满足自身零碳电力产量大于用电量，还需要通过足够的电力调蓄能力满足每个瞬间的电功率需求。由此课题 9 分析了当风电光电发电总量满足用电总量之后，把电源与预测的用电负荷之差分解为三部分：一年

内季节性变化，主要是由于太阳辐射的季节性变化和用电需求的季节性变化所导致；一周内逐日的变化，主要由于天气变化、周末及节假日所致；一天内的变化，由太阳辐射的大范围变化和用电变化所致。光储直柔通过充电桩利用车载电池资源和建筑本身的柔性用能，可以平衡和协调一天内的源与荷之差，同时还可以为解决一周内的不平衡问题做出一定的贡献。针对芮城县具体的资源和需求状况，则设计规划了利用其抽水蓄能资源、生物质电厂和部分可中断工业用电解决年内和周内的不平衡问题。通过全面的平衡分析，指出中心县城最主要的储能资源是电动车。尽管是低收入县，未来可拥有私人车辆将超过 10 万辆，具有日储电能力 500 万 kWh，只要开发利用其 70%即可完全满足平衡电力峰谷差的要求。怎样与电动车的发展速度同步地发展有序充电桩，并实现桩、车、电力平衡三者有机协同、同步发展成为问题的关键。为此规划设计出几种充电桩的建设模式，使其既可以服务于当前状态，又满足未来全面发展所提出的需要。对于建筑，由于投资问题很难对城区居住建筑进行光储直柔改造。建筑光储直柔改造的重点是部分公共建筑。作为开始，先以县政府大楼为示范案例，研究规划了性价比最高的改造方案，仅通过安装光伏、改变照明灯具、在停车场实现“一位一桩”，使安装光伏和工程改造费用可以较快地回收。

课题 10 是农宅的光储直柔。经过在芮城几个村庄的实际勘测，发现每户农户可利用的屋顶等空闲面积在 200 平方米以上，每户可安装屋顶光伏 20~40kW，年发电 2.5~4.0 万 kWh，是目前农宅自身用电量的 10 倍以上。即使全面电气化，包括炊事、采暖和全部生活用能、各类交通和农机用能以及全面电气化之后的农业生产用能，未来也将有发电总量 1/2 到 2/3 的电量要外送上网，成为农户的经济收入。而完全依靠屋顶光伏满足自身用能需求并有效上网送电的关键又是要有足够的调储能力。每户 3~5kWh 储电能力可以满足自身生活用能（不包括采暖）；通过电热膜加蓄热墙体的方式，也可以用蓄热替代蓄电从而实现太阳能光伏采暖。为此在 5 户农宅进行了 2021-2022 年全冬季的实验运行，结果表明这种方式适应农宅的实际使用状况，基本上可以满足采暖舒适要求；在没有配置蓄电池的条件下，冬季由于连阴天出现了两次室温接近 10℃的情况。此时如果配有 20kWh 的蓄电能力，将可以避免这种现象出现。而农村能源革命进一步的任务是农机的全面电气化。由于各种农机装备年使用小时数并不高，所以可以采用换电模式，发展标准化电池模块，可用于任何农机和农用车辆。在不使用的时间，则把电池放置于户内的电池箱中，成为户内直流微网的蓄电单元。每户农户至少可以拥有 60kWh 以上的蓄电池，这就成为户内和村内直流微网正常运行和可靠供电的保障。其主要作用为：

1. 为农户用电提供保障。尤其是在冬季采暖季节，出现连阴天，利用蓄电池可以补足 2~3 天的采暖需要电量，而冬季为农闲期，各类农机使用率低，正好可以提供足够的蓄电容量；
2. 破除农电上网瓶颈。按照目前户均可安装 20kW 光伏的装机容量，即使全面实现农机和交通电气化，每户每年还剩余电量 1~1.5 万 kWh，需要上网送电。目前大多数农网的变压器配电容量是 5~6kW/户，如果每户安装 20kW 光伏并直接上网，则只能满足 1/4 农户的需要，否则就导致变压器过载。而当每个农户平均拥有 60kWh 的储电能力，就可以通过调蓄充分利用变压器容量。通过与电网协商，选择合适的时间段上网送电，以满足电网调峰的需要。这样在不对农网进行大改动的前提下，就可以实现农村从电力的消费者到生产者的转变，使农村成为“只发不收”的电力生产者。
3. 通过村内的直流微网和跨村跨台区的互联互通，还可以在各户、各村用电需求不一致时，相互调用，使各户的电池资源充分发挥作用。

为实现上述目标，需要户内改为户级直流微网，村内各个变压器台区下改为村级直流微网，农户的用电设备全部改为直流供电。通过在芮城县庄上村的实践，这两点都已顺利解决。家用电器直流化的困难比原来设想的小，经过简单的接口改造就可接入直流。居民的接受程度也比预想好。直流化改造困难不大，只是目前市场上没有相应的直流产品，使得居民在采购新的家用电器时出现麻烦。尽快建立直流家电产品标准并推出足够品种的直流产品，是光储直柔能够真正落地的基本条件。安全防护系统是直流配电必须解决的又一问题。为此课题承担小组获得多项发明专利，既实现高可靠的防护，又使成本可控，目前已成为正式产品批量生产。

庄上村 100 户 20kW 光伏和户内配电系统（不包括蓄电池）投资 617.525 万元，平均每户约 6 万元。如果配 5kWh 储能作为用电可靠保障，则每户投入 7 万元。每户全年发电 2.5 万 kWh。如果免费生活用电 0.5 万 kWh，可出售电力 2 万 kWh，收入 0.8 万元以上（按照 0.4 元/kWh 计算），通过低息光伏贷款，十年可完成还本付息。支撑 100 户微网系统的村级直流配电网改造投入 282 万元（包括 300kWh 的储能电池和变换器）。这可以满足村内公共设施用电需求，并实现余电上网。如果未来拥有足够的电动车和移动式电动农机具，100 户将具有 6000kWh 的储电能力，则不仅可以为这些电动农机具和车辆免费充电，并且依靠其储电能力可以满足村内其它各种公共设施用电需求，并在电网公司调度下在需要电力的时间段送电上网。如

果在指定时间段上网的上网电价为 0.6 元/kWh，每年剩余的上网电量为 180 万 kWh（车辆免费充电 20 万 kWh），上网售电收入 100 万元，返还各户余电上网费 80 万，结余 20 万，可支付包括 2 名运行管理技工在内的运行管理维护费用。这样，只要解决村内约 300 万/100 户的村级直流电网建设费用，并全面实现农机电气化，就可以完成农村光储直柔系统建设，且实现可持续运行管理。

由此分析，农机的全面电气化成为在农村实现光储直柔新型能源系统的关键。目前电动可移动农机设备售价普遍高于燃油农机，这也是由于昂贵的电池所致。绝大多数电动农机不包括电池的裸机价格都低于同功能的燃油农机。这样，通过采用换电方式并推广电池标准化就可以显着解决电动化的成本问题。 每户 60kWh 的蓄电池目前需要 10 万元左右，成为实现农机电气化和农村新能源系统的核心。如果按照家电下乡的政策，由国家补贴一半，相当于每户补贴 5 万元，将极大地推动农村电气化和新能源建设的发展。

课题 11 是浙江省湖州供电公司与鲁能集团联合建设的鲁能公馆新建商业综合体。主要是 38 户单身公寓和商业配套。电网公司为了尝试光储直柔概念，投资充电桩、储能和直流配电；而建设单位投资光伏和房屋本体。目前该项目正在建设中，预计在今年年内土建完工，明年上半年开始安装和调试。研究团队与业主方在光储直柔系统方案确定中遇到很多矛盾，主要是：

配电系统系统容量的确定。按照常规设计方法，按照全部用电设备的最大功率之和再加上保险系数，项目的入口功率就会超过 1000kW（2000 平方米公寓 235kW，1000 平方米商业 340kW，外景照明 33kW，28 个充电桩 420kW）。而按照光储直柔系统的思路，充电桩应该在用电低谷和光伏富裕时充电，不应该占用入口功率；由于配备了 2×300kWh 储能，又可以利用储能削掉短期可能出现的尖峰负荷。安装了 180kW 光伏，全年发电 20 万 kWh，可提供整个项目一半以上的电量，因此即使入口功率取 200kW，年满功率运行小时数也不足 1000 小时，通过储能可完全应对短期大功率负载的需要。入口功率 1000kW 还是 200kW 将导致配电系统投资的巨大差别。经过讨论，最后仍采用 2×400kW 入口的配电容量。这就不仅造成投资居高不下，而且变压器和接入口的 AC/DC 长时间在 10%以下的低负载工况下运行，效率低，待机电耗高。

如何充分用好充电桩，是实现光储直柔目标的关键。要充分开发利用车载电池资源，就要采用双向充/放电方式，使车载电池成为光储直柔主要的储能容量。充电

桩可以设计为双向功能，而在开始时实行单向充电，通过免费充电方式逐渐建立起新的充电文化，逐渐过渡到双向充/放电。28 个充电桩如果能充分利用，对应的储电容量是 1400kWh，是目前单独设计安装的蓄电池容量的 2 倍以上。而当不同时段电价差在 2 倍时，如果每天低谷期充电 50kWh，车辆行驶用电 15kWh (100 公里)，高峰段释放 30kWh，电池充放电损耗 5kWh，则仍可通过峰谷差电价获益。而实际上未来峰谷电价差将在 4 倍以上，因此必须把智能有序充电桩作为重要环节予以充分重视。

如何利用光储直柔系统的柔性负载的特点，与电网配合，产生最大收益？这是光储直柔可否发挥其作用、并产生经济收益的关键。项目组根据几种现行的调控政策进行分析，发现不同的调控模式对应的经济性差别巨大。这个项目的光伏可提供一半以上的用电量，充分利用自身和车辆的储能资源，不弃光、不上网返送电，就可以减少一半以上的购电量。如果再设法使网上所购电力都发生在电力低谷期，那么当电力的峰谷电价差达到 4 倍时，这个光储直柔系统需要付出的电力购买费仅为常规方式的 1/5。如果峰谷平均电价为 0.75 元/kWh，则每年可节省电费 18 万元，考虑静态 10 年回收投资的话，光储直柔系统增加的成本应不超过 180 万元。

原方案比常规投资增加 670 万元，显然毫无经济性。分析其原因是光伏、储能和充电桩预算的单价过高（光伏 4.5 元/W，可降低到 3 元/W；储电 3.5 元/Wh，可降低到 2.5 元/Wh；充电桩 3 万/个，可降低到 1.5 万/个）；配电系统容量过大（可从 2×400kW 降低到 2×150kW），减小容量后配电系统可比常规系统减少 100~150 万投资；综合核算，投资增量可从目前的 670 万降低到约 200 万元，但比常规方式增加了 28 个充电桩，按照峰谷电价差的方式运行，15 年内可回收增加的投资和利息。如果不计入充电桩投资，则 10 年内可回收增加的投资和利息。

应该采用何种调控策略从而和电网配合，协助电网在目前风电光电占比小的状态下实现负荷侧的削峰填谷，在未来大比例风光电时有效消纳风电光电？这成为决定光储直柔控制运行的关键问题。尽管这个项目的建设方之一是电网公司。但却没能给出合适的运行模式和调控策略。对于这种仅几百千瓦的负载，也难以由电力调度直接指挥调控。因此需要找到一个直接反映电力系统供需关系的参数，在线实时发布这一参数，使分布在各处的光储直柔负载自行响应、自动调控。并且这个参数能够即适应目前煤电为主的电源结构、也适应未来风电光电为主的零碳电源结构，从而使调节策略保持一致。这应该是光储直柔方向未来研究的重点之一。

此项目面对的又一困难是缺少适宜的低压直流配电产品和建筑直流电器产品，

专门定制的产品又不符合采购招标规程。市场上缺少系列的直流产品几乎导致此项目的夭折。因此解决“鸡生蛋”还是“蛋生鸡”的问题，加强直流相关产品的开发和标准化，补足短板，是光储直柔必须尽快解决的问题之一。

课题 12 是青岛奥帆中心既有公共建筑的光储直柔更新改造研究，目的是针对量大面广的 140 亿平方米既有公共建筑研究在进一步节能、提升能效的基础上，能否通过光储直柔技术应用，大幅度降低运行过程能源消耗导致的碳排放，为既有公共建筑光储直柔改造摸索经验。

研究选取奥帆中心内的奥帆博物馆作为对象，首先通过运行电耗数据分析筛选出适合进行配电系统光储直柔更新的主要负载，包括海水源热泵机组、变频水泵、空调箱变频风机等可实现大范围功率调节的设备，以及 LED 大屏、LED 照明等适合直流低压直供的负载。在确定光储直柔系统架构和主要电力电子设备容量等参数时，意识到公共建筑实施光储直柔更新应当做到“节能优先”，即通过节能改造更换为更节能高效的变频热泵机组和选型合理的变频水泵，这样不仅使得系统更新能有直接的节能收益，而且降低了对电力电子设备容量和投资的需求等，提升光储直柔更新改造的经济性。此外，随着研究的深入特别是工程推进过程中与业主反复交流，认识到既有公共建筑进行光储直柔更新时，还应关注以下几点。一是用电安全的问题，哪些墙内暗装线管中的电缆可以继续利用，需要确定利用旧的墙内电缆适用的直流电压等级、电流上限、绝缘实际性能等具体参数，如果需要将所有的墙内电缆也全部更新，则这部分成本巨大。幸运的是，通常配电系统设计都有较大的冗余，电缆截面尺寸较大，基本不需要更新楼内主要配电线缆，只有一些局部线缆需要重新穿管敷设；但隐患是线缆的绝缘情况，只能根据配电室合集图纸进行评估。二是既有建筑在建筑外表皮上增加光伏安装比较受限，社区园区中的车棚、草坪、水面上有安装光伏板的条件且成本较低，但需要与景观协调，并征得业主的同意。目前建议在既有公共建筑水平屋顶上尽量安装光伏，做到 BAPV；有更换围护结构外表面的可能时，利用 BIPV 实现建筑表面光伏“应装尽装”。三是如何计算既有公共建筑光储直柔更新的经济账、减碳账、用能安全账。其中光储直柔更新方案中电力电子设备、线缆、安全保障措施、直流用电设备、光伏发电系统等都要较大的投入，目前说服业主接受光储直柔更新的途径是：安装光伏发电的投资可单独计算、或申请补贴，建筑内“储直柔”更新工程与节能改造或能效提升工程“合二为一”，其收益与光储直柔系统的运行方式和电力系统来源构成的发展变化有关。在当前燃煤火电

占比仍然较大、白天电价高、夜晚电价低的情况下，本研究认为既有建筑光储直柔更新的经济效益，首先是通过“节能优先”减少运行过程中的总累积耗电量等带来的节能收益，其次是来自白天峰值电价时段，通过吸纳本场光伏发电量、水蓄冷蓄热体释放冷热量等措施大幅度减少从电网的购电量，夜间依靠电网保障供电、并利用谷电价时段蓄存冷热量等带来的收益，以及潜在减少购买碳指标支出的收益等。这一运行调节方案预计在 2030 年前可使得既有建筑运行电费最低，并且由于节能和光伏发电抵消从电网购电从而减少间接碳排放。但在 2030 年后，随着电网中光伏发电量等可再生电力比例逐渐增高、光储直柔的运行调节方式也逐渐变化。电网中白天光伏发电量比例越来越高，特别是春夏秋季节白天光伏发电量大，导致白天时段电网发电成本低、电量碳排放因子也低；而夜间和冬季等光伏发电量小的时段，需要依靠燃煤或燃气火电机组保障供电，成本变高，度电对应的碳排放量也提高。“低谷电价”从夜间变成白天、“需求侧响应”从夏季电力需求高峰变为冬季或夜间发电成本最高时段。光储直柔系统就应随时跟着电源结构的变化而改变运行状况，能随机应变。简而言之，既有建筑作为传统电力系统中的“用户”、“终端负载”，如能回答业主当前和未来两个不同时段下光储直柔更新“如何保障用电安全”、“是否采用成熟可靠技术”、“能否给出收益与投资的细账、当前账和未来账”等基本问题，再通过光储直柔更新、“自力更生”地增强用电系统的柔性和韧性，运行过程减碳、降费、提升用能安全可靠性、提升与电网博弈能力，才能真正推动既有建筑光储直柔更新健康发展。

