

面向虚拟电厂优化运行的多类型储能动态聚合 协同调度技术综述

葛磊蛟, 王宇宁, 路茹博, 孟周越, 卓岳, 吴宇阳
(天津大学电气自动化与信息工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对高比例分布式新能源和新型负荷接入下虚拟电厂储能异构特性表征、时变聚合边界和跨时间尺度调度等难题, 该文以“资源特性—动态聚合—场景建模—协同调度—算法求解”为主线, 分析多类型储能优化运行技术。根据功率—能量特性、响应速度、荷电状态和寿命退化差异梳理储能功能与场景, 从动态分群/成员选择、可行域/等效边界、市场/收益驱动三方面分析储能动态聚合模型; 将场景建模分为确定性、模糊、随机、鲁棒/分布鲁棒和区间方法; 围绕经济性、新能源消纳和技术安全总结调度约束, 比较多目标、多层、多阶段模型和求解算法。结果表明: 采用动态分群与可行域等效相结合的储能聚合方式, 在日前—日内—实时多阶段框架中实施分布鲁棒滚动优化, 并通过数学规划、分解式算法和安全约束智能算法协同求解是一种综合性能较好的多类型储能协同调度方案。此外, 对虚拟电厂多市场利益互动进行了简要论述, 结果表明收益驱动的储能动态聚合方式和多层博弈模型的构建具有良好的使用前景。通过多方面系统深入分析虚拟电厂的发展趋势后明确指出, 未来面向虚拟电厂优化运行的多类型储能动态聚合协同调度技术应发展动态聚合结合退化感知、多源不确定性场景的分布鲁棒滚动修正、多市场收益协调及安全约束强化学习与传统优化融合, 推动聚合向状态可感知、价值可评估和安全可控方向发展。

关键词: 虚拟电厂; 多类型储能; 动态聚合; 协同调度; 不确定性建模; 多时间尺度优化; 多市场联合优化
中图分类号: TM763 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2026)12-0000-00

Review of Dynamic Aggregation and Coordinated Scheduling Technologies for Multi-type Energy Storage Oriented to Optimized Operation of Virtual Power Plants

GE Leijiao, WANG Yuning, LU Rubo, MENG Zhouyue, ZHUO Yue, WU Yuyang
(School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, 300072, Tianjin)

Abstract: To address the challenges of characterizing heterogeneous energy-storage resources, time-varying aggregation boundaries, and cross-timescale scheduling in virtual power plants with high penetrations of distributed renewable energy and emerging loads, the paper adopts “resource characteristics–dynamic aggregation–scenario modeling–coordinated scheduling–algorithmic solution” as its main analytical framework and examines optimal operation technologies for multi-type energy storage. Storage functions and application scenarios are reviewed according to differences in power–energy characteristics, response speed, state of charge, and degradation. Dynamic aggregation models are analyzed from three perspectives: dynamic grouping/member selection, feasible regions/equivalent boundaries, and market/revenue-driven mechanisms. Scenario-modeling methods are classified as deterministic, fuzzy, stochastic, robust/distributionally robust, and interval-based. Scheduling constraints are summarized in terms of economic performance, renewable-energy accommodation, and technical security, while multi-objective, multi-level, and multi-stage models and their solution algorithms are compared. The results indicate that an energy-storage aggregation approach combining dynamic grouping with feasible-region equivalencing, distributionally robust rolling optimization within a day-ahead–intraday–real-time multi-stage framework, and coordinated solution by mathematical programming, decomposition-based algorithms, and safety-constrained intelligent algorithms provides favorable overall performance for the coordinated scheduling of multi-type energy storage. Stakeholder benefit interactions in multiple virtual power plant markets are also briefly discussed. The results show that revenue-driven dynamic energy-storage aggregation and multi-level game-theoretic models have promising application prospects. Based on a systematic analysis of virtual power plant’s development trends, it is further

concluded that future dynamic aggregation and coordinated scheduling technologies for multi-type energy storage should integrate degradation-aware dynamic aggregation, distributionally robust rolling correction of multi-source uncertainty scenarios, multi-market benefit coordination, and safety-constrained reinforcement learning combined with conventional optimization. Such integration is expected to promote the transition toward state-aware, value-assessable, and securely controllable aggregation.

Keywords: virtual power plant; multi-type energy storage; dynamic aggregation; coordinated scheduling; uncertainty modeling; multi-time-scale optimization; multi-market joint optimization

多类型储能动态聚合与协同调度, 是虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)在高比例分布式新能源条件下实现稳定、经济和低碳运行的关键。风电、光伏和光热等电源出力受气象条件影响, 电动汽车、温控负荷及其他可调负荷的用能行为也具有明显波动性, 随着新能源渗透率提高, 源荷两侧的不确定性进一步叠加^[1]。VPP 借助信息通信和先进控制技术聚合分散资源, 为协调这种不确定性提供了可行路径^[2]。本文所讨论的综合型 VPP 包括风电、光伏、光热、燃气轮机和柴油机等电源, 电动汽车、温控负荷及其他可控负荷, 以及电化学储能、抽水蓄能和电磁储能等储能装置。不同资源在响应速度、持续供能能力和运行约束上的差异, 使聚合过程不能停留在容量汇总层面。

在现有应用中, VPP 将分布式发电单元、储能系统(Energy Storage System, ESS)、可控负荷^[3]和电动汽车^[4]在逻辑层面统一组织, 无需改变各资源的物理隶属关系, 即可形成可参与电网调度和市场交易的聚合单元^[5]。其聚合对象不受固定地理位置和运行模式限制^[6], 资源互补能够降低单体波动对整体出力的影响, 提高预测性和调节灵活性^[7]。在运行层面, 不同响应速度和持续时间的储能资源可缓解源荷功率偏差, 促进新能源消纳^[8-9]; 在市场层面, 聚合资源能够参与电能量市场^[10]、碳交易^[11]和辅助服务市场^[12], 收益来源因而由单一电能交易向多市场拓展。国内外示范与模型研究已经验证了 VPP 组织分散资源的可行性, 但现有应用仍以单类储能、单一时间尺度或单一市场目标为主, 异构资源之间的动态协同尚未成为稳定、可复用的运行能力。

储能配置规模扩大后, 应用瓶颈已由是否具备调节资源转向能否准确表征并协调异构储能。电化学储能、抽水蓄能和电磁储能在响应速度、持续时间、效率、荷电状态(State Of Charge, SOC)和寿命退化方面差异显著, 统一等效模型虽然便于求解, 却可能高估聚合可调能力。设备级协同不足会削弱储能对源荷功率偏差的解耦效果^[13], 日前、日内和实时调度之间缺少状态传递, 则会降低储能对风光预测误差的缓冲能力^[14]。当 VPP 同时参与电能量、辅助服务、碳交易和绿证交易时, 储能退化成本、履约要求与收益目标相互影响, 现有方法仍难兼顾经济性、低碳性和技术安全^[15]。更深层的问题在于, 聚合结构、不确定性场景、调度模型和求解算法常被分开研究, 模型

之间缺少随资源状态与市场信号更新的反馈关系。

针对上述不足, 本文以多类型储能动态聚合为主线, 关注聚合结果能否准确反映设备能力, 并能否解聚为可执行的设备指令。研究从综合型 VPP 的源荷储构成和储能技术差异切入, 分析动态分群、可行域等效及收益驱动等聚合机制。场景建模部分讨论确定性与不确定性方法如何影响成员选择、聚合边界和备用容量; 协同调度技术部分则从经济性、新能源消纳和技术安全目标出发, 归纳功率平衡、网络安全、储能运行和市场交易约束。针对模型的混合整数、非线性和跨时间尺度耦合特征, 本文进一步比较数学规划、结构化、智能优化及随机仿真驱动算法的适用边界。上述分析贯通资源特性、场景描述、调度决策与算法执行, 旨在揭示多类型储能支撑 VPP 优化运行的关键联系, 并为后续研究和工程应用提供依据。

1 综合型 VPP 结构

Shimon Awerbuch 等在 1997 年首次提出 VPP 的概念^[16]。它们基于虚拟公共基础设施的定义, 描述了独立的、由市场驱动的实体之间的灵活协作, 以提供面向消费者的能源服务。VPP 的本质, 是一个以价值实现为根本驱动、聚合柔性资源的市场化载体, 它通过参与批发市场交易, 为电网提供需求侧管理、容量及辅助服务, 旨在协同提升系统经济性、可靠性, 并优化可再生能源的并网消纳^[17]。此外, VPP 可以作为电力系统中与电网相连的单一实体, 可以是静态的, 也可以是动态的^[18]。

依据所聚合主要参与者的类型, VPP 整体呈现出不同的运行特性。基于此, 我国 VPP 的主要类型可分为电源型、负荷型、储能型和综合型。为了更全面、系统性地探究 VPP 优化运行协同调度方法中的结构设计、储能特征、配置模型和求解算法等方面, 本文以综合型 VPP 作为主要研究对象。

1.1 综合型 VPP 结构

如图 1 所示, 一般的综合型 VPP 主要由可用于调度的分布式可再生能源系统、常规发电系统、ESS、区域内多类型负荷以及协调控制中心聚合而成。其中, 协调控制中心是核心, 通过可再生能源预测和市场参与等任务, 促进高效运行和性能优化^[19]。VPP 运营商根据电网的调控要求, 合理调度内部资源, 完成

电网经济性、低碳性以及技术性上的优化调度任务。

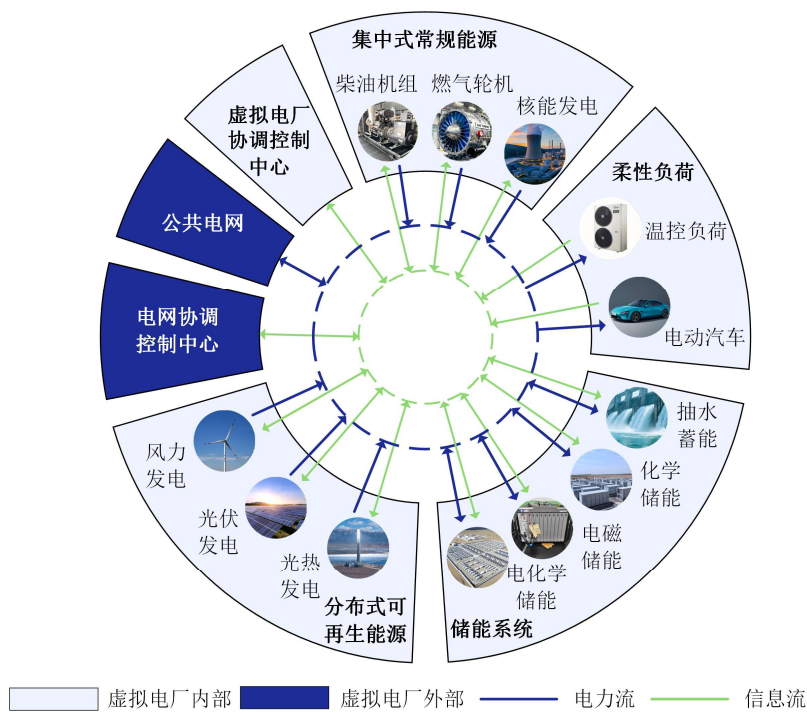


图 1 综合型 VPP 结构
Fig. 1 Structure of integrated VPP

综合型 VPP 聚合以风电^[20]、光伏^[21]、光热^[22]为代表的新能源，为电网提供绿色电力。然而，这类发电侧单元的输出功率受气象因素（如风速、光照）制约，具有强随机性与波动性，易引起配电网潮流与电压波动，威胁供电可靠性。为此，VPP 常引入燃气轮机^[23]、柴油机组^[24]等常规电源，以及化学储能^{错误;不能识别的开关参数。}、抽水蓄能^{错误;不能识别的开关参数。}、电磁储能^{错误;不能识别的开关参数。}等装置进行功率平抑与调节，以降低弃风弃光率并改善电能质量。

