

绿色低碳建筑电气设计的几大环节及“光储直柔”系统的应用研究

况 东

(中国建筑上海设计研究院有限公司, 上海 200062)

摘要: 结合设计经验与目前在绿色低碳建筑研究方面的几个案例, 阐述了绿色低碳建筑实现的几大要素、绿色低碳建筑电气设计的主要环节、设计“光储直柔”系统的意义、“光储直柔”建筑的发展现状和亮点及全面推广的难点等, 完善了传统的电气节能设计及绿色设计的内容, 有助于“碳达峰、碳中和”战略目标的实现。旨在通过绿色低碳建筑电气设计的全面归纳总结, 给行业的绿色低碳设计提供一点借鉴与参考。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 绿色建筑; 低碳建筑; 光储直柔

Study on several links of electrical design for green low-carbon buildings and application of “photovoltaic, energy storage, direct current, flexibility” system

KUANG Dong

(China Shanghai Architectural Design & Research Institute Co.,Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: Design experience and several cases of green low-carbon buildings is combined, expounds the major elements of realizing green low-carbon buildings, the main links of electrical design of low-carbon buildings, the significance of designing the “Photovoltaic, Energy storage, Direct current, Flexibility” system, the development status quo, highlights and difficulties of comprehensive promotion of “Photovoltaic, Energy storage, Direct current, Flexibility” buildings, and improves the content of traditional electrical energy-saving design and green design, It is helpful to achieve the strategic goal of “carbon peaking and carbon neutrality”. A reference for design for the green low-carbon of the industry through the comprehensive summary of electrical design for the green low-carbon buildings is provided.

Key words: carbon peaking; carbon neutrality; green buildings; low-carbon buildings; photovoltaic, energy storage, direct current, flexibility

0 引言

为推进“双碳”战略(中国力争在2030年前实现“碳达峰”, 2060年前实现“碳中和”), 实现我国经济社会的全面转型, 国务院此前已经发布《2030年前碳达峰行动方案》, 2022年3月住建部发布了《关于印发“十四五”建筑节能与

绿色建筑发展规划的通知》和《“十四五”住房和城乡建设科技发展规划》。目前能源结构、工业交通、生态建设和建筑房地产等各个领域都迫切需要发挥科技创新在各自领域的引领及支撑作用。本文主要就实现“双碳”战略的目标对绿色低碳建筑的电气设计进行分析总结。

1 绿色低碳建筑实现的几大要素

绿色低碳建筑，国际上一般叫作净零碳建筑。目前的研究，实现目标主要采用三大类措施：降低建筑能耗；采用可再生能源；跨时间储能。

这需要设计院各专业从整体来考虑绿色低碳建筑设计，包括建筑专业的节能设计措施：

①如何最大限度地利用自然光；②安装电动遮阳窗帘，夏天减少太阳的辐射传热而冬天利用太阳能；③利用外保温、中空玻璃和隔热断桥门窗减小建筑的热桥影响；④设计绿色屋顶花园。

绿色建筑材料的应用包括：①利用科技继续升级现有的气密外围护结构；②利用新材料增强建筑物墙壁、地板及屋顶的隔热性能。

空调系统设计：①建筑物内安装机械通风热回收（MVHR）系统，以减少热量损失；②通风系统设计尽量利用自然风；③尽量不使用燃气锅炉，而使用空气源热泵或地源热泵供能来代替。

水系统设计：①中水回收技术的有效实施，如安装并利用雨水收集；②利用现有的管网资源优化供水方式；③改变频率以调控水源的供给；④使用太阳能热能供热水。

电气系统的设计：①尽量所有照明都由LED替代；②所有的灯都尽量由被动式红外传感器控制；③对所有电气设备采用建筑自动化控制系统（BA）；④使用光伏发电；⑤设计可视化能耗监测管理系统对建筑的能耗进行监测分析管理；⑤安装收集动能的智慧型健身设备，可利用它为建筑提供能源。

