第49卷 第20期 2025年10月25日
DOI：10.7500/AEPS20250610009
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 20 Oct. 25，2025

第一性原理视角下虚拟电厂的技术体系构建

周保荣[1]，高洪超[2]，程韧俐[3]，赵文猛[1]，毛　田[1]，康重庆[2]
（1. 南方电网科学研究院有限责任公司，广东省广州市 510663；
2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室（清华大学），北京市 100084；3. 深圳供电局有限公司，广东省深圳市 518000）

摘要：需求侧协同能力提升是加快构建新型电力系统的关键举措之一，有利于挖掘需求侧灵活性、改进零售侧市场体系与丰富电网调节手段。在需求侧管理涌现的诸多典型模式中，虚拟电厂作为一种兼具灵活调节属性与市场交易功能的新型“电源”，在与电力系统的多维互动中提供多时序平衡调节能力，继而获取市场价值。然而，现有的虚拟电厂技术仍缺乏特有的体系框架和分析理论，海量分布式资源的运行特性、互动机理及其动态聚合问题尚未完全突破，导致虚拟电厂的规模化应用与常态化运营成为其可持续发展的重要困境。为此，首先，文中立足第一性原理视角对虚拟电厂的技术本质进行了深入剖析，梳理了差异化市场交易品种对不同类型虚拟电厂的技术要求，并提出了虚拟电厂的技术体系建设目标。其次，面向多类型虚拟电厂建立了基于基础共性、工程应用、关键装备与特色攻关4个维度的关键技术体系。最后，归纳了中国虚拟电厂的工程建设、运营现状与市场成效，并对现有技术体系的不足提出前瞻性建议，为虚拟电厂的常态化运营与规范化应用提供理论支撑。

关键词：虚拟电厂；新型电力系统；需求响应；技术体系；基础共性；工程应用；关键装备；第一性原理

0　引言

2025年是“十四五”规划的收官之年，也是中国深化电力体制改革的第10年。自新一轮电改以来，随着“管住中间，放开两头”的理念深化推进，多元化市场竞争格局初步形成[1]，有效推动了需求侧海量资源的灵活性挖掘，为保障电力系统安全稳定运行奠定了体制机制基础。

在挖掘需求侧资源灵活性的发展过程中，需求侧协同在不同阶段呈现了差异化的发展目标和组织形态：2010年《电力需求侧管理办法》正式发布，有序用电成为电力供需紧张时期保障电网供需平衡的重要手段[2]；2012年，中国启动电力需求侧管理城市综合试点工作，明确将需求响应（demand response，DR）作为重要推广内容之一；2013年，上海在电力需求侧管理试点中首次引入经济补偿机制，通过财政补贴引导用户实现了用电行为调整，标志着全国范围内需求响应的正式实施[3]。随着能源互联网技术在国内的蓬勃发展，需求侧资源参与常态化市场运营的诉求日益迫切，虚拟电厂（virtual power plant，VPP）技术的引入成为重要解决方案[4]；2019年，经国家能源局批复，华北调峰辅助服务市场正式准入虚拟电厂主体，建立了国内首个连续开市的需求侧资源市场化运营生态[5]；2024年，《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027年）》颁布，提出需求侧协同能力提升专项行动[6]，强调“开展典型地区高比例需求响应”并“建设一批虚拟电厂”，进一步强化了需求响应、虚拟电厂在丰富电力系统调节手段中的重要作用。2025年，《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》中明确了中国虚拟电厂的内涵、定位与建设目标，并强调了虚拟电厂在新能源消纳、主-配网供给安全与市场交易体系完善等方面的协同作用，为虚拟电厂的规模化应用与市场化运营注入强劲动力。

尽管虚拟电厂与需求响应服务的响应主体高度重叠、响应场景存在交叉、服务能力部分相近，但是多元的电力市场交易品种对两种技术形态提出了不同的技术要求。需要指出的是，经过不断的递进演化和市场融合，中国的需求响应被电力领域广泛认知为一种狭义的响应服务机制，是政府行政与市场

收稿日期：2025-06-10；修回日期：2025-07-13。
上网日期：2025-09-02。
国家重点研发计划资助项目：“规模化灵活资源虚拟电厂聚合互动调控关键技术”（2021YFB2401200）。

激励相融合下的安全保供措施之一。这一符合中国国情同时适配系统调节需求的服务理念,与国外相对广义的需求响应服务(多时序、多品种)有一定差别,但同样发挥着不可或缺的重要作用。两者的核心都在于驱动规模化资源用户通过改变自身发用电行为,进而参与电力系统平衡调节的范式。从用户侧视角分析,驱使其改变自身行为模式的关键在于提供足够的利益驱动,这种驱动因素除参与电力交易套利以外,还包括提升减碳效益与能源利用效率等。随着国内电力市场交易机制的逐步完善,需求侧的海量资源也逐步呈现出参与多时序、多品种市场交易的迫切需求[7]。为此,迫切需要以满足用户的多维度利益诉求为抓手,构建灵活的激励机制和与之相适配的技术体系,系统性提升需求侧资源参与电网运行与市场运营的能力。

诸多文献面向虚拟电厂的研究现状及关键问题进行了归纳梳理,并从不同视角提出了虚拟电厂技术体系或理论框架。文献[8]聚焦于单一通信技术视角,分析了虚拟电厂参与系统运行与市场运营过程中的可靠性、实时性与安全性问题,构建了以"可靠网络通信-智能分层控制-多品类市场协同"为核心的虚拟电厂技术体系。文献[9-10]立足于能源互联网理念,分别构建了涵盖"资源聚合-信息通信-优化调控"与"电力通信-计算机科学-能源管理-经济效益-地理条件"多维要素的虚拟电厂技术框架。文献[11-12]基于"物理-信息-社会"融合视角,梳理了虚拟电厂面临的核心科学问题,提炼了支撑其动态构建与可信量化的关键技术及内在关联;文献[13]在此基础上论述了规模化灵活资源虚拟电厂面临的技术挑战,提出了计及动态聚合、安全通信、协同调控、可信交易的虚拟电厂关键技术框架。此外,文献[14]针对虚拟电厂面临的聚合资源体量小且位置分散、市场机制与商业模式不成熟、系统复杂且难以实现快速调节等实际问题,构建了以聚合、运营、调控三大关键技术为核心的体系架构。

上述研究成果为推动需求响应与虚拟电厂发展提供了重要的理论支撑,但在研究体系的独立性与科学性方面还存在一定提升空间:一方面,需求响应与虚拟电厂在资源特性建模、激励机理分析等面向用户资源的研究内容上高度重合,可能造成技术路线重叠、研究边界模糊等问题,影响学术资源配置效率与关键技术攻关次序,但当前对虚拟电厂与需求响应的本质差异进行剖析的研究较少;另一方面,虚拟电厂涉及的学科内容众多、技术路线庞杂,主流的"信息-物理-社会"技术架构虽实现了对不同学科的有机整合,但在技术体系协同演进的过程中也存在着结构性矛盾,任一维度学科研究进展的滞后都将对虚拟电厂技术路线的整体性突破产生制约,亟须重新梳理既有技术体系。

1　虚拟电厂的第一性原理分析与技术目标推论

1.1　虚拟电厂的技术内涵

虚拟电厂的技术概念来源已久,在不同技术标准与政策文献中均有解读,相对权威的技术定义分别为:2021年发布的国际标准IEC 63189、2024年发布的中国国家标准GB/T 44241—2024,以及2025年中国国家能源局发布的《虚拟电厂指导意见(357号文)》。3个定义的共同之处在于可聚合资源的对象均被认定为分布式发电、可调节负荷及储能等资源,差别之处在于对虚拟电厂的形态理解:IEC标准为"系统或组织";中国国家标准认为是"系统";国家能源局认为是"电力运行组织模式"。尽管不同文献表述不同,但是技术内涵具有高度共识,3个定义中均强调了虚拟电厂的技术目标是通过先进技术融合实现需求侧资源对电力系统运行与电力市场运营的协同作用。