本课题为奥帆博物馆提出的光储直柔更新方案就是尝试回答这些问题，业主更关注当前阶段的光储直柔更新的经济收益。方案的要点包括，一是原奥帆博物馆空调系统的海水源热泵效率偏低，方案建议更新为变频高效热泵机组，通过节能提效，可将空调系统供冷季用电量从 16.9 万 kWh/年降低至 5.2 万 kWh/年，供热季用电量从 23.2 万 kWh/年降低至 11.8 万 kWh/年，并且对直流配电系统的各种设备容量要求大幅度下降。二是方案筛选变频热泵(178.5kW）、变频水泵(40kW)、变频风机(30kW)、LED 照明和 LED 屏幕(57kW)接入到光储直柔系统中。三是直流配电采用辐射状拓扑结构，电压等级为 DC540V 和 DC220V，系统采用高阻 IT 接地。光伏安装方案是，在博物馆平屋顶铺设光伏 135kW，缺口部分从其隔壁的国家会议中心屋顶 600kW 光伏系统接线过来，这部分光伏板目前全部上网而非自发自用，因此将其接入奥帆博物馆的配电系统中，可实现本地光伏发电量部分消纳、同时最大程度减少白天峰值电价阶段从电网购电，再多的光伏发电量，通过配置储能系统配置 114m³

的冷热蓄水箱和 40kWh 固定蓄电池和 160kWh 电动汽车移动蓄电池进行蓄存。其中冷热蓄水箱目前是利用电网夜间低谷电价期间进行储能，但奥帆中心园区内未来一定会增加更多的车棚光伏、草坪光伏、甚至水面光伏等分布式发电系统，因此，提前布局的蓄电池和蓄水箱未来可吸纳本场多出来的光伏发电量、甚至电网光伏电量。这一方案项目直流系统改造直接投资 175 万元，采购变频热泵机组、直流智慧充电桩、蓄能水箱等直接投资 125 万元，蓄电池拟采用青岛市第一座换电公交示范–黄岛青岛隧道口换电公交车站准备退役的电池组，因对方有意在确保安全的前提下赠送给奥帆中心光储直柔项目试点。此外，光伏铺设费用 60 万元、从隔壁建筑光伏系统接线费用 20 万元，设计、施工和调试费用约 200 万元，其中 100 万元申请青岛市科技局科技惠民支持，这样光储直柔项目所需总投资约 480 万元。经前期节能诊断和模拟分析，预测运行中通过供冷供热系统节能提效可节省运行能源费 17.5 万元/年，光伏发电 16.7 万度电/年（仅计算博物馆平屋顶 135kW 光伏发电量）自发自用、结合水蓄冷热等减少电网峰电价时段购电量预计收益 25.1 万元/年，运行费用下降 56%，减碳量为 166.5 吨/年。

但即使这样，该光储直柔更新项目的投资回收期仍在 11 年左右。此外还需要协调从国家会议中心屋顶光伏系统“隔园区内部道路 50 米引电”可能导致的管理责权不清问题，因此一年多来业主青岛旅游集团、能源托管方青岛能源热电集团迟迟未能协调一致、下定决心投资正式开工该项目的光储直柔更新。投资回收期偏长的主要原因是，低压直流配电系统中各关键设备价格较高，改造工程成本高，而直流配电带来的经济收益并不显着，原因是一方面直流配电“一根电缆实现建筑强电弱电两个系统功能”还未研究成熟，另一方面电网中光伏电量比例仍偏低，以直流方式、本场光伏、储能调节、柔性用电方式来协同城市用电侧需求变化和电网中风电光电源侧变化的“协同零碳运行”场景还需时日。而通过建筑用电柔性获得用电的碳减排并从碳减排中获得经济收益，目前找不到相应的政策支持。电力部门给不出希望的用电调节方式，从而也就无法核算柔性用电带来的减碳效果。采用需求侧相应方式为电网削峰，山东省要求的门槛容量在 5MW 以上，对于单个的建筑光储直柔项目不具备这样的调蓄能力。

不过该项目意外的收获是，本项目能源托管方、同时也是潜在投资方青岛能源热电集团每年办公楼和集中采暖系统循环泵耗电量超过 3000 万度电，还有很多的燃煤锅炉集中供热热源需要改造，因此对光储直柔这一面向未来的理念非常认同，决定投资在自用办公楼中更新光储直柔系统做实验，包括在水平屋顶和地面车棚安

装 500kWp 光伏板，投资约 200 万元；设计纳入光储直柔系统的负载包括变频磁悬浮冷机 95kW、变频空调冷冻水泵和冷却水泵 90kW、LED 照明用电 30kW、示范办公室直流电器 30kW 等，并将原 800m³的消防水池改造为蓄冷水箱，并配置 51kWh 固定蓄电池在屋顶满足消防规范，保障夜间建筑内照明用电等，投资 308 万元，目前已获批投资并完成系统设计和工程招采工作，预计 2022 年 9 月完成工程，光储直柔系统经调试后，可试验各种控制策略的实际减碳量、经济性和供能可靠性、安全性，期待用实际工程的效果来验证和进一步深入研究既有建筑光储直柔更新的技术方案、控制方法、运行调节策略等。

3.4. 政策机制

课题 7 是在示范工程的成本费用收益数据跟踪分析、100 位行业参与者调查分析、相关部门沟通对接基础上，提出与投融资模式、商业模式和产业化发展路径相匹配的政策建议。

3.4.1. 农村地区光储直柔的商业模式

在山西芮城庄上村 71 户整村示范和朱吕村 5 户技术示范案例尝试的基础上，可以初步得出北方农村，户均安装光伏 20-30kW，配置一定规模的分布式储能，在整村部署直流微电网，冬季可满足农户包括采暖在内的全部直流生活用电负荷；其他季节，自发自用以外多余的光伏发电还可打捆外送，获得经济收益。

农村地区光储直柔建筑的三部分投入对应三部分产出。第一部分是光储直柔直接的增量成本，包括 20-30 kW 规模的屋顶光伏、固体蓄热式直流电采暖，以及同步完成低成本围护结构改造，每户投资 6~8 万。对应产出是农户全年电费支出可节省至零，多余的电量通过“隔墙售电”获益，整体投资回收期在 10 年之内。第二部分是满足农户电气化需求的改善型支出，包括直流家电、电动农机具、院内电动车慢充桩等，这部分投资可纳入乡村振兴工程，政府提供一定的补贴，村民具有较强的出资意愿。第三部分是农村地区的电网建设投资，包括村内公共部分的直流微电网、电动汽车公用快充桩、提供应急供电的集装箱储能、分布式发电交易平台（用户端）等，100 户规模的村庄，投资 300~500 万。这部分投资总体来看，造价不高于传统农网建设投资，对应的收入包括输配电费、电动车充电服务费、应急供电收费。

农村光伏目前在市场中应用的商业模式有三种：模式一是大型能源公司投资，

租用农户屋顶，合同关系和结算手续均较为简单，缺点是农户参与度低、收益比例也少，后期企业的运行维护成本高，投资方基本上是具有低成本融资优势的垄断型大型国央企；模式二是集体企业投资，农户入股。这种模式一定程度上和村干部的组织能力和村集体经济的基础条件有关；模式三是农户个人投资，自发自用余电上网，此模式的社会整体成本最低，和农村今后的全电气化发展方向最为吻合，是光储直柔技术的较为适宜的应用场景。

农村“光储直柔”系统的商业模式，建议融合上述光伏投资模式当中的模式二和模式三，我们称之为“只出不进、寓电于农”。“只出不进”是指以整村来看，全年的用电都由村内光伏发电满足，多余电量还能够对外输出。“寓电于农”是指村民将是村内所有能源设施的资产持有者。农户院内部分引导农民自行投资，资金来源可为低息甚至免息的绿色金融贷款；村内公共部分由村集体企业投资，村集体企业发展成为清洁能源综合运营商，负责当地农村散煤治理项目的投资和运营，以及发展分布式可再生能源维护及服务、生物质成型燃料加工等乡村能源站等清洁能源开发工作。采用政府购买服务与用户缴费相结合的方式，保证相关项目的投资收益，政府协助相关项目争取政策性绿色贷款。

对应农村地区光储直柔 “只出不进、寓电于农”的商业模式，针对性地提出三项关键政策机制建议。一是以村为单位，将全部农户屋顶、院子周边、农业设施、林地荒地具备铺设光伏的资源统一规划，参照脱贫攻坚的工作开展方式，“建档立卡、一村一策”，将电动农机具、电动车、农户采暖以及家电升级等需求综合考虑，采用光储直柔方式，分期分批统一建设。与光伏协同发展，光储直柔系统将成为电动车辆和电动农机在农村推广的重要推动力。建议村委会配合提供建桩的相关材料，保障慢充桩的建设。同时将公共快充桩纳入到农村基础设施范畴，由中央或地方财政直接拨款建设。二是加快分布式发电交易平台建设，使得投资安装光伏的农户可以“隔墙售电”。和城市地区建筑类型多样、用电计量计费复杂的情形不同，农户每家天然具备产销一体的属性，让农户实时感知简单的清洗电池板、系统别掉线，多余的电就能够卖钱，除了还贷款还能净赚一笔钱，可以让光储直柔系统的后期运维成本最低。“隔墙售电”可彻底破解当前农村地区户用光伏系统，农户袖手旁观、企业运维不起的困境。三是加速支持一批带商业模式的整村建设光储直柔能源系统的试点，总结形成可复制可推广经验，以点带面，多领域多层次推动“零碳乡村”发展。

3.4.2. 城市地区光储直柔的商业模式

城市地区的光储直柔建筑的投入产出和农村地区有很大的不同。从投入来看，相比于满足基本功能的建筑物相比，光储直柔建筑的增量投入包括 6 部分：分布式光伏、分布式储能、双向电动充电桩、机电设备直流化、数字能源平台、建筑同步提升改造。

从产出来看，经济价值类的有 6 项：光伏发电（kWh）的确定性产能收入、为电动车充电的（kWh）服务费收入、节能改造的运行费用（kWh）省减收入、储能和能源管理系统利用峰谷电差（kWp）套利的电费省减收入、节省电力（kWp）参与需求侧响应的奖励型经济激励收入、参与碳交易的收益（或有）尚不明确。

和农村地区农户每家天然具备产销一体的属性不同，城市地区的光储直柔建筑利益相关者复杂得多，包括了四方：产权人——建筑的房产所有者；资管方——建筑的经营管理方，比如酒店管理公司，园区管委会等；运维方——建筑的日常运维者，比如物业公司或设备运维公司；用户方——建筑的使用者，比如日常生活、办公到访人员等。上述四方，都可能是光储直柔增量成本的投资人和经济价值、社会效益的受益人，相互交织导致投融资模型复杂多变。

近年来，城市地区的分布式光伏发电、电动车充电、用户侧储能各自独立或相互结合，已经探索形成了几类可行的商业模式：（1）光、充、储各自独立实施模式，在经济发展水平较好的地区，工商业电价高、电动车用户保有量足、峰谷电差大的条件下，满足内部收益率 8%-12%的条件。（2）“光伏+汽车充电”模式，其商业盈利来源于充电桩充电服务费以及光伏按照标杆电价上网和供电公司结算获得的收益，投资回收期预计为 8-10 年。（3）光储充一体化模式，经济性决定于储能系统的成本以及峰谷电差的大小，现阶段采用此模式的项目只是把充电服务看作一种随机的用电负荷，没有挖掘车载电池的蓄电资源，“用电池为电池充电”，因此增量成本的回收期要到 20 年左右，很难获得经济收益。

相比于传统的交流型光伏建筑，光储直柔的由于“直”和“柔”两个环节导致配电网的造价大约要提高 40%-50%，但是与之对应的经济收益都是功率型（kWp）的，且存在或有性风险，在当前以能量型（kWh）为主的电价体系下，很难收回投资，这是制约光储直柔建筑技术市场化应用的瓶颈问题。建议采用“区域尺度聚合、建筑+X 协同”的商业模式，在电力市场和碳交易市场当中单独构建建筑领域的与功率型（kWp）省减相对应的价值体系。

“区域尺度聚合”是指要跳出单体建筑在围绕建筑本体追求能耗降低的单一模式，重点发展各类园区、校园、社区等成片区的建筑群，冷热电采用光储直柔技术

统一完善升级。“建筑+X 协同”是指围绕建筑的用能管理体系，把屋顶及周边区域（景观、公共绿地）的光伏资源开发、储能安全管理、电动车充电桩报装、能源数据采集等光储直柔各环节统筹考虑，形成能源微网，在园区、校园、社区尺度的变压器端和输配电网协同，以一个整体参与电力交易和碳交易。

对应城市地区“区域尺度聚合、建筑+X 协同”的商业模式，针对性地提出三项关键政策机制建议。

一是将光储直柔建筑作为市场主体，纳入碳交易市场，新制定与功率型（kWp）调节能力相对应的碳定价机制。短期之内，对以“电量”为主的电力交易市场进行变革，建议把改革的突破点放在筹建期和新规则制定阶段的碳交易市场，新制定与功率型（kWp）调节能力相对应的碳定价机制。

二是将建筑周边的电动车充电桩作为建筑能源系统的组成部分，统一规划、统一建设。首先改变整车及电池按照固定年份或累计行驶里程的质保政策，将累计充放电量纳入电池质保因素，打消车主参与协同运行的顾虑。其次是让电动汽车反向充电功能得以应用，赋予电动汽车用户和电源的双重身份。让用户逐渐“熟悉”电力市场特性，培养用户习惯与规律性的行为。三是支持一批园区、校园、社区建设光储直柔能源系统，充分利用城市更新、低碳试点、既有建筑节能改造、国家重点科技研发项目等各类已有资金政策积极支持试点建设，对符合规定的试点项目予以奖励或补贴。积极引导各级金融机构为试点项目建设提供绿色信贷、绿色债券、绿色基金等金融支持，吸引各类金融资本和社会资本参与试点项目设计、改造和运营。

4. 存在问题与进一步对策

目前全社会已开始认识到光储直柔建筑配电这一新的技术，知道它是建筑低碳的重要措施。相关部门基本达成共识，要大力发展。相比本世纪初开始推广绿色建筑理念，到现在全面深入人心，很多城市已经要求全部新建建筑必须符合绿建标准，绿色建筑的推广取得了巨大成功。光储直柔的起步速度似乎更快，那么怎样才能顺着这个势头发展下去？相比之下，目前的光储直柔技术上没有建立完备的技术体系，亦缺少相应的系列产品，而且没有相应的可落地的政策机制。光储直柔的最终目的是为了协助电网实现风电光电的消纳，但目前尚未得到可操作的与电网协调的调节机制。在这种形势下，如果盲目推广，快速上一批项目而又不能获得预期效果，很可能成为“拔苗助长”，最后把这个尚未成熟的新技术扼杀在摇篮中。

4.1. 农村的光储直柔发展

农村具有丰富的可安装光伏的资源，从而可以从屋顶空间开发利用中获取足够的收益，这是农村发展“光储直柔”技术的巨大优势，但如何用好屋顶空间资源，采用什么样的实施路线又成为在农村发展光储直柔必须面对的问题。

