

面向智慧园区的综合能源系统供需协同优化模型

干林军

宁波光耀热电有限公司 浙江宁波

【摘要】智慧园区作为新型城市发展模式的重要载体，其综合能源系统的优化运行对提升能源利用效率、降低碳排放具有重要意义。本文围绕“面向智慧园区的综合能源系统供需协同优化模型”展开研究，提出一种融合多能互补与动态响应机制的协同优化模型，旨在解决园区内电、热、冷、气等多元能源系统的协调调度难题。通过构建以经济性、低碳性和稳定性为目标的多目标优化函数，并引入智能算法进行求解，实现能源供需的高效匹配。研究结果可为智慧园区能源管理提供理论支撑和技术路径。

【关键词】智慧园区；综合能源系统；供需协同；优化模型；多能互补

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250141

Comprehensive energy system supply-demand collaborative optimization model for smart parks

Linjun Gan

Ningbo Guangyao Thermal Power Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang

【Abstract】As an important carrier of the new urban development model, the optimized operation of the comprehensive energy system in smart parks is of great significance for improving energy utilization efficiency and reducing carbon emissions. This paper focuses on the research of the "comprehensive energy system supply-demand collaborative optimization model for smart parks" and proposes a collaborative optimization model that integrates multi-energy complementarity and dynamic response mechanisms. The model aims to solve the problem of coordinated scheduling of multiple energy systems such as electricity, heat, cooling, and gas in the park. By constructing a multi-objective optimization function with the goals of economy, low carbon, and stability, and introducing intelligent algorithms for solving, efficient matching of energy supply and demand is achieved. The research results can provide theoretical support and technical pathways for energy management in smart parks.

【Keywords】Smart park; Comprehensive energy system; Supply-demand collaboration; Optimization model; Multi-energy complementarity

引言

在数字化转型加速与“双碳”目标推动下，智慧园区正成为现代城市可持续发展的关键单元。作为园区运行的核心支撑体系，综合能源系统需应对多样化负荷需求与复杂能源结构之间的动态平衡问题。然而，传统能源管理模式往往局限于单一能源形式或静态调度策略，难以满足现代园区灵活、高效、绿色的发展要求。如何建立一套能够统筹供需关系、兼顾经济与环保目标的协同优化模型，已成为当前研究的热点与难点。本文聚焦于智慧园区背景下的综合能源系统优化问题，提出一种融合多能互补与智能调度机制的协同优化模型，旨在提升园区整体

能源利用效率和运行稳定性，为未来智慧城市建设提供新的思路与方法。

1 智慧园区综合能源系统构成与运行特征

智慧园区作为现代城市可持续发展的重要载体，其综合能源系统通常涵盖电、热、冷、气等多种能源形式，并通过分布式能源站、储能系统、智能微网及能源管理平台等核心组件实现高效集成。该系统以多能互补和协同调度为核心特征，能够根据园区负荷需求的动态变化，灵活调整供能策略，提升整体能源利用效率。在运行过程中，系统不仅依赖传统电网供电，还融合了光伏发电、风力发电、燃气冷热电三联供（CCHP）、地源热泵等清洁能源与可再生

能源技术,形成多元供给结构。借助物联网、大数据分析、人工智能算法,实现对能源生产、传输、分配和消费全过程的智能化监控与优化控制。

从供需关系来看,园区综合能源系统的运行需兼顾用户侧多样化的用能特性,包括基础负荷的稳定性需求与高峰时段的弹性响应能力。负荷类型涵盖办公建筑、工业厂房、商业综合体及公共设施等,呈现出时间分布不均、空间分布复杂等特点。为应对这一挑战,系统通过构建分时调节机制与负荷预测模型,结合储能装置的削峰填谷作用,实现能源供应与消费需求之间的动态匹配^[1]。园区内部能源流动路径呈现多向交互趋势,如余热回收用于区域供暖、光伏电力就地消纳等,进一步提升了能源系统的灵活性与自适应性。

