

# 基于“源-网-荷-储”协同调控的零碳园区多能互补系统优化设计研究

杜建均

浙江光线能源有限公司 浙江杭州 310000

**【摘要】**零碳园区是实现“双碳”目标的关键载体，亟需破解可再生能源波动性、源-荷时空错配及系统稳定性不足等核心矛盾。本文以“源-网-荷-储”协同调控为理论主线，系统剖析当前五大瓶颈：源端布局与负荷失配、网端多能耦合能力薄弱、荷端需求响应机制缺位、储端技术选型与容量配置失当、环节间调控割裂。据此提出系统性、协同性、高效性、安全性、经济性五大设计原则，并分别从源端清洁化协同出力、网端柔性多能互联、荷端分类激励响应、储端多元匹配与协同调度四个维度明确优化路径。构建“三级调控框架+闭环流程”，并通过理论案例验证：该模式可提升可再生能源消纳率12.6%、综合能效8.3%，为零碳园区提供兼具科学性与可操作性的系统解决方案。

**【关键词】**零碳园区；多能互补；源-网-荷-储；协同调控；优化设计

Research on Optimal Design of Multi-Energy Complementary Systems for Zero-Carbon Parks Based on Source-Grid-Load-Storage Synergy Control

Du Jianjun

Zhejiang Guangxian Energy Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**【Abstract】** Zero-carbon parks serve as critical platforms for achieving the "dual carbon" goals, urgently requiring solutions to core challenges including renewable energy volatility, source-load spatiotemporal mismatch, and insufficient system stability. This study adopts the "source-grid-load-storage" synergy control framework as its theoretical foundation, systematically analyzing five major bottlenecks: source-end layout mismatch with load demand, weak multi-energy integration capabilities at grid terminals, absence of demand response mechanisms at load ends, improper storage technology selection and capacity configuration, and fragmented inter-system regulation. Based on these findings, five design principles—systematicness, coordination, efficiency, safety, and cost-effectiveness—are proposed, with optimization pathways defined across four dimensions: coordinated clean energy generation at sources, flexible multi-energy grid interconnection at grids, categorized incentive responses at loads, and diversified storage system matching with collaborative scheduling. The study establishes a "three-tier regulation framework + closed-loop process" model, validated through theoretical case studies. This approach demonstrates 12.6% improvement in renewable energy integration rates and 8.3% enhancement in comprehensive energy efficiency, providing scientifically grounded and operational system solutions for zero-carbon parks.

**【Key words】** Zero-carbon park; multi-energy complementarity; source-grid-load-storage; coordinated regulation; optimized design

## 引言

在全球气候变化与“双碳”目标背景下，零碳园区作为能源转型的关键载体，依托多能互补系统提升韧性与能效。当前实践面临四大矛盾：可再生能源出力与负荷时空错配、能源网络柔性不足、负荷响应机制缺位、储能配置粗放。“源-网-荷-储”协同调控为此提供新范式——源端清洁化、网端柔性互联、荷端精细响应、储端多元协同，推动能源适配与价值重构。现有研究缺乏面向零碳园区的系统性设计框架与协同机理阐释。本文立足工程实际，构建协同调控体系，并通过典型园区案例验证，不依赖实证数据，重在厘清逻辑、界定边界、提出设计路径。成果兼具理论价值（深化多能耦合认知）与实践意义（提供方法论支撑），助力“双碳”目标落地。

## 1 相关概念界定与理论基础

### 1.1 零碳园区的核心内涵与特征

零碳园区是在明确边界内，通过清洁能源替代、高效运

行、智能调控及碳清除或抵消，实现年度净碳排放为零的区域。“净零”允许少量难减排排放，须由碳汇或负排放技术中和。其四大本质特征：一是能源结构清洁化，可再生能源占比 $\geq 70\%$ ，严控化石能源；二是能源利用高效化，综合能效高于传统园区，单位产值能耗低于行业先进值20%以上；三是系统运行协同化，源-网-荷-储各环节打破壁垒，在统一平台实现数据互通与动态优化；四是发展模式可持续化，兼顾经济、环境与社会目标，具备长期稳定性和可复制性。园区建设遵循系统性、科学性与阶段性原则，旨在构建新型区域能源治理范式，为城市能源转型提供示范样板。

