



电力圆桌  
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

# 面向双碳的虚拟电厂技术支撑体系与商业模式研究

电力圆桌项目课题组

2023年11月

## 电力圆桌项目

电力圆桌（全称电力可持续发展高级圆桌会议）项目于 2015 年 9 月启动，旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略，邀请业内专家和各利益方参与，共同探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。通过建立一个广泛听取各方意见的平台机制，电力圆桌将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到平台讨论，选出核心问题委托智库开展高质量研究，并将研究成果和政策建议提交到平台征求意见，从而支持相关政策的制定和落地，推动中国电力行业的改革和可持续发展，提高电力行业节能减排、应对气候变化的能力。

## 报告编写人员

中国电力科学院：陈宋宋、王舒杨、董家伟、宫飞翔

感谢自然资源保护协会对报告提出的意见和建议

## 项目课题组



国家电网  
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司  
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

中国电力科学院（CEPRI）成立于 1951 年，是国家电网公司直属科研单位，是中国电力行业多学科、综合性的科研机构。主要从事超 / 特高压交直流输电变电技术、电网规划分析及安全控制技术、输变电工程设计与施工技术、配用电技术以及新能源、新材料、电力电子、信息与通信、用电与能效技术等研究，研究范围涵盖电力科学及其相关领域的各个方面，围绕电力科学及其相关领域的各个方面，攻克了一系列重大核心技术。在大电网安全分析与运行控制、特高压交直流输电、大规模新能源接入与大规模储能应用等关键技术研究处于国际领先水平，形成了具有显著优势的技术攻关实力。

NRDC



自然资源保护协会  
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 700 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为助力。NRDC 自上个世纪九十年代起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 40 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC 在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。更多信息，请访问：[www.nrdc.cn](http://www.nrdc.cn)。

# 面向双碳的虚拟电厂技术支撑体系与 商业模式研究

Research on Technological System and Business Model for  
Virtual Power Plants Towards Carbon Peaking and  
Neutrality Goals

2023 年 11 月

# 目 录

执行摘要 .....	01
1. 背景 .....	04
1.1 虚拟电厂建设背景 .....	04
1.2 虚拟电厂定义 .....	05
1.3 虚拟电厂政策环境 .....	06
2. 虚拟电厂建设的国内外进展 .....	08
2.1 国外发展情况 .....	08
2.2 国内发展情况 .....	12
2.3 国内外对比分析 .....	14
3. 虚拟电厂技术支撑体系 .....	16
3.1 虚拟电厂资源分类 .....	18
3.2 多元场景下虚拟电厂资源分析 .....	18
3.3 虚拟电厂资源潜力分析及验证 .....	21
3.4 虚拟电厂资源的聚合策略 .....	23
4. 虚拟电厂商业模式分析 .....	24
4.1 虚拟电厂盈利模式 .....	25
4.2 虚拟电厂定价机制 .....	28
5. 面向双碳目标的虚拟电厂建设路径与发展建议 .....	31
5.1 虚拟电厂建设路径 .....	31
5.2 虚拟电厂发展建议 .....	33
参考文献 .....	35
附录 A 虚拟电厂政策清单 .....	36
附录 B 国内外典型虚拟电厂示范工程 .....	38

# 执行摘要

虚拟电厂是聚合分布在一定区域的分布式电源、可调节负荷、储能等资源，应用计量、通信、控制、大数据、人工智能等技术，形成的具有电力市场交易或电网互动能力的物理或经济实体。虚拟电厂可以在碳达峰、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、减少高碳排放机组电力调峰出力和增容需求等作用，进而促进碳排放降低。

国外虚拟电厂建设方面，各国实践各具特色，与当地资源特性和电网发展面临的问题高度相关。欧洲虚拟电厂以分布式电源、储能资源为主，主要针对实现分布式电源可靠并网和电力市场运营。美国虚拟电厂在需求响应基础上发展而来，聚焦负荷资源聚合调配，侧重于用户侧柔性负荷主动响应以提升电网运行稳定性。澳大利亚虚拟电厂聚合资源以用户侧储能为主，可以参与紧急频率控制辅助服务市场和电能量市场，主要提供频率控制辅助服务。

国内虚拟电厂建设方面，我国在智能电网早期建设阶段侧重于坚强电网建设，因此虚拟电厂起步稍晚，但在政策、市场和盈利模式等方面均取得一定进展。（1）政策方面，国家层面尚未出台虚拟电厂专项政策，但在省市层面，部分省市出台了虚拟电厂专项政策，对虚拟电厂设计建设、参与交易、资金支持等多方面进行了引导和规范。（2）市场机制方面，虚拟电厂作为新型经营主体纳入政策规划，对市场准入、交易品种放开提供了支持。虚拟电厂可参与现货市场交易、辅助服务市场交易及需求响应市场交易，参与不同市场时按照具体市场规则执行。（3）盈利模式方面，国内虚拟电厂仍以邀约型为主，以需求侧响应、调峰调频为主要的收益来源。广东、江浙沪等经济发达地区为缓解电力供需不平衡问题，

对虚拟电厂需求旺盛，开发项目较多，电力交易试点较为成熟，具备业务开展的良好基础。未来虚拟电厂也有望在绿电绿证市场化交易、碳交易中进行盈利。

技术支撑体系方面，支撑虚拟电厂运营的技术核心在于对不同类型资源的聚合、分析、控制的能力，以及运用模型与算法支持调度与交易决策的能力，实现可测、可析、可控，对复杂且具有不确定性的各类资源进行高效、精细的管理以确保能提供可靠的、灵活的供电或调节能力，以获得最佳的经济效益。

商业模式方面，目前国内的虚拟电厂还处在商业模式的探索阶段。（1）从虚拟电厂的收益来源来说，已经开展的虚拟电厂业务模式主要以邀约型需求响应为主，盈利模式来源于响应补贴。但是需求响应属于偶发交易，在电网供需调节存在困难时触发，具有交易频次不确定的特点，无法构成虚拟电厂运营商主要盈利模式。随着中长期市场、现货市场、绿电交易市场、辅助服务市场等逐步放开，虚拟电厂可作为一个市场主体全面参与到市场中，主要盈利模式除了需求响应，还包括辅助服务交易、电力现货交易等。（2）从虚拟电厂成本来说，除了平台与设备建设等前期固定成本外，不同类型虚拟电厂运营模式对应的运维成本差别较大。由于虚拟电厂运营平台一方面对接电力交易中心，另一方面对接各类资源聚合商，组织资源主体参与各类电力市场交易，并完成相关结算和利益分配。所以运营平台对不同资源组合的定价机制、利益分配机制的设计与创新，是激发各类用户侧资源积极参与虚拟电厂，提高虚拟电厂整体效益的关键。

虚拟电厂建设的顶层设计方面，应从国家层面加快制定和发布虚拟电厂政策文件，结合“双碳”目标推进路线、新型电力系统建设要求和相关技术发展趋势，从管理要求、技术参数、运营模式等方面，加快制定虚拟电厂系列标准规范，构建完整的技术体系，推动虚拟电厂发展规划，结合新型电力系统建设规划和不同地区资源禀赋，明确虚拟电厂在各阶段的发展重点，推动我国虚拟电厂有序发展，将需求侧资源与发电侧资源调节能力等同，发挥虚拟电厂对“双碳”目标实现的积极作用。“双碳”目标实现进程的达峰期、平台期、下降期，新型电力系统建设对应分为加速转型期、总体形成期和巩固完善期，虚拟电厂发展的邀约期、交易期和自治期与“双碳”路径和新型电力系统建设可以有机结合。

- ◎ 在达峰期（当前到2030年），多元资源分别参与主要以邀约形式组织的电网互动，其中负荷型虚拟电厂依托终端用能电气化替代有望快速发展，要求具备削峰、填

谷能力，积极参与需求响应和辅助服务。同时，虚拟电厂储能资源可结合可再生能源电源进行峰谷套利和参与调峰、调频、备用等辅助服务，进一步提升可再生能源消纳比例。

- ◎ 在平台期（2030 年到 2045 年），虚拟电厂聚合资源不断丰富，在工业领域可结合电能替代深入挖掘削峰和填谷资源，在交通领域拓展新能源汽车、充电站储能，探索配置长时储能资源。虚拟电厂向源荷混合型转变，利用新型电网技术充分参与集中地电能量市场和辅助服务市场及分散式交易市场，具备更充足的交易议价能力，促进可再生能源渗透率进一步提升。
- ◎ 在下降期（2045 年到 2060 年），随着分布式电源接入电网承载力提升，虚拟电厂将进入自治期，快速发展分布式光伏、分布式风电机组等可再生能源，与综合电力平衡需求和电力市场信息，参与市场交易或进行本地化的消纳和调控；拓展氢能等多种储能资源，实现能源深度融合利用，形成内部自供应、自消纳与自平衡的能力。

在碳中和目标达成后，社会发展所需新增负荷可结合地理位置、电气位置、当地能源结构和虚拟电厂建设等情况统筹规划，需要注重平衡虚拟电厂存量资源与新建资源比例，引导新建资源高效参与交易和互动。

# 背景

## 1.1 虚拟电厂建设背景

“双碳”目标推动系统电源结构与负荷特性加速转变。

在电源侧，为应对全球气候变暖、能源短缺等问题，风电、光伏等可再生能源发电逐步成为我国能源结构转型的重要力量。我国可再生能源开发虽然起步较晚但势头强劲，且已成为未来电力系统的发展方向，预计到2060年可再生能源装机规模将达到60亿千瓦，装机占比将达到84%以上，一次能源消费非化石能源占比将到达78%<sup>[1]</sup>。2022年我国新增可再生能源装机规模已达1.52亿千瓦，占国内新增发电装机的76.2%。可再生能源并网规模不断扩大，逐步成为发电量增量主体。但可再生能源发电出力的波动性、随机性和间歇性，对电力系统安全稳定运行带来严峻挑战。

在负荷侧，随着社会经济发展和电气化水平的提升，电力系统尖峰负荷屡创新高、峰谷差持续拉大，个别时段、局部地区电力供需矛盾突出。“十四五”期间全社会用电量增长率预计为4~5%，且受第二产业用电比重稳步下降、第三产业和居民用电占比逐年提高影响，最大负荷增速将高于用电量增速，夏季冬季电力负荷“双高峰”特征更加显著，预测2025年最大日峰谷差率将增至35%，最大日峰谷差达到4亿千瓦<sup>[2]</sup>。

因此，我国当前面临着电力供需新形势，电力供需平衡压力和可再生能源消纳困难叠加并长期存在。新型电力系统建设对提升电力系统灵活性调节能力、提高电力客户供电保障和绿色消费水平提出了更高要求，但当下电力系统峰谷调节、频率调节难度显著上升，现有调节容量捉襟见肘，迫切需要一种可快速应用、具有经济性的新型市场主体参与协同管理和运行调控，分担电力系统调节压力，提升电力系统可靠性和灵活性。

