

面向零碳园区的绿电直连与源网荷储协同技术研究

李建林, 曾璐, 石泽林, 陶晓波, 刘云

(北方工业大学国家能源用户侧储能创新研发中心, 北京 100144)

摘要: 在“双碳”目标下,零碳园区通过节能提效、能源替代、系统协同以及碳管理等多种手段旨在实现园区的能源结构优化升级和净零排放的目标,已经成为推动园区高质量发展的重要方向。同时,随着新能源装机规模扩大以及人们对绿色用能的不断增多,绿电直连作为一种可以实现绿色电力物理可溯源的新型模式,在现在发挥着不可替代的价值。该文首先聚焦零碳园区,先后梳理了概念内涵、核算边界、实现路径以及评价指标;其次总结了园区中综合能源系统中多类能源协同运行的关键核心技术;进一步重点阐述了绿电直连的核心内容、与源网荷储协同优化的内在关联,以及绿电直连落地面临的瓶颈;最后提出零碳园区规划建设与绿电直连模式的发展趋势。

关键词: 零碳园区;绿电直连;综合能源系统;源网荷储;电碳协同

Research on Green Power Direct Connection and Source-grid-load-storage Coordination Technology for Zero-carbon Parks

LI Jianlin, ZENG Lu, SHI Zelin, TAO Xiaobo, LIU Yun

(National User-side Energy Storage Innovation Research and Development Center, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Under the “dual carbon” goals, zero-carbon parks aim to achieve an optimized and upgraded energy structure and net-zero emissions through various such measures as energy efficiency improvement, energy substitution, system coordination and carbon management. They have become an important direction for promoting the high-quality development of industrial parks. At the same time, as the installed capacity of new energy expands and the demand for green energy continuous to grow, green power direction connection, a new model that allows physical traceability of green electricity, plays an irreplaceable role today. This paper first focuses on zero-carbon parks, systematically sorting out their conceptual connotations, accounting boundaries, implementation pathways, and evaluation indicators. Then, the key core technologies for the coordinated operation of multiple types of energy within integrated energy systems in such parks is summarized. Furthermore, the core content of direct green power connection, its intrinsic relationship with the coordinated optimization of source, grid, load, and storage, as well as the bottlenecks faced in its practical implementation are described. Finally, the future development trends of zero-carbon park planning and construction and the direct green power connection model are proposed.

Key words: zero-carbon park; green power direct connection; integrated energy system; source-grid-load-storage; power-carbon coordination

收稿日期:2026-03-14; 修回日期:2026-05-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52277211);北京市高等教育学会课题(MS2025053)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52277211), Beijing Association of Higher Education (MS2025053).

0 引言

全球气候变化与能源转型背景下,碳中和已从理念转向实践,工业部门作为能源消费和碳排放的核心领域,其低碳转型直接关乎“双碳”目标的落地^[1]。目前中国工业园区因负荷密度高、排放强度大、能源系统耦合性强,因此成为减排工作的重点场景,而零碳园区也随之从政策倡导走向工程实践与学术研究,成为产业绿色升级与新型能源体系建设的重要抓手^[2]。

但零碳园区的建设并不是简单的对于碳排放的单方面的要求,而是在能源供应、用能结构与碳管理体系的同步调整,通过了解相关信息,发现在发展的过程中会遇到很多问题:①绿电供需匹配矛盾突出^[3]。随着绿色电力需求的提升,从聚焦于电力消费转变为电力的来源可追溯性、供应的稳定性、减排效果的可量化以及相关数据的可验证性,但现有的模式难以满足^[4]。因此需要构建适配园区场景的绿电直连供需协同调控体系。②绿电直连与源网荷储协同的耦合机制缺失。当前研究多聚焦零碳园区、绿电直连、源网荷储这3个方面的单一方向,缺乏系统性的耦合关系^[5]。因此需要解决建立网荷储全要素支撑绿电直连的模式理论框架。③模式落地的现实制约和适用条件不明^[6]。随着绿电直连与源网荷储协同进行规模化的推广,会面临例如规划投资、经济性评估、碳核算标准等现实约束。因此需要完善政策、标准与工程实践体系。

零碳园区绿电高效利用的核心受阻,在于新能源固有的波动特性与园区系统调节能力之间的失衡^[7]。风电、光伏等新能源发电受气象条件影响显著,会存在随机性、间歇性,而工业园区生产负荷多为刚性且连续,这种“源”与“荷”的动态错配,不仅会影响供电可靠性,还会增加电网调频、调压的压力。所以相较于传统能源系统,零碳园区依托的绿电直连模式缺乏灵活的调节载体,现有储能技术存在成本高、寿命短、容量匹配难度大等问题,难以实现新能源波动的精准平抑;同时,多能源转换环节的效率损耗、电网、热网等不同能源网络的协同调度滞后,进一步降低了系统对新能源波动的适应能力,成为绿电高效消纳的首要技术障碍^[8]。

绿电直连与源网荷储协同模式的推进,会涉及到新能源企业、园区运营方、电网公司、入驻企业等多个主体,因此导致协同难度显著提升^[9]。各主体的利益诉求存在差异,例如新能源企业侧重绿电的就地消纳与收益保障,园区运营方关注绿电供给的

稳定性与减排效益,电网公司聚焦系统安全与调度效率,入驻企业则更看重用能成本与供电可靠性,多主体之间就会缺乏有效的协同机制与利益分配模式。除此之外,绿电直连专用线路建设、源网荷储设施布局等还需要大量前期投资,而且投资回报周期长、收益分配不明确,也导致各主体参与积极性不足,难以形成协同推进的格局,间接地制约了模式的落地速度^[10]。

零碳园区建设的标准体系与核算方法有所欠缺,这同样成为模式规模化推广的重要制约。在绿电管理层面,目前绿电溯源、减排核算的标准不统一,不同地区、不同主体的核算方法存在差异,导致园区绿电的“减排可核”难以落地,绿电的环境价值难以得到精准量化和充分认可^[11]。在源网荷储协同层面,缺乏针对园区场景的协同调度标准、设施配置标准,不同类型园区的协同模式缺乏统一的设计规范与评估体系,导致模式适配性不足^[12]。同时,碳核算、绿电认证、政策补贴等相关体系的衔接不畅,进一步增加了园区零碳转型的管理成本与推进难度,难以形成标准化、可复制的建设路径^[13]。综上所述,当前零碳园区建设已从单一的绿电装机扩容转向多能源系统协同与高质量碳管理的新阶段^[14]。基于此,文中围绕零碳园区绿色供能体系构建主线展开综述,采用系统型耦合分析方法,将零碳园区高质量绿电需求、绿电直连供能模式、源网荷储协同支撑机制纳入同一框架,明确绿电直连解决来源可信与就地消纳、源网荷储解决波动平抑与高效利用的功能定位^[15]。为零碳园区能源系统规划与绿色供能模式优化提供参考。章节内容如下:第1节梳理零碳园区绿电需求的内在逻辑与新要求,分析绿电高质量供给的核心诉求与传统模式的适配性局限;第2节总结绿电直连的模式特征、应用价值与现实局限,剖析其在园区场景下的技术特性与落地瓶颈;第3节分析源网荷储协同对绿电直连的支撑机制及二者耦合的关键问题,归纳相关技术路径的技术、经济、制度约束;第4节展望零碳园区绿电直连与源网荷储协同的后续研究方向,对全文进行总结。