为推动虚拟电厂的标准化发展,差异化运营模式下的共性问题解析至关重要。第一性原理是从不可简化的前提出发,仅保留物理或逻辑层面的基础公理,并通过逻辑推演得出结论的思维方式[15]。立足第一性原理,深入剖析虚拟电厂的技术本质是推动学术共识的基础性研究工作。本文论述的虚拟电厂第一性原理具体包括虚拟电厂的物理本质、技术原理与逻辑要素三个方面。首先,虚拟电厂的物理本质要回答何为"虚拟"、何为"出力"。"虚拟"既强调了形态上的非实体,也明示了特性上的虚拟出力,"电厂"提出了聚合后的运行特征,也明确了业务上的运营范畴。虚拟电厂并非实体电厂,其物理实体仍为需求侧资源,所以虚拟电厂本身是一种客观并不独立存在的特殊资源。尽管运营系统赋能了虚拟电厂的聚合运行,但是其本质是技术支持载体而非资源本体。这一过程中的要素是"聚合",将无法获得市场准入且具有灵活调节能力的资源聚合成为可被接受的规模化虚拟资源。那么,多大规模才是虚拟电厂,即达到市场准入门槛的要求。这一要求,会随着灵活性供需情况以及电力系统运营算法求解能力进行动态调整。例如,当虚拟电厂聚合商数量发展至通信负担过大、电力求解器难以求解,那么准入规模将触发资源重组。其次,虚拟电厂的技术原理始于其技术初衷,即释放需求侧灵活性。这一特殊

的“电厂出力”并非一定是基于分布式发电或者储能放电形成的向上调节，也可能是基于可调节负荷或储能充电形成的向下调节。那么向下调节为何仍可理解为“出力”。这是因为，立足电力系统运行的“平衡视角”，同一时序下的“用电下调等于发电上调”。不难看出，虚拟出力的要素是“互动”，需要在电量＋电力的多时序平衡调节中提供虚拟的“电厂”响应服务能力。这也同样验证了上述猜想，虚拟电厂并不是客观独立存在的实体资源。举例来说，一个工业园区经过灵活性改造，未参与互动调节时，其运行目标仍是能量管理或成本管控。本质上，在没有电网的互动调节情况下，不会形成虚拟“出力”的认定，园区资源的灵活性只会发挥在这一形态下源荷储的协同价值。因此，虚拟电厂需要具备电厂类似的运行特性，即便是对标新能源机组，也需要形成可并网运行的技术条件，形成互动模式。不仅如此，虚拟电厂作为特殊的“电厂”，其外特性受限于海量资源的运行调节，特别是可调节负荷是虚拟电厂的重要基石，在没有调节能力时，虚拟“出力”不复存在，则无法形成可调度的“电厂”。因此，虚拟电厂的第3个要素是“调节”。基于这样的理念框架，虚拟电厂才能如一般的电厂资源被常态化调用，满足上文所述的需求侧资源多时序、多品种的市场获利需求。

综上，基于第一性原理的思维指导，虚拟电厂技术本质的分析中给出了3个逻辑要素——聚合、互动与调节，而互动中又涵盖了物理互动、信息互动和价值互动，形成多维互动与资源协同的关键技术体系。

1.2　虚拟电厂的技术目标

在新型电力系统的构建过程中，电力市场交易体系不断完善，各地现货市场相继转正、辅助服务市场化正在推进、新兴交易品种加速探索。特别是在新能源全面入市的政策推动下，电力市场价格更加完整，灵活性资源调度需求提升，可见虚拟电厂的市场化空间正在逐步扩大。

为加快推进虚拟电厂在新型电力系统构建中的融合应用，虚拟电厂的分类方法应当遵循技术特性本质，继而实现在技术共识下的规范化应用。根据虚拟电厂的第一性原理分析方法，虚拟电厂的聚合、互动和调节能力需要符合交易品种的响应特性要求。本质上是资源调节在不同时间尺度上的协同能力问题，不同响应时序下形成了不同技术特性的虚拟电厂。本文归纳了国内部分省份市场交易品种对虚拟电厂的技术要求，如表1所示。

虚拟电厂的传统分类方法是依照聚合资源的类型进行划分，通常分为“负荷类”和“发电类”等，这种分类方法较为粗犷，对于聚合表后光伏、用户侧储能等资源的虚拟电厂缺乏科学的属性划分。在真实系统运行场景下，虚拟电厂也可同时提供上、下调服务，例如，爬坡、调频等其他辅助服务。在这一基础上，虚拟电厂的分类方法应该遵循第一性原理的分析指导，按照响应时间尺度分为功率型（秒级、分钟级）和能量型（分钟级、小时级及以上），前者以高精度、快速率为主，无需售电资质；后者以容量大、时序长为主，需要售电资质。其中，能量型虚拟电厂按照调节特性分为负荷类（下调型）和发电类（上调型）参与市场互动，继而形成相适应的技术体系和目标。图1给出了功率型、能量型虚拟电厂参与不同市场交易品种的响应时序示意。

表1　部分省份市场交易品种对虚拟电厂技术要求
Table 1　Technical requirements for virtual power plants in market trading varieties of some provinces

交易品种	聚合容量	调节速率	调节精度	响应时间	持续时间
需求响应	≥10 MW				≥2 h
调峰服务	≥5 MW		偏差≤20%	≤15 min	≥1 h
电力现货	≥20 MW且不低于最大负荷的10%	≥调节容量的3%/min且≥0.6 MW/min	偏差≤15%	≤2 min	≥2 h
爬坡服务	≥5 MW	≥调节容量的1%/min	偏差≤3%	≤15 min	≥30 min
调频服务	≥5 MW	≥调节容量的5%/min	偏差≤5%	≤10 s	≥30 min

基于上述分类方法，依照能量价值、灵活性价值、容量价值、绿色价值等多维互动体系，可为完善虚拟电厂的技术体系建立3个方面的目标。

1）经济低碳。相较于功率型虚拟电厂，能量型虚拟电厂更直观地反映了通过聚合规模化资源用户参与现货或峰谷套利，吸引需求侧潜在清洁低碳资源以形成规模化调节能力的核心思想，对探索适配虚拟电厂特性的市场交易机制，挖掘需求侧资源多维度价值提出了要求。

2）灵活可靠。相较于能量型虚拟电厂，功率型虚拟电厂更直观地反映了通过精准快速调节对外出力以响应更快时序电网波动，为保障电力系统稳定可靠运行贡献灵活性调节能力的核心理念，同时，也对实现虚拟电厂的精准调控与低时延传输提出了要求。

3）安全高效。两种类型虚拟电厂在聚合资源用户参与系统运行与市场运营的过程中，都面临着并

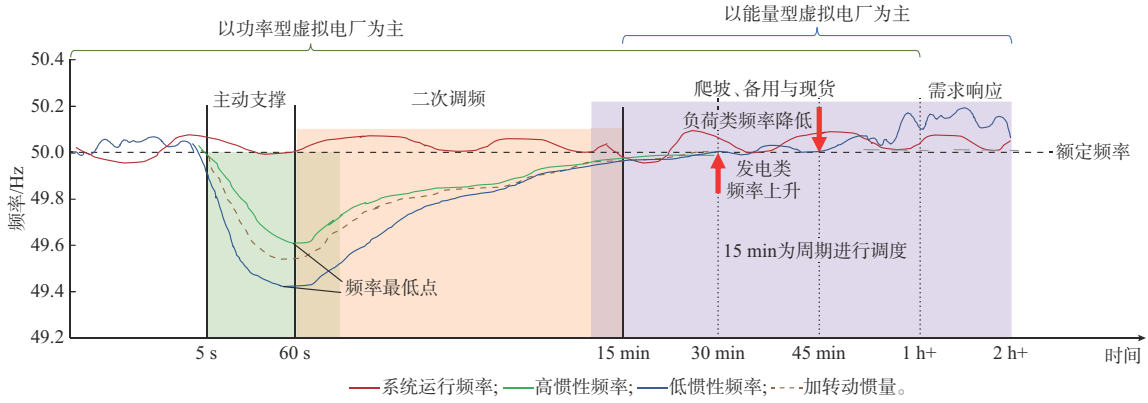

图 1　不同类型虚拟电厂参与市场交易的响应时序

Fig. 1　Response timing of various types of virtual power plants participating in market trading