随着新型电力系统的发展，具备调节潜力的用户侧资源数量飞速增长，包括工商业和居民各类可调节灵活负荷，电动汽车、分布式储能等储能资源，屋顶光伏和小型风电等分布式可再生能源，为电力系统提供了潜在的灵活调节手段。然而，上述用户侧多元灵活资源具有点多量大、容量较小、电压等级低、主体多样等特征，需要利用数智化技术手段，通过市场化模式，聚合海量的零散灵活资源以提升系统整体的调度可靠性和灵活性。

## 1.2 虚拟电厂定义

虚拟电厂（Virtual Power Plant）是聚合分布在一定区域的分布式电源、可调节负荷、储能等资源，应用计量、通信、控制、大数据、人工智能等技术，形成的具有电力市场交易或电网互动能力的物理或经济实体，也可指实现此目的的综合应用技术，进一步可引申为搭载、应用此技术的软硬件及服务产品。虚拟电厂可以在碳达峰、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、减少高碳排机组电力调峰出力 and 增容需求等作用，进而促进碳排放降低。图 1 给出了虚拟电厂相关功能和业务的示意图。

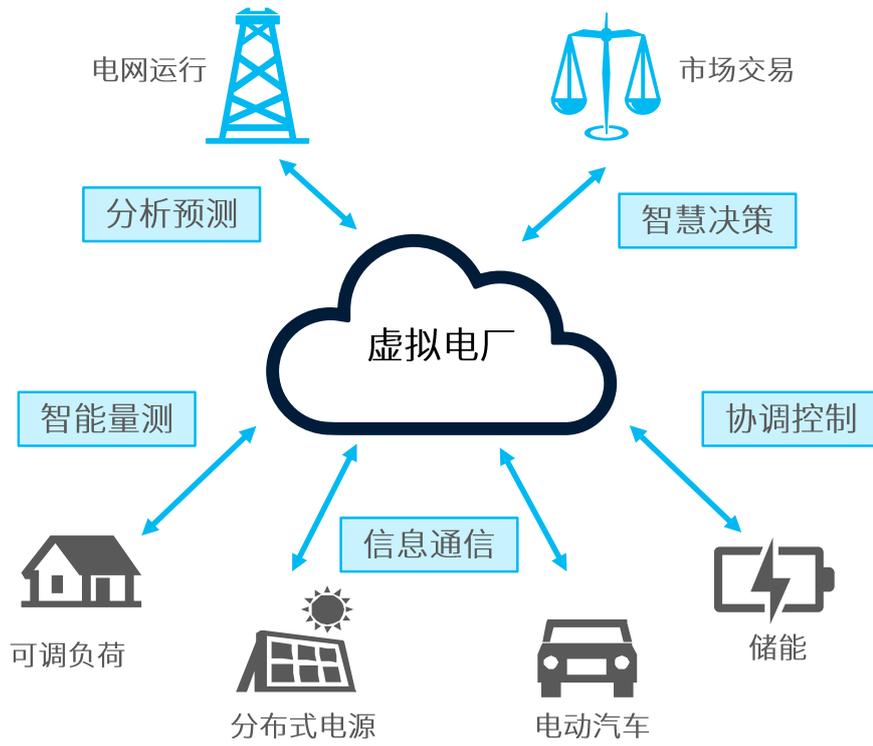


图 1. 虚拟电厂示意图

### 1.3 虚拟电厂政策环境

国家发改委、国家能源局等部门出台多项相关政策，明确要求加强需求侧管理，充分挖掘用户端调节潜力，提升需求侧调峰能力<sup>1</sup>。《“十四五”现代能源体系规划》（发改能源〔2022〕210号）要求“大力提升电力负荷弹性。加强电力需求响应能力建设，整合分散需求响应资源，引导用户优化储用电模式，高比例释放居民和一般工商业用电负荷的弹性。……开展工业可调节负荷、楼宇空调负荷、大数据中心负荷、用户侧储能、可再生能源汽车与电网（V2G）能量互动等各类资源聚台的虚拟电厂示范”，确立了虚拟电厂的市场主体地位。《新型电力系统蓝皮书》指出，要“积极培育电力源网荷储一体化、负荷聚合服务、综合能源服务、虚拟电厂等贴近终端用户的新业态新模式，整合分散需求响应资源，打造具备实时可观、可测、可控能力的需求响应系统平台与控制终端参与电网调度

1 虚拟电厂相关政策清单见附件 A。

运行，提升用户侧灵活调节能力”，指出了虚拟电厂在新型电力系统中应发挥的作用。《电力需求侧管理办法（2023年版）》提出“支持各类电力需求侧管理服务机构整合优化可调节负荷、分布式电源、新型储能等需求侧资源，以负荷聚合商或虚拟电厂等形式参与需求响应，创新用电服务模式，培育用电服务新业态。”，明确支持了虚拟电厂作为需求侧资源管理、互动的基本单元的建设方向<sup>[3]</sup>。

因此，建立更加灵活的需求侧资源开发利用模式是新形势下电力供应的迫切要求，常态化发挥需求侧资源的灵活调节作用是解决新型电力系统源荷双侧不确定性的关键路径。随着新型电力系统和全国统一电力市场加速建设，通信技术的发展与近期人工智能技术的突破，有望解决用户感知交互、用户可调潜力动态预测分析等问题，提升虚拟电厂实时参与电力系统运行的能力，实现资源高效、精准、经济调用，为虚拟电厂发展与实践提供了机遇。

# 2 虚拟电厂建设的 国内外进展

## 2.1 国外发展情况

国外虚拟电厂实践各具特色，与当地资源特性和电网发展面临的问题高度相关。欧洲虚拟电厂以分布式电源、储能资源为主，主要针对实现分布式电源可靠并网和电力市场运营。美国虚拟电厂在需求响应基础上发展而来，聚焦负荷资源聚合调配，侧重于用户侧柔性负荷主动响应以提升电网运行稳定性。澳大利亚虚拟电厂聚合资源以用户侧储能为主，可以参与紧急频率控制辅助服务市场和电能量市场，主要提供频率控制辅助服务。

### (1) 欧洲

在欧洲，德国、英国、法国虚拟电厂发展起步较早、项目数量和案例相对较多，并已出台相关引导政策和保障措施，推动虚拟电厂健康有序发展。德国结合自身可再生能源发展需求，重点解决新增分布式电源并网和市场交易问题；英国将灵活电力市场机制纳入能源战略，重点解决市场交易和平衡服务的机制障碍问题；法国明确虚拟电厂参与市场的门槛和机制，引导技术发展方向，确保虚拟电厂发展符合电网需求。

政策方面，以德国为例，相关法律规定了聚合商的市场角色、机会和义务，在《能源经济法》（Energiewirtschaftsgesetz, EnWG）、《可再生能源法》、《电网加速扩建法》

等法律中设置了直接或间接促进虚拟电厂发展的条款，为虚拟电厂聚合能源资源提供了法律保障。2016年，德国联邦网络局（BNetzA）提出了一个“聚合商模式”，并启动了一个利益相关方进程，与相关市场主体共同对这个模式进行讨论。这一过程促使一项行业指导方针（BNetzAAZ.BK6-17-046）的出台，其中包括将“聚合商”定义为市场参与者的角色。此外，2021年7月，德国政府对聚合商的角色、市场机会和义务进行了法律界定。

市场机制方面，以德国为例，虚拟电厂主要参与现货电力市场（包括日前和日间）、平衡市场（类似国内辅助服务市场）、可中断负荷投标和电网阻塞管理。现货市场方面，虚拟电厂活跃在日前市场和日间市场。日间市场的交割期较短，对可在短时间内迅速做出反应的灵活性产品有额外需求。虚拟电厂能在15分钟和1小时市场提供快速可控的灵活性，因此虚拟电厂的灵活性资源池正好可以在日间市场提供这项服务。平衡市场方面，虚拟电厂主要通过现货交易或输电网运行商招标参与平衡市场<sup>[4]</sup>。由于德国的输电系统运营商接受聚合资源参与平衡市场，虚拟电厂可用其资源池中聚合的各种分布式能源资源，参与平衡市场、提供备用服务，特别是二次备用（5分钟激活时间，最小投标单位5兆瓦）和三次备用服务（15分钟激活时间，最小投标单位5兆瓦）。提供二次控制备用和三控制次备用的供应商通过容量价格和平衡能量价格获得收益，对实际使用的平衡能量进行计费，并将成本转移至导致启动备用的平衡责任方。可中断负荷方面，5兆瓦以上负荷的虚拟电厂可参与输电系统运营商的可中断负荷招标。电网阻塞管理方面，德国引入了“调度管理商”和“再调度2.0”的再调度方案，为虚拟电厂运营商创造了新的商机。

实施模式方面，以德国为例，虚拟电厂单元控制系统监测接入的机组和可控负荷的实时发用电负荷，机组和可控负荷接受单元控制系统的控制。虚拟电厂内的每一个机组和可控负荷通过4G公网与单元控制系统进行双向移动通信，优化决策系统通过监测市场电价、调度机构指令等各种信息，做出市场交易决策，并将最新的发用电计划通过单元控制系统下发给各机组和可控负荷，有些代理商还具备对平衡单元内的机组和可控负荷进行遥测和遥调的能力。

标准制定与应用方面，欧洲主要有IEC 62746-10-1:2018、IEC 62745-10-3:2018和IEC TS 62939-10-2:2018。这些标准规定了如何实施双向信号系统，以促进电力服务提供商、

聚合器和最终用户之间的信息交换，并通过技术规范提供了一种架构来定义需求侧和电网之间的智能设备 / 系统之间的信息交换接口。

## (2) 美国

美国基于系统效益收费的虚拟电厂通过合理利用峰谷电价、可中断电价等电价政策引导用户尽可能在低谷时段用电，合理避开高峰时段，同时吸收更多的虚拟电厂参与者，采用技术更先进的节电设备提高终端用电效率，进而节约电能。

政策方面，美国碳中和目标、气候与环境正义法案和国家能源行动法案为虚拟电厂提供了发展环境，美国联邦能源监管委员会（FERC）于 2018 年发布 2222 号法令，要求独立系统运营商（independent system operator, ISO）、区域输电组织允许储能和分布式能源聚合体等参与批发电力市场、辅助服务市场和容量市场，为虚拟电厂发展扫清了政策障碍。

市场机制方面，在加州电力市场，不同的参与方式对虚拟电厂资源聚合的要求有所不同。虚拟电厂可通过代理需求响应资源（proxy demand resource, PDR）或分布式能源供应商（distributed energy resource provider, DERP）市场机制参加日前、实时能量市场与日前实时旋转备用 / 非旋转备用市场。PDR 允许虚拟电厂通过负荷削减参与电力市场，DERP 通过聚合一定范围内的分布式能源作为虚拟资源参与电力市场。相较于 PDR，DERP 由于对聚合的分布式资源种类没有特殊要求并且允许双向调节更符合虚拟电厂的概念，但必须遵守分布式能源供应商协议，并接受 ISO 的价格规定。以上两种参与方式均需虚拟电厂通过 ISO 的新资源认证流程并寻求调度协调员（scheduling coordinator, SC）代理虚拟电厂进行报价与结算。对于 PDR，虚拟电厂参与能量市场竞标容量应达到 100 千瓦，参与辅助服务市场竞标容量须达到 500 千瓦并且持续时间应达到 30 分钟；虚拟电厂聚合的需求响应资源虽不要求由同一本地服务机构提供服务，但为确保需求响应资源调度不会造成额外的阻塞，虚拟电厂聚合的需求响应资源必须位于同一子负荷区域。对于 DERP，虚拟电厂所聚合的最小容量应达到 500 千瓦，当跨越多个定价节点时聚合容量必须小于 20 兆瓦。

