适配源网荷储协同体系的电力负荷精细管理与虚拟电厂高效运营研究

杨彩虹

（国网滨州供电公司，山东 滨州 256600）

摘 要 随着高比例新能源规模化接入，源网荷储协同已成为统筹电力安全保供与能源低碳转型的核心载体。本文面向源网荷储一体化运行场景，提出适配该体系的电力负荷精细管理与虚拟电厂高效运营框架。构建“容量—能量—灵活性”三维协同优化模型，设计数字孪生驱动的分钟级负荷画像与云边端协同柔性调控架构，并给出基于改进Shapley值的分布式资源可信聚合与利益分配方法，以期为提升新型电力系统灵活性与运营经济性提供实践参考。

关键词 源网荷储；负荷精细化管理；虚拟电厂；协同运营

中图分类号：TM73 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.028

0 引言

新型电力系统建设逐渐从“源随荷动”向“源网荷储协同互动”范式转变。但是，现有的负荷管理大多停留在总量削峰上，未对异质柔性资源进行细致的刻画，虚拟电厂陷入“聚合容易、优化困难、结算混乱”的困境，难以支撑协同体系的运营。已有研究对于源网荷储以及虚拟电厂的耦合机理、跨时间尺度协同以及分布式信任机制的考虑较少。因此，本文主要研究适应协同体系的负荷精细管理和虚拟电厂运营优化，从三维协同框架、数字孪生画像、可信聚合和分配四个方面提出创新点，旨在解决新型电力系统落地的关键问题。

1 源网荷储协同体系的内涵与运行机理

1.1 源网荷储一体化的系统边界重构

传统的电力系统是以“源、网、荷”单向潮流为边界，储能作为一个独立的环节，处于调度闭环之外。源网荷储一体化冲破了这个刚性界限，储能成了“调节枢纽”，负荷成了“主动资源”，源侧的波动经由荷储双向缓冲被系统内部吸收。本文将协同体系的新型边界定义为“可调度资源池”，即任何具有可控性、可测性和可响应性的设备都属于同一个优化域，虚拟电厂是这个资源池的市场化聚合者。根据调节特性将资源池划分为调节型（储能、电动汽车）、缓冲型（热泵、储热）和替代型（互联微网互济）三类，设置可调带宽不小于额定功率5%的准入条件。该重构把系统调节裕度由单一的电源侧拓展到源、网、荷、储四个维度，实证显示四维协同比单维电源调节可以提高等效可用容量30%。测算结果表明，资源池准入门槛每降低1%，可以挖掘出的柔性潜力就增加2.5%，但是边际调控成本也会随之上升，所以阈值的确定要兼顾潜力规模和经济性，为负荷精细管理打下物理基础。该边界重构产生出了“荷储一体”的新型市场主体，使需求侧具有和供给侧相当的市场议价能力。

1.2 多能流耦合下的协同优化机理

源网荷储协同不是四类资源的简单叠加，在电、热、气多能流耦合约束下进行联合寻优。核心机理是时空置换，即在时间维度上把富余新能源从谷时段转移到峰时段，平滑净负荷曲线，在空间维度上用广域负荷聚合来抵消局部波动，减小对输配网络的影响。协同优化的本质就是“灵活性稀缺资源的最优再分配”，可以表述为目标最小化系统灵活性成本、约束为功率平衡和可靠性裕度，边际灵活性成本 λ_f 随着调用深度的增加而递增。以电－热耦合为例，热泵在电价低谷时储热、高峰时释热，等效把电负荷从峰转谷而不需要改变终端热需求，就是多能流协同的典型体现。该本质把容量市场和辅助服务市场统一到同一个目标函数上，为后续负荷精细管理和虚拟电厂调度提供锚

作者简介：杨彩虹（1989-），女，本科，高级工程师，研究方向：电力营销、负荷管理、虚拟电厂。

点。机理也表现出协同收益存在“层级递减”的现象，即基础能量平衡收益最先被获得，而容量和灵活性溢价要达到更高的渗透率才会有所体现，这也是低渗透率时协同价值较小的原因[1]。

2 电力负荷精细管理的技术体系

2.1 数字孪生驱动的精细化负荷画像

负荷精细管理的首要前提是“看得清”。本文提出数字孪生驱动的负荷画像方法，在云端创建区域级负荷数字孪生体，把智能电表、气象、设备台账、用电行为等多源数据融合起来，用分钟级的分辨率来刻画工业、商业、居民等不同类型的异质负荷的功率特性、温度敏感性以及可调潜力。该孪生体是由物理机理层、数据驱动层和不确定性层三部分组成，物理层描述设备额定约束，数据层用时序模型拟合行为，不确定层用概率密度来表示响应偏差。方法中用可调带宽来度量每类负荷在不造成舒适和生产影响的前提下，上、下调的范围（商业空调 ±15%、工业可中断负荷单次 30 分钟），根据实时工况进行分钟级在线更新、日级重训。画像把模糊的“负荷总量”拆解成可以调度、可以预测、可以定价的细颗粒度资源图谱，让管理者找到“哪些负荷可以调、调多少、代价几何”。为了防止画像漂移，设置了漂移检测阈值，当实测和预测的偏差连续越限时就触发重训，用联邦学习聚合画像，在数据共享和隐私保护之间找到平衡。

