

DOI: 10.61369/NPS.2025020001

虚拟电厂低碳经济优化调度模型综述

宋焯帅¹, 马骥骋¹, 李雅欣¹, 徐玉平², 李建林¹

(1. 北方工业大学 国家能源用户侧储能创新研发中心(筹), 北京 100144;

2. 浙江沃橙新能源科技有限公司, 浙江 嘉兴 314400)

A Review of Low-Carbon Economic Optimization Scheduling Models for Virtual Power Plants

SONG Tianshuai¹, MA Jicheng¹, LI Yaxin¹, XU Yuping², LI Jianlin¹

(1. National Energy User-Side Energy Storage Innovation Research & Development Center (in Preparation), North China University of Technology, Beijing 100144; 2. Zhejiang Wocheng New Energy Technology Company, Limited, Jiaxing, Zhejiang 314400)

摘要: 高比例可再生能源并网给新型电力系统带来诸多问题, 建立虚拟电厂进行资源整合与优化调度, 有望推动新型电力系统高效稳健运行, 实现低碳排放与经济高效的发展目标。现阶段, 建立合适的虚拟电厂优化调度模型是该领域热点, 相关研究方兴未艾。本文首先对虚拟电厂进行概述, 指出虚拟电厂基本结构以及优化调度建模的核心要素。进一步, 从内部优化调度与外部优化调度系统梳理了当前虚拟电厂低碳经济调度模型的主流方法、关键技术, 对比分析不同模型的方法与特点。最后, 进行总结与展望, 对未来建模的研究给出建议, 以帮助后续研究者快速了解虚拟电厂低碳经济优化调度模型现状, 明确未来的建模方向。

关键词: 虚拟电厂; 低碳经济调度; 模型综述

ABSTRACT: The high-proportion integration of renewable energy into power systems poses multiple challenges for modern power grids. Establishing virtual power plants (VPPs) for resource integration and optimal dispatch shows great potential to enhance the efficient and robust operation of new-type power systems while achieving low-carbon emissions and cost-effective development goals. Currently, developing appropriate optimal dispatch models for VPPs has become a research hotspot in this field, with related studies still in their early stages. This paper first provides an overview of VPPs, detailing their fundamental structure and key elements for optimal dispatch modeling. Subsequently, it systematically reviews mainstream methods and critical technologies in low-carbon economic dispatch models for VPPs from both internal and external optimization dispatch perspectives,

while identifying existing challenges. A comparative analysis of different modeling approaches and their characteristics is conducted. Finally, the paper concludes with future research recommendations and prospects, aiming to help subsequent research¹ers quickly grasp current modeling advancements and identify future research directions in this field.

KEY WORDS: Virtual Power Plant (VPP); Low-Carbon Economic Dispatch; Model Review

引言

高比例可再生能源并网, 为新型电力系统带来诸多问题, 如系统平衡机理的转变, 灵活性平衡体系的构建以及如何实现电力调度低碳化发展^[1-5]。此外, 可再生能源位置分散, 发电的随机性和不可控性加大了系统安全稳定运行的难度。数字化、智能化的发展, 为上述问题的解决提供了可行路径。通过对分布式资源进行资源整合与优化调度, 建立云端统一调度的虚拟电厂(virtual power plant, VPP), 有望高效调配分布式能源, 解决新型电力系统安全平衡问题, 所以虚拟电厂的发展获得了广泛关注。虚拟电厂可以整合分布式资源, 形成灵活调控的主体^[1], 推动新型电力系统稳定运行^[6], 实现低碳经济发展目标^[3], 未来有着广阔的

基金项目: 北京市自然科学基金(L242008)。

Project Supported by BeiJing Natural Science Foundation(L242008); 大学生创新创业训练计划项目(10805136025XN066-014) College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program(10805136025XN066-014).

前景。在国家发改委、能源局联合发布的《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》中，首次明确了将虚拟电厂作为新型电力系统核心主体的战略地位，要求到2030年建成覆盖全国的虚拟电厂调度网络。首批国家标准《虚拟电厂管理规范》已于2025年2月实施，为行业规范化奠定了基础。

现有的研究综述，对虚拟电厂的分类梳理多是基于虚拟电厂的功能和运行目标。文献[4]根据虚拟电厂参与主辅市场的功能，将虚拟电厂分为商业型虚拟电厂（Commercial VPP, CVPP）和技术型虚拟电厂（Technical VPP, TVPP）2类。文献[3]根据虚拟电厂的运行目标不同，将虚拟电厂分为任务驱动型虚拟电厂，经济驱动型虚拟电厂和混合驱动型虚拟电厂。以上主要针对虚拟电厂的外特性进行分类。

虚拟电厂作为一种能源管理系统，既要整合内部具有不同的技术特性和运行约束的分布式能源资源、储能系统和负荷可调节资源，还需高效参与外部电力市场并提供多样化的辅助服务，具有复杂系统内部和运行机理。数学模型是唯一能够精确描述这种复杂系统内部关系和运行机理的工具，没有准确的模型就无法实现科学的调度决策。由此可知，建立兼顾低碳排放与经济高效的虚拟电厂，关键在于建立合适的低碳经济优化调度模型^[45]，为虚拟电厂的运行提供最优策略。目前，虚拟电厂关键技术的研究方兴未艾，但较少从其内外部优化调度模型角度对现有研究进行深度整理。为强化针对性，更加直观看到不同调度模型的运行效果，本文将对虚拟电厂低碳经济调度模型进行整理，由于虚拟电厂的内部重点关注资源协同优化，外部主要关注市场参与和系统交互，内外调度的模型在面向目标和约束条件等方面存在本质差异，所以本文将虚拟电厂的优化调度模型做分层处理，分成内部优化调度模型和外部优化调度模型两层^[6]，模型具体分类如图1所示。内部优化调度重点关注内部设备（能源设备、碳循环设备），不确定性处理，多尺度响应3个问题，外部优化重点关注市场机制，需求响应和多虚拟电厂交互3个问题。内部优化调度模型属于资源层优化，解决如何运行问题，直接减少碳排放，外部调度属于市场层优化，解决如何交易问题，通过经济驱动实现低碳价值变现。

本文旨在全面梳理虚拟电厂低碳经济调度模型的研究现状，为以后研究建模提供参考。本文从内部优化调度模型和外部优化调度模型对虚拟电厂低碳经济调度模型进行了分类整理，归纳分析总结不

