

虚拟电厂参与电力市场的交易机制及数字化支撑体系研究

王利良 吕卿民 朱昌敏

浙江浙达能源科技有限公司，浙江杭州，310000；

摘要：随着我国电力市场化改革的深化和新能源装机规模的持续扩大，虚拟电厂作为新型电力市场主体逐渐崭露头角。虚拟电厂通过聚合多元分布式能源资源，依托物联网、大数据分析和云计算等数字化手段，实现柔性调度与资源优化配置，有效提升电网运行稳定性与经济性。本文研究重点聚焦基于智能技术的虚拟电厂参与市场机制、多时空尺度下的协同调度优化模型、以及市场化环境下的动态价格响应策略。通过系统分析其运营模式与技术路径，研究将为构建适应新型电力系统的市场规则体系和完善配套政策提供理论支撑。

关键词：虚拟电厂；电力市场；数字化支撑体系；资源调度

DOI：10.69979/3041-0673.25.09.019

由于世界范围内的能量供应格局发生了巨大的转变，以及电力市场化进程的逐渐深化，使得传统的电网运行方式受到了空前的冲击。随着新能源的迅速发展，我国电网面临着新的发展契机和新的挑战，因此，对其进行高效集成，实现电网最优供电是当前面临的一个重大问题。虚拟发电厂（VPP）是指将多种分散的能量聚集在一起，进行统一的调度与智能的管理，以提高电网的柔性与稳定能力。虚拟电站是实现电网负荷均衡、调峰调频的重要手段，同时也是一种具有弹性的参与方式。本项目以“虚拟电厂”为研究对象，以大数据、物联网、云计算等数字技术为基础，研究其在电力市场中的作用机理，为其有效运营提供技术支撑。

1 虚拟电厂概述

1.1 虚拟电厂的定义与基本概念

虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）是基于数字技术对分布式能源资源进行聚合调控与智能调度的新型电力系统组织形态。其核心架构通过虚拟化整合风电、光伏、储能装置及可调节负荷等异构能源单元，构建具备灵活调节能力的“数字能源网络”。该模式以标准化接口将分布式电源、储能系统及柔性负荷等异构资源耦合成统一聚合单元，使其能够作为整体参与电力市场交易与系统调度运行。作为电力系统数字化转型的产物，虚拟电厂并非传统物理意义上的发电实体，而是通过分布式协同机制对多类型资源进行跨域优化调度，实现资源利用效率最大化。其核心价值体现在两方面：一方面通过动态响应电力市场供需变化，提升电网运行可靠性及安全裕度；另一方面依托数字孪生、区块链等技术手

段，为新型分布式电源市场化接入提供技术支持，同时推动智能电网技术与电力市场机制实现协同创新。这种“物理分散、逻辑聚合”的运作范式，已成为重构电力系统“源-网-荷-储”协同关系的关键载体，也是实现能源系统低碳化、市场化转型的核心解决方案。

1.2 虚拟电厂的工作原理与运行模式

虚拟电厂的稳定运营需要智能调度体系与高效通信平台支撑，通过聚合风电、光伏、储能及可调负荷等分布式资源，构建动态响应的能源聚合系统，实现电网供需波动快速响应与发用电柔性协同控制。系统依托分布式数据采集网络实时监测各单元发电功率、负荷需求及储能状态，运用模型预测、分布鲁棒优化等算法进行资源最优配置，形成可调度标准化模块参与市场交易。同时，虚拟电厂通过动态优化电源出力与负荷响应策略，在电价信号引导下实现运行效益最大化。这种模式可降低电网损耗、提升能源利用效率，并增强系统对新能源波动的适应性及故障工况下的供电韧性，成为推动电力系统数字化与市场化转型的核心技术载体。

1.3 虚拟电厂在电力市场中的作用与价值

虚拟电厂（VPP）作为新型电力系统组织形态，在电力市场环境下通过电价信号实时优化交易策略，降低用户用电成本并提升市场参与效益。其次，虚拟电厂可利用灵活调节能力提供调峰调频等辅助服务，通过多源协同控制增强电网稳定性与运行效率。基于智能调度系统的动态响应机制，虚拟电厂可精准匹配电力供需动态变化，有效缓解市场供需失衡压力。在新能源消纳领域，虚拟电站可实现对间歇性电源的动态调节，为大型新能

源接入及最优调度提供支撑，推动电力系统低碳化转型。同时，虚拟电厂可实时模拟电网运行状态，通过柔性调控策略平抑新能源波动引发的电网功率振荡，显著提升系统抗扰动能力与动态自愈水平。

2 虚拟电厂参与电力市场的交易存在的问题

2.1 虚拟电厂市场准入和政策支持不足

虚拟电厂当前面临的核心矛盾在于市场准入机制缺失与政策支撑不足的结构性困境。尽管其具备柔性调度、分布式能源高效整合等技术优势，但现有电力市场规则仍主要适配传统集中式电源，导致虚拟电厂在交易主体认定、价格形成机制等关键环节缺乏制度保障。国内部分省份滞后的市场化进程使得虚拟电厂准入标准模糊、运营监管框架缺位，难以建立与常规电源平等的市场参与资格。即便虚拟电厂在提升电网稳定性、促进新能源消纳等方面优势突出，众多新能源项目仍因市场体系不完善，难以与主流电力市场高效对接，无法实现市场化定价与交易。可见，政策缺失与市场条件限制严重阻碍了虚拟电厂的市场拓展。要突破这一困境，需加快电力市场化改革进程，通过出台专项扶持政策、降低准入门槛，并构建适应柔性发电特点的市场参与机制。

2.2 电力市场规则的不适应性

虚拟电厂参与电力市场需突破现有制度架构的适配性障碍。当前电力市场研究多基于集中式电源主导的体系架构，尚未形成适应分布式电源、需求侧资源及虚拟电厂等新型主体的制度设计框架。VPP 具有多源异构资源聚合、多时间尺度响应等特性，要求市场机制具备更高的灵活性与实时性，而传统以集中调度为核心的运行模式存在显著路径依赖，导致 VPP 难以充分释放其快速响应与跨域协同的调节潜力。因此，必须对现行的电力市场规则进行制度创新，使其具有更加柔性的参与机制与交易模式，通过制度供给重构释放 VPP 在提升系统调节能力、降低新能源弃电率等方面的技术经济价值。

2.3 技术互通性与数据安全性问题

虚拟电厂规模化运营面临的核心挑战还有异构资源互联互通与信息安全的系统性矛盾。虚拟电厂聚合光伏、风电、储能等多元分布式资源厂商设备存在通信协议异构性、控制接口非标准化问题，导致资源聚合效率受限。为此亟需构建标准化通信协议与数据接口，实现异构资源的统一调度与管理。然而高频数据交互与实时

控制需求带来的信息安全风险尤为突出：电网运行数据、用户隐私信息及市场交易指令的传输若遭篡改或泄露，可能引发市场交易异常、系统控制失效等连锁风险，直接威胁电力系统的物理-信息耦合安全。为了破解这一矛盾，需进一步完善相关标准，促进不同设备、系统与平台的兼容，增加信息安全方面的投资。

2.4 市场激励机制的不完善

缺乏有效激励机制导致虚拟电厂交易成本居高不下。虚拟电厂具备柔性供电与需求侧响应能力，但现有激励措施难以激活其潜力，尤其是辅助服务市场激励严重不足。当前，全球多数电力市场激励政策聚焦常规电厂，对虚拟电厂这类新兴市场主体的研究与支持相对匮乏。例如在调频、调峰等辅助服务场景中，虚拟电厂虽为关键支撑力量，却因缺乏适配的激励政策，无法充分释放调节效能。此外，市场价格波动与高昂交易成本也进一步压缩了虚拟电厂的盈利空间。要推动虚拟电厂深度参与电力市场，亟需构建完善的市场化激励体系，针对发电业务、辅助服务等核心领域制定专项激励措施。通过强化经济激励、提升政策弹性，既能提升虚拟电厂运营效率，也能加速其在电力市场的规模化推广应用。

3 虚拟电厂的电力市场交易机制

3.1 虚拟电厂的市场参与模式

虚拟电厂在电力市场中的参与模式主要聚焦于现货交易与辅助服务两大核心领域。在现货市场中，其依托实时价格信号与负荷需求预测，动态优化分布式资源调度策略，在日前-实时市场价差中捕获最大经济收益。辅助服务市场则侧重发挥其多时间尺度调节能力，为电网的稳定运行提供必需的稳定支撑，比如在调频场景中，利用储能系统的快速充放特性平抑秒级频率波动；在调峰场景中，通过可中断负荷的智能响应与分布式电源的协同出力，实现日前、小时级、分钟级功率平衡调节。

3.2 虚拟电厂的调度与优化机制

虚拟电厂通过智能调度系统实现分布式能源的聚合调控，其核心在于构建基于实时电价信号的动态优化模型。该模型通过解耦光伏出力波动、负荷需求变化与储能系统荷电状态的多维约束，实现分钟级资源调度策略的动态修正。具体运作中，依托电力现货市场价格曲线与电网阻塞信号，虚拟电厂同步优化风光发电出力计划、储能充放电策略及可调负荷响应方案，在满足 N-1

安全准则前提下最大化市场收益。为保障系统运行稳定性，调度算法内嵌调频容量预留机制与电压灵敏度矩阵，通过滚动时域优化实时平衡功率波动与网络损耗。在技术实现层面，系统集成时序卷积网络与深度强化学习算法，利用历史运行数据与实时信息流构建高精度市场预测模型，可提前 15 分钟预测节点边际电价（LMP）波动趋势，并生成包含日前市场投标、实时市场平衡与辅助服务补偿的三级优化方案。

3.3 虚拟电厂的市场价格响应机制

虚拟电厂的价格响应机制构建核心在于实时电价信号的动态传导与资源优化调度的协同。通过建立基于金融衍生品定价理论的电价弹性模型，将电力市场中的现货价格波动分解为供需基数、天气敏感度及政策贴现三大风险因子，通过 ARIMA 时间序列分析建立小时级电价预测框架。虚拟电厂作为灵活性资源聚合商，利用分布式优化算法实时解算各单元边际成本曲线，形成以 15 分钟为粒度的动态报价策略：当 LMP（节点边际电价）高于储能放电阈值时，释放存储电量获取现货收益；在负电价时段启动充电策略完成套期保值；当电价触及调频容量补偿门槛时，快速切换资源至辅助服务市场。这种多层次市场套利模式不仅平抑了价格尖峰造成的市场扭曲，还通过需求侧资源弹性调度实现网架阻塞成本的系统性降低。

3.4 虚拟电厂的交易结算与资金流动机制

虚拟电厂作为聚合多种分散能源的新型市场主体，在电力市场运营中面临结算与资金流转等系列难题。在实时交易场景下，其收益需依据交易平台规则，结合交易量、电价、时长等要素核算；而调峰、调频等辅助服务业务，则按用户需求与市场价格开展交易。为此，需深入研究虚拟电厂与市场平台、分布式能源供应商、设备运营商间的资金流转机制。实际运营中，虚拟电厂需向分散新能源资源支付费用，并按约定比例与各资源方结算。为保障资金流转的透明与高效，虚拟电厂常借助智能合约、区块链等技术，实现交易自动化与信息公开化。同时，为确保交易公平合规，还需将资金管理系统与电网支付体系、监管机制深度融合，构建起安全可靠的资金运作体系。