实施模式方面，美国虚拟电厂项目类型多样，建设和运营虚拟电厂的主体包括配售电力公司和独立第三方虚拟电厂公司，参与方包括电力公司、硬件装备制造商、平台软件供应商、第三方聚合商、居民和工商业用户等。美国虚拟电厂均基于社区（用户）的商业模式主要通过社区、工商业区等形式实现用户侧光伏、储能设施、电动汽车等能源汇集，参加电网平衡，为电网提供服务。

标准制定与应用方面，美国开放式自动需求响应（Open Automated Demand Response, OpenADR）<sup>[5]</sup> 通信规范，提供了 DR 标准化信息模型及非专有开放式的标准化 DR 接口，用于支撑自动 DR 业务开展。在 2010 年 5 月，OpenADR 正式成为美国首批智能电网互操作标准之一。能源供应商使用 OpenADR 标准向各种客户安装的用电设备发送快速、可靠、安全的价格和事件消息，例如建筑能源管理系统、智能温控器、空调、电动车辆充电站等。

### （3）澳大利亚

澳大利亚电力系统发展较早，电力系统管理、市场机制较成熟。随着可再生能源快速发展，澳大利亚通过试点方式探索虚拟电厂模式，推进虚拟电厂发展，提升电力供应可靠性与经济性。

政策方面，澳大利亚从 1991 年开始推动电力市场改革，建立了国家电力批发市场和零售市场，实行现货交易和金融合约交易，明确国家电力市场管理公司作为市场主体购买系统调频及调压的相关辅助服务。2020 年，推出新的电网辅助服务规程，根据电网安全运行及经济性的需求，将电网支持与控制辅助分为可靠性与安全辅助服务及有市场收益的辅助服务两类，为试点虚拟电厂创造了有利条件。

市场机制方面，澳大利亚为鼓励虚拟电厂进入电力市场，在市场机制上面做出了较大的改变，主要体现在三方面，一是提供了新的市场参与者，二是定义了新的辅助负荷分类方法，三是建立了新的监控量测机制。澳大利亚虚拟电厂参与国家电力市场主要有三种方式，方式一是虚拟电厂协调商与零售商签订商业合同，零售商作为虚拟电厂协调商的财务责任市场参与方 (financially responsible market participant, FRMP)，方式二是零售商既为虚拟电厂协调商同时也为 FRMP，方式三是虚拟电厂协调商为市场辅助服务提供

商（market ancillary services provider, MASP）仅可参加频率控制辅助服务（frequency control ancillary services, FCAS）市场<sup>[6]</sup>。其中，虚拟电厂协调商是指协调控制内部辅助服务负荷以满足虚拟电厂操作目标的实体，FRMP为连接点处代理的负荷支付现货市场费用。

实施模式方面，澳大利亚虚拟电厂项目主要由独立运营商开发运营，运营商兼顾资源的聚合与调度，为参与方提供储能设备及定制化解决方案，通过虚拟电厂整合平台对聚合资源进行调度参与市场交易。从商业架构看，澳大利亚虚拟电厂试验项目主要采用独立平台模式，由政府提供补贴并进行监管，以特斯拉、发电商AGL为代表的独立运营商负责搭建平台整合分布式光伏电源和储能装置等负荷侧快速响应调节资源。其收益来源主要有两类，一是通过平台将多余的太阳能电力回售给电网公司，二是平台利用储能系统为局部电力系统提供快速响应的辅助服务，在电力系统出现由事故或天气等原因引发的电源或电网事故时，为电网提供及时的辅助服务支持。

标准制定与应用方面，澳大利亚主要采用AS/NZS4755系列标准。AS4755系列标准规范了DR设备接口功能，定义了空调、电热水器、电池储能系统的DR模式，使用户侧用电设备具备快速响应、获取即时反馈信息能力。为帮助澳大利亚过渡到安全可靠的低碳电力系统，2017年3月颁布了AS/NZS4755.1标准更新版<sup>[7]</sup>，明确了DR系统框架，对DR支持设备（Demand Response Enabling Device, DRED）通信接口方式、发布事件指令内容等进行规范，并提出了验证、测试一个具体的DRED是否满足规范提出的要求的方法。

## 2.2 国内发展情况

国内在智能电网早期建设阶段，侧重于坚强电网建设，因此虚拟电厂起步稍晚。同时，我国电力市场仍处于加速建设中，有望依托新型电力系统和电力市场建设，快速推进虚拟电厂建设。

政策方面，国家层面尚未出台虚拟电厂专项政策，近年来，发改、能源、工信、科技等部门发文多有提及，要求推动虚拟电厂建设，发挥其在电力系统中平衡供需等作用。省

市层面，山西、上海、宁夏、济南、广州、深圳出台了虚拟电厂专项政策，对虚拟电厂设计建设、参与交易、资金支持等多方面进行了引导和规范。

市场机制方面，随着全国统一电力交易市场建设的推进，虚拟电厂作为新型经营主体纳入政策规划，对市场准入、交易品种放开提供了支持。虚拟电厂可参与现货市场交易、辅助服务市场交易及需求响应市场交易，参与不同市场时按照具体市场规则执行。市场建设初期，“电源型”、“负荷型”虚拟电厂参与中长期、现货及辅助服务市场，“混合型”虚拟电厂参与现货及辅助服务市场。在虚拟电厂内涵延伸至分布式可再生能源聚合后，也将参与市场化绿电绿证交易。在碳市场，随着电-碳耦合研究进一步推进，虚拟电厂将具备参与 CCER（国家核证自愿减排量）交易的能力。

盈利模式方面，国内虚拟电厂仍以邀约型为主，以需求侧响应、调峰调频为主要的收益来源。现存虚拟电厂项目与电力现货交易试点区域几乎重合，除河北冀北虚拟电厂外，目前开展虚拟电厂试点项目的省份均在两批电力交易试点省份名单中。广东、江浙沪等经济发达地区为缓解电力供需不平衡问题，对虚拟电厂需求旺盛，开发项目较多，电力交易试点较为成熟，具备业务开展的良好基础。未来虚拟电厂也有望在绿电绿证市场化交易、碳交易中进行盈利。

实施模式方面，我国尚未形成成熟的成套解决方案，虚拟电厂项目基本处于前期试点研究阶段。“十三五”期间，我国江苏、上海、河北、广东等地相继开展了虚拟电厂的试点。江苏省于2016年投运首套针对可再生能源大规模消纳的“源网荷智能电网”虚拟电厂系统；上海于2017年建成世界首个商业建筑虚拟电厂，即黄浦区商业建筑虚拟电厂示范工程；冀北2019年建成直接参与华北辅助服务市场的虚拟电厂示范项目，并参与了多项虚拟电厂国际标准制定。目前国内虚拟电厂的主要投资与参与方包括政府，电网企业，发电企业与资源聚合商，政府部门主要牵头虚拟电厂管理平台的建设，例如深圳虚拟电厂管理中心；电网与发电企业投资建设虚拟电厂运营平台，例如国网的冀北虚拟电厂、南网的“粤能投”虚拟电厂、国电投保定综合智慧零碳电厂；资源聚合商种类较多，主要为综合能源服务公司，售电公司，与车桩企业等直接对接用户资源的公司。

标准制定与应用方面，目前虚拟电厂国内外在编标准6项，其中IEC在编标准2项，国内在编标准4项。IEC标准为《虚拟电厂功能架构》和《虚拟电厂用例》已于2018年3

月正式立项。国内在编标准包括国家标准 2 项《虚拟电厂管理规范》和《虚拟电厂资源配置与评估技术规范》，行业标准 1 项《虚拟电厂可调节性能指标设计与计算方法》，团体标准 1 项《虚拟电厂硬件架构与设备终端总体要求》。

应用成效方面，目前深圳、冀北和上海已经建设发展了具有一定规模和调节能力的虚拟电厂示范项目和市场实践。在深圳，已建设有虚拟电厂聚合商接入平台。深圳虚拟电厂聚合商接入平台已接入分布式储能、数据中心、充电站、地铁等类型负荷聚合商 14 家，接入容量达 87 万千瓦，接近一座大型煤电厂的装机容量。预计到 2025 年，深圳将建成具备 100 万千瓦级可调能力的虚拟电厂，逐步形成年度最大负荷 5% 左右的稳定调节能力<sup>[8]</sup>。在冀北，按照“云管边端”体系架构建设了虚拟电厂平台。冀北虚拟电厂资源覆盖范围包括张家口、秦皇岛、承德、廊坊、唐山，资源类型涵盖可调节工商业负荷、蓄热式电锅炉、空气源热泵、储能、分布式光伏、电动汽车充电站、智能楼宇、制雪设施等泛在弹性资源。在上海，虚拟电厂平台架构涵盖了调度 - 交易 - 运营一体化虚拟电厂运营体系和分布自治、层级间规约异构适配技术架构，实现了虚拟电厂直接参与电力市场交易和调度系统优化调控以及海量散布异质资源分层分群控制需求，促进海量多元负荷资源友好高效接入。目前，上海已有 12 家虚拟电厂接入上海虚拟电厂运行管理与监控平台，虚拟电厂初步形成 1000MW 发电能力<sup>[9]</sup>，接入资源类型包括工商业楼宇、冷热电三联供、电动汽车、动力照明、铁塔基站等。按照分钟级、秒级响应能力区分资源参与的交易品种。

## 2.3 国内外对比分析

通过上述分析，国内外虚拟电厂的发展有较大差别，总结分析如表 2-1 所示。国内外典型虚拟电厂见文后附录 B。

表 2-1. 国内外对比分析

对比项	国外	国内
聚合资源类型	类型丰富，包括源侧、荷测及储能等各类资源。欧洲以分布式可再生能源为主，负荷侧资源类型占比较小。	以负荷侧资源调节为主。未能发挥国内丰富的分布式可再生能源资源优势，从而难以实现虚拟电厂的规模效益。
政策及市场成熟度	辅助服务市场和电力现货市场机制完善，尤其是电力现货市场更加成熟。	两类市场尚不成熟，大部分省份以试点方式在推进。
技术成熟度	核心技术更加成熟，尤其是其协调控制技术，可实现对各种可再生能源及负荷的灵活控制，对分布式可再生能源可控。	分布式可再生能源尚不可控，且协调控制策略有待完善。
商业模式	已实现商业化，主要通过以下方式获取收益：一是通过提供电力市场交易获得利润分成；二是主要通过参与调峰调频市场获取收益；三是通过配置储能装置获得辅助服务收益。	商业模式尚不清晰，以参与相对成熟的需求响应市场，及以虚拟电厂方式提供节能、用电监控等增值服务为主，参与辅助服务市场为辅，参与电力现货仍在尝试探索中。

