

零碳园区能源系统优化配置与运行策略

曾秀英

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

摘要:为解决零碳园区能源设备配置不合理、多能协同性弱、碳效与经济失衡等问题,本文梳理零碳园区能源系统基础架构与关键技术,剖析现存核心问题。构建兼顾低碳、经济、能效的多目标优化配置模型,依托NSGA-III算法完成模型求解。结合源荷时序特性,设计分场景精细化运行策略与多能协同管控机制,搭建智慧化调控体系。研究可为零碳园区能源系统高效低碳、稳定经济运行提供技术参考。

关键词: 零碳园区; 能源系统; 优化配置; 运行策略

引言:双碳战略推进下,零碳园区成为产业低碳转型的核心载体。当前多数园区能源系统存在设备配比不科学、多能耦合度低、新能源消纳不足等问题,难以平衡低碳减排、供能稳定与经济效益。为破解上述痛点,本文立足源-网-储-荷一体化理念,开展能源系统优化配置建模,设计适配多场景的动态运行策略,完善智慧化管控体系,助力园区实现常态化近零碳高效运行,推动零碳园区规模化落地发展。

1 零碳园区能源系统基础理论与架构分析

1.1 零碳园区核心内涵与评价标准

(1) 零碳园区是以清洁能源利用为核心,通过能源优化调度、资源循环利用实现园区全域近零碳排放的新型产业园区。其核心特征为能源低碳化、系统智能化、用能高效化、资源循环化,依托源头减排、过程管控、末端消碳的完整脱碳机理,逐步替代传统化石能源用能模式。(2) 零碳园区评价指标体系围绕三大核心维度构建,碳排放指标涵盖全域碳排放量、碳减排率等;能效效率指标包含综合能耗利用率、单位产值能耗等;新能源渗透率指标统计光伏、风电等清洁能源占比,全面量化园区零碳建设水平。(3) 零碳能源系统建设遵循低碳优先、因地制宜、多能协同、经济可行原则。同时受地域资源禀赋、建设成本、电网接入条件、产业用能特性等约束,需平衡低碳目标与园区生产运营稳定性、经济性。

1.2 园区综合能源系统组成与工作原理

(1) 供给侧系统涵盖光伏、风电、分布式储能、CHP机组、电转氢、碳捕集等核心设备,各设备各司其职,分别实现光能、风能转化、能源存储、热电联产、清洁能源转化及碳排放捕获,构建多元低碳供能体系。(2) 负荷侧系统包含园区电、热、冷、气多元用能负荷,不同产业、建筑的用能需求存在差异化,且呈现昼夜、季节时序波动规律,是能源系统调度优化的核心依

据。(3) 传输与调控侧依托多能耦合管网实现电、热、冷、气能源高效输送,搭配智慧能源管控平台,实时监测用能数据、统筹供需匹配,实现能源系统自动化、精细化运行调控^[1]。

1.3 多能互补与零碳运行关键技术

(1) 新能源高效消纳技术可解决新能源间歇性、波动性问题,通过多能协同互补,联动各类供能设备平抑能源波动,提升清洁能源就地消纳能力。(2) 储能系统凭借削峰填谷技术平衡供需时序差,依托等效储能调控技术,优化能源存储与释放节奏,提升系统能源利用稳定性。(3) 低碳智能化调控技术依托大数据、物联网实现能源系统动态优化调度,精准匹配零碳约束,兼顾系统低碳运行与智能高效管控。

1.4 园区能源系统现存问题分析

(1) 部分园区能源设备配置缺乏科学规划,设备配比不合理、新旧设备适配性差,导致新能源消纳不充分,整体清洁能源利用率偏低。(2) 多能耦合协同机制不完善,冷热电气能源系统独立运行度高,联动调度能力弱,整体运行调度模式粗放,资源浪费问题突出。(3) 零碳建设中低碳改造投入成本较高,清洁能源运维成本偏高,导致系统低碳性与经济效益难以平衡,制约零碳园区规模化发展。

2 零碳园区能源系统优化配置模型构建

2.1 优化配置总体思路与原则

(1) 本文采用以零碳目标为核心、兼顾经济性与供电可靠性的多目标优化原则。在严格落实园区低碳减排指标、控制碳排放总量的基础上,平衡设备投资、日常运维等经济成本,同时保障各类负荷稳定供能,避免单一追求低碳造成的系统成本过高或供能不稳定问题,实现多维度目标协同最优。(2) 依托源-网-储-荷一体化协同配置思路开展系统优化。打破传统能源设备独立运行

的局限,统筹供给侧新能源机组、传输侧耦合管网、储能设备与园区多元负荷,通过各环节资源整合、动态联动,优化能源分配与传输路径,提升整体系统运行协同性与适配性。(3)遵循全生命周期设备容量配置优化逻辑。摒弃短期运行优化思维,结合设备服役年限、损耗衰减、迭代更新规律,从设备选型、容量配比、运行周期、报废替换全阶段统筹规划,实现设备长期高效、稳定、低成本运行。

2.2 园区能源系统设备数学建模

(1)结合风光新能源间歇性、波动性出力特性,构建新能源发电设备出力数学模型,依托光照、风速时序数据量化发电出力规律。同时搭建热电联产机组运行模型,刻画机组热电耦合输出特性、启停约束与出力响应机制,贴合机组实际运行工况。(2)针对储能系统充放电特性,建立动态充放电数学模型,限定储能充放电功率、容量阈值及循环损耗约束。同时构建电锅炉、热泵等辅助用能设备模型,精准表征设备能耗转换效率、出力调节范围,完善多元辅助供能模块建模体系。(3)聚焦低碳减排设备,搭建碳捕集、电转氢设备运行数学模型,量化碳捕集效率、能耗损耗、氢能转化效率等核心参数,明确设备运行约束与低碳贡献机制,为系统低碳优化提供模型支撑^[2]。

2.3 多目标优化目标函数构建

(1)低碳目标以园区全时段碳排放总量最小化为核心。统筹化石能源消耗碳排放、设备运行间接碳排放,结合碳捕集设备减排量,构建碳排放计算函数,最大限度降低园区全域碳排放量,贴合零碳建设核心要求。(2)经济目标聚焦系统全生命周期成本最小化。整合设备初期投资成本、日常运维成本、电网购能成本以及设备损耗替换成本,构建全周期经济核算模型,有效控制园区能源系统整体运营成本。(3)能效目标以新能源消纳率与能源综合利用效率最大化为核心。以提升风光资源就地消纳能力、降低弃风弃光率为核心,结合多能耦合利用效率,搭建能效优化目标函数,挖掘系统用能潜力。

2.4 系统约束条件与优化算法选取

(1)设置基础物理约束条件,包含系统供需功率平衡约束、各类能源设备最大最小容量约束、机组出力上下限约束以及储能充放电功率、容量、循环次数运行约束,保障设备运行合规可控。(2)增设零碳与供需交互约束,涵盖园区碳排放强度、新能源渗透率等零碳指标约束,园区与外部电网购售电交互约束,以及电、热、冷、气多元负荷实时供需平衡约束,贴合零碳园区运行标准。(3)选用适配多目标优化问题的NSGA-III遗传算

法与Gurobi求解器,依托算法全局寻优能力,解决多目标冲突、变量复杂的优化问题,明确模型迭代计算、参数更新、最优解筛选的完整求解流程,保障优化结果精准可靠^[3]。

3 零碳园区能源系统动态运行策略优化

3.1 园区多元负荷时序特性分析

(1)零碳园区电、热、冷负荷具备显著的时序波动特征,受生产作息、环境温度、季节更替影响呈现差异化规律。在典型日尺度下,电力负荷呈现日间高、夜间低的双峰波动特征,适配园区生产办公需求;冷负荷集中在夏季日间高温时段,热负荷主要集中在冬季低温时段,昼夜差值较为明显。在典型季节尺度下,夏季以制冷、高用电负荷为主,冬季以采暖、稳定用电负荷为主,春秋平季冷热负荷需求偏弱,整体负荷曲线更为平缓,为差异化运行策略制定提供数据支撑。(2)园区光伏、风电等新能源出力存在极强的随机性与波动性。光伏出力严格依赖光照强度与日照时长,仅在日间有效出力,夜间出力归零,阴天、多云天气会大幅削弱发电功率;风电出力受风速、气象环境影响,昼夜、季节波动无固定规律,出力稳定性较差。整体新能源出力呈现间歇性、不稳定特征,无法持续匹配园区稳定用能需求,是系统运行波动的主要诱因^[4]。(3)源荷双侧不确定性对系统运行形成多重影响。负荷侧时序波动导致用能需求动态变化,供给侧新能源出力不稳定造成供能波动,双侧变量叠加易引发供需失衡,出现弃风弃光、供电缺口等问题。同时,源荷错配会降低多能设备运行效率,增加电网购能成本,加剧系统碳排放波动,严重时会影响园区供能稳定性,制约零碳园区常态化、稳定化低碳运行。