为弥补上述调节能力的不足，VPP 进一步将电动汽车^[28]、温控负荷^[29]等柔性负荷纳入调控范围。此类用户侧单元的用电行为受居民生活习惯、出行规律等复杂因素影响，同样呈现显著随机性与难以准确预测性^[30]。其功率波动与分布式新能源发电相互叠加，易产生“峰上加峰”现象，致使电力与负荷不平衡问题凸显，给电网调度运行带来新的挑战。

综上所述，为应对分布式能源与负荷接入对电能质量和 VPP 运行可靠性带来的显著挑战，核心策略之一是构建精确的数学模型，并据此优化配置一定规模的 ESS。近年来，储能技术在经济性与性能上的双重进步，使得采用多类型储能协同互补的方案日益可行。此举不仅在商业上能以更具成本效益的

方式缓解新能源消纳难题，更在技术上赋能 VPP，使其能够以更高的灵活性，向电网提供涵盖调压、调频及调峰等不同功能、不同时间尺度的多样化辅助服务。

1.2 多类型储能技术

如表 1 所示，面向 VPP 动态聚合决策，多类型储能的关键差异主要体现在功率-能量特性、响应速度、持续供能能力、充放电效率、及寿命退化规律等方面。功率型储能适于承担快速、频繁的短时功率调节，能量型及长时储能更适合跨时段能量转移与新能源消纳；混合储能可通过不同单元的功能互补降低设备投资和全生命周期成本^[31-32]。同时，储能在电源侧、电网侧和负荷侧的接入位置决定了其参与功率平抑、系统调节、削峰填谷、需求响应和辅助服务等任务的可用边界^[33-35]。因此，动态聚合不宜仅按额定容量或功率进行等效合并，而应依据响应速度、SOC、寿命衰减和持续供能能力实施分层建模与任务匹配，以准确表征异构储能的可调能力。

表 1 能量存储技术分类
Table 1 Classification of Energy Storage Technology

储能类型	特点	能量密度 (W · h · kg ⁻¹)	循环寿命/ 次	效率/%	适用场景
------	----	-------------------------------------	------------	------	------

机械储能	抽水蓄能	成本低、容量大、环境依赖性强	0.5~1.5	>30000	70~85	系统级调峰资源
	压缩空气储能	容量大、响应慢	2~6	>20000	50~70	能量搬移
	飞轮储能	响应快、寿命长	5~15	>1000000	85~95	快速功率响应
化学储能	锂离子电池	成本高、响应快、安全性差	150~250	3000~8000	90~95	VPP 主流储能、削峰填谷、需求响应与辅助服务、多市场联合收益
	铅酸电池	成本低、响应快	30~50	500~1500	70~85	
	钠硫电池	适合长时储能	150~240	2500~4500	75~90	
	液流电池	寿命长、易扩展	20~50	>10000	65~85	
	氢能储能	长时、跨区域储能	33000	>10000	30~45	
	合成燃料	易储运、可再利用	5000~12000	>10000	25~40	
电磁储能	超级电容器	功率密度极高、响应快	5~10	>100000	90~98	快速调频、电能质量治理、瞬时备用
	超导储能	容量大、稳定性高、投资高、运维复杂	1~5	>100000	95~98	
热储能	显热储能	结构简单、低成本	10~50	>10000	60~90	热负荷调节、跨季节储能
	潜热储能	能量密度高	50~150	>8000	70~90	

1.3 面向 VPP 优化运行的多类型储能动态聚合技术

在高比例多类型储能设备接入 VPP 后, VPP 的运行特性由传统的源荷储简单叠加逐渐转变为多主体、多时间尺度、多物理特性耦合的动态协同运行模式, 给 VPP 运行带来新的挑战。首先, 储能设备运行机理和动态响应特性差异较大, 若采用统一等效模型进行描述, 容易忽略不同储能在充放电效率、SOC 约束、寿命衰减和功率爬坡能力等方面的差异, 导致聚合模型难以准确反映真实可调度能力^[36]。其次, 多类型储能参与日前、日内和实时调度时, 其调节能力受到新能源出力不确定性、负荷波动、市场价格变化以及用户行为差异等因素共同影响, 表现出显著的时变性和不确定性^[37]。再次, 在 VPP 参与电能量

市场、辅助服务市场、碳交易和绿证交易等多市场联合运行时, 不同储能设备在经济性、低碳性和技术安全性目标之间可能存在冲突, 如何在多目标、多约束和多时间尺度条件下实现储能资源的动态聚合、分层协调和优化分配, 已成为支撑 VPP 高效、灵活和低碳运行的关键问题^{错误!不能识别的开关参数。}。

因此, 多类型储能的动态聚合并非简单的容量汇总, 而是需要根据运行状态、调度目标和外部市场信号, 对不同储能资源的可调容量、响应能力和能量支撑能力进行实时刻画与协同调用, 从而使 VPP 形成兼具快速响应能力、持续支撑能力和多市场参与能力的综合调节资源。如图 2 所示, 为面向 VPP 的多类型储能动态聚合技术框架。

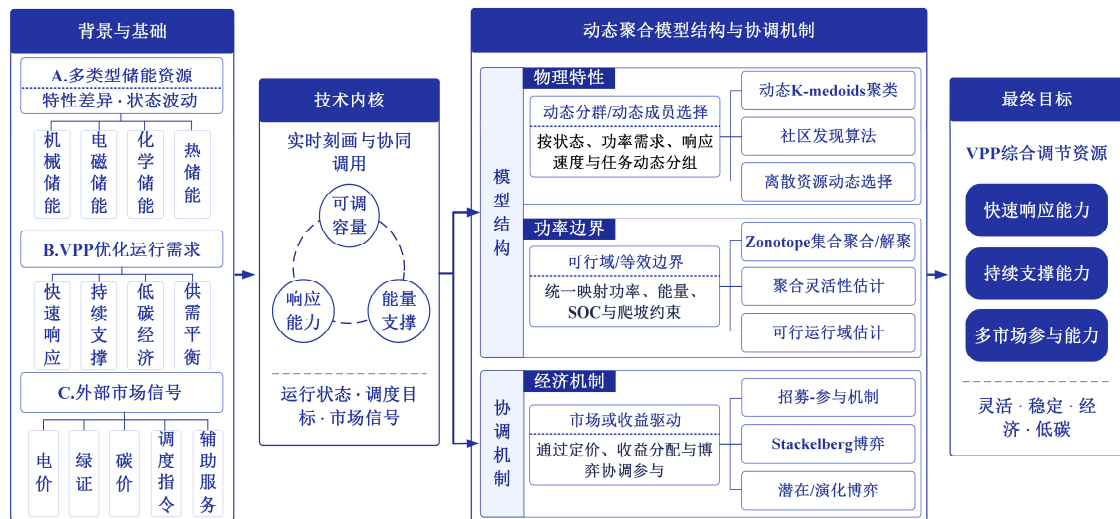


图 2 面向 VPP 优化运行的多类型储能动态聚合技术框架

Fig. 2 Framework of multi-type energy storage dynamic aggregation technology for VPP

1.3.1 动态聚合模型结构与协调机制

面向 VPP 的动态聚合模型并非对分散储能容量、

功率和 SOC 的简单求和, 而是需要在设备运行约束、聚合可调度能力和系统调度目标之间建立映射关系。现有对动态聚合模型结构的研究主要集中在动态分

群/动态成员选择结构和可行域/等效边界结构两个方面。对其内部协调机制的研究则主要集中于市场或收益驱动机制。

动态分群/动态成员选择结构根据储能资源的运行状态、功率需求、响应速度和调节任务差异,对资源进行动态分组或成员筛选。^{Ge 等^{错误!不能识别的开关参数。}}基于改进虚拟电池模型提出动态分组聚合方法,将异构分布式资源的能量容量、功率边界和响应能力进行统一表征;Zhang 和 Hredzak^{错误!未找到引用源。}依据功率需求构建异构 VPP 动态聚类模型,使不同资源簇承担差异化调节任务;Ding 等^{错误!未找到引用源。}进一步将聚合过程划分为资源选择和资源协调两个阶段,以降低大规模资源组合优化复杂度。此类结构能够应对多类型储能规模大、状态差异明显和调节任务多变等问题,但对实时感知、通信交互和分布式协调能力要求较高。

可行域/等效边界结构通过虚拟电池、类发电机或类储能模型,将多类型储能的功率上下限、能量约束、SOC 递推关系和爬坡能力转化为 VPP 聚合层面的可调能力边界。Zhao 等^{错误!不能识别的开关参数。}面向分布式综合能源系统建立主动动态聚合模型,将功率、能量和爬坡约束纳入统一等效框架;Liu 等^{错误!不能识别的开关参数。}则考虑网络约束、时序耦合约束和不确定性,构建 VPP 动态聚合可行域,以刻画多时间尺度下的灵活调节能力。此类结构能够较好解决异构资源统一建模和跨时段调节能力表达问题,但等效过程中可能弱化设备寿命衰减、局部运行约束和个体差异。

市场或收益驱动机制关注多主体储能参与 VPP 聚合时的收益分配、响应意愿和内部激励机制。Meng 等^{错误!不能识别的开关参数。}基于 Stackelberg 博弈构建内部定价驱动的 VPP 动态聚合模型,同时优化内部交易价格、聚合方案和调度策略,使储能主体的经济激励与 VPP 整体运行目标相协调。该类结构能够应对多市场参与下经济性、低碳性和技术性目标冲突,以及多主体参与意愿不足等问题,但其建模效果依赖于市场规则、价格响应关系和主体行为假设的准确性。

总体而言,动态分群/成员选择结构侧重提升异构资源组合的适应性,可行域/等效边界结构侧重刻画 VPP 整体可调能力,市场机制或收益驱动结构侧重保障多主体持续参与和收益协调,从物理特性、调度能力和经济机制三个层面回应了高比例多类型储能聚合后带来的动态协同挑战。

1.3.2 动态聚合算法

在确定模型结构与机制后,仍需选择与其数学性质相匹配的求解算法,以实现多类型储能资源的高效组合与协同调用。由于 VPP 动态聚合模型通常同时包含储能充放电状态、成员选择变量、市场交易决策和多时间尺度调度变量,其数学形式往往表现为混合整数、非线性、多目标和强时序耦合优化问题。当进一步考虑新能源出力、负荷需求和市场价格等