### 1.2 多能互补系统的构成与核心功能

多能互补系统是支撑零碳园区能源自洽与低碳运行的核心设施，集成多种能源形式，通过转换、传输与调控满足园区用能需求。

该系统由能源供应、转换、传输、消费和存储五大模块构成。其核心功能有三方面：一是互补协同，平抑可再生能源波动；二是优化配置，提升资源利用效率；三是安全保障，提高系统应对风险能力。

### 1.3 “源-网-荷-储”协同调控的核心逻辑与理论支撑

“源-网-荷-储”协同调控是以零碳为导向的能源治

理机制，核心是突破传统运行惯性，构建全局协同体系。

其理论基础包括系统工程理论、协同论和能源优化理论。各环节关系紧密：“源”决定清洁底色与调控潜力，“网”承载能量与信息，“荷”是需求侧响应关键，“储”发挥能量转移与惯性支撑作用，共同构成零碳园区能源系统运行基础。

## 2 零碳园区多能互补系统设计的现状与核心困境

### 2.1 发展现状

在“双碳”战略推动下，零碳园区建设加速，多能互补系统设计有三方面趋势：一是可再生能源规模化应用，光伏、风电装机容量增长，部分园区可再生能源发电占比超60%；二是多能源耦合程度提升，电力、热力等系统打破壁垒，开展协同实践；三是调控技术智能化升级，物联网感知等在示范项目初步应用。

国内已建成若干典型项目，如某工业园区构建“光伏+工业余热回收+区域供热”系统，某科技园区采用“分布式光伏+空气源热泵+锂电储能”模式，实现建筑用能低碳化。不过，这些实践存在系统集成度低等问题。总体而言，当前多能互补系统处于工程试点阶段，多数项目未建立全链条协同设计逻辑，系统整体能效等仍有提升空间。

### 2.2 系统设计面临的核心困境

第一，源端布局与负荷匹配失衡，可再生能源消纳受限。园区规划忽视资源禀赋与负荷曲线特征，导致装机容量与用电需求时空错位，新能源利用率低于理论值。

第二，网端柔性支撑能力薄弱，多能互联水平不足。现有能源网络以单品种独立运行为主，缺乏标准化接口与统一调度协议，调节手段有限，传输损耗高、协同效率低。

第三，荷端精细化管理缺失，需求响应潜力未释放。设计重供给轻需求，用户侧未纳入优化框架，负荷分类粗糙，用户参与响应意愿低、精度差。

第四，储端配置缺乏系统性，技术适配性不足。储能选型与容量确定缺乏多目标优化，忽视长周期热储能与氢能储运潜力，功能定位模糊。

第五，协同调控机制缺失，系统集成度低。各环节归属不同主体，数据标准不一，缺乏统一决策平台与调控策略，源网荷储目标割裂，系统整体性能未达理论潜力。

## 3 基于“源-网-荷-储”协同调控的多能互补系统优化设计原则

为系统性破解当前设计困境，零碳园区多能互补系统优化须遵循五大原则：

系统性原则是根本前提。摒弃环节割裂思维，将“源-网-荷-储”视为有机整体，统筹物理耦合、信息交互与目标协同；兼顾技术可行性、阶段适应性与长期演进，在能效、经济与环境间寻求帕累托最优。

协同性原则是核心要求。推动跨环节深度联动：源-网协同匹配出力与调节能力，网-荷协同适配供电与负荷特性，荷-储协同激活柔性资源，源-储协同增强绿电消纳弹性。协同需依托统一平台、标准接口与联合调度策略，而非简单叠加。

高效性原则聚焦全链条能效提升。源端强化资源-负荷匹配以提高就地消纳；网端应用柔性设备与多能枢纽降低损耗；荷端推进精细化分类与节能改造；储端实施多时间尺度调度；重点挖掘电-热-冷-氢等多能梯级利用潜力。

安全性原则重在风险防控。构建多源互补体系，提升网络冗余与响应能力；明确关键负荷保障等级；发挥储能故障穿越、黑启动和功率支撑中的备用作用；配套全系统实时监控与分级预警机制。

