第49卷 第20期 2025年10月25日
DOI：10.7500/AEPS20250425003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 20 Oct. 25，2025

基于分层聚合的虚拟电厂互动调节能力多维量化评估

孔祥玉[1]，张培榕[1]，刘高华[1]，张曦元[2]，高洪超[3]，庄　重[4]
（1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室（天津大学），天津市 300072；
2. 国网天津市电力公司培训中心，天津市 300170；
3. 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；
4. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心，江苏省南京市 210019）

摘要：虚拟电厂互动调节能力量化评估是衡量其在不同时空条件下的调节性能和优化运行的重要依据。为精细化评估虚拟电厂调节能力，提出一种基于分层聚合的虚拟电厂互动调节能力多维量化评估方法。首先，针对不同时间尺度的市场交易决策需求，采用数据驱动方法，通过基于k-means算法提取用户典型曲线，获取单一灵活资源调节能力量化评估模型，并进行基于激励价格的灵活资源可实现潜力修正。其次，考虑调节容量、爬坡率、响应时间和响应成本等因素，建立虚拟电厂多类型资源聚合互动调节能力量化评估模型，并结合粒子群优化算法和综合隶属度法进行多目标求解。最后，通过仿真算例，表明所提方法能够精准量化虚拟电厂参与辅助服务的潜力边界，为运营商制定最优策略、最大化其服务价值提供决策依据。

关键词：虚拟电厂；分布式能源；调节能力；多维量化评估；资源聚合；辅助服务；多目标优化；激励价格

0　引言

在当前全球能源结构转型和电力系统智能化的背景下，虚拟电厂（virtual power plant，VPP）作为连接分布式电源、可调节负荷、储能等各类分布式能源（distributed energy resources，DER）的关键枢纽和连接清洁能源与智能控制技术的新兴业务模式，正逐渐成为电力行业和学术研究的热点。VPP通过高效整合各类DER，可在用电高峰时调整电力消耗或向电网供电，为电力系统的稳定性和可靠性提供了强有力的支持[1]。

VPP互动调节能力是指在不同运行条件下，协调各类DER以响应电网需求变化，同时考虑自身经济性与多资源协调约束，与电网进行动态、双向功率交换的能力，涉及削峰填谷、调频、备用等服务[2]。分布式灵活资源聚合后参与的市场机制和业务类型多样，资源运营主体主观随机性强，导致资源具有不同的调节特性和响应能力，有效聚合和协同优化多类型资源难度大，量化表征和评估各类资源的聚合互动调节能力面临一定挑战[3]。

针对VPP聚合互动调节能力的量化评估已有较多研究，涉及不同类型DER响应能力评估、VPP整体响应能力评估、调节灵活性提升技术等[4]。文献[5]提出VPP灵活性及调节能力分类方法。文献[6]建立了VPP灵活资源统一储能形式的数学模型，并计算了高精度集群灵活性外部模型。文献[7]提出了聚合电动汽车的协调评估方法，但尚未解析用户行为的随机性对调节潜力的影响。文献[8]构建了一种包含虚拟发电机和虚拟电池的VPP模型，并提出基于高维多面体的束缚收缩方法，以求解整个可行域。文献[9]将DER聚合到VPP中，作为单一实体参与批发市场，但缺乏对整体调节能力的系统性指标设计。上述研究推动了DER独立建模与算法优化，但存在以下局限：1）评估维度单一：现有指标多聚焦于单一资源类型或静态场景，缺乏对多资源聚合下“时间-容量-可持续性”的协同量化框架；2）数据-机理分离：传统方法依赖于价格弹性或人为比例设定，未结合数据驱动技术解析用户行为不确定性，导致调节潜力评估精度不足。

在可调能力评估的经济性研究方面，现有研究主要集中在以最低运营成本或最高利润为目标的最优调度。文献[10]基于电、氢、热能转换和储能的混

收稿日期：2025-04-25；修回日期：2025-08-05。
上网日期：2025-08-20。
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）。

合储能模型，提出了一种微电网自主运行策略。文献[11]建立了同时满足电力和热负荷的VPP调度模型，以实现参与者利润的最大化。文献[12-13]基于电-热-天然气管网建立经济调度模型。文献[14]对数据中心的能源生产和能耗进行了优化，并研究了其可调节容量的潜力。上述研究大多将经济目标与调节能力评估分离，未建立经济约束下的调节能力评估框架，市场适应性不足。

在已有研究基础上，本文提出面向VPP资源的聚合互动调节能力量化评估方法，实现多类型资源在不同响应场景下调节能力的统一建模、多维度指标动态评估，为VPP运营提供决策支持。主要创新性工作体现在以下方面：

1)针对单一维度评估指标的局限性，基于多主体协同业务架构，给出VPP聚合DER参与电网互动的调节能力评估业务流程，并形成适于多场景响应特性刻画的VPP调节能力评估指标；

2)针对价格弹性法的主观性缺陷，基于*k*-means算法聚类，并结合成本和峰谷差最小的多目标模型，提出数据-机理驱动的单类型可调资源潜力评估方法，实现资源调节潜力的动态标定；

3)针对DER时序配合参与调节过程的不确定性，构建考虑多目标的VPP互动调节能力评估模型，采用改进粒子群算法，生成VPP聚合响应能力评分，平衡经济性与灵活性需求。

1　VPP参与互动的分层聚合评估框架

1.1　VPP的分层聚合模式

为实现对VPP互动调节能力的精细化评估，本文提出一种自下而上的分层聚合评估框架。该框架遵循VPP内资源的物理和管理层级，分为用户层、资源聚合层和VPP层。

1)用户层：VPP内最基础、最分散的DER。本层级的目标是精准刻画单个DER的运行特性和理论调节潜力。

2)资源聚合层：将多个同类型的用户聚合为一个单一灵活资源簇，例如电动汽车集群等。其目标是考虑聚合体内部的协同效应和经济性约束，评估其作为一个整体的可实现调节潜力。

3)VPP层：将多个不同类型的资源进行聚合，形成VPP的整体调节能力。本层级的目标是评估VPP在应对不同市场需求时，其总体的调节容量、爬坡率、响应时间等综合互动调节能力。

本文的后续章节将遵循此分层评估框架展开论述。第2章将聚焦于用户层和资源聚合层的潜力分析，第3章则在此基础上，对VPP整体的互动调节能力进行多维量化评估。

1.2　灵活资源聚合互动调节能力分析流程

VPP作为独立运作的虚拟实体形式参与电力系统运行，实现多元能源互补、灵活资源互动，同时，向电网提供调峰、调频和备用等辅助服务[15]，其调节能力是参与电网互动的关键。不同的业务场景对参与主体的调节能力需求有所不同，多时间尺度聚合互动调节能力影响其参与市场调节服务的质量和数量、市场竞争力和电网支撑效能。VPP参与不同场景业务的需求如附录A表A1所示。