国家能源局推出整县屋顶光伏计划，掀起开发农村屋顶光伏的热潮。很多企业将其看作是开发新的空间资源，把屋顶理解为可安装光伏的“空地”，到农村租用屋顶，安装光伏，所发电力全额上网。这种方式与集中式光伏电站几乎相同，具备一定的经济收益，但光伏发电与农户无关，既不能解决农村能源问题，也不能有效利用农村的储电和灵活用电资源，房屋业主还很容易与光伏的管理者产生各种纠纷。发电和农民用电“收支两条线”，屋顶光伏的产权与日常维护与房屋业主无关。而按照每户可以安装 20kW 光伏分析，目前的农网户均容量仅 5~6kW，仅能接受不到 1/4 的屋顶光伏。这就使得一方面农村拥有的储能和灵活用电资源得不到开发应用，另一方面由于缺少储能资源使得屋顶空间资源也仅能开发一小部分。因此，这种由产业租用农户屋顶光伏的模式不是可取的方式。目前已有 676 个县市的屋顶分布式项目确定建设投资单位，尤以能源央企为主。由于能源央企习惯了集中式光伏开发模式，不适应沉入到基层协调各种关系，勘察分散、工作量大、周期长，需要转变开发思路，才能推进项目实施。

把屋顶光伏的开发作为农村以全面电气化为目标的新能源革命的基础，则应优先解决农村生活、生产和交通的能源需求，替换掉目前农村的燃煤、燃油、燃气和

秸秆。农民依生产内容不同，拥有不同的机械化和运输设备。这些农机设备全面电气化，所拥有的电池资源将高于城市居民。即使采用标准模块化电池的换电方式，每户至少可拥有 60kWh 以上的电池资源。由于大多数农业机械使用率并不高，这些电池平时就可以放置在每户的电池柜中，成为分布式储能资源。依靠 20kW 光伏和 60kWh 蓄电池，可以非常好的满足各种生活用能需求，炊事、采暖、生活热水、以及照明和家电。即使出现 3 天连阴，只要预先规划储电，也能保证各种用电需要。20kW 的光伏发电的 1/4 即可满足农户用电需求，剩余 3/4 则用于部分生产、公共设施以及发电上网。60kWh 的蓄电能力完全可以满足公共照明、信息传播等必须的电力供应，而生产用电（如浇灌、农副产品加工等）则可以实行需求侧响应方式，根据电力供应状况组织生产。这样最终剩余的 1/2 到 2/3 的电力（平均每户 1.2~1.6 万 kWh/年）则可以利用现有的农网系统上网输电，成为农民新的经济收入。如果每户平均的配网容量为 5kW，则每年上网输电 2500~3000 小时，这是光伏直接发电时间的两倍以上。利用 60kWh 的蓄电池资源，可以选择用电负荷高峰期而不是光伏发电送电，这就使得农村光伏也能参与大电网的调节，使光伏由“垃圾电”转身为可调控电源。在这种情况下，农网的目标应该是实现“只发不收“，由单纯的电力消费者转身为电力生产者。怎样的融资方式、管理运行方式、调控方式、和建设方式能够使这一理想变为现实？

4.2. 城市的光储直柔发展

城市建筑空间资源相对要少，平均状态屋顶光伏仅能满足自身 15%~30%的用电。而光储直柔最主要的目的是不仅用好自身光伏，并且调动与其连接的充电桩系统和建筑自身的直接与间接储能能力，协助电网削峰填谷，缓解电源侧和用电侧的矛盾，使建筑由电力负荷峰谷差变化的制造者转变为电力系统源与汇不协调的消除者。但是目前多数计划上马的光储直柔的项目并不是从这点出发，不重视充电桩系统的建设，不注意用电设备的柔性功能，再加上层层加码的设备容量选择，不仅投资高、运行效率低，而且很难产生足够的负荷调节功能。这样无调蓄功能的光（储）直（柔）除了光伏可产生一些收益外，剩下就只有展示功能，无法回收付出的高额成本，仅换来一个“低碳行动”，这恐怕将严重影响这一技术的推广。

实际上，即使理解和追求柔性目标，在目前的电网运行机制下，除了可以通过峰谷电价减少电费，再得不到其它收益；为电网削峰填谷也不能被认定为减少了碳排放或使用了绿电。在很多场合，从电价上的收益很难回收增加的投资。这就使得，

宏观规划上都认为光储直柔对未来新型电力系统建设非常重要，一片唱兴，而微观上供电者和用电者都无收益，一片唱衰。

4.3. 核心问题是光储直柔与电网的协调

怎样破解这个局面？核心问题是解决与电网互动协调的问题，使光储直柔的柔性真正发挥作用。近期要解决的是负载侧峰谷差调节，是建筑由电力负载峰谷差的制造者转变为消除者；远期建成大比例风电光电后，主要功能又转为跟随风电光电的变化用电，从而有效消纳风光电。先后都是根据电网供需关系变化而调节从电网的取电功率（对于农电则是供电功率），发挥建筑自身的柔性负荷的作用，那么就存在统一反映电网供需关系变化的参数，只要统一实时颁布这个参数，有调节能力的负载实时根据这个参数调整其用电功率，就可以实现这一目标。对于海量的彼此独立的用电负载，不是统一规划调度，而是统一颁布参数，各个终端自律调节。当可调度电源的容量很大，而可自律调节的终端（光储直柔建筑）容量很小时，这种方式不会导致任何电网稳定性问题，只会改善电网的负荷特性。而随着光储直柔总容量的增加和风电光电电源占比的提高，将会在实践中逐渐摸索出保证稳定性的基本条件和措施，从而在用电侧可调容量大于电源侧可调容量后的新型电力系统中仍可安全稳定运行。

对于一个区域电网（内部具有足够的相互输电能力的电网）取动态电力碳排放责任因子作为这一参数。所谓碳排放责任并不是发电直接对应的碳排放量，而是用电侧由于使用电力须承担的碳排放责任。每个时刻电力生产者、消费者和集中性电力储存者的碳排放责任之和为此时电力生产的真实碳排放总量。通过这种方式可以使得动态碳排放责任因子无论在目前电源结构下还是在未来高比例风电光电下都可在一天内大范围变化，度电对应的碳排放在不同时刻为 0.2~1.2kgCO_2/kWh。高碳排放因子对应着电力短缺时刻，各燃煤机组全力发电，各集中储能装置也在全力放电；而低碳排放因子则对应各燃煤机组尽力压减负荷、电源中风电光电比例大的工况。按照碳排放责任因子的变化来运行光储直柔系统，在高碳排放因子时尽可能利用自身储能装置释能，尽可能减少从电网取电；而当低碳排放因子时，则全力储能、加大从电网取电量。这样，即使全年消耗同样的电量，光储直柔建筑要承担的碳排放责任仅为常规配电方式建筑的 20%~30%。这就可以通过碳排放责任计量与核算给出光储直柔系统定量的碳减排业绩。

对于农村建筑，通过光伏电力收益可以回收投资，获得足够的经济回报。而对

于城市建筑，只有明确计量得到定量的碳减排量，才可以具体核算光储直柔的减排效果，从而通过碳交易获得经济收益，通过具体的减碳量说明其对社会的贡献，并考核其系统的优劣。否则，很难对投资者说明：为什么要做光储直柔？

4.4. 技术推广中的障碍

由上述分析，可以总结出目前光储直柔技术开发和推广中的五大障碍：

（1） **政策障碍**

缺少光储直柔减碳的定量评估、无法核算为电网调节的贡献。从而： 一方面国家整体绿色低碳发展的需求迫切，一方面建筑用能柔性可实现的减碳潜力又得不到应有的认可与发挥。

（2） **经济障碍**

光伏发电可以有收益，而怎样从柔性中得到经济收益？对于城市建筑，柔性的投入要远大于光伏，而收益又无法核算。

（3） **技术障碍：**

安全保护等已基本实现，而调控策略还有待细化，如何降低变换器损耗，提高系统效率更有待突破。此外，建筑内的分布式储能的安全防护措施也是今后要进一步提升的。

（4） **产品障碍**

未形成系列化产品、未达到市场规模，远不能满足招标采购需要。

（5） **标准障碍**

产品标准，设计标准，运行标准，评价标准等；现在标准化已成为瓶颈。

4.5. 未来需要进一步开展的工作

根据上述分析，光储直柔工作需要利用好目前的大好形势，抓住关键问题突破，引导各个工程明确清晰的目标，提供各种技术服务使各个工程最大可能地实现其目标，推出合适的政策机制并努力使其落实，从而保证这些工程目标的顺利实现；进一步宣传推广，把示范项目扩充到一个城市、一个地区，具体展示怎样通过光储直柔建立新型零碳的电力系统，从而在可靠电力供给前提下实现全区域的零碳能源革命。为此，需要和科技部、各企业目前支持的各相关研究项目有机配合，扬长补短，充分发挥能源基金会的独特的作用。

重点开展如下工作：

（1） 与气候变化主管部门、能源管理部门、电力部门合作，确定新的反映电力系统供需关系的动态碳排放责任因子方法，分析其在各种场合下可产生的结果。研究其技术上和政策上的可操作机制，具体设计落地方法。

（2） 与电力部门或能源局合作，推动分布式光伏接入规定制订，从项目方案审批环节确定光储直柔的技术路线，把硬件构建起来，为后续的调控奠定硬件基础。至于电网调度的策略优化、柔性的评价和价格机制，可以逐步调整完善。

（3） 标准化建设。从已经初步完成的光储直柔标准化体系出发，并针对现实工作的轻重缓急，选择其急迫者加速编写。同时从一开始就抓好标准内部的一致性，并通过与国内项目外的标准编制工作、国际标准化工作密切沟通，相互协调。

（4） 以屋顶光伏为基础的农村全面电气化和能源转型是重大工程，需要多学科多领域深度合作，做出科学、完备、可行的整体规划和区域级的示范。包括农机电气化、农电系统政策机制的彻底改革、农村清洁取暖工程、以及农网潮流改变后对电网的影响等，都需要深入研究，需要技术和政策上的创新与示范性实践。

（5） 对于城市建筑最主要的是建立起科学的动态碳排放责任因子发布和管理系统，使光储直柔建筑产生的效果可定量、可考核、可产生经济收益。在此基础上，进一步通过工程案例研究不同地区不同特点的建筑如何在最小的投资基础上获得最大的调蓄能力和最佳的经济效益。只有通过大量的案例学习和宣传才能更有效的引导和规范。

（6） 通过光储直柔建立直流微网实现孤网运行，也是光储直柔的重要应用。这对于我国一些边远山区电力系统的改善有意义，对完善发展中国家的电力建设，解决无电贫困区域供电问题，使人人都可以享受电力服务， 具有重要意义。可以将其作为我国一带一路建设的内容之一，替代原来的煤电输出，在解决电力供给的同时实现零碳。

（7） 电动车电池资源是光储直柔最重要的储能资源，通过有序充电桩系统把车载电池接入光储直柔系统，是建筑成为可大范围变化的灵活负载的保证。有序充电桩+光伏又可以作为推动光储直柔的先导，可先通过这部分工程获得屋顶空间和停车位资源，并容易获得经济效益。需要与充电桩领域企业和研究机构合作，确定几种推广的技术和商业模式，作为优先推广的内容。

5. 课题技术报告摘要

课题 2：中国“光储直柔”建筑未来发展实施路径研究

本研究是清华大学牵头的《中国“光储直柔”建筑发展战略路径研究》的子课题2：中国“光储直柔”建筑未来发展实施路径研究（以下简称“本课题”）。课题旨在系统梳理中国建筑规模，全面分析建筑负荷特性，分析光伏、储能、直流、柔性等技术发展趋势与不确定性因素，规划发展“光储直柔”建筑的技术路径。

本研究项目受能源基金会资助，由清华大学牵头，深圳市建筑科学研究院股份有限公司承担，并邀请来自清华大学、深圳供电局有限公司等单位的专家学者共同完成。

减少建筑直接碳排放是低碳发展的前提，建筑电气化则是其中的重要技术路径。由能源基金会支持的“建筑电气化及其驱动的城市能源转型路径”项目研究指出，要实现 2℃温升目标，在建筑节能的基础上，建筑电气化率要从当前的 48%提高到 2050 年的 90%以上，非化石电力在建筑总电量中的比例至少从当前的 29%提高到 2050 年的 90%以上。建筑电气化率的提高，意味着需要更多的电力，非化石电力比例的提高在总量上将能够满足电气化率提高所带来的电力总量增长的需求。

着眼未来电力发展，我们仍将面临总量平衡的问题，同时面临电力不平衡的挑战。未来大规模的风电、光伏发电等可再生能源的发展，将彻底改变当前的发电形态，同时经济发展和用能习惯的改变，也将改变用能负荷形态。做到总量平衡不易，做到实时电力平衡，就需要“源荷互动”、“荷随源动”等新技术的应用。

“光储直柔”新型能源系统是建筑实现自身减排、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。分布式光伏将能够直接抵消建筑用能，但在城市农村、不同建筑对象，发展策略不同；储能尚处在技术快速发展进步中，是否利用电动车电池、如何发展分布式储能等诸多方向等待明确；低压直流建筑应用是当前国际的热点，其关键技术和应用障碍有待深入研究；柔性技术是建筑与电网协同实现电力平衡的重要桥梁，但也是发展相对滞后的，面临技术攻关和政策机制的突破。

光、储、直、柔四项主要技术所处的发展阶段不同，如何客观认识并做到合理的预测，如何根据“3060”目标看待“光储直柔”技术的未来，如何从识别障碍到问题解决再到规模化应用，如何理解其与交通和电网的关系，如何量化评估“光储直柔”技术对于目标的支撑，如何开展工程实践以及技术目标的性能实现等，都得到了行业广泛的关注。

- **光储直柔[1]（PEDF）是新型电力系统的重要组成，是建筑节能新方向。**建筑节能经历了 30%、50%、65%的“三步走”，建筑本体的性能以及设备系统效率大幅提升，采暖空调用能占建筑能耗的比例由过去的三分之二逐步降低到三分之一。同时，电器设备用能比例逐步提高。在建筑电气化的背景下，考虑可再生能源边际成本的降低，未来建筑负荷灵活性的作用甚至超过能效提高发挥的作用。未来建筑将融合光伏、储能、电动车，逐步由用能者转为产消者。“光储直柔”技术即是在建筑能效提升基础上进一步实现电能替代与电网友好交互的新型建筑配电技术，是建筑节能的新方向。