同类模型的特点及应用条件，并对未来虚拟电厂优化调度建模提出建议，进行展望。

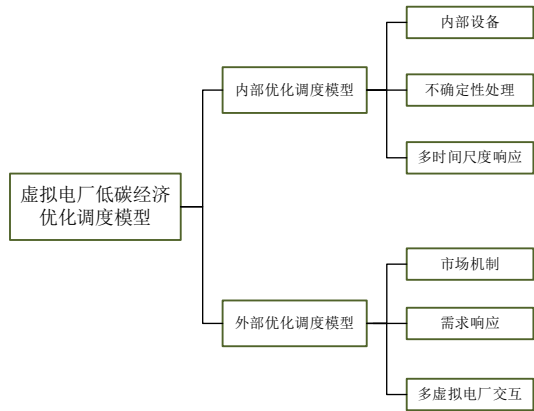


图1 虚拟电厂低碳经济优化调度模型分类
Fig.1 Classification of optimization scheduling models for low-carbon economy in virtual power plants

1 虚拟电厂概述

1.1 组成结构

虚拟电厂的主要组成模块^{[3][4][6]}包括分布式能源资源，通信网络，控制与管理系统，市场交互层和用户终端，组成结构如图2所示。

分布式能源资源是虚拟电厂的物理基础，包括多种分散的能源生产和存储设备，如分布式发电设备，储能设备，电动汽车等。通信网络连接所有分布式资源与中央控制系统，进行数据采集与传输，实时收集设备的运行状态。控制与管理系统负责虚拟电厂资源调度与优化，制定调度策略。市场交互层是虚拟电厂参与电力市场的核心，用户终端可实时检测用户用电数据，参与需求响应。

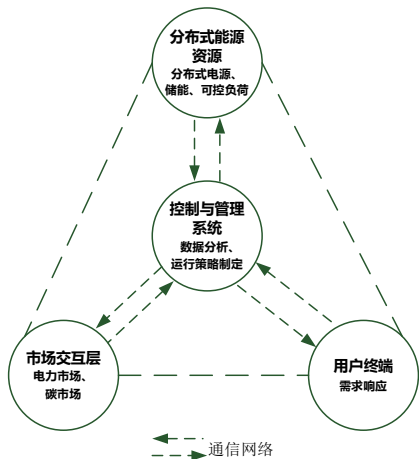


图2 虚拟电厂组成结构
Fig.2 Composition structure of virtual power plants

1.2 优化调度建模

模型是进行系统仿真和方案验证的科学工具，提供了评估不同调度策略效果的量化指标和客观标准，使决策过程更加科学和透明。

虚拟电厂优化调度^[4]是一种通过先进的信息和算法，对分散的分布式能源资源进行智能整合与协调管理，以实现经济、高效、可靠的电力系统运行策略。

对虚拟电厂的优化调度建模^[44]，是通过数学建模与优化算法，在满足物理约束和市场规则的前提下，确定虚拟电厂（VPP）内部分布式资源的最优调度策略，以实现经济性、环保性或可靠性等目标。

优化调度建模的核心要素包括目标函数，决策变量与约束条件，核心三要素之间的联系如图3所示。目标函数决定调度策略的优化目标，决策变量是优化调度的操作载体，约束条件是优化调度的可行域边界，三者共同构成完整的优化调度数学模型。

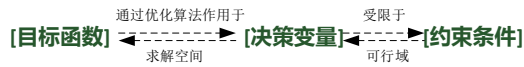


图3 优化调度建模三要素

Fig.3 Three key elements of optimization scheduling modeling

1.2.1 目标函数

目标函数，是定义调度问题的标量优化目标，虚拟电厂的优化调度通常兼顾经济性，环保性与灵活性。

目标函数数学表达式为

$$\min_u \in u \left\{ f(u, x) = \sum_{i \in T} \left[C_{grid} (P_{grid}^i) + \sum_{i \in DG} C_i (P_i^i) \right] + \lambda \bullet CO_2^{emission} \right\}$$

式中： u 为决策变量向量（如机组出力、储能充放电功率）； x 为状态变量（如储能SOC、电网电压）； λ 为多目标权重系数（可通过Pareto前沿分析确定）。

1.2.2 决策变量

决策变量数学表达式为

$$u = [P_{wind}^t, P_{pv}^t, P_{bat}^t, P_{dispatch}^t, \delta_{load}^t]^T, \forall t \in T$$

决策变量主要包括连续变量、离散变量和状态变量，具体分类见表1。

表1 决策变量类型

Table.1 Types of decision variables

变量类型	物理意义	数学特性
连续变量	发电机出力、储能功率	受限于线性 / 非线性约束
离散变量	燃气轮机启停状态	引入混合整数规划
状态变量	储能 SOC	微分 / 差分方程约束

1.2.3 约束条件

约束条件包括物理约束（设备层）、系统约束（电网层）和市场约束，具体类型见表2。

表2 约束条件类型

Tab.2 Types of constraints

约束类型	典型示例	作用
物理约束	DG 出力范围，储能 SOC 限制	确保设备安全运行
系统约束	功率平衡、电压 / 线路容量限制	保障电网稳定
市场约束	分时电价时段、调频容量要求	满足市场规则与政策合规

1.3 虚拟电厂优化调度与传统电厂优化调度对比

虚拟电厂与传统电厂优化调度对比见表3。由表3可以直观地比较出，虚拟电厂的控制对象多为小容量分布式资源，不同资源具有不同的响应特性，需要协调多种资源的差异化可控性，且大量可再生能源具有高度的间歇性和波动性使虚拟电厂的不确定性显著提高。虚拟电厂的优化目标通常为多个，因此，需要针对虚拟电厂的特性，建立新的多层次、多时间尺度的复杂优化调度模型。

表3 虚拟电厂优化调度与传统电厂优化调度对比

Table.3 Comparison of optimal dispatch between virtual power plants and traditional power plants

维度	虚拟电厂优化调度	传统发电调度
控制对象	分布式资源（异构，小容量）	集中式机组（同构，大容量）
不确定性	风光出力 + 负荷双重不确定性	以负荷预测为主
优化目标	多目标（经济 + 环保 + 灵活性）	以经济性优先

2 内部调度模型

2.1 基于内部设备的调度模型

2.1.1 内部设备概述

内部设备主要分为能源设备和碳循环设备。

能源设备直接参与能源生产、存储或消费，如分布式发电单元（光伏、风力发电机、燃气轮机等），储能系统（电池储能，压缩空气储能等），

柔性负荷（电动汽车充电桩），核心功能是满足电力供需平衡。碳循环设备通过技术手段直接减少、回收或转化碳排放的设备，核心功能是实现碳足迹抵消，典型设备有碳捕集设备，电转气设备等^[53]。