1 零碳园区

零碳园区作为重要空间载体承载着产业集聚、能源消费与碳排放治理等功能,其绿电需求并非单纯源于可再生能源替代的一般性趋势,而是由碳减排约束、产业链绿色转型和园区能源系统重构共同驱动的需求^[16]。随着零碳园区建设目标由提升绿色电力消费比例,逐步转向构建可核证、可匹配、可协

同的低碳能源体系,从而园区对绿电的需求内涵也由数量型扩张转为质量型升级^[17]。所以相应的绿电供给不再仅以电量充足为目标,而是需要同时满足绿色属性可信、时序匹配有效、供能稳定可靠、系统调节灵活和经济机制可持续等多重要求。然而,传统以年度总量平衡、单向购电交易和静态配置为主的供给模式,难以适应零碳园区高比例绿电消纳和精细化碳治理的新需求^[18]。由此,梳理零碳园区绿电需求的内在逻辑与新要求,并分析高质量供给的核心诉求及传统模式的适配性局限,成为理解后续园区绿电供给模式创新与机制优化的理论前提。

1.1 零碳园区的内涵演进与关键能源需求

目前零碳园区还没有形成统一定义,其核心是在特定核算边界和时间尺度内,通过能源结构优化、系统效率提升、低碳技术应用及碳抵消手段,实现园区净零排放,核心关键词为“核算边界”与“净零”^[19]。其概念从节能园区、循环园区、低碳园区逐步发展而来,演进过程可分为3个阶段:首先是聚焦能效提升、资源循环与污染减排,核心是降低单位产值能耗与碳排放;其次是依托新能源技术发展,转向能源供给重构与多能系统协同,重视可再生能源替代与碳管理机制建设;最后是向可核验、可追踪、可评价的方向延伸,结合绿色供应链与碳足迹约束,将绿电溯源与低碳竞争力塑造纳入建设体系^[20]。

零碳园区框架图见图1,零碳园区的“零碳”是能源、产业、系统、管理构成的复合目标,能源侧需要提高非化石能源占比,系统侧需要增强灵活性与协同性,管理侧需要建立精细化碳核算与追踪机制,最终实现“低碳、可靠、经济、可核验”并重^[21]。



图1 零碳园区框架图

Fig. 1 Zero-carbon park framework diagram

工业园区的负荷规模大、运行连续、多能并存

并且峰谷差异显著,部分负荷刚性强、部分具备调节空间,这就决定了园区绿电替代思路需贴合实际负荷特征。园区绿电三大需求类型及核心作用说明见表1,园区对绿电的需求主要体现在三方面:一是规模需求,充足的绿电供给是能源替代与零碳目标落地的基础;二是质量需求,绿电需来源清晰、供应稳定、减排效应可信,满足高端制造、出口导向型园区的ESG与碳足迹要求;三是匹配需求,绿电供给节奏需与园区用能节奏协调,避免系统运行成本与调节压力攀升。

表1 园区绿电三大需求类型及核心作用说明

Table 1 Three major demand types of green power in parks and core functions

绿电需求类型	具体需求类型	核心作用和要求
规模需求	保障充足的绿电供给	是能源替代与零碳目标落地的基础
质量需求	绿电需求来源清晰、供应稳定、减排效果可信	满足高端制造、出口导向型园区的ESG与碳足迹要求
匹配需求	绿电供给节奏需与园区用能节奏协调	避免系统运行成本与调节压力攀升

并且上述需求推动园区绿电利用形成两大趋势:一是从“统计性绿电消费”转向“来源明确、过程可解释的物理供能”;二是将新能源替代与系统调度统筹考虑,绿电供给方式成为影响零碳园区建设质量的重要变量。零碳园区内涵的演进与绿电需求的升级,使得传统公共电网供电+绿电属性交易的方式难以满足实际需求,为绿电直连与源网荷储协同的引入奠定了现实基础^[22]。

1.2 零碳园区对绿电供给方式的新要求

随着零碳园区建设深入,绿电在园区能源体系中的角色从“减排手段”升级为“支撑低碳制造、绿色认证、产业竞争力的基础”,园区对绿电供给的要求也从“消费比例提升”转向“系统运行导向”,核心超越了传统绿色购电范畴,提出可追溯性、稳定性、匹配性、经济性 with 协同性四大新要求。

可追溯性是指传统绿电交易、绿证购买仅能在结算层面完成绿色属性认定,公共电网的电力混合传输特性,使得园区难以追溯特定时段、产品或产线的绿电来源^[23]。在绿色供应链与出口碳约束下,园区亟需绿电供给在来源逻辑与使用链条上的清晰性,实现物理层面的溯源。

稳定性是指工业园区负荷连续、对停电敏感,精密制造、高载能产业对供能稳定性要求严苛,绿电供给需兼顾年度消费占比与实际运行的供需匹配,避免因新能源间歇性导致系统稳定性承压,需

具备关键时段的有效调用能力。

匹配性是指不仅是装机规模的供需平衡,更包括时空与系统结构的协调,需解决新能源出力与园区负荷曲线的时序错配、新能源开发位置与园区负荷中心的空间错配问题,避免弃电、调峰成本攀升等问题。

经济性与协同性是指园区低碳转型需兼顾成

本约束,绿电供给模式需平衡新能源、专线、储能的建设与运维成本,保证项目持续性;同时,绿电利用与储能配置、负荷调节、综合能源系统运行、碳管理机制深度交织,供给模式需实现绿电的高效消纳与多系统协同^[24]。

不同绿电供给方式在核心指标上各有优劣,适配不同类型零碳园区,具体对比见表2。

表2 不同园区绿电供给方式综合特性对比

Table 2 Comparison of comprehensive characteristics of green power supply modes in different parks

绿电供给方式	物理溯源性	成本	供电稳定性	实施复杂度	适用场景
公共电网购绿电	弱,仅可通过绿电证明间接佐证	中等,高于常规电价,无电源建设成本	高,依托公共电网,受绿电波动影响小	低,仅需签订采购合同,流程简单	中小型园区、绿电需求不稳定、无自建能力
绿证/绿电交易	无,仅证明绿电消费额度,无法物理溯源	低至中等,成本低于PPA,无额外建设成本	无关联,由原有供电方式保障稳定性	低,交易流程标准化,无需复杂操作	各类园区,适合追求低成本、无需物理溯源
PPA(购电协议)	中,可约定来源,具备一定溯源基础	中等至高,可锁定价格,前期谈判成本高	中至高,取决于电源组合,单一电源波动大	中至高,协议谈判复杂,需协调多方	大型园区、绿电需求稳定且长期
绿电直连	高,专用线路输送,可精准物理溯源	高,需建设专用线路,前期投资大	中,受自然条件影响,需配套储能	高,需建设输电通道,审批流程复杂	大型园区、对溯源要求高,周边有绿电资源
园区分布式自发自用	极高,园内生产消费,溯源清晰可查	高,需投入建设成本,余电可上网收益	低至中,配套储能可提升稳定性	中,流程适中,适合分期建设	各类园区,尤其屋顶、土地资源充足者