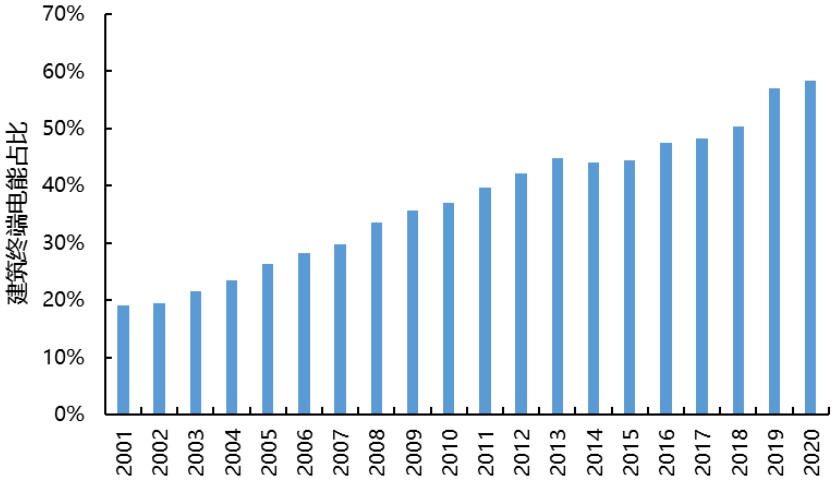


图 I　2001-2020 年建筑终端电能占比变化趋势

- **未来电力峰谷将被重新定义，光储直柔着力解决电力日平衡需求。**当前电力

[1] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.1。

系统面临负荷连年增长的巨大压力，但尖峰负荷持续时间并不长。尤其是夏季，建筑空调负荷作为夏季电力负荷的重要组成，利用建筑空调负荷的可调节性参与需求响应是当前电力领域和建筑领域都共同关注的焦点。随着高比例可再生能源发电的接入，未来电网的挑战是风光电出力与用电负荷的不匹配。当我们同时考虑风电和光伏发电，未来的峰谷将被重新定义。从日平衡角度看，未来电力可能白天是谷晚上是峰，与现在正好颠倒过来。现在的电力紧张主要是由于用电负荷高峰，而未来的电力紧张还要看风光电出力的大小。用电负荷低但风光电出力更低的情况仍然会出现电力紧张，而用电负荷高但风光电出力更高的情况依然会出现电力盈余。随着能源结构的转变，电力供需关系发生改变，建筑柔性价值也将发生改变。建筑柔性（负荷调节和电动车）对不同时间尺度的储能容量需求和累计储能量起不同程度的替代效果。在替代储能容量方面，建筑柔性几乎能解决全部的日调峰需求，不依赖于电网储能和调峰电源，如图 II 所示。

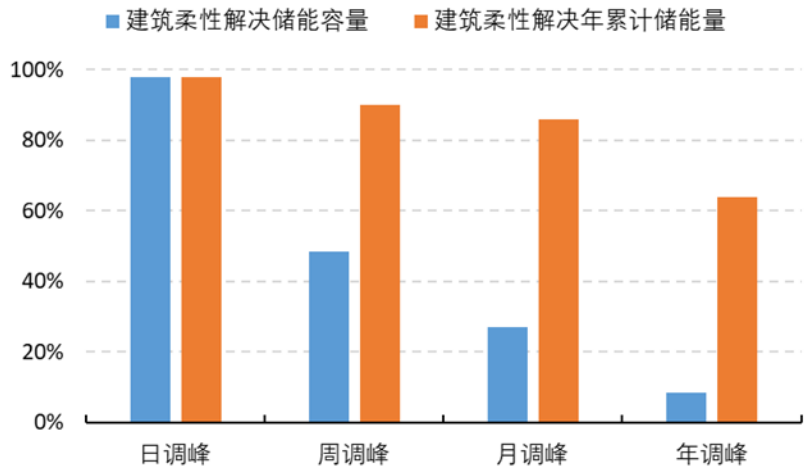


图 II　建筑柔性解决储能容量和年累计储能量的比例

- 光储直柔应遵循城乡差异化发展，城市应用重在“柔”且先公建、后住宅，而农村应用重在“光”和“光伏+”。在城市地区，建筑用电负荷高、需求大，发展以“储”和“柔”为核心的“光储直柔”配电系统，发挥建筑的资源聚合作用，使建筑成为虚拟

电厂，主动调节建筑负荷，与电动车、电力系统的双向友好互动，提高电力系统的经济性，提高可再生能源的消纳比例。且在前期由政府办公建筑带头发展分布式光伏，推动公车电动化和有序充放电模式，鼓励柔性用电。同时，结合峰谷价差、电力市场、需求响应等有关政策机制，探索“光储直柔”的市场化推广模式，走先公建、后居住的发展路径。如图 V 所示。而在农村地区，建筑屋顶资源丰富，发展以“光”为核心的“光伏+”系统，自发自用、余电外送，围绕农村建筑屋顶和周边场地的太阳能资源全面开发，推动农村用能电气化、农业机具电动化、用电管理有序智能化，建设村级直流配电网和蓄电蓄热设施，促进光伏发电的高效利用和充分消纳。

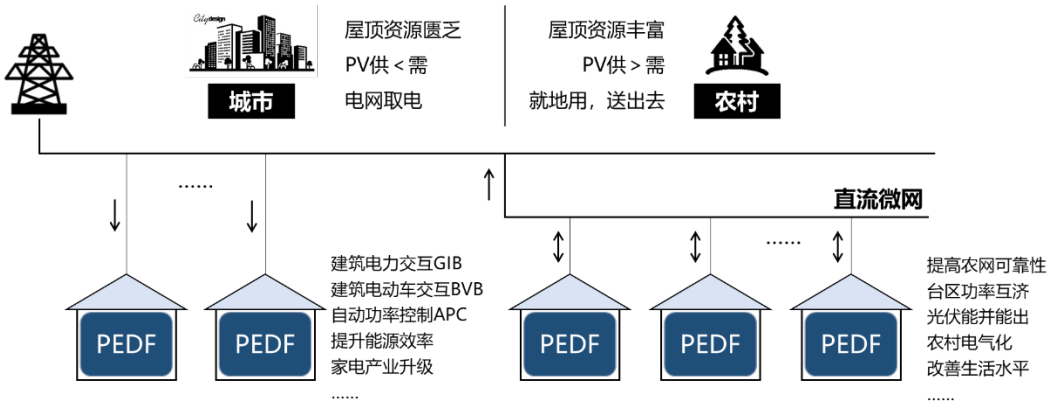


图 V　光储直柔在城市和农村的发展策略

- **中国光储直柔建筑未来发展实施路径近期侧重政策与科技研发，近中期重点在于示范，中远期则在于柔性价值突破。**光储直柔技术现阶段仍处于发展初期，其应用及推广离不开全社会对零碳电力和柔性用电的认知，离不开发电侧与用电侧的协同共识，离不开政府部门的带头示范，离不开商业模式与机制的探索与构建，更离不开持续的技术攻关与设备研发。总体看，近期侧重政策与科技研发，近中期重点在于示范，中远期则在于柔性价值突破，如图 VI 所示。具体推动光储直柔建筑发展应从以下六个方面入手：

1) 从标准入手，确保太阳能光伏应用；
2) 推动充电桩与建筑停车位绑定，成为规划审批的重要组成；

3) 公共机构示范先行，尤其是建筑电动车交互[2]（BVB）；

4) 探索零碳标识认证，解决“帽子”驱动力；

5) 探索建筑电力交互[3]（GIB）商业模式，解决“利益”驱动力；

6) 组织技术与产品装备的科技攻关，解决 1-100 多元化。

	近期政策与科技	近中期示范破题与主体		中远期利益突破
光伏	• 标准强制	公建先行→	开发商	
储能	• 建筑蓄能（冷热电） • 电化学储能等的安全性、经济性 • 车位-充电桩绑定 → 建筑电动车交互（BVB）	BVB→	公共机构	
直流	• 直流装备1-100多元化	直流微网→	农村	
柔性	• 电压-柔性（U-F）控制技术 • 4倍峰谷，需求响应（DR）	虚拟电厂（VPP）→	建筑负荷聚集商	柔性价值： • 动态碳排放因子 • 实时电价 • 碳交易 • ……

零碳建筑 ⟷ 零碳电力

图 VI　光储直柔实施路径

[2] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.12。

[3] 《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030-2022 术语 2.1.2

课题 3：“光储直柔”建筑与电网的关系技术及相关政策研究

随着碳达峰碳中和目标的提出，未来电网将是高比例新能源的电网，电源端的波动将比现在更大，如果负荷侧的用电需求能够跟随电源端一起波动，将有力促进新能源的消纳，减低电力系统单位电量化石能耗。本项目结合我国整体的发展水平、电力市场规则、建筑楼宇分布、光储柔直的技术特点等，从电网侧总体评估分析采用大数据分析技术对负荷特性进行分析，提出负荷侧调节资源的规模和需求，开展楼宇参与电网互动的技术要求研究。基于国内外虚拟电厂政策环境、典型模式等调研成果，结合大型城市电网实际情况，提出了开展建筑楼宇参与绿电消纳前景及市场机制设计研究，为光储直柔建筑型虚拟电厂的政策机制构建提供一定的理论依据和参考。

本课题主要包含以下研究内容：

一、虚拟电厂技术的国内外发展调研。对国内外虚拟电厂政策环境、典型模式调研成果进行概述，对虚拟电厂发展所必须的电力市场环境状况进行调研，对南方区域虚拟电厂技术实践案例和电力市场交易品种进行总结分析，并对存在的问题及挑战进行了总结。

二、大型城市对柔性的需求分析。从电网角度分析对于光储直柔的建筑作为负荷侧柔性可调资源的需求，以大型城市负荷特性数据分析出发，分析电网削峰填谷需求的月份分布、日期分布及时刻分布、调节功率的需求大小、不同调节需求，展现不同时间维度电网对于不同调节需求的量化评估值，并对建筑负荷的柔性调节提出调节要求。

三、虚拟电厂参与市场交易的政策机制研究。对建筑型虚拟电厂参与电网已有的各类辅助服务市场可行性进行分析，同时提出了参与不同类型市场调节性能参数

的要求，根据不同市场模式，提出了独立投资、合作投资和租赁等三种商业模式。

四、建筑楼宇参与绿电消纳前景及市场机制设计研究。根据 2025 年和 2030 年电网规划以及新能源发展情况，系统分析了 2025 年和 2030 年新能源消纳困难的时段和不同时段总的柔性调节资源需求量。结合不同建筑用电类型的负荷曲线和柔性能力，得出深圳市大型公共建筑负荷具备较大辅助电网消纳新能源的潜力。最后基于现有的中长期绿电交易机制，提出中长期+短期的区域和省级两级市场运作的绿电消纳和认证机制，提出了绿电交易市场建设的多阶段发展机制。市场化需求响应机制，通过虚拟电厂参与电网绿电消纳的场景，最后从市场体系、价格机制、电碳耦合和建筑柔性价值认定、技术标准等多个角度提出光储直柔建筑型虚拟电厂应用的建议。

课题 4：中国光储直柔建筑中直流关键技术体系研究

在“近零能耗建筑”实践过程中，光伏发电无疑成为建筑电力供应的重要手段。传统的光伏发电均采用交流方案，然而随着大量的分布式光伏并网，低压电网的电能质量问题（谐波、不平衡）逐渐显现，导致电网公司对光伏并网做出了严格限制。光储直柔直流系统采用“自发自用，集中并网”的设计运行方式，不仅实现了分布式光伏的有效利用，还极大程度上解决了低压电网的电能质量问题，为规模化推进分布式光伏的发展提供了良好的技术支撑。与交流系统最大的区别在于分布式电源及负荷均通过直流接入，由于处于研究推广阶段，系统中的设备、控制、保护等均未形成系统性的技术方案和标准。针对上述现状，本课题在现有技术的基础上，从实际应用的角度，对建筑光储直柔系统主要技术进行梳理，并就其中部分关键技术展开实用化研究，形成不同场景下的光储直柔系统方案。

本课题的主要研究内容包括以下几个方面：

（1）建筑光储直柔系统的源荷特性及优化控制策略

分析了建筑光储直柔系统内关键设备的现状和特性，包括电源、变换器、直流负荷、储能设备以及开关设备等。针对光储直柔内源荷特性，考虑到建筑用电本身特点，对建筑光储直柔系统进行了控制策略的研究，分析了分层控制策略和电压带控制策略，并研究了系统的具体运行模式。

（2）建筑光储直柔系统的系统保护与用电安全

考虑到当前直流系统在实际应用中的各类故障问题，首先分析了系统的故障类型和主要特征，包括变换器故障和电缆线路故障等。根据不同故障类型的特点，提出了响应的保护要求并分析了系统不同保护方案的类型。其次，在上述研究的基础上，提出了系统级保护策略，并根据保护策略给出了实际的保护配置方案举例。最后，在具体的保护产品研制方面，研究相应的数字化保护设备，并对成本低、体积小、易于推广的直流灭弧及绝缘检测方法进行研究，实现了直流负荷的无电弧操作以及直流支路多类型漏电流的快速保护，促进直流系统在建筑中的推广应用。

（3）建筑光储直柔系统内关键设备选型开发及直流负荷设计

针对市场光储直柔产品缺乏的现状，分析建筑光储直柔系统内电能变换需求，

结合理论分析与实验测量，形成系统内变换装置的选型或开发方案，并对常规负荷进行直流化设计或改造。形成了包括电力电子变换设备（柔性双向变换器、整流设备、各类 DC/DC 等）、保护测控装置（母线保护、交直流线路一体化保护、支路保护）、系统监控管理平台以及多类型直流负荷等关键设备，满足了光储直柔系统的推广应用需求。

（4）不同场景下建筑光储直柔系统的方案设计

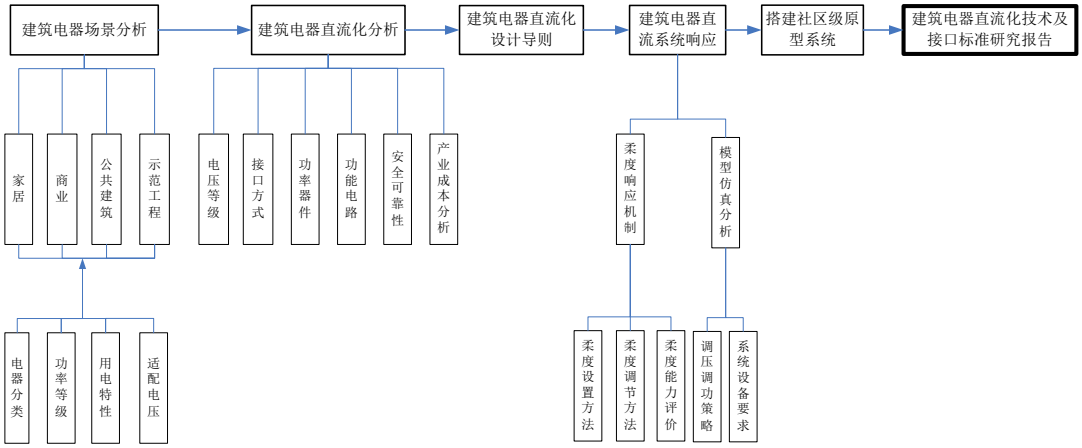
对不同场景下建筑光储直柔系统的电压等级、接地方式等进行研究，并设计合理的系统运行模式。具体形成了包括商业场景、住宅场景以及工业场景等不同类型的设计方案，并对方案系统结构、电压等级选取、核心装置以及运行模式等进行了选取配置。

在前述研究的基础上，从拓扑结构选取、接地和接线方式以及容量配置等方面，给出了不同方式的特点对比和选取原则或建议。项目研究内容可为实现能源生产、消费、技术和体制改革提供重要的实践参考，对于新兴产业的发展，实现能源科技和装备水平的全面提升等方面都具有重要的理论和现实意义。对于双碳目标的实现，具有一定的促进作用。

课题 5：建筑电器直流化技术及接口标准研究

建筑电器直流化技术及接口标准(设备)课题主要针对发展光储直柔建筑的直流化和接口的关键技术体系进行全面分析，系统建立建筑电器直流化的关键技术框架，对接入方式、接口标准，需求侧响应模式等进行研究。