要建造出一幢绿色低碳建筑甚至零碳建筑，设计师要研究的就是如何把各个专业的新措施、新技术完美地集成在一起综合考虑，目标是减少50%~75%乃至更多的能源使用。

2 低碳绿色建筑电气设计的主要环节

2.1 变电站或配电间应尽量靠近负荷中心

这样设计主要是为了减少供电半径，减小一次配电电缆的成本，缩短配电半径有利于减少线路损耗。这里以笔者设计中国双汇总部的变电所

设计为例。双汇总部开闭所（兼变电所）业主报规划局批的最初方案设一个集中变电所，位于一层西面，不在负荷中心，配电方案不太合理；到塔楼的电缆、到东面车库与东辅楼的电缆过长。经过概预算，此供电方案会比变电所移到裙房西北角或北面中间展厅下方电缆多投资161万元，而且后期每年还有几十万元的多余380 V线路损耗费用。通过经济方案比较更改了业主最初报规划局的供电方案设计。

2.2 合理选择供配电方案

供配电系统对于学校校区和工业园区至关重要。考虑到宿舍区基本集中在晚上用电，而教学楼或厂房是白天用电，二者用电明显不同时段，所以设计供配电系统时不可以简单地把所有用电负荷直接相加。可以选择白天或晚上的负荷取最大值，且宜设计有联络母线的成组SCB14干式变压器，以达到变压器的实际使用台数可以随负荷变化灵活减少一半的目的，可显著地减少由于变压器轻载而引起的耗能。笔者以前曾设计的乐山师范学院新校区、北京信息学院校区等，尽管用两台变压器比一台变压器一次投资多一些，但是校区寒暑假放假时3个月的用电负荷与平时相比少70%，因此寒暑假投切一台变压器运行即可，如此设计更加低碳节能。

2.3 低压侧的无功补偿及谐波治理

众所周知，配电系统的功率因数应达到0.9，甚至有的地区要求达到0.95以上，所以在设计供配电系统时应采用并联电力电容器在低压侧进行集中补偿。但随着民用建筑配电系统中不间断应急电源、LED照明、宴会厅及多功能厅的调光设备、大型LED广告屏和变频控制器等各类非线性负荷在大型公共建筑的大面积使用，不仅发生三相不平衡、零线电流过大等故障，甚至出现线路过负荷发热的现象，非常不利于绿色节能。笔者曾为此写过相关研究论文，可以采用动态无功补偿装置（SVG）、电力有源滤波器（APF）和终端电气综合治理保护系统（NTPS）等设备有效解决。

2.4 尽量全面使用LED光源及合适的节能控制方式

经过20年的发展，目前LED照明的成本已经非常低，照明设计符合GB 50034—2013《建筑照明设计标准》和GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中规定的照度标准、照明功率密度（LPD）、统一眩光值（UGR）、照明均匀度、显色指数、色温和能效指标等相关要求。主要区域的照度标准、LPD、UGR、 U_0 和 R_a 等参数满足规范“主要房间或场所照度和LPD值表”。控制方式可以选择：①房间或场所设有两列或多列灯具时，设计所控灯列与侧窗平行，每个房间灯的开关数不少于两个（只设置一只光源的除外），每个照明开关所控光源数尽可能少；②门厅、公共走道、地下车库和商业公共区域采用楼宇自动化（BA）控制系统，分回路、分时间和分区域控制；③电梯间采用移动感应控制，设备机房采用就地控制。

2.5 采用节能型产品

电力变压器、电动机、交流接触器和照明产品的能效水平应高于能效限定值或能效等级三级的要求，这是2022年4月1日实施的强制性国家标准GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》的要求。比如变压器选用节能环保型、低损耗和低噪声，接线组别为Dyn11的干式变压器，变压器自带温控器和强迫通风装置。其能效应达到现行国家标准GB 20052—2006《三相配电变压器能效限定值及节能评价》中规定的目标能效限定值（二级能效）及节能评价的要求，设计项目应全部选择SCB14型干式变压器。