3.2 分场景精细化运行策略设计

(1)平季运行工况稳定,采用新能源优先消纳、储能平稳调控的最优运行策略。春秋季冷热负荷需求低、电网电价平稳,系统以光伏、风电清洁能源供能为主体,最大化就地消纳新能源发电量。储能系统保持平稳浅充浅放状态,平抑新能源小幅出力波动,减少能源浪费,同时降低机组启停频次,保障系统以低能耗、低碳排、低成本状态稳定运行。(2)结合电网峰谷电价机制与负荷波动规律,制定峰谷差异化运行策略。用电高峰时段,优先释放储能系统存储电能,替代高价网购电力,同时缩减高能耗辅助设备运行,缓解电网供电压力,降低峰值用能成本。用电低谷时段,依托低价电网电力与富余新能源电量完成储能蓄能,储备能源以应对后续负荷高峰,通过峰谷套利与负荷转移,实现系统经

济运行优化。(3)针对极端高温、极端低温、阴雨无风等恶劣场景,构建应急运行策略。极端天气下新能源出力大幅衰减,园区易出现供能缺口,此时关停低效低碳设备,启动CHP机组等备用供能设备兜底供能,优先保障园区基础生产、生活负荷稳定。同时收紧储能调控权限,禁止无序放电,优先弥补供电缺口,兼顾系统供能可靠性与低碳底线,规避大面积供能中断风险^[5]。

3.3 多能协同运行优化策略

(1)构建电-热-冷-气多能耦合协同调度策略,打破各类能源独立运行壁垒。依托多能管网耦合特性,实现电能、热能、冷能、燃气能源的相互转化与互补调配,新能源富余时段优先通过电转热、电转冷消纳富余电能,负荷高峰时段联动多能设备协同供能,实现不同能源品类的互补互济,提升整体能源利用效率。(2)建立储能系统与新能源、负荷的动态匹配调控策略。根据新能源实时出力与园区负荷时序变化,动态调整储能充放电节奏,新能源大发、负荷低谷时储能蓄能,新能源不足、负荷高峰时储能释能,精准匹配源荷动态变化,有效平抑系统供需波动,解决新能源间歇性带来的运行不稳定问题。(3)推行碳-能协同管控运行策略,实现运行阶段近零碳排放。将碳排放指标纳入实时调度体系,优先调度低碳、零碳新能源设备,限制高碳化石能源设备运行时长,联动碳捕集设备实时捕获运行碳排放,抵消残余碳排放,从能源调度、设备运行、碳减排多维度协同管控,实现园区运行阶段近零碳目标。

3.4 智慧化运行管控机制

(1)依托能源数字孪生平台搭建实时监测与动态调控机制。通过数字孪生技术构建园区能源系统虚拟仿真模型,实时映射设备运行状态、能源供需数据、碳排放数据,实现全系统可视化监测。基于仿真数据动态调整设备运行参数,快速修正源荷偏差,实现能源系统自适应动态调控。(2)构建基于大数据的负荷预测与超

前调度机制。整合历史负荷数据、气象数据、生产作息数据,利用大数据算法精准预测短期、中长期电、热、冷、气负荷变化趋势与新能源出力情况。提前制定能源调度方案,超前配置设备运行状态,由被动调控转变为主动预判调度,提升系统运行前瞻性。(3)建立园区能源自治与电网互动协同运行机制。正常工况下以园区内部能源自治为主,依托新能源与储能实现自给自足;供需失衡时与外部电网开展双向互动,富余电量并网消纳,电量缺口网购补充。通过内外协同运行,平衡园区能源自治能力与电网支撑能力,实现零碳园区高效、稳定、低碳、经济长效运行。

结束语

本文完成零碳园区能源系统理论分析、优化建模与运行策略设计,有效解决了园区能源利用低效、调度粗放、碳经失衡等难题。通过多目标优化模型与分场景运行策略,大幅提升新能源消纳率与多能协同水平,兼顾系统低碳性、经济性与可靠性。后续可结合实际园区工况迭代优化算法参数,细化差异化调度方案,进一步完善零碳能源管控体系,为同类园区建设提供可复制的实践范式。

参考文献

- [1]王志强.零碳园区能源系统优化配置研究[J].中国电力,2021,54(7):45-52.
- [2]张敏.储能在零碳园区综合能源系统中的应用研究[J].电网技术,2022,46(5):33-41.
- [3]张大庆,米建华,郭傲,等.城市电厂综合能源服务园区经济的多场景应用[J].中国电力企业管理,2026,17(1):84-85.
- [4]兰国芹,陆烨,阚严生,等.综合能源服务发展趋势与对策研究[J].发电技术,2025,46(1):19-30.
- [5]陈雨琪.“双碳”目标下综合能源服务前景展望[J].上海节能,2024,43(6):961-967.