

基于条件风险价值的虚拟电厂优化运行与收益分配

李新聪¹, 黄滢², 李振坤², 袁明翰³, 季亮²

(1. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海市 徐汇区 200233; 2. 上海电力大学 电气工程学院, 上海市 200090;
3. 国网上海市电力公司, 上海市 杨浦区 200090)

Optimal operation and profit allocation of virtual power plants based on conditional value-at-risk

LI Xincong¹, HUANG Ying², LI Zhenkun², YUAN Minghan³, JI Liang²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Xuhui District, Shanghai 200233, China; 2. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. State Grid Shanghai Electric Power Company, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要: 虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 作为解决可再生能源并网的技术途径, 可有效帮助各类分布式能源参与电力市场交易并提高整体竞争力与经济性。为此文中提出了一种聚合多类分布式能源的 VPP 运营策略及其内部成员收益分配方法。首先, 构建了由风电机组、燃气机组、储能设备和可中断负荷组成的 VPP 优化运行模型, 并运用条件风险价值理论对不确定因素风险进行量化处理, 得到了不同风险水平下 VPP 的运营策略和收益; 接着, 基于内部各成员的风险水平、收益贡献和成员吸引力, 采用权重系数改进 Shapley 值法, 提出了适用于多个成员的 VPP 收益分配模型; 最后, 以某 VPP 为研究对象进行算例分析, 验证了所建模型的有效性, 确保了收益分配结果的公平性与合理性, 对各类分布式能源参与到 VPP 起到积极作用, 对维护 VPP 联盟的稳定具有重要意义。

关键词: 虚拟电厂; 不确定性; 优化运行; 收益分配; 条件风险价值; 改进 Shapley 值法

Abstract: As a solution for integrating renewable energy sources into the grid, Virtual Power Plant (VPP) can effectively facilitate participation in electricity market transactions by various types of distributed energy resources, thus improving overall competitiveness and economic viability. In this article, we propose a VPP operating strategy that aggregates multiple types of distributed energy resources, along with a method for

distributing profits among its internal members. Firstly, we construct an optimized VPP operating model composed of wind turbine, gas turbine, energy storage equipment, and interruptible loads. We use conditional value-at-risk theory to quantify the risk of uncertain factors, and derive VPP operating strategies and profits under different risk levels. Secondly, based on the risk levels, profit contributions, and member attractiveness of internal members, we improve the Shapley value method with weighted coefficients to propose a VPP profit allocation model that applies to multiple members. Finally, we use a VPP as a case study to analyze the effectiveness of the model. The fairness and reasonableness of profit allocation results are ensured, which plays a positive role in the participation of various types of distributed energy resources in the VPP, and is of great significance to maintaining the stability of the VPP alliance.

Keywords: virtual power plant; uncertainty; optimal operation; profit allocation; conditional value-at-risk; improved Shapley value method

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0263

0 引言

随着能源匮乏和污染问题的日益严重, 国际社会越来越关注分布式能源 (distributed energy resource, DER) 技术发展。但是, DER 出力间歇性等不确定性因素使其可调度性较差^[1]。虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 的出现, 为电力系统消纳问题的研究开辟了新途径^[2]。作为一种集成源-网-荷的新型智能控制技术和业务交互方式, VPP

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52177098); 国家电网有限公司科技项目 (SGSHJY00GPJS2100193)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177098); State Grid Corporation of China Technology Project (SGSHJY00GPJS2100193).

将分散在电网中的分布式发电、储能、负荷等各种资源集中起来,以实现最优的运营控制和市场交易^[3-4]。

目前,国内外对VPP参与电力市场的内部优化和协调已经进行了相关的研究^[5-9]。文献[5]在随机发电机组和市场电价等不确定因素基础上,构建了基于市场需求与需求响应的VPP模型。文献[6]对VPP的源-荷双重特性进行分析,并探讨了多VPP参与电力市场的协同交易。文献[7]研究了多储能加入VPP的两阶段市场出清规划。文献[8]以VPP市场交易的预期收益最大化为目标构建了短期交易模型,并运用多场景方法对日前电价不确定性进行仿真。文献[9]考虑到随机发电机组的功率不确定,构建了两阶段分布鲁棒优化模型,得到了VPP的最佳调度决策。然而,由于VPP构成复杂,在运行交易中常常存在着多维不确定性^[10-11],对于VPP交易的风险测量仍需要进一步的探讨。作为当前广泛应用的风险测度方法,条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)在反映损失尾部信息方面具有优势,因此在本文中被用于量化VPP的交易风险。现有研究中,CVaR理论被广泛运用于风险规避和风险约束等领域^[12-13]:文献[12]以CVaR为风险度量指标,探讨了不同风险水平对VPP电源容量配置的影响。文献[13]将市场交易中的多维不确定性因素纳入考量,构建同时考虑预期收益和条件风险损失的交易策略决策模型。

VPP通过整合零散的DER资源,以一个整体的形式参与市场交易。但是,由于每个DER都是一个独立的主体,不公平和不合理的收益分配会对VPP的正常运作造成影响,并危及各DER之间形成的合作关系。因此,收益分配方案的公平性与合理性对于维持VPP内部各成员之间的合作意愿具有重要意义。现有文献资料关于在VPP中如何实现多个主体之间的收益分配的研究较少^[14-18]。文献[14]分别建立了单个VPP和多个VPP联合运行规划模型,对VPP收益进行分配。而文献[15]则根据VPP的不同特性,给出了收益与奖惩的分配方式以及基于奖惩分配期望的利弊判断。文献[16]运用条件风险价值分析了日前与日内风险系数对调度结果的影响,并应用差价-收益转移结算机制对微电网收益的影响进行分析。文献[17]提出了计算分布式电源配电网节点的边

际电价方法,实例显示,该模型能够最大程度地对分布式电源提供激励,降低电力系统的损耗和排放,并实现分摊方案的零销售盈余。文献[18]从增强联盟稳定的角度,在Shapley法基础上,考虑了DERs边际贡献和不确定性预测水平之间的差别,对Shapley法进行调整。然而,各类DER在VPP运行过程中,其不确定性风险往往会对VPP收益造成影响,所以,如何有效地反映出VPP内部各成员的多维贡献程度,还有待进一步研究。

综上所述,本文主要考虑在电力现货市场下,构建由风电机组、燃气机组(gas turbine, GT)、储能设备和可中断负荷(interruptible loads, IL)组成的VPP优化运行模型,同时运用条件风险价值度量不确定性风险,继而得到在不同风险系数下VPP的运营策略和收益,为VPP运行管理提供参考;接着,考虑内部成员风险水平、收益贡献和成员吸引力,在改进的Shapley值法的基础上提出适用于多个成员的VPP收益分配模型,对VPP收益进行分配;最后,通过算例进行仿真,验证了所建模型的有效性,保证收益分配更加公平合理,有利于各类DER加入VPP,提高了联盟的稳定性。

1 VPP结构与市场交易

1.1 VPP基本模型

以智能电网为框架,虚拟电厂可以将不同容量等级的分布式能源进行有效整合,并在空间和时间上实现互补,从而有效地降低可再生能源的出力间歇。时域上,VPP通过利用各DER出力曲线的不同达到出力的平稳;空域上,VPP整合不同位置的DER以实现电网各节点供能平衡。虚拟电厂模型如图1所示。

1.2 市场交易流程

虚拟电厂通过调整其内部资源配置参与市场,例如在电力市场上出售剩余电能或根据负荷需求从市场上购买电能,从而实现最佳收益。VPP运营商对其内部可再生能源出力以及负荷等情况进行预测,从而确定日前市场的购售电能。由于实际出力与预测值之间存在着差异,因此在实时阶段中,VPP需要利用燃气机组、储能设备和可中断负荷等资源适应可再生能源出力的动态变化,

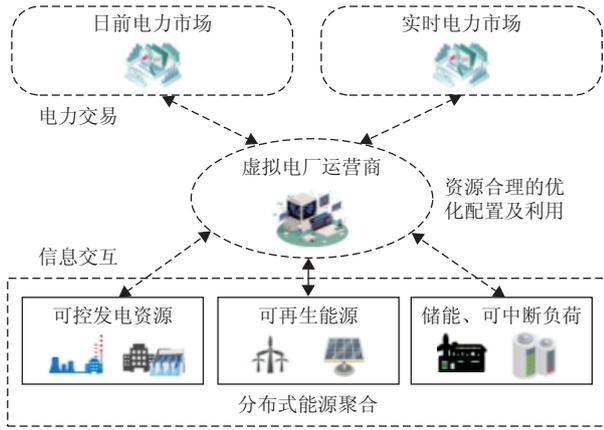


图 1 虚拟电厂模型

Fig. 1 Virtual power plant model

使其能够达到在日前的投标要求。当实际出力与竞标值存在偏差时，VPP 需要接受不平衡惩罚：在实际出力高于竞标出力情况下，VPP 将多余电能按低于日前电价进行销售；相反，VPP 需要用比日前电价更高的价格来采购不足电能。

2 基于 CVaR 的虚拟电厂优化运行模型

2.1 条件风险价值分析

风险价值 (value at risk, VaR) 是衡量在正常市场条件和一定置信水平下，未来特定一段时间内可能遭受的最大损失。反映损失尾端信息的条件风险价值 CVaR 是具有凸性的风险衡量指标，该数值代表了 VaR 分位点后损失的期望值，考虑了超过 VaR 值损失的条件期望，更好地解决了 VaR 在处理损失分布的“后尾”问题，更能反映出潜在风险。假设 x 为可控电源出力等决策变量， y 为负荷以及风光等不可控电源出力的随机变量，则在为置信水平 α 下的风险价值 η_α 计算公式如下：

$$\eta_\alpha = \max \{ \eta \in R | \varphi(x, \eta) \leq 1 - \alpha \} \quad (1)$$

式中： $\varphi(x, \eta)$ 为收益函数 $g(x, y)$ 不大于边界值 η 的概率。

2.2 模型假设

1) VPP 充当市场交易的价格接受者。由于 VPP 在前一天的市场报价不影响最后的市场价格，为保证竞价容量能够充分利用，将其竞价价格设置为 0，并根据市场出清价格确定结算价格。

2) 电力市场采用两种结算方式。日前市场以日前电价进行交易，而实时市场则采用实时市

场价格，并且为简化计算过程，将正负不平衡电价设定为日前电价的一定比例。

2.3 目标函数

为了评估可再生能源出力不确定性对虚拟电厂市场运行造成的影响，本文引入 CVaR，对 VPP 在市场竞争中的收益与风险间关系进行评估。因此，以考虑风险因素的收益最大化为目标，构建了 VPP 优化运行模型。模型目标函数由 3 个部分构成：1) VPP 参与日前市场的购售电收益，可以用日前市场的购售电功率与日前电价的乘积来表达；2) VPP 在实时运行中各场景下的期望收益，表示为可中断负荷的效用加上不平衡惩罚，再减去 VPP 总成本；3) 基于 CVaR 的风险收益，用风险系数和 CVaR 之积来表示。具体如式 (2) 所示：

$$\begin{aligned} \max F = & (1 - \beta) \sum_{w=1}^Q \sum_{t=1}^T p_w \{ \pi_{wt}^{\text{DA}} P_{wt}^{\text{DA}} \delta_t \\ & + [\pi_{wt}^{\text{L}} (P_t^{\text{LOAD}} - P_{wt}^{\text{IL}}) \delta_t + U_{wt} - C_{wt}^{\text{VPP}}] \} \\ & + \beta \left(\eta - \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{w=1}^Q p_w \xi_w \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： β 为风险系数， $0 \leq \beta \leq 1$ ，其值取决于决策者对风险和回报的权衡， β 值越大，表示 VPP 运营决策者对风险越厌恶，其运行策略越保守，更倾向于规避不确定性因素所带来的风险； T 为总时间； Q 为场景总数； p_w 为场景 w 出现的概率； π_{wt}^{DA} 、 π_{wt}^{L} 代表在时间 t 、场景 w 下的日前电价以及 VPP 对内部负荷的供电电价； δ_t 代表单位时间间隔，单位为 h； P_{wt}^{DA} 表示 VPP 在日前市场的购售电功率，如果该值为正，VPP 将向市场出售电能，如为负，VPP 将从市场购买电能； P_t^{LOAD} 表示 VPP 内部负荷； P_{wt}^{IL} 表示可中断负荷功率； U_{wt} 为时间 t 、场景 w 下的不平衡惩罚； C_{wt}^{VPP} 为 VPP 总成本； η 为 VaR 值； α 为置信水平； ξ_w 为辅助变量。