# 3 虚拟电厂技术支撑体系

虚拟电厂的物理架构包括四层，即资源层、网络层、平台层和上级系统，如图 2 所示。虚拟电厂的物理核心在于运营管控平台，是实现各类资源主体管理和商业变现、连接上下环节的关键。

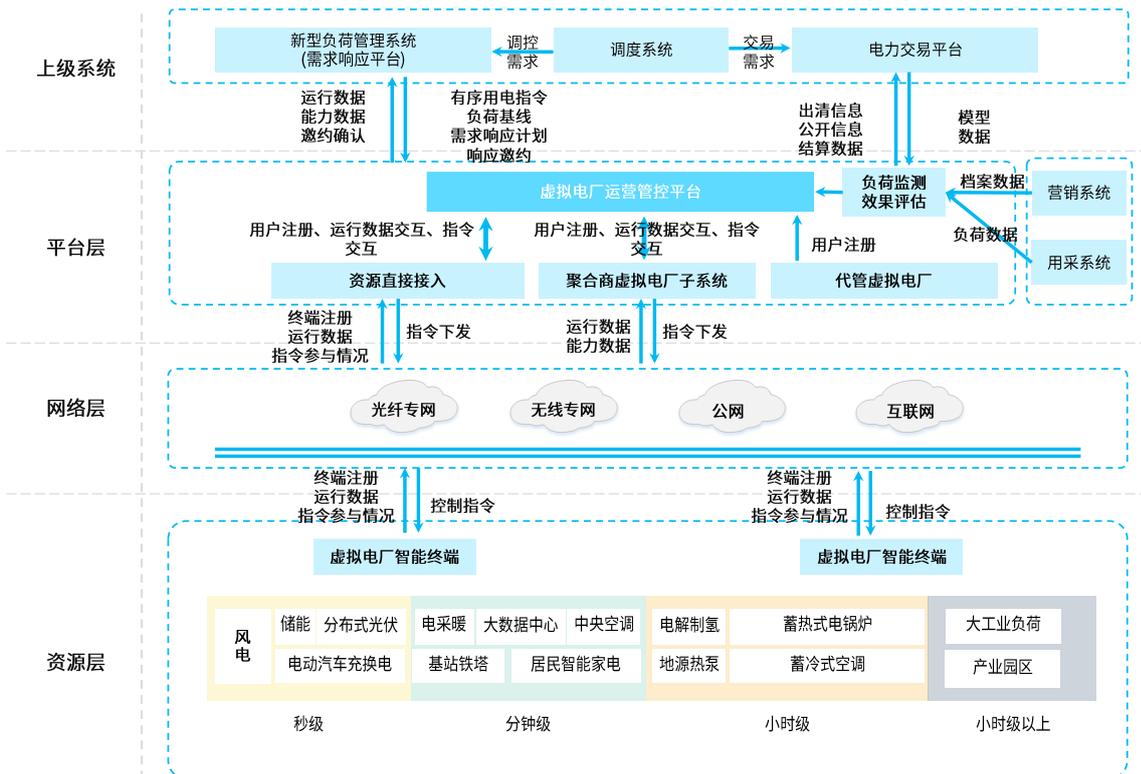


图 2. 虚拟电厂物理架构

虚拟电厂的运营业务包括数据监测、可调节潜力分析、控制策略、互动效果测量与验证、效益价值综合评估 5 个部分，图 3 给出了虚拟电厂的业务模型。其中，数据监测与感知是对工业、商业等各类调节资源进行运行参数监测与采集分析；通过可调节潜力分析，包括负荷功率调节方法、生产流程及经营特性分析方法对各类资源的调节潜力进行量化；控制策略部分针对资源的可调潜力与市场信息制定互动策略；互动效果测量与验证部分确定虚拟电厂和具体资源基线、计算响应电量和节约电力；效益价值综合评估部分分析电网、用户、电厂、社会等效益。

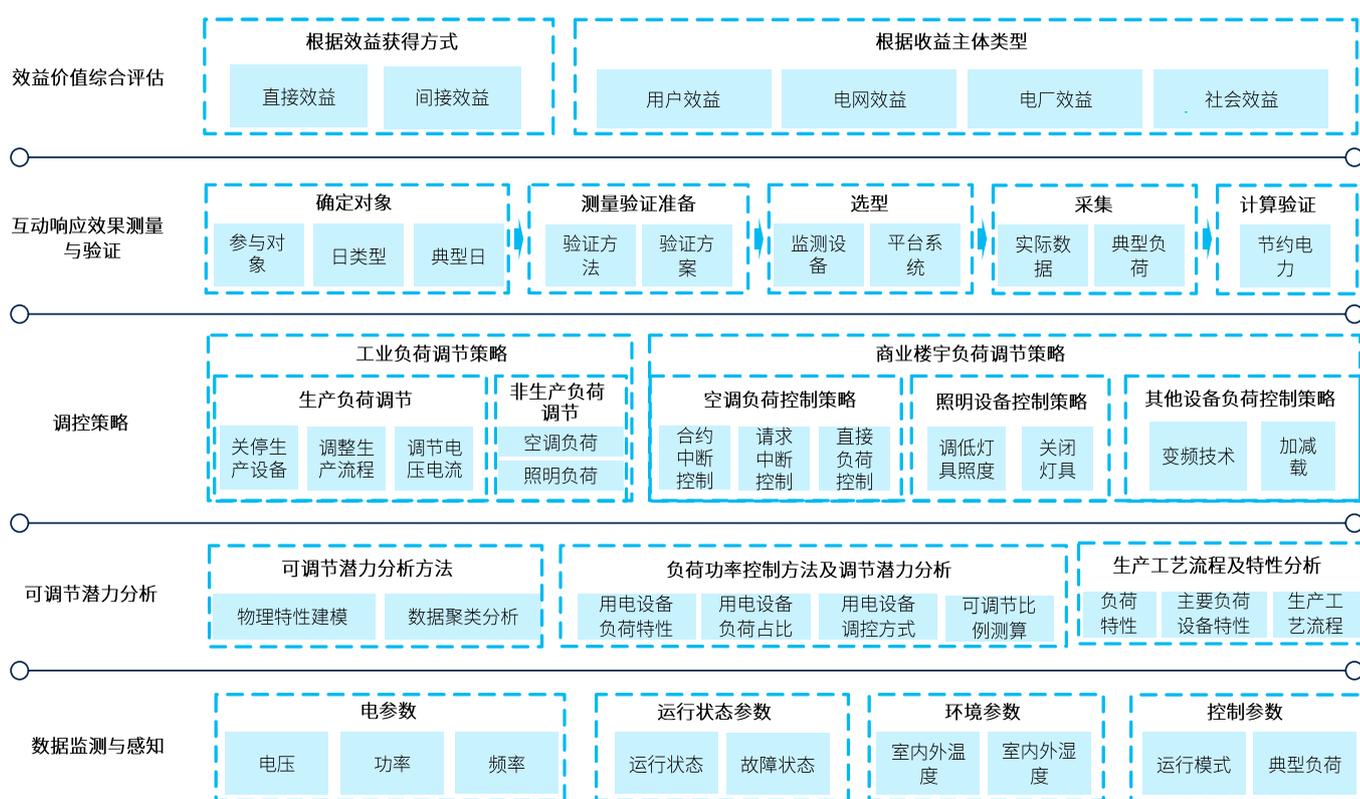


图 3. 虚拟电厂业务模型

支撑虚拟电厂运营的技术核心在于对不同类型资源的聚合、分析、控制的能力，以及运用模型与算法支持调度与交易决策的能力，实现可测、可析、可控，对复杂且具有不确定性的各类资源进行高效、精细的管理以确保能提供可靠、灵活的供电或调节能力，以获得最佳的经济效益。

本章将从资源分类、资源匹配、潜力分析和资源聚合策略等方面对支撑虚拟电厂运营的关键技术与方法进行详细介绍。

### 3.1 虚拟电厂资源分类

虚拟电厂资源分类涉及多种维度，可以基于不同的原则和方法进行，如能源类型、地理位置、运营模式等。在不同维度下，由于分类的根据与目标存在不同，分类结果也有所区别，需要考虑资源之间的相互关系和相互作用，以及其在虚拟电厂系统中的作用和影响。

在不考虑资源互动场景的最基础的分类方式中，可将虚拟电厂资源分为可调节负荷（包括柔性调节负荷和可中断负荷等）、分布式电源（如分布式光伏、分布式风电机组、小型燃机等）以及储能设备。可调节负荷涉及工业、建筑、交通等资源，可按照中断调控和柔性调控、响应时间尺度进一步分类。

根据参与互动场景，可分为可调节电量资源和可调整电力资源，进一步细分为调峰、调频以及可再生能源消纳资源。调峰资源包括降低电网高峰、填补低谷的负荷、储能和部分具有调控能力的分布式电源。调频资源是指当电力系统发生有功功率缺额而导致频率降低时，能够按照一定的控制策略帮助电网恢复频率的资源，目前仅储能设备具备相应技术能力。可再生能源消纳负荷是指能够应对风电等可再生能源随机性、间歇性的具备快速调整的负荷，主要包括蓄热电锅炉、双蓄空调以及蓄电池等设备。从调整电力的实际效果和应用约束角度分析，可调整电力资源包括可转移资源、可调控资源和可中断资源。

虚拟电厂资源分类后，资源之间的相互关系和相互作用的分析、不同类型资源的协同调度优化可提高虚拟电厂的整体效益。

### 3.2 多元场景下虚拟电厂资源分析

虚拟电厂资源具有很强的资源禀赋依赖性，而资源禀赋与地理位置和行业部门密切相关，如城市的建筑楼宇和工业园区的企业设备等，有不同的用电主体和用户侧资源，并且存在空间和时间的关联和互补性，需要加强协调和有效利用。

### (1) 建筑场景下虚拟电厂资源分析

建筑具有用电强度大<sup>2</sup>的特点，包括建筑中的空调负荷、电动汽车、移动基站、分布式电源、储能、充电站等。基于建筑场景建设的虚拟电厂与电网实现互动，可以降低电网尖峰负荷，提升电力系统在尖峰负荷时期的运行可靠性与安全性。

以上海市为对象分析公共建筑的用电情况。上海市 2019-2021 年公共建筑逐月用电强度如图 4 所示<sup>[10]</sup>，通过与两年同期数据进行对比分析可以发现，每年 4 至 10 月建筑逐月用电强度变化情况与气温变化趋势相符，如 2020 年 8 月平均温度高于 2019 年同期，对应 8 月能耗明显高于同期。

夏季随着气温不断升高，空调制冷需求逐渐增大，导致用电量也逐渐增加，因此夏季楼宇建筑空调负荷是造成电网尖峰负荷的重要原因，也是建设虚拟电厂的重要资源。在办公建筑、商业楼宇中空调负荷占比较大，约占建筑负荷的 40-60%<sup>[11]</sup>。