（1）制定了建筑电器直流化设计的技术路线，作为今后建筑电器直流化设计的总体指导。



（2）分析总结了不同设备类型的直流化方案，并给出直流电器发展建议。

序号	设备类型	设备名称	直流化技术障碍及成本变化
1	电-动类	空调	电源、驱动、阀件、风机电机、压机电机等新研发，规模化后成本降低。
2		水泵	水泵变频化及其电机驱动新研发，规模化后系统成本降低。
3		风机	风机变频化及其电机驱动新研发，规模化后系统成本降低。
4		电梯	电梯电机、门机、限速器及其复位装置、风扇、照明、电机驱动等新研发，并涉及特种设备安监认证，规模化后系统成本降低。
5		打印机	电源、加热辊等直流化新研发，规模化后成本基本持平。
6	电-光类	照明	电源直流化新研发，规模化后成本降低。
7	电-影类	显示器	电源直流化新研发，规模化后成本降低。
8		电视机	电源直流化新研发，规模化后成本降低。
9	电-热类	电饭煲	电源、发热盘等直流化新研发，规模化后成本降低。
10		热水壶	电源、发热盘等直流化新研发，规模化后成本降低。
11		电磁炉	电源、加热部件等直流化新研发，规模化后成本降低。
12	电-声类	音响	电源直流化新研发，规模化后成本降低。

13	信息电子终端	手机	电源、适配器直流化新研发，规模化后成本降低。
14		笔记本	电源、适配器直流化新研发，规模化后成本降低。
15		电脑主机	电源直流化新研发，规模化后成本降低。

建筑电器将走过交流-交直流混合-全直流的长征，需要强强联合，科学有序协同推进，具体建议如下：

a、 以应用场景为对象，科学有序的组织技术、资本和企业开展本质安全、接口技术攻关和示范到试点，并总结迭代实现建筑直流电器及供用电系统的升级与逐步推广；

b、 紧跟国家双碳及新型电力系统构建契机，联合电力及能源伙伴，在新建的园区、社区、场站、场馆、乡村及校园进行全直流化的规划、设计、建设和运营，带动建筑电器直流化；

c、 以海岛、边境小镇为先行对象，更好发挥零碳直流价值优势，建设光储直柔海岛和小镇，发展建筑直流电器；并带动直流船舶，光储直柔海洋牧场等能凸显直流价值的场景应用；

d、 开展广泛的国内外跨专业和行业交流与合作，以场景应用数据为基础，总体规划先形成指引和导则，再逐步制定实用的建筑直流电器标准；

e、 建设建筑直流电器的实证基地，并已实际应用为目标，训练和培养直流电器研发队伍。

（3）结合技术研究、产品应用及标准等的现状和发展趋势，在直流插头插座迈向产业化发展的道路上，通过对直流插头插座应用场景分析，主要围绕四个方面进行产业化设计：

a、按设备功率等级而不是品类进行设计的直流插头插座，形成多行业、跨国家适用产品；

b、低压直流安全插头插座（48VDC/16A），宜采用类 Type-C 连接方式，实现通用化、小型化与信息化，并最终与信息电子终端接口完全统一，大幅提高产业通用化、标准化水平和产业集约化率；

c、高压直流功率型（800DC/400VDC）电器大部分可采用固定式连接方式，安全、可靠、简洁，能覆盖 89%的功率型电器；

d、高压直流功率型（800DC/400VDC）电器还有小部分需要插拔的，宜采用类充电桩接口的协议供用电连接方式；并进一步研究抑弧材料和灭弧技术，保障插拔安全可靠，同时关注无线供用电技术，研究电磁泄漏对生物安全的影

响，攻关直流功率型电器的无线供用电技术。

（4）通过对直流系统不同接地方式的保护装置及保护特性研究，直流宜采用浮地架构。目前提出的三种非浮地架构接地方式，分析特性对比可看出，当前 IT（高阻）接地方式能作为过渡方案用于民用直流示范和试点。相应的直流电器产品的设计，可预留 IT（高阻）接地口，直流插头插座宜按照浮地设计。

（5）经对负荷类型进行分析，直流电器设备应采用直接连接，可内置 DC/DC 实现，由设备生产商提供，不作为“光储直柔”建筑室内配电网的一部分。建筑电器直流化后可采用直流母线ΔU 调压调功的需求侧响应模式，调压调功采用两种柔度响应控制模式：

控制模式一：母线电压-功率随动运行模式：直流电器实时监测母线电压，根据母线电压变化实时调节自身运行功率，在母线电压超出直流电器的可运行范围时直流电器将停止运行。

控制模式二：母线电压-功率恒定运行模式：直流电器在可接受的母线电压变化范围内保证自身功率输出能力，在超出可接受的母线电压变化范围后设备将调节自身运行功率或调节可运行的设备数量，使母线电压变化到可接受的范围，设备自身具备宽范围的运行能力；在母线电压超出直流电器的可运行范围时直流电器将停止运行。

课题 6：“光储直柔”直流建筑标准体系研究

实现“双碳”目标，是我国实现可持续、高质量发展的重大战略决策。当前我国工业、交通和建筑成为了“耗能大户”，其中建筑的用电量仍在逐年增长，所以在建筑层面开展节能减排，是实现“双碳”目标的重要环节之一。在高比例可再生能源大量接入的系统结构下，采用直流供用电系统、具备“光、储、直、柔”特点的建筑是建筑领域解决能源短缺、环境污染、气候变化等问题，实现双碳目标的重要手段之一，其技术特点也顺应了能源效率最大化和环境影响最小化这一历史潮流。“光储直柔”直流建筑是跨行业、跨学科、融合多专业、综合性强的新兴学科，既有许多交叉重叠的技术领域以及标准规范，又存在许多独特的难题有待解决。

在建筑通用标准体系的基础上，对“光储直柔”直流建筑的整体标准体系进行系统分析与梳理，从建筑、电网和设备不同角度研究“光储直柔”直流建筑的相关需求，提出促进“光储直柔”技术全面推广的标准体系和优先发展方向，以完善“光储直柔”直流建筑技术框架，为将来的标准制定以及技术推广奠定基础。

1 国内外低压直流标准工作现状

目前国内外对于建筑低压直流配用电技术都已经有了大量的研究，国内外实际建成运行的直流建筑项目已经涵盖了城市、乡村、办公、校园、住宅和厂房等多个建筑类型。随着直流建筑研究和示范项目的积累，相关国际标准组织也已开展相关内容的标准化工作。

1.1 国外低压直流标准工作现状

国际电工委员会（IEC）在 2009 年启动了低压直流相关标准化工作，先后成立了低压直流配电系统战略组、评估组，为了系统研究低压直流相关标准化工作，在 2017 年成立了低压直流及其电力应用系统委员会（IEC SyC LVDC）。委员会内成立特别工作组 ahG 7，进行低压直流配电术语和定义的标准化。特别工作组 ahG 8 主要负责 LVDC 在建筑物内的应用探索和收集。CIGRE 于 2015 年成立 C6.31 “中压直流配电可行性研究”，工作组研究成果已形成技术手册（TB793）并出版。2018 年 6 月，德国电气工程、电子和信息技术行业标准化组织（DKE）发布了“德国低压直流标准化路线图”第二版，路线图中也分析了涉及直流建筑的直流电气技术，同时介绍了低压直流配电优势，相关标准的发展现状。

1.2 国内低压直流标准工作现状

在国内标准化方面，中国电力企业联合会、中国电工技术学会、全国低压电器标准委员会、全国家电标准委员会，直流建筑联盟等学协会和学术团体都先后成立

了相应工作组或者委员会，从事各自领域直流化的相关技术研究、试点工程建设等。目前已在基础标准和专用设备等方面具备了一定的标准化基础。关于直流电压等级的相关标准，如 GB/T 156-2017《标准电压》给出了 1500V 以下等级的直流电压系列，GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》，则给出低压直流配电电压为 110～1500V。关于配用电系统过流保护用设备，无论是用于工业场所和配电系统的断路器，还是用于家用及类似场所的断路器都有明确的标准。我国在特定的建筑应用场景中也初步开始了低压直流标准化的工作，例如中国工程建设协会发布标准 T/CECS705-2020《直流照明系统技术规程》；中国建筑节能协会发布了标准 T/CABEE 030-2022《民用建筑低压直流配电设计标准》。

由此可见，随着“光储直柔”直流建筑相关技术研究、工程试点及各种团体、行业标准等日益增多。然而对于将上述各项技术有机融合的“光储直柔”直流建筑，由于其标准体系还未建立，导致相关标准缺乏系统性、完整性，难以指导具体工程建设实施，也无法对建筑的节能减排效果开展统一评价，并且对“光储直柔”直流建筑健康有序发展也造成了一定影响。所以构建“光储直柔”直流建筑标准体系成为了当前的迫切需求。

2 “光储直柔”直流建筑标准体系

为构建“光储直柔”直流建筑标准体系，在对国内外相关标准化工作梳理的基础上，首先应该明确标准体系的构建原则和构建目标。

2.1 构建原则

“光储直柔”直流建筑是一种新的建筑形式，但它的各组成元素的技术发展却都相对成熟。“光储直柔”直流建筑的标准体系将呈现一个多行业多领域技术融合的综合体。构建“光储直柔”直流建筑技术标准体系是一项系统性、综合性工程，应坚持以下原则：

目的性原则：“光储直柔”直流建筑标准体系的设计目标就是为了规范“光储直柔”建筑健康有序发展，从而在建筑行业范畴内探索出实现“碳达峰，碳中和”的有效路径。

系统性原则：坚持标准体系的整体性优化，既要体现标准体系自身的系统性，又要保证与其他相关技术体系的互联互通，全局性谋划、战略性布局、整体性推进标准体系建设。

协调性原则：坚持各领域标准间的统筹协调，确保各组成要素与子系统之间，子系统与系统整体之间的平衡协调，既保证领域划分的衔接性，又保证各领域标准

不交叉重复。

开放性原则：坚持无歧视对接世界范围内相关标准化组织，积极吸纳各级组织机构、区域联盟、跨国集团发布的先进适用技术标准，积极促进科技发展新成果与工程实践新经验的标准转化，促进标准化工作公开透明、开放共赢。

扩展性原则：坚持持续创新、不断拓展，既保持标准体系整体架构的相对稳定，又要顺应能源技术、电力技术、信息技术、建筑技术的发展趋势，满足“光储直柔”直流建筑技术创新发展需求。

2.2 构建目标

建筑与人是密不可分的，安全、舒适是衡量建筑的基本指标。所以，在构建“光储直柔”直流建筑标准体系时，要兼顾当前和长远，统筹“光储直柔”直流建筑技术健康发展和用电安全的需求，以建设“安全可靠、绿色智能和经济可持续”的“光储直柔”直流建筑为目标。发展“光储直柔”直流建筑相关技术首先必须保证人身安全，确保设备和电气系统的可靠性，其安全性和可靠性的衡量标准不应低于当前的低压交流用电水平。“光储直柔”直流建筑一方面要通过新能源发电与储能结合，给建筑提供绿色电力。另一方面要通过柔性控制，使建筑外光伏发电自发自用，储能装置可以配合电网实现削峰填谷，提高能源利用率。“光储直柔”直流建筑标准体系构建需要通过实现清洁能源与建筑结合，达到为电网减负，从而间接减少煤炭的消耗。

2.3 体系架构

“光储直柔”直流建筑最突出的特点是建筑电气部分区别于传统交流电的电气设计，另外建筑增加了光伏、储能和充电等附属设施。所以，“光储直柔”直流建筑标准体系最初的设计主要对应房屋建筑工程标准体系中的三个专业内容，即建筑设计、建筑环境与设备和建筑电气。针对房屋建筑标准体系中的建筑地基基础、建筑结构、建筑工程施工安全、建筑给水排水等专业相关标准，对“光储直柔”建筑具有普遍适用性，所以在“光储直柔”直流建筑标准体系中不再重复。

为此结合试点工程经验，设计了包含以下十大类的“光储直柔”直流建筑标准体系：规划设计与评估、建筑电气系统设计、电气系统控制与保护、直流计量、电能质量、调试与验收、关键设备技术要求、运行与管理、工程设计、典型应用场景与特殊要求等方面的内容。标准体系框图如图所示。

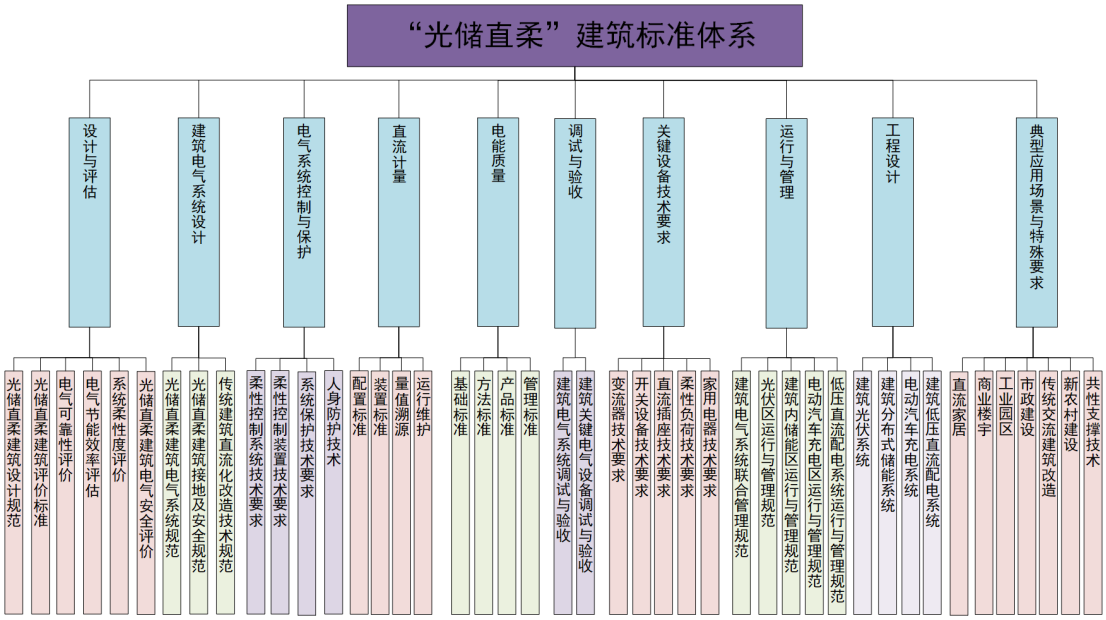


图 1 “光储直柔”直流建筑标准体系

3 “光储直柔”直流建筑标准内容

“光储直柔”直流建筑标准体系涉及 10 个技术方向的标准布局。

3.1 设计与评估

从设计的角度，《“光储直柔”建筑设计规范》是工程设计的基本依据，是建筑设计标准化的重要组成部分。从评估的角度，《“光储直柔”建筑评价标准》是为贯彻落实“光储直柔”理念，推进建筑节能减碳的措施而设计的标准。另外，在建筑电气方面还需要评估建筑电气的可靠性、安全性、节能效果、电气系统柔性度等。目前，相关标准都空白。

3.2 建筑电气系统设计

现有的建筑电气系统规范都是基于交流三相电设计，而“光储直柔”直流建筑采用直流配电系统，直流建筑供电系统的相关标准目前几乎处于空白状态，因此，亟需制定和完善直流建筑供电系统相关标准。

3.3 电气系统控制与保护

“光储直柔”直流建筑与电网的柔性互动是实现低碳的关键，其系统、设备和人身的安全稳定可靠运行则是应用的保证，因此需要在柔性控制装置、柔性控制系统、保护技术要求、人身防护技术要求等方面开展标准化工作。

3.4 直流计量

在传统能源装备与检测设备的计量体系中，直流电能表应用较少，缺乏生产标准和成熟产品，各国计量院尚未建立直流电能计量基准。因此亟需开展包括计量配

置标准、计量装置标准、量值溯源、运行维护、故障处理、更新改造等内容在内的标准体系建设。

3.5 电能质量

“光储直柔”直流建筑系统电能质量问题存在多种特殊性，原有传统电力系统的电能质量标准显然不适用。然而，目前与低压直流密切相关的标准仅有两部：IEC TR 63282《低压直流系统标准电压等级及电能质量现象评估》、GB/T 35727 2017《中低压直流配电电压导则》。因此亟需修订和完善光储直柔系统电能质量标准，规范光储直柔技术应用和工程建设。

