

碳中和与新型电力系统

Carbon Neutralization and New Power Systems



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

Level 1

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Liangzhong Yao

President of Smart Grid Research Institute, Wuhan University; Foreign academician of the European Academy of Sciences, China

Shuyong Chen

China Electric Power Research Institute, China

Editorial Board Member

Xin Fang

Mississippi State University, USA

Jianlin Li

Member of Academic Committee of North China University of Technology, China

Qiyu Chen

System Research Institute, China Electric Power Research Institute, China

Zhuomin Zhu

Shanghai Dianxiang Information Technology, China

Wei Sheng

Henan Polytechnic University, China

Yu Zhang

Xi'an Togeek Informantion Technology CO., Ltd. China

Yiran Rao

Chairman of Shenzhen Kezhong Cloud Technology, China

Jinghua Li

School of Electrical Engineering, Guangxi University, China

Luoping Zhang

Tsinghua University researcher, China



碳中和与新型电力系统

Carbon Neutralization and New Power Systems

第3卷 第2期 2025年6月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.
主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.
编 辑 《碳中和与新型电力系统》编辑部

ISSN(O): 2995-4479

ISSN(P): 2995-4436

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

001	虚拟电厂低碳经济优化调度模型综述	宋畑帅, 马骥骋, 李雅欣, 徐玉平, 李建林
	A Review of Low-Carbon Economic Optimization Scheduling Models for Virtual Power Plants	SONG Tianshuai, MA Jicheng, LI Yaxin, XU Yuping, LI Jianlin
013	考虑可再生能源绿证交易的 LSTNet 虚拟电厂负荷预测	张宜然, 姜晓霞, 白宁, 高康伟, 李芳菲, 黄一峻, 张艳灵
	Virtual Power Plant Load Forecasting Based on LSTNet Considering Tradable Green Certificates	ZHANG Yiran, JIANG Xiaoxia, BAI Ning, GAO Kangwei, LI Fangfei, HUANG Yijun, ZHANG Yanling
021	首波开断技术在新能源电压暂降治理中的应用与工程实践	刘海, 邵久柠, 宋廷良, 童雪燕, 杨新州
	Engineering Practice Research on Mitigating Voltage Sag with First-Wave Breaking Technology	LIU Hai, SHAO Jiuning, SONG Yanliang, TONG Xueyan, YANG Xinzhou
028	虚拟电厂低碳能源转型政策机制与实践	张海龙
	Policy Mechanism and Practice of Low-Carbon Energy Transformation of Virtual Power Plant	ZHANG Hailong

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。

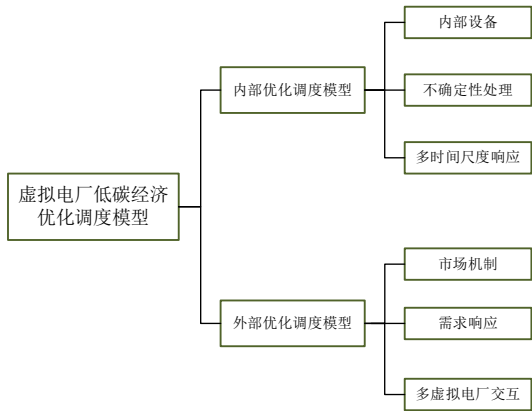


图1 虚拟电厂低碳经济优化调度模型分类
Fig.1 Classification of optimization scheduling models for low-carbon economy in virtual power plants

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。

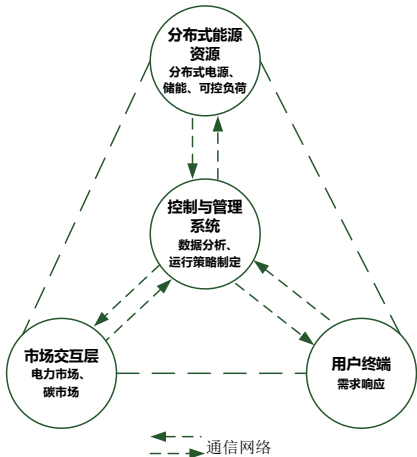


图2 虚拟电厂组成结构
Fig.2 Composition structure of virtual power plants

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技术和算法，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。

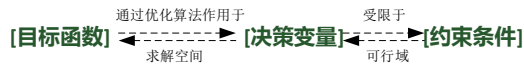


图3 优化调度建模三要素

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。

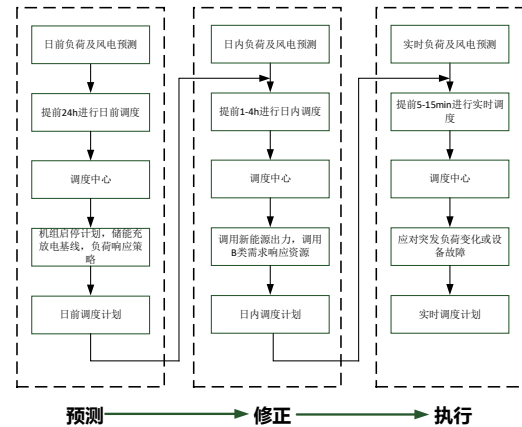


图 4 日前—日内—实时分层模型

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 CCGP virtual power plant based on IGDT [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(05): 68–78.

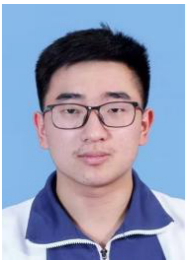
[54] 王保义,杨慧,张少敏.电力集合竞价交易环境下用户隐私保护方案研究 [J].电力科学与工程 ,2024,40(07):42-51.
Wang Baoyi, Yang Hui, Zhang Shaomin. Research on user privacy protection scheme in electricity call auction transaction system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2024,40(07):42-51.

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，dkyljl@163.com。

DOI: 10.61369/NPS.2025020002

考虑可再生能源绿证交易的 LSTNet 虚拟 电厂负荷预测

张宜然^{1,2}, 姜晓霞^{1,2}, 白宁^{1,2}, 高康伟^{1,2}, 李芳菲^{1,2}, 黄一峻^{1,2}, 张艳灵^{1,2}

(1. 国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 国家能源用户侧储能创新研发中心, 北京 102209)

Virtual Power Plant Load Forecasting Based on LSTNet Considering Tradable Green Certificates

ZHANG Yiran^{1,2}, JIANG Xiaoxia^{1,2}, BAI Ning^{1,2}, GAO Kangwei^{1,2}, LI Fangfei^{1,2}, HUANG Yijun^{1,2},
ZHANG Yanling^{1,2}

(1. SPIC Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209;

2. National Energy User-Side Energy Storage Innovation and R&D Center, Beijing 102209)

摘要:【目的】旨在解决可再生能源绿证交易背景下虚拟电厂中长期负荷预测的精度问题, 针对数据缺失、算法运行时间长等挑战, 重点探究绿证交易对负荷变化的影响机理, 并优化预测模型以提升精准度。【方法】首先通过皮尔逊相关性分析验证负荷与非同步发电瞬时渗透率(SNSP)的中等相关性(相关系数 0.410), 证明绿证交易对负荷存在影响; 利用密度聚类算法(DBSCAN)提取负荷季节性特征(分为春夏/秋冬两类), 缩减训练数据规模。在此基础上, 提出 DBSCAN-LSTNet 混合预测模型: 采用一维 CNN 提取短期时间序列特征, 结合 GRU 和 Skip-GRU 捕获长周期依赖关系, 并通过自回归模块(AR)解决非线性特征导致的尺度敏感性问题。以 SMAPE 为评价指标, 使用北爱尔兰 2018 年-2020 年负荷数据进行训练和验算, 并引入 SNSP 表征绿证交易强度。【结果】实验表明: (1) 考虑绿证交易因素(SNSP)的 DBSCAN-LSTNet 模型误差降至 2.56% (未考虑时为 6.03%), 显著优于传统的 LSTM (3.91%) 和 SVM (23.45%); (2) 绿证因素可使预测误差平均降低 4%; (3) DBSCAN 有效缩减数据规模, 模型训练效率提升, 且对离群点具有鲁棒性; (4) LSTNet 融合线性和非线性预测, 比单一 LSTM 具有更高精度与鲁棒性。【结论】虚拟电厂负荷预测需纳入绿证交易等市场因素。所提 DBSCAN-LSTNet 模型通过特征降维和混合神经网络结构, 实现了高精度中长期负荷预测(SMAPE \leq 2.56%), 为电力市场决策提供可靠依据。

关键词: 虚拟电厂; 中长期负荷预测; 绿证交易; 神经网络;

DBSCAN-LSTNet 混合预测模型

ABSTRACT:[Introduction] The purpose of this paper is to solve the accuracy problem of medium and long-term load forecasting of virtual power plants under the background of renewable energy green certificate trading. In view of the challenges such as data loss and long running time of the algorithm, this paper focuses on exploring the influence mechanism of green certificate trading on load changes, and optimizes the prediction model to improve the accuracy. [Method] Firstly, Pearson correlation analysis is used to verify the moderate correlation (correlation coefficient of 0.410) between load and non-synchronous generation instantaneous penetration (SNSP), which proves that green certificate trading has an impact on load. Then, the density clustering algorithm (DBSCAN) is used to extract the seasonal characteristics of the load (divided into spring and summer / autumn and winter), and the scale of the training data is reduced. On this basis, a DBSCAN-LSTNet hybrid prediction model is proposed: one-dimensional CNN is used to extract short-term time series features, combined with GRU and Skip-GRU to capture long-period dependencies, and the auto-regressive module (AR) is used to solve the scale sensitivity problem caused by nonlinear features. Taking SMAPE as the evaluation index, the load data of Northern Ireland from 2018 to 2020 are used for training and checking, and SNSP is introduced to characterize the green certificate trading intensity. [Results] Experiments show that: (1) The error of DBSCAN-LSTNet model considering the green

基金项目: 北京市自然科学基金 (L242008)。

Project Supported by Beijing Natural Science Foundation (L242008).

certificate trading factor (SNSP) is reduced to 2.56% (6.03% when not considered), which is significantly better than traditional LSTM (3.91%) and SVM (23.45%). (2) The green card factor can reduce the prediction error by an average of 4%; (3) DBSCAN-AN effectively reduces the data size, improves the efficiency of model training, and is robust to outliers. (4) LSTNet combines linear and nonlinear prediction, which has higher accuracy and robustness than single LSTM. [Conclusion] The virtual power plant load forecasting needs to include market factors such as green certificate trading. The proposed DBSCAN-LSTNet model realizes high precision medium and long-term load forecasting ($\text{SMAPE} \leq 2.56\%$) through feature dimension reduction and hybrid neural network structure, which provides a reliable basis for power market decision-making.

KEY WORDS: virtual power plant; mid-long term load forecasting; tradable green certificates; neural network; DBSCAN-LSTNet hybrid prediction model

引言

当前,在我国能源体系中,可再生能源的地位日益凸显,但其波动性和间歇性也给电力系统的运行带来了挑战。为增强电力系统的稳定性,文献[1-3]分别提出了随机、鲁棒和分布鲁棒的优化方法。由于分布式可再生能源容量小,不确定性较强,为对其进行科学管理,学者们提出了三种能源市场模式:生产者到电网、点对点以及基础社区方案^[4]。最初的虚拟电厂即虚拟公用设施,其灵感来自基础社区方案,它集成了不同地理位置的能源与消费者,具有组织性和灵活性,可摆脱电网结构的限制^[5]。虚拟电厂最具有吸引力的功能在于聚合分布式资源参与电力市场和辅助服务市场运行,为电网的输、配方面提供管理及辅助服务。

能源负荷预测是电力市场主体优化决策的重要依据。文献[6]提出了基于经验模式分解的风光发电预测,并开发出基于经济运行的虚拟电厂负荷调度策略。为加强数据安全,文献[7]提出了一种虚拟电厂分散预测提供算法,每个子区域的消费者只购买当地的能源预测。针对小型光伏太阳能系统,文献[8]介绍了一种混合辐照强度预测方法,旨在促进光伏集成到虚拟电厂中。需求预测方面,文献[9]提出了一个虚拟电厂的多智能体系统模型,用于终端用户分类能源需求协同预测,但是并未考虑市场环境对需求变化的影响。文献[10]分析了

电价对负荷的影响,提出了基于长短期记忆循环网络的负荷预测模型。

近年来,深度学习已经成为许多领域中最活跃的技术之一。与浅层学习不同,深度学习通常是指神经网络的多层叠加,依靠随机优化来执行机器学习^[11]。文献[12]详细介绍了长短期记忆网络(long short-term memory,LSTM),并将其运用于短期住宅负荷预测。文献[13]提出了一种在负荷聚合商模式下考虑需求响应的LSTM超短期负荷预测方法。文献[14]提出了理论导向的深度学习负荷预测模型(theory-guided deep-learning load forecasting, TgDLF),与LSTM相比有较高的准确性,而且针对数据噪声具有鲁棒性。文献[15]提出了一种基于深度残差网络的短期电力负荷预测模型,并用两阶段集成策略提高泛化能力。为捕捉更长期依赖信息,文献[16]提出了长短时记忆时序网络(long-and short-term time-series network,LSTNet),与LSTM不同的是,LSTNet能够成功捕获数据中的短\长期重复模式,并结合线性和非线性模型进行准确预测,不仅适用于短期负荷预测,在中长期预测中也有较高的优势。