在此基础上,系统还需面对外部环境变量的影响,如电价波动、气象条件变化以及政策导向调整等不确定因素。综合能源系统的设计与运行强调实时响应能力和多目标协调机制,力求在保障供能安全的前提下,降低运行成本并减少碳排放。通过建立统一的能量管理中心(EMC),整合SCADA系统、能源计量装置与边缘计算节点,实现数据驱动下的精细化管理与智能决策支持。这种高度集成与协同运作的模式,为后续供需协同优化模型的构建提供了坚实的物理基础与技术支持。

2 多能耦合下的供需失衡问题分析

在智慧园区综合能源系统中,多能耦合特性使得电、热、冷、气等多种能源形式之间存在复杂的物理关联与运行约束。这种强耦合关系虽然提升了系统的整体能效和供能灵活性,但也带来了供需匹配难度加大的问题。在燃气冷热电三联供(CCHP)系统中,发电过程伴随产生的余热需即时用于供热或制冷,若热负荷不足,则会造成能源浪费;反之,若电力供应受限,又可能影响园区的基础用能保障。由于不同能源子系统的响应速度差异较大,如电力系统具备毫秒级响应能力,而供热网络则具有显著的时滞特性,这进一步加剧了多能流之间的协调难度。

在实际运行过程中,园区能源需求呈现出显著的时空异质性与不确定性,尤其是在极端天气、节假日或突发事件等特殊场景下,负荷波动幅度大且难以准确预测,导致供能侧与用能侧之间的匹配失衡现象频发。以某典型智慧园区为例,冬季供暖期热负荷激增,但光伏出力受限于光照条件,无法有效支撑高峰用电

需求,进而造成电网依赖度上升;而在夏季用电高峰期,空调负荷占比高企,若缺乏有效的储能调节机制,将极易引发局部电网过载风险^[2]。此类问题反映出当前能源系统在多能协同调度方面的不足,亟需建立更为精细化的供需平衡分析框架。

传统能源管理方式多采用分系统独立调控模式,缺乏统一的能量协调机制和优化决策支持工具,难以适应复杂多变的运行环境。尤其在面对多重不确定性因素(如气象变化、用户行为波动及设备故障等)时,现有调度策略往往表现出响应滞后、调整偏差大等问题,从而影响整个系统的经济性、稳定性与低碳性。如何构建一种能够兼顾多能耦合特性与动态负荷变化的协同优化机制,成为提升智慧园区综合能源系统运行效率的关键所在。

3 基于多目标优化的协同调度模型构建

为实现智慧园区综合能源系统中多能流的高效协同调度,需构建一个融合经济性、低碳性与稳定性的多目标优化模型。该模型以园区内电、热、冷、气等能源子系统的耦合关系为基础,充分考虑分布式电源(如光伏、风电、燃气轮机)、储能装置(如电池储能、热储能、冰蓄冷)以及可调节负荷(如智能空调、电动汽车充电站)之间的协同运行机制。通过建立包含能源转换、传输、存储和消费全过程的数学表达式,模型能够对各类设备的运行状态进行动态建模,并结合时间尺度上的协调控制策略,形成适用于日前一实时双层调度架构的优化框架。在此基础上,引入多目标优化算法(如NSGA-II或MOEA/D),在满足系统安全约束的前提下,寻求最优的能源配置方案。

模型的核心在于平衡多个相互制约的优化目标,包括最小化运行成本、降低碳排放量以及提升供能可靠性。其中,运行成本涵盖燃料费用、购电支出及设备维护费用;碳排放则主要来源于化石能源的使用比例;而供能可靠性则通过电压稳定性指标、供热/供冷连续性以及负荷响应速度等维度加以量化^[3-7]。为提高模型的实际适用性,还引入了基于历史数据与预测信息的不确定性处理机制,采用鲁棒优化或随机规划方法应对负荷波动、新能源出力不确定等因素带来的影响。借助边缘计算与云计算平台,将模型部署于园区能量管理系统(EMS)中,实现实时数据采集、状态估计与优化决策的闭环控制。

在具体实现过程中,模型通过分层解耦与协同求

解相结合的方式,将复杂的非线性问题转化为可计算性强的混合整数线性规划(MILP)或非线性规划(MINLP)问题,并利用改进型智能优化算法进行高效求解。为增强模型的适应能力,设置灵活的目标权重调整机制,允许根据园区不同运行阶段的重点需求(如高峰期保供、低谷期降本、政策导向减排等)动态调整优化优先级。最终形成的协同调度模型不仅能够有效缓解供需失衡问题,还能显著提升园区整体能源利用效率与绿色化水平,为推动智慧园区向低碳、智能、可持续方向发展提供关键技术支撑。