3.6 调试与验收

“光储直柔”直流建筑的电气系统调试目的是验证直流配电系统在实际运行中功能和性能是否可以达到设计要求，并通过调试找出实际运行存在的问题，通过分析找到解决方案。但是 GB 50303-2015《建筑电气工程施工质量验收规范》这个标准不涉及电气系统的调试与验收，只是分别对主设备、材料、成品、半成品的安装要求。由于“光储直柔”直流建筑的电气系统需要和光伏部件、储能单元等联合调控，加之存在变换器、开关设备及家用电器等关键直流电气设备，因此需要增加相应电气系统和主要电气设备调试与验收的标准。

3.7 关键设备技术要求

目前“光储直柔”直流建筑与交流电力系统存在接口设备，对于用户还涉及直流电器设备等。因此需制定针对变换器、开关设备、直流插头插座、家用直流电器及柔性负荷的技术规范。

3.8 运行管理

目前暂无“光储直柔”直流建筑相关运行与管理标准，可参考光伏、储能、充电站、微网运行与管理的相关标准制定本系列标准。关键是要明确责任主体、运维机制、边界等。

3.9 工程设计

“光储直柔”直流建筑是在建筑领域应用太阳能光伏、储能、直流和柔性控制四项技术。建筑光伏系统、储能系统、直流配电系统和柔性控制系统都需要相关标准覆盖设计、施工、检测与评价、验收和运行维护的全过程，并针对光伏系统、储能系统、直流配电系统、电网及建筑智能用能设备之间相互协调控制的接口开展标准化工作。

3.10 典型应用场景与特殊要求

考虑“光储直柔”直流建筑在直流家居、新农村建设、商业楼宇、工业园区、市政建设、传统交流建筑改造等领域的推广应用前景以及特殊使用需求，也需要针对性的制定相关标准，

4 “光储直柔”直流建筑标准优先发展方向

结合上述“光储直柔”直流建筑的标准体系和内容，考虑目前“光储直柔”直流建筑示范应用和工程建设的现状，建议优先在系统设计、建筑评估、柔性控制、电气设备、直流家电和建筑用电池储能这六个方面优先开展标准化工作。制定《建筑低压直流电气设计规范》，明确“光储直柔”直流建筑的配电电压等级和分区、直流拓扑结构、接线方式、接地方式、绝缘监察、剩余电流保护、直流电弧保护等；制定《“光储直柔“建筑评价标准》，确定“光储直柔”直流建筑定义，评价指标；制定《低压直流配电系统柔性控制系统技术规范》，需在柔性控制方案确定后，综合设计低压直流配电系统内柔性控制系统的技术要求；制定《建筑低压直流电气系统直流计量配置方案》，以设置在购授电设施产权分界处为原则，合理选择直流计量装置和直流计量配置点，选择具有代表性的电能、电压、电流、故障信号等监测点；制定《不同类型变流器技术规范》，完善不同变流器设备的技术标准，应用电压等级、变比、直流母线接线形式、控制模式、功率器件参数等；制定《家用及类似用途直流插头插座技术标准》：完善不同直流插头插座的技术规范，包括应用电压等级、接线形式，额定电流、是否需专业人员操作等；制定《直流家电技术要求》，以支撑建筑直流配电的使用需求；制定《建筑用电池储能配置技术规范》，明确“光储直柔”直流建筑用电池储能的技术要求、试验方法、检验规则、使用要求等。

课题 7：中国光储直柔建筑发展的关键政策机制研究

《中国“光储直柔”建筑研究项目》共设置十三个课题，子课题七为政策机制研究部分。如何有效地衔接现有政策机制，同时甄别现有政策当中与光储直柔今后规模化发展存在的“错配、空隙、失当”等问题，提出与投融资模式、商业模式和产业化发展路径相匹配的政策建议，是推动光储直柔产业发展的重要工作。

课题组对《中国“光储直柔”建筑研究项目》的五个示范工程的成本费用收益数据、采用的商业模式进行了跟踪分析，在此基础上和示范项目的利益相关者进行了深度访谈，提炼出示范工程开展过程中遇到的共性问题和障碍，形成了调研问卷，对 100 位行业参与者进行了线上调查，由此，梳理形成了发展光储直柔的困难障碍、待突破和完善的政策机制问题。

当前行业共识，难度高的四项障碍依次为：缺少可以参照执行的规范、直流电器产业链远未成熟、用户看不到明显实效认可度低、储能安全问题。待突破和完善的政策期待可以归类为：通过市场的手段利用好“价格激励机制”、通过计划的手段利用好“政府约束机制”、赋能科技之手扶持带商业模式的技术示范。

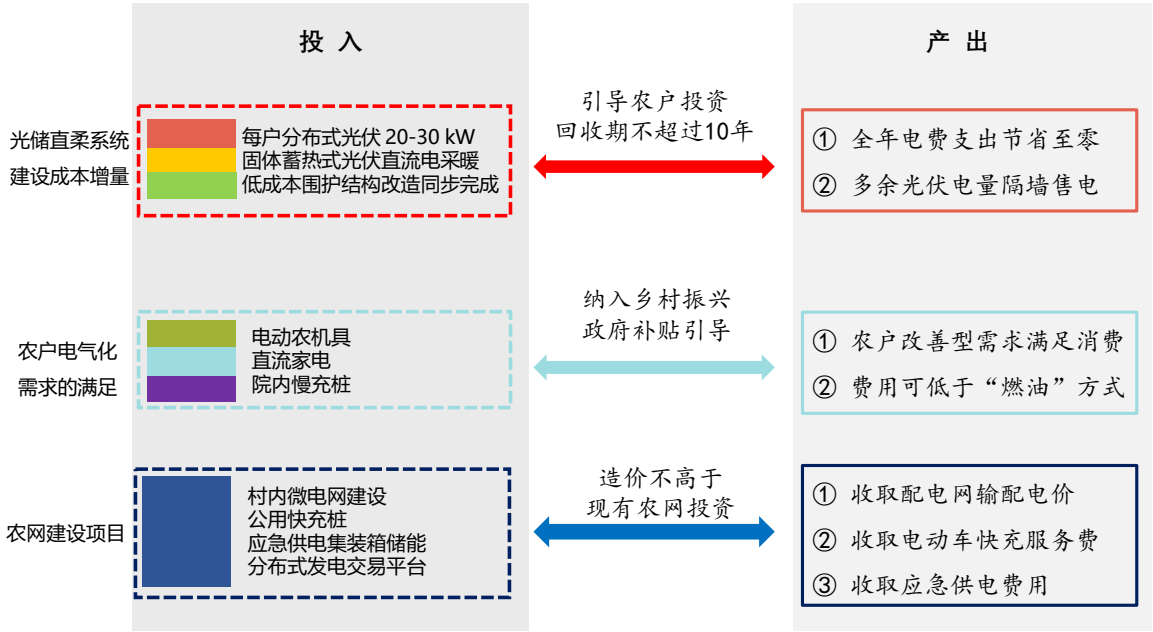


图 1 农村地区光储直柔建筑的投入产出图

在农村地区，“煤改电”+“生活电气化”“农业生产电动化”+“电动车”需求叠加，成为农村能源产业当期面临的复杂问题，“光储直柔”技术面临巨大的产

业发展机遇。

农村“光储直柔”系统建议采用“只出不进、寓电于农”的创新模式，“只出不进”是指以整村来看，全年的用电都由村内光伏发电满足，多余电量还能够对外输出。“寓电于农”是指村民成为村内能源设施的资产持有者。

对应农村地区光储直柔 “只出不进、寓电于农”的商业模式，我们针对性地提出三项关键政策机制建议。一是建议以村为单位，将全部农户屋顶、院子周边、农业设施、林地荒地具备铺设光伏的资源统一规划，采用光储直柔方式，分期分批统一建设。二是加快分布式发电交易平台建设，使得投资安装光伏的农户可以“隔墙售电”。三是赋能科技与金融融合之手，加速支持一批带商业模式的整村建设光储直柔能源系统的试点。

城市与农村不同，分布式光伏发电、储能、电动车充电桩、负荷柔性调节带来的能量型（kWh）经济收益，在当前的工商业能源价格体系下，已具备商业投资价值。相比于传统的交流型光伏建筑，光储直柔的由于“直”和“柔”两个环节导致配电网的造价大约要提高 40%—50%，但是与之对应的经济收益都是功率型（kWp）的，且存在或有性风险，在当前以能量型（kWh）为主的电价体系下，很难收回投资，这是制约光储直柔建筑技术市场化应用的瓶颈问题。

城市“光储直柔”系统的商业模式，需要跳出光储直柔各环节组合得越多经济性越差的困局，采用“区域尺度聚合、建筑+X 协同”的商业模式，“区域尺度聚合”是指要跳出单体建筑在围绕建筑本体追求能耗降低的单一模式，重点发展各类园区、校园、社区等成片区的建筑群的光储直柔能源系统。“建筑+X 协同”是指围绕建筑的用能管理体系，把屋顶及周边区域（景观、公共绿地）的光伏资源开发、储能安全管理、电动车充电桩报装、能源数据采集等光储直柔各环节涉及的工作纳入到现有工作体系，形成能源微网整体参与电力交易和碳交易。

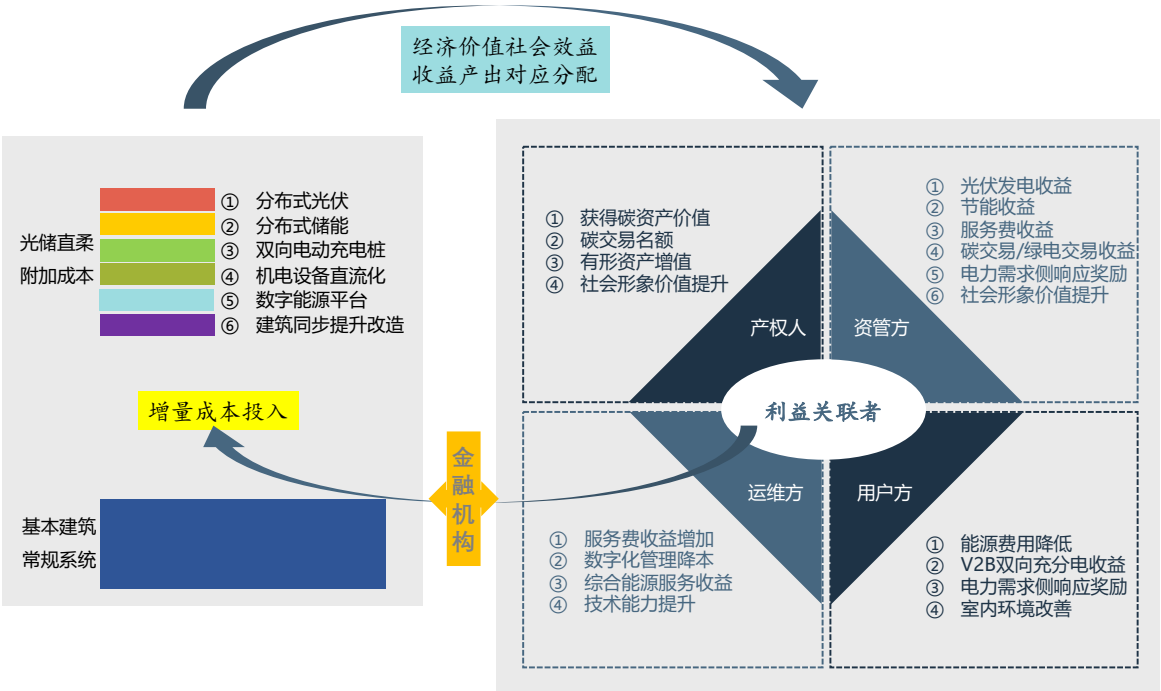


图 2 城市地区光储直柔建筑的投入产出图

对应城市地区光储直柔“区域尺度聚合、建筑+X 协同”的商业模式，我们针对性地提出三项关键政策机制建议。一是将光储直柔建筑作为市场主体，纳入碳交易市场，新制定与功率型（kWp）调节能力相对应的碳定价机制。二是将建筑周边的电动车充电桩作为建筑能源系统的组成部分，统一规划、统一建设。三是支持一批园区、校园、社区等集成性、综合性载体，建设光储直柔能源系统，以点带面，多领域多层次推动“零碳”发展。

对应上述商业模式，加大技术研发投入、明确传达价值作用、赋能行业专业力量、政府引导试点示范四项是光储直柔建筑规模化发展的四项保障措施。

课题 8：“光伏+智能充电桩”可行性分析与示范

在“碳达峰、碳中和”目标的指引下，发展以可再生能源为主导的新型电力系统、推动能源需求侧的全面电气化进程，已经成为我国能源革命的重要路线。其中，发展电动汽车是实现低碳能源转型的关键环节，不仅可以减少交通直接碳排放量，更重要的是电动汽车蕴含的巨大蓄电资源，有潜力效支撑可再生能源消纳与电网调节。我国的电动汽车正呈现蓬勃发展趋势，然而目前盛行的恒功率快充模式不仅无法支撑可再生电力消纳，同时会对电网产生了巨大冲击。可再生电力难以消纳和充电需求冲击电网均已成为实现“双碳”目标过程中两个迫切需要解决的问题。与此同时，为了构建低碳城镇，已有多地政府将电动汽车充电桩作为重要基础设施纳入城镇改扩建规划，由此将会产生巨大的投资。如果能够有效参与电网调峰、积极消纳自产可再生电力，将可能以极低甚至零电价取电，从而实现充电桩基础设施投资的快速回收。因此，亟待给出基于智能充电桩的新型运营模式，探索经济、可持续地进行大规模充电桩基础设施建设的道路

本项目研究从电动汽车出行规律和用能需求出发，研究“光伏+智能充电桩”系统及部件的关键技术，提出了与之相适应的运行管理模式，并进行了应用实践。为解决分布式光伏消纳难、电动汽车冲击电网等问题提供了有效的技术方案、商业模式和实践案例，为电力、交通、建筑等相关领域“双碳”目标的实现提供了技术支撑。具体内容如下：

1）以建筑为中心研究私家汽车在不同规模城市内的行为特征，厘清车辆在住宅、办公地、其他地点之间的转移及停留规律。结果表明北京这类大城市和芮城这类县城的私家车年平均行驶里程较为相近（平均 1.3 万 km/年），但是行驶里程的构成存在较大差异，北京案例的最大组成部分是上下班通勤（58%），而芮城案例是城内除通勤外的出行（49%）。如仅考虑私家车在城内出行的充电需求，北京案例（平均 1.98 MWh/年）高于芮城案例（平均 1.58 MWh/年）。

2）开发基于可变电压直流微网的智能充电桩，实现充放电功率的主动调节；并基于此提出四种“光伏+智能充电桩”系统形式。对电动汽车行为的全年仿真结果显示：办公地慢充方式可满足私家车全年城内出行的需求；采用传统光伏恒功率充电系统，电力供需存在严重的供需不匹配，需大量配置储能才可满足充电需求；采用“光伏+智能充电桩”系统，可有效促进匹配供需，在此基础上与建筑用电协同可使光伏消纳率达到 90%以上。