为促进可再生能源消纳,各国提出建立考虑配额制及绿色证书的电力现货市场体系^[17-18]。与传统上网电价补贴相比,可再生能源组合标准(renewable portfolio standard,RPS)和可交易的绿色证书(tradable green certificate,TGC)是另一种选择^[19],绿证市场的收入可缓解能源市场的利润压力。为探究绿证交易背景下虚拟电厂负荷预测变化,和解决在研究中发现的数据个别缺失及算法运行时间长等问题,本文首先分析了负荷与绿证影响因素的相关性和负荷的季节性变化,提取负荷季节特征之后提出基于密度的聚类算法(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)和长短时记忆时序网络(LSTNet)的虚拟电厂负荷预测模型,打破传统神经网络预测壁垒,引入可再生能源绿证交易相关因素,并结合算例进行分析。预测结果证实了虚拟电厂负荷预测应跟随市场发展,考虑绿证交易相关因素,同时验证了该模型在虚拟电厂中长期负荷预测方面精准度高,精简数据信息等特点。

1 虚拟电厂负荷预测分析

1.1 负荷与绿证影响因素相关性分析

研究发现,配额定可降低消费者的购电成本并扩大可再生能源电站的部署规模^[20],绿证交易可降低可再生能源发电成本^[21-22]。由此推断,虚拟电厂作为分布式能源协调管理系统以及绿证交易的主力军,其负荷也与绿证密切相关。本研究采用非同步发电瞬时渗透率(system non-synchronous penetration, SNSP)表示绿证对负荷的影响程度。选取2020年北爱尔兰能源系统3月、4月稳态负荷及发电量、SNSP月移动平均数据样本进行皮尔逊相关性分析。

由表1可知,负荷样本和发电量样本相关系数为0.625,负荷样本与SNSP样本相关系数为0.410,说明负荷与总发电量及SNSP为中等程度相关,在虚拟电厂负荷预测当中,应该考虑加入SNSP因素。

表1 负荷与总发电量、SNSP 相关性分析

Tab.1 Correlation analysis between load, total power generation and SNSP

模型样本	相关系数
负荷和总发电量	0.625
负荷和 SNSP	0.410

1.2 负荷季节性分析

气候变化影响绿证价格大小^[23],冬春季节光照强度小,在电能量市场中,其光伏发电收益较少,为达到预期收益,需提高光伏绿证价格,海上风电与之相反。同样,负荷大小也受气候变化影响。寒冷地区冬季取暖照明等设施使用时间长,炎热地区夏季空调用电量。因此,进行负荷季节性分析至关重要。

为证明上述推断,本文使用一种基于密度的聚类算法(DBSCAN)^[24]进行分析。与K-means相比,DBSCAN对离群点有较好的鲁棒性,甚至可以检测离群点。将DBSCAN应用于北爱尔兰能源系统2018年全年负荷数据,样本完整并已完成异常数据处理,5月份负荷日剖面图如图1所示。其中负荷分为2类,以1类曲线为主,紫色表示离群值。每日模式曲线的表现一致,负荷高峰期集中在17时左右,低谷期集中在5时左右。

北爱尔兰属于温带海洋性气候,3月—5月为

春季,6月—8月为夏季,秋季9月—11月,冬季12月—2月。聚类结果可将样本按照季节分为两类,其中春夏季负荷为1类负荷,秋冬季负荷为0类负荷。取1月、4月、6月、11月负荷聚类热点图如图2中(a)(b)(c)(d)所示,其结果代表冬春夏秋四季的负荷分布。

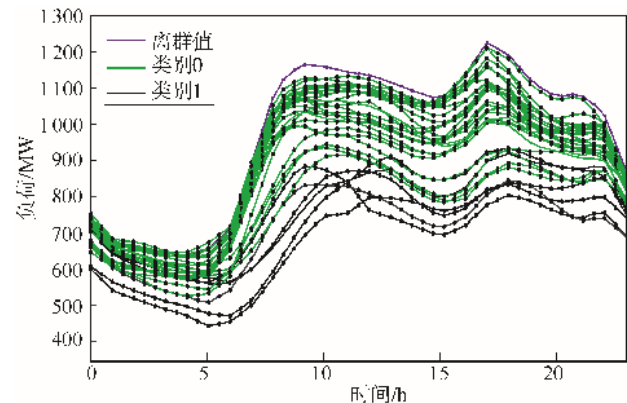


图1 2018年5月负荷数据聚类结果

Fig.1 Clustering results of load in May 2018

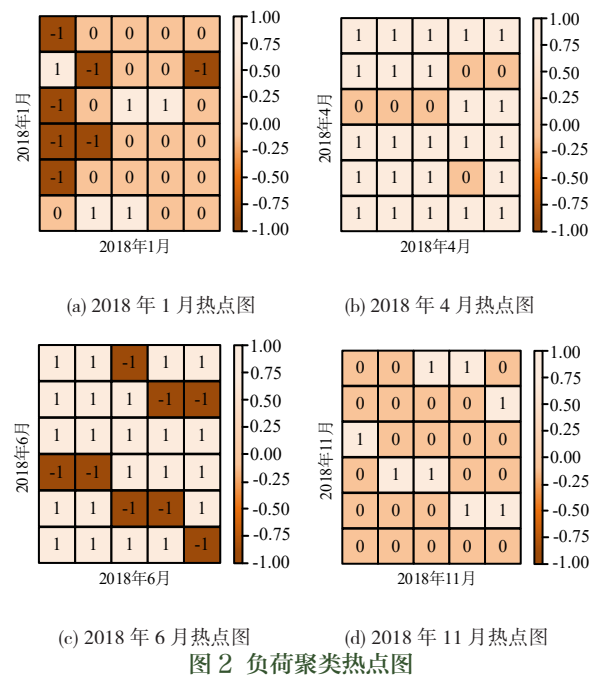


图2 负荷聚类热点图

Fig.2 Hotspot map of load clustering

图3为2018年北爱尔兰能源系统负荷低谷和高峰曲线图,图中显示了负荷的低谷与高峰差异大小以及四季负荷高低起伏的变化趋势,与热点图相对应。

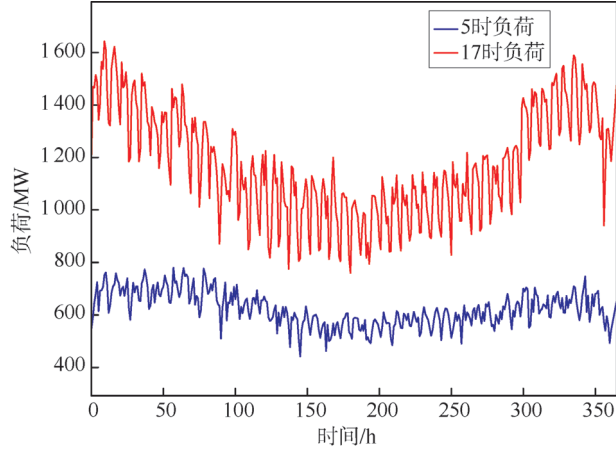


图3 2018年全年5时和17时负荷分布（低谷和高峰）
Fig.3 Annual load distribution at 5:00 and 17:00 in 2018 (trough and peak)

由于通信传输存在误差，常导致数据缺失或者异常，为负荷预测增添难度，同时大量数据的样本训练耗费时间。因此，运用 DBSCAN 从输入剖面数据中提取负荷季节特征，缩减训练规模。本研究着眼于虚拟电厂负荷预测模型的提出与绿证交易对负荷的影响，并未涉及天气数据等因素。

2 虚拟电厂负荷预测

2.1 基于 LSTNet 虚拟电厂负荷预测模型

LSTNet 虚拟电厂负荷预测模型由多种类型神经网络复合而成，结构如图4所示。

DBSCAN 提取负荷季节性特征之后，与其他数据特征结合，输入到一维 CNN 中。为提取时间序列维度上的短期记忆模式以及变量之间的局部依赖关系，CNN 只留下核心卷积层。其中滤波器宽度为 ω ，高度为 n 。第 k 个滤波器扫过输入矩阵 X 并产生隐藏向量 h_k 。ReLU 为隐藏状态更新激活函数，实验发现，与 tanh 函数相比，ReLU 性能更可靠，梯度更容易进行反向传播。

$$h_k = \text{ReLU}(\omega_k * X + b_k) \quad (1)$$

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x) \quad (2)$$

数据从卷积层输出的同时输入到 GRU 的递归层以及 Skip-GRU 的递归层。由于梯度消失问题，GRU 在实际应用中往往不能捕获时间序列中

超长期的记忆信息。因此设计了一个具有时间跳跃连接特征的递归神经结构，以扩展记忆信息流的时间跨度，从而简化权值优化过程。具体的操作是在当前时刻隐藏单元状态与相邻周期中同一阶段

的隐藏单元状态之间增添 skip-links，即参数 p ， p 为跳跃过的隐藏单元格数量。此时，Skip-GRU 中隐藏状态即为 h_{t-p} ， p 值需根据场景不同进行调优，实验表明，调优后的 p 也可以显著提高模型性能，而且 p 的长度很容易扩展，符合实际应用要求。GRU 和 Skip-GRU 的连接是通过 Dense 层进行组合。Dense 层的输入包括当前 t 时刻 GRU 隐藏单元状态 h_t^R ，以及 $t-p+1$ 时刻到 t 时刻 Skip-GRU 中 p 个隐藏单元状态。 h_t^D 为上述模型在当前时刻 t 的预测结果。

$$h_t^D = w_R h_t^R + \sum_{i=1}^{p-1} w_i^S h_{t-i}^S + b \quad (3)$$

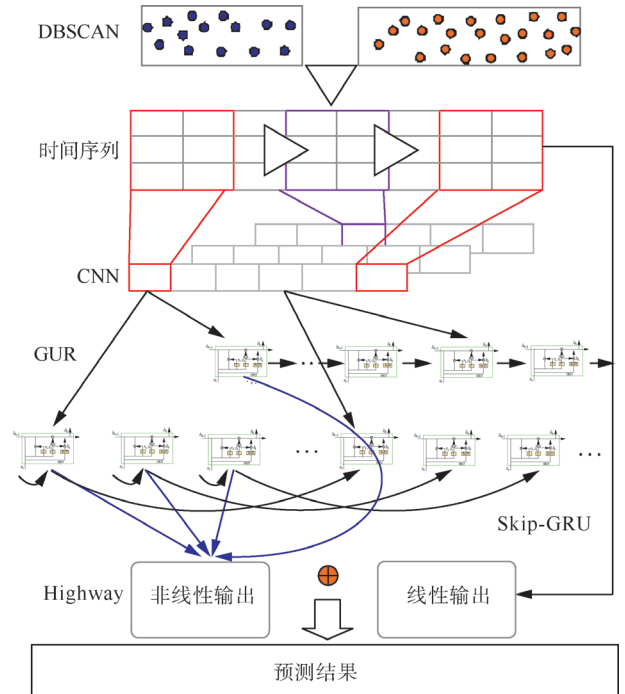


图4 基于 LSTNet 虚拟电厂负荷预测模型
Fig.4 Virtual power plant load forecasting model based LSTNet

由于卷积层和递归网络的非线性特征，传统神经网络模型有一个共同的缺点就是输出对输入尺度比例的不敏感性，显著降低了预测精度。为解决这一缺陷，LSTNet 的最终预测分解为线性预测部分和包含重复模式非线性预测部分，其本质与 Highway 网相似。线性预测部分采用自回归模型 (AR) 作为分量，分析原始输入数据特征并得出预测结果 $h_{t,i}^L$ 。

$$h_{t,i}^L = \sum_{k=0}^{qar-1} w_k^{ar} y_{t-k,i} + b_{ar} \quad (4)$$

将主模型输出与 AR 模型输出相加,并结合 sigmoid 函数,得到最终基于 LSTNet 虚拟电厂负荷预测模型预测结果 \hat{Y}_t 。

$$\hat{Y}_t = \sigma(h_t^D + h_t^L) \quad (5)$$

2.2 评价标准

本文采用 SMAPE 作为误差评价标准,式 (6) 为计算方法,其中, x_i 为实际值, y_i 为预测值, n 为预测值总数。

$$SMAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{(|x_i| + |y_i|) / 2} \quad (6)$$

SMAPE 作为误差评价标准的优点之一是可以更容易地以统计方式分析输出,不依赖于数据的规模,因为它加强了对称性和显示高度偏差的特性。SMAPE 取值范围为 [0~100]%, 其中 0 表示两种模式的绝对匹配,即存在点对点匹配,不存在误差,而 100% 表示两种模式的绝对不相似。因此,我们看到 SMAPE 系数有一个以百分比表示的上界和下界,更容易解释。

3 算例分析

本算例分析了绿证对虚拟电厂中长期负荷预测的影响,并将 DBSCAN 与 LSTNet 相结合,观察其对于解决数据量繁杂、相关因素缺失等问题的改善效果。首先,建立了 DBSCAN-LSTNet 预测模型与原始 LSTNet 对比。然后,引入绿证相关因素,分析其对结果的影响。最后,针对目前其他先进机器学习算法,分析所提模型优缺点。

3.1 预测参数设置

本文选取北爱尔兰能源系统 2018 年—2020 年负荷数据。对于 LSTNet,设置 2018 年至 2019 年共 17 448 条数据为训练集,2020 年 1 月—4 月负荷共 2 880 条数据为验证集。对于 DBSCAN-LSTNet,根据 1.2 节所提取的负荷特征,对原始数据进行缩减,分别取 2018 年和 2019 年的 4 月—9 月负荷共 8 784 条数据为训练集,2020 年 4 月负荷共 720 条数据为验证集。