网运行的系统风险与隐私泄露的网络风险，对于保障通信链路安全、调度信号与控制指令高效传输，以及跨主体数据共享与用户隐私安全提出了要求。

2　虚拟电厂的关键技术体系

2.1　技术体系及其关联关系

结合前述分析，为有序推动虚拟电厂科学技术发展，需要以实现虚拟电厂经济低碳、灵活可靠、安全高效运行为导向，通过构建对应的技术体系，明确不同技术所处层级与攻关梯度，助力需求侧协同能力提升与新型电力系统建设。通过解耦虚拟电厂动态聚合、协同调控、安全通信与可信交易等维度的核心关键技术，提出面向需求侧协同能力提升的虚拟电厂技术体系，具体如图 2 所示。

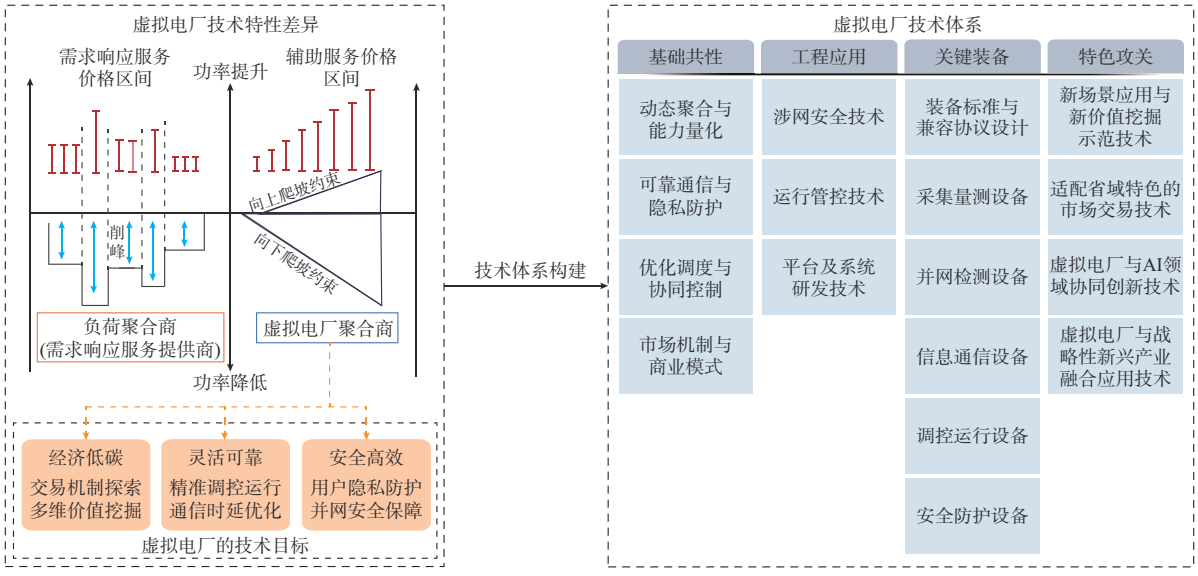

图 2　虚拟电厂技术体系

Fig. 2　Technical system of virtual power plant

图 2 中，基础共性技术是指不同类型虚拟电厂本征构建中通用的方法论，可实现虚拟电厂在不同市场环境和调度模式下的统一兼容，主要包括动态聚合与能力量化、可靠通信与隐私防护、优化调度与协同控制、市场机制与商业模式四方面技术。

工程应用技术面向实际工程场景，重点解决虚拟电厂理论技术在并网过程中面临的一系列应用问题，主要包括虚拟电厂涉网安全技术、运行管控技术、平台及系统研发技术。

关键装备技术主要为基础共性技术中相关算法模型的部署，以及工程应用技术的落地提供硬件支撑，聚焦于适配虚拟电厂运行特性相关设备或装置的研制，主要包括虚拟电厂相关的装备标准与兼容协议设计，以及采集量测、并网检测、信息通信、调控运行、安全防护等关键设备研发。

特色攻关技术是指面向特定场景或需求的前沿性技术，主要包括新场景应用与新价值挖掘示范技术，适配省域特色的市场交易技术，虚拟电厂与人工

智能（artificial intelligence，AI）领域协同创新技术，以及虚拟电厂与战略性新兴产业融合应用技术。

2.2　基础共性技术

2.2.1　动态聚合与能力量化技术

1）动态构建技术。分布式能源、储能、新型电力负荷等异质资源在运行及响应特性上存在着显著差异，难以统一纳入虚拟电厂动态聚合模型并实现规范化表达。因此，需要面向虚拟电厂的动态构建技术展开深入研究，以解决异质资源难以表征的问题[16]。针对聚合资源状态波动或电网调节需求变化等场景，还需要针对虚拟电厂快速动态重构技术展开研究[17]。

2）可信量化技术。在构建虚拟电厂动态聚合模型过程中，内部资源的出力波动性与行为模式变化随机性相互叠加，将对外特性的准确表征造成较大影响。因此，需要研究虚拟电厂概率置信表征技术与调节能力精准评估方法[18]，实现对调节容量、调节速率、调节精度等核心指标的可信认证。

2.2.2　可靠通信与隐私防护技术

1）时延优化技术。虚拟电厂需要与电网及内部异质资源进行高频信息交换，进而实现对各类资源的连续精准控制，但信息传输过程中的任意一次时延或丢包都将导致虚拟电厂的外特性扰动与动态性能下降。因此，需要以提升虚拟电厂的通信管控能力为目标，研究信息流视角下的通信传输优化技术[19]，以及数据流视角下的通信链路优化与通信阻塞管理技术[20]。

2）隐私防护技术。虚拟电厂在跨主体进行数据交互过程中面临着信息泄露与滥用风险，传统基于静态数据假设的隐私防护模型难以有效应对具备数据动态变化、跨域互济协同特征的虚拟电厂业务场景。因此，需要面向虚拟电厂的跨域数据安全共享与隐私防护技术展开相关研究[21-22]，实现业务过程中对于敏感信息的安全共享。

2.2.3　优化调度与协同控制技术

1）分层分区优化调度技术。虚拟电厂的优化调度并不是一个扁平化的过程，其本质是一个分层分区的协调调控体系。该体系可以把复杂的调控问题分解为不同层级的子问题，从而实现全局优化和区域自主的有机结合。根据文献[23]提出的多层级架构，可以将调度功能分解为以下3个层级。

（1）上层：协调层。在此层级，虚拟电厂聚合内部资源，对外表现为统一的可调度实体，面向上级电网或电力市场进行战略协调和互动，并进行实时、日前以及中长期的市场竞价和结算，响应系统层面的调控指令。

（2）中层：执行层。此层级可以接收上层的调度指令，并将其分解为内部不同“子虚拟电厂”的具体操作指令，是连接宏观调控和微观执行的桥梁。执行层需要根据实时数据进行资源的最优化组合，确保以最低成本完成上层任务。

（3）底层：响应层。该层级由海量异构的分布式资源构成，它们在接受上层指令的同时，也需要充分考虑每个分布式资源的运行状态（如电动汽车充电需求、储能荷电状态）、响应成本和响应意愿，通过精细化的控制满足用户侧的基本需求。这种分层分区的优化调度架构，不仅有效解决了大规模资源协调优化的复杂性问题，还通过各个层级逐层分解，保证了虚拟电厂在复杂环境中的灵活性、经济性和可靠性。

2）协同控制技术。虚拟电厂在参与电力系统调节的过程中，需要不断协调内部异质资源，通过快速精准响应指令实现对电网调度曲线的主动跟随。考虑到虚拟电厂控制架构的多样性，需要分别研究面向虚拟电厂的分布式控制与集中式控制方法[24]。此外，需要研究面向虚拟电厂的自适应控制、鲁棒控制与偏差控制方法[25]，以平抑新能源出力波动及用户用能行为随机调整对外特性的影响。