2.1.2 研究现状

针对虚拟电厂内部设备所建立的模型，主要从不同特性的能源设备之间的分配调度和碳循环设备的合理利用等方面的优化调度展开研究。

文献[37]建立了含CSP电站、抽水蓄能电站和CCS机组的多能源互补VPP低碳调度模型，基于粒子群算法分析不同运行模式下的VPP环境效益及经济性运行方案。文献[14]引入电解熔融碳酸盐设备捕集燃气轮机热电联产所产生的二氧化碳，并对电转气设备精细化建模，建立P2G和电解熔融碳酸盐协同的虚拟电厂低碳经济调度模型。文献[31][26][16][23][29]建立了含CCPP-P2G设备的VPP运行系统，构建包含多电厂、多储能在内的新型电力系统结构。文献[33]考虑系统源荷两侧低碳配合问题，提出一种考虑充放电策略的换电站与风电—碳捕集虚拟电厂协调低碳调度方法，建立以系统综合成本最优为目标函数的低碳经济调度模型。文献[20]确定虚拟电厂中包括风电、火电、水电等各个能源资源的产量和消耗量，采用多目标优化算法进行虚拟电厂中能源资源的分配和调度。文献[24]引入电制热设备地源热泵，协同P2G-CCS解耦热电联产“以热定电运行”约束，建立了考虑地源热泵、电转气（P2G）和碳捕集与封存（CCS）的热电联产虚拟电厂模型。文献[41]构建考虑时空耦合特性的虚拟电厂小水电低碳运行模型，通过聚合小水电的协同调度，实现各水电站库容调节能力的共享。文献[8]将富氧燃烧碳捕集技术引入虚拟电厂中，分析富氧燃烧碳捕集机组运行原理与能流特性，并建立数学模型。文献[27]引入CCPP-P2G联合运行模式，并加装储碳罐。文献[9]建立了含储液式碳捕集耦合电转气设备、燃气轮机、电热炉以及储能设备等能源设备的数学模型，使虚拟电厂可以实现碳循环，碳交易成本降低。

通过对以上文献的分析可知，考虑内部设备的优化调度模型，是以满足负荷需求，降低运行成本，最大化可再生能源利用，减少碳排放为优化目标，综合协同传统能源设备，可再生能源设备，碳循环设备，来实现虚拟电厂经济性与低碳性运行。

2.1.3 归纳总结

总结以上研究文献，可以对基于内部设备的优化调度做以下总结，见表4。

表4 基于内部设备优化调度的总结

Table.4 Overview of internal equipment-based optimization scheduling

内容描述	
调度对象	传统能源设备（燃气轮机、燃煤机组）、可再生能源设备（光伏、风电等）、储能设备、碳循环设备
优化目标	满足负荷需求，降低运行成本，最大化可再生能源利用，减少碳排放
典型约束	功率上下限、设备转换效率、启停时间及成本、碳排放限额
优化方法	混合整数线性规划（MILP）、非线性规划（NLP）、粒子群算法等
模型特点	强调设备间协同，兼顾经济性与低碳目标

2.2 不确定性处理的调度模型

2.2.1 概述

可再生能源出力具有不确定性^[49]，虚拟电厂调度过程中，不确定性的主要来源为可再生能源出力波动和负荷需求的不确定性。

2.2.2 研究现状

解决不确定性问题是虚拟电厂优化调度模型的热点，已有较多研究。

文献[15][32]充分考虑了新能源发电的不确定性，提出了用鲁棒优化方法，对两阶段鲁棒优化模型进行求解，文献[15]考虑在多重不确定下的优化调度，兼顾机组出力和运行效益，增强风险管理能力。文献[32]采用列约束生成算法和分布鲁棒，进行求解，能更好兼顾经济性与保守性。文献[31]建立了风电出力，光伏出力和负荷的概率模型，引入序列运算理论，对不确定性变量的概率分布进行离散化，采用机会约束规划处理风、光、负荷的不确定性，并运用可调鲁棒处理电动汽车的不确定性。文献[14][28][21]采用场景生成与削减法，通过概率分布刻画不确定性，合理设置生成与削减策略，可在调度中实现经济性，可靠性与计算可行性的统一。

2.2.3 不确定性处理方法对比分析

现有的研究，对于不确定性的处理有以下方法，见表5。

表 5 处理不确定性问题的方法对比

Tab.5 Comparison of approaches for handling uncertainty issues

方法类别	基本原 w	优点	缺点	典型应用
随机规划	将不确定参数视为随机变量, 通过概率分布描述其变化特性, 构建期望最优的调度方案	能够充分利用不确定性的概率信息, 获得期望意义下的最优解	依赖于准确的概率分布信息, 计算复杂度高	情景树方法 样本平均近似法 机会约束规划
鲁棒优化	考虑不确定参数的最坏情况, 构建在所有可能情况下均可行的调度方案	无需精确概率分布信息, 决策保守稳健	可能过于保守, 导致经济性降低	区间鲁棒优化 椭圆鲁棒优化 多阶段自适应鲁棒优化
分布式鲁棒优化	结合随机优化和鲁棒优化优点, 考虑不确定参数概率分布本身的不确定性。	平衡了随机优化和鲁棒优化的特点, 决策更加灵活	模型构建和求解较为复杂	矩信息鲁棒优化、 Wasserstein 距离鲁棒优化、 ϕ - 散度鲁棒优化
模糊优化	采用模糊集理论描述不确定性, 通过隶属度函数表达不确定参数的可能性分布。	适合处理语义模糊和主观不确定性	隶属度函数构建依赖专家经验	模糊目标规划 模糊约束规划 可能性规划
数据驱动	直接利用历史数据构建优化模型, 无需假设概率分布形式。	无需假设概率分布形式, 直接利用数据	依赖历史数据质量和代表性	基于场景的优化、机器学习辅助优化、分位数回归优化

2.3 多时间尺度优化

2.3.1 概述

多时间尺度优化, 是通过分层, 分阶段的调度策略, 协调不同响应速度的资源 (如秒级可控负荷, 分钟级储能, 小时级可再生能源出力预测), 提高虚拟电厂内部资源的协同效率, 确保内部电力供需的动态平衡。

2.3.2 研究现状

现有的文献从对 VPP 内多时间尺度响应展开研究。文献 [29] 提出了多目标的两阶段优化调度算法, 将长期优化与短期调度相结合, 满足不同时间尺度的优化调度。文献 [7] 采用随机优化和 IGDT 建立虚拟电厂日前—实时模型, 在机会寻求和风险规避两种策略下, 研究系统低碳经济运行调度。文献 [11] 研究日前和日内两阶段, 构建了考虑阶梯型碳交易的日前调度模型和考虑 CVaR 的日内调度模型, 能够有效降低碳排放量和度量风光不确定带来的风险, 使调度结果更具低碳性和实用