按照山西省《虚拟电厂建设与运营管理实施方案》文件要求[16]，针对电网侧不同调节时段和不同需求容量，VPP需合理聚合资源并上报整体的响应时长、响应容量、响应速率等参数。在日前市场中，VPP需逐时提交其可用的上行和下行调节能力，并确保在任何指定备用时间段内的调节功率遵循上报的容量限制，同时还提供爬坡率和响应时间等参数信息作为电网运营调度数据。

1)资源接入。在流程的开始端定义评估的目标和要求，向VPP控制中心对接，完成资源注册、特征指标集确认等启动评估流程的基础任务。

2)资源调节信息上报。在此过程中，在本地计算每个DER特性信息并定期更新。对于给定的时刻，一个DER的调节能力可以用一个信息表$[T_S, P_x](x=\mathrm{up},\mathrm{down})$来表示，其中，$T_S$为调节时长集合，$P_x$为调节容量、响应时间、爬坡率和调节成本等信息集合。该信息表表示某一资源在不同调节响应持续时间长度下对应的调节能力的集合。可将DER调节特性模型集成到资源设备的智能监控系统中，即插即用地无缝接入VPP网络。

3)聚合调节能力计算。VPP控制中心定期接收到单个资源的信息表，并按照调节持续时间将这些信息汇总、组合、排序，形成资源群体信息表。根据群体信息表评估计算聚合特性，并将信息上报至调度中心，用于决策支持。

1.3　VPP互动调节能力评估指标

VPP互动调节能力依赖于其内部灵活资源，是基于DER的调节潜力综合得出的最大聚合调节功率估计值。在忽略网络约束和内部损耗情况下，若只考虑同时发生的功率调节(即时域纵向叠加)，VPP的功率调节能力可以简化为DER在特定时刻的功率调节能力总和。调节容量和调节成本的非线性关系经深度学习可以表征为调节容量-成本曲线，但是难以追溯单个DER的调节容量-成本曲线，且VPP受到网络条件、资源的实时状态和市场运作机

制等因素制约，需要考虑资源之间的协同效应以及不同时间段内的配合调节策略。通常以调节容量-爬坡率-响应/持续时间-成本联合表示VPP资源聚合调节能力。

VPP可按照系统指令提供向上、向下的功率调节，即增加或减少与电网的交互功率[17]。分布式可调资源与VPP调节能力评估指标如附录A图A1所示。VPP聚合响应能力根据输出功率的变化量曲线确定，定义输出功率变化量为$\Delta \boldsymbol{P}=[\Delta P(t_1),\Delta P(t_2),\cdots,\Delta P(t_{T_e})]$，其中，$T_e$为最后一个调节时刻。$\Delta \boldsymbol{P}$表示调节前后输出功率之差，描述了VPP在多时段内的动态响应行为。本文所建立的多维评价指标体系均是对此核心向量的关键特征提取，包括以下几个方面：

1）调节方向A：该指标用于判断VPP功率调节的方向。当VPP向系统输送功率或减少负荷时为向上调节，反之为向下调节。采用符号函数$A=\mathrm{sgn}(\Delta P(t))$表述。

2）调节容量P：该指标用于衡量VPP在响应期间能够实现的最大瞬时功率变动幅度，反映了其调节能力的深度。涉及向上调节的边界P_{up}和向下调节的边界P_{down}。例如，向上调节的边界可表示为$P_{\mathrm{up}}=\max\limits_{p\in\{1,2,\cdots,T_e\}}\Delta P(t_p)=P_2-P_0$，其中，$P_0$为未参与调控状态下的功率，$P_2$为调节中的最大功率。

3）响应时间T_{R}：该指标用于衡量VPP响应的速度，指从接收调节信号到$\Delta \boldsymbol{P}$完全达到调节要求所需的最短时间。例如，向上调节响应时间为$T_{\mathrm{R,up}}=t_3-t_1$，其中，$t_1$为VPP接收到指令的时刻，$t_3$为VPP接收到指令向上调节至最大聚合调节功率的时刻。

4）持续时间T_{C}：在达到调节要求后，可以维持新状态的最长时间，即$\Delta \boldsymbol{P}$维持在目标值的最长时间。例如，向上调节持续时间$T_{\mathrm{C,up}}=t_5-t_3$，其中，$t_5$为VPP向上调节的终止时刻。

5）爬坡率R：该指标用于衡量VPP功率快速变化的能力，描述的是实际调节功率向量中相邻时间点的功率变化速率。由VPP中各类资源的功率调整速率汇总后获得。

6）调节成本C：该指标用于衡量实现指定的功率调节目标而产生的经济成本，包括VPP内调节设备的单位运行成本和引导源荷储电力电量变化所产生的费用。

2　单一灵活资源聚合响应潜力分析

在VPP分层聚合评估框架中，单一灵活资源潜力的准确评估是关键。针对VPP内灵活资源需求响应的异质性，首先，在用户层对单个用户进行潜力建模，其次在资源聚合层对由多个用户构成的灵活资源进行潜力修正。

2.1　单一用户调节能力量化模型

首先，选取单一用户周期内的日功率曲线进行聚类分析，以15 min为间隔，一日分为96个时间点。根据灵活资源的响应方式选择周、月、年等周期维度开展聚类分析。例如，汽车制造厂按周排产、化工厂按月度检修等，周期分别可采用周/月功率曲线捕捉生产周期关联的调节潜力。如图1所示，对每个用户完整周期内的典型用能曲线和数据标签进行提取。其中，输入是用户周期内所有日功率数据序列，输出则是用户在周期中的典型日功率曲线和用能参数，如附录A图A2所示。