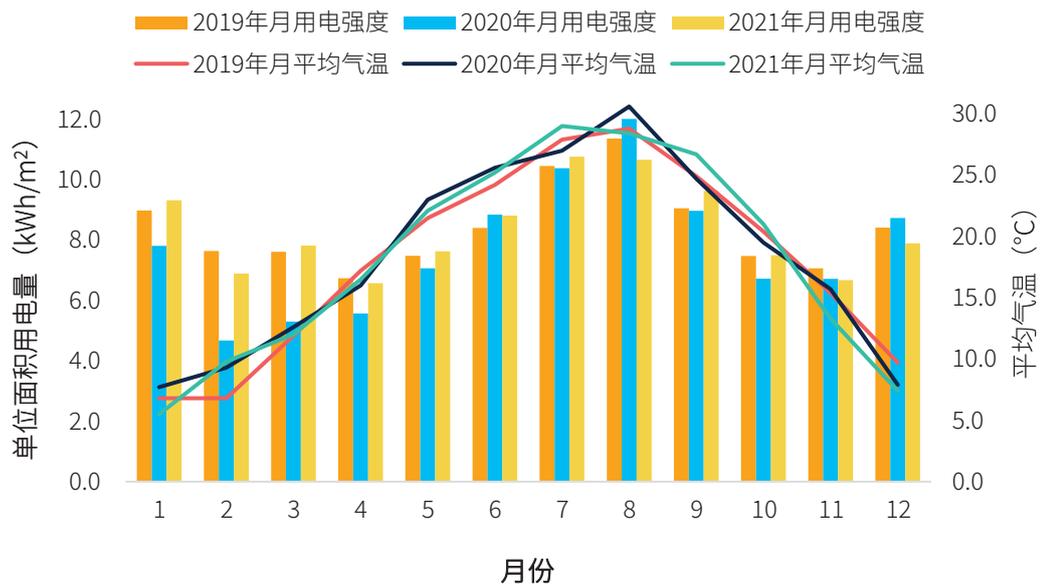


图 4. 2019-2021 年与能耗监测平台联网的建筑逐月用电强度<sup>[10]</sup>

缓解极端天气下电力供需矛盾是建筑参与电网互动的重要场景，电动汽车是其中重要资源。据预测，2030 年中国电动汽车保有量将达到 8000 万辆。全国达 1310 万辆，作为代表性的典型城市上海 2022 年电动汽车保有量 99.07 万辆，预测到 2030 年，上海电动汽

2 用电强度为某一小时内平均用电负荷与对应额定功率的比值

车保有量将达到 605 万辆，相应充电负荷尖峰预计将达到 5041MW<sup>[12]</sup>，电动汽车形成的可调负荷通过灵活参与电网互动，将有效降低上海负荷峰谷差，缓解局部地区电力供应压力。

建筑负荷中，空调负荷可以通过间歇开关或柔性调控的方式削减，照明负荷可通过点位选取控制照明设施灵活开关。电动汽车作为具有流动性的双向调节资源，现阶段可以通过错峰充电参与电网调节，后续有望在 V2G 技术试点成熟后逐步推开，在尖峰时段参与出力进行顶峰调节，以及参与调频辅助服务，提升新型电力系统灵活调节能力，通过减少增量电网容量、增量调峰调频电厂建设等方式，间接减少碳排放。

## (2) 工业场景下虚拟电厂资源分析

工业企业，尤其是高耗能企业在用电形势紧张的情况下应当参与电网错峰，主要资源依赖于企业的大型生产设备。高耗能工业企业供电稳定性及电费成本波动对企业发展影响巨大。同时，国家强化能耗“双控”约束，倒逼高耗能行业加大节能减排改造力度。在东北等重点工业省份，钢铁、有色金属石油石化、化工等高耗能行业是重要的支柱产业，而电费是核心工艺环节最主要的生产成本。因而，企业一般选择利用低谷电价政策，集中在夜间生产，造成局部电网白天利用率低，夜间电网负载率过高，甚至可能威胁局部电网运行安全和电力供应。

在我国，工业可调节负荷资源潜力巨大，不同行业调节情况参差不齐。截至 2021 年底，削峰负荷排名中前 15 的行业均为工业，合计 2078.20 万千瓦，占可调节负荷资源库容量的 35.52%，其中行业主要集中在水泥、石灰和石膏制造、钢压延加工、炼钢等；截至 2021 年底，填谷负荷排名中前 15 的行业均为工业，合计 674.56 万千瓦，占可调节负荷资源库容量的 45.38%，其中行业主要集中在钢压延加工、炼钢、电子和电工机械专用设备制造等<sup>[13]</sup>。

由于工业设备具有高价值且连续运行的特点，需要确保生产安全和设备安全，因此可从以下三方面入手：首先，应提前调查和登记工业企业具有错峰能力的设备和生产环节，通过梳理生产工业流程和设备运行特性，形成可控负荷主体群，预先生成安全、智能的调控策略。其次，对生产线进行智能化改造，帮助企业在电网负荷过高时，主动切除支持短时停电的生产线，避免因整体拉闸限电造成的损失，使生产线可以快速响应电网负荷调节

需求。最后，还可以适应实时电力市场电价波动，不断扩大工业负荷参与市场化交易的能力和规模，让企业通过市场化手段获得降低用电成本的实惠，形成以市场为驱动的虚拟电厂商业模式，构建面向能源互联网的共享生态。

### 3.3 虚拟电厂资源潜力分析及验证

#### (1) 不同场景下的虚拟电厂潜力分析方法

由于虚拟电厂资源种类丰富且特性各异，对虚拟电厂进行潜力分析和验证需要结合实际应用场景下的聚集和互动策略，综合用电、气象、经济等数据，评估虚拟电厂在不同条件下的潜力和可行性，并验证其在实际应用中的性能和效益。

虚拟电厂通过主动参与电网运行控制，与电网进行能量互动，其潜力是指虚拟电厂内部各类灵活性资源调节正负出力大小的能力。对虚拟电厂潜力进行合理分析评估，有利于虚拟电厂在低碳运营模式下参与市场交易的过程中发挥最大的优势，获得最佳经济效益和社会效益。

目前虚拟电厂参与电力系统优化调度时空动态调控潜力估计常用到数据驱动法和物理建模法。数据驱动方法指利用历史数据和统计分析方法，建立对虚拟电厂运行情况的模型，通过数据分析预测虚拟电厂的潜力。物理模型法指利用建模和优化方法，对虚拟电厂进行建模和仿真，评估其供需平衡、能源利用效率和经济性等方面的潜力。通过虚拟电厂资源筛选、预测，建立细分可再生能源电源、工业削峰负荷、工业调峰负荷、城市商业和居民的可调节负荷潜力测算模型，实现虚拟电厂潜力精细化分析。图 5 给出了虚拟电厂潜力分析方法模型。

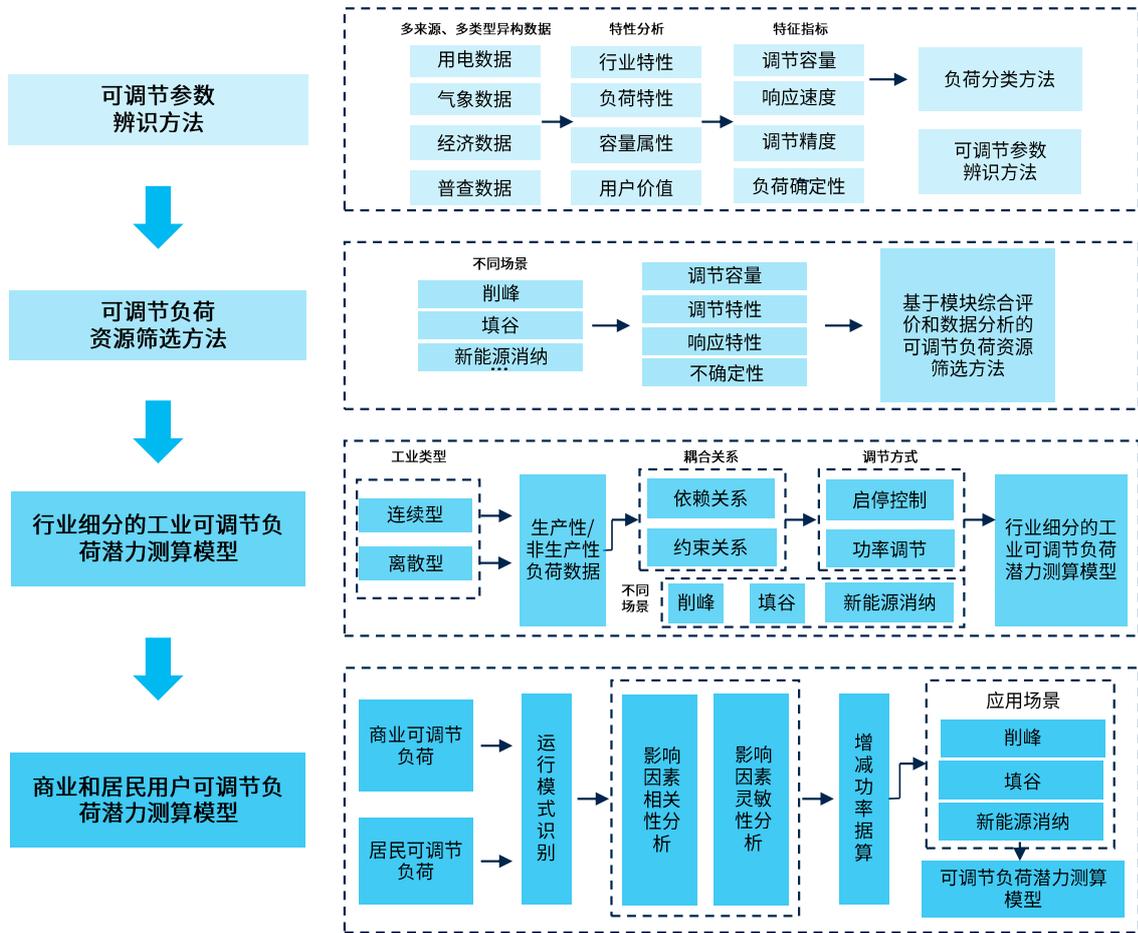


图 5. 虚拟电厂潜力分析方法

## (2) 虚拟电厂潜力在线验证方法

虚拟电厂在线验证方法通常包括仿真测试方法和运行监控方法。仿真测试方法指在实验室环境下对虚拟电厂进行测试和验证，包括能源设备的性能、控制策略的效果、协调运行的可行性等方面。常用的实验室测试方法包括硬件实验、仿真实验和模型验证等。运行监控方法需要在实际场景中对虚拟电厂进行测试、监测和验证，通过实际运行，验证虚拟电厂的供应能力、功率平衡、调度灵活性和经济性等指标，评估其运行情况和效果。结合实际数据和运行结果，对虚拟电厂的性能和效益进行评估和验证。

具体到虚拟电厂节电潜力计算验证方法，国标《GB/T 37016-2018 电力用户需求响应节约电力测量与验证技术要求》中要求了用户参与需求响应时采用日期匹配法计算用户负

荷基线<sup>[14]</sup>。此外《GB/T 37016-2018 电力用户需求响应节约电力测量与验证技术要求》还对典型日确定方法、基线负荷计算修正、节约电力计算等方面进行了规定。虚拟电厂在参与需求响应服务时，节电潜力的计算验证方法可根据该标准开展执行。