性。文献 [19] 提出了一种日前—日内—实时递进式多时间尺度优化调度流程, 通过日前长时优化调度,

日内—实时反馈校正调度, 环环相扣, 每环求出最优解, 确保系统整体调度的最优性能。

综上所述, 多时间尺度优化可以分为日前, 日内, 实时 3 个时间尺度。日前阶段可以基于长期预测数据, 制定全局低碳经济调度计划, 为后续阶段提供基准参考。日内阶段可以根据更新的预测数据和实际运行状态, 修正日前计划, 提升调度精度。实时阶段可以快速平抑功率波动确保供需实时平衡与电网安全。通过日前—日内—实时分层设计, 实现预测—修正—执行的闭环, 逐步逼近最优低碳经济运行状态。

2.3.3 日前—日内—实时分层模型

根据多时间尺度响应的研究, 可得到日前—日内—实时的分层模型, 如图 4 所示。

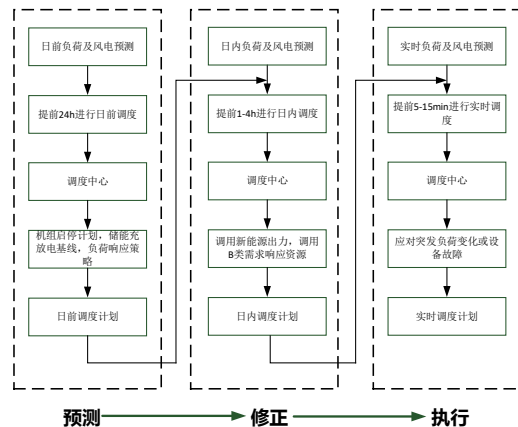


图 4 日前—日内—实时分层模型

Fig.4 Day-ahead – intraday – real-time hierarchical model

3 外部调度模型

3.1 基于市场交易机制的调度模型

3.1.1 概述

我国电力市场改革逐步推进, 虚拟电厂参与市场化交易不仅可以制定更优质的投标策略, 还能够更好的展开经济优化调度^[46]。基于市场交易机制的调度模型, 是指在电力市场框架下, 通过价格信号和经济激励机制等外部市场化手段, 间接调控分布式能源资源的高效利用和低碳发展, 优化交易策略以实现收益最大化或成本最小化。

3.1.2 研究现状

通过外部市场机制的调度对虚拟电厂进行优化调度, 现有的研究主要的机制有碳市场机制和电力市场—碳市场联动机制。

文献[15][31][14][38][26][16][32][24][30][35]主要从碳市场机制进行研究, 文献[15][31][14][38][26][30]引入阶梯式碳交易机制, 精细化约束电力调度, 制约系统碳排放量, 增强虚拟电厂的灵活性和经济性。文献[32]引入绿证—碳交易机制, 利用条件风险价值评估系统运行所面临的风险, 构建考虑绿证—碳交易机制的区域虚拟电厂优化模型, 进一步促进企业绿色转型意愿。文献[24]构建基于碳市场价格波动风险的 CVaR 模型, 能较精确的预测次日碳价, 规避虚拟电厂风险损失。文献[10]主要研究电力市场与碳市场联合机制, 研究 VPP 参与到电能市场, 调峰市场, 碳市场, 并引入 CVaR 衡量市场收益与风险的关系, 构建 VPP 奖惩阶梯型碳交易模型, 实现了碳电耦合。

对现有研究进行综合整理分析, 得出基于市场交易机制的虚拟电厂低碳经济调度模型, 是以利润最大化, 碳排放最小化为核心目标, 通过与电力市场、碳市场的交互, 利用阶梯式碳交易等碳市场机制和绿证—碳交易等电碳市场联动机制, 对虚拟电厂的外部调度进行优化, 引导虚拟电厂更好的参与到市场中。

3.2 考虑需求响应的调度模型

3.2.1 概述

需求响应是指用户根据电网的需求和价格信号, 主动调整自身的用电行为, 如削峰填谷、错峰用电, 以支持电网的平衡和优化运行^[47-48]。基于需求响应的优化调度, 是在建模过程中考虑多方面需求响应, 有效改变需求侧用户负荷分布, 实现削峰填谷或匹配可再生能源出力, 降低电网压力与碳排放^[50-52]。

3.2.2 研究现状

现有的建模研究, 引入多方面需求响应, 对模型进行优化调度, 引导用户调整用电计划, 优化了负荷曲线。文献[26][30]提出在负荷侧建立分时电价机制的价格型需求响应模型, 并通过用户满意度指标来平衡负荷波动。文献[22]将数据中心作为极具潜力的新型需求响应资源, 研究虚拟电厂数据中心的负荷时空可调特性, 通过任务调度和负

载迁移实现具有时间和空间的双重灵活性的需求响应。文献[39]提出一种“移出—汇总—分配”的负荷平移模型, 调整可平移负荷的时间分布, 实现经济性和低碳性的平衡。文献[34]提出基于聚合商—用户的双层规划的综合需求响应模型, 上层聚合商通过差异化激励价格引导用户调整用能, 下层用户收到上层的响应补贴, 依据具体价格决定自身的需求响应量。文献[27]在需求侧整合需求响应虚拟机组和电动汽车虚拟机组, 通过协议时段调度实现削峰填谷。文献[43]建立用户满意度量化指标, 限制需求响应负荷调用量, 充分挖掘用户响应积极性,

通过以上文献的总结分析, 得到以下结论: 考虑需求响应的虚拟电厂低碳经济调度模型, 是以供需平衡与低碳匹配峰谷平衡、提高新能源消纳为核心目标, 重点关注负荷侧灵活性管理, 需从用户满意度, 负荷控制, 电价等多个方面进行研究, 以提高终端用户调整自身用电行为的积极性, 但也同时面临用户响应不确定性的问题。

3.3 多虚拟电厂交互

3.3.1 概述

多虚拟电厂的交互是指多个 VPP 通过能源共享, 备用互助或市场竞价等方式, 实现协同合作和市场竞争, 使区域能源系统的经济性与可靠性提升, 在区域或跨区域电力系统中实现低碳经济目标的联合优化。