2.6 设置能耗监测系统

建筑能耗监测系统应采集水、电、燃气、燃油、外供热源、外供冷源和可再生能源共七类能耗数据，实现对建筑能耗的监测、数据分析和管
理，且能向上级平台发送建筑能耗数据。计量器具应满足现行国家标准GB 17167—2006《用能单位能源计量器具配备和管理通则》中的要求。
系统要求：保存36个月的数据；能够远程访问数

据；仪表能够每小时、每天和每月进行报告。编制《计量和验证计划》，符合《国际能效策略和验证规程》（IPMVP）方法D，便于测量结果与基准模型比较，优化建筑能源利用。

2.7 设置建筑设备监控管理系统

设置建筑设备监控管理系统目的是监控供暖系统、通风系统、空调系统、照明系统、动力系统、给排水系统和电梯等建筑设备。所有非设备自带的控制箱、电源箱均预留控制模块电源，用于节能的楼宇自控系统使用。大型会议室、宴会厅和大型多功能厅设置CO₂监控与排风系统联动措施，地下车库采用CO监控与排风系统联动措施。

目前建筑行业尽管经过研究及总结，有以上各种绿色节能设计的措施及方法，但随着“双碳”战略的稳步推进，传统的绿色节能措施在“碳达峰、碳中和”的目标前确实遇到了发展瓶颈，离“双碳”战略目标存在一定的距离，于是有学者研究并提出了“光储直柔”的新概念。

3 设计“光储直柔”系统的意义

“光储直柔”指的就是应用太阳能光伏、储能、直流配电和柔性交互四项技术的简称，是指通过光伏、储能、直流配电和柔性用能来构建适应“碳中和”目标的新型建筑配电系统（或称建筑能源系统），如下图所示。

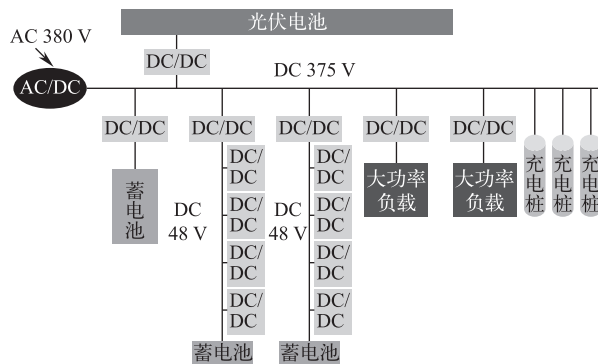


图 “光储直柔”系统

Fig. 1 “Photovoltaic, energy storage, direct current, flexibility” system

“光储直柔”概念最初是由清华大学江亿院士团队首先提出，其团队还指出未来电力系统是

建立以风电、光电为主要电源的零碳电力系统，但需要解决风光电力波动性难题，需要配置大量调蓄和储能资源，电池约1元/(W·h)，目前成本很高，但光伏成本只要约2元/W，综合建设后的成本也通常不超过5元/W。因此认为“光储直柔”系统更经济，可有效解决可再生电力的消纳问题。刘晓华、范丽佳等学者通过对当前及未来中国建筑碳排放进行分析，提出“光储直柔”系统是建筑领域实现碳中和目标的一个重要路径。

2021年10月24日，《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》明确提出：“提高建筑终端电气化水平，建设集光伏发电、储能、直流配电和柔性用电于一体的“光储直柔”建筑。有学者指出“光储直柔”配电系统将成为建筑及相关部门实现“双碳”目标的重要支撑。

国家全文强制性规范GB 55051—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》从2022年4月1日开始强制执行，其中5.2.1条明确规定“新建建筑应安装太阳能系统”。光伏发电2022年开始正式在全国的新建建筑中强制性全面推广。