绿电直连因在物理溯源、就地消纳方面的独特优势,成为零碳园区高质量绿电供给的重要方向,但也带来新能源波动、系统调节等新问题,推动零碳园区绿色供能研究从“如何获得绿电”转向“如何高质量使用绿电”,这种供需矛盾与系统性要求的提升为绿电直连与源网荷储协同的研究奠定了逻辑基础^[25]。

1.3 绿电高质量供给的核心诉求

在零碳园区建设过程中,绿电供给已经不再只是满足绿色电量消费比例的补充性安排,而是逐步成为影响园区减排成效、系统运行质量和产业绿色竞争力的重要基础条件。因此,衡量绿电供给质量,不能仅看供给规模是否增加,还应该从供给的真实性、时序适配性、供能可靠性、成本可承受能力以及系统协同性等维度来进行综合判断^[26]:

1)来源属性清晰可信。绿电价值不仅体现在替代常规能源的规模,更在于绿色属性能被识别、追踪和核验。在产品碳足迹核算、绿色供应链管理和出口碳约束强化背景下,园区需从“统计使用绿电”转向“可证明使用绿电”,绿电供给需在来源识别、流向关联、使用证明上提供支撑,保障减排效应真实可信。

2)时序特征与负荷匹配。工业园区用能需求具

有连续性、刚性和明显峰谷变化,新能源出力受资源条件影响呈现波动性、间歇性。绿电供给不能仅满足年度总量平衡,需与园区生产时段、负荷曲线、关键用能场景高度协调,实现精准时序匹配。

3)兼顾低碳与供电可靠。零碳园区不能以牺牲供能安全 and 生产稳定为代价追求高比例新能源。连续生产型、高端制造型园区对供电中断、电压波动、功率不稳敏感,绿电供给需通过储能配置、调节资源优化、电网支撑,平衡绿色低碳与安全可靠运行。

4)具备可持续经济性。零碳园区建设是长期过程,绿电替代需建立在成本可承受、收益可预期、模式可持续的基础上。需从全生命周期视角,平衡绿色价值与经济成本,保障绿电供给模式可推广、可运行。

5)嵌入园区系统协同运行。零碳园区是电、热、冷、气多能源形态交织,源、网、荷、储多资源并存的复合系统。绿电供给需与储能调节、负荷响应、综合能源管理、碳核算机制联动,避免与系统调度、资源配置、管理平台割裂,提升整体运行效率与减排绩效。

零碳园区所需要的绿电供给,已经不是单纯意义上的绿色电量输入,而是同时满足来源可信、时序匹配、运行可靠、成本可控和系统协同的综合性

供给体系。也正是在这一意义上,绿电供给方式开始从满足消费要求转向支撑零碳园区高质量运行的关键环节^[27]。

2 零碳园区绿色供能方式演进下的绿电直连

随着零碳园区建设不断推进,园区绿色供能方式正在发生明显变化。过去,工业园区的电力获取主要依赖公共电网统一供给,园区用户更多是被动接受既有电源结构,在这种模式下,用电侧虽然能够通过节能改造、设备优化等方式降低能耗,却难以直接决定所用电能的绿色属性^[28]。后来,随着绿证交易、绿电交易以及中长期购电协议等机制逐步发展,园区获取绿色电力的方式开始由单一购电转

向“购电+属性配置”并行。这样的变化确实一定程度上提高了绿色电力消费比例,也为企业减碳和绿色认证提供了路径支撑。但随着零碳园区建设目标不断提高,仅仅依靠属性层面的绿电认定,已经很难完全满足园区对绿色供能质量的要求。尤其是在产品碳足迹管理、绿色供应链审核和高比例新能源利用逐渐成为现实约束的背景下,园区开始更加关注绿色电力是否来源清晰、供电关系是否明确以及实际运行中能否稳定消纳等问题^[29]。在这样的需求推动下,绿电直连逐渐进入零碳园区研究和实践的中心视野,成为绿色供能模式演进中的一个重要方向。绿电直连供电模式示意图见图2。

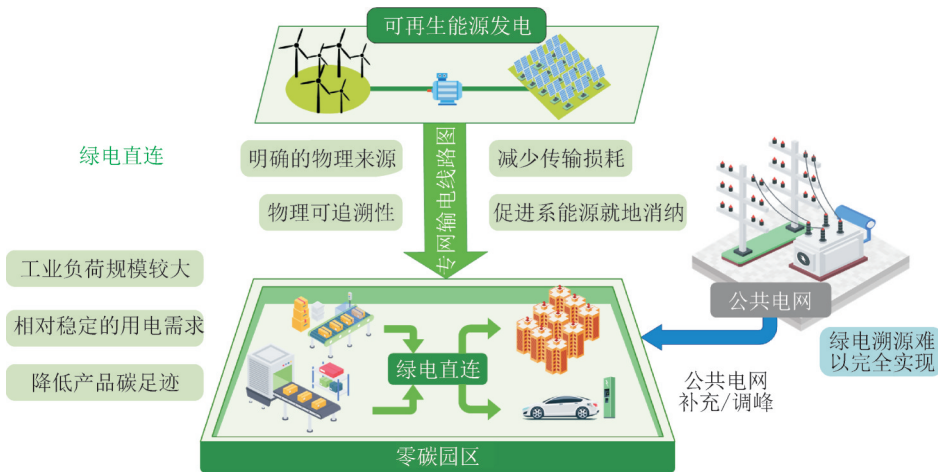


图2 绿电直连供电模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of green power direct supply mode

2.1 绿电直连的提出背景与基本内涵

绿电直连并不是对传统电网供电方式的简单替代,而是在零碳园区对绿色电力提出更高要求的背景下形成的一种新型供能组织方式^[30]。传统公共电网供电模式具有网络完善、供电可靠性高和调度体系成熟等优点,但由于不同类型电源在大电网中混合输送,终端用户往往难以从物理层面明确区分所使用电力的具体来源^[31]。绿电交易、绿证购买等方式虽然能够在制度和结算层面实现绿色属性匹配,但对于一些对电力来源真实性和碳排放核验要求较高的园区来说,仅有属性证明并不足以完全支撑其绿色发展诉求。特别是当零碳园区建设逐渐与出口导向型制造、供应链碳约束以及产品全生命周期碳管理相联系时,绿色电力来源的清晰程度、使用逻辑的可解释性,已经不再只是一个能源问题,而逐渐成为影响企业市场竞争力和园区绿色认证能力的重要因素。

基于上述背景,绿电直连开始被赋予更强的现

实意义。绿电直连是指风电、光伏等新能源电源,通过专用输电线路、园区配电网专属回路、微电网闭环等方式,跳过公共电网混合输送环节,直接向园区负荷供电的物理供能模式,可实现发电单元到用电单元点对点溯源、全链路可核查。与公共电网统一输配电不同,该模式强调发电侧与用电侧的直接对应关系,在绿电可追溯性、供电路径清晰度上优势显著,可精准支撑园区碳足迹管理、绿色供应链审核的现实需求^[32]。绿电直连并不必然意味着园区完全脱离公共电网独立运行,也不意味着所有绿电都通过单一专线一对一供应。就现有研究和实践来看,绿电直连更像是一种相对明确新能源供电关系的组织方式,其具体形态既可能是园区内部的分布式新能源就近供电,也可能是园区周边新能源项目通过专线接入,甚至还可能是新能源基地与园区之间建立相对稳定的直接供电关系。