3.3.2 研究现状

现有的多虚拟电厂交互模型, 主要研究多虚拟电厂分配问题, VPP 联盟内部信息交换与隐私保护问题, 多虚拟电厂整体与个体利益等问题。

VPP 联盟间的合理公平分配, 能够提高各虚拟电厂的积极性, 保障联盟间的稳定, 应对如何分配问题, 不同学者提出不同解决方案。文献[12]提出的基于合作满意度的广义纳什议价方法, 通过量化 VPP 边际效益和电能占比对议价能力的影响, 使得分配结果更为合理。文献[36]构建了考虑风险和碳流动的改进的加权 Shapley 值虚拟电厂效益分配模型, 使效益分配方案更加公平合理。文献[25]通过博弈理论制定各部分电价, 提升各 VPP 间交互性, 降低 VPP 联盟总成本及各成员的成本, 实现 VPP 联盟的高效合作及收益的合理分配。文献[18]根据各 VPP 贡献程度大小, 采用非对称纳什议价模型进行更公平的利润分配。

多虚拟电厂之间的信息交互与隐私保护也是值得关注的问题^[54]。多虚拟电厂之间的信息交互是实现高效协同和资源优化的基础,但同时也带来了数据泄露、商业机密外泄、网络攻击等风险。因此,如何在保证信息有效交互的同时,保护各方的隐私和数据安全,是一个必须重点关注和解决的问题。文献[25]通过二分法结合ADMM算法求解多VPP博弈模型,使得各VPP在合作博弈仅交换电量交易及交易电价信息,能够有效保护各交易主体的隐私。

随着虚拟电厂的不断发展,会出现不同虚拟电厂分属于不同的利益主体,为进一步优化虚拟电厂之间的优化调度,文献[40]为兼顾联盟与个体利益,使用合并—分裂博弈算法求解优化模型,合并操作使联盟利益最优,分裂规则考虑个体利益。文献[13]提出了构建虚拟电厂运营平台,通过作为上层领导者的虚拟电厂运营平台与下层跟随者的各虚拟电厂的顺从博弈,降低整体的成本。

综上所述,虚拟电厂优化调度中基于多虚拟电厂的建模研究中,主要利用博弈论与协调策略来实现VPP联盟内的合理公平分配,通过通信与隐私保护技术,在保障数据安全前提下,实现实时信息共享,提高交互效率。

3.43 种外部调度优化调度模型对比分析

基于以上研究,对市场机制,需求响应,多虚拟电厂交互的3种外部优化调度模型进行总结对比,见表6。

表6 外部调度优化调度模型对比
Table.6 Comparison of external dispatch-oriented optimization scheduling models

	市场交易模型	需求响应模型	多VPP交互
核心目标	利润最大化、碳排放最小化	供需平衡与低碳匹配峰谷平衡、提高新能源消纳	区域能源系统优化或竞争胜出,市场竞争与碳减排协调
核心关注点	电力市场,碳市场	负荷侧灵活性管理	多VPP间合作或博弈
交互对象	电力市场,碳市场	终端用户	其他VPP或能源主体
关键技术	阶梯碳交易机制,电碳联合机制	负荷时间转移、负荷控制	博弈论、联合调度或竞争策略设计
典型收益来源	市场套利,碳交易	降低峰谷差,减少外购电	资源共享收益或市场份额提升
主要风险	价格波动,政策风险	用户响应不确定性	合作背叛或竞争过渡

4 结语

虚拟电厂的不断发展,有必要对虚拟电厂的低碳经济调度模型进行研究。

本文从内部调度与外部调度系统梳理现有的虚拟电厂低碳经济调度模型,针对现有的内部调度模型,从内部设备分配调度,不确定性处理,多时间尺度响应3个角度整理分析,针对现有的外部调度模型,从市场机制,需求响应,多虚拟电厂交互3个角度整理分析,总结归纳出不同优化调度模型的特点,对比分析处理不同优化调度问题的建模方法。

对未来虚拟电厂的低碳经济调度模型的展望归纳如下。

(1) 智能化: AI与物理模型的深度融合,提升动态环境下的决策效率。

(2) 市场化: 通过机制设计平衡多方利益,释放低碳经济潜力。

(3) 人本化: 以用户为中心,通过技术与商业模式创新推动能源民主化转型。

参考文献

- [1] 胡嘉诚,张宁,曹雨桐,胡存刚.分布式能源接入下虚拟电厂负荷优化调度决策[J].综合智慧能源,2025,47(1):62–69.
HU Jiacheng, ZHANG Ning, CAO Yutong, HU Cungang. Load optimization scheduling decision for virtual power plants with distributed energy accessed[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(1): 62–69.
- [2] 郭昆健,高赐威,严兴煜.新型电力系统下虚拟电厂研究综述与展望[J].电力需求侧管理,2024,26(5):49–57.
Guo Kunjian, Gao Ciwei, Yan Xingyu. Review and Prospect of Virtual Power Plant under New Power System[J]. Demand Side Management of Electric Power, 2024, 26(5):49–57.
- [3] 孙秋野,姚葭,王一帆.从虚拟电厂到真实电量:虚拟电厂研究综述与展望[J].发电技术,2023,44(5):583–601.
Sun Qiunye, Yao Jia, Wang Yifan. From Virtual Power Plant to Real Electricity: A Review and Prospect of Virtual Power Plant Research[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5):583–601.
- [4] 彭道刚,税纪钧,王丹豪,等.“双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J].发电技术,2023,44(5):602–615.
Peng Daogang, Shui Jijun, Wang Danhao, et al. Review of Virtual Power Plant Research under “Dual Carbon” Background[J]. Power Generation Technology, 2023,