### 3.4 虚拟电厂资源的聚合策略

虚拟电厂资源构成复杂，具有多样性和不确定性，单体资源具有不同的特性和运行模式且不同资源间交互影响，需要考虑多元异构资源的时空互补特性和相应的调节能力，确定合理的聚合策略，根据实际情况调度分布式发电、工商业用电、居民用电、电动车充电等资源。

首先，对虚拟电厂聚集特性进行分析，并量化其外特性参数。虚拟电厂的聚集特性分析和量化方法是评估和衡量虚拟电厂运行性能的重要工具。虚拟电厂的聚集特性主要可以分为技术特性和经济特性。技术特性包括聚合资源类型、聚合容量、响应速度等；经济特性包括成本、收益、市场交易能力等。虚拟电厂聚集特性往往不等于单体资源参数的简单叠加，需要考虑多元灵活资源在物理交互和用户行为等方面的多重影响。通常首先需要将单一虚拟电厂资源聚合为资源集群，从而建立多元虚拟电厂资源集群的聚合多维发用模型。

其次，在分析虚拟电厂资源特性后，需要构建虚拟电厂发用电全景拓扑，对虚拟电厂多场景实时运行进行计算和优化，设定不同目标下虚拟电厂运行约束，构建多时间尺度下的经济调度模型，通过对虚拟电厂资源应用聚合算法，研究如何利用优化算法和数学模型，实现虚拟电厂资源的聚合和调度。

最后，确定合理的聚合策略。对同类型或多类型的分布式电源资源进行聚合，以达到电网互动和交易准入的门槛，如将多个太阳能光伏电站或风力发电厂进行聚合，或者聚合分布式储能参与调频辅助服务，还可以将分布式电源资源和可调节负荷及储能设备进行聚合，提高能源的利用效率和可靠性。

# 4 虚拟电厂商业模式分析

虚拟电厂能否在我国电力系统中发挥作用，除了需要完备的技术支撑体系，更需要完善的市场环境和商业模式。

目前国内的虚拟电厂还处在商业模式的探索阶段，从虚拟电厂的收益来源来说，已经开展的虚拟电厂业务模式主要以邀约型需求响应为主，盈利模式来源于响应补贴。但是需求响应属于偶发交易，在电网供需调节存在困难时触发，具有交易频次不确定的特点，无法构成虚拟电厂运营商主要盈利模式。随着中长期市场、现货市场、绿电交易市场、辅助服务市场等逐步放开，虚拟电厂可作为一个市场主体全面参与到市场中，主要盈利模式除了需求响应，还包括辅助服务交易、电力现货交易等。

从虚拟电厂成本来说，除了平台与设备建设等前期固定成本外，不同类型虚拟电厂运营模式对应的运维成本差别较大。由于虚拟电厂运营平台一方面对接电力交易中心，另一方面对接各类资源聚合商，组织资源主体参与各类电力市场交易，并完成相关结算和利益分配。所以运营平台对不同资源组合的定价机制、利益分配机制的设计与创新，是激发各类用户侧资源积极参与虚拟电厂，提高虚拟电厂整体效益的关键。

本章将主要介绍虚拟电厂的几种盈利模式与定价机制。

## 4.1 虚拟电厂盈利模式

受全国统一电力市场体系建设等利好政策驱动，能源行业各发电集团、电网公司积极开展研究和试点，虚拟电厂市场机制衔接、技术规格标准化、商业模式研究等方面工作快速推进，“十四五”期间，虚拟电厂有望在供需紧张地区快速发展。

具体到区域、省市层面，目前各省发改委、能源局、经信委、环资局等政府主管部门多在政策文件中提及虚拟电厂应用，支持虚拟电厂参与电网互动。经政策收集与统计，区域政策层面，华北、东北、西北、南方区域以市场交易形式组织辅助服务申报，允许用户侧资源参与；华东、华中对用户侧调峰予以补偿；西南暂不支持用户侧提供辅助服务。省级政策层面，26个省（直辖市、自治区）发布需求响应文件；15个省份单独出台政策支持用户侧资源参与调峰辅助服务，5个省份沿用区域辅助服务政策，其中西藏以补贴形式引导用户参与；12个省份单独出台政策支持用户侧参与调频辅助服务，其中重庆、西藏以补贴形式引导用户参与，江苏、山西、福建、四川、浙江、山东在辅助服务市场规则中明确，目前用户侧资源中仅储能资源具备参与调频辅助服务条件；山西对虚拟电厂开放电能市场，允许虚拟电厂参与中长期交易和日前现货交易，实时现货市场中作为固定出力机组参与出清。

虚拟电厂参与市场化交易，尤其是现货交易，为用户获取足够的利益，是虚拟电厂发展的关键，表2列出了虚拟电厂参与市场的交易品种。目前虚拟电厂可参与的交易品种主要以单边的形式组织，未来可拓展双边协商、双边集中竞价、挂牌交易等交易品种。

表 4-1. 虚拟电厂参与市场的交易品种

市场	交易品种	交易范围	交易组织形式	典型地区或省份
需求响应	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	湖北：每年按日前最高限价 20 元 /kW，日内最高限价 25 元 /kW 组织交易。
	日内			甘肃：日内提前 2 小时向市场主体发布中标时段、响应负荷、边际价格。市场初期，需求响应市场交易时序根据省间现货市场实际出清情况相应顺延。

市场	交易品种	交易范围	交易组织形式	典型地区或省份
辅助服务	备用	省内、区域	单边报量固定标准补贴、单边报量报价边际出清	南方区域：采用“日前出清+日内调整”模式组织跨省备用市场交易。日前分24个时段分省区申报10分钟备用购买和提供容量和价格，出清后在日内由南网总调组织调整并事后披露。
	调峰	省内、区域		上海：实时市场申报容量单位为0.01MW，时间单位为15分钟，最短持续时间为30分钟。报价上限值为400元/MWh。
	调频	省内、区域		重庆：市场初期暂定调频容量价格为日前3元/MW，日内10元/MW。
现货市场	日前	省内	单边报量报价边际出清	山西：日前交易以报量报价方式参与
	日内			山东：虚拟电厂竞价申报运行日调节的电力、调节时间、调节速率等信息，接受实时市场出清价格

### (1) 需求响应

在参与需求响应时，政府或电网向参与主体发出削峰或填谷响应邀约，告知响应量、响应时段。响应邀约下发至虚拟电厂，虚拟电厂进一步向台区内可调节资源下发调节指令。具备响应能力和意愿的虚拟电厂资源主体可在接收通知后按时进行响应，主动改变常规电力消费模式。

下面以冀北公司对虚拟电厂参与需求响应的管理情况为例进行说明。政策依据方面，冀北需求响应市场依据《河北省电力需求响应市场运营规则》的通知，参与冀北需求响应市场的负荷聚合商、虚拟电厂需要经过各地市供电审核，报河北省发改委备案；参与市场条件方面，按照河北需求响应市场要求，参与需求响应的用户需要登陆网上国网、省级智慧能源平台进行注册，开展聚合申报，按月出清，数据频率为15分钟，通信满足安全要求；资质方面，按照市场要求，参与需求响应市场主体需要具备独立法人资格，需求响应负荷聚合商需要具有售电资质或工业领域电力需求侧管理服务机构资质；认证方面，虚拟电厂聚合削峰能力不低于3000千瓦。而在参与市场流程方面，需求响应参与市场时，需在国

网 APP 进行申报注册，并在该平台查看中标信息，申报时需要用户报量报价，边界出清。结算方面，需求响应市场按月组织出清，确定次月中标用户价格及执行序位。分成及盈利方面，电网企业按照“以支定收”原则，不设置单独账户，直接结算给用户，再由用户与虚拟电厂聚合商根据代理合同进行收益分摊，目前需求响应市场中标价格为 3 元 / 千瓦时。由于需求响应通过行政化指令按需开展，审批流程审慎且周期较长，无法为市场参与者提供持续性收入，故而难以鼓励虚拟电厂发展。

## (2) 辅助服务

在辅助服务市场中，虚拟电厂可以根据市场需求在能源供需之间实现动态平衡，参与调峰<sup>3</sup>、调频等辅助服务市场交易是虚拟电厂重要的盈利方式。常见的且容易量化的辅助服务项目包括调峰、（二次）调频、惯量市场（一次调频）、无功电压调节、黑启动。作为一种新兴电力市场主体，虚拟电厂从理论上可以参与以上全部的辅助服务市场<sup>[15]</sup>。但受虚拟电厂发展现状与市场机制建设所限，目前我国虚拟电厂主要参与调峰市场和调频市场两类辅助服务市场。

参与调峰市场时，虚拟电厂可利用用户用电弹性缓解峰谷时段供应与消耗不平衡的情况参加需求响应。在调峰市场下，虚拟电厂往往需要调用长时间、大容量的需求响应资源，比如聚合可控负荷、储能和充电桩等设备。

参与调频市场时，虚拟电厂可通过灵活调控其内部分布式电源使其整体外特性追踪调度机构下达的自动发电控制信号 (automatic generation control, AGC) 以提供调频服务。其响应速度要求更快，但作用时间相对较短，对聚合商的功率聚合水平提出要求。调频市场虚拟电厂可聚合风、光、储等分布式电源，或是通过控制策略安排电动汽车参与电网调频。目前，国内江苏省能源监管办已发布《江苏电力辅助服务（调频）市场交易规则（试行）》，其中明确除各类统调发电企业外，储能电站以及综合能源服务商均可参加江苏省调频辅助服务市场，虚拟电厂以综合能源服务商的身份参加调频市场。图 6 给出了虚拟电厂参与辅助服务业务的业务流程图。

---

3 在我国现阶段，调峰是在辅助服务市场中交易。

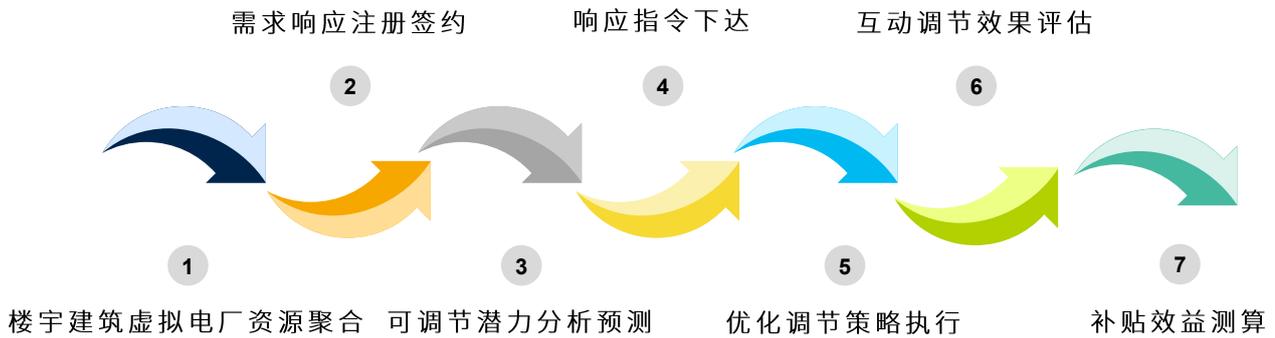


图 6. 虚拟电厂参与辅助服务业务流程

### (3) 现货市场

现货市场方面，山西、山东省内电力交易规则明确虚拟电厂可以参与电力现货市场，其交易形式和目的有所不同。

山西省虚拟电厂参与现货市场时仅参与日前市场，按照报量报价方式参与。在交易中，虚拟电厂视为单独的市场主体，分为“负荷类”和“源网荷储一体化”两类。“负荷类”虚拟电厂在交易中申报以“负发电”形式报量报价，利用出清差价获取市场红利；“源网荷储一体化”虚拟电厂作为发电和用电的结合体，以“报量报价”方式参与现货市场，自主决策申报负荷状态量价曲线和发电状态量价曲线，以及发电运行出力上限和负荷运行用电上限。目前暂无“源网荷储一体化”虚拟电厂注册进入山西现货市场。