不确定因素时,模型还可能转化为随机优化、鲁棒优化或分布式优化问题,导致决策空间维度迅速增大,求解复杂度显著提升。

因此,动态聚合算法不仅需要具备处理离散-连续变量耦合、非凸约束和多目标权衡的能力,还应能够适应资源状态快速变化和滚动调度需求。基于此,所选算法应兼顾求解精度、收敛稳定性和计算效率,并具备较好的可扩展性、并行计算能力和实时响应能力,以支撑 VPP 在复杂运行环境下实现多类型储能的动态聚合与协同调度。

依据动态模型结构机制,现有动态聚合算法可归纳为三类。动态分群/成员选择算法主要应对资源数量庞大、异构性强和组合空间复杂等建模挑战,通过聚类、社区发现或动态成员筛选降低模型维度。Teng 等^{错误!未找到引用源。}采用动态 K-medoids 聚类和基于子模优化的两阶段选择方法,以满足频率控制中不断变化的性能需求;Zhao 等^{错误!不能识别的开关参数。}结合虚拟贡献理论与社区发现算法,刻画资源间电气联系和聚合贡献;Du 等^{错误!不能识别的开关参数。}则面向离散分布式资源构建动态聚合方法。此类算法的优势在于可快速筛选高贡献资源,但聚合效果依赖聚类指标和成员评价体系。

可行域/等效边界计算算法主要解决储能功率、能量、SOC 递推和时间耦合约束导致的可调能力难以表达问题。Müller 等^{错误!不能识别的开关参数。}基于 zonotope 集合实现分布式资源灵活性的聚合与解聚;Wang 等^{错误!不能识别的开关参数。}针对时间耦合约束下 VPP 聚合灵活性难以直接计算的问题,构建聚合功率灵活性估计方法;Chen 等^{错误!不能识别的开关参数。}进一步考虑 DER 异构性与不确定性,提出 VPP 可行运行区域估计方法。此类算法能够提高 VPP 可调能力边界的可计算性和可解释性,但在高维时序、多不确定场景下仍面临计算复杂度上升的问题。

市场机制或收益驱动算法针对多主体参与意愿不足、收益分配不均和聚合关系不稳定等问题,将博弈、价格信号和双向选择机制引入动态聚合。Lu 等^{错误!不能识别的开关参数。}通过“招募—参与”机制描述多个能源服务商组建和竞争 VPP 的过程;Esfahani 等^{错误!不能识别的开关参数。}采用价格协调信号与双层 Stackelberg 博弈刻画 VPP 成员选择;Dong 等^{错误!不能识别的开关参数。}基于潜在博弈和演化博弈构建 DER 与 VPP 双向选择策略。此类算法强化了经济激励与聚合稳定性,但对市场规则、主体行为假设和价格响应模型的准确性依赖较强。

为进一步明确不同动态聚合算法的适用边界,表 2 从适用场景、优势和局限三个方面对上述三类算法进行比较。动态分群/成员选择算法侧重大规模异构资源的快速筛选,可行域/等效边界计算算法侧重聚合资源可调能力的统一表达,市场机制或收益驱动算法则侧重多主体参与和多市场协同条件下的聚合机制。

表 2 动态聚合算法的适用场景、优势与局限
Table 2 Applicable scenarios, advantages and limitations of dynamic aggregation algorithms

算法类型	适用场景	优势	局限
动态分群/成员选择算法	大规模、异构、状态快速变化	筛选速度快、降维效果好	依赖分群指标与实时数据
可行域/等效边界计算算法	需统一表征整体调节能力	聚合边界清晰、便于调度调用	高维计算复杂、易弱化个体差异
市场机制或收益驱动算法	多主体参与、多市场交易	增强参与激励、协调主体收益	依赖市场规则与行为假设

2 高比例分布式新能源接入下 VPP 的场景建模技术

多类型储能动态聚合模型构建了 VPP 优化运行的资源组织框架，场景建模则用于描述聚合资源在不同运行条件下的可调能力及其调度边界。但是两者并非彼此独立的，聚合结构决定场景信息的表达重点，场景变化又会影响资源组合及其等效运行特性。采用动态分群/成员选择结构时，需要依据新能源出力、负荷波动和市场价格变化持续筛选储能资源，因此聚合结果较为依赖典型场景的代表性和预测信息的准确性。可行域/等效边界结构更加关注不确定条件下储能的功率、能量和 SOC 约束边界，若场景覆盖不足，其可调能力可能被高估或低估。市场机制或收益驱动结构则需要综合考虑多市场价格、响应意愿和风险偏好，以描述储能资源在不同市场环境下的参与策略。由此可见，场景建模不仅是动态聚合模型的外部输入，也是连接资源特性、运行约束与调度决策的关键环节。

同时在高比例分布式新能源和新型负荷深度接入背景下，VPP 运行状态也呈现出显著的多样性与复杂性，受新能源出力波动、负荷需求随机变化、市场价格及运行约束等多源不确定因素共同影响。传统基于单一工况或静态假设的建模方法已难以准确刻画其真实运行特征。

高比例新能源接入下，新能源功率输出不确定性为影响 VPP 功率平衡和调度决策的主导因素。通过多样化场景，可避免储能优化调度模型过度依赖单一预测结果，提高其对风光波动的适应能力。同时，电动汽车、可调负荷等负荷侧资源的接入，使 VPP 负荷特性由传统的被动、刚性用电模式转向主动、柔性、与随机性并存的模式，其充放电行为、响应区间和参与意愿均具有动态变化特征，对负荷侧运行策略提出了更高要求。

另外，VPP 运行有明显的多时间尺度耦合特征。源荷不确定性在日前、日内及实时尺度统计特性和影响程度不同，多类型储能在不同时间尺度调节能力有差异，使得各调度阶段的运行场景和约束条件

并不一致。

总的来说，在完成多类型储能动态聚合技术分析后，需进一步讨论高比例新能源接入条件下的 VPP 精准场景建模方法，构建更加贴合实际的 VPP 运行模型，并充分考虑不同时间尺度典型运行状态，为后续目标函数、约束条件及协同调度模型设计提供必须的数据支撑与核心决策依据，提升调度策略对复杂运行环境的适应能力、系统响应速度与控制精度，降低全周期运行成本，优化 VPP 整体经济性。目前已有若干场景构建的方法，对此背景下 VPP 进行构建，如图 3 所示。

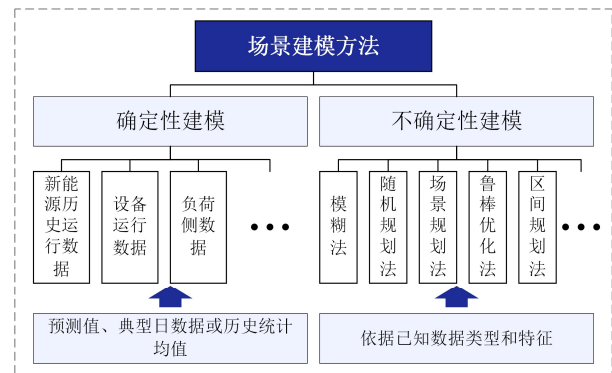


图 3 VPP 场景建模方法

Fig. 3 VPP scenario modeling method

2.1 确定性建模方法

确定性建模方法是指在 VPP 运行场景构建过程中，基于已知或预测确定的参数与变量，对系统运行状态进行描述和分析的一类建模方法。该方法的系统输入通常被视为确定值，一般采用预测值、典型日数据或历史统计均值构建算例进行表征^[54]。该方法计算复杂度较低，但通常依赖精确预测结果或固定假设，其对随机波动和预测误差的刻画能力相对有限，因此适用于预测精度较高或不确定性水平相对可控的场景。

2.2 不确定性建模方法

高比例新能源和新型负荷接入使 VPP 同时面临新能源出力、负荷需求与市场价格等多源不确定性^[55-56]。现有方法可按信息依赖与风险刻画方式归纳为四类：模糊法以隶属度描述样本不足条件下的不确定范围，但参数设定具有一定主观性^[57]；随机规划依据概率分布求解期望意义下的调度方案^[58]，通常结合场景生成与削减控制计算规模^[59]，其中生成对抗网络、变分自编码器及改进 VAEGAN 等深度生成模型可增强场景的非线性与时序特征表达^[60]；鲁棒优化利用不确定集保证最不利情形下的可行性，但可能牺牲经济性^[61]，分布鲁棒优化则通过矩信息或 Wasserstein 距离构造分布模糊集，在样本利用与保守性之间取得折中^[62]；区间规划仅依赖参数上下界，适

用于统计信息不足的可行域与敏感性分析, 但所得区间解的决策指向性相对有限^[63]。

对于多类型储能动态聚合, 不确定性建模方法会直接改变成员选择、聚合可行域和备用容量。动态分群/成员选择需依托随机场景及其概率权重评估不同储能的可用性与响应贡献; 可行域/等效边界聚合需利用鲁棒集、分布模糊集或区间边界修正功率、能量和 SOC 约束, 避免高估聚合调节能力; 备用容量

及跨时段能量分配则应依据风险水平和预测误差动态调整。因而, 数据完备且强调经济性时可采用随机规划与场景方法, 样本有限而安全要求较高时宜采用鲁棒或分布鲁棒方法, 统计信息不足时可采用模糊或区间方法。现有研究仍多聚焦单一不确定因素或局部调度环节^[64], 后续需融合多源场景生成、分布鲁棒边界与滚动修正机制, 使场景变化能够反馈至储能成员更新、聚合边界重构和备用容量配置。