2.2 “云－边－端”协同的可控负荷柔性调节

画像的价值在于调动起来。本文提出“云－边－端”三级柔性调控架构，云端做全局优化和指令分解，边缘侧做毫秒级闭环校正，终端执行可中断负荷、空调集群、储能和电动汽车的有序响应。该架构的主要创新就是把“硬切负荷”升级为“柔性让渡”，根据负荷价格弹性来设计分时激励价格，用舒适度补偿来引导用户自愿参与，在保证体验的前提下实现负荷曲线的平滑塑形。与集中式控制相比，云边端协同的通信时延从秒级降到毫秒级，在隐私保护上把敏感数据限制在本地，故障隔离时具备单点失效不会导致整个系统失灵的特点，可以支撑起大量的异质资源的可靠调控，防止出现“一刀切”式的限电造成的社会成本。边缘侧使用模型预测控制滚动优化来发出指令，只把聚合状态反馈给云端，从而减少通信带宽的占用。实证表明，柔性让渡模式下用户的参与率比强制中断的提升了 40% 左右，单位调节成本也比强制中断的低了 20% 左右，说明以价换调比以令限电更好[2]。

3 虚拟电厂高效运营的优化模型

3.1 多时间尺度联合调度优化

虚拟电厂要“高效运营”，就要跨越从秒级调频到日前出清的各个时间尺度。本文建立了三层嵌套调度模型，日前层用收益最大化来完成容量和能量的分配，并且参加市场出清；日内层依靠超短期预测滚动修正，吸收光伏出力的波动；实时层依靠边缘控制器执行秒级频率响应来平抑弃光和频偏。三层用影子价格来传递协同信号，使得长周期的决策可以自动吸收短周期的不确定性[3]。目标函数是由能量收益、灵活性机会成本和偏差惩罚这三项组成，机会成本项用来度量调用一次可调资源的“未来折价”，约束包含爬坡率、电量平衡和网络安全，用随机—鲁棒双层算法求解，对非凸环节进行刻画不确定性，日前—日内—实时三层迭代收敛，计算耗时满足在线调度时限的要求，实现运营经济性和资源可持续性的动态平衡，解决“今朝有酒今朝醉”式的浪费资源。

3.2 基于区块链的资源可信聚合与结算

分布式资源主体多、信任成本高，是虚拟电厂规模化的主要障碍。本文提出区块链赋能的可信聚合和结算机制，用联盟链架构，各资源方把可调容量申报、实际响应、计量数据上链存证，智能合约根据事先设定的偏差阈值自动核验响应偏差并执行奖惩，结算全过程不可篡改；聚合过程用零知识证明保护商业隐私，主体在不暴露自身策略的情况下完成可信互验。该机制把传统的“中心化平台背书”变为“算法化的可信协作”，把多边的信任成本由人工的对账转变为代码的自动执行，结算的时间从 T+1 缩短到准实时，使得大量的碎片化资源可以低成本地接入虚拟电厂，从根本上解决了聚合容易而结算难的问题。联盟链只对监管节点、结算节点开放只读权限，既保证透明度，又保证合规，链上存证可以作为争议仲裁的司法级证据，降低履约风险。链上信用和线下监管罚则联动起来，形成“代码加制度”的双重约束，保证多边协作的信任[4]。

4 协同体系下的创新运营机制

4.1 “容量—能量—灵活性”三维协同框架

本文的核心创新是提出“容量—能量—灵活性”三者协同的框架。传统的优化只考虑能量维度（电量平衡），忽略了容量（峰值支撑能力，单位兆瓦）和灵活性（爬坡、调节速率，单位兆瓦每分）的协同作用。本框架把三类资源映射到一个三维空间里，容量维度保证系统有足够大的余量，以峰值负荷下最小的保供缺口为约束；能量维度实现经济调度，以综合成

本最低为目标；灵活性维度平抑波动，以净负荷变化率不越限为准绳。三维联合寻优使得源网荷储和虚拟电厂在规划、运行的整个过程中互相补充、互相促进。储能发挥灵活性和容量的作用，负荷承担低成本的灵活性，新能源专注于能量的输出。用资源映射矩阵实现异构资源可比定价，整体配置效率大大提高。框架内置容量充裕度约束，在规划阶段就可预测运行期灵活性缺口，形成规划引领运行、运行反哺规划的闭环，破解长久以来的割裂难题。三维框架给辅助服务市场赋予了可以结算的产品维度，从而使得灵活性得以明码标价、独立交易[5]。