2.2.4　市场机制与商业模式

1）市场交易策略。虚拟电厂需要兼顾内外双重视角下的经济协同，当作为独立市场主体参与交易时，应以整体经济效益最大化为目标，研究面向现货市场、辅助服务市场等不同市场下的交易申报策略制定方法[26]。当面向内部的海量异质资源主体时，需要考虑各主体间的非对称博弈关系，研究虚拟电厂内部资源利益均衡与效益分配技术[27]。

2）交易机制设计。通过价格信号激励分布式资源的市场参与及行为调整意愿，是推动虚拟电厂规模化发展的关键抓手。然而，当前部分省份对于虚拟电厂参与电力市场交易过程中的主体身份、报价规则与结算机制等关键内容尚未厘清，虚拟电厂仍缺乏参与常态化市场运营的支撑机制。因此，需要结合不同省份的资源禀赋与电力市场实际建设进展，研究适配虚拟电厂参与电力现货市场、辅助服务等市场的相关交易机制与规则[28-29]。

3）商业模式设计。虚拟电厂在国内已经取得了一定的建设进展与示范成效，但在部分省份仍以小规模试点示范形式展开，聚合规模与运营能力的提升需要合理商业模式的进一步扶持。因此，需要以提升虚拟电厂参与市场交易的多维度效益为抓手，设计可激励用户市场参与意愿与低碳节能意识，支撑虚拟电厂常态化运营的多维度商业模式[30]。

2.3　工程应用技术

2.3.1　涉网安全技术

1)通信安全防护技术。虚拟电厂需要与多元异构设备建立安全通信链路,但不同设备厂商密钥管理体系孤立,认证协议互不兼容,聚合资源难以实现统一安全管理[31]。因此,需要设计支持身份动态认证的安全通信防护架构,建立跨厂商跨设备的安全通信认证接入机制,以及面向不同层级的数据加密技术与密钥管理体系[32-33]。

2)异常数据识别技术。边缘侧分布式资源存在数据格式混杂、标准不一等问题,例如,设备内部运行误差、外部恶意攻击所引发的数据异常现象极易导致对电网调控指令的响应偏差。当前,基于统计学理论构建的集中式数据异常检测模型存在数据体量需求大、计算复杂度高、泛化能力差等缺陷[34],需要面向虚拟电厂的异常数据注入辨识、溯源与应对方法展开细化研究[35]。

2.3.2　运行管控技术

虚拟电厂聚合资源出力波动与行为模式的频繁变化容易引发电压越限等电网运行风险。然而,传统的系统安全运行校核技术多基于集中式电源的稳态调节特性设计,难以适配海量异质资源的动态变化特性[36]。因此,需要研究兼顾虚拟电厂多时序灵活性的安全校核技术,以及虚拟电厂运行风险评估方法与平抑技术[37]。

2.3.3　平台及系统研发技术

当前,虚拟电厂业务系统正面临海量终端设备并发接入场景下数据采集、并网检测、智能调控、实时预警等方面的性能缺陷,同时,各业务模块面临着交互协同效率不足等问题。因此,需要针对海量分布式资源接入的虚拟电厂业务系统与高效管控平台构建技术展开研究[38]。

2.4　关键装备技术

2.4.1　装备标准与兼容协议设计

分布式资源终端计量设备存在接口类型混杂、通信协议多样、数据标准缺失等问题,导致数据采集兼容性差且可信度不足,难以直接应用至虚拟电厂的聚合调控及相关业务。因此,需要制定计量设备的接口规范与通信协议,同步研究面向表后可调资源的标准化可信量测改造方案[39]。

2.4.2　采集量测设备

受分布式资源地理位置分散、运行环境复杂等因素的影响,传统的信息采集设备存在量测精度低、抗扰动能力弱等问题[40],难以满足虚拟电厂对资源状态实时感知的精细化要求。此外,不同设备的数据采集频率偏差也将一定程度上影响对虚拟电厂外特性刻画的精准程度。因此,需要研发高精度、抗干扰的智能传感终端,以及面向不同场景的可信采集模块与量测设备。

2.4.3　并网检测设备

虚拟电厂动态响应电网调节指令过程中,内部分布式资源的出力与意愿扰动,以及功率频繁调节、外部网络攻击等多元不确定因素都将导致对电网的瞬时冲击,但现有设备难以量化评估动态聚合的异质资源对电网稳定性的影响。因此,需要针对虚拟电厂并网检测装备及相关标准规范展开研究[41]。

2.4.4　信息通信设备

虚拟电厂需要协调广域海量分布式资源参与系统运行,但部分资源的部署环境复杂且通信网络环境较差,存在明显的传输时延与较高的丢包隐患,导致虚拟电厂响应电网指令的过程中出现偏差。因此,需要面向满足虚拟电厂与电网互动的本地与远程通信设备,以及通信网络管理设备展开研究[42]。

2.4.5　调控运行设备

虚拟电厂参与调频辅助服务的过程中,需实现秒级的快速响应与精准控制,但传统集中式架构调控设备通信时延通常较高,难以满足包含新能源出力波动与用户意愿扰动场景下的电网调频需求[43]。因此,需要面向虚拟电厂快速频率响应的智能调控终端设备展开研究。

2.4.6　安全防护设备

虚拟电厂边缘侧终端设备大多暴露于开放网络环境,面临着固件恶意植入、网络恶意攻击等风险。同时,传统通信防护设备缺乏面向虚拟电厂业务中高频交互特定通信协议的解析能力。因此,需要研发并部署边缘侧专用安全防护设备[44],完善边端接入-链路传输-云端存储的全环节硬件防护体系。

2.5　特色攻关技术

2.5.1　新场景应用与新价值挖掘示范技术

1)县域级虚拟电厂示范应用技术。部分省份的系统灵活性调节需求正逐步向配电网末端的县域与乡村转移,但相关区域正面临资源位置分散、电网网架薄弱、电力通道阻塞多方面难题。既有的虚拟电厂示范工程多聚焦于城市主网场景,灵活性潜力的释放受到多方面因素限制。因此,有必要面向县域级场景,针对虚拟电厂的聚合调控与市场运营等技术展开研究[45-46]。

2)低碳导向型虚拟电厂聚合优化调控技术。现有面向虚拟电厂的聚合优化调控技术侧重于实现对资源的精准调控,一定程度上忽略了资源的低碳属性,导致多维度价值尚未充分释放。因此,需要面向计及资源碳排放特性的虚拟电厂聚合与分解方

法，以及考虑清洁能源参与的虚拟电厂调控优化技术展开研究[47]。

2.5.2　适配省域特色的市场交易技术

1）虚拟电厂参与的超大规模现货市场出清求解技术。省域级电力市场呈现出数据体量大、变量维度多等一系列特征，传统的集中式出清优化算法在面临海量高维数据时，极易出现求解效率不足、模型难以收敛等问题。随着虚拟电厂等新型市场主体的参与，需要针对海量分布式资源接入后的超大规模现货市场出清加速求解策略展开研究[48]。

2）适配虚拟电厂参与的区域电力市场机制。随着电力市场交易体系的逐步完善，市场交易品种不断丰富，交易范围不断扩大，推动电力资源实现更大时空范围内的优化配置是必然趋势。因此，可针对虚拟电厂参与区域电力市场[49]，以及协同参与电能量、调频、备用等多市场交易品种的相关规则与机制展开研究[50]。

3）虚拟电厂参与多市场协同交易技术。虚拟电厂聚合的分布式能源具备低碳属性，可将该部分价值延伸至碳交易、绿证等多维度市场。因此，可研究适配虚拟电厂参与的市场机制与交易策略[51]，为释放需求侧资源的多维度价值提供理论支撑。

2.5.3　虚拟电厂与AI领域协同创新技术

1）云端智能技术。当前，AI在虚拟电厂中的应用主要聚焦于负荷预测等静态数值计算维度与方法，动态聚合、协同调控、可信交易等核心业务场景受决策效率等因素制约，尚未实现规模化应用。此外，主流AI模型依赖于海量数据拟合输入、输出变量间的非线性关系，存在计算结果可解释性差等问题，难以满足电网实际运行的安全可靠要求。为此，需要结合机理分析与数据驱动方法，研究具备较强可解释性的虚拟电厂AI应用模型[52]。同时，高度中心化的云端架构也带来了单点故障风险和系统扩展性瓶颈。

2）边端智能与去中心化架构。云端智能模型因其参数量大、计算复杂的特征，难以适配边缘侧设备。同时，用户数据在云端的集中上传也容易引发隐私泄露与数据主权等方面的争议。对此，文献[53]提出的“去中心化IPT云/雾架构”可作为一个典型的解决方案。该架构通过在设备侧部署“雾节点”，将大量的数据处理和实时控制任务从云端卸载至边缘。在此架构下，AI模型的应用也呈现出云边协同的模式，具体如下。

1）云端负责执行全局性、非实时的AI任务，如模型的训练、大范围的资源优化和策略下发。

2）雾/边端则负责执行轻量化、实时性强的AI推理任务。例如，雾节点可以独立运行本地设备的故障诊断模型，执行快速的功率响应控制策略，其I/O响应时间可低至毫秒级[53]。

2.5.4　虚拟电厂与战略性战新兴产业融合应用技术

1）虚拟电厂车网互动技术。虚拟电厂面临着用户充电需求刚性化与电网调节需求动态化的矛盾。同时，车桩资源时空分布不均衡与用户响应意愿随机等特征也对实现规模化车网互动造成了较大影响。因此，需要研究多时间尺度下的电动汽车灵活资源动态聚合与协同优化方法，以及考虑用户响应意愿的价格激励机制[54-55]，实现规模化电动汽车资源灵活性调节潜力的充分释放。

2）大规模空调协同调控技术。迎峰度夏期间，空调占电网负荷比例极高，是虚拟电厂参与电网削峰填谷的重要资源。然而，用户资源对温度变化的敏感性差异以及调控指令响应时延等因素在一定程度上制约了将空调资源纳入虚拟电厂精准调控与规模化应用框架。因此，需要针对吉瓦级海量终端空调资源聚合建模、快速响应与精准控制，以及边缘控制框架下用户舒适度保障与无感调节策略等技术展开研究[56]。

3　虚拟电厂工程示范进展与技术成效

3.1　工程进展

自中国第1座以市场化方式运营的虚拟电厂投运以来，虚拟电厂的发展日新月异，工程规模不断扩大、交易品种逐渐丰富、社会效益持续提升。截至2024年底，国内虚拟电厂示范工程总规模已突破10 GW，成为助力各省实现电力供需平衡与新能源消纳的关键支撑。

从省域建设进展分析，各省基于自身的资源禀赋与市场条件，持续提升虚拟电厂建设规模。图3总结了国内典型省份的虚拟电厂建设进展。

在聚合容量与调节能力方面，不同地区情况如下：

1）华北地区。冀北不断创新虚拟电厂运营模式，将张家口蓄热式电锅炉、唐山电动重卡接入负荷管理中心，两类资源的聚合容量、调节能力分别达到410 MW、105.6 MW；山西省虚拟电厂聚合容量达2 014 MW，最大可调负荷达256.3 MW。

2）华东地区。山东省虚拟电厂聚合容量达到2 546 MW，调节容量达277 MW；江苏省启动全国首个吉瓦级虚拟电厂建设，迎峰度夏时期居民空调主动响应负荷超500 MW；上海市虚拟电厂申报可调能力达2 032.4 MW，与浙江省共同参与了首

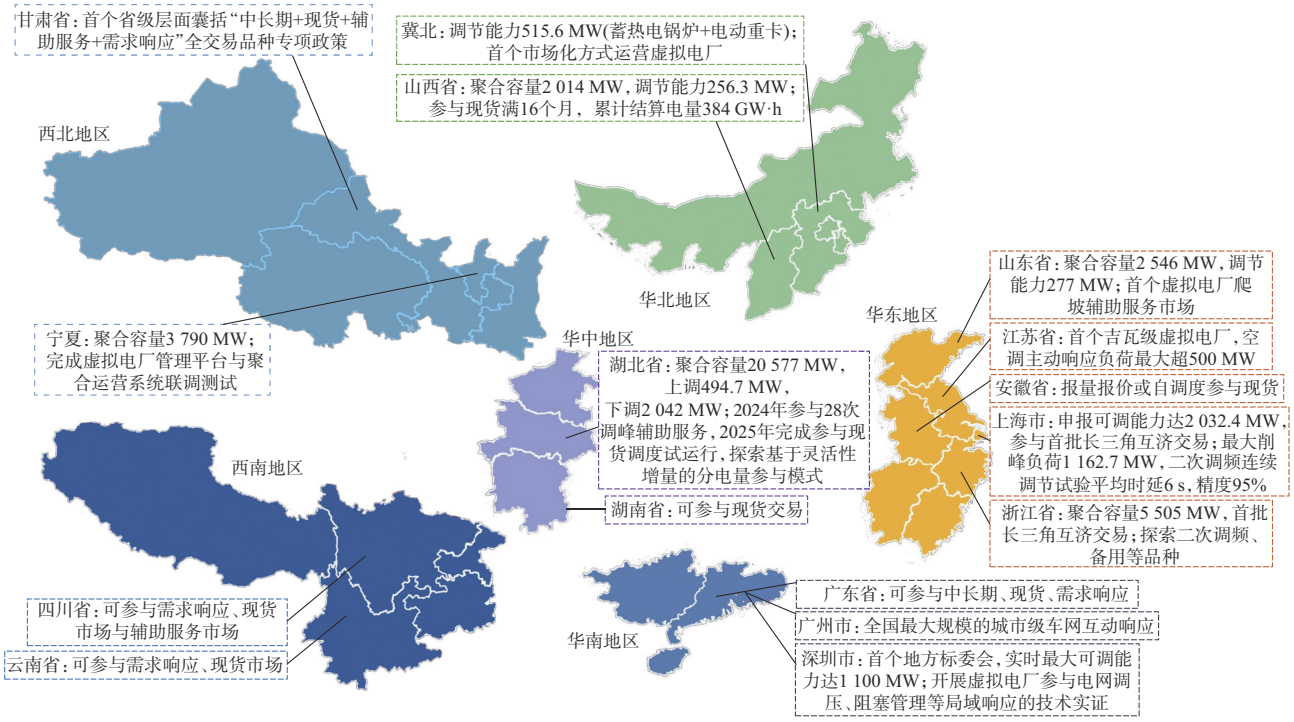

图3　国内典型省份虚拟电厂建设进展

Fig. 3　Construction progress of virtual power plants in typical provinces in China

批长三角互济交易；浙江省虚拟电厂聚合容量达5 505 MW。

3)华南地区。深圳市虚拟电厂实时最大可调能力达1 100 MW，成立首个地方性标委会，持续推动虚拟电厂在超大型城市中的市场化运营模式。

4)华中地区。湖北省虚拟电厂报装聚合容量达20 577 MW，具备494.7 MW上调、2 042 MW下调能力。

5)西北地区。宁夏虚拟电厂聚合资源聚合容量已达3 790 MW。

在政策制定与特色探索方面各地区情况如下：

1)华北地区。山西省虚拟电厂以4次/h的交易频率按日不间断参与电力现货市场16个月，累计结算电量384 GW·h。

2)华东地区。华东能源监管局发布新版“两个细则”，开展了面向虚拟电厂提供旋转备用、转动惯量等品种交易机制的探索；山东省颁布国内首个爬坡辅助服务市场规则《山东电力爬坡辅助服务市场交易规则(试行)》，积极探索适配虚拟电厂的全新市场交易机制；浙江省颁布《虚拟电厂参与浙江电力辅助服务市场试点工作方案》，探索虚拟电厂参与二次调频、备用等市场品种的交易规则；上海市完成了迎峰度夏期间的虚拟电厂快速削峰能力验证，调用最大削峰负荷达1 162.7 MW，创下全国虚拟电厂实测调用最高纪录。此外，完成了虚拟电厂二次调频连续调节试验，含上下行通信与响应时延可平均控制在6 s左右，响应精度可达95%以上；安徽省印发《安徽电力现货电能量市场交易实施细则》，允许虚拟电厂通过报量报价或“自调度”模式参与现货市场。

3)华南地区。南方能源监管局组织制定《第三方独立主体参与南方区域跨省电力备用辅助服务市场交易实施细则》，推动虚拟电厂参与跨省备用市场结算运行，深圳市开展了虚拟电厂参与电网调压、阻塞管理等局域响应的技术实证；广州市2025年春节期间组织了全国最大规模的城市级车网互动响应，响应规模占全省总响应量的占比达19.3%；广东省颁布《广东省虚拟电厂参与电力市场交易实施方案》，明确虚拟电厂可参与中长期、需求响应与现货市场。

4)华中地区。湖北省2024年组织虚拟电厂参与调峰辅助服务市场28次，2025年完成虚拟电厂参与现货市场调度试运行，探索基于灵活性增量的分电量参与模式；湖南省颁布《湖南省虚拟电厂管理工作细则(试行)》，明确满足市场准入条件的虚拟电厂可参与现货市场交易。

5)西北地区。宁夏完成虚拟电厂管理平台与聚合运营系统的联调测试；甘肃省颁布《甘肃省虚拟电厂建设与运营管理实施方案》，这是全国首个省级层面囊括“中长期＋现货＋辅助服务＋需求响应”全交

易品种的虚拟电厂专项政策。

6）西南地区。四川省印发《虚拟电厂建设与运营管理实施方案（征求意见稿）》，积极推进虚拟电厂参与需求侧市场化响应、电能量市场与辅助服务市场；云南省颁布《2025年云南省电力需求响应实施方案（征求意见稿）》《现货电能量交易实施细则》，同样明确了虚拟电厂参与需求响应与现货交易的市场主体身份。

3.2　市场成效

省间互济市场方面，2023年9月28日，南方电网通过城市级虚拟电厂智能调控平台组织10家虚拟电厂运营商在国内首次参与跨省备用辅助服务市场调电试运行，检验虚拟电厂参与跨省备用服务市场申报、出清、执行等全业务流程，揭示了深圳市虚拟电厂备用能力的潜力；2023年11月3日至6日，实现了国内首次结算意义的第三方独立主体参与跨省电力辅助服务市场交易，为海南省提供跨省电力支援4次，平均实时备用能力均超20 MW，占全部备用需求的10%，有效支撑省间电力供应，跑通跨省备用的技术路径和结算路径。2024年7月22日，长三角省市间互济交易市场首次启动，上海市9家经营主体、安徽省2家经营主体参与市场。7月23日14:00—15:00，安徽省支援上海市成交电力31 MW，成交价1.245元/（kW·h）；当日20:00—21:00，上海市支援安徽省成交电力31 MW，成交价1.205元/（kW·h），经上海市虚拟电厂运营管理平台实时监测，最大响应负荷为20.2 MW（20:15），平均响应负荷为14.7 MW，标志着需求侧可调节资源交易正式由省内跨向省间，实现了省间交易全链路技术贯通。

省内辅助服务方面，2019年底，冀北虚拟电厂建成投运中国首个以市场化方式运营的虚拟电厂示范工程。截至2022年底，已在线连续提供调峰服务超过4 800 h，虚拟电厂运营商和用户收益达673.7万元。湖北省调峰辅助服务市场中，2024年4至10月，虚拟电厂参与填谷调节28次，虚拟电厂贡献最大调节能力为305.4 MW，累计促进省内新能源消纳超29.14 GW·h，市场传导成本为518万元。在二次调频市场方面，浙江省虚拟电厂首次纳入调度运行结算，根据2024年12月调频市场结算，浙江华能虚拟电厂63 MW的聚合容量月度市场化收益达8.9万元，用户分摊1 130元/MW，实现了虚拟电厂的常态化调度运行。

省内现货市场方面，山西省虚拟电厂引入全电量市场参与模式，自2023年9月1日山西省启动虚拟电厂入市交易以来，虚拟电厂以4次/h的交易频率按日不间断运行16个月，结算电量384 GW·h，共获得红利259.36万元。相比而言，湖北省提出首个基于虚拟电厂调节量进现货的市场改进机制，在新能源消纳困难及电网阻塞节点，通过节点电价激发用户调节意愿，充分释放需求侧灵活性在能量平衡中调节价值。2024年12月，参与调电的运营商主体共2家，包括用户资源19个，涉及水泥、化工、材料、食品等行业，分布于12个节点。此次试运行虚拟电厂全天中标结果均为上调，最大上调负荷为41 MW，最小上调负荷为9 MW，其中，主要上调负荷集中在11:00—15:00时段。全日中标平均价格为282.6元/（MW·h），中标最高价格、最低价格分别为395元/（MW·h）和31元/（MW·h）。

配电网状态管控服务方面，深圳面向配电网越限、阻塞、减碳等不同业务场景，建立虚拟电厂面向配电网状态管控与减碳服务的“电-碳双普惠”响应服务机制，探索基于市场化调控的经济型配电网保供新模式。截至2024年底，深圳市累计开展虚拟电厂精准响应101次，总调节电量5.603 GW·h，减少碳排放约4 681.2 t，为各虚拟电厂运营商带来的经济收益约为1 820万元，创造社会直接经济效益高达1.5亿元。

4　虚拟电厂的技术体系完备建议

尽管中国虚拟电厂的技术能力和成效验证已取得显著进展，但其常态化运营能力仍然存在技术壁垒，特别是新型电力系统下如何将其从随机性资源转变为确定型资源，是推动虚拟电厂在统一调度体系下规模化应用的关键一环。经过分解剖析，本文立足虚拟电厂的第一性原理，从信息-物理-社会多个维度给出技术体系完备建议。

1）物理视角。首先，建立健全技术标准，推动虚拟电厂规范化发展，形成统一的形态、特性与定位共识，以推动在功率调节与能量响应等多元业务场景中的准入和应用；其次，完善电力市场的准入与出清规则，建立针对虚拟机组的安全管控技术体系，包括动态能力验证与功率交互校核等，深化虚拟电厂运行特性与网络运行状态的耦合关系，实现网荷互动下的安全调度与可靠运营；最后，强化多时间尺度的协同运行能力，进一步提高异质资源聚合精度，充分释放海量随机约束下的真实可调边界，同时，构建有限聚合容量下的多时序解耦调度运行能力，实现多元需求侧资源供需互动下的协同能力提升。

2）信息视角。首先，提升异构通信的承载与风险评估水平，建立虚拟电厂信息-物理融合的分析理论与刻画技术，动态提炼数据丢包、信息时延与通信方式对虚拟电厂运行特性的量化影响；其次，创新电

力通信调度范式,加强通信可靠性、时滞性的管控技术,规范软硬件产品性能指标,降低因设备异构带来的性能偏离;最后,构建电网、聚合商、用户全局化的隐私防护技术,设计数据产品的标准化流通技术,强化边缘计算与储存能力,降低隐私泄露风险。

3)社会视角。首先,持续完善电力市场新型交易品种,改善虚拟电厂运营成本的多市场价值传导机制,推动虚拟电厂容量成本(聚合成本)与运行成本(调节成本)的解构;其次,建立设备检测、平台检测、响应质量检测等可信评估资质与社会监管能力,实现虚拟电厂质量认证与市场运营监管的高效衔接;最后,构建完善的能源互联网市场经济体系,推动虚拟电厂上下游产品与服务的循环发展,实现虚拟电厂业务有序竞争的市场生态。

5　结语

针对新型电力系统下需求侧协同能力提升问题,本文基于第一性原理的分析方法,揭示虚拟电厂的物理本质,基于电力系统平衡理论的技术原理,以及涵盖"聚合、互动与调节"的逻辑要素,并基于响应时间尺度提出了面向不同调节品种的技术要求,进而兼容不同类型虚拟电厂"经济低碳、灵活可靠、安全高效"的总体技术目标。围绕该目标,构建了涵盖基础共性、工程应用、关键装备、特色攻关4个维度的虚拟电厂技术体系,明确了不同技术的核心理念与技术目的。为进一步讨论上述技术体系的适用性并探索其优化空间,对国内典型虚拟电厂的工程实践与市场成效进行了论证剖析,发现实现其常态化运营仍面临物理、信息、社会维度下的技术因素制约,进而针对性提出了多视角融合、跨学科交叉的技术体系完备建议。相关成果将为虚拟电厂规模化发展与应用提供理论支撑。

参 考 文 献

[1] CHENG Y S, CHUNG M K, TSANG K P. Electricity market reforms for energy transition: lessons from China[J]. Energies, 2023, 16(2): 905.

[2] 国家发展改革委.关于印发《电力需求侧管理办法》的通知[EB/OL]. (2014-05-21)[2025-04-05]. https://www.nea.gov.cn/2014-05/21/c_133349789.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the "Electricity Demand Side Management Measures" [EB/OL]. (2014-05-21)[2025-04-05]. https://www.nea.gov.cn/2014-05/21/c_133349789.htm.

[3] 王宝,叶斌,朱刘柱,等.市场环境下我国电力需求响应实践与探索[J].电力需求侧管理,2021,23(5):91-95.
WANG Bao, YE Bin, ZHU Liuzhu, et al. Practice and exploration of China's power demand response in electricity market[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 91-95.

[4] NAVAL N, YUSTA J M. Virtual power plant models and electricity markets: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 149: 111393.

[5] 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 research on virtual power plant under the new power system [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(5): 49-57.

[6] 国家发展改革委.关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》的通知[EB/OL].(2024-07-25)[2025-04-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of the "Action Plan for Accelerating the Construction of New Power System (2024—2027)" [EB/OL]. (2024-07-25) [2025-04-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm.

[7] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.

[8] LI B, WANG J J, BAI X F, et al. Overview and prospect of information and communication technology development in virtual power plants[J]. Energy Conversion and Economics, 2022, 3(6): 368-380.

[9] MAHMUD K, KHAN B, RAVISHANKAR J, et al. An Internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109840.

[10] BHUIYAN E A, HOSSAIN M Z, MUYEEN S M, et al. Towards next generation virtual power plant: technology review and frameworks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111358.

[11] GAO H C, JIN T, FENG C, et al. Review of virtual power plant operations: resource coordination and multidimensional interaction[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122284.

[12] 陈启鑫,高洪超,冯成,等.虚拟电厂动态构建与可信量化:理论分析与关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(18):26-36.
CHEN Qixin, GAO Hongchao, FENG Cheng, et al. Dynamic construction and trustworthy quantification of virtual power plant: theoretical analysis and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 26-36.

[13] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46

(18)：3-14.

[14] 梁英，左娟．虚拟电厂技术及展望[J]．新型电力系统，2025(1)：12-32.
LIANG Ying, ZUO Juan. Virtual power plant technology and prospects[J]. New Type Power Systems, 2025(1): 12-32.

[15] STEIKER C S. Second thoughts about first principles [J]. Harvard Law Review, 1994, 107(4): 820.

[16] 高洪超，李楚一，王冠雄，等．聚合规模化5G基站的虚拟电厂动态构建与响应实证[J]．电力系统自动化，2024，48(18)：47-55.
GAO Hongchao, LI Chuyi, WANG Guanxiong, et al. Dynamic construction and response demonstration of virtual power plant with aggregated large-scale 5G base stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 47-55.

[17] 孙玲玲，李海滨，贾清泉，等．基于动态重构的虚拟电厂资源聚合规划方法[J]．电力系统自动化，2024，48(18)：115-128.
SUN Lingling, LI Haibin, JIA Qingquan, et al. Planning method for resource aggregation of virtual power plant based on dynamic reconstruction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 115-128.

[18] 焦治杰，王小君，刘嬖，等．考虑分布式新能源出力不确定性的虚拟电厂概率可行域构建方法[J]．电力系统自动化，2024，48(18)：129-138.
JIAO Zhijie, WANG Xiaojun, LIU Zhao, et al. Construction method for probability-based feasible region of virtual power plant considering uncertainty of distributed renewable energy output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 129-138.

[19] NADEEM F, AFTAB M A, SUHAIL HUSSAIN S M, et al. Virtual power plant management in smart grids with XMPP based IEC 61850 communication[J]. Energies, 2019, 12(12): 2398.

[20] OEST F, RADTKE M, BLANK-BABAZADEH M, et al. Evaluation of communication infrastructures for distributed optimization of virtual power plant schedules [J]. Energies, 2021, 14(5): 1226.

[21] ALAGAPPAN A, VENKATACHARY S K, ANDREWS L J B. Augmenting zero trust network architecture to enhance security in virtual power plants[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1309-1320.

[22] 李达，杨珂，郭庆雷．面向虚拟电厂电力交易的隐私保护结算模型[J]．电网技术，2024，48(9)：3713-3723.
LI Da, YANG Ke, GUO Qinglei. A privacy-preserving settlement model for power transactions in virtual power plants [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3713-3723.

[23] ZHOU L J, ZHENG B. Research on hierarchical and zonal dynamic reconfigurable resource aggregation technology for virtual power plants[C]// 2025 4th International Conference on Green Energy and Power Systems (ICGEPS), April 11-13, 2025, Hangzhou, China: 759-763.

[24] 赛翔羽，刘艳，智楠，等．虚拟电厂模式下初期黑启动频率及电压分布式优化控制[J]．智慧电力，2025，53(2)：49-57.
SAI Xiangyu, LIU Yan, ZHI Nan, et al. Distributed optimization control of frequency and voltage during initial black start in virtual power plant mode[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 49-57.

[25] 庄紫麟，窦晓波，丁泉，等．基于鲁棒模型预测控制的配电网虚拟电厂一次频率控制策略[J/OL]．电力系统自动化，2025：1-26 (2025-03-07) [2025-04-05]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250306.1616.002.html.
ZHUANG Zilin, DOU Xiaobo, DING Quan, et al. Primary frequency control strategy of virtual power plant in distribution network based on robust model predictive control [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2025: 1-26(2025-03-07)[2025-04-05]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250306.1616.002.html.

[26] 彭超逸，徐苏越，顾慧杰，等．基于主从博弈的虚拟电厂参与多元竞争市场投标策略研究[J]．电力系统保护与控制，2024，52(7)：125-137.
PENG Chaoyi, XU Suyue, GU Huijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant participating in a multiple competitive market based on the Stackelberg game [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 125-137.

[27] SHUI J J, PENG D G, ZENG H, et al. Optimal scheduling of multiple entities in virtual power plant based on the master-slave game[J]. Applied Energy, 2024, 376: 124286.

[28] SEVEN S, YAO G, SORAN A, et al. Peer-to-peer energy trading in virtual power plant based on blockchain smart contracts[J]. IEEE Access, 2020, 8: 175713-175726.

[29] LYU X Y, XU Z Y, WANG N, et al. A two-layer interactive mechanism for peer-to-peer energy trading among virtual power plants[J]. Energies, 2019, 12(19): 3628.

[30] 高洪超，王宣元，邱小燕，等．新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]．太阳能学报，2023，44(3)：376-385.
GAO Hongchao, WANG Xuanyuan, QIU Xiaoyan, et al. Ramping energy market mechanism and its business model of virtual power plants oriented to new power system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376-385.