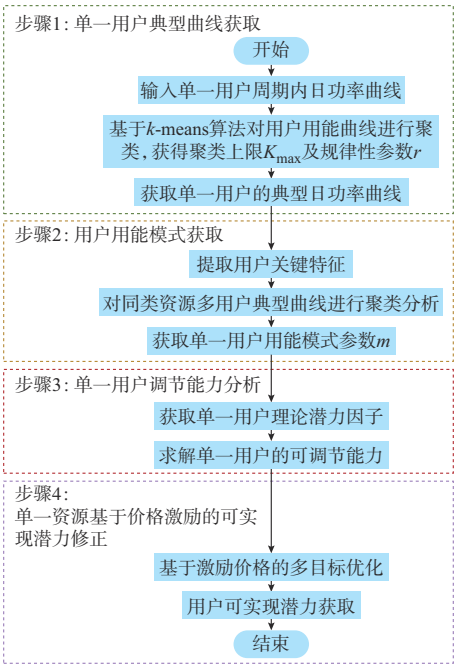


图1　单一资源调节能力计算流程

Fig. 1　Calculation process for single-resource regulation capability

通过计算可获得单一用户的典型功率曲线和用能参数，计算步骤如下所示。

步骤1：选取用户一定周期的电力计量数据$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_t,\cdots,\boldsymbol{X}_{T_{\mathrm{cycle}}}]$，其中，$\boldsymbol{X}_t$为该用户第$t$天的日功率数据向量，即$\boldsymbol{X}_t=[x_{t,1},x_{t,2},\cdots,x_{t,96}]$，$T_{\mathrm{cycle}}$为该用户功率曲线的聚类周期包含天数。

步骤2：基于k-means算法对周期T_{cycle}内用户功率曲线进行聚类，并获得对应的用能规律性参数r，可参考文献[18]。选取最佳聚类数量下日功率曲线最多的聚类中心作为典型功率曲线，表示为$\boldsymbol{X}_{\mathrm{typical}}=$

$[x_{\text{typical},1}, x_{\text{typical},2}, \cdots, x_{\text{typical},96}]_{1\times 96}$，用于对用户行为模式的识别。

步骤3：聚类分析不同用户典型功率曲线，得到用户的不同运行模式。其计算步骤如下：

1）选取同类资源下所有用户的n周期中的n条典型日功率曲线。第i个用户的典型功率曲线为$\boldsymbol{X}_i=[\boldsymbol{X}_{i,1}, \boldsymbol{X}_{i,2}, \cdots, \boldsymbol{X}_{i,n}]_{n\times 96}$。

2）若选取日功率96点曲线作为特征向量进行聚类将存在冗余信息，不利于聚类的准确性。因此，使用特征提取方法对资源聚类。选取曲线的负荷率、日峰谷差率、峰期率、平期率、谷期率等特征，其定义与物理意义如附录A表A2所示。

3）以资源的特征值为特征向量，使用k-means算法进行聚类，按照迎峰型、高负荷率型、避峰型进行聚类，设定同类资源下每个用户的用能模式数据标签为m，对于迎峰型、高负荷率型、避峰型3种类型，m取值分别为1、0.5、0。

需求响应潜力因子表征用户需求响应潜力大小，取值范围为0～1。0表示用户完全没有需求响应潜力，1表示所有时段都可以参与需求响应。需求响应潜力因子的计算主要依赖于两方面的参数：用户的适应性参数和流程参数，其中，适应性参数由用户用能规律性数据标签和用能模式数据标签获取[18]，表示如下：

$$e=\frac{r+m}{2}\sum_{j=1}^{z}a_j b_j \tag{1}$$

式中：e为用户的需求响应潜力因子；z为该用户用能流程总数；a_j为用户第j个用能流程的可削减性；b_j为第j个用能流程使用的电量占总用电量的比例。

考虑到响应类型的变化，确定响应用户i在t时刻的调节能力$P_{i,t,\text{potential}}$为：

$$P_{i,t,\text{potential}}=P_t e \tag{2}$$

式中：P_t为响应用户在t时刻的有功功率。

2.2　基于激励价格的灵活资源可实现潜力修正

2.1节评估了单一用户的理论调节潜力。实际中，VPP运营商需要调度由多个同类用户聚合而成的资源簇。为了评估该资源聚合体在实际电力市场中的可实现调节能力，本节基于激励价格构建多目标优化模型，以分析和修正资源的整体潜力。

2.2.1　目标函数

为解决只考虑资源响应成本或峰谷差最小化单一目标下评估不精确的问题，构建了一个包含成本最小化和峰谷差最小化两个优化目标的多目标优化模型，具体如下：

$$\min\sum_{i=1}^{n'}\sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}}C_{i,t} \tag{3}$$

$$\min(P_{\max}-P_{\min}) \tag{4}$$

式中：n'为用户总数；$P_{\max}$为单一灵活资源日内最大功率；$P_{\min}$为资源最小功率；$C_{i,t}$为资源内用户i参与t时刻的调峰需求响应的成本；t_{start}和t_{end}分别为调峰需求响应的开始和结束时刻。

$$C_{i,t}=P_{i,t,\text{down}}c_t \tag{5}$$

式中：$P_{i,t,\text{down}}$为用户i在t时刻的可削减功率；c_t为t时刻的单位功率成本。

2.2.2　约束条件

1）功率削减约束

每个用户包含多类设备，不同类型设备的削峰需求响应最大功率削减量不高于该资源的理论响应潜力。

$$P_{i,t,\text{down}}\lambda_{t,\text{demand}}\leqslant P_{i,t,\text{potential}} \tag{6}$$

式中：$\lambda_{t,\text{demand}}$为响应信号，表示在$t$时刻存在或不存在削峰需求响应，有响应时取1，无响应时取0。

2）响应持续时间约束

由于某些设备在面临设备运行环境的变化时，可能会导致响应时间延长，其应答性能可能受到一定程度的影响，需要考虑响应持续时间约束。

$$\sum_{t=0}^{96}\lambda_{t,\text{demand}}\leqslant t_{\text{down}} \tag{7}$$

式中：t_{down}为最大日功率减少时间。

3）响应时间约束

由于资源的用电情况各不相同，可能无法完全满足响应需求，这源于资源的能源消耗模式、需求量的波动以及系统的供给能力，不能保证在所有时间下都能及时满足所有响应需求，因而响应时间受到一定的约束。

$$\lambda_{t,\text{demand}}=0 \quad t\in\tau \tag{8}$$

式中：τ为无法执行削峰需求响应的时刻集合。

4）能量平衡约束

可调节负荷资源参与需求响应后曲线发生了一定变化。然而负荷调节量之和不能大于0，即参与需求响应后负荷总值不能上升，否则，不能满足能源平衡需求。

$$\sum_{t=0}^{96}\alpha_t P_{t,\text{shift}}\leqslant 0 \tag{9}$$

式中：α_t为负荷转移方向，$\alpha_t=-1$表示t时刻负荷减少，$\alpha_t=1$则表示t时刻负荷增加；$P_{t,\text{shift}}$为t时刻转移的负荷量。