绿电直连与公共电网是呈现出互补关系。并不是完全对立的。直连部分解决绿色电力来源与

就地消纳问题,公共电网则承担备用支撑、余缺调节和安全保障等功能^[33]。因此,在分析绿电直连时,不能只把它看成一项孤立技术,更应将其放在零碳园区整体能源系统与绿色供能方式演进的框架中加以理解。

2.2 绿电直连的典型实现方式及其特征

绿电直连并没有单一固定的实现形式,而是会随着园区负荷规模、新能源资源条件、供电距离以及系统结构不同而呈现出差异化路径^[34]。

园区内分布式直供是一种常见模式,即在园区内部或周边配置光伏、小型风电等分布式新能源设施,通过园区配电系统直接向负荷供电。该模式已在苏州工业园区、北京中关村软件园等中小型园区得到应用,通过屋顶光伏实现就近消纳,线损可控制在3%以内^[35]。其优势在于新能源与负荷距离较近,传输损耗低,建设周期较短,适合土地资源充足、屋顶条件良好或负荷规模中等的园区。然而,该模式受场地条件和资源禀赋限制较大,单靠园区内部新能源难以满足高比例绿色电力需求,对于高载能或连续生产型园区,其供电规模和稳定性仍存在不足。

另一类实现方式是园区周边新能源项目或区域新能源基地通过专用线路向园区供电。上海临港新片区、天津泰达低碳园区均采用该模式,由周边集中式光伏电站通过10 kV专线供电,绿电占比可提升至40%以上。相较于园区内分布式供电,该模式可接入更大规模新能源电量,在提高绿电占比和满足园区大负荷需求方面具有优势。尤其在风

光资源丰富的地区,该模式有助于新能源开发与工业园区绿色转型的协同,提高新能源就地消纳水平,同时在一定程度上降低远距离输电的损耗与调度压力。但该模式涉及较高线路建设成本、更复杂的接入关系及明确的系统边界,因此在实施过程中需综合考虑经济性、运行控制及政策机制。

此外,近年来研究逐渐关注绿电直连与储能系统、微电网及园区内部可调负荷的耦合运行。深圳前海合作区、浙江嘉兴工业园区已实现“绿电直连+储能”联合运行,绿电自给率可提升至80%以上。由于风电和光伏具有波动性与间歇性,单一直连模式难以完全匹配供需。通过在园区内部配置储能、需求响应或微电网,可在一定程度上增强系统灵活性,使绿电供给由静态接入转向可调节、可优化的能源系统。由此可见,绿电直连的实现方式正逐步从单一线路供电演变为与园区综合能源系统深度耦合的运行模式。

专线直连强调新能源电源经专用线路向园区负荷供电,适用于周边具备集中式新能源资源且负荷规模较大的园区;微电网直供强调园区内部新能源、储能及负荷的局部自治运行,适用于具备配电网改造条件和柔性负荷资源的园区;就近消纳侧重新能源在空间邻近范围内优先利用,适用于分布式光伏、分散式风电资源较好的园区;点对点供电则强调发电主体与用电主体之间的电量对应关系和可追溯性,适用于需要强化绿电来源核证和碳减排核算的场景。上述总结见表3。

表3 园区绿电直连典型运行模式特征与适配场景汇总

Table 3 Summary of typical operation modes, characteristics and application scenarios for green power direct connection in parks

模式类型	核心特征与优势	关键局限	典型适用场景
园区内分布式直供	就近消纳,线损极低(<3%)自建自用,绿电自给率可控建设周期短,轻量化运维	规模受屋顶/用地限制易受天气波动影响	中小型工业园区办公及商业配套园区
园区周边新能源直供	中规模供给(50~200 MW)线损适中(3%~8%)选址更灵活,资源互补性强	需新建专线,投资较高受区域资源禀赋制约	中大型工业园区用电负荷稳定的产业集聚区
新能源基地专线直供	大规模绿电(200 MW+)专线独立,供电可靠性高规模化成本优,跨区域调配	输电距离长,线损较高(8%~15%)前期投入巨大,审批复杂	重型制造产业集群高耗能重点用能企业
绿电直连+储能	削峰填谷,稳定兜底提升绿电自给率(>80%)减少对大电网依赖,抗风险强	初始成本提升20%~30%储能设备有折旧运维成本	精密制造、数据中心高绿电比例认证需求场景
绿电直连+微电网	多能互补,综合利用电、热、冷梯级利用,效率高独立运行,极端工况自保	系统集成复杂,技术门槛高资金与运维成本高昂	智慧能源标杆园区高标准零碳示范项目

2.3 绿电直连在零碳园区中的应用价值与现实边界

绿电直连在零碳园区场景下受到重视,首先在于它能够提升绿色电力供给的可辨识度和可追溯性。对于零碳园区而言,绿色电力已经不仅仅是实

现减排目标的一种能源来源,更逐渐成为支撑碳核算、绿色认证和低碳竞争力的重要基础。相比属性层面的绿电购买方式,绿电直连在供电关系上更为直接,因此更容易满足园区在碳足迹管理和绿色供

应链审核中的现实需求^[36]。

绿电直连有助于提高新能源就地消纳水平,并推动园区能源结构进一步优化。对于一些靠近新能源资源富集区的工业园区来说,若能够通过直连方式将风电、光伏等绿色电力直接引入负荷侧,不仅有助于减少输电损耗,也可以缓解部分新能源外送压力,从而提高系统整体利用效率。这种模式往往会倒逼园区从被动用能走向主动配置能源资源,也就是不再把绿色电力仅仅视为一种买来的属性,而是把它作为园区能源系统的重要组成部分来统筹考虑。基于此,园区在能源结构、负荷组织、储能配置和调度方式上都会发生变化,零碳转型也会从单纯的能源替代进一步走向系统重构。

但绿电直连在零碳园区中的应用价值,始终受到资源条件、负荷特征、系统调节能力以及制度环境等多方面因素约束。最直接的原因是新能源出力与工业园区负荷需求并不天然匹配。风电和光伏的波动性决定了即使建立了直连关系,也不代表园区能够在任何时段都稳定获得足量绿电。尤其对于连续生产、负荷刚性较强的园区来说,如果缺乏储能支撑、柔性负荷调节或与公共电网的协同机制,仅靠直连本身很难同时保证高比例绿电利用和供能可靠性。

绿电直连还面临较为现实的经济与制度约束。专线建设、新能源配套投资、储能系统布置以及后续运行维护,都会增加前期投入和系统复杂度。如果园区负荷规模不够稳定、绿电需求不够强或配套机制不完善,直连模式的经济性优势未必能够充分体现。同时,绿电直连往往还涉及电网接入责任、输配电费用分摊、备用服务补偿以及市场结算方式等问题,这些问题如果没有清晰的规则支撑,项目推进就容易停留在技术可行、落地困难的状态。因此,对于零碳园区而言,绿电直连更适合作为特定条件下的一种高质量绿电供给路径,而不是适用于所有场景的统一方案。

绿电直连的意义不在于简单替代传统供电方式,而在于它为零碳园区提供了一种更接近真实绿色供能需求的组织路径。它有助于强化绿色电力来源的清晰度,提高园区绿电利用质量,并推动能源系统从“用电侧减排”向“供能方式重构”演进。但它也把新能源波动、供需时序错配、系统灵活调节不足等问题更直接地暴露出来。也正因为如此,绿电直连在零碳园区中的进一步应用,不能停留在供电路径层面的讨论,而是必须与储能配置、需求响应、微电网运行以及外部电网协调等相关的机制