模型基于 python 软件平台,采用 Pytorch 动态框架进行仿真模拟。与 Tensorflow 相比,pytorch 为动态框架。这种运算方式较为灵活,可有效提高计算效率。对于 LSTNet,需重点关注输入输出数据的维度是否相呼应,其直接影响预测结果

的大小。本文为观测不同参数大小对预测结果的影响,在其他数值不变的情况下,设置时间戳长度 History_len 分别为 48、72 和 96,粒度为小时 (h)。其余网络输出维度如表 2 所示。

表 2 LSTNet 模型参数

Tab.2 LSTNet model parameter

算法	维度	指标
LSTNet/DBSCAN-LSTNet	History_len	48/72/96
	HidC	32
	HidR	64
	Skip1	4
	Skip2	24

3.2 预测结果与分析

除此之外,也有很多先进的机器学习方法用于负荷预测。例如传统的 SVM、BPNN 以及目前研究广泛的 LSTM,本文将采用这几种算法与 LSTNet 进行对比。

对于 LSTNet 和 LSTM,本研究测试了多个背景下不同时间步长的相关结果。其中,LSTNet 研究了过去 2 日、3 日、4 日的场景变化,LSTM 时间步分别设置成 1、2、4、8 和 12。由于 Dropout 具有随机性,预测结果有些许差异,因此每个场景进行 10 次重复试验,计算其对应的 SMAPE,预测时间跨度为 1 个月,取 10 次误差平均值作为最终预测误差结果,如表 3 所示。参照经验法则,当 SMAPE 值在 10% 阈值以下波动时,预测性能将达到最佳水平^[25],在 10% 和 20% 阈值之间的值表明预测性能被认为在可接受的范围内。文献 [26] 利用南非公用事业公司的配电所视在功率,对南非配电网进行两周负荷预测,LSTM 模型可实现 SMAPE 为 3.3% 的误差精准。

表 3 LSTNet 模型参数

Tab.2 LSTNet model parameter

算法	SMAPE/% (考虑 SNSP)	SMAPE/% (不考虑 SNSP)
DBSCAN-LSTNet-2 日	2.568 3	6.036 2
DBSCAN-LSTNet-3 日	2.589 3	6.199 9
DBSCAN-LSTNet-4 日	2.600 4	6.834 9
LSTNet-2 日	3.085 2	7.402 2
LSTNet-3 日	3.039 5	7.102 6
LSTNet-4 日	2.791 8	7.106 5
LSTM-1 时间步	6.167 2	6.505 8
LSTM-2 时间步	7.855 4	5.212 6

LSTM-4 时间步	3.910 9	5.371 4
LSTM-8 时间步	4.555 4	5.08
LSTM-12 时间步	5.034 9	6.171 6
BPNN	17.337 6	21.185 8
SVM	17.318	23.447

结果显示, 几种算法均可以达到较为理想的预测效果。对于月负荷预测, LSTM 可达到 3.9% 的误差, 与文献 [26] 中负荷预测精度相当, LSTNet 结果优于 LSTM, 误差可达到 2.8%。值得注意的是, 以上误差都是在考虑绿证交易条件下得出的。利用 DBSCAN 聚类提取季节特征, 与 LSTNet 算法结合进行预测, 误差可达 2.56%。为清晰观察不同场景下的预测结果, 本文截取了 3 日负荷预测曲线, 如图 5 所示。

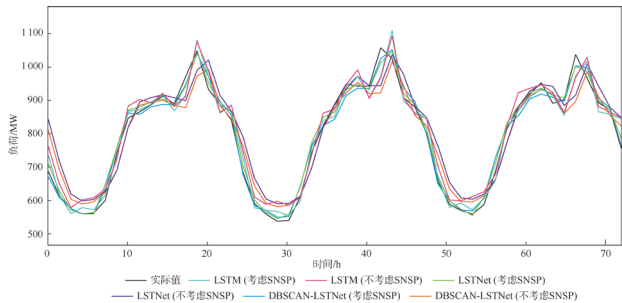


图 5 不同场景下负荷预测曲线
Fig.4 Load forecasting curves in different scenarios

4 结语

本文试图解决可再生能源绿证交易发展背景下虚拟电厂中长期负荷预测问题, 并针对原始数据量繁杂、深度学习无用信息冗余问题进行分析处理。首先用 DBSCAN 对负荷进行聚类, 分析可知绿证价格受气候变化影响, 负荷同样也随着季节波动, 其季节性特征明显。利用特征结果, 提取有效月份负荷作为输入数据进行深度学习预测, 可为神经网络剔除无用信息, 优化权值更新, 解决数据量繁杂问题, 同时减少计算时间, 改善算法流程, 提高预测精准度。之后将其与目前较为新颖的神经网络算法结合, 提出 DBSCAN-LSTNet 虚拟电厂负荷预测模型, 并分析可再生能源绿证交易强度对负荷预测的影响。

结果表明, 文章所提模型优于以往经验评价标准, 同时考虑绿证交易因素进行负荷预测可使误差降低 4% 左右。现如今, 实现“碳中和”目标刻不容缓, 在电力市场变革的大环境下, 需要对虚拟电

厂负荷预测方法进行更新。由算例数据也可看出, 将 DBSCAN 与深度学习算法结合可有效改善预测误差, 证实了上述结论的正确性。LSTNet 算法可捕捉短期和更长期时间序列信息, 并与线性回归结合, 相对于 LSTM 算法具有优越鲁棒性, 可考虑其进行广泛使用。

需要注意的是, 本文只考虑了绿证交易强度对负荷预测的影响, 虚拟电厂结构复杂, 影响因素众多, 多时空耦合预测模型值得不断探究。

参考文献

[1] XU X Y,YAN Z,SHAHIDEHPOUR M,et al.Data-Driven Risk-Averse Two-Stage Optimal Stochastic Scheduling of Energy and Reserve with Correlated Wind Power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020,11(1): 436-447.

[2] WANG C,LIU F,WANG J H,et al.Robust Risk-Constrained Unit Commitment with Large-Scale Wind Generation:an Adjustable Uncertainty Set Approach[J].IEEE Transactions on Power Systems,2017,32 (1):723-733.

[3] WEI W,LIU F,MEI S W.Distributionally Robust Co-Optimization of Energy and Reserve Dispatch[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2016,7(1):289-300.

[4] PARAG Y,SOVACOL B K.Electricity Market Design for the Prosumer Era[J].Nature Energy,2016,1:16032.

[5] 谈金晶,李扬.多能源协同的交易模式研究综述[J].中国电机工程学报.2019,39(22):6483-6497. TAN Jinjing,LI Yang.Review on Transaction Mode in Multi-Energy Collaborative Market[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6483-6497.[6] TASICIKARAOGLU A,ERDINC O,UZUNOGLU M,et al.An Adaptive Load Dispatching and Forecasting Strategy for a Virtual Power Plant Including Renewable Energy Conversion Units[J]. Applied Energy,2014,119: 445-453.

[7] CHEN Y,LI T X,ZHAO C H,et al.Decentralized Provision of Renewable Predictions within a Virtual Power Plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36 (3):2652-2662.

[8] MORENO G,MARTIN P,SANTOS C,et al.A Day-Ahead Irradiance Forecasting Strategy for the Integration of Photovoltaic Systems in Virtual Power Plants[J].IEEE Access,2020,8:204226-204240.

[9] HERNANDEZ L,BALADRON C,AGUIAR J M,et al.A Multi-Agent System Architecture for Smart Grid Management and Forecasting of Energy Demand in Virtual Power Plants[J].IEEE Communications Magazine,2013, 51(1):106-113.

- [10] 李鹏,何帅,韩鹏飞,等.基于长短期记忆的实时电价条件下智能电网短期负荷预测[J].电网技术,2018,42(12):4045-4052.
LI Peng,HE Shuai,HAN Pengfei,et al.Short-Term Load Forecasting of Smart Grid Based on Long-Short-Term Memory Recurrent Neural Networks in Condition of Real-Time Electricity Price[J].Power System Technology,2018,42(12):4045-4052.
- [11] BENGIO Y,COURVILLE A,VINCENT P.Representation Learning:a Review and New Perspectives[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2013,35(8):1798-1828.
- [12] KONG W C,DONG Z Y,JIA Y W,et al.Short-Term Residential Load Forecasting Based on LSTM Recurrent Neural Network[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(1):841-851.
- [13] 郭亦宗,冯斌,岳铂雄,等.负荷聚合商业模式下考虑需求响应的超短期负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(1):79-87.
GUO Yizong,FENG Bin,YUE Boxiong,et al.Ultra-Short-Term Load Forecasting Considering Demand Response in Load Aggregator Mode[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(1):79-87.
- [14] CHEN Y T,ZHANG D X.Theory-Guided Deep-Learning for Electrical Load Forecasting (TgDLF) via Ensemble Long Short-Term Memory[J].Advances in Applied Energy,2021,1:100004.
- [15] CHEN K J,CHEN K L,WANG Q,et al.Short-Term Load Forecasting with Deep Residual Networks[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):3943-3952.
- [16] LAI G K,CHANG W C,YANG Y M,et al.Modeling Long and Short-Term Temporal Patterns with Deep Neural Networks[C]//The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval.Ann Arbor MI USA.ACM,2018: 95-104.
- [17] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等.国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1729-1752.
FAN Yuqi,DING Tao,SUN Yuge,et al.Review and Cogitation for Worldwide Spot Market Development to Promote Renewable Energy Accommodation[J].Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1729-1752.
- [18] 单茂华,汤洪海,耿明志,等.绿色电力市场本质动因及设计思考[J].电力系统自动化,2020,44(16):12-20.
SHAN Maohua,TANG Honghai,GENG Mingzhi,et al.Essential Cause and Design Thinking of Green Electricity Market[J].Automation of Electric Power Systems,2020,44(16):12-20.
- [19] GUO H Y,CHEN Q X,XIA Q,et al.Modeling Strategic Behaviors of Renewable Energy with Joint Consideration on Energy and Tradable Green Certificate Markets[J].IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(3):1898-1910.
- [20] BUTLER L,NEUHOFF K.Comparison of Feed-in Tariff,Quota and Auction Mechanisms to Support Wind Power Development[J].Renewable Energy,2008,33(8): 1854-1867.
- [21] AUNE F R,DALEN H M,HAGEM C.Implementing the EU Renewable Target through Green Certificate Markets[J].Energy Economics,2012,34(4):992-1000.
- [22] AUNE F R,DALEN H M,HAGEM C.Implementing the EU Renewable Target through Green Certificate Markets[J].Energy Economics,2012,34(4):992-1000.
- [23] 张悦,谢敏,程培军,等.可再生能源绿证价格季节性测算方法研究[J].南方能源建设,2020,7(3):46-54.
ZHANG Yue,XIE Min,CHENG Peijun,et al.Research on Seasonal Calculation Method of Renewable Energy Certificate Price[J].Southern Energy Construction,2020,7(3):46-54.
- [24] ZHU Q D,TANG X M,LIU Z L.Revised DBSCAN Clustering Algorithm Based on Dual Grid[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). August 22-24,2020,Hefei,China.IEEE,2020:3461-3466.
- [25] KOUKARAS P,BEZAS N,GKAIDATZIS P,et al.Introducing a Novel Approach in One-Step Ahead Energy Load Forecasting[J].Sustainable Computing:Information Systems,2021,32:100616.
- [26] MOTEPE S,HASAN A N,TWALA B,et al.Power Distribution Networks Load Forecasting Using Deep Belief Networks:The South African Case[C]//2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT).April 9-11, 2019,Amman,Jordan.IEEE,2019:507-512.