山东虚拟电厂在参与现货市场时，通过日前申报填谷和顶峰能力进行出清。虚拟电厂竞价申报运行日调节的电力、调节时间、调节速率等信息，接受实时市场出清价格。目前山东虚拟电厂暂未实际参与电力现货市场运行。

## 4.2 虚拟电厂定价机制

虚拟电厂定价机制是虚拟电厂运营的重要组成部分，对虚拟电厂的经济效益和市场竞争能力具有重要影响，需要考虑市场价格、成本价格、用户行为、市场竞争、交易成本、风险溢价等多种不确定性因素并使其尽量可控。虚拟电厂集群协同调控过程复杂，多元资源

聚集的不确定性、多元市场交易品种耦合、低碳经济运行要求进一步增加了虚拟电厂的多阶段协同定价难度。

虚拟电厂定价机制需要考虑批发市场定价、申报定价策略和代理合同约定价三重价格形成环节及其联动影响。出于市场公平考虑，批发市场应无歧视地对符合技术准入条件的虚拟电厂和其他电网互动资源主体进行出清并形成价格，并根据各地供需形势，适当地引入两部制定价方法；政府部门也应在具体实践中适时调整核定价格申报上下限要求。虚拟电厂申报定价策略需考虑市场价格的波动性，灵活调整虚拟电厂整体聚合出力和价格以适应市场变化，在市场价格上涨时提高出力并提高定价，从而最大程度地获利；在市场价格下跌时，控制出力和降低定价以避免亏损。

在虚拟电厂代理合同约定价环节，用户的价格敏感度、风险偏好和反应行为深度影响合同约定价，需要通过精细化管理服务平衡优化成本和收益。近似于电能量零售市场，虚拟电厂代理合约可分为固定价格套餐、比例分成套餐、阶梯价格套餐、市场价格联动套餐等类型。虚拟电厂应考虑反映可调节资源经济成本、用电舒适度损失成本、效用损失成本、内部交易成本等虚拟电厂成本构成及合同约定价、考核措施、收益分成等合约约束对用户参与互动的影 响。虚拟电厂通过和用户执行代理合约套餐，在不同用户、多种合约间实现博弈竞争，降低了用户的交易成本，缓冲市场风险。对于同时作为售电公司、综合能源服务商的虚拟电厂运营商，还应考虑辅助服务市场合约与电能量市场套餐的耦合影响及结合绿电、绿证、碳市场的收益管理。

虚拟电厂资源配置应基于虚拟电厂目标参与的电能量、调频、调峰、备用等不同场景需求，满足电力规划或虚拟电厂运营商自身生产经营的性能指标要求。虚拟电厂资源配置优化目标包括经济性成本如建设成本、运行成本、年化综合成本、年化净收益，发电规模包括发电容量、年发电量，调节性能包括调节容量、响应时间、爬坡率、调节偏差率，环境效益如碳排放量等。

在建设过程中，应考虑建设当地实际的虚拟电厂服务准入政策，包括准入门槛和准入市场。例如，华北市场要求虚拟电厂聚合的调节电量应不小于  $30\text{MW}\cdot\text{h}$ 、调节容量不小于  $10\text{MW}$ ；上海市场要求调节容量应不小于  $5\text{MW}$ 。此外，对于参加上海实时调峰交易的虚

拟电厂，额外要求其用电信息采集时间周期不大于 15min，响应时间不超过 15min，持续时间不小于 30min<sup>[16]</sup>。

另外，市场准入方面，华北市场和上海市场开放虚拟电厂调峰服务。在华北市场中虚拟电厂申报周期为日，需向调度机构申报聚合调节容量 (MW·h)、最大聚合充放电功率 (MW)、充电时间及时间范围 (h)、日最大充放电次数 (次)、聚合功率调节速率 (MW/min)、基准运行曲线。在上海市场中，虚拟电厂参与日前调峰交易、日内调峰交易需上报调峰容量、价格，申报最小调峰容量单位为 0.01MW，申报价格从 0 开始以 5 元/(MW·h) 递增，报价上限为 100 元/(MW·h)。江苏省能源监管办于 2020 年 7 月正式发布《江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(试行)》，其中明确除各类统调发电企业外储能电站以及综合能源服务商均可参加江苏省调频辅助服务市场。虚拟电厂可以综合能源服务商的身份参加调频市场。

收益结算方面，上海市场为鼓励虚拟电厂参与调峰市场，在建设初期并未规定具体偏差考核细则，在结算时也不考虑调峰性能仅根据实际执行量与报价由调度机构按月结算调峰费用。华北市场规定了较为明确的偏差考核方法<sup>[17]</sup>，若由于虚拟电厂自身原因，某时段的实际运行曲线与调度机构下发的运行曲线偏差超过 30%，该时段调峰费用不予结算，调峰费用具体计算见下式：

$$R_f = K \times \min\left\{\frac{P}{P_{\text{中标}}}, 1\right\} \times \min\{P, P_{\text{中标}}\} \times t_{\text{出清}} \times C_{\text{出清}}$$

其中： $K$  为市场系数取省网内火电机组平均负荷率的倒数； $P$ 、 $P_{\text{中标}}$  分别为虚拟电厂的实际充电功率与在调峰市场中标容量，单位为 MW； $t_{\text{出清}}$  为调峰市场出清时间间隔，为 0.25h； $C_{\text{出清}}$  为调峰市场边际出清价格，单位为元/(MW·h)。

# 5 面向双碳目标的虚拟电厂建设路径与发展建议

## 5.1 虚拟电厂建设路径

在顶层设计方面，应从国家层面加快制定和发布虚拟电厂政策文件，结合“双碳”目标推进路线、新型电力系统建设要求和相关技术发展趋势，从管理要求、技术参数、运营模式等方面，加快制定虚拟电厂系列标准规范，构建完整的技术体系，推动虚拟电厂发展规划，结合新型电力系统建设规划和不同地区资源禀赋，明确虚拟电厂在各阶段的发展重点，推动我国虚拟电厂有序发展，将需求侧资源与发电侧资源调节能力等同，发挥虚拟电厂对“双碳”目标实现的积极作用。

“双碳”目标实现进程的达峰期、平台期、下降期，新型电力系统建设对应分为加速转型期、总体形成期和巩固完善期，虚拟电厂发展的邀约期、交易期和自治期与“双碳”路径和新型电力系统建设可以有机结合。

在达峰期（当前到 2030 年），中国将从高碳经济转向低碳经济，以尽早实现碳排放达峰。这段时期内，电力系统加速转型，新能源成为发电量增量主体，集中式和分布式可再生能源装机量提升，终端用能电气化水平提高，要求电力系统由传统的“源随荷动”转变为“源荷互动”，分散化需求响应资源进一步整合，用户侧灵活调节和响应能力提

升至 5% 以上，促进新能源就近就地开发利用和高效消纳，用户侧储能削峰填谷满足系统日内调节需求，全国统一电力市场体系基本形成。由于虚拟电厂内部自理能力仍在建设中，管理要求和市场机制仍在探索，此阶段虚拟电厂的研究以及示范侧重于多元资源分别参与主要以邀约形式组织的电网互动，其中负荷型虚拟电厂依托终端用能电气化替代有望快速发展，要求具备削峰、填谷能力，积极参与需求响应和辅助服务。同时，虚拟电厂储能资源可结合可再生能源电源进行峰谷套利和参与调峰、调频、备用等辅助服务，进一步提升可再生能源消纳比例。

在平台期（2030 年到 2045 年），碳排放将呈现趋缓趋稳、稳中有降的趋势。新型电力系统建设进入总体形成期，用电需求达到饱和，新能源发展重点转向增强安全可靠替代能力和积极推进就地就近消纳利用，市场环境逐步完善，用户侧优质调节资源参与电力需求响应市场化交易，用户侧调节能力大幅提升。在此阶段，虚拟电厂聚合资源不断丰富，在工业领域可结合电能替代深入挖掘削峰和填谷资源，在交通领域拓展新能源汽车、充电站储能，探索配置长时储能资源。虚拟电厂向源荷混合型转变，利用新型电网技术充分参与集中地电能量市场和辅助服务市场及分散式交易市场，具备更充足的交易议价能力，促进可再生能源渗透率进一步提升。

在下降期（2045 年到 2060 年），随着可再生能源、负排放技术等应用，碳排放将快速降低，直到实现碳中和目标。新型电力系统进入巩固完善期，具有全新形态的电力系统全面建成，新能源逐步成为发电量结构主体电源，传统电源转型成为系统调节性电源，服务高比例新能源消纳，支撑电网安全稳定运行，提供应急保障和备用容量。电力“产消者”蓬勃涌现，成为电力系统重要的平衡调节参与力量。全周期、多类型储能协同运行，电力系统实现动态平衡，能源系统运行灵活性大幅提升。随着分布式电源接入电网承载力提升，虚拟电厂将进入自治期，快速发展分布式光伏、分布式风电机组等可再生能源，与综合电力平衡需求和电力市场信息，参与市场交易或进行本地化的消纳和调控；拓展氢能等多种储能资源，实现能源深度融合利用，形成内部自供应、自消纳与自平衡的能力，进一步发现低碳调节潜力评估机理，统筹低碳和经济运行。

在碳中和目标达成后，社会发展所需新增负荷可结合地理位置、电气位置、当地能源结构和虚拟电厂建设等情况统筹规划，需要注重平衡虚拟电厂存量资源与新建资源比例，引导新建资源高效参与交易和互动。

## 5.2 虚拟电厂发展建议

尽管虚拟电厂对“双碳”目标下的新型电力系统建设具有良好的辅助功能，存在广泛的商业前景，仍面临相当的商业推广与技术落地难度。其中，主要的难点在以下方面：

(1) 电碳耦合方面，目前由于电-碳市场尚未打通，虚拟电厂聚合资源种类众多，针对调节能力的碳核算难度较大。我国目前碳市场主要开展碳配额交易，而参照2021年国家出台的《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》，三大CCER核心项目类型为林业、可再生能源，和甲烷利用，并未包括虚拟电厂等项目类型。