- 44(5):602–615.
- [5] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806–2819. Zhang Zhigang, Kang Chongqing. Challenges and Prospects of Constructing New Power System under Carbon Neutrality Goals [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(8):2806–2819. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [6] 方燕琼,艾芊,范松丽.虚拟电厂研究综述[J].供用电,2016,33(4):8–13.DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2016.04.003. Fang Yanqiong, Ai Qian, Fan Songli. Review on Virtual Power Plant Research [J]. Power Supply and Utilization, 2016, 33(4):8–13. DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2016.04.003.
- [7] 王辉,周子澜,李欣,等.考虑电能量-调峰市场的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J/OL].电力系统及其自动化学报,1–10[2025-05-17].https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001615. Wang Hui, Zhou Zilan, Li Xin, et al. Multi-Time-Scale Optimal Scheduling of Virtual Power Plant Considering Electric Energy-Peak Regulation Market [J/OL]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 1–10 [2025-05-17]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001615.
- [8] 鲍刚,张永海,彭雄,等.考虑信息间隙决策理论和富氧燃烧碳捕集技术的虚拟电厂优化调度[J/OL].电测与仪表,1–12[2025-05-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20250317.1604.002.html. Bao Gang, Zhang Yonghai, Peng Xiong, et al. Optimal Scheduling of Virtual Power Plant Considering Information Gap Decision Theory and Oxy-Fuel Combustion Carbon Capture Technology [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1–12 [2025-05-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20250317.1604.002.html.
- [9] 何耀耀,王雅生.燃气掺氢和储液式CCS耦合P2G的虚拟电厂低碳经济调度[J/OL].发电技术,1–14[2025-05-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.tk.20250307.1119.002.html. He Yaoyao, Wang Yasheng. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Coupling Gas-Hydrogen Blending and Liquid Storage CCS-P2G [J/OL]. Power Generation Technology, 1–14 [2025-05-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.tk.20250307.1119.002.html.
- [10] 李明冰,李强,管西洋,等.市场环境下考虑多元用户侧资源协同的虚拟电厂低碳优化调度[J].中国电力,2025,58(2):66–76. Li Mingbing, Li Qiang, Guan Xiyang, et al. Low-Carbon Optimal Dispatch of Virtual Power Plant Considering Multi-User-Side Resource Coordination under Market Environment [J]. China Electric Power, 2025, 58(2):66–76.
- [11] 苏海锋,董鑫星,孙明皓.考虑阶梯型碳交易和条件风险价值的虚拟电厂经济调度[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1–11[2025-05-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20250115.1103.002.html. Su Haifeng, Dong Xinxing, Sun Minghao. Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Stepwise Carbon Trading and Conditional Value-at-Risk [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025: 1–11 [2025-05-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20250115.1103.002.html.
- [12] 李雪,张剑楠,王立峰,等.计及P2P交易的多虚拟电厂机会约束优化调度模型[J].电力需求侧管理,2025,27(1):14–20. Li Xue, Zhang Jiannan, Wang Lifeng, et al. Opportunity-Constrained Optimal Dispatch Model of Multiple Virtual Power Plants Considering P2P Trading [J]. Demand Side Management of Electric Power, 2025, 27(1):14–20.
- [13] 王博闻,张博涵,鲁宇,等.考虑碳交易的多虚拟电厂主从博弈协调策略[J].电力需求侧管理,2025,27(1):80–87. Wang Bowen, Zhang Bohan, Lu Yu, et al. Master-Slave Game Coordination Strategy of Multiple Virtual Power Plants Considering Carbon Trading [J]. Demand Side Management of Electric Power, 2025, 27(1):80–87.
- [14] 栗世玮,林剑波,李咸善,等.含电转气和电解熔融碳酸盐的虚拟电厂低碳经济调度[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(3):89–97.DOI:10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2025.03.013. Su Shiwei, Lin Jianbo, Li Xianshan, et al. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plants Including Power-to-Gas and Electrolytic Molten Carbonate Processes [J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2025, 47(3):89–97. DOI:10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2025.03.013.
- [15] 刘金朋,胡国松,彭锦淳,等.多能互补的虚拟电厂低碳-经济-鲁棒优化调度[J].中国电机工程学报,2024,44(24):9718–9731.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.242431. Liu Jinpeng, Hu Guosong, Peng Jinchun, et al. Low-Carbon-Economic-Robust Optimization Dispatch of Multi-Energy Complementary Virtual Power Plant [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2024, 44(24):9718–9731. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.242431.

- [16] 王秀云,崔本旺.阶梯型碳交易机制下考虑垃圾焚烧参与的虚拟电厂协调优化调度[J].东北电力大学学报,2024,44(6):101–111.DOI:10.19718/j.issn.1005–2992.2024–06–0101–11.
Wang Xiuyun, Cui Benwang. Coordinated Optimal Dispatch of Virtual Power Plant Considering Waste Incineration under Stepwise Carbon Trading Mechanism [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(6):101–111. DOI:10.19718/j.issn.1005–2992.2024–06–0101–11.
- [17] 吕游,毛乃新,秦瑞钧,等.考虑风光及负荷不确定性的虚拟电厂低碳经济调度[J].太阳能学报,2024,45(11):116–123.DOI:10.19912/j.0254–0096.tynxb.2023–1195.
Lü You, Mao Naixin, Qin Ruijun, et al. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Uncertainties in Wind, Solar and Load [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(11):116–123. DOI:10.19912/j.0254–0096.tynxb.2023–1195.
- [18] 朱瑛,郭健伟,周亦洲,等.考虑碳–绿证市场耦合的多虚拟电厂电–碳P2P交易模型[J].电力自动化设备,2025,45(1):51–58.DOI:10.16081/j.epae.202411019.
Zhu Ying, Guo Jianwei, Zhou Yizhou, et al. Multi-Virtual Power Plant Electric–Carbon P2P Trading Model Considering Carbon – Green Certificate Market Coupling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 45(1):51–58. DOI:10.16081/j.epae.202411019.
- [19] 于东民,孙钦斐,刘华南.考虑碳流计算的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J].南昌大学学报(理科版),2024,48(6):604–611,620.DOI:10.13764/j.cnki.ncdl.20241029.001.
Yu Dongmin, Sun Qinfei, Liu Huanan. Multi-Timescale Optimal Dispatch of Virtual Power Plant Considering Carbon Flow Calculation [J]. Journal of Nanchang University (Science Edition), 2024, 48(6):604–611,620. DOI:10.13764/j.cnki.ncdl.20241029.001.
- [20] 张良,栾翰章,杜华琛,等.考虑碳捕集与压缩液态二氧化碳储能的虚拟电厂低碳经济调度[J/OL].电网技术,1–10[2025–05–17].https://doi.org/10.13335/j.1000–3673.pst.2024.1404.
Zhang Liang, Luan Hanzhang, Du Huachen, et al. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Carbon Capture and Liquid CO₂ Compression Energy Storage [J/OL]. Electric Power Technology, 2025:1–10 [2025–05–17]. https://doi.org/10.13335/j.1000–3673.pst.2024.1404.
- [21] 张艺,刘蕊.考虑不确定性风险的虚拟电厂优化调度模型研究[J].智慧电力,2024,52(8):9–18.
Zhang Yi, Liu Rui. Research on Optimization Scheduling Model of Virtual Power Plant Considering Uncertainty Risk [J]. Smart Power, 2024, 52(8): 9–18.
- [22] 文浙宇,朱继忠,李盛林,等.基于时空协同的多数据中心虚拟电厂低碳经济调度策略[J].电力系统自动化,2024,48(18):56–65.
Wen Xiyu, Zhu Jizhong, Li Shenglin, et al. Low-Carbon Economic Scheduling Strategy of Multi-Data Center Virtual Power Plants Based on Spatiotemporal Coordination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 56–65.
- [23] 薛太林,杨海翔,张海霞,等.考虑P2G及碳捕集的热电联产虚拟电厂低碳优化调度[J].山东电力技术,2024,51(5):1–8.DOI:10.20097/j.cnki.issn1007–9904.2024.05.001.
Xue Tailin, Yang Haixiang, Zhang Haixia, et al. Low-Carbon Optimal Scheduling of Combined Heat and Power Virtual Power Plant Considering P2G and Carbon Capture [J]. Shandong Electric Power Technology, 2024, 51(5): 1–8. DOI:10.20097/j.cnki.issn1007–9904.2024.05.001.
- [24] 王秋杰,亓浩,谭洪,等.考虑碳市场风险的热电联产虚拟电厂低碳调度[J].电力自动化设备,2024,44(10):8–15. DOI:10.16081/j.epae.202404003.
Wang Qiujie, Qi Hao, Tan Hong, et al. Low-Carbon Scheduling of Combined Heat and Power Virtual Power Plant Considering Carbon Market Risk [J]. Automation of Electric Power Equipment, 2024, 44(10): 8–15. DOI:10.16081/j.epae.202404003.
- [25] 徐慧慧,田云飞,赵宇洋,等.考虑绿证–碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J].智慧电力,2024,52(3):1–7+16.
Xu Huihui, Tian Yunfei, Zhao Yuyang, et al. Hybrid Game Optimization Scheduling of Multiple Virtual Power Plants Considering Green Certificate–Carbon Trading [J]. Smart Power, 2024, 52(3): 1–7+16.
- [26] 赵振宇,李忻薪.基于阶梯碳交易的碳捕集电厂–电转气虚拟电厂低碳经济调度[J].发电技术,2023,44(6):769–780.
Zhao Zhenyu, Li Xinxin. Low-Carbon Economic Dispatch of Carbon Capture Power Plant–Power to Gas Virtual Power Plant Based on Stepwise Carbon Trading [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 769–780.
- [27] 王玉梅,周永鑫,张继钦.考虑需求侧的综合能源系统虚拟电厂低碳调度[J].电工技术,2023,(18):73–76. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.18.021.
Wang Yumei, Zhou Yongxin, Zhang Jiqin. Low-Carbon Dispatch of Integrated Energy System Virtual Power Plant Considering Demand Side [J]. Electrical Technology, 2023,