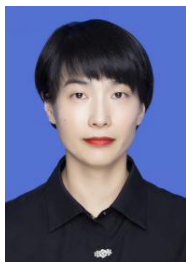
收稿日期: 2025 年 5 月 20 日

作者简介:

张宜然,女,硕士,初级工程师,研究方向为新型储能技术,
zyr1198371431@163.com



张宜然



姜晓霞

姜晓霞, 女, 教授级高级工程师, 国家电投集团科学技术研究院新型储能技术研究所副所长, 中国电工技术学会标准化工作委员会委员、中国电子节能技术协会电池专业委员会专家委员。研究方向为新型储能技术, jiangxiaoxia@spic.com.cn。



李芳菲

李芳菲, 女, 博士, 研究方向为储能安全及人工智能在储能领域的应用, lifangfei@spic.com.cn



白宁

白宁, 男, 正高级工程师, 国家电投集团中央研究院储能所所长, 全国电力储能标准化技术委员会成员、全国电工电子产品与系统的环境标准化技术委员会成员、中关村储能联盟理事代表、可再生能源学会储能专委会委员。研究方向为新型储能技术, baining@spic.com.cn



黄一峻

黄一峻, 男, 硕士, 初级工程师, 研究方向为新型储能技术, huangyijun@spic.com.cn



高康伟

高康伟, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新型储能技术, gaokangwei@spic.com.cn



张艳灵

张艳灵, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为新型储能技术, zhangyanling01@spic.com.cn

DOI: 10.61369/NPS.2025020003

首波开断技术在新能源电压暂降治理中的应用与工程实践

刘海¹, 邵久柠¹, 宋延良¹, 童雪燕², 杨新州³

(1. 华电新疆公司有限公司 新能源分公司, 新疆 乌鲁木齐 832000;

2. 安徽合凯电气科技股份有限公司, 安徽 合肥 231131;

3. 上海昆拓电气科技有限公司, 上海 201612)

Engineering Practice Research on Mitigating Voltage Sag with First-Wave Breaking Technology

LIU Hai¹, SHAO Jiuning¹, SONG Yanliang¹, TONG Xueyan², YANG Xinzhou³

(1. Huadian Xinjiang Company Limited, New Energy Branch, Urumqi Xinjiang 832000;

2. Anhui Hekai Electric Technology Co., Ltd., Hefei Anhui 231131;

3. Shanghai Kuntuo Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

摘要:【目的】为解决新能源风电等连续型企业因电压暂降引发的敏感设备停运问题,避免大规模停产事故。【方法】根据研判,电压暂降问题核心在于传统故障切除时间远超设备耐受极限,提出了首波开断技术。通过涡流驱动快速开关、高速 DSP 识别技术及限流阻抗构成系统,短路时快速开关将电流导向限流阻抗,15 ms 内完成故障隔离。以某 110 kV 供配电系统为实例,设计了应用方案,实现了母线电压维持与故障快速切除。【结果】在新能源风电项目首次应用验证:①故障切除时间缩短至 15 ms 内,母线电压维持在 90% 额定值;②短路持续时间从 0.15 s 降至 15 ms,热效降低,电缆截面需求减小;③限制短路电流幅值,保护主变等设备免受冲击;④确保无故障支路敏感负载连续运行,彻底消除电压暂降导致的连锁停产。【结论】首波开断技术通过极速故障隔离和电压维持,从根本上解决了电压暂降问题。其高效性、可靠性和经济性为新能源风电、石化等连续型生产企业避免重大经济损失,具备工程推广价值。

关键词:变电站;电压暂降;敏感负载;首波开断技术;快速识别

ABSTRACT: [Purpose] To address the suspension of sensitive equipment in continuous-operation enterprises, such as those in the new energy wind power industry, caused by voltage sags, thereby preventing large-scale production outages. The core challenge lies in the fact that traditional fault-clearing times significantly exceed the tolerance limits of such equipment. [Method] The first-wave breaking technology is

proposed, comprising an eddy-current-driven fast switch, high-speed DSP identification technology, and a current-limiting impedance. During short circuits, the fast switch diverts fault current to the impedance, isolating the fault within 15 ms. A practical application scheme is designed and validated using a 110 kV power distribution system, achieving rapid fault clearing while maintaining bus voltage stability. [Results] Initial application in a wind power project demonstrated: (1) Fault-clearing time shortened to <15 ms, with bus voltage maintained at 90% of the rated value; (2) Short-circuit duration reduced from 0.15 s to 15 ms, thermal effect lowered, and cable cross-section requirements minimized; (3) Short-circuit current amplitude limited, protecting critical equipment (e.g., main transformers); (4) Continuous operation of sensitive loads on non-faulted branches ensured, eliminating cascading outages due to voltage sags. [Conclusion] The first-wave breaking technology fundamentally resolves voltage sag issues through ultra-fast fault isolation and voltage stabilization. Its high efficiency, reliability, and cost-effectiveness mitigate significant economic losses for continuous-operation enterprises (e.g., wind power, petrochemicals), underscoring its substantial engineering value for widespread adoption.

KEY WORDS: substation; voltage sag; sensitive load; first-wave breaking technology; rapid identification

引言

连续生产的企业对供电可靠性要求高,且系统接线复杂。中压系统的供电的层级比较多,任一下级站某出线回路发生短路事故,会造成所在总站变电所的电压暂降,电压暂降就是在故障支路被切除前电压凹陷到 $10\%U_c \sim 90\%U_c$ 的现象,电压暂降的持续时间一般约为100 ms左右^[1-2],电压凹陷期间将会导致对电压质量要求高的敏感负载停产、停运。

某企业设置循环水处理变电站,站内所属10 kV I段的馈出线发生短路故障,故障应对措施是做切除动作,动作用时70 ms~300 ms,在做出切除动作期间,10 kV I段的母线将发生电压暂降,会导致其所带部分负荷失电;同时,该电压暂降会波及存在电气连接的10 kV尿素变电所I段和10 kV锅炉变电所I段母线,造成这两段母线上所带的部分高感性负荷(电压要求高者)失电,进而停运。

因此,一旦发生电压暂降若不能在最短的时间内将故障支路切除,严重时将会导致全厂停电事故^[3-4]。其主要原因是普通弹簧操作机构的真空开关分闸速度不够快,其总体切除时间大于70 ms,因此无法避免对电压质量要求高的感性负载全厂停运事故。

本文首先分析了造成电压暂降事故的原因及市场现有解决方案,并阐述治理电压暂降的基本措施,进而引出首波开断技术,最后以某系统实际应用为例,介绍了首波开断技术在新能源风电行业首次应用及其效果。

1 电压暂降的本质及现有解决方案

1.1 电压暂降的本质

项目科研阶段的调研与实地考察表明:对线路出现的电压暂降,该企业内部部分敏感设备的耐受时间不同,无压释放时间分别为:交流接触器20 ms~30 ms、交流电磁阀30 ms~40 ms、低电压保护装置的为20 ms~30 ms。因此,若电压暂降持续时间超过20 ms,部分控制类设备即存在失压释放的风险;若无压释放时间超过40 ms,则会导致此类设备全部失压释放。

对变频器而言,当电压凹陷超过20 ms,直流侧滤波和储能电容两端的电压,就会降低到额定70%以下,并闭锁逆变器的输出,即变频器电压暂降超过20 ms以上,就会停止对外供电,导致其所

带的负载出现大面积停运事故。

系统短路导致电压暂降后,异步电动机会转入发电机模式。其原有旋转磁场在切割定子绕组时,约100 ms内即可耗尽储存的磁场能量。若此时重启电机,电网将产生高达7倍额定电流的冲击;多台并联启动可能导致母线电压崩溃,甚至引发整个企业供电系统瘫痪。

通过上述分析得知:对电压要求高的感性负载对电压暂降的容忍时间一般为20 ms~30 ms,远远小于企业电压暂降持续时间,显然,在电压凹陷期间,控制类设备早已释放,变频类设备已经停止对外供电,还有一些由交流接触器控制的辅机,会停运连跳主机,最终导致重要生产设备的停产事故。

因此,电压凹陷时间远大于敏感类设备所能承受的时间,是导致电压暂降事故的本质原因。

1.2 现有处理方案

1.2.1 快速隔离/切换方案

快速隔离/切换方案采用光纤纵差保护分析了影响传统分相式全电流差动原理保护装置可靠性和灵敏度的各种因素:负荷电流、线路的分布电容电流、制动系数K和TA特性提出了一种利用相电流突变量构成分相式突变量差动保护,利用两端电流构成差动后备保护的快速隔离/切换方案^[4-6],此方案二次保护出口速度比传统的差动保护速度快了很多,保护出口时间可以控制在7 ms左右,但是保护出口的执行部件是开关柜中的普通弹簧操作机构的真空断路器,而目前市面上弹簧操作机构的真空断路器的分闸时间在40 ms~60 ms左右,显然这个时间远远大于敏感类负载的容忍时间。

1.2.2 抗晃电接触器的优化方案

抗晃电接触器的优化方案能解决短时(零点几秒内的电压陡降)接触器不释放,但是根本不能阻止电机、变频器停止工作^[6]。

1.2.3 分批启动优化方案

当企业电力系统发生晃电现象时,分批启动优化方案是通过PLC控制技术、在线控制技术、电力电子等技术对企业内负载进行分类,采取分批启动方式,研究设计出企业内重要负载如异步电动机分批再启动及自动切换控制系统^[7],但是此种优化方案只是在停产后恢复,这个恢复过程至少要几个小时,停产损失已成事实且更严重。

1.2.4 出线回路串联电抗器方案

为缓解电压凹陷对系统的影响,常规方案是在

各分支线路中串联支路电抗器。其核心作用是在某馈线发生短路时，通过串联电抗器维持母线电压。然而，电抗器参数的设计存在显著困难：维持母线残压于80%及以上需较高的电抗率，该参数虽提升稳压效果，但同时导致串联线路产生显著功耗、电磁干扰及额外压降。特别是高电抗率工况下，电抗器两端的大幅压降将危及系统中大部分电气设备的正常运行，严重削弱了该方案的经济性。

为阐明电抗器运行对企业安全生产的影响及安全隐患^[8-10]，举例分析如下：

隐患1：能耗。以如图2所示的系统为例，循环水变电所10 kV I段馈线短路电流有效值： $I_d=38.64$ kA，换算成系统阻抗标幺值是0.142 3，为了短路时维持母线电压在80%左右，需要串入4倍系统阻抗的电抗器。计算得出 $X_k=0.569 4$ ，由于该段母线所带负荷的计算容量为8 810 kW，对应额定电流1 000A，额定电压10 kV的电抗器的电抗率为12%。

现以额定电压10 kV，额定电流1 000 A，额定电抗率12%的电抗器为例计算电抗器的年经济损耗：

计算时假设条件：电抗器所带负荷的负荷率 $\beta=0.6$ ，电抗器在系统中的年运行时间 $T=8\ 000$ h，电费：0.5元/kW·h。有功损耗功率查电抗器参数表可得 $P_k=16.98$ kW，三相无功损耗：

$$Q_k = 3S_k = 3 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times I_N \times X_L \% = 2.78.4 \text{ kVar} \quad (1)$$

一组电抗器年耗电量：

$$S = \beta^2 \Delta P_\Sigma T = \beta^3 (P_k + 0.06 Q_k) T = 408\ 049.92 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (2)$$

式中，其中0.06为无功当量。

电抗器年经济损耗如表1，其数据可以得出：一组额定电压10 kV，额定电流1 000 A，额定电抗率12%的空心电抗器，按照负荷率 $\beta=0.6$ ，年运行时间 $T=8\ 000$ h，电费为0.5元/kW·h考虑，其年经济损失约为20.4万元。

表1 电抗器年经济损耗表

Tab.1 Reactor annual economic loss table

序号	型号	有功功率 损耗/kW	无功损 耗/kW	年耗电量/ kW·h	年经济损 失/万元
1	XK GK-10- 1000%-12%	16.98	124.7	408 049.92	20.4

隐患2：电磁干扰。空心电抗器在空气介质中运行时，其交变电磁场会辐射出强电磁能。该电磁

辐射可严重干扰邻近的通信系统及计算机监控系统，甚至导致其功能失效。此外，强交变主磁场会在电抗器周边的金属构件及基础混凝土的钢筋内诱发涡流损耗（即附加损耗）。持续性的电磁振动还可能使混凝土结构松软，进而损害基础与厂房的长期结构稳定性。

隐患3：压降、噪声及发热等隐患。综上所述可知，当前市面主流电压暂降治理方案均未从根本上解决该问题。其中前三种方案因故障切除时间过长，如：继电器的保护出口时间约为20 ms~30 ms，断路器的固有分闸时间约40 ms~60 ms，再加上燃弧时间的10 ms~20 ms，三者累计达到70 ms~110 ms，会构成事故发生的核心瓶颈。若要有效抑制电压暂降事故，须将故障切除时间压缩至20 ms以内。

2 首波开断优化方案

2.1 工作原理

首波开断优化方案的核心在于快速限制短路电流并维持系统稳定。如图1虚线框所示，装置包含涡流驱动快速开关、微机综合控制器、电流采集器、限流阻抗及后备开关。

装置原理图见图1虚线框内：

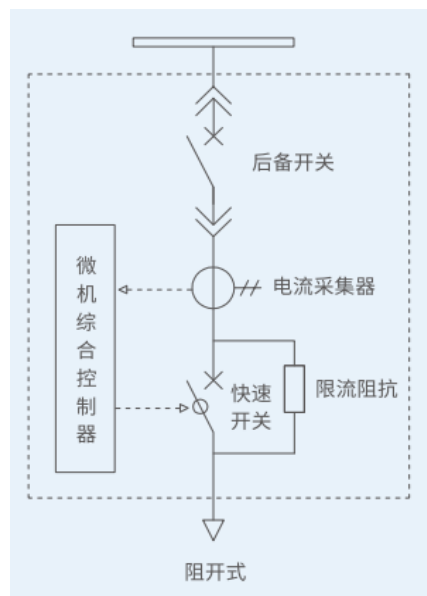


图1 首波开断方案的一次原理接线图

Fig.1 Primary principle wiring diagram of first-wave breaking scheme

一旦短路故障被切除，微机综合控制器监测到支路电流回归额定水平，会立即指令快速开关合闸，退出限流阻抗，系统恢复正常运行。

若支路短路状态持续超过300 ms（即回路故障未解除），微机综合控制器判定为分支断路器拒动或母线故障，随即命令后备开关分闸切除该故障支路，此举符合继电保护整定原则。

得益于该方案的快速响应特性，在装设首波开断装置的馈线短路时，上级主母线电压暂降持续时间可缩短至一个周期以内，有效避免系统中变频器、接触器、电动机、电磁阀等敏感负载出现停产或停运现象。