2022年1月4日，工信部、住房和城乡建设部等联合发布的《智能光伏产业创新发展行动计划（2021—2025年）》也提出“提高建筑智能光伏应用水平，积极开展光伏发电、储能、直流配电和柔性用电于一体的‘光储直柔’建筑建设示范”。

目前各地一般都是分时电价，“光储直柔”系统确实能起到“削峰填谷”的作用，通过“柔”优化电力需求曲线，从而节约电费。而“光储直柔”系统的大面积使用，各个“光储直柔”的大用户也可作为虚拟电厂的重要组成部分，根据当地的电力调度系统发送的指令来实现实时控制，既可以促进需求侧资源参与电网运行，也可以促进节能减排及清洁能源消纳。因此，设计“光储直柔”系统具有重要意义。

4 “光储直柔”建筑的发展现状及亮点

目前，国内已经建成或者在建的与“光储直

柔”有关的项目案例有近60项，涵盖商业建筑、办公建筑和科教建筑等。比如深圳建科院未来大厦的“双碳”实践项目就“光储直柔”低压直流配电技术，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电网控制在内的综合型低压直流配电工程，通过采用自然光、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”系统等多种措施，探索建筑领域“碳达峰”的路径。目前，未来大厦R3零碳模块建筑面积为6 259 m²。该建筑在2020年8月~2021年8月实测得到的单位面积能耗为51.1 kW·h/m²，比2019年深圳市同类办公建筑统计的平均全年能耗水平91.8 kW·h/m²低44.3%，年度CO₂减排量达1 592 t，建筑能耗较国家标准降低50%以上，对市政电源的接口容量需求降低了60%，电力负荷峰值可以实现100%削减。

另一个代表性的项目中建绿色产业园办公楼也是一座“光储直柔”建筑，屋顶铺设了400 m²的太阳能光伏发电装置，其生产的能源存储在锂电池储能设备中，通过柔性用电管理系统向大楼8个办公区、2 500 m²建筑面积内的空调系统、照明系统、汽车充电桩和直流电器供电。建筑内经过改造的直流电热水器、冰箱、咖啡机和手机充电器一应俱全，与普通设备相比耗电量更低。因采用48 V以下电压，建筑每年节约用电超过10万 kW·h，相当于节约标准煤约33 t，每年减少碳排放超47%。

2022年中国建筑集团首个BIPV光伏餐厅进入运营阶段，餐厅表面由顶部的192块、立面32块碲化镉薄膜太阳能电池组成，光伏系统装机容量约为36 kW，日均发电量为80~110 kW·h，每年可生产绿电约3.9万 kW·h，可满足餐厅的照明系统及空调系统用电需求。

从上面三个案例可以发现“光储直柔”建筑的亮点就是：“光储直柔”建筑不仅是一座“绿色发电站”，同时也进行智能配输电，有效弥补了太阳能等绿能相对不稳定的短板，为缓解电力的供需矛盾提供了一种新的有效的解决途径。

5 “光储直柔”系统全面推广的难点

虽然“光储直柔”系统具有大量的优点，但是目前在建筑领域进行集成应用仍然处于探索研究阶段，要实现全国的全面大规模推广应用，还面临着很大的困难和挑战。经笔者调查与分析，“光储直柔”系统全国全面推广的难点总结如下。

(1) “光储直柔”产业聚集度不高

尽管2022年GB 55051—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》开始正式实施，但基于目前全国的配电系统及末端用电负荷基本还是380 V的交流设备，加上“光储直柔”系统的社会认知度、市场关注度仍然还比较低。目前从已经建成的“光储直柔”建筑分析，“柔”的价值未能充分体现，市场推动力不足，尽管“光储直柔”相关产业有所发展，但总体上还处于规模小、分布散的状态，能源领域大型企业参与投入少，产业聚集度不高，房建领域终端技术集成应用还没有形成对“光储直柔”产业链的拉动作用。