- (18): 73–76. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.18.021.
- [28] 税纪钧, 彭道刚, 宋炎侃, 等. 计及风光不确定性碳排放和碳惩罚的虚拟电厂优化调度策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 305–319. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.23–0840.
- Shui Jijun, Peng Daogang, Song Yankan, et al. Optimization Scheduling Strategy of Virtual Power Plant Considering Wind and Solar Uncertainty, Carbon Emissions and Carbon Penalty [J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 305–319. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.23–0840.
- [29] 贾成鹏, 董红星, 李敏. 考虑低碳的虚拟电厂多目标两阶段优化调度算法[J]. 电气开关, 2023, 61(4): 14–18+23.
- Jia Chengpeng, Dong Hongxing, Li Min. Multi-Objective Two-Stage Optimization Scheduling Algorithm of Low-Carbon Virtual Power Plant [J]. Electrical Switchgear, 2023, 61(4): 14–18+23.
- [30] 罗其华, 李平, 张少迪. 考虑需求响应和阶梯碳交易的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 浙江电力, 2023, 42(06): 51–59. DOI:10.19585/j.zjdl.202306006.
- Luo Qihua, Li Ping, Zhang Shaodi. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Demand Response and Stepwise Carbon Trading [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 51–59. DOI:10.19585/j.zjdl.202306006.
- [31] 彭思佳, 邢海军, 成明洋. 多重不确定环境下考虑阶梯型碳交易的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(12): 1571–1582. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.185.
- Peng Sijia, Xing Haijun, Cheng Mingyang. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Stepwise Carbon Trading under Multiple Uncertainties [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(12): 1571–1582. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.185.
- [32] 耿家璐. 考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度研究[D]. 昆明理工大学, 2023. DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2023.002353.
- Geng Jialu. Research on Distributed Robust Optimization Scheduling of Virtual Power Plant Considering Carbon-Green Certificate Trading Mechanism [D]. Kunming University of Science and Technology, 2023. DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2023.002353.
- [33] 李翼成, 赵钰婷, 崔杨, 等. 考虑充放电策略的换电站与风电-碳捕集虚拟电厂的低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 27–36. DOI:10.16081/j.epae.202301002.
- Li Yicheng, Zhao Yuting, Cui Yang, et al. Low-Carbon Economic Scheduling of Battery Swap Station and Wind-Power-Carbon Capture Virtual Power Plant Considering Charging and Discharging Strategy [J]. Automation of Electric Power Equipment, 2023, 43(6): 27–36. DOI:10.16081/j.epae.202301002.
- [34] 丛琳, 王冰, 孙毅, 等. 考虑碳排放和需求侧多能源响应的虚拟电厂低碳经济运行策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 12–21+53. DOI:10.19753/j.issn1001–1390.2024.11.002.
- Cong Lin, Wang Bing, Sun Yi, et al. Low-Carbon Economic Operation Strategy of Virtual Power Plant Considering Carbon Emissions and Demand-Side Multi-Energy Response [J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 12–21+53. DOI:10.19753/j.issn1001–1390.2024.11.002.
- [35] 周斌, 周静, 陈良亮. 碳交易机制下计及冷热电的虚拟电厂优化调度[J]. 电气自动化, 2022, 44(6): 67–70.
- Zhou Bin, Zhou Jing, Chen Liangliang. Optimization Dispatch of Virtual Power Plant Considering Heat, Cold and Electricity under Carbon Trading Mechanism [J]. Electrical Automation, 2022, 44(6): 67–70.
- [36] 葛晓琳, 曹旭丹, 李伶玲, 等. 考虑风险与碳流动的多虚拟电厂优化运行方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(08): 126–135. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.001152.
- Ge Xiaolin, Cao Xudan, Li Yiling, et al. Optimization operation method for multiple virtual power plants considering risk and carbon flow [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(8): 126–135. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001152.
- [37] 张明光, 赵文渊, 李鹏程. 多能源互补的虚拟电厂低碳调度研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022, (5): 76–83. DOI:10.19950/j.cnki.cn61–1121/th.2022.05.015.
- Zhang Mingguang, Zhao Wenyuan, Li Pengcheng. Low-carbon dispatch of virtual power plant with multi-energy complementarity [J]. Industrial Instruments and Automation Devices, 2022, (5): 76–83. DOI: 10.19950/j.cnki.cn61–1121/th.2022.05.015.
- [38] 徐韵, 徐耀杰, 杨嘉禹, 等. 基于阶梯碳交易的电转气虚拟电厂低碳经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 118–128. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.001113.
- Xu Yun, Xu Yaojie, Yang Jiayu, et al. Low-carbon economic dispatch of power-to-gas virtual power plant based on step carbon trading [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(7): 118–128. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001113.
- [39] 艾星贝, 闫庆友, 李金孟. 考虑负荷平移的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11418–11427.
- Ai Xingbei, Yan Qingyou, Li Jinmeng. Low-carbon economic dispatch of virtual power plant considering load shifting [J].