3　考虑场景需求的调节能力多维量化评估

VPP通过削峰填谷、频率调节、紧急备用等多样化服务实现其商业价值和电网支撑作用。不同场景对VPP的调节性能需求各有侧重：部分场景强调大容量和长时段的持续调节能力，另一些则对快速的响应时间与爬坡速率有极高要求，同时还需兼顾运行的经济成本。针对需求的多样性与内在冲突性，本章建立考虑多元场景需求的VPP互动调节能力多维量化评估方法。

多维量化评估过程并非采用传统加权求和等方式将不同物理单位的指标合成单一数值。这种简单聚合方式存在权重设定主观、物理意义模糊等缺陷。本文将多维调节能力聚合过程构建为场景驱动的多目标评估问题，将调节容量、爬坡率、成本等关键指标作为相互冲突或协同的目标函数，通过多目标求解，获得一个Pareto最优解集（Pareto optimal solution set，POSS）。该解集构成VPP能力边界，直观地揭示了VPP在不同性能维度之间的内在权衡关系。VPP运营商可以根据特定场景的实际需求，从中选择最适宜的能力组合进行决策与市场申报，从而实现其价值的最大化。

3.1　VPP多类型资源聚合互动能力评估模型

3.1.1　运行基线功率

运行基线功率是指在没有接收到外部调节响应需求的情况下，VPP为实现自身运行目标而自然形成的整体功率流动曲线，用于VPP自我评估和内部决策[19]。然而，基线功率无法被直接观测和验证，其估算不可避免地存在不确定性[20-21]。但通过用户负荷数据、电价、新能源出力预测，并结合VPP运行情况得到基线功率仍是当前基线计算的通用做法[22-23]。本文在综合考虑VPP内部所有DER的运行特性、负荷预测以及电价信息后，求解出VPP在无外部指令时的经济运行计划，并将按照该计划运行所产生的各时刻的功率值作为基线功率。目标函数表述如下：

$$\min \sum_{t\in\gamma} C_{t,\mathrm{vpp}} + c_{t,\mathrm{tie}} P_{t,\mathrm{tie}} \tag{10}$$

$$C_{t,\mathrm{vpp}} = \sum_{i\in S_{\mathrm{VPP}}} C_i(P_{t,i}) - c_{t,\mathrm{L}} P_{t,\mathrm{L}} \tag{11}$$

式中：γ为由一系列运行时刻组成的集合，其可以根据实际的运行需求而定；$C_{t,\mathrm{vpp}}$为t时刻VPP的运行成本函数；$P_{t,\mathrm{tie}}$为t时刻的购售电功率，数值为正表示购电功率、数值为负表示售电功率；S_{vpp}为VPP中除固定负荷外所有资源的总集合；$P_{t,i}$为第i个资源在t时刻发出的功率预测值（可调节负荷出力功率取负值）；$P_{t,\mathrm{L}}$为固定不可调负荷的总功率；$C_i(P_{t,i})$为资源i在t时刻的成本函数；$c_{t,\mathrm{tie}}$为VPP在t时刻的购售电价；$c_{t,\mathrm{L}}$为t时刻VPP向负荷资源售电的价格。

基于上述模型，输出VPP的基线负荷曲线$P=\{P_{t,\mathrm{vpp}}\}$，其中，元素$P_{t,\mathrm{vpp}}$为t时刻VPP的总功率，求解如式（12）所示。

$$P_{t,\mathrm{vpp}} = \sum_{i\in S_{\mathrm{vpp}}} P_{t,i} - P_{t,\mathrm{L}} \tag{12}$$

在进行VPP的基线求取时，除了要考虑DER的设备约束之外，还须确保电功率平衡。

$$P_{t,\mathrm{vpp}} = -P_{t,\mathrm{tie}} \tag{13}$$

3.1.2　调节容量

本节旨在求解VPP聚合互动调节能力的边界包络线，获得任意时刻VPP可达到的最大上调和下调功率，从而构建其有功功率运行可行域。在评估模型中，购售电功率上下限反映了VPP在特定时刻能够达到的出力功率范围的极值，二者共同确定了可行域范围。为实现VPP最大灵活性评估，设置VPP互动调节能力评估模型目标函数为购售电量的最大上、下限，即

$$\max P_{t,\mathrm{tie}} \tag{14}$$

$$\min P_{t,\mathrm{tie}} \tag{15}$$

此外，还需考虑购售电的最大、最小功率约束和聚合资源的最大调节潜力约束：

$$P_{\mathrm{tie,min}} \leqslant P_{t,\mathrm{tie}} \leqslant P_{\mathrm{tie,max}} \tag{16}$$

$$P_{i,t} - P'_{i,t} < P_{i,t,\mathrm{down}} \tag{17}$$

式中：$P_{\mathrm{tie,max}}$和$P_{\mathrm{tie,min}}$分别为购售电的最大、最小功率；$P'_{i,t}$为第i个资源在t时刻发出的有功功率。

3.1.3　爬坡率

爬坡率的界限$R_{\mathrm{up}}/R_{\mathrm{down}}$是指VPP在运行于其功率基线时，其输出功率从某一时刻$P_{i,t}$到下一时刻$P_{i,t+1}$允许的最大增加或减少量。为了求解VPP爬坡率特性，将评估模型目标函数设置如下：

$$\max\left(\sum_{i\in S_{\mathrm{vpp}}} P_{i,t+1} - \sum_{i\in S_{\mathrm{vpp}}} P_{i,t}\right) \tag{18}$$

$$\min\left(\sum_{i\in S_{\mathrm{vpp}}} P_{i,t+1} - \sum_{i\in S_{\mathrm{vpp}}} P_{i,t}\right) \tag{19}$$

3.1.4　响应时间

VPP的响应时间T_{vpp}被定义为：在遵循功率基线运行的情况下，从接收调整命令的那一时刻起，到所有调节资源共同将总输出功率调整至指定变化值P_{vpp}所需的最短时间。对应的目标函数如下：

$$\max \sum_{k=t}^{t+h} v_k \quad P_{\mathrm{vpp}} \in S_{P_{\mathrm{vpp}}} \tag{20}$$

式中：h为VPP完成响应的最大允许时间；$S_{P_{\mathrm{vpp}}}$为由等间隔P_{vpp}组成的集合；k为在求和操作中所考虑的

各个时间点；v_k为二元变量，表示是否达到了在时刻k的调节指令P_{vpp}。

当不满足指令需求时，需遵循以下两个限制条件：

$$\sum_{i\in S_{\text{vpp}}} P_{i,t} + P_{\text{vpp}} = \sum_{i\in S_{\text{vpp}}} P_{i,k} \tag{21}$$

$$v_{k+1} = 0 \tag{22}$$

式(21)和式(22)表示在某时刻达到调节指令的要求后，随后的时刻将不再计入响应时间。

3.2　VPP互动调节能力评估实现方法及流程

针对上文构建的多目标评估模型，求解策略可分为两类：单目标转换法和Pareto前沿法。前者通过加权聚合将多目标简化为单目标，但存在权重设定僵化、难以动态反映决策偏好的缺陷。为克服此缺陷，本文采用基于Pareto前沿的综合评价法，该方法的核心优势在于将客观的评估过程与主观的决策过程相分离。首先，运用自适应网格多目标粒子群优化算法(adaptive grid algorithm based on multi-objective particle swarm optimization, AGA-MOPSO)，在解空间中搜索出所有不受支配的非劣解，形成一个完整的POSS。该解集就是对VPP多维度能力的聚合与量化，客观地展示了VPP所有技术上可行的、最优的能力组合和调节边界。获得完整的Pareto前沿后，再引入决策者的偏好，根据实际需求赋予不同目标相应的权重，并利用综合隶属度函数计算出每个解的综合满意度，最终从解集中选取最符合当前主观意图的最优解。评估流程如图2所示。

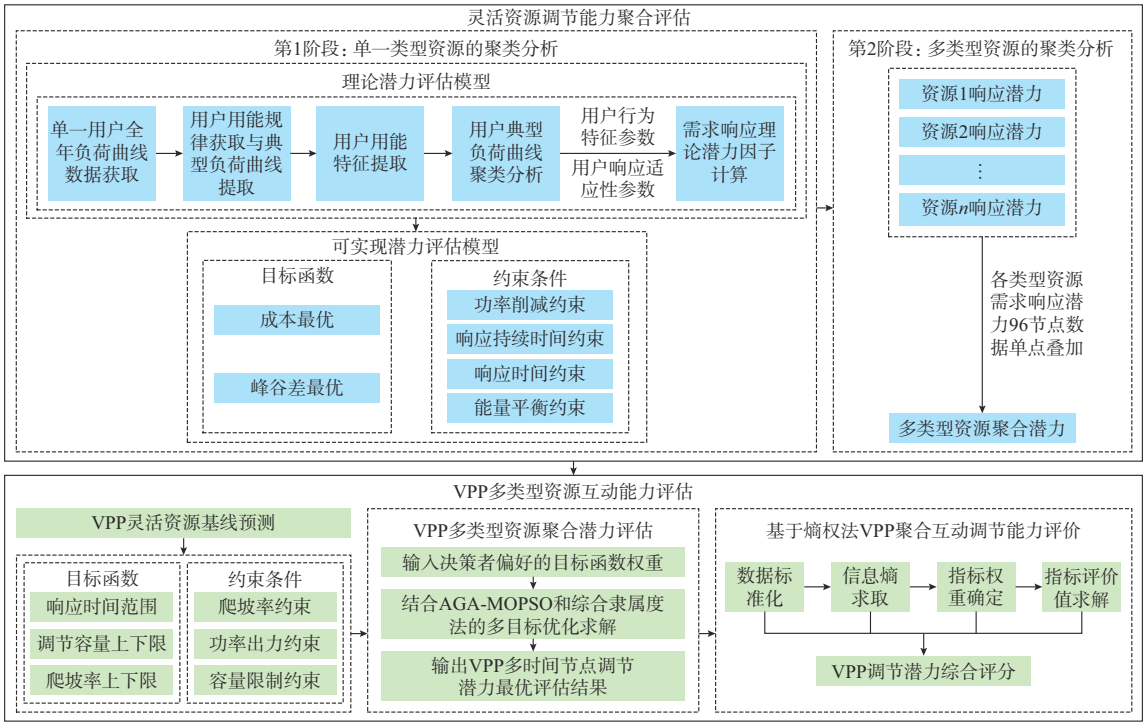


图2　VPP互动调节能力评估流程

Fig. 2　Assessment process for VPP interactive regulation capability

对于第s个目标函数，第u个解的隶属度为：

$$\psi_{s,u} = \frac{\max f_s - f_{s,u}}{\max f_s - \min f_s} \tag{23}$$

式中：$\psi_{s,u}$为第u个解对于第s个目标函数的隶属度，其值越大，表明该解对应的第s个目标函数越优；$\max f_s$和$\min f_s$分别为Pareto解集中各解对应的第s个目标函数值集合f_s中的最大值和最小值；$f_{s,u}$为第u个解的第s个目标函数值。

第u个解的综合隶属度ψ_u为：

$$\psi_u = \frac{\sum_{s=1}^{S} w_s \psi_{s,u}}{\sum_{u=1}^{N_{\text{A}}}\sum_{s=1}^{S} w_s \psi_{s,u}} \tag{24}$$

式中：S为目标函数的总数；w_s为第s个目标函数在所有目标函数中所占的权重；N_{A}为解的总数。

多目标优化方法的流程如附录A表A3所示。表中：N为迭代次数；$g(\cdot)$为粒子的适应度函数；Q_n、A_n、f_n分别为第n次迭代时的粒子群、Pareto解集和目标函数解集。

步骤1：基本参数输入。输入VPP资源的运行状态信息，根据调节特性模型计算并上传其调节能力与期望成本。

步骤2：种群初始化。设置优化算法的种群数量、迭代次数和惯性权重参数。根据目标函数数量生成初始种群Q_0，并确保粒子满足系统约束。

步骤3：适应度评估。根据目标计算粒子的适应度值$g(Q_n)$，确定支配关系以获取Pareto前沿A_n。

步骤4：自适应网格循环迭代。引入自适应网格机制[24]优化粒子群算法，估算粒子密度，动态调整拥挤距离，更新粒子速度与位置；判断是否达到最大迭代次数，若达到则输出Pareto解集A_N。

步骤5：最优解选择。结合目标函数权重输入w，应用综合隶属度函数法确定各目标函数综合隶属度ϕ，从解集A_N中选取最优解求取目标函数值f_N^*，获得考虑多目标间权衡的最优评估结果。

通过多目标优化获得VPP的多维能力评估结果后，为了对不同VPP或不同场景下的综合调节能力进行客观比较，本文进一步引入熵权法进行综合评分。首先，基于各评估对象的多维指标计算各指标的信息熵；其次，根据信息熵的大小设定各指标的客观权重；最后，通过对各指标的归一化评价值进行加权求和，获得各VPP的综合能力评分。该综合评分可作为直观的量化依据，用于全面衡量和对比不同VPP的整体调节性能优劣。