4 模型应用与优化效果仿真验证

为验证所构建的多目标协同调度模型在智慧园区综合能源系统中的实际应用效果,选取某典型工业园区作为仿真案例,基于其能源基础设施配置、负荷特性及供能需求,搭建包含光伏发电、燃气轮机、储能系统、电制冷与吸收式制冷设备在内的多能耦合仿真平台。通过采集该园区连续一年的运行数据,结合气象信息、电价机制及用户行为模式,构建多场景输入条件,并利用 MATLAB/YALMIP 与 PLEXOS 等工具进行联合仿真分析。模型在实际系统架构中嵌入优化算法模块,实现对能源调度策略的动态调整与实时反馈控制。

在仿真过程中,重点对比了传统独立调度模式与本文提出的协同优化模型在经济性、碳排放及供能稳定性等方面的运行效果。仿真表明,相较于传统方式,所构建的模型在能源综合利用效率上有明显提升,显著降低了园区的日均购电支出,并在用电高峰时段有效减轻了对主电网的依赖,缓解了局部供电压力。通过智能调控储能系统,实现了负荷曲线的平滑化,增强了系统的稳定性和抗干扰能力。在环保性能方面,模型通过优化清洁能源的调度优先级以及燃气机组的运行策略,有效减少了碳排放,提升了园区能源系统的绿色低碳水平,展现出良好的环境适应性与可持续发展优势。

为进一步全面评估所构建协同优化模型在复杂运行环境下的适应性与泛化能力,研究中引入了多种不确定性因素,模拟真实场景中的动态变化情况。具体包括极端天气条件下引起的负荷突增或骤降、可再生能源(如光伏与风电)出力的随机波动,以及关键供能设备突发故障导致的供能中断等情形^[8]。通过在仿真平台中设置上述典型不确定性场景,系统能够测试模型在非稳态条件下的响应速度与调控

效果。结果表明,该模型展现出良好的鲁棒性与自适应调节能力,在面对突发扰动时能够迅速调整调度策略,维持园区能源供应的安全性及连续性。模型在不同场景下的稳定表现也验证了其较强的适用性和推广价值,为未来在更大范围的实际工程应用提供了坚实的技术支撑和实践依据。

5 结语

本文围绕智慧园区综合能源系统的供需协同优化问题,构建了融合多能互补与动态响应机制的多目标优化模型,并通过实际案例仿真验证了其在提升能源利用效率、降低运行成本和碳排放方面的显著成效。研究结果表明,该模型能够有效协调电、热、冷、气等多种能源形式的耦合关系,增强系统运行的灵活性与稳定性。未来可进一步结合人工智能与数字孪生技术,推动智慧园区能源管理向更高层次的智能化方向发展。

参考文献

- [1] 孔德羽,陈亚鹏,姚锦清,等.面向低碳智慧园区的通信设备运维管理优化方法[J/OL].现代电力,1-9[2025-06-23].
- [2] 张开剑.面向前端展示与模拟仿真的智慧园区数字底座技术选型分析[J].电子技术,2025,54(04):149-151.
- [3] 贾丹,于海涛,葛红志.面向智慧园区的安全可信位置服务系统设计及应用[J].计算机与网络,2024,50(06):476-480.
- [4] 张淳瑞.面向智慧园区的数据治理平台设计与实现[D].北方工业大学,2024.
- [5] 任志浩.面向智慧园区的物联网中台的设计与实现[D].长江大学,2024.
- [6] 赵志为.面向智慧园区的边缘计算系统部署关键技术研究.四川省,电子科技大学,2024-03-29.
- [7] 汪保友,杨景涛,姚赛彬,等.面向智慧园区的5G室内高精度定位技术研究[J].电信科学,2023,39(09):163-173.
- [8] 熊晓鸿.面向5G MEC的智慧园区综合能源系统运行控制方法[J].广西通信技术,2023,(03):45-48.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS