

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

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]、数据安全和隐私保护亟待加强^[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。

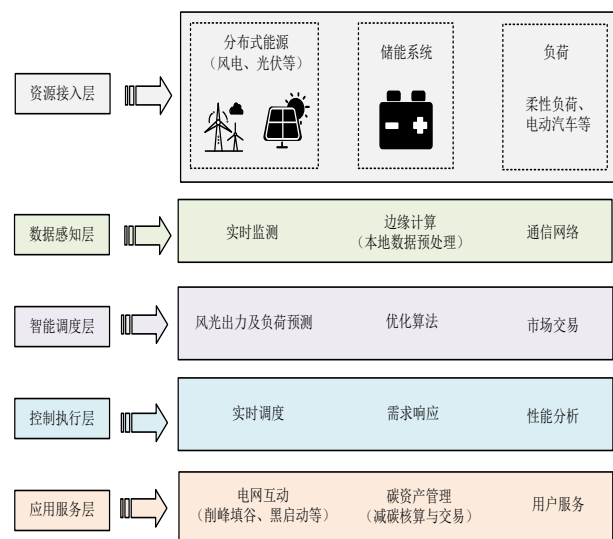


图1 VPP运行框架

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。

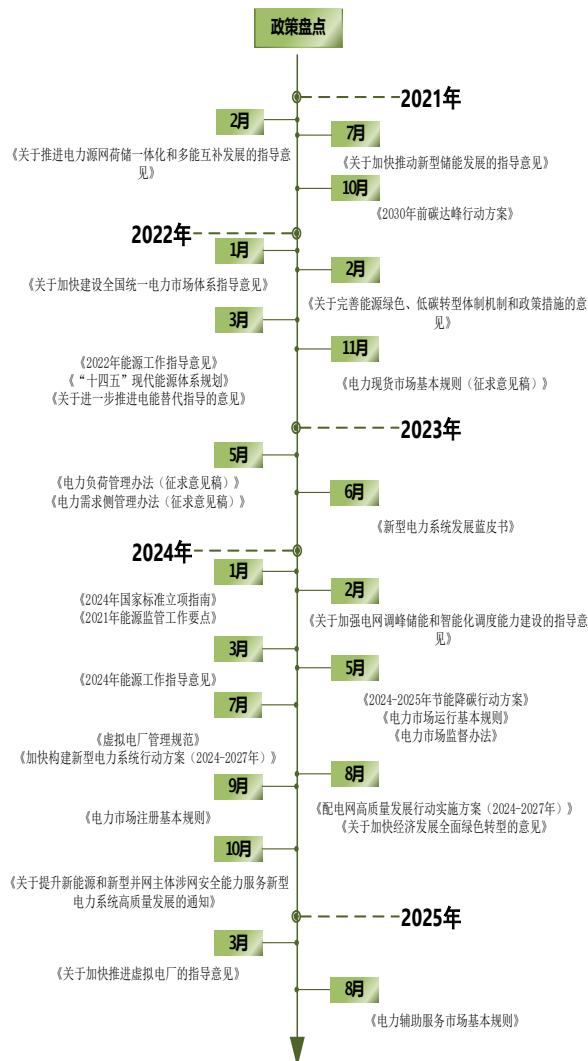


图2 中国 VPP 相关政策 (2021 年至今)

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, CCER)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。

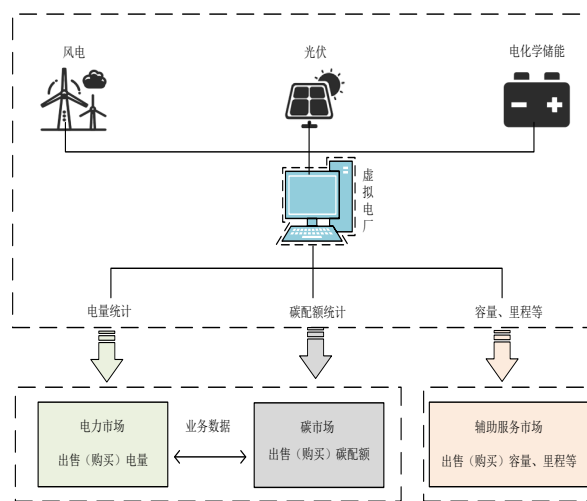


图3 VPP参与电-碳联合市场的运行模式

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

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。