[31] 胡金炜，张玉健，蔡莹，等．虚拟电厂网络安全研究综述及展望[J]．中国电机工程学报，2025，45(8)：2876-2899.
HU Jinwei, ZHANG Yujian, CAI Ying, et al. Review and prospect on cyber security of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2876-2899.

[32] KORUKONDA M P, SHAHIDEHPOUR M, XIE L. Cyber resilience in virtual power plants: a multiscale multilayer approach toward secure energy management [J]. IEEE Electrification Magazine, 2025, 13(1): 54-65.

[33] PARK T, SONG K, JEONG J, et al. Convolutional autoencoder-based anomaly detection for photovoltaic power forecasting of virtual power plants [J]. Energies, 2023, 16(14): 5293.

[34] 吴天琦，葛广凯，韩啸，等．虚拟电厂下基于基因表达式编程的云边协同分布式异常数据检测算法[J]．电力信息与通信技术，2024，22(1)：47-54.
WU Tianqi, GE Guangkai, HAN Xiao, et al. A cloud-edge collaboration distributed anomaly data detection algorithm based on gene expression programming in virtual power plant [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(1): 47-54.

[35] ZHANG Y C, DONG Z Y, KONG W C, et al. A composite anomaly detection system for data-driven power plant condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(7): 4390-4402.
[36] GKOKTSIS G, LAUER H, JAEGER L. Risk assessments in virtual power plants with NESCOR criteria, practical application, advantages and disadvantages[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Availability, Reliability and Security, August 31-September 1, 2023, Benevento, Italy: 1-11.
[37] ZHANG G, JIANG C W, WANG X. Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(2): 145-156.
[38] SHAO P, LIU Y, HUANG L, et al. Design and implementation of an electricity market trading platform architecture for high concurrency access by market entities[C]// IEEE 6th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, May 24-26, 2024, Chongqing, China: 746-751.
[39] SUN L Y, CHEN Y, DU Q J, et al. Virtual power plant for monitoring of distributed energy resources using extensible messaging and presence protocol[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101365.
[40] DENG W, PEI W, QI Z. Design and implementation of universal interface for DER communication and control based on IEC 61850-7-420[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 141-148.
[41] ZHAO H, ZHAO H. Research on current protection of distribution network with DG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(8): 13-18.
[42] 汪莞乔,苏剑,潘娟,等.虚拟电厂通信网络架构及关键技术研究展望[J].电力系统自动化,2022,46(18):15-25.
WANG Wanqiao, SU Jian, PAN Juan, et al. Prospect of research on communication network architecture and key technologies for virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 15-25.
[43] XU Z N, LIU Z S, MENG H M, et al. Design and implementation of virtual power plant system based on equipment-level power and load forecasting[C]// Advances in Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, July 22-24, 2023, Yantai, China: 1045-1055.
[44] VENKATACHARY S K, ALAGAPPAN A, ANDREWS L J B. Cybersecurity challenges in energy sector (virtual power plants): can edge computing principles be applied to enhance security?[J]. Energy Inform, 2021, 4(1): 5.
[45] 张云飞,周强,丁戈,等.考虑多源相关不确定性的乡村虚拟电厂自治优化运行[J].广东电力,2023,36(10):47-56.
ZHANG Yunfei, ZHOU Qiang, DING Ge, et al. Autonomous optimal operation of rural virtual power plants considering multisource correlation uncertainties[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 47-56.
[46] 李文浩,毛承雄,王丹,等.农村背景下基于需求响应的虚拟电厂博弈策略[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(6):43-53.
LI Wenhao, MAO Chengxiong, WANG Dan, et al. Virtual power plant game strategy based on demand response under rural background[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(6): 43-53.
[47] XIE T, WANG Q, ZHANG G, et al. Low-carbon economic dispatch of virtual power plant considering hydrogen energy storage and tiered carbon trading in multiple scenarios[J]. Processes, 2024, 12(1): 90.
[48] 程韧俐,周保荣,史军,等.面向区域统一电力市场的超大城市虚拟电厂关键技术研究综述[J].南方电网技术,2023,17(4):90-100.
CHENG Renli, ZHOU Baorong, SHI Jun, et al. Review of key technologies for mega-city virtual power plants upon regional unified power market[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 90-100.
[49] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6780-6790.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
[50] 刘浩文,刘东,陈张宇,等.多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J].电网技术,2021,45(7):2533-2541.
LIU Haowen, LIU Dong, CHEN Zhangyu, et al. Optimal reactive power service clearing based on multilevel cooperative VPP[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2533-2541.
[51] ZHANG L, LIU D Y, CAI G W, et al. An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108558.
[52] 袁孝科,沈石兰,张茂松,等.基于可解释强化学习的智能虚拟电厂最优调度[J].综合智慧能源,2025,47(1):1-9.
YUAN Xiaoke, SHEN Shilan, ZHANG Maosong, et al. Optimal scheduling of intelligent virtual power plants based on explainable reinforcement learning[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(1): 1-9.
[53] ZHANG Y F, CHEN Z Q, MA K X, et al. A decentralized IoT architecture of distributed energy resources in virtual power plant[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(10): 9193-9205.
[54] YANG D C, HE S W, WANG M, et al. Bidding strategy for virtual power plant considering the large-scale integrations of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5890-5900.
[55] QIN Y D, RAO Y R, XU Z C, et al. Toward flexibility of user side in China: virtual power plant (VPP) and vehicle-to-grid (V2G) interaction[J]. eTransportation, 2023, 18: 100291.
[56] GUO M X, GUO X X, YANG J L, et al. Operation strategy of central air conditioning virtual power plant based on risk measurement method[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 773149.

周保荣(1974—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统规划、电力系统分析与控制。E-mail:zhoubr@csg.cn

高洪超(1990—)，男，博士，助理研究员，主要研究方向：虚拟电厂、微电网、分布式能源系统的运行控制与市场运营。E-mail：hcgaoth@tsinghua.edu.cn

程韧俐(1972—)，女，教授级高级工程师，主要研究方向：电力系统安全稳定分析与控制及运营方式管理。E-mail：chengrenli@sz.csg.cn

康重庆(1969—)，男，通信作者，博士，教授，博士生导师，主要研究方向：电力系统规划、低碳电力技术、负荷预测、电力经济。E-mail：cqkang@tsinghua.edu.cn

（编辑　代长振）

Technical System Construction for Virtual Power Plants from First Principles Perspective

ZHOU Baorong[1], *GAO Hongchao*[2], *CHENG Renli*[3], *ZHAO Wenmeng*[1], *MAO Tian*[1], *KANG Chongqing*[2]

(1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China;
2. National Key Laboratory of New Power System Operation and Control (Tsinghua University), Beijing 100084, China;
3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Enhancing demand-side coordination capability is one of the key initiatives to accelerate the construction of new power system. This facilitates the development of demand-side flexibility, improves the retail-side market framework, and diversifies grid regulation methods. Among various typical models emerging in demand-side management, the virtual power plant (VPP) functions as a novel "power source" combining flexible regulation attributes with market trading capabilities. Through multi-dimensional interactions with the power system, VPPs provide multi-temporal balancing regulation capabilities, thereby obtaining market value. However, existing VPP technologies still lack a dedicated systematic framework and analytical theory. The operation characteristics, interaction mechanisms, and dynamic aggregation problems of massive distributed resources have yet been fully addressed, which leads to significant obstacles to large-scale application and routine operation of VPPs for sustainable development. To this end, this paper first conducts an in-depth analysis of the technical essence of VPPs from first principles perspective, organizes the technical requirements imposed by differentiated market trading varieties for various types of VPPs, and proposes the objectives for constructing the VPP technical system. Then, a key technology system for multi-type VPPs across four dimensions is established: fundamental commonality, engineering application, key equipment, and characteristic research. Finally, this paper summarizes project implementation, operational status, and market effectiveness of VPPs in China. Forward-looking recommendations to address limitations in existing technical system are proposed, thereby providing theoretical support for routine operation and standardized application of VPPs.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB2401200).

Key words: virtual power plant; new power system; demand response; technical system; foundational commonality; engineering application; key equipment; first principles