3）针对提出的“光伏+智能充电桩”系统模式，提出“一位一桩、即停即插、

会员收费”的运行管理模式。研究其市场推广方案：短期来看，可帮助私家电动汽车用户每年节约 38%的充电费用，同时实现企业盈利和提升分布式光伏自消纳率，可有效调动政府、企业、用户等各方的积极性；长远来看，可据此模式进一步开放电动汽车双向充放电模式，参与电网调蓄、帮助消纳大量的风电光电，可为政府、企业、用户带来更大的收益，形成正向的循环激励机制。研究制定企业运营推广战略，为相应企业的发展运营提供“提前布局，政企合作，下沉市场”的战略指导。

4）将上述研究成果应用于清华大学建筑节能研究中心，建立“光伏+智能充电桩”示范工程并取得预期效果；提出芮城县电动汽车及充电桩发展规划，并针对芮城县政府大楼给出详细方案。

综上所述，经过本项目的研究，已经有效实现将分布式光伏发电与电动汽车的充电需求进行匹配，满足电动汽车的充电需求的同时促进建筑屋顶光伏的自消纳；所设计的商业模式也可以让政府、企业、电动汽车用户获取收益。未来还需对“光伏+智能充电桩”系统开展以下几方面的深入研究工作：1）典型城市/区域私家车行为特征及智能充电桩布局模式研究：研究不同规模城市/区域内私家车的行为特征，研究智能充电桩在城市/区域中各类建筑周围的布局模式，分析车辆电量保障率和可调度等效储能资源之间的关系，给出从当前“通过可控充电就地消纳屋顶光伏并参与电网削峰”发展至远期“通过可控充放电支撑新型电力系统可再生能源消纳”的发展路径。2）智能充电桩在城市内会员制模式及经济性研究：基于已有的实际项目，调研电动汽车车主的行为偏好与接受度，给出会员制模式从当前“通过可控充电就地消纳屋顶光伏并参与电网削峰”发展至远期“通过可控充放电支撑新型电力系统可再生能源消纳”的定价及运营方案转变路线，以期同时实现系统的经济性与用户参与的激励机制。3）城市/区域尺度智能充电桩网络的布局与调蓄规划方案（如海南岛）：包括城市/区域的能源供需预测研究、车辆行为及充电桩网络方案研究、电动汽车深度参与的零碳能源系统规划方案。

课题 9：芮城城镇地区光储直柔建筑示范项目

人类实现可持续发展的必然路径是将化石能源转变为以可再生能源为主的低碳能源。风电、光电是可再生能源的最主要构成，目前其组件和装置成本大幅度下降，发电成本接近煤电，并且仍有较大的下降空间。面临能源转型，我国目前发展风光电的瓶颈已经从过高的装置成本转变为可以安装这些装置的土地或安装空间资源，和由于缺少灵活电源导致的接纳能力的不足。解决安装空间这一问题的途径之一是充分挖掘利用建筑表面和乡村空地开发太阳能光伏和风电。而解决接纳能力不足的问题从根本上要变目前的集中式电源的电力系统为分布式电源系统，建立直接的发-储-用通道。利用建筑本身的用电特点及未来电动汽车充电的需求，发展建筑柔性负载来调节协调电力的供需关系是破解随机型风电光电难以接纳的重要途径。具体的技术路线是：通过建筑光伏+直流+蓄电+需求性响应用电和电动汽车内置蓄电池的智能应用实现建筑外表面的充分利用和对可再生电力接纳能力的提升。

芮城县位于山西省运城市的南部，2018 年全县常驻人口 41 万，现阶段人均 GDP 还没有达到中国人均的水平。芮城县 2019 年全社会用电量是 7.24 亿度，其发电侧主要靠集中风电、集中光电和大唐火电厂，2019 年全县上网电量 24.9 亿 kWh，其中风电光电发电量为 8.25 亿 kWh。如果按年总量看，可再生电力风电+光电已经可以满足用电。但由于风电光电发电特点是夏季多冬季少、白天多晚上少，与用电的曲线存在季节和日内的不匹配，所以要依赖火电进行调峰。

本项目以芮城县为基础示范四线城市及乡村全面利用“光储直柔”技术解决实现全县零碳的途径，使这一个四十多万人口、城镇化率约 50%的县依靠“光储直柔”技术，促进社会经济全面发展，在人均 GDP 达到全国平均水平的同时实现全县的碳中和。本项目重点在于设计使得芮城全县实现碳达峰、碳中和目标的路径，对芮城县电力系统供需平衡、新型农村能源系统、城镇“光储直柔”建筑配电系统改造、电动车和智能充电桩规划、生物质产业规划和工业规划几个方面进行整体方案设计以及县城地区建筑的示范项目设计。具体内容如下：

活动一：芮城县能源供需预测及碳排放核算。针对三种碳中和的定义方法，给出芮城县逐步实现三类碳中和的路径和战略规划。2030 年前实现能源导致的碳排放总量为零，近期的发展重点是大力发展风电光电，特别是充分利用农村和城镇建筑屋顶资源，发展分布式光伏。2035 年实现化石能源燃烧的零碳排放，促进芮城县化石燃料全部改电或生物质燃料，于 2035 年实现化石能源燃烧的碳中和。实现电力系统的零排放，从将来大规模发展风电光电的目标来看，将要求各地尽可能自行消纳

其生产的风电光电，并且尽可能少的要求电网在风电光电不足时为其补充电力。

活动二：芮城县实现碳中和核心任务分析。根据预测的芮城风电光电发展规划和全县电力负荷的变化，得到电力系统碳排放变化曲线如下图 。规划 2028 年首先投入抽水蓄能，2028 年之前由于用电和发电不断上升，进一步加剧了电力系统的不平衡，碳排放持续增长，到 2028 年投入抽水蓄能后稍有改善，但效果不明显，2029 年电力系统的碳排放约为 27 万 tCO_2。规划 2030 年投入生物质电厂后，有效解决了季节不匹配问题，电力系统碳排放显着下降。从 2030 年到 2035 年，电动车以及光储直柔技术快速发展，解决一天内的不平衡问题。最终，结合工业自身生产有序用电调峰，可实现 2035 年芮城电力系统零碳。

活动三：县政府大楼“光储直柔”+智能充电桩节能改造方案。电动车的发展可以促进屋顶光伏的充分消纳，100%电车时不需要蓄电池可以实 94%的光伏自耗率。此外,照明直流化后仍需要双向 AC/DC 保证光伏消纳和需求保证,没必要改造系统。预计建筑光储直柔系统光伏安装 327kW（投资 100 万），电动车 70-100 辆（投资 50 万），蓄电池 50kWh（投资 50 万）。收益为年发电量 36 万度，年收益 20 万元，总投资回收期为 10 年。是可接受的合理选择。

课题 10：农村光储直柔系统示范项目技术方案及商业模式研究

庄上村光储直柔系统项目位于山西芮城黄河北岸的庄上村，分布式光伏总装机容量 2MW，储能 600kWh，包括户级光储直柔系统和村级光储直柔系统，二者组网通过变压器（AC/DC）与交流电网相连。户级光储直柔系统电压等级为 DC220V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑结构，通过直来电实现系统的电压变换和协调控制，主要用于供应居民用电，剩余电量送到村级光储直柔系统；村级光储直柔系统电压等级为 DC750V，IT 不接地系统，采用单极接线方式、放射状拓扑，便于村内各户之间以及与电网的能量交互。经过测算，系统总平均线损约 4%，低于设计限值 7%，实测整体效率达 91.7%。

本项目通过发展“光储直柔”技术，以全面电气化的零排放助力“碳中和”，引领全球乡村区域零碳化运营并依托减碳理念实现乡村焕新。项目实现了分布式光伏的高效消纳，提升发电用电的能效和台区间功率互济的能力；解决了分布式光伏给电网带来的部分扩容压力、三相不平衡、谐波、电压波动及闪变等问题；解决了光伏发电和百姓用电的随机波动性问题；实现了对电网的柔性友好接入，及可观、可测、可控。技术方案上，系统通过电压带控制策略协调控制光伏、电网、储能和负荷，维持建筑配电系统电压稳定，保障稳定运行；提出了一种适应直流系统的剩余电流保护方案，通过低压直流主动监控装置和直流剩余保护执行装置的灵活配合，实现可靠驱动跳闸或者发出跳闸信号。本项目还开发了一种直流灭弧模块，实现直流负荷的无弧通断。

项目被农业农村部和联合国开发署授予“中国零碳村镇项目示范村”，其推广应用将进一步实现国内相关区域从局部脱碳向全面净零碳的迈进。2021 年国务院将本项目“光储直柔”、“直流配电”技术路线纳入《2030 年前碳达峰行动方案》。

本示范工程光伏所发电量优先供庄上村居民使用，多余电量由电网全额收购，不足电量由电网企业提供。以发电总量计算投资方的收益，储能收益算给投资方。FCS 资产无偿移交给电网公司管理，电网公司根据系统与电网交互的电量向投资方结算电费，所产生的线损由电网承担。

项目参与单位包括牵头方芮城县人民政府、投资方中电国际、设计方国核电规划设计研究院、建设运营方南京国臣直流配电科技有限公司、合作方芮城县供电公司以及屋顶持有方庄上村村民。各参与方按合同/投资协议约定进行利益分配：

庄上村总共 71 户居民铺设光伏，所选光伏组件每块 400W，共有 5000 块，总装机 2MW。年发电 1200 小时，其中 8.52 万 kWh 向当地用户免费赠送（1200kWh/

户），10.68 万 kWh 向当地用户出售，剩余电量售卖给电网公司。

社会效益方面，本示范工程光伏装机容量 2MW，平均每年预计可提供 240 万 kWh 清洁电力，节约标准煤 966t，减少排放二氧化碳 2392.8t、二氧化硫 72t、粉尘排放 652.8t、氮氧化物 36t。建设本工程可以减少一定的化石能源的消耗，有利于环节环境保护压力，实现经济与环境的协调发展，节能和环保效果显着。

此外，本示范工程采用光储直柔技术对光伏发电进行传输消纳，与传统分布式能源技术相比，光储直柔技术在电能质量问题、电网的扩容压力问题、电网调度问题、台区重过载问题、线路损耗、供电可靠性等具有明显的优越性，能够避免分布式大规模并网带来的电能质量问题、缓解电网扩容压力、减少线路损耗、提高供电可靠性、提高能源利用效率。

经济效益方面，项目带动农民增收及村集体经济收入（户均增收 1200 元以上），推动乡村振兴。增加 GDP 和财政收入，实现每年发电收益约 100 万元/年（税收约 10 万元），提升地方经济水平。当纳入碳交易后，项目将新增额外的碳指标收入（目前国内价约 12.6 万、国际价约 88.2 万元）。另外，农村光储直柔系统的实施还减少了农村电网升级改造投资以及“煤改电”、“煤改气”等取暖工程的投资支出。

庄上村投建的“户-村”光储直柔示范项目具备明显的经济效益和社会效益，其探索出的商业模式可在芮城县乃至全国各村推广，进而形成“乡镇-县-地市-省”推广模式，打造农村供给城镇的能源生产消费新模式。

课题 11：浙江电网湖州鲁能公馆示范项目

课题 11 是浙江省电力局与鲁能集团联合建设的鲁能公馆新建商业综合体。光储直柔应用范围主要是 38 户单身公寓和商业配套。电网公司为了尝试光储直柔概念，投资充电桩、储能和直流配电，鲁能集团投资光伏和房屋本体。目前该项目正在建设中，预计在今年年内土建完工，明年上半年开始安装和调试。

区域	直流范围	直流负荷（系统配置）
17#单身出租公寓	楼宇全直流(38 户)	235kW
8#16#沿街独立商铺	直流照明、空调	340kW
小区及沿街公共区域	直流照明	25 kW
小区景观池	直流照明、供电	8kW
屋顶	屋顶光伏	180kW
社区内	充电桩	28 台 15 kW 直流慢充电动汽车充电桩 20 台 0.2kW 电动自行车充电桩
	储能系统	2×300kWh

项目“光储直柔”系统具体配置与选用情况介绍如下：

1）配电系统的容量：本项目按照常规设计方法总入口功率约 1032kW，通过与设计院的沟通，减去了充电桩的容量（充电桩应该在用电低谷和光伏富裕时进行有序充电），现在采用了 800kW（2*400 kW）入口的配电容量。而按照光储直柔系统的思路，若能实现充电桩智慧有序充放电、储能削峰功能及光伏的充分利用，入口功率取 200 kW 即可满足建筑使用需求。但在与多方参与单位讨论后，考虑多重安全因素，项目仍采用了 800kW 入口的配电容量，这就不仅造成投资居高不下，而且变压器和接入口的 AC/DC 长时间在 20%以下的低负载工况下运行，效率低，待机电耗高。目前正在与设计院进行沟通协调，拟根据本报告的容量优化模拟分析结果，定量确定该项目中充电桩、储能、光伏对于降低配电容量的作用和价值，进一步降低该系统的配电容量。

2）“低压直流供电”：在电压等级上，本项目选择 DC400V 与 DC48V 两级电压进行供电，DC400V 作为主干电压，供应储能、光伏、充电桩以及商铺空调用电，DC48V 作为单身公寓的输入电压，供应公寓内家用电器用电。在接线方式上选择单级电压母线结构，在接地方式上，采用 IT 接地方式与 TN 接地方式的优化组合，正

常状态下为 IT 接地方式，单点故障时切换至 TN 接地方式，利用漏电流进行保护，充分保证系统的安全稳定性。

3）充分利用好充电桩资源：根据本报告模拟计算结果可以看出，如何充分用好充电桩，是实现光储直柔目标的关键。要充分开发利用车载电池资源，就要采用双向充/放电方式，使车载电池成为光储直柔主要的储能容量，同时充电桩应该对公众开放使用，充分提高充电桩柔性用电的实际应用效果和价值，否则需要设计储能设施来代替充电桩的双向充放电功能，则会降低其经济效益。

4）“柔性调节”：对内，整个系统由两个直流微网形成，实现系统内平衡与互补。对外以整体形式与大电网之间进行电力电量交易，根据分时电价政策、大电网负荷特性、峰谷差和微电网内负荷特性等因素，可实现恒功率取电模式（通过对光伏发电和储能系统协调控制，实现对电网的“恒功率取电”。）、需求侧响应模式（根据电网的调度需求实时调整从外网的取电量）以及分时段电价经济运行模式（按照分时电价调整用电功率，进行一天内用电模式优化，使得在满足用电需求的前提下需要支付的电费最低）。

内容	单位	场景 1： 外网恒定输入功率	场景 2： 现状峰谷电价政策	场景 3： 未来电网波动
直流配电容量	kW	160	500	300
充电桩充放电能力	kWh	800		
系统增量成本	万元	232	452	352
年节省费用	万元	16.6	38.7	28.5
投资回收期	年	14.0	11.7	12.3

注：（光伏 4.5 元/W 降低到 3 元/W，储电 3.5 元/Wh 降低到 2.5 元/Wh，充电桩 3 万/个降低到 1.5 万/个）。

本项目总投资金额为 1189 万元，与常规交流建筑（无光伏、储能）相比，本项目增量成本约 676.8 万元，由于设备单价高，配电容量大，存在投资成本过高回收期过长的问题。若能进一步下调光伏、储能和充电桩设备单价，降低系统配电容量后（这条尤为重要），充分考虑并利用充电桩双向充放电能力的工况下，其投资回收期可缩短至 10~15 年。

课题在研究过程主要通过会议讨论、专家研讨等方式方法去解决项目中的重点、难点。在对光储直柔系统设计的过程中，应通过合理确定直流负载、光伏发电量、充电桩充放电能力等条件，并根据不同场景的优化目标确定调控策略，进而精细化