4 虚拟电厂的数字化支撑体系

4.1 大数据与实时监控系统

大数据与实时监控系统是支撑虚拟电厂高效运行的核心技术架构，通过物联网传感器、智能电表与边缘计算设备构建全域感知网络，实时采集分布式电源的发电功率、储能荷电状态、负荷需求及电网频率等百万级数据点，形成每秒更新量级达 TB 的能源数据流。系统依托分布式数据中台实现多源异构数据的清洗、对齐与标准化处理，结合时间序列分析、深度学习算法建立多维特征提取模型，可精准刻画光伏出力波动曲线、负荷响应潜力及储能动态调节裕度。实时监控系统基于数字孪生技术构建电网运行镜像，通过秒级数据刷新与并行计算引擎，同步推演虚拟电厂聚合资源的运行状态与市场交易场景，动态生成包含经济性、安全性约束的多目标优化策略。在异常工况下，该系统可触发自适应控制机制，例如通过负荷聚类分析快速定位可中断用户，或调用储能系统秒级充放电平抑频率波动。该技术体系不仅将资源利用率提升 15%-20%，更将故障响应速度从分钟级压缩至秒级，为虚拟电厂参与电力市场提供从感知、决策到执行的闭环技术支撑。

4.2 物联网（IoT）技术的应用

物联网（IoT）是构建虚拟电厂数字支持系统的关键。利用物联网技术，可以对各种设施进行智能管理和实时监测。在此基础上，将各分散的能量源（如风电机组、光伏电池板、储能装置等）接入感知与智能设备，并利用物联网等手段将其接入，构成综合智慧电网。基于物联网的虚拟发电厂可以获得各种设备运行状态、能量效率、环境等相关数据，以达到准确的能量分配和管理。比如，通过物联网技术，可以将风机的运行状态、光伏出力等信息及时地上载到虚拟电站的控制中心，从而制定出合理的调度方案。另外，基于物联网的能量存储管理方法，可以实时监测存储装置的充电和放电情况，并对其进行动态调节。利用该方法，实现对发电流程的最优控制，提升电网运行的可靠度与稳定度，减少设备失效率，提升智能决策水平。

5 结束语

虚拟电厂作为新型电力市场主体，凭借其资源聚合能力与智能优化算法，正成为全球能源转型的重要技术路径。随着我国电力市场化改革深化与电网数字化转型加速推进，虚拟电厂将在保供、清洁能源高效消纳、完善电力市场等领域发挥核心作用。虽然虚拟电厂当前发

展仍面临市场机制适配性不足、政策配套滞后等结构性约束，导致虚拟电厂难以开展规模化复制的商业模式。但伴随电力现货市场建设提速与辅助服务市场扩容，虚拟电厂可通过参与现货市场、快速调频等新兴交易品种实现价值变现。预计在“双碳”目标驱动下，虚拟电厂将突破制度性障碍与技术瓶颈，重构电力系统价值链，最终推动新型电力系统构建与能源互联网生态形成，成为支撑我国能源体系市场化、低碳化转型的关键基础设施。

参考文献

- [1] 王军,王恒涛,纪宇飞,等.基于低通滤波的风燃储虚拟电厂容量配置方法[J].能源研究与管理,2025,17(01): 173-178+186.
- [2] 解凯,郝飞,廖丛林,等.考虑配置电氢储能的虚拟电厂经济调度研究[J].能源与环保,2025,47(03): 189-197.

[3] 吴玖蓉,李旭涛,白杨,等.虚拟电厂资源聚合运行边界评估方法[J].电力需求侧管理,2025,27(02): 1-7.

[4] 张一晨,易炳星,王天峰,等.基于数据挖掘的电力交易合规风险自动监测系统[J].自动化应用,2025,66(05): 215-216+221.

[5] 梁英,左娟.虚拟电厂技术及展望[J].新型电力系统,2025,3(01): 12-32.

作者简介:王利良(1991-),男,汉族,浙江杭州人,学士,研究方向:虚拟电厂。

吕卿民(1992-),男,汉族,浙江兰溪人,硕士,中级工程师,研究方向:电力市场。

朱昌敏(1992-),男,汉族,江苏泰州人,高级工程师,学士,智能电网、虚拟电厂、能源物联网。