结合起来考虑。

3 绿电直连下的系统运行问题与源网荷储协同需求

随着零碳园区对绿色电力需求的增加,园区电力系统的运行方式开始发生深刻变化。传统的电力供应方式往往是单一依赖电网,而在新能源不断接入的背景下,如何保障供电稳定性和可靠性,这已经成为绿电直连模式能否顺利落地的核心制约。为破解上述难题,源网荷储协同是实现稳定供能的关键技术路径^[37]。

源网荷储协同系统结构图见图3,源网荷储协同系统通过不同能源和系统的协同作用,能够在电网、负荷、储能和能源源头之间实现信息、能源和调度的动态交互。在这一框架下,电网与园区负荷、储能装置、源头能源之间的协同优化成为了实现稳定绿色供能的基础。图3中的各个模块相互作用,共同保障园区在高比例新能源接入的情况下,既能提升绿色电力的消纳能力,又能平衡新能源波动性带来的供电不稳定性。

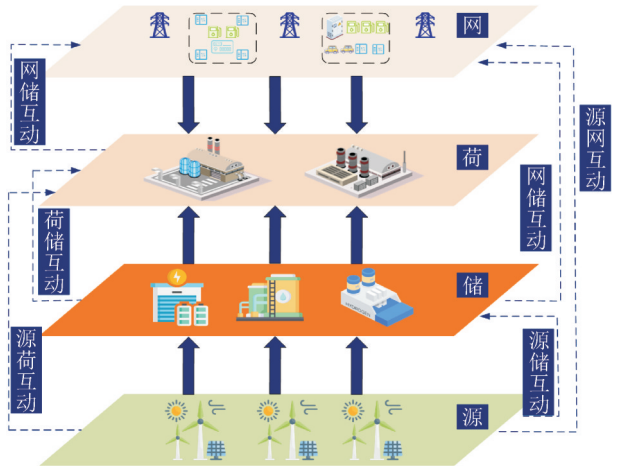


图3 源网荷储协同系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of source-grid-load-storage collaborative system

在这一协同机制中,绿电直连作为新能源供电的一种重要方式,解决了园区绿色电力来源清晰和就地消纳的问题。但如何进一步解决其在波动性、时序错配等方面的短板,仍需要依赖源网荷储协同系统的支撑^[38]。通过灵活调度储能系统、优化负荷响应以及提升电网调节能力,源网荷储协同能够有效缓解绿电直连模式在运行中的不足,实现园区能源系统的高效运行。接下来,将深入分析绿电直连在园区中的应用现状,探讨其运行中面临的主要挑战,并进一步说明源网荷储协同在此场景下的重要作用^[39]。

3.1 绿电直连与系统运行的耦合挑战

绿电直连作为零碳园区中的核心绿色供能模式,在实践应用中展现出了其在提升绿色电力可追溯性、降低输电损耗以及推动园区绿色转型方面的独特优势。然而,这一模式的应用并非没有挑战。最大的问题在于:绿色电力供给的波动性与园区用能需求之间的错配。这种错配是由多个因素引起的,包括新能源电力的间歇性、园区内部负荷的复杂性以及电力系统对不同来源电力的适应性。

新能源本身的波动性使得即使绿电直连可以为园区提供稳定的绿色电力来源,它的供电能力也并非在任何时段都足够可靠。风电与光伏发电受气象、时段与季节条件影响显著,出力具有较强随机性。即便采用绿电直连,若缺乏配套调节手段,仍难以避免因新能源波动引发的供电不稳问题。

园区的负荷需求具有特殊性。工业园区不仅需要稳定、连续的电力供给,而且负荷波动较大,某些园区的负荷需求呈现出较为明显的峰谷差异。比如,某些生产线可能在白天的高峰时段消耗大量电力,而夜间的低谷期则需求较少。这种负荷不均匀性和不规则性加剧了新能源电力供给的不匹配,使得绿电直连在园区高负荷时段可能无法满足全部电力需求,甚至出现需要依赖外部电网提供补充电源的情况。因此,如何平衡绿电直连供电的稳定性与园区内负荷波动之间的矛盾,成为了绿电直连模式下不可忽视的问题^[40]。

3.2 源网荷储协同的关键作用与机制

面对绿电直连带来的系统运行挑战,源网荷储协同提供了解决方案。源网荷储协同的核心思想是通过将电源、配电网、负荷和储能系统进行整体优化,使不同能源资源之间能够协调运行,从而提高系统的灵活性和稳定性^[41]。对于零碳园区来说,源网荷储协同不仅是提升绿电消纳的技术手段,更是实现绿色供能稳定性、降低能源成本以及提升园区低碳竞争力的必要手段。

1)在系统优化层面,源网荷储协同首先可以有效解决“源”和“荷”之间的时序错配问题^[42]。通过引入储能系统,园区可以在新能源出力较高时储存过剩电能,并在新能源出力不足时,通过释放储能电力来平衡园区内的供需差异。储能系统的这一调节作用,使得园区不必完全依赖公共电网作为备用电源,从而提高了园区内绿色电力的消纳能力和使用效率。

2)源网荷储协同还可以提升园区内电力系统的灵活性和安全性。通过多种能源形式的协调使用,

园区能够在不同的运行状态下灵活调整能源来源,最大限度地降低对单一能源形式的依赖。例如,当新能源出力较高时,园区可以优先使用绿色电力,而当新能源出力不足时,园区则可以通过调节负荷、激活备用电源或通过储能补充电力,确保园区在任何时刻都能获得足够的能源供给^[43]。

3)源网荷储协同还能够增强电网与园区之间的互动性。在传统的电力供给模式下,园区通常是电力消费的终端,电网调度是单向的。而在源网荷储协同模式下,园区不仅作为电力消费方,还可以通过调节负荷、提供储能等手段与电网实现双向交互,优化电力资源配置,提升电网的灵活性和调节能力^[44]。

3.3 源网荷储协同对绿电直连的支撑作用

源网荷储协同与绿电直连的结合,是零碳园区绿色供能体系的关键^[45]。绿电直连直接解决了园区绿色电力来源的可追溯性和消纳问题,但其无法独立解决绿色电力波动性和园区负荷之间的时序错配。而源网荷储协同则通过灵活调节和协调运行,解决了这一矛盾。具体来说,源网荷储协同为绿电直连提供了以下几个支撑作用。

1)源网荷储协同可有效强化绿电直连的供电可靠性,借助储能装置在绿电充足时蓄能、用电紧张时释能,实现供需动态平衡,减轻新能源出力波动对园区供电稳定性的影响。

2)该协同模式能够优化园区内外能源的互补调配,大幅提升绿电消纳水平,降低系统整体运行成本,改善园区经济效益。

3)源网荷储协同还能拓展绿电直连在零碳园区中的适用范围与扩容能力,在园区规模扩张、绿电占比提升的趋势下,单纯的绿电直连难以应对持续增长用电需求,尤其在负荷高峰时段更为明显。

依托优化调度、灵活调节与多能系统协同运行,绿电直连可以更好匹配各类园区的负荷特性与多时段运行要求,为其在大型园区中规模化应用提供坚实支撑。

3.4 未来发展展望

零碳园区综合能源系统结构示意图见图4,整个园区构建覆盖能源供应侧、能源转换与传输网络、储能系统、多元化能源消费侧,并由EMS能量管理系统统一调控的典型源—网—荷—储一体化架构。源网荷储协同运行,为园区实现高比例绿电消纳、绿电直连高效利用、整体零碳转型提供了核心技术支撑,展现出极强的运行优化与降碳潜力。但对照图4多主体、多能源强耦合的复杂拓扑也不难

发现,该系统在实际落地与日常调度运行中,仍面临多重现实瓶颈与技术挑战。

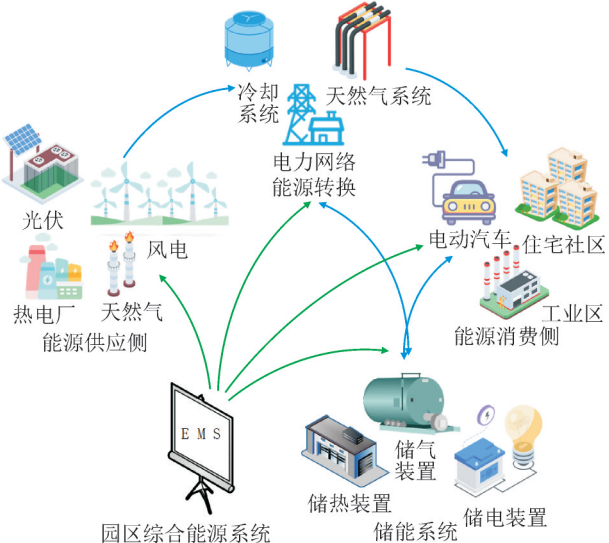


图4 零碳园区综合能源系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of integrated energy system for zero-carbon parks

在技术突破方面,应重点推进低成本、长寿命混合储能技术研究,优化不同时间尺度下的储能容量配置与热管理方案^[46];构建面向新能源出力、园区负荷及电价的联合预测模型,研发兼顾经济性、安全性与鲁棒性的双层多目标优化调度方法^[47];突破异构设备互联与协同控制关键技术,建立覆盖园区源、网、荷、储各环节的能源管理与实时调控体系,提升系统运行灵活性及极端工况下的保障能力;绿电直连系统应通过储能备用、多电源互补、需求响应、微电网孤岛运行能力和应急调度策略等方式提升供电韧性。

在标准制定方面,应加快构建统一、系统的行业标准体系,尽快形成绿电直连接网技术规范、源网荷储协同运行导则及安全评价标准^[48];进一步明确零碳园区碳排放核算边界,建立统一的绿电认证和碳减排核验规则,增强标准的可追溯性、可审计性与互认性^[49];统一设备通信接口和数据交互规范,为园区规范化建设与运行奠定基础^[50]。

在市场机制方面,应完善储能成本分担与多元价值补偿机制,健全容量电价、辅助服务补偿等相关政策^[51];理顺绿电直连模式下专线电价与输配电价的形成机制,明确多主体参与中的权责关系和收益分配方式;推动电力市场、碳市场与绿证市场的有效衔接,提升绿色电力环境价值的实现水平,逐步形成可持续的市场化运行机制^[52]。

在工程推广方面,应结合园区负荷特征与资源条件开展差异化规划设计,形成模块化、标准化的

建设方案^[53];系统总结示范项目的建设与运行经验,凝练关键问题和有效做法,形成具有可复制性和推广价值的实施路径,为零碳园区绿电直连和源网荷储协同模式的规模化应用提供支撑^[54]。

4 结论

面向“双碳”目标的零碳园区绿色供能模式研究,是推动园区能源转型、提升绿色电力利用质量和实现低碳高质量发展的重要路径^[55]。尽管当前围绕零碳园区绿电供给、绿电直连及源网荷储协同等方面的研究不断增多,但总体上仍处于持续探索和深化阶段^[56]。文中围绕零碳园区绿电需求演进、绿电直连模式特征、源网荷储协同支撑机制及其后续发展方向进行了系统分析,以期为相关研究和实践提供参考^[57]。主要结论如下:

1)当前零碳园区的绿电需求已由单纯强调绿电消费比例,逐步转向强调绿电来源清晰、供给过程可追溯、减排效果可核算的高质量供给新要求。传统绿电获取方式虽然能够满足部分绿色用能需求,但在供电关系直接性、碳足迹核算支撑以及绿色供应链审核适配等方面仍存在局限,难以完全满足零碳园区高标准绿色转型的发展需求。

2)绿电直连作为一种更直接的绿色供能组织方式,具有提升绿电供给真实性、增强新能源就地消纳能力、推动园区能源结构优化的重要价值,有助于推动零碳园区由用电侧减排向供能方式重构演进。但与此同时,绿电直连并非适用于所有场景的统一方案,其应用仍受到新能源资源条件、园区负荷特征、系统调节能力和制度环境等因素制约,特别是在负荷刚性较强、连续供能要求较高的园区中,仅依靠直连关系难以同时兼顾高比例绿电利用与供能安全稳定。

3)源网荷储协同是支撑绿电直连有效运行的重要机制,其核心在于通过储能配置、柔性负荷调节、园区内部优化控制以及与外部电网协同,缓解新能源波动性与园区负荷时序错配之间的矛盾。绿电直连主要解决绿色电力如何更直接进入园区的问题,源网荷储协同则进一步解决绿色电力进入园区后如何稳定、高效利用的问题,二者在零碳园区绿色供能体系中具有显著的耦合性。但从实际推广看,其规模化应用仍面临储能成本较高、智能调度复杂、收益机制不完善以及电网接口和市场规则不清晰等技术、经济与制度约束。

4)未来零碳园区绿色供能模式的研究,应进一步从单一供电路径分析转向系统协同优化研究,

重点围绕绿电直连与源网荷储协同的耦合机理、储能与柔性调节资源优化配置、智能化能源管理平台建设、多能互补综合能源系统集成以及园区与外部电网协调机制等方向展开。同时,还需完善绿电交易、绿证核算、辅助服务补偿、输配电费用分摊等政策与市场机制,推动技术创新、制度建设与工程实践协同推进,逐步形成适应不同园区类型和发展阶段的高质量绿色供能模式,为零碳园区建设和新型能源体系发展提供支撑。

参考文献:

- [1] Guo Yang, Tian Jinping, Zang Na, et al. The role of industrial parks in mitigating greenhouse gas emissions from China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(14): 7754-7762.
- [2] 张子瑞. 零碳产业园: 新型电力系统的生动实践[N]. 中国能源报, 2021-10-25(023).
Zhang Zirui. Zero carbon industrial park: vivid practice of new power systems[N]. China Energy News, 2021-10-25(023).
- [3] Chen G, Shan Yuli, Hu Yuanchao, et al. Review on city-level carbon accounting[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(10): 5545-5558.
- [4] 李明煜, 张诗卉, 王 灿, 等. 重点工业行业碳排放现状与减排定位分析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(3): 28-39.
Li Mingyu, Zhang Shihui, Wang Can, et al. The carbon emission status and emission reduction positioning of key industrial sectors [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 28-39.
- [5] 孙秋野, 王晶宇, 胡旭光, 等. 综合能源仿真系统及其多场景数据集构建策略和案例[J/OL]. 电力系统自动化: 1-34[2026-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260303.1814.004>.
Sun Qiuye, Wang Jingyu, Hu Xuguang, et al. Integrated energy simulation system and its multi - scenario dataset construction strategy and cases[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-34[2026 - 01 - 14]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260303.1814.004>.
- [6] 曹启帆. 零碳园区发展的系统性挑战与金桥实践路径[J]. 上海节能, 2026, 44(2): 149-153.
Cao Qifan. Systematic challenges in the development of zero - carbon parks and the Jinqiao practice path[J]. Shanghai Energy Conservation, 2026, 44(2): 149-153.
- [7] 傅 娟. “十五五”时期零碳园区建设的战略定位与实践路径[J]. 可持续发展经济导刊, 2026(1): 56-61.
Fu Juan. Strategic positioning and practical path of zero - carbon park construction during the 15th Five-Year Plan period[J]. China Sustainable Development Herald, 2026(1): 56-61.
- [8] 牟 伟. “双碳”背景下宜昌零碳园区建设的路径思考[J]. 产业创新研究, 2026(2): 58-60.
Mu Wei. Path thinking on Yichang zero-carbon park construction under the “dual carbon” background[J]. Industrial Innovation Research, 2026(2): 58-60.
- [9] 韩长河, 马 亮, 连守军, 等. 新型电力系统中源网荷储的协同优化与互动技术[J]. 电力设备管理, 2026(1): 129-131.
Han Changhe, Ma Liang, Lian Shoujun, et al. Collaborative optimization and interaction technology of source-grid-load-storage in new power system[J]. Electric Power Equipment Management, 2026(1): 129-131.
- [10] 孙 龙, 沈天清. 绿色经济下零碳园区综合能源系统的效益评估[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2026, 44(1): 142-146.
Sun Long, Shen Tianqing. Benefit evaluation of integrated energy systems in zero-carbon parks under the green economy[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2026, 44(1): 142-146.
- [11] 荣烜曼, 黄玉雄, 叶宇鑫, 等. 考虑源网荷场景生成的综合能源系统运行可靠性评估[J/OL]. 电网技术: 1-17[2026-01-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0944>.
Rong Xuanman, Huang Yuxiong, Ye Yuxin, et al. Operational reliability assessment of integrated energy system considering source-grid-load scenario generation[J/OL]. Power System Technology: 1-17[2026-01-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0944>.
- [12] 石 磊, 薛艺超, 董朔瑜, 等. 山东省零碳园区建设路径解析[J]. 山东宏观经济, 2025(6): 81-86.
Shi Lei, Xue Yichao, Dong Shuoyu, et al. Analysis on construction path of zero - carbon parks in Shandong province[J]. Shandong Macroeconomics, 2025(6): 81-86.
- [13] 李一帆. 电力体制改革背景下电力交易机构财务管理[J]. 财富时代, 2025(12): 94-95.
Li Yifan. Financial management of power trading institutions under the background of power system reform[J]. Fortune Times, 2025(12): 94-95.
- [14] 刘晋辉, 徐占伯, 吴 江, 等. 氢赋能零碳能源系统设计与优化研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2026, 60(4): 99-114.
Liu Jinhui, Xu Zhanbai, Wu Jiang, et al. Research progress on design and optimization of hydrogen-enabled zero-carbon energy systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60(4): 99-114.
- [15] Liu Wei, Tian Jinping, Chen Lujun. Greenhouse gas emissions in China's eco-industrial parks: a case study of the Beijing economic technological development area[J]. Journal of Cleaner Production, 2014(66): 384-391.
- [16] 张琦峰, 方 恺, 徐 明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708.
Zhang Qifeng, Fang Kai, Xu Ming, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 696-708.
- [17] Zheng Jiali, Mi Zhifu, Coffman D M, et al. The slowdown in China's carbon emissions growth in the new phase of economic development [J]. One Earth, 2019, 1(2): 240-253.
- [18] 李嘉祺, 陈艳波, 陈来军, 等. 工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3190-3200.
Li Jiaqi, Chen Yanbo, Chen Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3190-3200.
- [19] Wiedmann T, Barrett J. A greenhouse gas footprint analysis of UK

central government, 1990—2008[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(8): 1041-1051.

[20] 李建林, 刘文博, 梁忠豪, 等. “双碳”背景下全球典型氢能示范工程分析[J]. *电力自动化设备*, 2026, 46(2): 1-11.

Li Jianlin, Liu Wenbo, Liang Zhonghao, et al. Analysis of global typical hydrogen energy demonstration projects under background of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2026, 46(2): 1-11.

[21] 卢佳富, 梁宁, 徐慧慧, 等. 计及动态绿证—碳排协同交易机制的含氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(22): 43-54.

Lu Jiafu, Liang Ning, Xu Huihui, et al. Robust optimal dispatch of hydrogen-integrated energy systems considering dynamic green certificate-carbon emission cooperative trading mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(22): 43-54.

[22] 张兴华, 朱晔. 基于能—碳耦合视角的零碳园区建设关键技术综述[J]. *电力需求侧管理*, 2025, 27(6): 1-9.

Zhang Xinghua, Zhu Ye. A review of key technologies for zero-carbon park construction from an energy-carbon coupling perspective[J]. *Power Demand Side Management*, 2025, 27(6): 1-9.

[23] 菅玉航, 李继涛, 张天辉, 等. 源网荷储在化工企业中的一体化应用[J]. *化工设计通讯*, 2025, 51(10): 133-135.

Jian Yuhang, Li Jitao, Zhang Tianhui, et al. Integrated application of source network load storage in chemical enterprises[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2025, 51(10): 133-135.

[24] 卢茵仪. 绿色建筑在零碳园区中的实践探索[J]. *居舍*, 2025(30): 134-136.

Lu Yinyi. Practical exploration of green buildings in zero-carbon parks[J]. *Housing*, 2025(30): 134-136.

[25] 张良华, 张长浩, 朱晔, 等. 基于零碳路径约束的源网荷储系统低碳优化调度研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(5): 597-605.

Zhang Lianghua, Zhang Changhao, Zhu Ye, et al. Research on optimization strategy of source-grid-load-storage system for carbon reduction based on zero-carbon path constraints[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition)*, 2025, 44(5): 597-605.

[26] 李建林, 康靖悦, 辛迪熙. 新型电力系统储能技术应用研究[J]. *分布式能源*, 2024, 9(6): 1-8.

Li Jianlin, Kang Jingyue, Xin Dixi. Application research of new power system energy storage technology[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(6): 1-8.

[27] 刘多伦, 李璠. 基于新型电力系统的源网荷储协同互动技术研究[J]. *电力设备管理*, 2025(17): 117-119.

Liu Duolun, Li Jin. Research on collaborative interaction technology of source-grid-load-storage based on new power system[J]. *Electric Power Equipment Management*, 2025(17): 117-119.

[28] Kang Chongqing, Zhou Tianrui, Chen Qixin, et al. Carbon emission flow in networks[J]. *Scientific Reports*, 2012(2): 479219-479226.

[29] 汤亚宸, 刘婷婷, 刘广一, 等. 园区电力碳排放核算系统[J]. *供用电*, 2022, 39(10): 36-43.

Tang Yachen, Liu Tingting, Liu Guangyi, et al. Park electricity carbon emission accounting system[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(10): 36-43.

[30] Mancarella P, Chicco G. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: models and indicators[J]. *Energy*, 2008, 33(3): 410-417.

[31] Mancarella P, Chicco G. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: analysis techniques and application cases[J]. *Energy*, 2008, 33(3): 418-430.

[32] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳—绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 248-255.

Luo Zhao, Qin Jinghui, Liang Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 248-255.

[33] 朱建全, 刘海欣, 叶汉芳, 等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(7): 2469-2482.

Zhu Jianquan, Liu Haixin, Ye Hanfang, et al. Review on optimal operation of park-level integrated energy system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(7): 2469-2482.

[34] 娄素华, 卢斯煜, 吴耀武, 等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. *电网技术*, 2013, 37(6): 1483-1490.

Lou Suhua, Lu Siyu, Wu Yaowu, et al. An overview on low-carbon power system planning and operation optimization[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(6): 1483-1490.

[35] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(3): 697-707.

Qu Kaiping, Huang Linni, Yu Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(3): 697-707.

[36] Luo Xing, Wang Jihong, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. *Applied Energy*, 2015(137): 511-536.

[37] 路学刚, 汤亚宸, 刘广一, 等. 基于分层分区源网荷储平衡聚合机制的三级电网一体化调控与应用研究[J]. *供用电*, 2025, 42(7): 23-33.

Lu Xuegang, Tang Yachen, Liu Guangyi, et al. Research on integrated control and application of three-tier power grid based on hierarchical zoning balanced aggregation mechanism for source-grid-load-storage coordination[J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(7): 23-33.

[38] 宋晓华, 冯汗青, 汪鹏. 考虑需求响应的源网荷储一体化运行策略研究——基于复杂网络博弈推演的分析[J]. *价格理论与实践*, 2024(10): 138-145.

Song Xiaohua, Feng Hanqing, Wang Peng. Research on integrated operation strategy of source-grid-load-storage considering demand response—analysis based on complex network game deduction[J]. *Price: Theory & Practice*, 2024(10): 138-145.

[39] 徐菲菲, 苑锦霞. 基于新型电力系统的源网荷储协同互动技术[J]. *中华建设*, 2024(10): 175-177.

Xu Feifei, Yuan Jinxia. Collaborative interaction technology of source-grid-load-storage based on new power system[J]. *China*

- Construction, 2024(10): 175-177.
- [40] 魏斯典, 刘宇. 高比例风电接入的电力系统源网荷储协同规划模拟分析[J]. 机电信息, 2024(3): 21-24.
- Wei Sidian, Liu Yu. Simulation analysis of collaborative planning of source-grid-load-storage in power system with high proportion of wind power integration[J]. Mechanical and Electrical Information, 2024(3): 21-24.
- [41] 王睿琪, 薛熙臻, 黄阮明, 等. 面向新能源波动平抑的储能多参数等价折算配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1498-1509.
- Wang Ruiqi, Xue Xizhen, Huang Ruanming, et al. Multi-parameter equivalent conversion configuration method for energy storage with new energy fluctuation smoothing[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1498-1509.
- [42] Zhang Tieyan, Yao Zongjun, Hu Jingwei, et al. Multi-time scale rolling optimization scheduling of “nealy-zero carbon park” based on stepped carbon allowance trading[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2022(2022): 4449515.
- [43] Yao Zongjun, Zhang Tieyan, Zhao Yan. Two-stage robust optimal scheduling of “nearly-zero-carbon park” considering the synergy of waste disposal and carbon capture gas-fired power plants[J]. Frontiers in Energy Research, 2022(10): 939110.
- [44] 李建林, 石泽林, 梁忠豪, 等. 含电氢耦合储能系统的直流微电网功率协同控制方法[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-24[2026-01-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.293>.
- Li Jianlin, Shi Zelin, Liang Zhonghao, et al. Power coordinated control method of DC microgrid with electricity-hydrogen coupled energy storage system[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-24[2026-01-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.293>.
- [45] 胡博, 孙铠彬, 邵常政, 等. 面向全过程碳足迹的园区综合能源系统碳感知与优化方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2495-2504.
- Hu Bo, Sun Kaibin, Shao Changzheng, et al. Carbon perception and optimization method of the integrated community energy system oriented to the whole process carbon footprint[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2495-2504.
- [46] 施泉生, 丁建勇, 刘坤, 等. 含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 269-276.
- Shi Quansheng, Ding Jianyong, Liu Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276.
- [47] Wang Ning, Guo Zhanqiang, Meng Fanxin, et al. The circular economy and carbon footprint: a systematic accounting for typical coal-fuelled power industrial parks[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(229): 1262-1273.
- [48] 陈孜, 郑炜. 零碳园区的核心功能、建设路径与发展关键[J]. 中国电力企业管理, 2025(24): 13-15.
- Chen Zi, Zheng Wei. Core functions, construction paths and development keys of zero-carbon parks[J]. China Power Enterprise Management, 2025(24): 13-15.
- [49] 张聪, 张鹏飞, 陈少东, 等. 基于源网荷储协同的配电网优化控制策略[J]. 电气时代, 2025(5): 29-34.
- Zhang Cong, Zhang Pengfei, Chen Shaodong, et al. Optimal control strategy of distribution network based on source-grid-load-storage collaboration[J]. Electric Age, 2025(5): 29-34.
- [50] 吕佳伟, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4021.
- Lyu Jiawei, Zhang Shenxi, Cheng Haozhong, et al. Review on planning of regional integrated energy systems considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [51] 邱迪, 刘东, 高飞, 等. 基于离散混合自动机的园区综合能源系统多模式建模与日前优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 135-147.
- Qiu Di, Liu Dong, Gao Fei, et al. Multi-mode modeling and day-ahead optimization of park integrated energy system based on discrete hybrid automaton[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 135-147.
- [52] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015(11): 3023-3034.
- Liu Dichen, Peng Sicheng, Liao Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy Internet[J]. Power System Technology, 2015(11): 3023-3034.
- [53] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
- Yan Mengyang, Li Huaqiang, Wang Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [54] Liu Sai, Zhou Cheng, Guo Haomin, et al. Operational optimization of a building-level integrated energy system considering additional potential benefits of energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 4.
- [55] Li Peng, Zhang Fan, Ma Xiyuan, et al. Multi-time scale economic optimization dispatch of the park integrated energy system[J]. Frontiers in Energy Research, 2021(9): 743619.
- [56] Liu Xiaou. Pipeline network layout design of integrated energy system based on energy station site selection and load complementary characteristics[J]. IEEE Access, 2020(8): 92776-92790.
- [57] Du Yi. Research on integrated demand response mechanism under integrated energy service mode[C]//Proceedings of the 2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2021: 834-837.
- 李建林(1976—), 男, 博士, 二级教授, 研究方向为电气工程、大规模储能技术方面的研究(通信作者)(E-mail: dkylj@163.com).
- 曾璐(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制工程、综合能源优化调度方面的研究(E-mail: 2125689739qq.com).
- 石泽林(2001—), 男, 博士研究生, 研究方向为电氢耦合系统规划与运行(E-mail: 2023322070107@mail.ncut.edu.cn).