(2) “光储直柔”建成的案例数量少且规模小

尽管各地已有一些“光储直柔”案例，但数量少且规模小，示范效应弱。已经建成的项目类型多是城市办公建筑、科教建筑或少数商业建筑，居住建筑基本未见，农村项目数量更没听过，而且一些示范性的案例项目在东部沿海地区多，中西部地区很少，不能适应不同地区的不同情况，缺少可复制的标准化案例。尽管2022年“光储直柔”的案例有所增加，但目前基本处于建设阶段或运行初期，实际运行节能效果尚缺少长时间的有利数据资料支撑，全部是自下而上基于科研而搞的研究型案例，示范效应弱。

(3) “光储直柔”的相关配套技术存在明显短板

“光储直柔”涉及智慧能源管控、柔性调节和实时响应等方面软硬件系统的持续迭代升级，

其配套的技术存在短板，相关产品也尚不健全，不但民用建筑的直流配电规范，相关设备如直流-直流(DC/DC)变换器也没有量产，分布式储能电池的存储效率和消防安全水平存在不足，家用设备、空调系统等直流终端设备市场上明显缺乏。“柔”的实现不仅需要蓄电池，也需要能够给汽车充电的双向充电桩，但可惜的是，双向充电桩目前市面上还无此成熟技术及产品。

(4) 缺乏配套激励措施及成功的商业模式

虽然从理论上分析“光储直柔”技术能以较低的成本推动能源系统转型，但现阶段政府还缺乏补贴、价格和认证等有效激励机制，柔性调节的经济价值尚未得到体现。要使“光储直柔”建筑有效运行且发挥经济价值，还涉及电力负荷聚集商、“虚拟电厂”和能源服务商等，探索形成可持续发展的商业模式是一个新的课题。

(5) 有关的标准体系不够健全

“光储直柔”课题从无到有时间较短，如果全面应用“光储直柔”系统的建筑要进一步发展和推广，还需要相关国家规范及标准的支撑。日前除了T/CABEE 030—2022《民用建筑直流配电设计标准》已颁布实施，在编的《建筑“光储直柔”评价标准》《建筑“光储直柔”系统变换器通用技术要求》等还没有确切的消息。因此“光储直柔”建筑的推广还缺乏完善的标准体系，比如相关的直流产品和技术及国家或行业标准、规范和指南等。

6 结束语

综上所述，虽然“光储直柔”配电系统具有能源低碳化、配电高效化、用电柔性化和运维智能化等显著的优点，目前看是推动实现“碳达峰、碳中和”战略目标的技术路径之一，但是，经过上述综合分析，“光储直柔”作为推进“双碳”战略的新课题，仍然需要各行业对光伏一体化、分布式蓄电、直流配电和双向充电等一些关键技术继续攻关，需要推动各类直流电气设备、柔性配电设备、电网供给端及时响应技术设备和智能管理设备等的技术创新与大范围的成功应

用,更需要建筑行业推进国家有关标准规范的建设,如对“光储直柔”系统的价值如何评价,对分布式蓄能的效益如何量化,对建筑低压直流配电技术标准如何确定,对双向充电系统如何安全设计,制定出“光储直柔”建筑是作为生产者还是自我消纳者的定位标准以及“光储直柔”设计的行业标准等,笔者觉得目前仍还有一段路需要继续探索,不排除未来有更加适合全面推广的新的供配电方案取而代之。

参考文献

[1] 刘晓华,张涛,刘效辰,等.“光储直柔”建筑

新型能源系统发展现状与研究展望[J].暖通空调,2022(8):1-9,82.

[2] 况东,刘小芳.浅析民用建筑电气设计节能的几大环节[J].智能建筑电气技术,2007(3):46-48.

作者简介

况东(1980—),男,高级工程师,研究方向为建筑电气及智能化。

(收稿日期:2022-10-21)