2.2 首波开断优化方案的特点

1) 动作速度快。该短路电流限制装置的核心优势在于其超快的动作速度和强大的开断能力。装置能够在系统短路故障发生的7ms~15ms内可靠开断故障电流，这得益于其关键组件的高速协同运作。高速涡流驱动机构赋予快速开关极快的分合闸能力，实现5 ms以内分闸及10ms内合闸。核心控制系统采用配备高精度、高速数模转换器的微机综合控制器，对系统电流进行持续实时采样检测。一旦检测到电流超过设定阈值，系统即刻通过高速DSP技术结合专用优化算法，在2 ms内精确计算短路电流参数及其电流过零点时刻。控制器据此精确地在电流过零点前发出动作指令，驱动快速开关动作，确保燃弧时间达到最小值，从而在7 ms~15 ms的时间窗内，将短路电流成功转移至限流电抗器中。这一过程不仅有效限制了短路电流的幅值，还维持了母线电压的稳定性（维持母线残压）。

2) 开断能力强。该装置通过精确控制触头的刚分时间，进一步优化操作时序，将燃弧时间压缩至最低，显著提升了灭弧室的性能裕度，使其短路开断能力轻松达到80 kA的高水平。

3) 母线残压保持高。装置正常运行时，限流阻抗被快速开关并联，无电流通过，无压降。只有在短路发生时投入工作，限流抗值设计等同于负载阻抗。短路时快速开关开断将限流阻抗投入，使母线电压保持90%左右，使上级系统和关联的敏感负荷连续运行。

4) 使用寿命长。该装置在使用寿命和运行可靠性方面展现出显著优势。其核心组件——快速开关采用高速涡流驱动机构，相较于传统断路器普遍使用的弹簧操作机构，运动部件数量减少80%。该机构仅执行简单的直线运动，省却了复杂的传动结构，大幅降低了机械磨损，从而显著提升了机械

寿命和整体可靠性。同时，装置基于过零点精确开断技术，在开断过程中产生的燃弧量不足常规断路器的10%。这一特性不仅极大提升了开断容量，更显著减小了触头烧蚀，使得触点电寿命呈现数量级的增长。

5) 性能高可靠。装置的高可靠性能得益于核心部件的自主原创研发与生产，即使在强电磁干扰的严苛工况下也能保持稳定运行。系统配备的微机综合控制器具备实时自检功能，持续监控自身状态以确保核心功能的绝对可靠。装置运行的所有关键功能信息和告警均可通过标准通信协议或4G/5G无线网络实时传送至后台监控中心。此外，用户还可通过专属手机APP便捷地查阅历史故障记录及分析故障录波波形图，为维护 and 诊断提供强大支持。

3 首波开断优化方案在某新能源风电行业首次应用

3.1 某系统电气系统及设计图

以110 kV供配电系统为例，用以说明首波开断优化方案在某新能源风电行业首次应用。

该供电案例的具体电气系统图具体如图2—图4所示。

以图2循环水变电所为例进行短路电流计算分析。已知：该变电所10 kV的电气设备采用单母线分段的供电方式，母联开关正常运行时处于常开状态，该变电所10 kV I段母线系统提供的短路电流 $I_x=36.52$ kA，电动机的反馈电流 $I_{fd}=2.12$ kA。

10kV侧循环水变电所I段馈线发生三相短路故障时，

总电流有效值： $I_d = I_x + I_{fd} = 38.64$ kA；

短路电流峰值： $I_{max} = \sqrt{2} \times 38.64 = 54.64$ kA；

短路电流冲击值： $I_c = 2.5 \times 38.64 = 96.6$ kA。

由短路电流计算机系统分析可知：循环水变电所I段配电网络中心开闭所馈出线发生两相或三相短路故障时，故障切除时间70 ms~300 ms。

在此动作期间，10 kV I段母线发生了电压跌落。该线路的电压跌落首先造成其下联的部分负荷失电；其次，与此母线电气相连的10 kV尿素变电所和锅炉变电所的I段母线也将发生电压暂降，这样导致这些变电所I段母线上所带的电压敏感性负荷停运。此外，系统中存在大量高压电动机负载，电压回升时会引发电机群二次冲击，将母线电压拖低至70% U_n 及以下，造成更多负载跳闸。

3.2 热效应抑制效能分析

首波开断优化方案的实施显著降低了短路电流在电缆导体中的热积累效应 (Q_d)。

该效应可表征为:

$$Q_d = \int_0^t i^2 dt = I_B''^2 (t + T_B) + 4I_B'' I_D'' \left[\frac{T_D}{2} (1 - e^{-\frac{t}{T_D}}) + \frac{T_B T_D}{T_B + T_D} \right] + 1.5 I_D''^2 T_D \quad (3)$$

式中, I_B'' 为系统电源周期分量起始有效值, kA; U_c 电动机反馈电流周期分量起始有效值, kA; I_D'' 为电动机反馈电流电源周期分量的起始有效值, kA; t 为短路计算时长 (综合主保护动作与断路器分闸时间), 本项目取 0.15 s; 考虑暂态分量衰减特性 (系统时间常数 $T_B=0.06$ s, 电机 $T_D=0.03$ s), 热效应可简化为:

$$Q_d = 0.21 I_B''^2 + 0.08 I_B'' I_D'' + 0.045 I_D''^2 \quad (4)$$

代入数值计算得: $Q_d = 286.48 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$, 依据热效应校验导体截面积:

$$S \geq \frac{\sqrt{Q_d}}{C} \quad (5)$$

式中, S 为导体最小截流量, mm^2 ; Q_d 是短路电流的热效应, $\text{A}^2 \cdot \text{s}$; C 为铜导体热容系数, 取 137。对循环水变电所 I 段出线回路, 计算得 $S_d \geq 124$ 。

实际负荷电流分析表明 (典型值 50A/60A/120A), 常规载流量选型仅需 $35 \text{ mm}^2 \sim 75 \text{ mm}^2$ 截面电缆 (详见表 2)。

表 2 电缆选型对比表

Tab.2 Cable selection comparison table	
选型依据	要求截面积 / mm^2
载流量选型	35~75
短路热效应校验	≥ 124
实际配置	150

由此可知, 热效应约束导致电缆截面需提升至 150 mm^2 , 较载流量选型增大 214% 以上, 凸显本方案对导体热应力的控制价值。由此, 采用了首波开断优化方案后, 短路持续时间 t 由 0.15s 缩短到 15 ms 以内, 即 Q_d 降低, 热稳定校验最小截面 S 减少到原来的 $\frac{1}{\sqrt{10}}$, 即现有的电缆热稳定裕量大大增加。

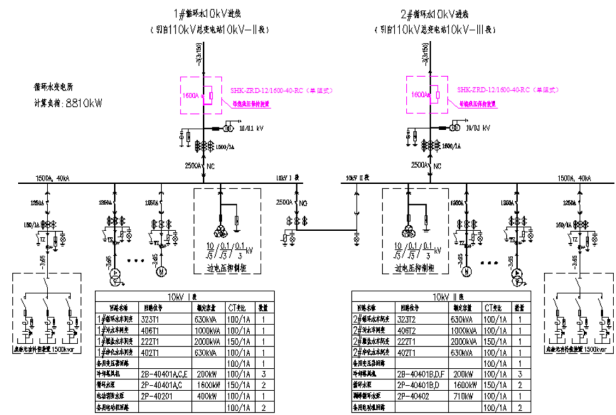


图 2 某企业循环水变电所电气系统图

Fig.2 Electrical system diagram of circulating water substation in a certain enterprise

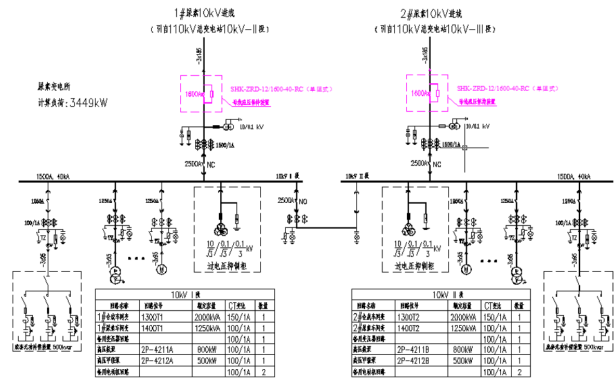


图 3 某企业尿素变电所电气系统图

Fig.3 Electrical system diagram of urea substation in a certain enterprise

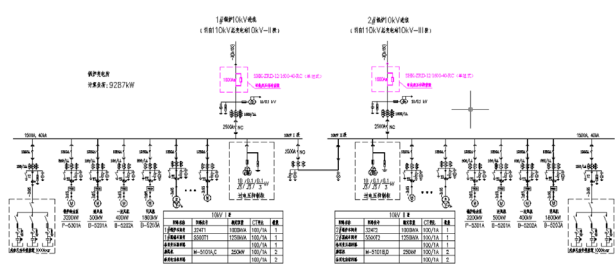


图 4 某企业锅炉变电所电气系统图

Fig.4 Electrical system diagram of boiler substation in an enterprise

3.3 馈出线回路短路电流的抑制

为应对循环水变电所 I 段出线回路因短路而造成的电压暂降所可能引发的两相或三相短路故障, 本文所提方案采用了具备毫秒级的快速分断能力的母线电压支撑装置 (SHK-ZRD)。该装置的核心机制在于, 故障发生时, 其内部的快速开关能在极

短时间内动作（典型动作时间约为数毫秒），迅速将故障电流转移至预设的限流阻抗路径。此举显著降低了故障电流的峰值幅值，从而有效保障了馈出线断路器能够在其安全开断容量范围内可靠地消除故障。

3.4 母线电压的稳定维持

在循环水变电所 I 段出线回路发生上述短路故障期间，母线电压支撑装置（SHK-ZRD）发挥关键作用。其设计目标是在故障发生后的关键初期阶段（通常在十余毫秒量级内），通过特定的能量补偿或限流机制，主动将 110 kV 总降变电所 10 kV II 段母线电压维持在接近额定运行值的高水平区间（例如，保持其不低于额定电压的较大部分比例）。这一功能至关重要，它最大限度地减小了系统电压暂降的深度和持续时间，确保了连接于该母线及关联系统的、对电压波动敏感的非故障负载能够持续正常运行。

4 结束语

本文深入剖析了解决电压暂降问题的核心技术关键，创新性地提出了首波开断优化方案。该方案通过毫秒级（典型值约 15 ms）的快速分断能力与限流阻抗的协同投入，有效维持了故障期间上级母线的电压稳定性（维持在接近额定值的高水平），从根源上阻断了电压暂降事故链。应用表明，该技术方案显著保障了非故障支路及关联变电所内敏感设备的连续可靠运行，为新能源风电、石油化工、冶金等对供电连续性要求极高的大中型流程工业，规避了由生产中断引发的巨额经济损失，具有很好的工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 张军梁,鲁宗相,李立.石化企业抗晃电问题研究[J].电气应用,2010,29(22):60-63. ZHANG Junliang,LU Zongxiang,LI Li.Research on Anti-Flashing in Petrochemical Enterprises[J].Electrotechnical Application,2010,29(22):60-63.
- [2] 何冕,王林玲,郭成,等.电力系统电压暂降治理措施综述[J].电工技术,2023(18):210-215. HE Mi,WANG Linling,GUO Cheng,et al.Review on Control Measures of Voltage Sag in Power System[J]. Electric Engineering,2023(18):210-215.
- [3] 张帅.电压暂降对敏感电气设备影响及其改进措施分析[J].电器工业,2023(2):48-51.

- ZHANG Shuai.Influence of Voltage Sag on Sensitive Electrical Equipment and Its Improvement Measures[J]. China Electrical Equipment Industry,2023(2):48-51.
- [4] 李清波,刘沛.光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高[J].电力自动化设备,2002,22(4):21-24. LI Qingbo,LIU Pei.Applications of Fiber Differential Protection and Sensitivity Improvement[J].Electric Power Automation Equipment,2002,22(4):21-24.
 - [5] 刘文亮.厂用电快速切换装置的研究[D].重庆:重庆大学,2011. LIU Wenliang. Research on fast Switching Device of Auxiliary Power[D].Chongqing: Chongqing University, 2011.
 - [6] 冯庆全.永磁式交流接触器《低电压释放功能》对稳定生产系统的作用[J].机电信息,2003(20):26-27. FENG Qingquan.Effect of Permanent Magnet AC Contactor "Low Voltage Release Function" on Stable Production System[J].1,2003(20):26-27.
 - [7] 王茂君.用PLC实现电动机分批再启动和自动切换[J].石油化工自动化,2007,43(4):40-42,60. WANG Maojun.Realizing Motors Batch Restarting and Auto-Changing by PLC[J].Automation in Petrochemical Industry,2007,43(4):40-42,60.
 - [8] 欧阳森,程伟添,刘天马.考虑故障不确定性的电压暂降监测点优化配置方法[J].电气自动化,2023,45(6):1-3. OUYANG Sen,CHENG Weitian,LIU Tianma.Optimal Configuration Method for Voltage Sag Monitoring Points Considering Fault Uncertainties[J].Electrical Automation,2023,45(6):1-3.
 - [9] 郑峻峰,黄际元,陈远扬,等.多功能电压暂降治理装备控制策略研究[J].电气传动,2023,53(10):71-78. ZHENG Junfeng,HUANG Jiyuan,CHEN Yuanyang,et al.Research on Control Strategy of Multifunctional Voltage Sag Treatment Equipment[J].Electric Drive, 2023,53(10):71-78.
 - [10] 林邵杰.基于深度迁移学习的配电网电压暂降状态自适应估计方法[D].西安理工大学,2023. LIN Shaojie. Adaptive Estimation Method of Voltage Sag State in Distribution Network Based on Deep Transfer Learning[D].Xi'an University of Technology, 2023.

收稿日期: 2025 年 5 月 22 日

作者简介:



刘海

刘海 (1973), 男, 研究方向为电力工程建设及与之相关的新技术、新工艺、新材料研发及其运用, 108865297@qq.com



宋延良

宋延良 (1991), 男, 工程师, 研究方向为工程建设管理, 289641728@1qq.com



邵久柠

邵久柠 (1987), 男, 工程师, 研究方向为电力工程施工, 电气设备自动化技术, shaojiuning@126.com



童雪燕

童雪燕 (1976), 女, 高级机电工程师、高级电气工程师、BIM 高级工程师、装配式高级工程师、二级机电建造师。企业研究生导师。主要研究方向: 中压配电网故障防控及电能质量治理领域, 在短路电流超标治理、电压暂降治理等。13866778709@126.com



杨新州

杨新州, 硕士, 工程师, 研究方向: 过电压过电流保护, 快速识别与判断测控技术, 快速开关, 连续稳定供电, 项目管理。

DOI: 10.61369/NPS.2025020004

虚拟电厂低碳能源转型政策机制与实践

张海龙

(山西建筑工程集团有限公司, 山西 太原 030009)

Policy Mechanism and Practice of Low-Carbon Energy Transformation of Virtual Power Plant

ZHANG Hailong

(Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030009)

摘要: 在全球能源低碳转型的背景下, 虚拟电厂(VPP)作为聚合分布式能源资源的创新技术, 已经成为提升电网灵活性与促进可再生能源消纳的关键手段。本文系统分析了VPP的运行框架、政策体系及电-碳协同机制, 深入探讨了VPP在推动能源系统低碳化转型中的重要作用。首先, 从概念内涵和运行框架两个维度对VPP进行理论解析, 并通过与传统电厂、微电网的对比研究, 阐明其技术特征和功能定位。其次, 基于政策文本分析方法, 梳理了我国VPP发展的政策支持体系, 重点分析了国家的政策演进及其对VPP市场化的推动作用。在运行机制方面, 研究了VPP参与电-碳联合市场的协同模式, 探讨了碳交易机制与电-碳市场耦合对VPP低碳效益的影响。最后, 通过典型案例分析, 总结了我国VPP从邀约型向交易型转型过程中的技术创新路径和商业运营模式。本文的研究为VPP的规模化发展提供了理论支撑和实践参考, 对实现“双碳”目标和构建新型电力系统具有重要意义。

关键词: 虚拟电厂, 分布式能源, 政策, 发展趋势

ABSTRACT: In the context of global energy transition towards low carbon, virtual power plants (VPP), as an innovative technology for aggregating distributed energy resources, have become a key approach to enhancing grid flexibility and promoting the consumption of renewable energy. This paper systematically examines the operational framework, policy system, and electricity-carbon synergy mechanism of VPP, delving into their significant role in driving the low-carbon transformation of the energy system. First, it provides a theoretical analysis of VPP from both conceptual and operational perspectives, and through comparative studies with traditional power plants and microgrids, clarifies its technical characteristics and functional positioning. Second, using policy text analysis methods, it outlines the policy

support system for VPP development in China, focusing on the evolution of national policies and their impact on the marketization of VPP. In terms of operational mechanisms, it explores the collaborative model of VPP in the electricity-carbon joint market, examining how the coupling of carbon trading mechanisms with the electricity-carbon market affects the low-carbon benefits of VPP. Finally, through case studies, it summarizes the technological innovation paths and commercial operation models of VPP in China as they transition from an invitation-based to a transaction-based model. This research provides theoretical support and practical references for the large-scale development of VPP, and is crucial for achieving the ‘dual carbon’ goals and building a new type of power system.

KEY WORDS: Virtual power plant, Distributed energy resources, Policy, Development trend

引言

在全球能源体系加速向清洁化、低碳化转型的时代背景下, 电力系统正面临前所未有的机遇与挑战。随着“碳达峰、碳中和”战略目标的深入推进, 以风电、光伏为代表的可再生能源装机规模持续扩大, 预计到2030年, 我国新能源发电装机容量将突破12亿千瓦, 分布式能源的渗透率持续攀升。这一现象的产生既源于构建能源效率更高、碳排放更少的可持续能源系统的内在需求, 也得益于电力市场自由化改革的持续推进^[1-2]。在此背景下, 大量分布式能源单位投入运行成为必然。分布式能源的大规模接入给电力系统带来了新的挑战。分布式能源的小型化、模块化等特性使其难以满足当前电力市场的准入要求, 加之风、光资源的间歇性、分散性的影响, 以及各单元之间缺乏协同运行等问题, 都严重制约了分布式能源对新型电力系

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(L242008)。

Project Supported by Beijing Natural Science Foundation (L242008).

统建设的支撑作用^[3]。为破解这些难题，虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）应运而生。

VPP是一种通过先进的通信、控制和信息技术，将分散的储能设施、可控负荷等进行聚合协调优化，形成一个虚拟的、可调度的发电单元，参与电力市场交易和电网运行服务的新型能源管理系统^[4]。文献[5]提出了一种双层低碳调度模型，可以提高VPP运营商的收益，减少碳排放，提高电力系统对不确定性的鲁棒性。文献[6]构建了含“风-光-气-储”的低碳VPP优化调度模型，为VPP低碳调度和风光消纳提供了新的方法。文献[7]提出了一个考虑综合需求响应的VPP优化调度方案，对VPP的低碳经济运行具有指导意义。VPP打破了传统电厂的物理边界，可以在碳达峰、碳中和进程中起到提高能源利用率、提高可再生能源经济性以及减少高碳排放机组出力等作用，进而促进碳排放降低。

目前，中国VPP的应用与发展等方面仍面临诸多挑战，如：技术标准体系不完善^[8]、市场机制尚不成熟导致商业模式单一且盈利困难^[9]、数据安全与隐私保护亟待加强^[10]、资源有效聚合与精准控制能力有待提升^[11]等。但在国家战略政策的持续强力驱动、电网灵活性需求的日益攀升、技术创新的不断突破以及电力市场改革的纵深推进等多重利好因素的共同作用下，中国VPP市场正孕育着前所未有的发展机遇，未来成长空间极为广阔。

VPP为破解可再生能源消纳难题、提升电网灵活性提供了突破性的解决方案。本文首先从概念内涵、运行框架和系统架构三个维度对VPP进行理论解析，并通过与传统电厂、微电网的对比研究，阐明其技术特征和功能定位。其次，基于政策文本分析方法，系统梳理了我国VPP发展的政策支持体系。在运行机制方面，重点研究了VPP参与电-碳联合市场的协同模式。最后，通过典型案例分析了我国VPP从邀约型向交易型转型过程中的技术创新路径和商业运营模式，为行业未来发展提供了一定的参考价值。

1 VPP概述

1.1 VPP的概念与内涵

虚拟电厂这一术语源于1997年的《虚拟公共设施：新兴产业的描述、技术及竞争力》中对虚拟公共设施的描述^[12]。随着技术的进步以及政策支持

的推动，VPP的定义也不断演变和完善。早期VPP主要强调通过市场机制整合分布式能源资源，在随后的技术探索和应用实践中，逐步与电力市场紧密结合，参与电能现货市场、辅助服务市场等。

近年来，VPP被明确定义为一种基于现代信息通信和系统集成控制技术，聚合分布式电源、储能、可调节负荷等资源，协同参与电力系统优化和市场交易的新型电力运行模式，并在政策引导下逐步向规范化、规模化方向发展。VPP作为一种特殊的电厂，既能够向系统提供电力以实现调峰，又能促进负荷消纳，协助系统填谷。VPP的应用与发展将为构建更加灵活高效、低碳环保的现代电力系统注入关键动力。

VPP运行框架通过5层协同架构实现分布式能源的高效整合与智能管理。如图1所示，在资源接入层，光伏、风电等分布式电源与储能系统、柔性负荷等多元化资源实现统一接入；在数据感知层，依托智能计量和通信网络，结合边缘计算完成实时数据采集与预处理；在智能调度层，运用预测引擎和优化算法，制定兼顾经济性与可靠性的调度策略，并参与电力市场交易；在控制执行层通过自动发电控制、自动电压控制等技术实现精准调控，同时保障电网安全稳定运行。最终在应用服务层，提供电网调峰、用户能效管理和碳资产交易等增值服务。该框架形成“采集-优化-执行-服务”的闭环管理体系，显著提升了电力系统灵活性和清洁能源消纳能力，为新型电力系统建设提供了关键技术支撑。

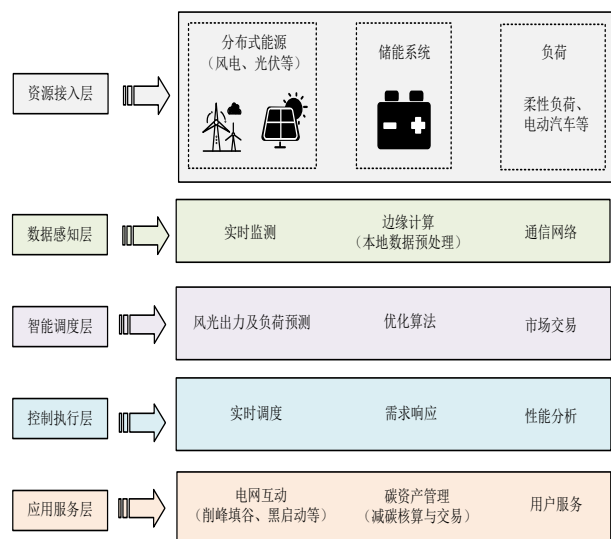


图1 VPP运行框架

Fig.1 Virtual power plant operation framework

按照 VPP 的功能特性可以分为两种类型^[13]，商业型 VPP（Commercial VPP, CVPP）和技术型 VPP（Technical VPP, TVPP），见表1。其中，CVPP 主要关注于电力市场的交易和经济优化，通过聚合分布式能源参与电力市场，提供电能量、辅助服务等，以实现经济效益最大化。TVPP 的核心功能则聚焦于电力系统的运行调控，通过整合分布式能源资源，为电网提供频率响应、电压支持等辅助服务，从而有效提升电网运行的稳定性。

在实际运行中，CVPP 通常与传统发电设备协同运行，共同参与电力市场竞争，以实现发电计划最优。CVPP 通过整合分布式能源和需求响应资源，参与市场交易，同时为 TVPP 提供关键信息。而 TVPP 在整合这些数据后，通常会将优化聚合的资源能力提供给电网调度机构，从而以经济最优的方式保障电力系统的稳定运行。这种协作模式提高了市场效率和电网稳定性，推动电力行业可持续发展。

表1 CVPP, TVPP 特性对比
Table.1 Comparison of CVPP and TVPP features

特性	CVPP	TVPP
核心目标	经济收益最大化	电网稳定性保证
主要功能	电力交易 / 能量优化	调频 / 备用 / 电压支撑
参与市场	现货市场 / 绿证交易	辅助服务市场
控制周期	日前 / 日内市场	实时控制
关键技术	报价策略算法	快速响应控制
典型收益	电价差 / 容量补偿	调频服务补偿
聚合重点	经济性参数	技术性参数

1.2 VPP、传统电厂与微电网

VPP、传统电厂和微电网是电力系统中的3种不同运行模式，各自在能源结构、运行方式和低碳贡献方面既有区别又存在紧密联系，3者特性对比见表2。

传统电网是集中式电力系统的典型代表，主要依赖大型化石能源发电厂通过电网向用户供电。其特点是中心化控制、单向电力流动，但由于依赖高碳能源，面临巨大的低碳转型压力。相比之下，微电网和 VPP 则代表了分布式能源时代的两种不同整合方式。微电网是在局部区域内将分布式可再生能源、储能和负荷组合形成的自治系统，能够实现并网或离网运行，强调就地平衡和供电可靠性，直接促进可再生能源的本地消纳，减少碳排放。而

VPP 并不受地理限制，它通过先进的通信、量测和控制技术，将分散在不同区域的分布式电源、储能和可调负荷聚合起来，形成一个可灵活调度的“虚拟”电力资源池，主要目标是通过电力市场和辅助服务实现经济收益最大化，间接提升可再生能源的利用率，从而降低整体电力系统的碳强度。

从电网改造的角度来看，微电网需要对局部配电网进行物理结构调整，而 VPP 则无需改变现有电网架构，仅依赖软件和通信技术实现资源聚合。在功能上，微电网更注重技术自治，而 VPP 更偏向商业运营。然而，两者并非完全割裂，微电网可以作为 VPP 的物理基础，提供分布式能源资源；而 VPP 则能够将多个微电网的冗余绿电进行跨区域优化调度，进一步放大低碳效益。

这三种模式在新型电力系统中形成互补关系：传统电网逐步向“配电网 + 微电网 + VPP”的混合模式演进，实现不同能源形式的协同互补与高效利用。其中，微电网能够提升局部可再生能源渗透率；VPP 则通过市场机制激励绿电投资和优化运行。二者共同推动电力系统向低碳化、智能化发展。

表2 VPP、传统电厂与微电网特性对比
Table.2 Comparison of characteristics of VPP, traditional power plant and microgrid

特性	VPP	传统电厂	微电网
物理结构	无实体，虚拟聚合	集中式大型机组	小型局域网络
能源来源	分布式能源 + 储能 + 负荷	化石能源 / 核电	风光储 + 柴油备份
运行模式	虚拟整合，依赖通信、信息技术	独立运行，电网统一调度	可并网、离网运行
灵活性	高，可灵活调度多种资源	低，发电能力相对固定	高，可自主运行
碳排放	低，促进可再生能源消纳	高（尤其是化石燃料电厂）	低，依赖分布式能源
应用场景	大规模分布式能源整合，参与电网运行	大型电网的稳定供电	局部区域（如工业园区、岛屿）
挑战	技术复杂，市场机制不完善	碳排放高，灵活性差	规模小、成本高

2 “双碳”背景下 VPP 的相关政策

我国智能电网在早期建设阶段主要聚焦于电网基础设施的强化，因此虚拟电网起步较晚，技术发展相对滞后。然而，随着 VPP 支持政策的持续完善，我国 VPP 产业迎来快速发展期。2021 年至

今,我国陆续出台了一系列支持 VPP 发展的政策文件^[14],如图2所示。VPP 政策体系的逐步完善,不仅构建了 VPP 市场化运营的规范体系,更为我国 "双碳" 战略目标的实现提供了有力保障。

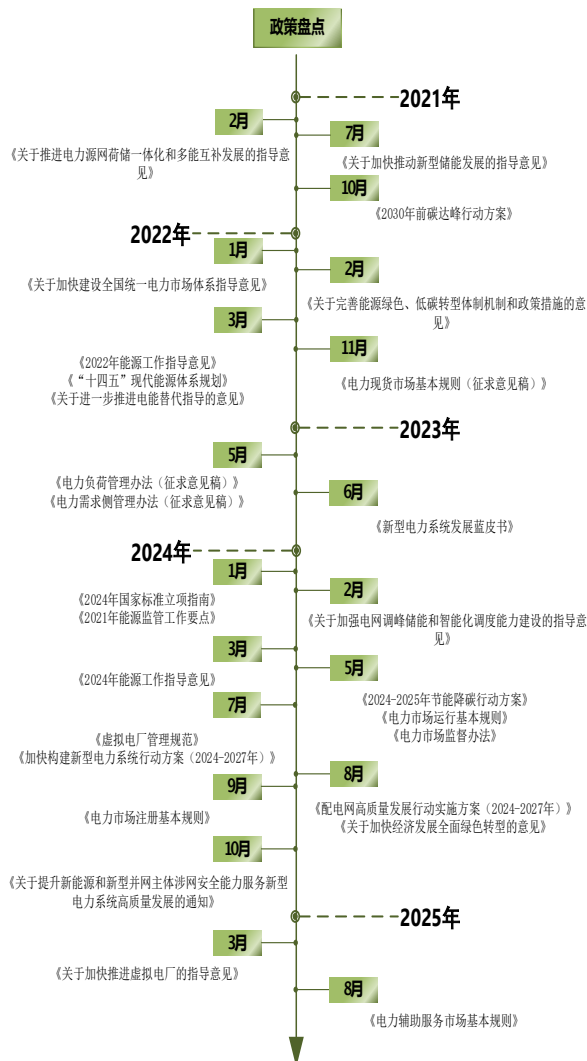


图2 中国 VPP 相关政策 (2021 年至今)

Fig.2 China's virtual power plant related policies (2021 to present)

国家层面已明确将 VPP 的发展纳入战略规划,并在“十四五”期间得到了政策的强力支持。2021年,《2030年前碳达峰行动方案》首次在国家政策文件中提出要推进灵活调节电源建设,支持 VPP 等新型资源参与电网调节。2022年出台的《“十四五”现代能源体系规划》多次提到“VPP”,进一步提升了其在能源规划中的重要性。同年11月发布的《电力现货市场基本规则(征求意见稿)》构建了 VPP 参与电力市场交易的基本制度框架,为 VPP 参与电力市场提供了初步的制

度依据。

随着对 VPP 认识的深化和实践需求的增加,我国的政策支持力度也在持续增加。2023年5月发布的两项电力管理办法征求意见稿中进一步明确了 VPP 在电力需求侧管理中的作用。6月公布的《新型电力系统发展蓝皮书》为 VPP 的发展指明了方向。2024年相关政策持续深化,5月颁布的《电力市场运行基本规则》明确了电力交易的类型(电能量、辅助服务、容量等)和交易方式,要求 VPP 需在此框架下开展相关业务;同年9月,《电力市场注册基本规则》将 VPP (含负荷聚合商) 明确列为新型经营主体,规定了其市场注册的基本条件,为 VPP 合法参与市场奠定了基础。

2025年,国家发展改革委和国家能源局联合印发了《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》(发改能源〔2025〕357号,简称《指导意见》),进一步细化了 VPP 参与各类市场的要求,且给出了 VPP 的权威定义,是当前指导中国 VPP 发展的纲领性文件。此外,多个能源领域专项政策也提及了发展 VPP。这些规则共同构成了 VPP 参与市场的基本框架。因为各地电力市场和能源结构存在差异,所以具体的实施细则和操作流程仍需各省级、区域市场等地方层面根据实际情况制定^[15]。

地方层面对 VPP 的发展同样给予了高度重视,并根据各自地区的实际情况,制定了一系列推动 VPP 发展的具体方案和细则。这些地方政策不仅响应了国家层面的战略规划,还为 VPP 的落地实施提供了更为具体的指导和支持。广州、深圳作为特别行政区,先后发布《广州市虚拟电厂实施细则》和《深圳市虚拟电厂落地工作方案(2022—2025年)》;山西则聚焦市场化机制创新,其发布的省级实施方案开创了现货市场环境下 VPP 运营的先河。此外,其他地区也在积极探索 VPP 的发展模式并出台相关政策,政策覆盖范围从东部沿海向中西部延伸,形成“试点—推广—深化”的渐进式发展路径。

除去国家、地方政策上的支撑,标准体系的建立也被认为是促进 VPP 发展的重要因素。我国发布的《虚拟电厂管理规范》(GB/T44241-2024)和《虚拟电厂资源配置与评估技术规范》(GB/T44260-2024)是首批 VPP 领域标准,被国家市场监督管理总局列入督办的国家重要技术标准清单中。这标志着 VPP 规划建设和运行管理等工作

开展将有据可依,我国VPP从科学建设到管理运营,正式开启标准化与规范化发展新阶段。此外,我国还有《虚拟电厂技术导则》等国家标准进入在编阶段,3项行业标准已立项。这些标准体系的建立对于保证VPP系统的互操作性、安全性、可靠性以及市场公平性至关重要。标准体系与政策体系相辅相成,共同助力VPP行业健康发展。

我国VPP的发展在政策与标准的双重驱动下,已经开始构建较为完善的支撑体系。国家层面通过一系列政策文件,将VPP发展纳入战略规划,逐步完善其参与市场的规则框架;地方层面积极响应,结合自身特点制定具体方案,推动VPP落地实施;标准体系的建立则为VPP的规范化、科学化发展提供了技术支撑。多方合力为VPP行业营造了良好的发展环境,为实现“双碳”目标和构建新型电力系统奠定了坚实基础。

通过政策支撑、标准引领与机制的创新,我国可以逐步构建起高效、安全、可持续的VPP,为能源转型与电力系统智能化升级提供关键支撑。预计未来几年,随着政策的细化落实、市场机制的完善和技术的成熟,中国VPP市场将进入快速发展期,并在构建安全、高效、绿色、智能的新型电力系统中发挥关键作用。

3 VPP与低碳交易的协同机制

VPP的低碳交易内核是其在低碳能源转型中实现低碳目标的关键所在。这一内核主要通过碳交易机制、电-碳市场耦合等机制来实现。碳交易机制将碳排放权作为一种可交易商品,通过市场化手段引导企业减排。具体而言,主管部门按企业排放量分配碳配额,市场主体通过交易平台买卖配额,以市场化方式优化排放权配置,形成“控总量-促交易-励减排”的管理闭环。电-碳市场耦合机制则通过将电力市场与碳市场相结合,使得VPP在优化调度时同时考虑电力成本和碳排放成本,这种耦合机制不仅提高了能源利用效率,还促进了低碳能源的消纳。

在电-碳交易市场中,VPP的加入可以积极地推动低碳能源转型。VPP可以通过考虑中国核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCRE)机制,构建电碳市场与自身的主从博弈交易决策模型,实现市场运营综合效益的最大化。系统之间可以进行多能耦合与优化调度,整合各类

分布式能源资源,从而实现多能互补和优化调度的目的。

VPP参与电-碳联合市场的运行模式如图3所示^[16-17]。在电-碳市场的交易模式中,VPP通过整合风电、光伏和储能等资源,优化能源调度。系统可以根据电力市场价格调整发电量,高峰时供电,低谷时储能,以获取最佳经济效益。同时,VPP可以通过减少碳排放获得并交易碳排放权,激励企业等采用更清洁的能源;也可以通过参与辅助服务市场,提供频率调节、电压支持和负荷平衡等服务,维持电网稳定,增加收益。文献[18-19]创新性地将碳交易机制与需求响应相结合,并构建了低碳调度模型;文献[20]通过引入绿证交易约束,实现了可再生能源利用率和减排效益的双重提升;文献[21]在碳成本建模基础上进一步优化调度策略,创造了额外的经济收益;文献[22]则从电力市场角度出发,提出了一种考虑碳交易的双层竞价策略,显著提高了VPP的盈利能力。这些研究为VPP参与碳市场提供了重要的理论支撑和方法指导。

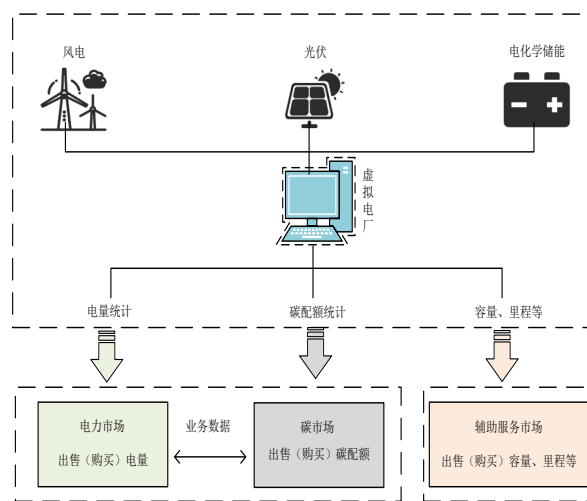


图3 VPP参与电-碳联合市场的运行模式

Fig.3 VPP participates in the operation mode of the combined electricity and carbon market

VPP通过电-碳市场的协同机制,构建了能源价值与环境价值的转换通道,为新型电力系统的低碳化运行提供了市场化解决方案,也为VPP在低碳能源转型中的发展提供了有力支持。

VPP参与市场化交易是其实现经济价值和环境效益的重要途径。当前交易体系主要包含现货市场、辅助服务市场和需求响应市场三大类。表3展示了当前VPP参与的主要交易品种及其组织形

式，可以看出当前 VPP 参与的市场交易主要采用单边组织形式，这种机制虽然保证了市场运行的稳定性，但在灵活性和市场活力方面存在一定局限。

随着电力市场改革的深入推进，未来 VPP 的交易形式将向更加多元化的方向发展。一方面，可以引入双边协商机制，允许 VPP 与电力用户或发电企业直接达成交易协议；另一方面，可以拓展双边集中竞价和挂牌交易等新型交易品种，为市场参与者提供更多选择。这种交易形式的创新将显著提升 VPP 的市场参与度和经济收益。但交易形式的拓展需要配套完善的市场规则和技术支持，包括建立更加精准的计量系统、开发智能化的交易平台等，以确保市场运行的公平性和高效性。通过不断完善市场化交易机制，VPP 将在新型电力系统中发挥更加重要的作用，为能源转型和碳减排目标的实现提供有力支撑。

表 3 VPP 参与市场的交易品种
Tab.3 The types of transactions in which VPP participates in the market

市场	交易品种	交易范围	交易组织形式
现货市场	日前	省内	多采用邀约单边报量固定标准补贴、单边报量报价边际出清
	日内		
辅助服务市场	调频	省内、区域	单边报量固定标准补贴、单边报量报价边际出清
	调峰		
	备用		
需求响应	日前	省内	单边报量报价边际出清
	日内		

4 VPP 的低碳工程案例

VPP 的发展历程呈现出了明显的 3 阶段特征，可划分为：邀约型、交易型和自治型阶段^[23-24]。在邀约型阶段，VPP 的运行主要依靠行政指令和财政补贴驱动。随着电力市场机制不断完善，VPP 逐步向交易型阶段过渡。在交易型阶段，VPP 通过参与现货、辅助服务等市场交易实现资源优化配置并获取收益。这标志着 VPP 开始融入电力市场，通过市场机制实现资源的优化配置。最终，VPP 将发展到自治型阶段，形成跨空间自主调度的“虚拟电力系统”，实现更广泛的资源调度和优化，提高能源利用效率，降低碳排放。

当前我国 VPP 发展正处于市场化转型的关键期，受限于储能技术、分布式电源渗透率和电力市

场机制等制约因素，整体仍处于政策驱动向市场主导的过渡阶段。从工程实践来看，我国 VPP 建设已取得显著减排成效，已经在国内多个省市落地实践，形成了一批具有示范意义的低碳工程案例，如表 4 所示。

表 4 中国 VPP 部分示范项目（2021 年至今）
Tab.4 Part of the demonstration project of VPP in China (2021 to present)

运行时间	省份	公司	项目名称
2021.01	江苏	江苏南京供电公司	江北新区智慧能源协调控制系统 VPP
	安徽	合肥供电公司	安徽合肥“VPP”
2021.03	浙江	浙江电网	浙江丽水绿色能源“VPP”
2021.05	上海	国网上海电力	上海“VPP”
2021.06	湖北	湖北电网武汉供电公司	武汉市“VPP”试点项目
	浙江	国网平湖市供电公司	浙江平湖县域“VPP”
2021.09	广东	广州供电局	广州市 VPP
2021.11	广东	深圳供电局、南网科研院	深圳网地一体 VPP 平台
2022.06	广东	国电投深圳能源发展有限公司	国电投深圳能源发展有限公司 VPP 平台
	浙江	国网浙江综合能源公司	国网浙江综合能源公司智慧 VPP 平台
2022.08	广东	深圳供电局	深圳 VPP 管理中心
2022.11	浙江	华能浙江能源开发有限公司	浙江省 VPP
2023.06	福建	国家电网厦门供电公司	厦门市 VPP 平台
	山西	华能山西能源销售有限责任公司	新绛源网荷储一体化项目 VPP 智慧管理平台
2024.03	四川	思极星能科技（四川）有限公司	政企协同调节型 VPP
2024.06	山西	国网山西电力有限公司	现货模式下虚拟电吃
2024.07	浙江	中国广核集团	中广核 VPP 示范平台

近年来，我国 VPP 示范项目建设呈现蓬勃发展态势，已从最初的技术验证阶段逐步迈向规模化商业应用的新阶段。从地域分布来看，VPP 示范项目已覆盖华东、华南、华北、西南等多个区域；从时间维度来看，项目建设呈现出明显的加速发展趋势，技术创新和商业模式迭代速度不断加快。

2021 年江苏南京建成首个 VPP 智慧能源协调控制系统，实现分布式资源聚合与调峰服务市场化运营；湖北武汉试点项目则创造了局部降低监控

负荷700 000 kW, 减排300万t的效益。2022年广东、浙江等地相继推出市场化交易平台, 其中浙江项目聚合33 800 kW可调资源, 标志着VPP规模化应用取得突破。

2023年以来, 我国VPP建设进入高质量发展阶段。山东、四川、山西等地陆续推出新型VPP示范项目, 如华能山西的智慧管理平台、思极星能科技的政企协同调节型VPP, 以及国网山西电力的现货市场模式VPP, 这些项目显示出VPP在技术集成、商业模式和市场机制上的持续创新。其中, 四川的项目创新性地采用了政企协同模式, 通过政府引导和市场运作相结合的方式, 提高了各类资源参与系统调节的积极性。特别值得注意的是, 2024年中广核在宁波投运的国内首个全绿电VPP项目, 创新构建了源荷储充一体化管理模式, 实现24 h可溯源绿电供应, 为清洁能源消纳提供了新范式。这一创新实践不仅拓展了VPP的资源聚合范围, 也为可再生能源发展提供了新的思路, 同时也标志着VPP在促进清洁能源消纳方面迈出新的

一步。这些实践案例表明, 我国VPP发展已从单纯的技术验证转向商业模式创新, 正逐步建立起适应电力市场机制的运营体系。各示范项目在提升可再生能源利用率和降低碳排放方面成效显著, 为行业规模化发展积累了重要经验。

随着技术的不断进步和市场机制的逐步完善, VPP将在实现跨空间自主调度、提高能源利用效率、降低碳排放等方面发挥更大作用, 成为我国能源体系绿色转型与高质量发展的重要推动力。当前, VPP的发展仍面临跨区域资源调度技术瓶颈、市场交易机制不完善、利益分配模式待优化等挑战。下一步需要重点突破关键技术壁垒, 健全市场化运营体系, 构建公平合理的利益共享机制, 同时加强国际交流合作, 共同推进VPP标准体系建设。在政策支持和技术创新的双重驱动下, VPP必将成为实现“双碳”目标的坚实技术支撑, 不仅为我国能源绿色低碳转型提供创新实践路径, 也将为全球能源可持续发展贡献中国智慧和方案。

5 结论

VPP作为能源系统数字化转型和清洁能源转型的关键载体, 正在我国经历从试点示范到规模化应用的重要发展阶段, 主要体现在以下几个方面。

(1)在政策层面, 随着电力市场化改革的深入推进, 国家、地方相继出台了一系列支持政策, 推动VPP从早期的政策驱动、补贴依赖逐步转向市场化运营;

(2)在技术层面, 人工智能、区块链、数字孪生等新技术的应用不断推动VPP向更加智能化、自主化的方向发展。

(3)在市场层面, 多元主体的积极参与和商业模式的不断创新为行业发展注入了持续动力; 在应用层面, VPP正在从单一的削峰填谷向综合能源服务拓展。

未来为更好地推动VPP的规模化发展, 需要构建全方位支撑体系。

(1)在技术标准方面, 应重点推进VPP接入规范、通信协议和计量标准的统一, 通过建立“产学研用”创新联盟, 加快边缘计算、区块链等核心技术的研发与应用;

(2)市场机制创新层面需着力探索“VPP+”商业模式, 完善电力市场交易规则设计, 构建基于贡献度的收益分配模型。数据安全领域层面要应用加密算法保障传输安全, 并建立用户数据分级授权机制;

(3)示范应用方面, 建议选取高比例可再生能源园区作为首批示范基地, 重点验证VPP的协同调度算法, 形成可复制的商业运营模板。通过系统性突破技术、市场和制度瓶颈, 实现VPP从试点示范到规模化应用的跨越式发展。

总体来看, 中国VPP市场虽然在技术、市场、安全等方面存在挑战, 但在政策红利、电网需求与改革驱动下有着广阔的前景。未来, VPP有望进一步拓展其功能和应用场景, 成为推动能源转型和电力系统高效运行的重要力量。

参考文献

- [1] 雷恺杰. 基于“双碳”背景的电力行业节能减排分析[J]. 节能, 2025, 44(03): 19-21.
LEI K J. Energy-saving and emission reduction analysis of electric power industry based on the background of “double carbon” [J]. Energy Conservation, 2025, 44(03): 19-21.
- [2] 叶幸, 邱辰, 艾琳, 辛颂旭, 郭雁珩. “双碳”目标下可再生能源绿证与碳交易衔接机制的思考[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(5): 12-20.
YE Xing, QIU Chen, AI Lin, XIN Songxu, GUO Yanheng. Connection mechanism between green certificates and carbon

- trading mechanism under the “double carbon” target[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(5): 12–20.
- [3] 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(05): 602–615.
PENG D G, SHUI J Y, LU Z X, et al. Review of virtual power plant under the background of “dual carbon” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(05): 602–615.
- [4] 赵行明, 潘海捷. 集群控制基站备电资源打造铁塔集团“虚拟电厂”[J]. 产业创新研究, 2024, (16): 8–10.
ZHAO X M, PAN H J. Cluster control base station backup power resources to create a “virtual power plant” for China Tower Group[J]. Industrial Innovation, 2024, (16): 8–10.
- [5] WEI X, XU Y L, SUN H B, et al. Day-ahead optimal dispatch of a virtual power plant in the joint energy-reserve-carbon market[J]. Applied Energy, 2024, 356122459–.
- [6] WANG P C, GE Y, YU N, et al. Low-carbon optimal dispatch of virtual power plant based on time-of-use ladder carbon emission rights exchange mechanism[J]. Systems Science & Control Engineering, 2023, 11(1): .
- [7] 刘超波, 李新利, 时于凯, 等. 考虑变热价—综合需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51(06): 30–41.
LIU C B, LI X L, SHI Y K, et al. Low carbon economic dispatching of virtual power plant considering changing heat price-integrated demand response[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2024, 51(06): 30–41.
- [8] 左娟, 艾芊, 王文博, 等. 虚拟电厂标准化现状及体系架构设计[J/OL]. 电力系统自动化, 1–13[2025–05–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250326.1417.002.html>.
ZUO J, AI Q, WANG W B, et al. Standardization status and system architecture design virtual power plant[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1–13[2025–05–26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250326.1417.002.html>.
- [9] 俞庆. 虚拟电厂业务发展的难点与建议[J]. 中国电力企业管理, 2025, (04): 8–9.
YU Q. Difficulties and suggestions for the development of virtual power plant business[J]. China Power Enterprise Management, 2025, (04): 8–9.
- [10] 杨挺, 张剑, 蔡绍堂, 等. 计及隐私数据保护的多虚拟电厂协同调度方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(08): 836–846.
YANG T, ZHANG J, CAI S T, et al. Collaborative scheduling method for multivirtual power plants considering privacy data protection[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2024, 57(08): 836–846.
- [11] 黄宇翔, 黄蔚亮, 牛振勇, 等. 虚拟电厂市场机制与盈利模式及欧洲运行实例分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(09): 17–30.
HUANG Y X, HUANG W L, NIU Z Y, et al. Market mechanisms and profit modes of virtual power plants and analysis of their operation cases in europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(09): 17–30.
- [12] 刘念. 虚拟电厂优化配置及低碳经济运行策略研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2024.
LIU N. Research on optimal configuration and low carbon economic operation strategy of virtual power plant[D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2024.
- [13] 傅中兴, 邹蓉蓉, 王佳宁, 等. 商业型与技术型虚拟电厂优化调度技术研究[J]. 机电信息, 2019, (18): 96–97.
FU Z X, ZOU R R, WANG J N, et al. Research on optimal scheduling technology of commercial and technical virtual power plants[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019, (18): 96–97.
- [14] 刘浩杰. 虚拟电厂建设的成效、挑战及对策建议[J]. 发展研究, 2025, 42(02): 37–43.
LIU H J. The effect, challenge and countermeasures of virtual power plant construction[J]. Development Research, 2025, 42(02): 37–43.
- [15] 周倜然. 市场交易型虚拟电厂将迎来广阔空间[N]. 中国电力报, 2025–05–16(004).
ZHOU T R. Market trading virtual power plants will usher in broad space[N]. China Electric Power News, 2025–05–16(004).
- [16] 张钧钊. 虚拟电厂参与电—碳联合市场的交易机制及竞价策略研究[D]. 河南: 郑州大学, 2023.
ZHANG J Z. Research on the trading mechanism and bidding strategy of virtual power plants participating in the combined electricity and carbon market[D]. Henan: Zhengzhou University, 2023.
- [17] 雷若愚. 考虑碳交易的虚拟电厂优化运行及收益分配研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
LEI R Y. The optimal operation and revenue allocation of virtual power plant considering carbon trading[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [18] 郭康壮, 赵俊, 李海斌, 等. 考虑碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 分布式能源, 2025, 10(02): 69–80.
GUO K Z, ZHAO J, LI H T, et al. Low carbon economic dispatch of virtual power plants considering carbon trading

- and demand response[J]. Distributed Energy, 2025, 10(02): 69–80.
- [19] 陈浩, 马刚, 钱达, 马健, 彭乐瑶. 绿证-碳交易机制下考虑阶梯需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(5): 21–30.
CHEN Hao, MA Gang, QIAN Da, MA Jian, PENG Leyao. Optimization of regional integrated energy systems under green certificate and carbon trading mechanism considering tiered demand response[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(5): 21–30.
- [20] 洪迎桓. 计及碳交易的虚拟电厂优化调度模型[J]. 云南水力发电, 2025, 41(02):177–181.
HONG Y H. A virtual power plant optimal dispatching model considering carbon trading[J]. Yunnan Water Power, 2025, 41(02):177–181.
- [21] 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(01):80–87.
WANG B W, ZHANG B H, LU Y, et al. Multi-virtual power plant master-slave game coordination strategy considering carbon trading[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(01):80–87.
- [22] 舒征宇, 朱凯翔, 王灿, 等. 考虑碳交易的虚拟电厂日前电力市场竞争策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(05):58–68.
SHU Z Y, ZHU K X, WANG C, et al. Virtual power plants participating in day-ahead electricity market bidding strategy considering carbon trading[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(05):58–68.
- [23] 钟永洁, 汤成俊, 王紫东, 等. 我国虚拟电厂的发展演进和关键技术及难点分析[J]. 浙江电力, 2025, 44(02): 13–31.
ZHONG Y J, TANG C J, WANG Z D, et al. Analysis of the evolution, key technologies, and challenges of virtual power plants in China[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(02): 13–31.
- [24] 张文博, 秦文萍, 刘佳昕, 陈玉梅, 刘博洋, 赵按霆. 绿证-电-碳耦合市场下计及需求响应与租赁共享储能的VPP鲁棒优化调度策略[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(5): 31–40.
ZHANG Wenbo, QIN Wenping, LIU Jiaxin, CHEN Yumei, LIU Boyang, ZHAO Anting. Robust optimization scheduling strategy for virtual power plants considering demand response and leasing shared energy storage under the green certificate-electricity-carbon coupled market[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(5): 31–40.

收稿日期: 2025年5月31日

作者简介:



张海龙

张海龙(198?-), 男, 中级工程师,
研究方向为: 新能源发电技术。