4　算例分析

4.1　参数设置

为验证所提VPP互动调节能力多维量化评估方法的有效性和实用性，本文采用中国天津市VPP示范项目数据集进行算例分析。该VPP聚合了新能源机组、电动汽车和工商业用户等多种DER，工商业用户包括空调等可调节资源，以及电脑等不可调资源。算例以夏季典型日为运行场景，设定空调集群调节响应补贴为1.2元/(kW·h)。日内电动汽车并网数量及总功率、环境温度、分时电价均通过前一天的数据预测得出，各类资源物理参数及成本函数系数参考文献[25]。设定VPP运营商对评估模型中各目标函数的隶属度权重一致。

4.2　VPP聚合互动调节能力评估结果

本节基于所提评估模型，对VPP在夏季典型日的聚合互动调节能力进行多维度量化评估，涵盖调节容量、爬坡率、响应时间和调节成本指标。

评估结果表明，VPP的各项调节能力具有显著的时变特性，并受到响应持续时长、市场电价、内部资源状态等多种因素的动态影响。例如，VPP的调节容量边界在一天中随资源组合的变化而波动，且响应持续时间要求越长，可提供的调节容量越相应减小；其爬坡率上下限同样呈现动态变化，反映了VPP在不同时段应对功率快速变化的能力差异；此外，VPP在不同时刻、针对不同调节深度的响应时间和调节成本也各不相同。关于各能力指标(调节容量、爬坡率、响应时间、调节成本)的详细评估结果、逐时变化曲线及分析见附录B。

4.3　VPP聚合互动调节能力综合评价

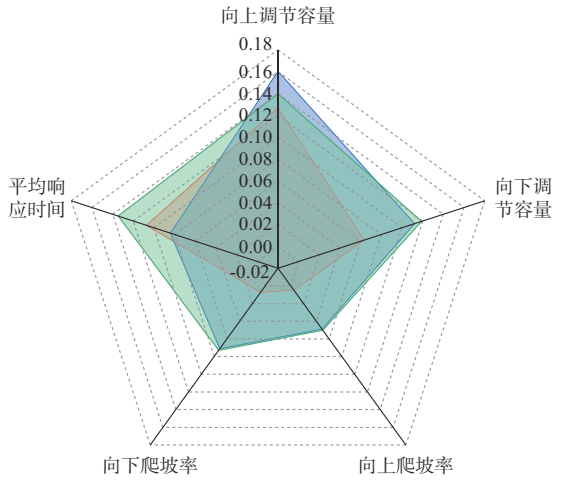
为评估比较不同VPP的综合调节能力，对算例中VPP进行调整以形成不同VPP，VPP1不考虑空调负荷集群；VPP2不考虑电动汽车；VPP3不作调整。对以上3个VPP求取各自的向上调节容量、向下调节容量、向上爬坡率、向下爬坡率、平均响应时间。计算平均响应时间时，取VPP下达的向上或向下的功率调节目标范围为−500～500 kW。基于熵权法的VPP调节能力综合评分结果见表1。图3展示了不同VPP调节能力综合指标和各指标平均权重雷达图。

表1　含不同资源VPP调节能力指标评价

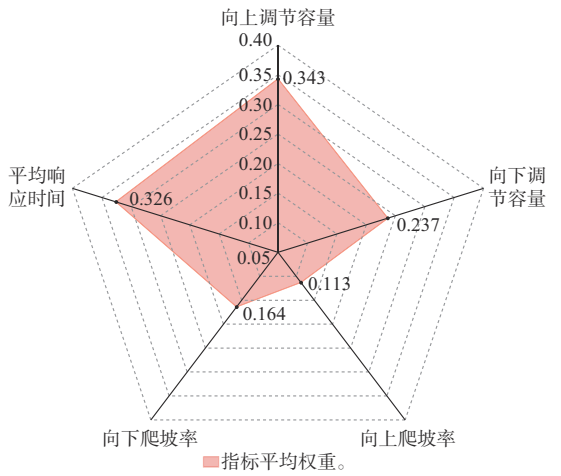
Table 1　Assessment of VPP regulation capability indicators under various resources

编号	指标名称	向上调节容量	向下调节容量	向上爬坡率	向下爬坡率	平均响应时间	综合得分
VPP1	评价值	0.370	0.411	0.489	0.433	0.347	0.381
	熵值	0.876	0.894	0.983	0.983	0.870	
	权重	0.315	0.267	0.044	0.044	0.329	
VPP2	评价值	0.467	0.473	0.433	0.433	0.258	0.403
	熵值	0.818	0.851	0.974	0.958	0.836	
	权重	0.324	0.265	0.045	0.073	0.291	
VPP3	评价值	0.407	0.502	0.444	0.444	0.413	0.427
	熵值	0.691	0.858	0.980	0.962	0.716	
	权重	0.390	0.179	0.024	0.047	0.358	

由表1可知：在调节容量方面，VPP1和VPP2的向上和向下调节容量较为平衡，而VPP3的向下调节容量评价值(0.502)显著高于其向上调节容量评价值(0.407)；在爬坡率方面，VPP2和VPP3的向上与向下爬坡率评价值均相等，而VPP1的向上爬坡率(0.489)则优于其向下爬坡率(0.433)；在平均响应时间方面，VPP2的评价值最低，而VPP3的评价值最高；在各个指标的熵值中，VPP1和VPP2的熵值较为接近，VPP3的熵值较低，说明其指标的集中度相对较高。由图3(a)可以看出，VPP3的各方面指标更为均衡，其综合评分最高。由图3(b)可知，调节容量、响应时间的权重较高，说明该指标能提供的信息量大，在综合评价中作用大。相反，爬坡率的权重小，说明爬坡率对于VPP调节能力综合评价的影响程度较低。



(a) 不同VPP调节能力综合指标雷达图



(b) 不同VPP调节能力各指标平均权重雷达图

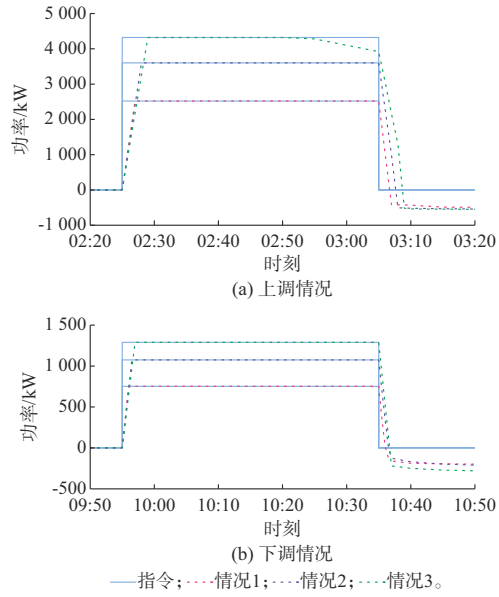
图3　不同VPP调节能力综合指标与各指标平均权重雷达图

Fig. 3　Radar charts of comprehensive indicators and average weights of various VPP regulation capabilities