其中，VPP 总成本具体如式 (3) (4) 所示：

$$C_{wt}^{\text{VPP}} = C_{wt}^{\text{W}} + C_{wt}^{\text{GT}} + C_{wt}^{\text{ESS}} + C_{wt}^{\text{IL}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{wt}^{\text{W}} = K_{\text{W}} P_{wt}^{\text{W}} \\ C_{wt}^{\text{GT}} = a_{\text{GT}} (P_{wt}^{\text{GT}})^2 + b_{\text{GT}} P_{wt}^{\text{GT}} + c_{\text{GT}} \\ C_{wt}^{\text{ESS}} = K_{\text{ESS}} (P_{wt}^{\text{in}} \eta_{\text{in}} + P_{wt}^{\text{out}} / \eta_{\text{out}}) \\ C_{wt}^{\text{IL}} = a_{\text{IL}} (P_{wt}^{\text{IL}})^2 + b_{\text{IL}} P_{wt}^{\text{IL}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： C_{wt}^{W} 、 C_{wt}^{GT} 、 C_{wt}^{ESS} 、 C_{wt}^{IL} 依次为风电机组运

行成本、燃气机组出力成本、储能设备成本以及可中断负荷的中断成本； K_W 为风电机组维护成本系数； a_{GT} 、 b_{GT} 和 c_{GT} 为燃气机组的成本系数； K_{ESS} 为储能设备的充放电成本系数； a_{IL} 、 b_{IL} 为可中断负荷的补偿系数； P_{wt}^W 、 P_{wt}^{GT} 、 P_{wt}^{in} 、 P_{wt}^{out} 依次为风电机组、燃气机组、储能设备充、放电功率； η_{in} 、 η_{out} 分别为充、放电时能量损耗的效率因数， $0 < \eta_{in} < 1$ ， $0 < \eta_{out} < 1$ 。

2.4 约束条件与不平衡惩罚

2.4.1 约束条件

1) VPP有功平衡约束。

VPP的有功平衡约束如下所示：

$$\begin{aligned} P_{wt}^W + P_{wt}^{GT} + P_{wt}^{out} / \eta_{out} + P_{wt}^{IL} + P_{wt}^- \\ = P_{wt}^{DA} + P_t^{LOAD} + P_{wt}^{in} \eta_{in} + P_{wt}^+ \end{aligned} \quad (5)$$

式中： P_{wt}^+ 、 P_{wt}^- 表示VPP实际出力与竞标出力的偏差量，任一时刻，它们中一个为正值，另一个为零。

2) 燃气机组运行约束。

燃气机组运行约束包含出力约束、爬坡率约束和最小开、停机时间约束，分别如式(6) — (8)：

$$\mu_{wt} P_{min}^{GT} \leq P_{wt}^{GT} \leq \mu_{wt} P_{max}^{GT} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{wt}^{GT} - P_{w(t-1)}^{GT} \leq \Delta P_{up} \delta_t \\ P_{w(t-1)}^{GT} - P_{wt}^{GT} \leq \Delta P_{down} \delta_t \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (\mu_{w(t-1)} - \mu_{wt}) (T_{w(t-1)}^{on} - T_{min}^{on}) \geq 0 \\ (\mu_{wt} - \mu_{w(t-1)}) (T_{w(t-1)}^{off} - T_{min}^{off}) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： μ_{wt} 为0-1变量，表示机组运行状态； P_{max}^{GT} 、 P_{min}^{GT} 为出力上下限； ΔP_{up} 、 ΔP_{down} 为上下爬坡速率； T_{min}^{on} 、 T_{min}^{off} 为允许的最小开、停时间； T_{wt}^{on} 、 T_{wt}^{off} 为累积开、停机时间。

3) 储能设备约束。

储能设备的约束如下所示，其中，式(9) — (11)为能量约束，式(12) — (13)为荷电状态约束，式(14)为充/放电功率约束。

$$E_{wt} = E_{w(t-1)} + E_{wt}^- - E_{wt}^+ \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_{wt}^- = P_{wt}^{in} \eta_{in} \cdot \delta_t \\ E_{wt}^+ = P_{wt}^{out} / \eta_{out} \cdot \delta_t \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{wt}^+ \leq E_{w(t-1)} \leq E_{max} \quad (11)$$

$$\zeta_{wt}^{SOC} = \frac{E_{wt}}{E_{max}} \quad (12)$$

$$\zeta_{min}^{SOC} \leq \zeta_{wt}^{SOC} \leq \zeta_{max}^{SOC} \quad (13)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wt}^{in} \leq P_{max}^{in} \\ 0 \leq P_{wt}^{out} \leq P_{max}^{out} \end{cases} \quad (14)$$

式中： E_{wt} 为 t 时刻在场景 w 下的能量状态； E_{wt}^- 、 E_{wt}^+ 为储能设备充放电电量； E_{max} 为储能设备的最大容量； ζ_{min}^{SOC} 、 ζ_{max}^{SOC} 为荷电状态上下限； P_{max}^{in} 、 P_{max}^{out} 为最大充、放电功率。

4) 可中断负荷约束。

可中断负荷出力上下限约束如式(15)：

$$\gamma_{wt} P_{min}^{IL} \leq P_{wt}^{IL} \leq \gamma_{wt} P_{max}^{IL} \quad (15)$$

式中： γ_{wt} 为0-1变量，表示可中断负荷的调用状态， P_{max}^{IL} 、 P_{min}^{IL} 为可中断负荷的上下限。

5) 竞标值约束。

日前市场竞标出力上下限约束如式(16)：

$$\begin{aligned} -P_t^{LOAD} - P_{max}^{in} \eta_{in} \leq P_{wt}^{DA} \leq P_{max}^W + P_{max}^{GT} \\ + P_{max}^{out} / \eta_{out} + P_{max}^{IL} - P_t^{LOAD} \end{aligned} \quad (16)$$

6) 条件风险约束。

本文采用CVaR对收益与风险间的关系进行衡量，条件风险约束如下所示：

$$\begin{aligned} \eta - \sum_{t=1}^T \{ \pi_{wt}^{DA} P_{wt}^{DA} \delta_t + [\pi_{wt}^L (P_t^{LOAD} - P_{wt}^{IL}) \delta_t \\ + U_{wt} - C_{wt}^{VPP}] \} \leq \xi_w \end{aligned} \quad (17)$$

$$\xi_w \geq 0 \quad (18)$$

2.4.2 不平衡惩罚

在实际出力高于竞标出力情况下，VPP将多余电能按低于日前电价进行销售；相反，VPP需要用比日前电价更高的价格采购不足电能。不平衡惩罚表示为：

$$U_{wt} = (\pi_{wt}^{DA} r_{wt}^+ P_{wt}^+ - \pi_{wt}^{DA} r_{wt}^- P_{wt}^-) \delta_t \quad (19)$$

式中： r_{wt}^+ 、 r_{wt}^- 代表正负不平衡电价系数，并满足 $0 \leq r_{wt}^+ \leq 1 \leq r_{wt}^-$ 。对应的正负偏差量约束如下式：

$$\begin{aligned} 0 \leq P_{wt}^+ \leq v_{wt} (P_{max}^W + P_{max}^{GT} + P_{max}^{in} \eta_{in} \\ + P_{max}^{out} / \eta_{out} + P_{max}^{IL}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq P_{wt}^- \leq (1 - v_{wt}) (P_{max}^W - P_{wt}^W + P_{max}^{GT} \\ + P_{max}^{in} \eta_{in} + P_{max}^{out} / \eta_{out} + P_{max}^{IL}) \end{aligned} \quad (21)$$