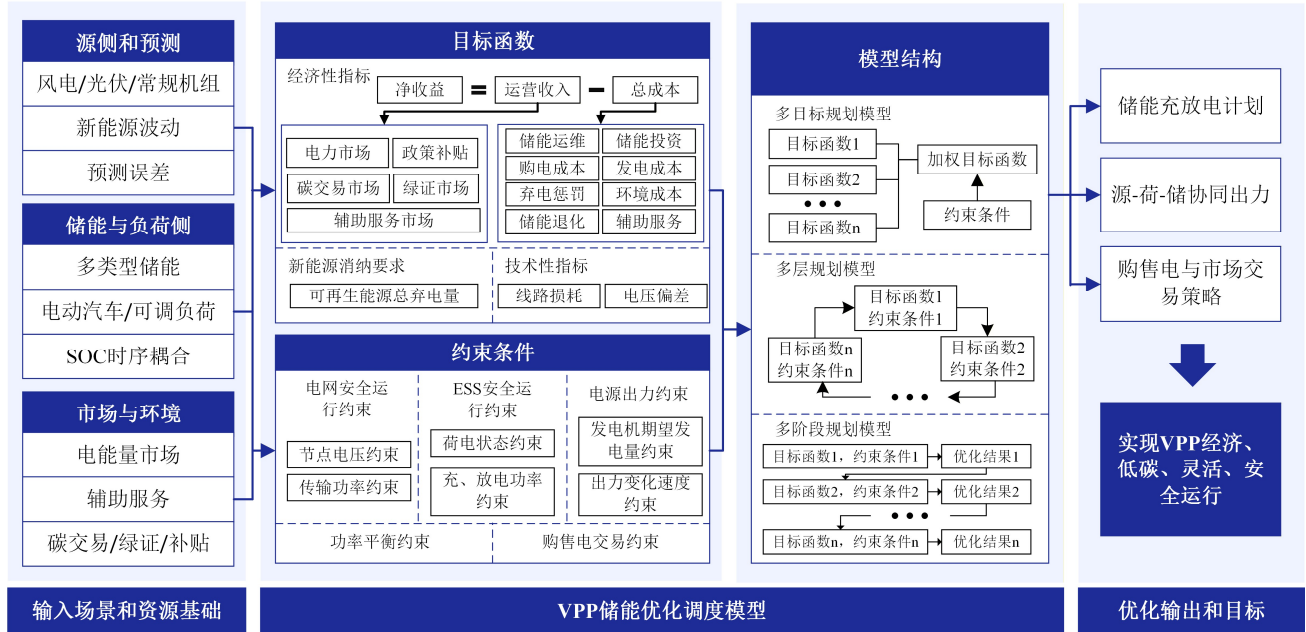


图4 VPP 储能优化调度模型

Fig. 4 Optimization Model of VPP Energy Storage

3 多类型储能支撑 VPP 优化运行技术

VPP 中高比例新能源发电与负荷的不确定性, 致使功率输出与负荷需求出现显著差异。储能技术的核心价值在于, 其能够实现电能“在时间”和“空间”维度的再分配, 从根本上改变电力系统“即发即用”的实时平衡模式。因此, 在构建 VPP 的总体场景模型后, 必须在后续的设计与规划环节中, 专门对各形态储能协同配置、时间结构及 VPP 交易策略进行优化。如图 4 所示, 下文将系统性地从目标函数设定、约束条件构建及整体模型框架三个层面, 对 VPP 中的储能优化调度模型展开详细论述。

3.1 目标函数

构建储能优化调度的目标函数是系统设计中的核心环节, 其本质是将优化的核心目标转化为精确的数学抽象。由于各类储能在成本结构、动态响应特性及技术寿命上差异显著, 因此必须构建一个能涵盖多类型储能的综合评价指标体系。该体系应同步评估其经济成本、促进新能源消纳的贡献以及综合技术性能, 从而为涵盖多类型储能与多样化目标的动态优化协同调度提供决策依据。以下将详述确立

此目标函数时需考虑的关键因素。

3.1.1 经济性指标

VPP 的经济性目标函数一般可表示为最大化 VPP 的净收益, VPP 的净收益为 VPP 的运行收益与其运行成本之差, 具体表达式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \max R = \sum_{t \in T} & \left[(R_{pm,t} - C_{pm,t}) + R_{CO_2,t} + R_{gre,t} \right. \\ & + R_{act,t} + (R_{sup,t} - C_{sup,t}) - (C_{ESS,t} + C_{ESS,inv,t} \\ & \left. + C_{ESS,de,t} + C_{gene,t} + C_{cut,t} + C_{env,t}) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

VPP 的总运营收益来源可分为以下几个部分: 电力市场收益 $R_{pm,t}$ 、碳交易市场收益 $R_{CO_2,t}$ 、绿色证书市场收益 $R_{gre,t}$ 、政策补贴 $R_{act,t}$ 、辅助服务市场收益 $R_{sup,t}$ 。

VPP 的总运行成本来源可分为以下几个部分: ESS 运维成本 $C_{ESS,t}$ 、ESS 的投资成本 $C_{ESS,inv,t}$ 、ESS 退化成本 $C_{ESS,de,t}$ 、电网购电成本 $C_{pm,t}$ 、发电机发电成本 $C_{gene,t}$ ^[72]、可再生能源弃电惩罚成本 $C_{cut,t}$ ^[73]、环境成本 $C_{env,t}$ ^[74-75]、辅助服务成本 $C_{sup,t}$ ^[76]。其中, 储能退化成本能够反映不同类型储能在循环寿命、

放电深度和 SOC 运行区间方面的差异^[38],是多类型储能协同调度中需要重点考虑的成本项。

3.1.2 新能源消纳要求

为进一步利用 ESS 的调节潜力,以使 VPP 中的新能源发电电量满足电网的调度指令,需对弃风弃光电量进行限制。因此 VPP 运营商在参与电网调度运行时,应考虑尽量减少弃风弃光电量,目标函数如下所示^{错误!未找到引用源。}:

$$\begin{cases} \min F = \sum_t \sum_{i \in I} \varepsilon_i (P_{re,i,t}^{pre} - P_{re,i,t}) \\ \varepsilon_i = 0, P_{re,i,t}^{pre} < P_{re,i,t} \\ \varepsilon_i = 1, P_{re,i,t}^{pre} \geq P_{re,i,t} \end{cases} \quad (2)$$

其中, F 为新能源总弃电量; $P_{re,i,t}^{pre}$, $P_{re,i,t}$ 分别为在时间段 t 内风、光发电机 i 的期望发电电量和实际发电电量。

3.1.3 技术性指标

线路损耗和电压偏差并非所有 VPP 优化模型均需显式考虑,其必要性取决于建模边界和调控职责。当 VPP 仅作为市场聚合商、以并网点等值模型参与交易,且内部网络安全由配电网运营商校核时,可将线路损耗等效计入功率平衡或运行成本,无需在 VPP 层面单独优化电压偏差;当 VPP 直接调控分布在配电网不同节点的源-荷-储资源,或承担调压、电能质量和安全运行责任时,则应将线路损耗和电压偏差纳入目标函数或网络安全约束。

1) 线路损耗

$$\min P_{loss} = \sum_{i=1}^l R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (3)$$

其中, P_{loss} 为系统的有功电量损耗; l 为所有的支路数; R_i 为支路 i 的等效电阻; P_i 和 Q_i 分别为注入支路 i 的有功、无功功率; U_i 为支路 i 的末端电压。

2) 电压偏差

$$\min U_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \frac{U_{i,t} - U_{i,t}^*}{\Delta U_{i,t}} \quad (4)$$

其中,在时间段 t 内, U_s 为系统的节点电压偏差量总和; $U_{i,t}$ 为节点 i 的测量电压; $U_{i,t}^*$ 为节点 i 的基准电压; $\Delta U_{i,t}$ 为节点 i 的最大允许偏差电压,即在允许范围内节点电压的最大值与最小值之差。

3.2 约束条件

确定目标函数时,必须同步考虑各类运行与安全约束,前者指引优化方向,后者则直接决定解的可行域。这些约束条件是保证优化结果具备实际可操作性的关键。对于 VPP 储能优化配置模型,其约束

体系主要可归纳为以下五类:功率平衡约束、安全运行约束、ESS 运行约束、电源功率输出约束及市场交易约束。

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i \in I} P_{re,i,t} + \sum_{j \in J} P_{tr,j,t} + P_{buy,t} + P_{ESS,dch,t} = \sum_{k \in K} P_{load,k,t} + P_{sell,t} + P_{ESS,ch,t} + P_{loss,t} \quad (5)$$

其中, $P_{re,i,t}$ 、 $P_{tr,j,t}$ 分别为风、光发电与传统发电的实际并网功率; $P_{ESS,ch,t}$ 、 $P_{ESS,dch,t}$ 分别表示 ESS 充、放电功率; $P_{buy,t}$ 、 $P_{sell,t}$ 表示从电网购售电功率; $P_{load,k,t}$ 为负荷功率; $P_{loss,t}$ 为功率损耗。

2) 安全运行约束

$$\begin{cases} U_{i,t,min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,t,max} \\ |P_i| \leq P_{i,max} \\ |Q_i| \leq Q_{i,max} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $U_{i,t,max}$ 、 $U_{i,t,min}$ 分别为节点 i 的电压幅值上下限; $P_{i,max}$ 、 $Q_{i,max}$ 分别为工程中依据 GB 38755^{错误!未找到引用源。}、GB/T 40427^{错误!未找到引用源。}与 DL/T 5220^{错误!未找到引用源。}确定的线路 i 的有功、无功功率传输极限。

3) ESS 运行约束

ESS 运行约束主要包括储能 SOC 上下限约束、充放电功率约束、充放电互斥约束、SOC 递推约束和 SOC 均衡约束。若多类型储能并联于同一聚合单元或承担共同功率指令,可加入 SOC 均衡约束或偏差惩罚项;若不同储能承担差异化功能,则不宜强制均衡。

$$\begin{cases} E_{ESS,i,t} = E_{ESS,i,t-1} + \left(\eta_{ch} P_{ESS,ch,t} \frac{P_{ESS,dch,t}}{\eta_{dch}} \right) \Delta t \\ 0 \leq P_{ESS,ch,t} \leq C_{ch} P_{ESS,ch,max,t} \\ 0 \leq P_{ESS,dch,t} \leq C_{dch} P_{ESS,dch,max,t} \\ C_{ch} + C_{dch} \leq 1 \\ E_{ESS,min,i,t} \leq E_{ESS,i,t} \leq E_{ESS,max,i,t} \\ E_{ESS,i,t=0} = E_{ESS,in}, E_{ESS,i,t=T} \geq E_{ESS,in} \\ |E_{ESS,i,t} - E_{ESS,j,t}| \leq \Delta E_{ij}^{max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $E_{ESS,i,t}$ 表示 ESS 在调度时段 t 的 SOC; η_{ch} 、 η_{dch} 表示储能的充、放电效率; $P_{ESS,ch,max,t}$ 、 $P_{ESS,dch,max,t}$ 分别表示储能的最大充、放电功率; C_{ch} 、 C_{dch} 为 0-1 变量,分别表示储能的充、放电状态^{错误!未找到引用源。}; $E_{ESS,min,i,t}$ 、 $E_{ESS,max,i,t}$ 分别表示 ESS 的 SOC 上下限^{错误!未找到引用源。}; $E_{ESS,in}$ 表示 ESS 初始 SOC; $E_{ESS,i,t=0}$ 、 $E_{ESS,i,t=T}$ 分别表示 ESS 在调度时段 t 开始和末尾 SOC^{错误!未找到引用源。}; ΔE_{ij}^{max} 表示不同储能间允许的最大 SOC 偏差。

4) 电源实际功率输出约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{re,i,t}^{pre} \leq P_{re,i,max,t}^{pre} \\ P_{tr,i,min,t} \leq P_{tr,i,t} \leq P_{tr,i,max,t} \\ R_{i,min} \leq P_{tr,i,t} - P_{tr,i,t-1} \leq R_{i,max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{re,i,max,t}^{pre}$ 为可再生发电机的期望功率输出上限; $P_{tr,i,max,t}$ 、 $P_{tr,i,min,t}$ 分别为传统发电机功率输出上下限; $R_{i,max}$ 、 $R_{i,min}$ 分别为传统发电机功率输出变化速度上下限。

5)VPP 购售电交易约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{buy,t} \leq P_{power} \\ 0 \leq P_{sell,t} \leq P_{power} \end{cases} \quad (9)$$

其中, P_{power} 为 VPP 与主网功率交换限值。

3.3 模型结构

优化模型结构决定了多类型储能动态协同机制的实现路径、目标之间的权衡机制以及不确定性和时间耦合的刻画方式, 从而对优化结果的物理含义、可行性、算法求解复杂度及真实运行决策过程反映能力产生直接影响。因此, 模型结构的选择需依据实际情况在建模精度、计算复杂度和工程可实施性之间进行综合权衡。

目前国内外学者已经展开了大量研究, 探索兼顾多个因素的 VPP 储能规划方法。文献通过构建两阶段随机模型刻画 VPP 在日前与旋转备用市场中的决策不确定性, 为储能参与多市场联动提供了概率层面的分析基础。在此基础上, 文献进一步将决策过程拓展为三阶段结构, 强化日前、日内市场规划及容量配置之间的逻辑递进关系。然而, 上述研究仍主要立足于电能量与辅助服务市场维度, 对碳约束及绿色价值的刻画相对有限。为弥补这一不足, 学界尝试着将碳交易、绿色证书以及用户侧成本等因素纳入统一框架, 通过多目标优化方法分析经济性与环保

性之间的权衡关系, 拓展了储能规划问题的价值维度。但其多目标协调多依赖加权或静态权衡机制, 对不同目标之间的内在博弈关系与动态演化过程刻画仍显不足。进一步地, 有学者引入双层规划与 Stackelberg 博弈结构, 将 VPP 运营方与参与主体之间的利益互动显式化, 在一定程度上揭示了多主体决策冲突的形成机理, 并通过层级化结构增强了模型对多目标冲突的表达能力。另外, 不同类型的规划模型之间也可相互嵌套, 以增强整体配置方案的优化效果。表 3 进一步从决策变量、目标组合、SOC 时序耦合、多市场收益建模和主要约束条件等方面对近期国内外相关高水平研究进行多层次归纳, 以揭示不同建模思路的适用场景与不足。

总体来看, 高比例分布式能源场景下 VPP 多类型储能优化主要采用多目标、多层和多阶段规划。多目标规划形式简洁, 适于协调经济性、低碳性与技术性目标, 但多依赖固定权重或层级分解, 难以响应电价、碳价、新能源出力偏差及储能 SOC 变化; 多层和多阶段模型能够刻画多主体及日前-日内-实时决策关系, 具有较强的可解释性, 但常将异构储能等效为统一资源, 对寿命退化、响应速度和持续供能能力的差异刻画不足。

表 3 表明, 现有研究分别聚焦储能退化、多市场交易、多目标权衡、风险规避、多主体协同和用户侧聚合, 但同时贯通异构储能特性、跨时间尺度反馈与多市场资源分配的研究仍较少。模型表达与求解机制的不协调进一步限制了动态协同: 离线或滚动优化通常依赖既定场景, 运行状态、市场信号或设备健康状态变化时缺少及时校正。后续应结合状态感知的动态权重、多主体博弈和跨市场耦合约束, 并融合在线优化、强化学习或模型预测控制, 形成随资源状态与外部环境持续反馈的调度机制。

表 3 多类型储能支撑 VPP 优化调度模型文献归纳
Table 3 Summary of optimal scheduling models for VPPs supported by multi-type energy storage

文献	研究对象与场景	主要决策变量	目标函数组合	SOC 时序耦合处理	多市场收益建模	主要约束条件	模型特点与不足
Li 等 ^[38]	多时间尺度调度、储能退化	储能功率、需求响应、机组出力	运行、碳交易与退化成本	SOC 递推、放电深度退化	电力、碳市场	功率平衡、SOC、需求响应、机组出力	兼顾寿命损耗, 复杂度较高
Guo 等 ^[86]	电力-碳-绿证多市场调度	源荷储功率、碳/绿证交易量	收益最大、新能源消纳	SOC 与运行边界	电力、碳、绿证市场	功率平衡、资源出力、多市场交易	多市场耦合, 退化反馈不足
Song 等 ^[87]	电池储能多目标优化	电池容量、充放电功率、运行状态	经济性与技术性协调	SOC 连续性	市场收益简化	容量、功率、SOC、安全运行	多目标清晰, 异构性不足
Vahedipour-Dahraie 等 ^[84]	日前-实时-备用调度	能量投标、备用容量、ESS 功率、需求响应	期望收益、风险控制	SOC 与容量边界	能量、备用市场	投标、备用、ESS、柔性负荷	兼顾收益风险, 退化差异不足

Cao 等 ^[11]	多 VPP 能量-碳交易	交易功率、碳交易量、收益分配	联盟收益、公平分配	未重点考虑	能量、碳市场	协同交易、碳交易、收益分配	多主体协调, 储能机理较弱
Babazadeh 等 ^[65]	电动汽车虚拟储能需求响应	电动汽车功率、用户响应、交互功率	需求响应收益、运行成本	电池 SOC 与充放电行为	需求响应、服务商交互	充放电、用户需求、聚合交互	用户侧聚合, 行为不确定

4 优化模型求解算法

在建立优化调度模型后, 选择何种算法对所建立的模型进行求解, 进而得到储能的具体优化配置参数、运行计划及 VPP 交易策略是又一重要步骤。多类型储能聚合调度的求解对象并非单一设备, 而是同时包含成员选择、聚合功率与能量边界、充放电状态、资源分配和多时间尺度市场决策的耦合模型。

算法求解不仅要形成聚合层调度决策方案, 还需保证方案能够解聚到具体储能设备。

此类模型通常具有混合整数、非线性、非凸、多目标和强时序耦合等特征, 并叠加新能源出力、负荷需求和市场价格的不确定性。因此, 算法选择应围绕聚合规模、模型可分性、在线响应和解聚执行需求, 在求解精度、计算效率、可扩展性与安全性之间权衡, 相关算法可按表 4 分类。

表 4 优化调度求解算法
Table 4 Optimized dispatching solving algorithm

算法类别	典型算法案例	求解精度	收敛性能	计算效率
数学规划类算法	LP、NLP、MILP、MINLP	凸或线性条件下可获全局最优解; 非凸问题需线性化或凸化处理	求解过程稳定; 结果可复现; 模型可解释性强	中小规模问题效率较高; 变量数和时间尺度增加时, 计算量显著上升
结构化算法	Benders 分解、ADMM、列与约束生成法	可保持原问题精度或获得高质量近似解; 精度受分解方式和终止阈值影响	收敛性取决于问题结构与参数设置; 凸问题中通常可稳定收敛	适合大规模、多时序及耦合约束问题; 支持分布式计算和并行求解
智能优化算法	GA、PSO、DE、强化学习算法	全局搜索能力较强; 适合非线性、非凸及多目标问题; 通常获得近似最优解	对参数和初值较敏感; 收敛速度存在波动; 可能陷入局部最优	单次迭代开销较小; 总体迭代次数较多; 大规模问题具有一定并行性
随机与仿真驱动类算法	蒙特卡洛仿真、场景生成与削减、随机采样评估	侧重期望或风险意义下的优化; 通常不保证确定性全局最优	稳定性受场景质量、样本规模及不确定性刻画精度影响	计算负担较重; 场景数增加时耗时明显上升; 通常需与其他算法结合

4.1 数学规划类算法

数学规划类算法适合聚合边界清晰、资源模型可显式表达的集中式调度。线性规划(LP)可处理线性经济调度, 非线性规划(NLP)用于描述储能充放电和新能源波动等非线性过程, 混合整数线性规划(MILP)与混合整数非线性规划(MINLP)可进一步纳入成员选择、设备启停、储能模式切换和市场交易等离散决策。该类算法求解精度和可解释性较高, 但聚合资源、变量和不确定场景增多时计算量迅速上升。

现有研究采用 MILP 联合调度 VPP 中的风电、光伏与 ESS, 通过启停变量和功率约束实现运行成本最小化^[91]; 利用 MINLP 刻画 ESS 非线性充放电过程及退化特性^[92]; 并将数学规划嵌入日前-日内-实时滚动优化, 协调聚合资源的跨时段状态与功率分配^[93]。该类算法适用于中小规模或可集中建模的聚合调度, 大规模实时场景通常需与分解或在线方法结合。

4.2 结构化算法

结构化算法利用聚合模型在资源、区域、主体或时间上的可分性, 将大规模问题分解为可并行求解的子问题, 再通过边界信息协调实现聚合一致性。Benders 分解适合分离容量规划与运行调度, 拉格朗日松弛适合处理跨层耦合约束, 交替方向乘子法(ADMM)适合多主体在保留局部模型和数据的条件下开展分布式协调。

相关研究采用 Benders 分解源荷储协同模型, 分离储能容量规划与实时运行调度^[94]; 利用拉格朗日松弛将下层运行目标转化为上层协调约束^[95]; 基于 ADMM 通过局部子问题并行求解和边界交互, 支持 VPP 集群与区域能源协同^[96]。此类算法能够缓解聚合规模扩张带来的维度问题, 但收敛速度和解质量受分解结构、耦合强度及参数设置影响。

4.3 智能优化算法

智能优化算法不依赖模型的凸性或可微性, 适用于动态成员组合、非线性、多目标和难以精确建模的聚合调度。遗传算法(GA)、差分进化算法(DE)、粒

子群优化算法(PSO)和蚁群算法(ACO)可通过群体搜索获得近似解, 强化学习则可依据聚合状态与市场信号形成在线策略。

现有研究利用多步强化学习提升分布式能源自动发电控制能力^[97]; 采用改进多目标遗传算法, 将储能动态分组与寿命约束纳入功率分配^[98]; 基于 PSO^[99]或 DE^[100]在成本、排放与设备退化之间进行多目标权衡^[101], 并通过改进种群更新或自适应分离提高搜索能力^[102]。这些方法可处理聚合成员选择与功率分配的复杂耦合。

强化学习进一步用于聚合资源的在线调度与多市场决策。Xue 等构建分层安全深度强化学习框架, 在统一可调空间下衔接配电网安全约束、VPP 经济调度和内部设备实时响应^[103]; Feng 等以联邦深度强化学习协调多 VPP 中的电动汽车充放电, 在保护本地数据的同时提升自平衡能力与控制鲁棒性^[104]; Ochoa 等采用多智能体深度强化学习, 综合光伏、ESS 及日前-实时市场信息进行连续竞价决策^[105]。

总体而言, 智能算法增强了聚合调度对非线性、高维耦合和在线决策问题的适应性, 但结果易受参数、随机初值和计算资源影响。强化学习还面临样本效率、训练稳定性、决策可解释性、安全约束嵌入和极端场景可靠性等问题, 宜与数学规划或安全校正机制结合。