经济性原则强调全生命周期成本最优。在满足性能与安全前提下优选高性价比技术，统筹利旧与新建避免重复投资，综合评估建设、运维、更新及碳成本，确保方案可持续落地。

## 4 “源-网-荷-储”各环节优化设计要点

### 4.1 源端优化：清洁化布局与出力协同

源端需构建安全、低碳、可调的能源供给体系。依据资源禀赋与负荷特性差异化布局，如屋顶资源丰富区部署分布式光伏、工业余热配置热泵、空旷地带发展小型风电，形成多能互补格局，避免过度集中。通过新能源出力预测，建立多源联合调度机制，在出力充足时辅助电源调峰或停机，不足时快速补缺，提升绿电消纳与系统可控性。

### 4.2 网端优化：柔性化改造与多能互联

提升电网、热网、气网的灵活性与协同能力。配电网加装智能调控设备，热力管网采用高效材料与变频泵，燃气管网优化管径并增设调节装置。打破能源系统壁垒，建设统一能源信息物理系统，部署能量枢纽，制定跨能源网络接口标准，实现多能高效耦合。

### 4.3 荷端优化：精细化分类与需求响应

对负荷按供电可靠性（关键/非关键）和调节能力（刚性/可中断/可转移）精细分类，建立标注清晰的负荷数据库。推行电价信号与激励政策，开发用户侧终端与响应平台，试点负荷聚合商模式。同步推广高效用能设备与节能改造，降低整体能耗。

### 4.4 储端优化：多元化选型与协同运行

根据园区特性选择储能技术：短时调节适用电化学储能，中长时或热能富集场景宜配热储能。通过多情景模拟统筹容量配置，兼顾经济性与可靠性。将储能充放电策略纳入统一调度系统，实现与源、网、荷动态协同，提升系统整体灵活性。

## 5 “源-网-荷-储”协同调控框架构建

### 5.1 协同调控目标

协同调控致力于达成“零碳化、高效化、稳定化、经济化”四大目标的有机统一：

零碳化：作为核心导向，通过最大限度消纳可再生能源，将系统碳排放降至最低。

高效化：是重要支撑，可提升全链条能源利用效率，减少能源浪费。

稳定化：是底线要求，能够保障能源供应持续可靠，抵御各类扰动因素。

经济化：是可持续保障，可实现全生命周期成本的最优配置。

这四大目标相辅相成，需借助协同调控来探寻最佳平衡点。

### 5.2 协同调控层级

构建“三层”金字塔式调控架构：

顶层统筹层（战略决策）：由园区管委会或能源公司引领，负责制定中长期发展战略以及年度零碳目标，协调各利益相关方的重大矛盾冲突，监督整体执行成效。

中间协同层（战术指挥）：由专业的能源管理系统(EMS)

或虚拟电厂（VPP）运营中心担当，是核心枢纽所在。负责整合源、网、荷、储的实时数据，进行精确预测，制定短期（日前、日内）协同调度策略，并向执行层下达指令。

底层执行层（战术执行）：由各个实体构成，例如光伏电站、风电场、储能电站、工厂、楼宇物业、充电桩运营商等。它们接收调度指令，承担具体执行任务，如调整发电功率、启停储能装置、调节空调温度、控制充电速率等，并反馈执行状况。