设计系统及各类设备容量，从而保证系统在对应情景下的经济性达到最优，切忌仅进行简单的光伏、储能、直流等元素的罗列和叠加。

此外项目面对的实际困难还有：缺少适宜的低压直流配电产品和建筑直流电器产品，专门定制的产品不符合采购招标规程，产品也没有官方的质量认证。因此加强直流相关产品的开发和标准化，是光储直柔必须尽快解决的问题之一。同时光储直柔体系缺少相关标准、储能系统安全问题等也是光储直柔系统未来推广过程中急需解决的问题与障碍。

课题 12：青岛奥帆中心建筑光储直柔改造示范研究

青岛奥帆中心既有公共建筑的光储直柔更新研究，目的是针对量大面广的 140 亿平方米既有公共建筑运行能耗高、直接碳排放和间接碳排放高的问题，研究在进一步节能、提升能效的基础上，能否通过光储直柔技术应用，大幅度降低运行过程能源消耗导致的碳排放，为 2060 年前最终实现全社会碳中和这一目标，摸索出自下而上、并与自上而下的新型电力系统协同的自主减碳路径。

研究选取奥帆中心内的奥帆博物馆作为对象，首先通过运行电耗数据分析筛选出适合进行配电系统光储直柔更新的主要负载，包括海水源热泵机组、变频水泵、空调箱变频风机等可实现大范围功率调节的设备，以及 LED 大屏、LED 照明等适合直流低压直供的负载。在确定光储直柔系统架构和主要电力电子设备容量等参数时，意识到公共建筑实施光储直柔更新应当做到“节能优先”，即通过节能改造更换为更节能高效的变频热泵机组和选型合理的变频水泵，这样不仅使得系统更新能有直接的节能收益，而且降低了对光伏板安装面积的需求、降低了对电力电子设备容量和投资的需求等，大幅度提升光储直柔更新的经济性。

此外，随着研究的深入特别是工程推进过程中与业主反复交流，认识到既有公共建筑进行光储直柔更新时，还应关注以下几点。一是用电安全的问题，哪些墙内暗装线管中的电缆可以继续利用，需要确定利旧的墙内电缆适用的直流电压等级、电流上限、绝缘实际性能等具体参数，如果需要将所有的墙内电缆也全部更新，则这部分成本巨大。幸运的是，通常配电系统设计都有较大的冗余，电缆截面尺寸较大，基本不需要更新楼内主要配电线缆，只有一些局部线缆需要重新穿管敷设；但隐患是线缆的绝缘情况，只能根据配电室合集图纸进行评估。二是既有建筑在建筑外表皮上增加光伏安装比较受限，社区园区中的车棚、草坪、水面上有安装光伏板的条件且成本较低，但需要与景观协调，征得业主的同意。目前建议在既有公共建筑水平屋顶上尽量安装光复盘，做到 BUPV；有更换围护结构外表面的可能时，利用 BIPV 实现建筑表面光伏“应装尽装”。三是如何计算既有公共建筑光储直柔更新的经济账、减碳账、和用能安全账。其中光储直柔更新方案中电力电子设备、线缆、安全保障措施、直流用电设备、光伏发电系统等都成本不低，目前说服业主接受光储直柔更新难度不小。

对于既有公共建筑光储直柔的经济账是绕不开的话题，也是推进光储直柔、低碳更新必须明确的问题。本研究尝试通过如下的途径说服业主：安装光伏发电的投资可单独计算、或申请补贴，建筑内“储直柔”更新工程与节能改造或能效提升工

程“合二为一”，其收益与光储直柔系统的运行方式和电力系统来源构成的发展变化有关。在当前燃煤火电占比仍然较大、白天电价高、夜晚电价低的情况下，本研究认为既有建筑光储直柔更新的经济效益，首先是通过“节能优先”减少运行过程中的总累积耗电量等带来的节能收益，其次是来自白天峰值电价时段，通过吸纳本场光伏发电量、水蓄冷蓄热体释放冷热量等措施大幅度减少从电网的购电量，夜间依靠电网保障供电、并利用谷电价时段蓄存冷热量等带来的收益，以及潜在减少购买碳指标支出的收益等。这一运行调节方案预计在 2030 年前可使得既有建筑运行电费最低，并且由于节能和光伏发电抵消从电网购电从而减少间接碳排放。但在 2030 年后，随着电网中光伏发电量等可再生电力比例越来越高、因此光储直柔的系统运行调节方式很可能发生巨大变化。主要原因是未来电网中白天光伏发电量比例越来越高，特别是春夏秋季节白天光伏发电量大，很可能白天时段电网发电成本低、电量碳排放因子也低；而夜间和冬季等光伏发电量小的时段，需要依靠已运行多年的燃煤或燃气火电机组保障供电，那时化石燃料、例如燃煤和燃气很可能像 2021 年冬季以来的情况价格飞涨，“低谷电价”从夜间变成白天、“需求侧响应”从夏季电力需求高峰变为冬季或夜间发电成本最高时段，现在更新的建筑光储直柔系统到时候还能节省运行费用么？因此，现阶段光储直柔系统运行调节策略也需要未雨绸缪、能随机应变，避免重复建设。

简而言之，既有建筑作为传统电力系统中的“用户”、“终端负载”，如能回答业主当前和未来两个不同时段下光储直柔更新“如何保障用电安全”、“是否采用成熟可靠技术”、“能否给出收益与投资的细账、当前账和未来账”等基本问题，再通过光储直柔更新、“自力更生”地增强用电系统的柔性和韧性，运行过程减碳、降费、提升用能安全可靠性、提升与电网博弈能力，才能真正推动既有建筑光储直柔更新健康发展。

课题 13：深圳未来大厦“光储直柔”工程实践与示范研究

一、项目基本情况

未来大厦项目位于深圳市龙岗区的深圳国际低碳城核心启动区内。项目由深圳建科院投资建设，总投资约 7 亿元，总建筑面积 6.29 万平方米，整体采用钢结构模块化的建造方式，包括了办公、会展会议、实验室、专家公寓等多种业态。项目整体定位于绿色三星级建筑和夏热冬暖地区净零能耗建筑（Net Zero Energy Building）。通过采用“强调自然光、自然通风与遮阳、高效能源设备及可再生能源与蓄能技术集成的“光储直柔”的技术路线，探索建筑领域碳达峰路径。

本示范项目于 2016 年备案立项，2017 年完成施工图设计和审查，于 2018 年启动工程建设，目前项目整体已经结构封顶，正在进行相关机电设备安装工程，计划 2021 年底全部竣工。其中未来大厦 R3 零碳模块（建筑面积 6259 平方米）已于 2019 年底完工并投入科研使用。R3 零碳模块是首个走出实验室规模化应用的全直流建筑，于 2019 年底通过了科技部净零能耗综合示范项目验收，并先后入选中美建交四十周年 40 项科技合作成果和联合国开发计划署（UNDP）中国建筑能效提升示范项目。

图 1 未来大厦位置示意图/工程效果图

二、项目技术示范特点

2.1 “光储直柔”低压直流配电技术示范

低压直流配电与传统的交流供电架构相比，具有转换效率高、电能损耗小、可控性强等优势，特别适合负荷需求多样化、分布式新能源接入规模化的发展要求。本示范项目构建了包括直流配电设备、分布式电源、直流用电电器、直流用电保护以及智能微网控制在内的低压直流配电工程。系统整体架构设计遵循简单、灵活的原则，力求通过最简洁的架构达到分布式能源灵活接入、灵活调度和安全供电的目的。本示范项目中采用了多种建筑分布式储能系统，并且采用基于直流母线电压的自适应控制技术，解决了传统交流并网光伏系统出力随机，储调和光伏耦合控制稳

定性差的问题。系统整体架构参见图 2。

图 2 未来大厦直流配电系统方案示意图

项目组从系统功能验证、电能质量、安全保护和系统能量损耗四个方面开展了测试和实验，以验证项目直流配电系统在实际运行中功能和性能，并通过实际测量尽可能找出实际运行存在的问题，通过分析找到解决方案，为系统调适与直流建筑项目建设方法改进提供建议和经验。整体来看，系统运行稳定、调控灵活，终端用电方便智能，基本实现了预期的设计目标，验证了低压直流配电在民用建筑中应用的可行性和优势，期间也发现了系统可以继续完善和改进的方面，例如：支路短路故障情况下短路电流有可能达到上千安水平，导则两级断路器同时脱扣，扩大了短路故障的影响范围，末端电器出现了低电压保护情况，因此支路和楼层断路器配合、末端换流器暂态电压波动耐受能力，以及系统中电容电感对短路电流的影响需要进一步深入研究；电力电子变换器、监测通信系统的固定待机能耗和储能电池降温散热的辅助用能是影响系统能效的主要因素之一，因此在变换器设计中可采用模块化设计和智能休眠的控制方式，提升系统在低负荷率下能效。

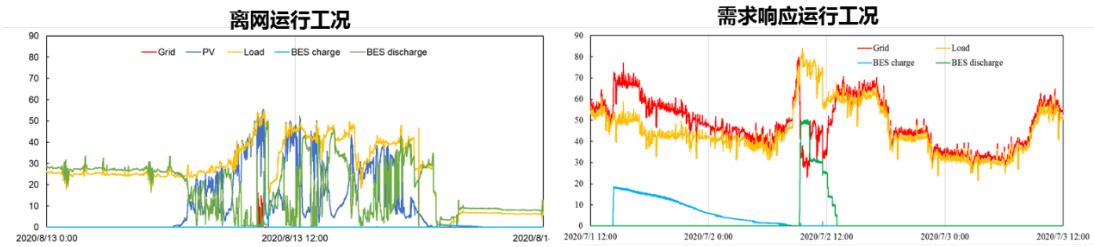


图 3 未来大厦实测用电负荷功率曲线

2.2 与电网互动的需求侧响应机制示范

需求侧响应机制是使建筑用电负荷具备灵活调整能力，能够优化用电负荷曲线，与电网友好互动，实现城市供能可靠性、用能经济性和环境友好性三者综合最优的

市场化机制。在通过直流配电技术实现柔性负荷调节的基础上，本示范项目与南方电网科研院合作打通负荷侧资源进入电网调度业务链条，具备电网直接调控的技术条件，并在楼宇管理系统的基础上，开发了建筑虚拟电厂子平台，实现建筑需求响应运行，且具备接入多栋建筑进行负荷聚集的条件和日前及紧急调度的技术条件。

图 4　未来大厦“虚拟电厂”平台界面

目前未来大厦已经实现的柔性用电调节的负载包括集中式储能、多联机空调和双向充电桩。分布式储能属于电力电子类柔性可调资源， 其控制和调度相对直接。在与电网联合测试的过程中， 虚拟电厂平台在接收到电网响应功率指令后，由 AC/DC 主动调节直流母线电压，控制储能电池放电功率， 在半个小时的响应时间内将平均 60kW 左右的用电负荷降到了 28.9kW，响应削峰比例达到了 51.6%。空调系统也是建筑负荷中另一个可调节的柔性用电负荷。项目组在空调响应特性测试的基础上，建立了空调运行功率和空调设定温度之间的动态关联关系，并对空调参与需求侧响应的过程进行了测试。在响应时段内，空调负荷从平均 40kW 降低到 20kW，削峰比例达到 50% 左右。

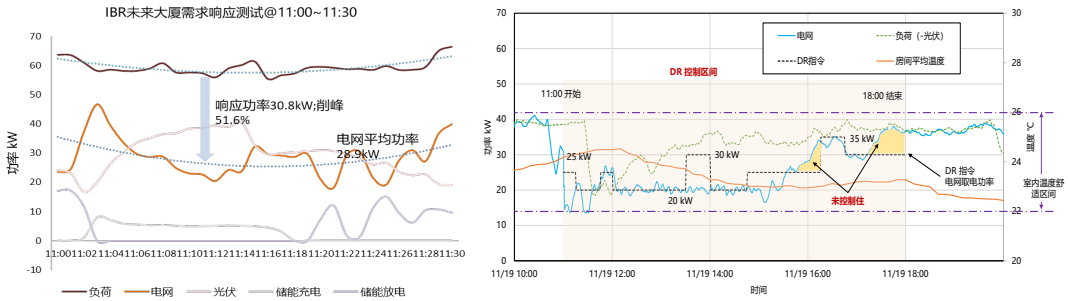


图 5　未来大厦需求响应测试

三、项目示范效益与推广前景

“光储直柔”技术不仅可以利用光伏发电和储能将多余的光伏发电储能并在需要时放电产生直接节能减排效益。深圳建科院未来大厦 R3 建筑于 2020 年 5 月投入

试运行，并用于办公、实验、测试与展示等活动。根据 2020 年 10 月 1 日~2021 年 9 月 30 日完整一年的数据分析，未来大厦单位建筑面积电耗指标下降至 48.27 kWh/（m^2.a），全年用电量的 28.03%来自可再生能源利用，与 2019 年度《深圳市大型公共建筑能耗监测报告》中的商业办公建筑能耗平均值相比，本项目的单位面积年碳排放减少 29.50 kg，总碳排放减少 1854.26 吨碳排放，减碳效果明显。

3.1 提高可再生能源消纳能力，助力碳中和

分布式光伏是建筑可再生能源利用的成熟技术，但可再生能源消纳难的问题是制约可再生能源规模化应用的瓶颈问题。以深圳市为例，如深圳市 7 亿平方米建筑能够安装 1 亿平方米光伏系统，产生 1000 万 kWp 的供电能力,相当于深圳市 40%的电源容量。但由于光伏发电本身的波动规律同建筑用能时间的差异，导致光伏发电量难以消纳，而并网向电网送电又会造成对电网稳定性和电能质量的损害。因此，在建筑中采用“光储直柔”分布式光伏和蓄电相结合的形式，能够有效的消纳光伏发电量，助力建筑领域碳中和实现。

3.2 提高建筑负荷调节能力，参与电力市场交易

深圳市是典型的能源输入型城市，用电峰值增长快、负荷波动大，本地调峰电源有限。以建筑为载体的第三产业及生活用能是造成峰谷差增大的主要原因，预计“十四五”期末年深圳市全社会用电峰值负荷将达到 2500 万千瓦，对应电网基础设施投资将达到 239~290 亿元。调峰能力的欠缺不仅会影响电网的稳定运行，同时也将影响深圳市进一步优化能源结构和消纳可再生能源发电。因此，亟待转变电网与建筑之间的单向关系，建立建筑自身的负荷调节能力；并通过电力现货交易、需求侧相应等市场化机制激发建筑用户的负荷调节潜力，提高城市能源系统的整体效率和效益。

四、存在问题与建议

4.1 成熟度和标准化需进一步提升，降低工程造价

直流配电技术、产品成熟度和标准化需进一步提升，降低工程造价。直流配电技术还没有形成一套统一的标准，在特定应用场景下的直流配电示范工程形成研究成果有一定的工程局限性，定制化程度高，工程造价难以大幅下降，不适合普遍推广。光储直柔概念的提出赋予了建筑“柔性”的特点，为适应不同的应用场景提供了可能性，因此亟需构建适应不同应用场景的建筑光储直柔理论体系，并形成统一的工程、技术和产品规范和标准，提高产品的通用性，降低工程建设的门槛，促进未来规模化发展。

4.2 市场化机制需进一步细化，明确用户收益

与电网友好互动的市场化机制需进一步细化，明确用户收益。目前我国电力市场化改革进展迅速，中央和各省市先后出台了一些需求响应电价政策和激励政策，建筑用户可以通过柔性用能减少电费支出，同时还可以获得电网公司给予的经济补偿，降低度电电费。但目前针对电网辅助服务的市场机制和实施细则尚处于研究和试点阶段，对应建筑柔性负荷的定量评价指标和与电网的友好互动模式的研究仍处于初期阶段。用户参与电网友好互动的收益也难以测算，因此亟需解决柔性负荷的测试方法和评价指标以及制定合适的激励机制使用户与电网实现友好互动等问题。