4.4 随机与仿真驱动类算法

随机与仿真驱动类算法通过采样和场景分析, 评估聚合资源在新能源出力、负荷需求与市场价格不确定性下的可调能力和运行风险。蒙特卡洛仿真用于生成随机状态, 随机搜索适合复杂非凸空间, 场景生成与削减可在代表性和计算规模之间折中。此类方法更适合作为聚合模型的场景输入和鲁棒性检验工具, 而非单独承担调度求解。

现有研究利用蒙特卡洛仿真对风电、光伏及负荷预测误差进行采样, 评估 ESS 在不同场景下的调节能力与运行风险^[106]; 利用场景生成与削减筛选 VPP 日前调度的典型状态^[107]; 并将随机仿真与鲁棒优化、随机规划或智能优化结合, 提高聚合调度的经济性与可靠性^[108]。其主要瓶颈是场景规模带来的计算负担, 以及大规模实时应用能力不足。

4.5 主流求解算法性能比较

为比较不同算法对多类型储能聚合调度的适用性, 本文从聚合对象、主要优势、主要局限和适用场景四个维度进行定性归纳。比较重点包括成员选择与异构约束处理、大规模分解与多主体协调、不确定性适应及在线响应能力, 结果如表 5 所示。

表 5 面向聚合调度的主流算法比较

Table 5 Comparison of mainstream algorithms for aggregation scheduling					
算法类型	代表性方法	聚合对象	主要优势	主要局限	适用场景
数学规划类算法	LP、NLP、MILP、MINLP	集中式多资源聚合	精度高、约束清晰	规模扩大时计算量高	中小规模聚合、日前调度、容量配置
结构化算法	Benders 分解、拉格朗日松弛、ADMM	多区域、多主体聚合	可分解、可并行	依赖分解结构与参数	大规模分布式聚合、多时间尺度协调
智能优化算法	GA、PSO、DE、ACO、深度强化学习	非凸、多目标、动态聚合	模型依赖低、在线适应性强	最优性与稳定性难保证	成员选择、功率分配、在线决策
随机与仿真驱动类算法	蒙特卡洛仿真、场景树搜索、仿真优化	不确定性聚合场景	风险刻画、鲁棒性检验	场景多、计算负担大	可调能力评估、风险分析、方案验证

由表 5 可见, 数学规划类算法适合边界清晰、规模可控的集中式聚合。结构化算法适合多区域、多主体和分层聚合, 可提升并行性与扩展性。智能优化算法适合非凸、多目标和动态聚合, 侧重成员选择、功率分配及在线决策。随机与仿真驱动类算法侧重不确定性刻画、可调能力评估和鲁棒性检验。实际应用宜采用组合方案: 数学规划保证约束可行性, 结构化算法提升扩展性, 智能算法增强在线适应性, 随机仿真负责风险验证。

5 结论与展望

本文以高比例分布式新能源和新型负荷接入条件下的 VPP 优化运行为对象, 系统梳理了多类型储能的动态聚合与协同调度方法。相关研究首先需要

准确描述异构储能在功率-能量特性、响应速度、SOC 边界和寿命退化方面的差异, 并据此确定成员选择方式与聚合可行域。新能源出力、负荷需求和市场价格的不确定性会进一步改变可调能力与备用需求, 因此场景建模不能脱离聚合过程单独处理。调度模型还需协调经济收益、新能源消纳和技术安全, 并选择与问题规模、模型结构和实时性要求相匹配的求解算法。

现有研究为异构储能的统一调度提供了较完整的方法基础, 但模型精度与计算效率之间的矛盾仍未得到根本解决。采用等效边界可以降低优化维度, 却容易掩盖设备退化、局部运行约束和个体差异; 保留设备级细节虽然能够提高决策可信度, 又会显著增加跨时间尺度优化的计算负担。类似问题也存在于不确定性处理和市场协调中。场景生成与调度决

策之间缺少持续反馈时,成员选择、聚合边界和备用容量可能仍基于已经失效的预测信息;收益分配机制若未反映不同储能的实际贡献,则难以维持资源长期参与。线路损耗和电压偏差是否纳入模型,应由 VPP 的网络调控职责决定,而不能作为所有场景下的固定目标。

未来面向 VPP 优化运行的多类型储能动态聚合协同调度研究仍有若干值得深入探讨的方向:

1) 构建退化感知的多时间尺度动态聚合模型。后续可结合 SOC、循环老化、健康状态、响应速度和持续供能能力,区分功率型、能量型和长时储能的功能定位,实现不同储能在日前、日内和实时调度中的任务匹配与寿命友好运行;

2) 发展面向多重不确定性的混合场景建模方法。可融合深度生成模型、分布鲁棒优化和滚动修正机制,刻画新能源出力、负荷行为和市场价格波动,在降低保守性的同时提升调度方案对极端天气、负荷突变和价格变化的适应能力;

3) 完善多市场联合优化与收益协调机制。可综合考虑电能量、辅助服务、碳交易和绿证交易收益,以及储能退化成本,结合博弈论、动态定价和收益分摊方法,协调经济性、低碳性和安全性目标,提升储能主体持续参与积极性;

4) 推动安全约束强化学习与传统优化融合。可构建离线训练、在线决策与安全校正相衔接的混合求解框架,由强化学习提升实时决策效率,由数学规划、ADMM 或模型预测控制校验功率平衡、SOC 边界和网络安全等硬约束。

综上,未来研究需要统筹推进储能本体精细建模、不确定性场景生成、多市场协同机制与在线智能决策,使多类型储能聚合由简单的容量等效,逐步转向状态可感知、价值可评估且运行安全可控的动态聚合。只有打通资源建模、场景描述、市场决策与算法执行之间的联系,才能充分释放异构储能的协同调节潜力,为 VPP 规模化应用和新型电力系统安全高效运行提供支撑。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见[R].发改能源(2025)357号.北京:国家发展改革委,2025.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding Opinions on Accelerating the Development of Virtual Power Plants [R]. Development and Reform Energy [2025] No.357. Beijing: National Development and Reform Commission, 2025.
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016,31(01):1-13.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.01.002.
YU XIAODAN, XU XIANDONG, CHEN SHUOYI, et al. Overview of Integrated Energy Systems and Energy Internet [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2016,31(01):1-13. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.01.002.
- [3] 刘方,陈祥洲,周江昕,等.考虑数据中心共享储能与计算负荷时空迁移特性的虚拟电厂优化运行方法[J/OL].电网技术,1-17[2026-02-03].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0747.
LIU F, CHEN XZ, ZHOU JX, et al. Optimal operation method of virtual power plant considering the spatiotemporal migration characteristics of shared energy storage and computing load in data centers [J/OL]. Power Grid Technology, 1-17 [2026-02-03]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0747.
- [4] 袁桂丽,王宝源.含电动汽车的虚拟电厂经济性优化调度[J].太阳能学报,2019,40(08):2395-2404.DOI:10.19912/j.0254-0096.2019.08.040.
YUAN GUILI, WANG BAOYUAN. Economic optimization scheduling of virtual power plants including electric vehicles [J]. Journal of Solar Energy, 2019,40(08):2395-2404. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.08.040.
- [5] 吕梦璇,娄素华,刘建琴,等.含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2874-2882+3138.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.171724.
LV MENGXUAN, LOU SUHUA, LIU JIANQIN, et al. Multi-type reserve coordination optimization of virtual power plants with high proportion of wind power [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2018,38(10):2874-2882+3138. DOI: 10.13334/j.0258-8013. pcsee.171724.
- [6] ASMUS P. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future[J]. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.
- [7] 孙惠娟,蒙锦辉,彭春华.风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J].电网技术,2019,43(11): 4040-4051.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2460.
SUN HUIJUAN, MENG JINHUI, PENG CHUNHUA. Coordinated optimization scheduling of wind-solar-hydro-carbon capture multi-regional virtual power plants [J]. Power Grid Technology, 2019,43(11): 4040-4051.DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2460.
- [8] 刘方,徐耀杰,杨秀,等.考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略[J].电网技术,2022,46(02):642-656.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0491.
LIU F, XU YJ, YANG X, et al. Multi-time-scale coordinated operation strategy for virtual power plant clusters considering energy interaction and sharing[J]. Power Grid Technology, 2022, 46(02):642-656. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0491.
- [9] 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.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.202152.
LI JIAMA, AI QIAN, YIN SHUANGRUI. Market Mechanism and International Experience Reference for Virtual Power Plants Participating in Peak and Frequency Regulation Services[J]. China Journal of Electrical Engineering, 2022,42(01):37-56. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.202152.
- [10] GUO H, CHEN Q, XIA Q, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 1898-1910.
- [11] CAO J, YANG D, DEGHANIAN P. Cooperative operation for multiple virtual power plants considering energy-carbon trading: A Nash bargaining model[J]. Energy, 2024, 307:

- 132813.
- [12] CARDOSO G, STADLER M, MASHAYEKH S, et al. The impact of ancillary services in optimal DER investment decisions[J]. *Energy*, 2017, 130: 99-112.
- [13] MALIK F H, HUSSAIN G A, ALSMADI Y M S, et al. Integrating energy storage technologies with renewable energy sources: A pathway toward sustainable power grids[J]. *Sustainability*, 2025, 17(9): 4097.
- [14] ZHOU Y, WU S, DENG Y, et al. Enhancing virtual power plant efficiency: three-stage optimization with energy storage integration[J]. *Energy Informatics*, 2025, 8(1): 23.
- [15] XU Y, LIAO Y, KUANG S, et al. Virtual Power Plant Optimization Process Under the Electricity-Carbon-Certificate Multi-Market: A Case Study in Southern China[J]. *Processes*, 2025, 13(7): 2148.
- [16] The virtual utility: Accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] 王宣元,刘敦楠,刘蓁,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. *电网技术*, 2019,43(09): 3175-3183.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1185.
- WANG XUAN-YUAN, LIU DUN-NAN, LIU ZHEN, et al. Operational Mechanism and Key Technologies of Virtual Power Plants under Ubiquitous Power Internet of Things [J]. *Power Grid Technology*, 2019,43(09):3175-3183. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1185.
- [18] LIU J, HU H, YU S S, et al. Virtual power plant with renewable energy sources and energy storage systems for sustainable power grid-formation, control techniques and demand response[J]. *Energies*, 2023, 16(9): 3705.
- [19] WU K, GU J, MENG L, et al. An explainable framework for load forecasting of a regional integrated energy system based on coupled features and multi-task learning[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(2): 1-14.
- [20] 朱继忠,熊小伏,刘乔波,等.现货市场下计及风光联合预测误差的经济调度[J]. *太阳能学报*, 2021,42(05): 450-458.DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0592.
- ZHU JIZHONG, XIONG XIAOFU, LIU QIAOBO, et al. Economic dispatching considering the joint forecasting error of wind and solar power in the spot market [J]. *Journal of Solar Energy*, 2021,42(05):450-458. DOI: 10.19912/j.0254-0096. tynxb.2018-0592.
- [21] 田晶京,李安乐,高锋阳,等.含光伏发电和时变负荷的主动配电网孤岛划分[J]. *太阳能学报*, 2021,42(09): 125-131.DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-0985.
- TIAN JINGJING, LI ANLE, GAO FENGYANG, et al. Islanding division of active distribution networks with photovoltaic power generation and time-varying loads [J]. *Journal of Solar Energy*, 2021,42(09):125-131. DOI: 10.19912/ j.0254-0096.tynxb.2019-0985.
- [22] 杨宏基,周明,武昭原,等.含光热电站的电-热能源系统优化运行机制[J]. *电网技术*, 2022,46(01):175-185. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0825.
- YANG HONGJI, ZHOU MING, WU ZHAOYUAN, et al. Optimization mechanism of the electric-thermal energy system in the Hanguang thermal power station [J]. *Power Grid Technology*, 2022,46(01):175-185. DOI: 10.13335/ j.1000-3673.pst.2021.0825.
- [23] ALIPOUR M, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K. Stochastic scheduling of renewable and CHP-based microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(5): 1049-1058.
- [24] 魏繁荣,随权,林湘宁,等.考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018,38(04):1045-1053+1281.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.162499.
- WEI FANRONG, SUI QUAN, LIN XIANGNING, et al. Optimization strategy for daily operation energy control of wind/solar/coal/accumulation island microgrids considering transferable load efficiency [J]. *China Journal of Electrical Engineering*, 2018,38(04):1045-1053+1281. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162499.
- [25] 杨裕生.发展化学储能有助于解决弃风、弃光难题[J]. *电力设备管理*, 2020,(03):23-24.
- YANG YUSHENG. Developing chemical energy storage to address wind and solar curtailment [J]. *Power Equipment Management*, 2020, (03):23-24.
- [26] 张国斌,陈玥,张佳辉,等.风-光-水-火-抽蓄联合发电系统日前优化调度研究[J]. *太阳能学报*, 2020,41(08): 79-85.DOI:10.19912/j.0254-0096.2020.08.011.
- ZHANG GUOBIN, CHEN YUE, ZHANG JIAHUI, et al. Research on day-ahead optimization scheduling of wind-solar-hydro-thermal-pumped storage combined power generation system [J]. *Journal of Solar Energy*, 2020, 41(08):79-85.DOI:10.19912/j.0254-0096.2020.08.011.
- [27] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的氢能源系统[J]. *电力系统自动化*, 2020,44(23):1-10.
- PAN GUANGSHENG, GU WEI, ZHANG HUIYAN, et al. A power-hydrogen energy system for high renewable energy consumption [J]. *Power System Automation*, 2020,44(23):1-10.
- [28] LIU Z, WU Q, HUANG S, et al. Optimal day-ahead charging scheduling of electric vehicles through an aggregative game model[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(5): 5173-5184.
- [29] 赵海彭,苗世洪,李超,等.考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(02):573-589.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.201942.
- ZHAO HAIPENG, MIAO SHIHONG, LI CHAO, et al. Research on the Optimization Operation Strategy of Integrated Energy Systems in Industrial Parks Considering the Coupled Response Characteristics of Cold, Heat, and Power Demand [J]. *China Journal of Electrical Engineering*, 2022,42(02):573-589. DOI: 10.13334/j.0258-8013. pcsee. 201942.
- [30] DONG Z, ZHANG Z, HUANG M, et al. Research on day-ahead optimal dispatching of virtual power plants considering the coordinated operation of diverse flexible loads and new energy[J]. *Energy*, 2024, 297: 131235.
- [31] 谢石骁,杨莉,李丽娜.基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. *电网技术*, 2012,36(05):79-84.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2012.05.036.
- XIE SHIXIAO, YANG LI, LI LINA. Optimal configuration method for hybrid energy storage based on opportunity constrained programming [J]. *Power Grid Technology*, 2012,36(05):79-84. DOI: 10.13335/j.1000- 3673.pst.2012.0 5.036.
- [32] 刘海涛,许伦,郝思鹏,等.基于配电网分区的分布式混合储能优化方法[J]. *电力自动化设备*, 2020,40(05):137-145. DOI:10.16081/j.epae.202004009.
- LIU HAITAO, XU LUN, HAO SIPENG, et al. Optimization method for distributed hybrid energy storage based on distribution network zoning [J]. *Power Automation Equipment*, 2020,40(05):137-145. DOI: 10.16081/j.epae.202004009.
- [33] CAVAZZINI G, BENATO A, PAVESI G, et al. Techno-economic benefits deriving from optimal scheduling of a Virtual Power Plant: Pumped hydro combined with wind farms[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 37: 102461.

- [34] HOU H, CHEN Y, LIU P, et al. Multisource energy storage system optimal dispatch among electricity hydrogen and heat networks from the energy storage operator prospect[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58(2): 2825-2835.
- [35] PULAZZA G, ZHANG N, KANG C Q, et al. Transmission planning with battery-based energy storage transportation for power systems with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 4928-4940.
- [36] ZHANG R, HREDZAK B, FLETCHER J. Dynamic aggregation of energy storage systems into virtual power plants using distributed real-time clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(11): 11002-11013.
- [37] MOGHADAM M, GHAFARZADEH N, TAHMASEBI M, et al. Virtual power plant management with hybrid energy storage system[J]. Unconventional Resources, 2025, 5: 100107.
- [38] LI Q, ZHOU Y, WEI F, et al. Multi-time scale scheduling for virtual power plants: Integrating the flexibility of power generation and multi-user loads while considering the capacity degradation of energy storage systems[J]. Applied Energy, 2024, 362: 122980.
- [39] GE X, WANG G, WANG F. Optimal day-ahead dispatching strategy for VPP using dynamic grouping DER aggregation method based on improved virtual battery model[J]. Energy, 2025, 326: 136166.
- [40] ZHANG R, HREDZAK B. Distributed dynamic clustering algorithm for formation of heterogeneous virtual power plants based on power requirements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12(1): 192-204.
- [41] DING Z, LI Y, ZHANG K, et al. Two-stage dynamic aggregation involving flexible resource composition and coordination based on submodular optimization[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122829.
- [42] ZHAO H, WANG B, WANG X, et al. Active dynamic aggregation model for distributed integrated energy system as virtual power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 831-840.
- [43] LIU X, LI Y, WANG L, et al. Dynamic aggregation strategy for a virtual power plant to improve flexible regulation ability[J]. Energy, 2024, 297: 131261.
- [44] MENG H, JIA H, XU T, et al. Internal pricing driven dynamic aggregation of virtual power plant with energy storage systems[J]. Energy, 2025, 321: 135470.
- [45] TENG X, ZHENG T, CAO J, et al. Dynamic Aggregation of Multiple Flexible Resources in Virtual Power Plants to Meet Diverse Frequency Control Requirements[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2025, 19(1): e70063.
- [46] ZHAO J, SONGHUAI D, DONG M, et al. A novel aggregation method for virtual power plant based on virtual contribution theory and community detection algorithm[J]. Energy Reports, 2025, 13: 3265-3278.
- [47] DU Y, GUO L, YANG X, et al. A Virtual Power Plant Construction Method Considering Dynamic Aggregation of Discrete Distributed Resources[C]//2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). IEEE, 2022: 2295-2300.
- [48] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1205-1214.
- [49] WANG S, WU W. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [50] CHEN L, TANG Z, HE S, et al. Feasible operation region estimation of virtual power plant considering heterogeneity and uncertainty of distributed energy resources[J]. Applied Energy, 2024, 362: 123000.
- [51] LU X, QIU J, ZHANG C, et al. Assembly and competition for virtual power plants with multiple ESPs through a “recruitment - participation” approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(2): 4382-4396.
- [52] ESFAHANI M, ALIZADEH A, CAO B, et al. Virtual power plant formation strategy based on Stackelberg game: A three-step data-driven voltage regulation coordination scheme[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124355.
- [53] DONG M, SU J, CAO Q, et al. Dynamic aggregation strategy for two-way selection between distributed energy resources and virtual power plants based on evolutionary game[J]. Energy, 2026: 141046.
- [54] 刘光宇, 韩东升, 刘超杰, 等. 考虑双重需求响应及阶梯型碳交易的综合能源系统双时间尺度优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(05): 218-225. DOI: 10.16081/j.epae.202210008.
- LIU GUANGYU, HAN DONGSHENG, LIU CHAOJIE, et al. Dual-time-scale optimization scheduling of integrated energy systems considering dual demand response and tiered carbon trading [J]. Power Automation Equipment, 2023, 43(05): 218-225. DOI: 10.16081/j.epae.202210008.
- [55] 白雪岩, 樊艳芳, 王天生, 等. 计及可再生能源可靠性的虚拟电厂动态聚合方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 102-110.
- BAI XUEYAN, FAN YANFANG, WANG TIANSHENG, et al. Dynamic aggregation method for virtual power plants considering renewable energy reliability [J]. Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 102-110.
- [56] 赵冬梅, 殷加玖. 考虑源荷双侧不确定性的模糊随机机会约束优先目标规划调度模型 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(05): 1076-1085. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170087.
- ZHAO DONGMEI, YIN JIAFU. A fuzzy stochastic opportunity-constrained priority goal programming model considering bilateral uncertainty of source and load [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2018, 33(05): 1076-1085. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170087.
- [57] ZHOU Y, ZHAI Q, XU Z, et al. Multi-stage adaptive stochastic-robust scheduling method with affine decision policies for hydrogen-based multi-energy microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(3): 2738-2750.
- [58] XIAO D, LIN Z, CHEN H, et al. Windfall profit-aware stochastic scheduling strategy for industrial virtual power plant with integrated risk-seeking/averse preferences[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122460.
- [59] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 2676-2687.
- [60] FENG J, RAN L, WANG Z, et al. Optimal energy scheduling of virtual power plant integrating electric vehicles and energy storage systems under uncertainty[J]. Energy, 2024, 309: 132988.
- [61] WANG S, YUAN S. Interval optimization for integrated electrical and natural-gas systems with power to gas considering uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105906.
- [62] LI Z L, PENG X G, CUI W B, et al. A novel scenario generation method of renewable energy using improved