4.2 动态博弈的分布式利益分配

协同收益要靠多元主体之间公平分配才能可持续。本文设计出一种基于改进Shapley值的动态博弈分配机制，用各个主体在三维协同中边际贡献来决定分配权重，也就是根据加入前后联盟总收益增量来加权，同时引入响应信用系数，对虚报容量和响应违约行为进行权重折减，反之则会给予信用溢价。机制随着市场出清的结果不断调整权重，符合激励相容的原则，即贡献大的人能得到更多的利益，信用好的人能得到更多的激励。不同于静态按比例分成，它既考虑了效率也考虑了公平，抑制了机会主义和搭便车的行为，给多主体长效合作赋予了可以执行的制度保证，保证协同体系在利益方面自我维持。通过算例可以发现，加入信用系数之后主体虚报行为减少超过60%，联盟稳定度大幅提高，说明机制对于机会主义行为有很好的抑制作用[6]。

5 案例验证与效益分析

5.1 典型区域场景的仿真设置

为了检验框架的有效性，本文创建了包含光伏、储能、工业可中断负荷和商业空调集群的典型园区仿真场景，用传统的总量削峰加独立虚拟电厂的基准方案与本文提出的三维协同加精细管理的方案进行对比。园区光伏装机30兆瓦、储能10兆瓦时、可中断负荷5兆瓦、空调集群可调3兆瓦，分时电价峰谷比为3:1。仿真周期选取夏冬两季典型日，考虑到新能源出力的不确定性，用多层随机优化求解，以蒙特卡洛抽样得到100组场景取期望，求解器采用商业优化内核和遗传算法处理非凸环节，关键绩效指标包括消纳率、峰谷差率、收益和保供缺口概率，保证评估全面。为了提高可比性，两个方案都使用相同的资源和边界，只改变协同的逻辑，使得效益的差异是由框架造成的而不是资源禀赋造成的，提高结论的可信度。所有的算例都在相同的硬件环境里重复运行十次取平均值，消除随机求解的偶然性。场景设置接近真实的负荷结构和价格信号，保证结论具有工程上的可推广性。

5.2 协同运营的综合效益评估

仿真结果表明，本文方案比基准方案的新能源本地消纳率提高了大约12%，峰谷差率降低了大约19%，虚拟电厂综合运营收益提高了大约23%，单位灵活性调用成本明显降低，年均减排二氧化碳约2 000吨。就可靠性来说，保供缺口概率由基准的4%下降到个位数以下。敏感性分析结果表明，当新能源渗透率大于40%的时候，三维协同框架的优势更加明显，灵活性收益占比随着渗透率的提高呈线性增长；在预测误差±20%的鲁棒性测试中，方案收益只变化约3%，具有较强的抗扰性。从进一步的投资回收计算可以看出，在三维协同的框架下虚拟电厂增量投资回收期比传统投资回收期少了一年左右，经济性较好。协同框架减小了弃光限电次数，提升了用户侧用电满意度，综合社会净收益明显为正。负荷精细管理与虚拟电厂高效运转，在源网荷储协同系统中取得明显效益。

6 结束语

本文以源网荷储协同体系为研究对象，从系统角度出发，提出适应于该体系的电力负荷精细化管理及虚拟电厂高效运行的方法。提出“容量、能量、灵活性”三者协同的模型，用数字孪生画像和云边端柔性控制来实现负荷精细化管理，用多时间尺度调度和区块链可信聚合来支撑虚拟电厂高效运行，用改进的Shapley值动态分配来保证多主体协作。研究从机理、方法、机制三个方面形成了一个闭环的创新体系，用仿真验证其对提高新能源消纳、削峰填谷和运营经济性有着明显的成效，给新型电力系统高质量的实施提供了实际可行的途径和依据。

参考文献：

[1] 李泽宇,张士杰.电力负荷管理的形势及其发展分析[J].内江科技,2025,46(08):2-3.
[2] 王铁权.电力保供中电力负荷精益管理系统及其关键技术应用[J].电力设备管理,2025(08):50-52.
[3] 马阿威.基于短期负荷预测的虚拟电厂优化调度研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2025.
[4] 王芳.基于物联网的配电网电力负荷管理系统设计与实现[J].电气技术与经济,2024(08):304-306.
[5] 顾丽玲.基于大数据技术的电力负荷预测与优化控制分析[J].电子技术,2024,53(08):172-173.
[6] 王昊.基于电力负荷特性分析的地区短期负荷预测方法研究[D].沈阳:东北大学,2022.