4.4　评估准确性分析

1)评估结果准确性

为了测试评估结果的准确性，以30 min的响应持续时间为例，给出了在不同调节指令下VPP的功率曲线。其中，指令1、指令2和指令3分别设置为所评估调节能力的70%、100%和120%，评估周期设置为5 min。不同调节指令下的VPP功率变化情况如图4所示。



(a) 上调情况

(b) 下调情况

指令；情况1；情况2；情况3。

图4　不同调节指令下VPP功率变化

Fig. 4　VPP power variation under various regulation commands

通过图4可以得到各指令下的结果：当调节指令低于调节能力(指令1情况)时，VPP通过选择部分对应时长的资源集合来灵活调节，以准确跟踪指令；当调节指令与调节能力相等(指令2情况)时，VPP调用对应时长资源集合的全部资源，仍然能够有效地跟踪指令；当调节指令高于调节能力(指令3情况)时，VPP在调用对应时长资源集合的同时，额外引入调节时长较短的资源，导致VPP在初始阶段满足指令要求，但随着时间的推移，由于短时长资源的限制，VPP无法持续提供调节，使得功率改变量逐渐降低，无法满足指令要求。

2)评估算法性能分析

为验证所采用的AGA-MOPSO相对于多目标模糊优化方法的性能优势，以30 min响应持续时间为例进行对比测试。对比方法——多目标模糊优化方法采用了梯形隶属度函数对目标函数进行模糊处理。对两种算法分别运行10次，结果如表2所示。表中的数值为10次运行后的最优值。

表2　不同算法的对比结果
Table 2　Comparison results of various algorithms

算法	各时刻0.5 h内平均调节范围/kW	爬坡率平均上限/下限/(kW·min^{-1})	全时段综合得分
多目标模糊优化算法	478	9.37/−6.29	0.386
综合学习粒子群优化算法	489	10.54/−6.70	0.406
AGA-MOPSO	500	11.42/−8.02	0.427

根据表2的结果可知，AGA-MOPSO相对于多目标模糊优化算法和综合学习粒子群优化算法具有更强的寻优能力，主要是因为多目标模糊优化方法在局部搜索方面的能力较弱，容易陷入局部最优解，而AGA-MOPSO能够在全局范围内进行搜索并具备解决局部极值问题的能力，且AGA-MOPSO相较于综合学习粒子群优化算法的优点在于其引入自适应机制，能够根据问题的动态变化调整搜索策略，以更高效地寻找Pareto前沿解。

4.5　多市场应用场景对比分析

为进一步验证本评估方法在不同市场激励和调度目标下的适用性，本文构建3种典型的市场应用场景进行对比。这3种场景下VPP的内部资源构成不变，但其参与市场的目标策略不同。不同场景下的购售电量和调节成本如图5所示。

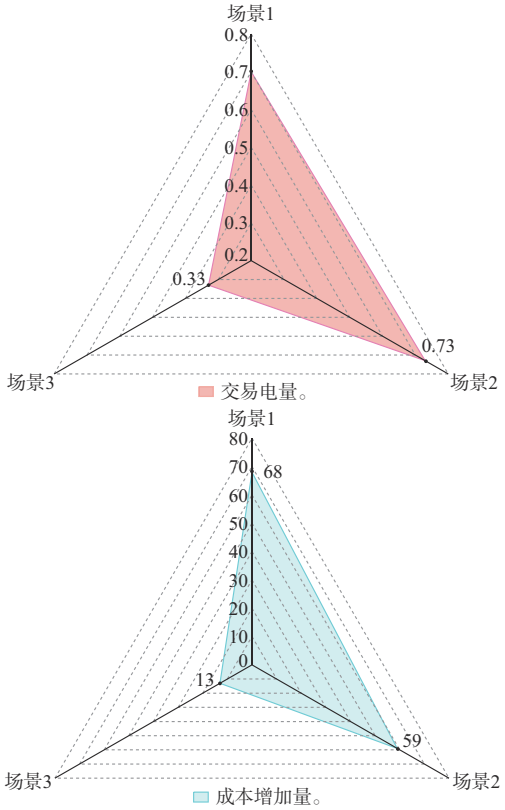


图5　不同场景下VPP的购售电量和调节成本雷达图
Fig. 5　Radar charts of purchased electricity, sold electricity and regulation costs for VPP in various scenarios

场景1：均衡经济型场景。VPP运营商旨在平衡调节能力和经济成本，追求综合效益最大化。

场景2：紧急响应型场景。当电网需要VPP提供最大程度支援时，VPP的策略会向保供能力倾斜，调节容量和爬坡率目标权重上升。

场景3：价格敏感型场景。当市场电价极高或VPP内部运行成本压力大时，VPP可能采取规避风险的保守策略，优先保证自身运行成本最低。

由图5可看出：场景1同时兼顾经济成本和调节深度；场景2的成本敏感性较低，因此调节成本最高，但购售电量显著提升，表明VPP调用包括高成本机组在内的所有可用资源以满足系统应急需求；场景3中，由于该场景下的价格敏感性，VPP受成本约束影响增大，拒绝调用高成本调节资源，购售电量和调节成本均被压缩至最低水平。由此可见，通过调整评估模型中目标函数的权重，本文所提方法能够灵活模拟VPP在多种市场场景下的最优策略和对应的能力边界。

5　结语

在含高比例分布式能源的新型电力系统背景下，VPP作为多类型可调资源的聚合载体，其精准建模与协同调控能力准确评估至关重要。本文基于单一资源-多类型资源分层聚合方法，对VPP互动调节能力进行多维量化评估。通过理论建模与算例分析，得到如下结论：

1）响应能力评估指标体系需要针对不同调控场景建立差异化评估准则，适用于评估各类资源的独立响应能力与整体协同能力，以实现对DER和VPP物理特性与业务环境耦合作用下的动态行为刻画。

2）为更有效地协调DER，通过特征提取与聚类分析可量化VPP灵活资源响应潜力，并基于价格激励进行修正，有助于实现单一资源调节潜力的动态标定。

3）多目标评估模型在求解过程中需要具有目标冲突协调能力，结合熵权法构建的日内波动性评价指标，可为VPP参与电网互动提供兼顾技术可行性与经济性的调节潜力边界信息。

尽管本文在VPP调节能力量化评估方面取得

了一定进展,但仍存在一些局限性:

1)本文为提升评估精度,提出了一种基于经济优化的运行基线,但仍存在不确定性和误差。如何精准量化运行基线,或探索不完全依赖于基线的新型市场机制,是未来重要的研究方向。

2)未来的研究可采用随机优化或鲁棒优化等更先进的数学工具,对可再生能源出力和用户行为的不确定性进行更深度的建模与分析。

附录见本刊网络版,点击 http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250425003,或扫描英文摘要后二维码,可阅读全文。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 王健,郑峻峰,黄际元,等.虚拟电厂关键技术综述与发展展望[J].供用电,2023,40(12):43-54.
WANG Jian, ZHEN Junfeng, HUANG Jiyuan, et al. Key technology and development prospects of virtual power plants[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 43-54.