- VAEGAN with controllable interpretable features[J]. *Applied Energy*, 2024, 363: 122905.
- [63] 李东东,王啸林,沈运帷,等.考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J].*电力自动化设备*,2023,43(05):210-217+251.DOI:10.16081/j.epae.202303024.
- LI D, WANG X, SHEN Y, et al. Optimal dispatch strategy for virtual power plants considering multiple uncertainties with demand response and electricity-carbon trading [J]. *Power Automation Equipment*, 2023,43(05):210-217+251. DOI: 10.16081/j. epae.202303024.
- [64] ZHANG X, CHEN Z, MA Z, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. *Power Syst. Technol.*, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [65] CAO J, YANG D, DEHGHANIAN P. Cooperative operation for multiple virtual power plants considering energy-carbon trading: A Nash bargaining model[J]. *Energy*, 2024, 307: 132813.
- [66] ZHANG Y, WU Q, REN H, et al. Optimal operation of multi-microgrid systems considering multi-level energy-certificate-carbon coupling trading[J]. *Renewable Energy*, 2024, 227: 120505.
- [67] 张宁,杨凌霄,李炫浓,等.基于分层深度强化学习的多能虚拟电厂区域消纳优化策略[J].*电力系统保护与控制*,2025,53(20):153-163.DOI:10.19783/j.cnki.pspc.241453.
- ZHANG NING, YANG LINGXIAO, LI XUANNONG, et al. Regional consumption optimization strategy for multi-energy virtual power plants based on hierarchical deep reinforcement learning [J]. *Power System Protection and Control*, 2025,53(20):153-163. DOI: 10.19783/j.cnki. pspc.241453.
- [68] WANG C, WANG H, JI X, et al. Hybrid energy storage capacity configuration strategy for virtual power plants based on variable-ratio natural gas-hydrogen blending[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 58: 433-445.
- [69] ZHONG J, HE L, LI C, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation[J]. *Applied Energy*, 2014, 123(15): 253-262.
- [70] 周任军,孙洪,唐夏菲,等.双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J].*中国电机工程学报*,2018,38(6): 1675-1683.
- ZHOU RENJUN, SUN HONG, TANG XIAFEI, et al. Low-carbon economic dispatch of wind power - carbon capture virtual power plants under dual carbon constraints [J]. *China Journal of Electrical Engineering*, 2018,38(6): 1675-1683.
- [71] LI S, GONG W, HU C, et al. Adaptive constraint differential evolution for optimal power flow[J]. *Energy*, 2021, 235: 121362.
- [72] 王佳惠,牛玉广,陈玥,等.计及火电深度调峰的高比例可再生能源电力系统日前优化调度研究[J].*太阳能学报*,2023,44(01):493-499.DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0868.
- WANG J, NIU Y, CHEN Y, et al. Research on Day-ahead Optimization Scheduling for High-Proportion Renewable Energy Power Systems Incorporating Deep Peak Shaving in Thermal Power Plants [J]. *Journal of Solar Energy*, 2023,44(01):493 - 499. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0868.
- [73] 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. Integrated energy coordination and dispatching optimization model for multi-regional virtual power plants [J]. *China Journal of Electrical Engineering*, 2017,37(23): 6780-6790.
- [74] 张忠,刘玥,石智豪.储能的竞价策略及电力市场出清方法研究[J].*电网技术*,2023,47(11):4555-4563.
- ZHANG Z, LIU Y, SHI Z. Research on Bidding Strategies for Energy Storage and Electricity Market Clearing Methods [J]. *Grid Technology*, 2023,47(11):4555-4563.
- [75] 闫涛,渠展展,惠东,等.含规模化电池储能系统的商业型虚拟电厂经济性分析[J].*电力系统自动化*,2014, 38(17):98-104.
- YAN TAO, QU ZHANZHAN, HUI DONG, et al. Economic Analysis of Commercial Virtual Power Plants with Large-Scale Battery Energy Storage Systems [J]. *Power System Automation*, 2014,38(17):98-104.
- [76] LU K, TANG K, DONG S, et al. Generalized-Nash-Equilibrium-Based Pareto Solution for Transmission-Distribution-Coupled Optimal Power Flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 39(2): 4051-4063.
- [77] 贾东梨,任昭颖,刘科研,等.协调分布式发电商与负荷用户利益的综合能源站的优化运行[J].*中国电力*,2025,58(12):128-136.
- JIA D, REN Z, LIU K, et al. Optimization of integrated energy stations coordinating the interests between distributed generation operators and load users [J]. *China Electric Power*, 2025,58(12):128-136.
- [78] 国家能源局.电力系统安全稳定导则:GB 38755-2019[S]. 中国标准出版社,2019.
- National Energy Administration. Guidelines for Power System Safety and Stability: GB 38755-2019[S]. China Standards Press, 2019.
- [79] 全国电网运行与控制标准化技术委员会(SAC/TC 446). 电力系统电压和无功电力技术导则:GB/T 40427-2021[S]. 中国标准出版社,2021.
- National Technical Committee for Standardization of Power Grid Operation and Control (SAC/TC 446). Technical Guidelines for Voltage and Reactive Power in Power Systems: GB/T 40427-2021[S]. China Standards Press, 2021.
- [80] 中华人民共和国住房和城乡建设部.110kV~750kV 架空输电线路设计规范:GB 50545-2010[S]. 中国计划出版社,2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Code for 110 kV to 750 kV Overhead Transmission Lines: GB 50545-2010[S]. China Planning Press, 2010.
- [81] WEI X, LIU J, XU Y, et al. Virtual power plants peer-to-peer energy trading in unbalanced distribution networks: A distributed robust approach against communication failures[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 15(2): 2017-2029.
- [82] JIANG T, WU C, HUANG T, et al. Optimal market participation of VPPs in TSO-DSO coordinated energy and flexibility markets[J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122730.
- [83] 丁涛,黄雨涵,张洪基,等.基于等微增率并计及机组功率约束的火电机组最优负荷分配精确解[J].*中国电机工程学报*,2024,44(04):1446-1460.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222537.
- DING TAO, HUANG YUHAN, ZHANG HONGJI, et al. An exact solution for optimal load distribution of thermal power units based on equal incremental rates and considering unit power constraints [J]. *China Journal of Electrical Engineering*, 2024,44(04):1446-1460. DOI:

- 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222537.
- [84] VAHEDIPOUR-DAHRAIE M, RASHIDIZADEH-KERMANI H, SHAFIE-KHAH M, et al. Risk-averse optimal energy and reserve scheduling for virtual power plants incorporating demand response programs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 1405-1415.
- [85] BABAZADEH V, SHAYEGHI H, JALILI-IRANI A, et al. Optimal demand response in virtual power plant using local/global service providers in interaction with energy storage systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 496: 145058.
- [86] GUO X, WANG L, REN D. Optimal scheduling model for virtual power plant combining carbon trading and green certificate trading[J]. *Energy*, 2025, 318: 134750.
- [87] SONG H, GU M, LIU C, et al. Multi-objective battery energy storage optimization for virtual power plant applications[J]. *Applied Energy*, 2023, 352: 121860.
- [88] 匡熠,王秀丽,王建学,等.基于 stackelberg 博弈的虚拟电厂能源共享机制[J]. *电网技术*, 2020,44(12):4556-4564.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0683. KUANG YI, WANG XIULI, WANG JIANXUE, et al. Energy sharing mechanism of virtual power plants based on Stackelberg game[J]. *Power Grid Technology*, 2020,44(12):4556-4564. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0683.
- [89] SHAFIEKHANI M, BADRI A, SHAFIE-KHAH M, et al. Strategic bidding of virtual power plant in energy markets: A bi-level multi-objective approach[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 113: 208-219.
- [90] 张晋铭,欧阳森,吴晗,等.计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2024,44(7):62-68. ZHANG JINMING, OUYANG SEN, WU HAN, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering distribution network reliability and operational economy [J]. *Power Automation Equipment*, 2024,44(7): 62-68.
- [91] YOON S J, RYU K S, KIM C, et al. Optimal bidding scheduling of virtual power plants using a dual-milp (mixed-integer linear programming) approach under a real-time energy market[J]. *Energies*, 2024, 17(15): 3773.
- [92] SAMAKOOSH H M, JAFARI-NOKANDI M, SHEIKHOLESLAMI A. Coordinated resource scheduling in a large scale virtual power plant considering demand response and energy storages[J]. *J. Oper. Autom. Power Eng*, 2018, 6(1): 50-60.
- [93] CONTE F, MASSUCCO S, SCHIAPPARELLI G P, et al. Day-ahead and intra-day planning of integrated BESS-PV systems providing frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 11(3): 1797-1806.
- [94] VAN DINTER J, REBENNACK S, KALLRATH J, et al. The unit commitment model with concave emissions costs: a hybrid benders' decomposition with nonconvex master problems[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 210(1): 361-386.
- [95] 杨娜,马龙腾,刘浩睿,等.考虑条件风险价值的含 EV 虚拟电厂主从博弈优化调度[J]. *综合智慧能源*, 2025,47(09): 80-88. YANG N, MA L, LIU HR, et al. Optimal scheduling of virtual power plants with EVs in master-slave game considering conditional risk value [J]. *Comprehensive Smart Energy*, 2025,47(09):80-88.
- [96] CHEN G, LI J. A fully distributed ADMM-based dispatch approach for virtual power plant problems[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 58: 300-312.
- [97] ZHAO W, ZENG T, LIU Z, et al. Automatic generation control in a distributed power grid based on multi-step reinforcement learning[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(4): 39-50.
- [98] 梁绥东.面向虚拟电厂的储能运行优化与可调节资源协同调度研究[J]. *电网与清洁能源*, 2025,41(09):27-36.DOI: 10.26963/j.psce.2025.09004. LIANG SUIDONG. Research on Energy Storage Operation Optimization and Regulated Resources Coordinated Scheduling for Virtual Power Plants [J]. *Power Grid and Clean Energy*, 2025,41(09):27-36. DOI: 10.26963/j.psce.2025.09004.
- [99] LAMARI M, AMRANE Y, BOUDOUR M, et al. Multi - objective economic/emission optimal energy management system for scheduling micro - grid integrated virtual power plant[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(8): 3057-3074.
- [100] BORISOOT K, LIEMTHONG R, SRITHAPON C, et al. Optimal energy management for virtual power plant considering operation and degradation costs of energy storage system and generators[J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2862.
- [101] 刘雨佳,樊艳芳.计及 5G 基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022,34(01):8-15.DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000809. LIU YUJIA, FAN YANFANG. Optimization strategy for virtual power plant dispatching considering 5G base station energy storage and technical energy-saving measures [J]. *Journal of Electric Power System and Automation*, 2022,34(01):8-15. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000809.
- [102] 闫群民,董新洲,穆佳豪,等.基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2022,50(10):11-19. YAN QUNMIN, DONG XINZHOU, MU JIAHAO, et al. Optimization of Energy Storage Configuration in Active Distribution Networks Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization [J]. *Power System Protection and Control*, 2022,50(10):11-19.
- [103] XUE L, ZHANG Y, WANG J, et al. Privacy-preserving multi-level co-regulation of VPPs via hierarchical safe deep reinforcement learning[J]. *Applied Energy*, 2024, 371: 123654.
- [104] FENG B, LIU Z, HUANG G, et al. Robust federated deep reinforcement learning for optimal control in multiple virtual power plants with electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2023, 349: 121615.
- [105] OCHOA T, GIL E, ANGULO A, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for efficient multi-timescale bidding of a hybrid power plant in day-ahead and real-time markets[J]. *Applied Energy*, 2022, 317: 119067.
- [106] FALABRETTI D, GULOTTA F, SIFACE D. Scheduling and operation of RES-based virtual power plants with e-mobility: A novel integrated stochastic model[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 144: 108604.
- [107] WENSI C, SHUO W, CHAO M, et al. Research on Optimal Scheduling of VPP Based on Latin Hypercube Sampling and K-Means Clustering[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 848805.
- [108] HARSH P, SUN H, DAS D, et al. Stochastic Incentive-based Demand Response Program for Virtual Power Plant with Distributed Energy Resources[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025.