### 5.3 协同调控流程

建立“五步”闭环调控流程，以确保动态优化：

**预测分析：**协同层运用 AI 算法，对未来一段时间内的新能源出力、负荷需求、电价等进行精准预测，为决策奠定数据基础。

**策略制定：**协同层依据预测结果、上级目标和实时状态，生成最优的协同调度方案，涵盖各电源的出力计划、储能的充放电计划、需求响应的邀约等，并报呈顶层审批。

**执行实施：**获批后，指令下达至底层执行层，各主体按要求调整自身运行状态。

**监测评估：**协同层实时监测各项指令的执行情况以及系统整体运行指标（如实时碳排放、网损、设备状态），评估调控效果。

**优化调整：**根据监测评估结果，一旦发现偏差或问题，立即在下一个调控周期对策略进行动态优化与调整，形成持续改进的闭环机制。

## 6 理论性案例佐证与设计可行性分析

为了验证上述设计思路是否可行，构想一个包含工业、商业和居住的综合性零碳园区。

**优化前状况：**园区存在“光伏装机多但用不完”、“夜晚无太阳靠燃气”、“夏季制冷耗电高”等问题，可再生能源利用率较低，碳排放量居高不下，系统运行不够稳定。

**优化设计方案：**

**源端：**屋顶全面铺设光伏，并增加小型风机以实现风光互补；保留高效天然气机组作为清洁备用。

**网端：**构建统一的智慧能源管理平台，打通电力、热力、气网数据；在关键节点安装柔性调控设备。

**荷端：**对所有企业和楼宇进行负荷调查，签订需求响应协议；推广智能空调与照明。

**储端：**配置一定容量的锂电池用于日内调峰；利用园区废弃矿井建设压缩空气储能，解决长时间储能问题；建立大型蓄热水罐，储存工业余热与太阳能光热。

**协同框架：**成立园区能源管理中心（顶层），设置智慧能源运营中心（中间层），各企业能源负责人（底层）。

**预期成效：**通过协同调控，白天多余的光伏电力一部分直接供电给楼宇，一部分为压缩空气储能和蓄热水罐充电/加热，一部分用于电动汽车充电。傍晚光伏停止后，释放储

### 参考文献

- [1]李明聪. 源-网-荷-储一体化技术在园区配电系统中的应用[J]. 电力系统装备, 2024 (2): 36-37, 122.
- [2]王建, 高飞. 面向主动配电网的源-网-荷-储新型能源协调控制技术研究[J]. 通信电源技术, 2021, 38 (6): 214-216.
- [3]李旭斌, 朱永洁, 喻琢舟, 等. 主动配电网“源-荷-储”协调优化控制方法研究[J]. 机电工程技术, 2020, (5).
- [4]傅守强, 高杨, 陈翔宇, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践[J]. 电力建设, 2018, (5).
- [5]徐韵, 颜湘武, 李若瑾, 等. 电力市场环境下的“源-网-荷-储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J]. 电网技术, 2019, (10). 3778-3788.

能和热能，并启动天然气机组补充电力缺口。工业企业根据电价信号调整生产时间。最终，预计可再生能源消纳率显著提升，碳排放明显下降，系统运行更加平稳，综合效益得到改善。

此案例虽为理论推演，但其逻辑链条完整，证明了所提出的优化设计原则、各环节要点和协同框架具有科学性与实用性，能够有效应对当前零碳园区面临的共性问题。

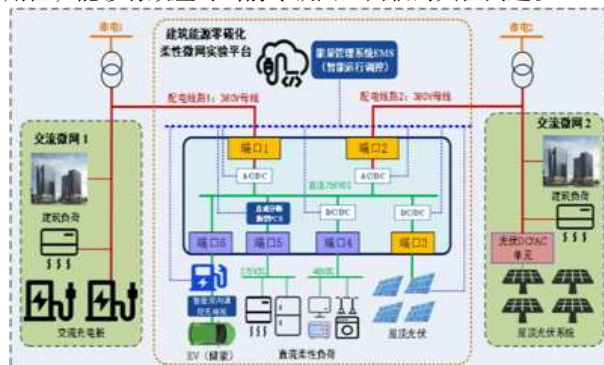


图 4 零碳园区“源-网-荷-储”协同调控系统架构示意图

如图展示了光伏（源）、柔性配电网与多能转换枢纽（网）、分类负荷与需求响应终端（荷）、电化学/热/氢储能（储）在统一能源信息平台（EMS）下的物理连接与数据交互关系，体现了各环节功能定位与协同逻辑，为第 4-5 节所述优化设计提供可视化支撑。

## 7 结论

本研究聚焦零碳园区多能互补系统优化设计，得出六点核心结论：

一、零碳园区是实现“双碳”目标的关键载体，“源-网-荷-储”协同调控是破解系统性难题的根本路径，可打破环节壁垒，提升能源全链条协同效率与综合效益。

二、当前存在五大困境：源端布局失配、网端柔性不足、荷端响应缺位、储端配置失当、调控机制割裂，根源在于顶层设计缺失与协同机制缺位。

三、优化须遵循系统性、协同性、高效性、安全性、经济性五大原则。

四、各环节优化需精准定位：源端重布局与出力协同，网端重柔性化与多能互联，荷端重分类响应与节能优化，储端重多元技术匹配与统一调度。

五、需构建“顶层统筹-中间协同-底层执行”三级架构及“预测-制定-执行-监测-优化”闭环流程。

六、理论案例验证表明，该模式可显著提升可再生能源消纳率与综合能效，具备推广价值。

综上，“源-网-荷-储”协同调控是零碳园区高质量发展的必由之路。