[4] YI Z K, XU Y L, WANG H Z, et al. Coordinated operation strategy for a virtual power plant with multiple DER aggregators [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2445-2458.

[5] LIU H, ZHAO Y, GU C H, et al. Adjustable capability of the distributed energy system: definition, framework, and evaluation model[J]. Energy, 2021, 222: 119674.

[6] WEN Y L, HU Z C, YOU S, et al. Aggregate feasible region of DERs: exact formulation and approximate models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4405-4423.

[7] WANG L S, KWON J, SCHULZ N, et al. Evaluation of aggregated EV flexibility with TSO-DSO coordination[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2304-2315.

[8] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.

[9] BABAEI S, ZHAO C Y, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5125-5135.

[10] TENG Y, SUN P, HUI Q, et al. A model of electro-thermal hybrid energy storage system for autonomous control capability enhancement of multi-energy microgrid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 489-497.

[11] RAHIMI M, ARDAKANI F J, ARDAKANI A J. Optimal stochastic scheduling of electrical and thermal renewable and non-renewable resources in virtual power plant[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 127: 106658.

[12] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113410.

[13] XIANG Y, CAI H H, GU C H, et al. Cost-benefit analysis of integrated energy system planning considering demand response [J]. Energy, 2020, 192: 116632.

[14] GUO C S, LUO F J, CAI Z X, et al. Integrated energy systems of data centers and smart grids: state-of-the-art and future opportunities[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117474.

[15] FENG C, CHEN Q X, WANG Y, et al. Provision of contingency frequency services for virtual power plants with aggregated models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2798-2811.

[16] 山西省能源局关于印发《虚拟电厂建设与运营管理实施方案》的通知[J].山西省人民政府公报,2023(4):37-43.
Notice of Shanxi Energy Bureau on the issuance of the "Implementation Plan for the Construction and Operation Management of Virtual Power Plants"[J]. Shanxi Provincial People's Government Bulletin, 2023(4): 37-43.

[17] 王宣元,刘蓁.虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J].电力系统自动化,2022,46(18):158-168.
WANG Xuanyuan, LIU Zhen. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 158-168.

[18] 伍子东.需求响应关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2020.
WU Zidong. Research on key technologies of demand response [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[19] 王飞,王歌,徐飞.面向系统响应能力提升的虚拟电厂聚合特性及交易机制综述[J].电力系统自动化,2024,48(18):87-103.
WANG Fei, WANG Ge, XU Fei. Review on aggregation characteristics and trading mechanisms of virtual power plant for enhancing system response capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 87-103.

[20] WIJAYA T K, VASIRANI M, ABERER K. When bias matters: an economic assessment of demand response baselines for residential customers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1755-1763.

[21] MOHAJERYAMI S, DOOSTAN M, ASADINEJAD A, et al. Error analysis of customer baseline load (CBL) calculation methods for residential customers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 5-14.

[22] CHEN Y B, XU P, CHU Y Y, et al. Short-term electrical load forecasting using the support vector regression (SVR) model to calculate the demand response baseline for office buildings[J]. Applied Energy, 2017, 195: 659-670.

[23] WANG F, LI K P, LIU C, et al. Synchronous pattern matching principle-based residential demand response baseline

estimation: mechanism analysis and approach description [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6972-6985.
[24] 张红易.基于精英引导与存档解信息交融的多目标进化算法研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.
ZHANG Hongyi. Research on multi-objective evolutionary algorithm with elite guidance and archive solution information integration[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
[25] 张禹森,孔祥玉,孙博伟,等.基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J].电网技术,2018,42(6):1811-1819.
ZHANG Yusen, KONG Xiangyu, SUN Bowei, et al. Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1811-1819.

孔祥玉(1978—),男,博士,教授,主要研究方向:大数据分析、新能源发电、智能配用电。E-mail:eekongxy@tju.edu.cn
张培榕(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向:虚拟电厂、需求侧管理。E-mail:przhang@tju.edu.cn
刘高华(1987—),女,通信作者,硕士,主要研究方向:人工智能、电力市场。E-mail:suppig@126.com

(编辑　孔丽蓓)

Multi-dimensional Quantitative Assessment of Interactive Regulation Capability for Virtual Power Plants Based on Hierarchical Aggregation

KONG Xiangyu[1], *ZHANG Peirong*[1], *LIU Gaohua*[1], *ZHANG Xiyuan*[2], *GAO Hongchao*[3], *ZHUANG Zhong*[4]
(1. National Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and Systems (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Training Centre of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300170, China; 3. National Key Laboratory of New Power System Operation and Control (Tsinghua University), Beijing 100084, China; 4. Marketing Service Centre of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: Quantitative assessment of interactive regulation capability for a virtual power plant (VPP) serves as critical foundation for evaluating its regulation performance and optimal operation under diverse spatiotemporal conditions. To achieve a refined assessment of the regulation capability for a VPP, this paper proposes a multi-dimensional quantitative assessment method for VPP based on hierarchical aggregation. Firstly, a data-driven method is employed to address the requirements of market transaction decisions across various time scales. By applying the *k*-means algorithm to extract typical user load profiles, a quantitative assessment model is obtained for the regulation capability of single flexible resource, which incorporates an incentive price-based correction to account for realizable potential. Secondly, considering factors such as regulation capacity, ramp rate, response time, and response cost, a quantitative assessment model is developed for the aggregated interactive regulation capability of heterogeneous VPP resources and solved through a multi-objective optimization approach that combines the particle swarm optimization algorithm and the comprehensive membership degree method. Finally, simulation results demonstrate that the proposed method can accurately quantify the potential boundaries of VPPs in participating in ancillary services, providing a decision-making basis for operators to formulate optimal strategies and maximize their service value.

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

Key words: virtual power plant (VPP); distributed energy resource (DER); regulation capability; multi-dimensional quantitative assessment; resource aggregation; ancillary service; multi-objective optimization; incentive price