- Science Technology and Engineering, 2022, 22(26): 11418–11427.
- [40] 侯昊宇,葛晓琳,曹旭丹.考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(03):77–85.DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.001060.
- Hou Haoyu, Ge Xiaolin, Cao Xudan. Coalition game optimization method for multiple virtual power plants considering carbon trading [J]. Proceedings of the CSU–EPSA, 2023, 35(03): 77–85. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001060.
- [41] 夏翔,吴晓刚,陶毓锋,等.考虑小水电时空耦合特性的虚拟电厂低碳运行策略[J].浙江电力,2022,41(6):22–31. DOI:10.19585/j.zjdl.202206004.
- Xia Xiang, Wu Xiaogang, Tao Yufeng, et al. Low-carbon operation strategy of virtual power plant considering the spatiotemporal coupling characteristics of small hydropower [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6): 22–31. DOI: 10.19585/j.zjdl.202206004.
- [42] 李红霞,樊伟,李楠,等.考虑风光不确定性的电气互联虚拟电厂近零碳调度优化模型[J].电力建设,2020,41(9):10–19.
- Li Hongxia, Fan Wei, Li Nan, et al. Near-zero carbon dispatch optimization model of electrically interconnected virtual power plant considering wind and solar uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(09): 10–19.
- [43] 杨柳,张超,蒋勃,等.考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J].热力发电,2019,48(9):40–45. DOI:10.19666/j.rld.201902020.
- Yang Liu, Zhang Chao, Jiang Bo, et al. A combined low-carbon economic dispatching model for virtual power plant considering customer satisfaction index [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 40–45. DOI: 10.19666/j.rld.201902020.
- [44] 刘轩宇.电力系统低碳优化调度建模与碳交易策略研究[D].大连理工大学,2024.DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2024.004292.
- Liu Xuanyu. Research on low-carbon optimal dispatch modeling and carbon trading strategies for power systems [D]. Dalian University of Technology, 2024. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2024.004292.
- [45] Lu X, Liu Z, Ma L, et al. A robust optimization approach for optimal load dispatch of community energy hub [J]. Applied Energy, 2020, 259(C): 114195–114195.
- [46] 许星原,陈皓勇,黄宇翔,等.虚拟电厂市场化交易中的挑战、策略与关键技术[J].发电技术,2023,44(6):745–757.
- Xu Xingyuan, Chen Haoyong, Huang Yuxiang, et al. Challenges, strategies and key technologies for virtual power plants in market transactions [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 745–757.
- [47] 闫靖.虚拟电厂与需求响应技术的协同优化策略分析[J].电子技术,2025,54(3):146–147.
- Yan Jing. Analysis of collaborative optimization strategies between virtual power plants and demand response technologies [J]. Electronic Technology, 2025, 54(3): 146–147.
- [48] 陆苏青.虚拟电厂优化调度满足精细化需求响应的策略研究[J].电工技术,2024,(S2):606–608.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2024.26.206.
- Lu Suqing. Research on strategies for virtual power plant optimal dispatch to meet refined demand response [J]. Electrician Technology, 2024, (S2): 606–608. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2024.26.206.
- [49] WANG W, CHEN P, ZENG DL, et al. Electric vehicle fleet integration in a virtual power plant with large-scale wind power [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5924–5931.
- [50] 姜立兵,刘念,庞万,等.计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济运行分析[J].内蒙古电力技术,2024,42(5):28–37.DOI:10.19929/j.cnki.nmgdljs.2024.0064.
- JIANG Libing, LIU Nian, PANG Wan, et al. Analysis of low carbon economic operation of virtual power plants considering carbon trading and demand response [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(5): 28–37.
- [51] 祁兵,赵燕玲,杜亚彬,等.双碳背景下基于需求响应的虚拟电厂调度策略研究[J].内蒙古电力技术,2022,40(1):33–37.
- QI Bing, ZHAO Yanling, DU Yabin, et al. Research on Virtual Power Plant Dispatching Strategy Based on Demand Response Under Dual?Carbon Background [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(1): 33–37.
- [52] 杜预则,董海鹰.基于主从博弈的储能电站协同源荷消纳新能源调控策略[J].综合智慧能源,2023,45(11):1–9.
- DU Yuze, DONG Haiying. Research on the source-load-storage collaborative scheduling strategy for new energy accommodation based on Stackelberg game [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(11): 1–9.
- [53] 艾星贝,闫庆友.基于信息间隙决策的含碳捕集虚拟电厂经济调度优化模型[J].电力科学与工程,2022,38(05):68–78.
- Ai Xingbei, Yan Qingyou. Economic dispatching optimization model of CCPP virtual power plant based on IGDT [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(05): 68–78.

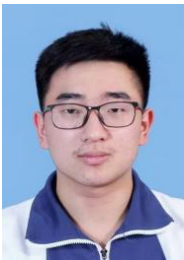
[54] 王保义,杨慧,张少敏.电力集合竞价交易环境下用户隐私保护方案研究 [J].电力科学与工程,2024,40(07):42-51.
Wang Baoyi, Yang Hui, Zhang Shaomin. Research on user privacy protection scheme in electricity call auction transaction system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2024,40(07):42-51.

收稿日期: 2025 年 5 月 8 日
作者简介:



宋烱帅

宋烱帅 (2005), 女, 大学本科在读, 研究方向为储能技术, 2949189776 @ qq. com。



马骥骋

马骥骋 (2004), 男, 大学本科在读, 研究方向为新型储能技术, mjc040906@163.com。



李建林

李建林 (1976), 男, 二级教授, 研究方向为大规模储能技术, dkyjl@163.com。