(2) 盈利预期方面，目前我国电价处于较低水平，低价格与高建设、运维、管控成本导致虚拟电厂盈利预期较低，相应地市场资本对投资建设仍在观望。我国已建成的虚拟电厂项目多以综合能源服务商或售电公司作为运营主体，而调频等交易品种对虚拟电厂的技术指标要求较高，虚拟电厂运营商需要投入更高的建设成本。

(3) 隐私安全方面，虚拟电厂需要大规模采集和调控用户用电信息，涉及用户个人和商业隐私。数据在采集、传输、存储等过程中可能存在泄露、滥用或未经授权访问的问题，或被恶意攻击者获取、篡改或破坏，以及设备被入侵、操控或恶意干扰，从而影响能源供应和用户的正常使用。

(4) 宏观规划方面，虚拟电厂需要根据各地的能源资源禀赋和基础设施建设情况进行规划和运营。然而，不同地区的能源资源类型和分布存在差异，能源需求随季节、时间和市场变化，可能存在波动和不确定性。如何合理匹配虚拟电厂技术和能源资源，确保可持续性和高效性应用，是一个值得注意的问题。

(5) 思想意识方面，监管运营方和用户对虚拟电厂的认识和理解仍在培养，缺乏信任，影响虚拟电厂资源调用和市场有效参与。政府部门和调度机构难以信任虚拟电厂等需求侧

资源参与电网辅助服务工作;同时用户难以信任和授权虚拟电厂运营商对其设备进行调控,导致虚拟电厂无法保证提供的辅助服务质量,造成恶性循环。

根据“双碳”工作阶段和新型电力系统建设规划,针对前述虚拟电厂的商业推广和技术落地难题作出以下发展建议:

(1) 加强面向双碳的虚拟电厂统筹管理和顶层设计。推动政府统筹考虑“双碳”目标与民生保障和经济发展要求,在各地综合可再生能源禀赋、国土空间规划、电网通道容量等要素,规划设计需求响应能力与虚拟电厂建设。

(2) 深入分析虚拟电厂建设改造环节和参与互动场景,包括削峰、移峰、可再生能源消纳等,对应不同类型的虚拟电厂,推动虚拟电厂项目纳入自愿减排交易范围,开发适用于各类虚拟电厂具体情况的 CCER 方法学。

(3) 持续完善电力市场机制,通过市场发现价格,实现资源优化配置。不断丰富虚拟电厂可参与的交易品种,扩大虚拟电厂收益来源,促进虚拟电厂投资建设,带动产业链发展和良性竞争,以规模化生产降低虚拟电厂设备组件采购成本。

(4) 建设虚拟电厂隐私安全防护和检验认证标准化和检验认证体系。推动国家质检总局、国标委、住建部、工信部等主管部门出台针对虚拟电厂系统和设备的统一互动接口标准,提升用户使用的安全性、便捷度和满意度。

(5) 建立健全完善的虚拟电厂信用机制,通过市场准入规则和信用评级等方式约束虚拟电厂主体提供可信赖的服务,推动需求侧资源在电力市场中等同于发电侧资源。同时,加强虚拟电厂在环境保护、经济效益方面作用的科普宣传,提升社会对虚拟电厂的认可度、接受度和信任度。

# 参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(07): 1893-1904+2205.
- [2] 易跃春. 中国可再生能源发展报告 [R/OL]. 北京: 水电水利规划设计总院, 2023: 1-40. <http://www.creei.cn/userfiles/site/735bdbbfd56241a78ae2895f232e95f1.pdf>
- [3] 电力需求侧管理办法 (2023 年版) [S].
- [4] 刘定, 赵德福, 白木仁等. 可再生能源发电对实时电价的影响分析——德国电力现货市场的数据实证 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(04): 126-133.
- [5] 张旭. 基于 OpenADR2.0 的分布式电源与可控负荷协同调度研究 [D]. 华北电力大学, 2019.
- [6] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(01): 37-56.
- [7] AS/NZS 4755.1:2017, Demand response capabilities and supporting technologies for electrical products Part 1: Demand response framework and requirements for demand response enabling devices (DREDs) [S].
- [8] 方胜, 杨晶晶. 南方电网助力深圳打造全球数字能源先锋城市 [N]. 深圳特区报, 2023-07-01(A04). DOI:10.28776/n.cnki.nszdq.2023.003001.
- [9] 上海市人民政府. 上海首次使用虚拟电厂“智慧减碳”初步形成一百万千瓦发电能力 [R/OL]. [https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20210510/cedcc01ae90e46a486df57491fa75cae.html?ivk\\_sa=1023197a](https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20210510/cedcc01ae90e46a486df57491fa75cae.html?ivk_sa=1023197a)
- [10] 上海市住房和城乡建设管理委员会, 上海市发展和改革委员会. 2021 年上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测及分析报告 [R/OL]. [http://hd.zjw.sh.gov.cn/static/upload/202206/0624\\_131610\\_724.pdf](http://hd.zjw.sh.gov.cn/static/upload/202206/0624_131610_724.pdf)
- [11] 周晓. 需求响应在大型智能商业楼宇能量管理中的应用研究 [D]. 华中科技大学, 2020.
- [12] 孙亚, 朱昊, 秦明霞. 上海电动汽车充电设施十四五规划布局和对策建议 [C]. 中国城市规划学会城市规划学术委员会. 绿色·智慧·融合——2021/2022 年中国城市规划年会论文集. 2022:9.
- [13] 陈宏, 赖春艳. 我国电力能源需求响应发展现状与展望 [J]. 电力与能源. 2021: 42(1): 87-90+122.
- [14] GB/T 37016-2018. 电力用户需求响应节约电力测量与验证技术要求 [S].
- [15] 沈运帷, 李扬, 高赐威等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 151-161.
- [16] 华东能源监管局. 上海电力调峰辅助服务市场运营规则 (试行) [EB/OL]. 华东能源监管局. <http://shoudian.bjx.com.cn/html/20200426/1066874.shtml>.
- [17] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于征求《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场试点方案 (征求意见稿)》意见的函 [EB/OL]. 国家能源局华北监管局. <http://www.czguangfu.org/PolicyLaws/4661.html>.

# 附录 A 虚拟电厂政策清单

发布时间	文号	政策名称	发布单位	主要相关内容
2023年9月	/	《电力需求侧管理办法(2023年)》	国家发展改革委	建立和完善需求侧资源与电力运行调节的衔接机制,逐步将需求侧资源以虚拟电厂等方式纳入电力平衡,提高电力系统的灵活性。
2023年9月	/	《电力现货市场基本规则(试行)》	国家能源局	稳妥有序推动新能源参与电力市场,设计适应新能源特性的市场机制,与新能源保障性政策做好衔接;推动分布式发电、负荷聚合商、储能和虚拟电厂等新型经营主体参与交易。
2022年7月	/	《电力需求侧管理办法(征求意见稿)》	国家发展改革委	建立和完善需求侧资源与电力运行调节的衔接机制,逐步将需求侧资源以虚拟电厂等方式纳入电力平衡,提高电力系统的灵活性。
2023年9月	/	《电力现货市场基本规则(试行)》	国家能源局	电力现货市场近期建设主要任务,包括加强中长期市场与现货市场的衔接;做好调频、备用等辅助服务市场与现货市场的衔接;稳妥有序推动可再生能源参与电力市场并与现有可再生能源保障性政策做好衔接;推动储能、分布式发电、负荷聚合商、虚拟电厂和可再生能源微电网等新型经营主体参与交易等。
2022年1月	发改能源〔2022〕210号	《“十四五”现代能源体系规划》	国家发展改革委、国家能源局	开展工业可调节负荷、楼宇空调负荷、大数据中心负荷、用户侧储能、可再生能源汽车与电网(V2G)能量互动等各类资源聚合的虚拟电厂示范。

发布时间	文号	政策名称	发布单位	主要相关内容
2022年1月	发改能源〔2022〕206号	《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》	国家发展改革委、国家能源局	拓宽电力需求响应实施范围，通过多种方式挖掘各类需求侧资源并组织其参与需求响应，支持用户侧储能、电动汽车充电设施、分布式发电等用户侧可调节资源，以及负荷聚合商虚拟电厂运营商、综合能源服务商等参与电力市场交易和系统运行调节。
2022年1月	发改体改〔2022〕118号	《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》	国家发展改革委、国家能源局	引导各地区根据实际情况，建立市场化的发电容量成本回收机制，探索容量补偿机制、容量市场、稀缺电价等多种方式，保障电源固定成本回收和长期电力供应安全。鼓励抽水蓄能、储能、虚拟电厂等调节电源的投资建设。
2021年7月	发改能源规〔2021〕1051号	《关于加快推动新型储能发展的指导意见》	国家发展改革委、国家能源局	鼓励聚合利用不间断电源、电动车、用户侧储能等分散式储能设施。依托大数据、云计算、人工智能、区块链等技术，结合体制机制综合创新，探索智慧能源、虚拟电厂等多种商业模式。
2021年2月	发改能源规〔2021〕280号	《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》	国家发展改革委、国家能源局	充分发挥负荷侧的调节能力。依托“云大物移智链”等技术，进一步加强源网荷储多向互动，通过虚拟电厂等一体化聚合模式，参与电力中长期、辅助服务、现货等市场交易，为系统提供调节支撑能力。

# 附录 B 国内外典型虚拟电厂示范工程

工程名称	工程时间	主要国家	聚合资源	用途
VFCPP	2001-2005	德国、荷兰、西班牙等	源	研究燃料电池安装在家庭场所
PM 虚拟电厂	2005-2007	荷兰	源	基于多代理技术完成分布式电源在电力市场中的运行
FENIX	2005-2009	英国、西班牙、法国等	源	提高欧盟供电系统的经济性、稳定性、安全性和可持续性
EDSION	2009-2012	丹麦、德国	荷	平移分布式能源接入后的系统扰动，实现电动汽车大规模且可靠稳定地接入电力系统
TWENTIES	2012-2015	比利时、德国、法国等	源网荷	实现热电联产、分布式能源和负荷的智能管理
WEB2ENERGY	2015	德国、波兰等	源网荷	验证和实施“智能配电”中智能计量技术、智能能量管理和智能配电自动化三大技术
上海黄浦区需求响应型虚拟电厂	2016	中国	源网荷	基于互联网及大数据技术，实现智能化、资源多元化的商业建筑规模需求响应，并促进可再生能源消纳及电力的调峰 / 调频
关西虚拟电厂	2016	日本	源网荷	利用物联网连接电网的终端设备，平衡电力供给与需求，提高能源的利用率和综合能源效益
Con Edison	2016	美国	源网荷	利用储能系统提高电网调峰、调频能力，用于发电容量市场和电力批发市场，并基于云计算实现实时设备聚合与控制
光储虚拟电厂	2018	南澳大利亚州	源网荷	降低用户电费，提高多能源系统稳定性
冀北全城虚拟电厂示范工程	2019	中国	源网荷	基于智能管控平台和智能配网多能流网络，进行海量数据的流通与聚合，实现源输配荷协同，并开展新的商业模式





自然资源保护协会 (NRDC)  
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706  
邮编: 100026  
电话: 010-59270688  
[www.nrdc.cn](http://www.nrdc.cn)