式中： v_{wt} 为0-1变量，若VPP实际出力与竞标出力的偏差量为正， $v_{wt} = 1$ ，若为负，则 $v_{wt} = 0$ 。

2.5 参数不确定性处理

本文利用多情景方法，对电力市场价格和风力发电的不确定性进行了分析，将两者作为随机变量，模拟可能的情景，从而将模型中的不确定性转化为多确定性的情景问题。在假定随机变量满足历史分布前提下，通过采用蒙特卡洛模拟^[19]进行场景生成，并基于概率距离的快速前代选择算法^[15]对场景进行削减，从而加快了对相似场景的削减速度，提升了计算速度。

3 基于综合改进因子的改进 Shapley 值法收益分配模型

3.1 传统 Shapley 值法

传统 Shapley 值法关注成员的边际效益，并通过计算各成员的边际贡献期望值来确定各自所获收益。VPP 中包括了 N 个成员，除去空集，有 $2^N - 1$ 种不同的组合形式。利用 Shapley 值法对 VPP 中各成员进行收益分配，其中成员 n 的收益可表示为

$$R_n = \sum_S \frac{(|S|-1)!(N-|S|)!}{N!} (R(S) - R(S - \{n\})) \quad (22)$$

式中： S 为各类成员组成的一种联盟； $|S|$ 表示该联盟中成员数目； $(|S|-1)!(N-|S|)!/N!$ 为联盟 S 所应分得收益的权重； $R(S)$ 和 $R(S - \{n\})$ 依次表示成员 n 参与和不参与联盟 S 时的收益； $R(S) - R(S - \{n\})$ 为成员 n 参与到不同的联盟 S 中为自身参与联盟所提供的边际贡献。

3.2 改进 Shapley 值法模型

针对 VPP 经过一日运行获得的收益，采用公平合理的方式进行分配，有助于 VPP 内部成员之间长期稳定合作。传统 Shapley 法认为联盟中各成员的风险为均等的 $1/N$ ，无法充分反映各成员在 VPP 中多维度的投入与贡献水平，从而不能确保分配结果与投入的平衡。在实际应用中，应当充分考虑 VPP 内各成员的特点并加以量化。因此，本文考虑了风险水平、收益贡献和成员吸引力，并将其量化并赋予合理的权重得到一个综合改进因子，对结果进行再修正，并基于改进 Shapley 值法构造了适合多成员 VPP 的收益分配模型。

$$\Delta R_n = R(N) \Delta M_n \quad (23)$$

$$R'_n = R_n + \Delta R_n \quad (24)$$

式中： $R(N)$ 是 VPP 内所有成员在市场中的收益； ΔM_n 是综合改进因子； ΔR_n 是修正前后成员 n 的收益差值； R'_n 是改进 Shapley 法时成员 n 所获收益。

3.2.1 收益分配的影响因素

1) 风险水平。

本文将风电机组列为不可调度成员，燃气机组、储能设备与可中断负荷则被列为可调度成员，这两种类型的预测偏差分别具有风险规避性和风险偏好性。根据效用理论^[20]，设风险函数为 f_n ，效用函数为 $N(f_n)$ 。当出现预测误差时，不可调度成员的效用将降低，由此，选用出力预测误差作为不可调度成员的风险函数 f_n^1 ，并选用风险规避型指数效用函数 $N(f_n^1)$ ：

$$f_n^1 = 1 - \frac{1}{TN_1} \sum_{n \in N_1} \sum_{t \in T} \frac{|P_{nt} - P'_{nt}|}{P_{nt}} \quad (25)$$

$$N(f_n^1) = \frac{e^{[1 - \exp(-f_n^1)]}}{e - 1} \quad (26)$$

式中： N_1 为不可调度成员总数； n 为 VPP 各成员； P_{nt} 、 P'_{nt} 分别为不可调度成员在 t 时刻的实际值和预测值。

可调度成员更容易从风险中获利，把可调度成员的误差调节能力视为风险函数 f_n^2 ，并选用风险偏好型指数效用函数 $N(f_n^2)$ ：

$$f_n^2 = \frac{1}{E_n^2} \frac{1}{TN_2} \sum_{n \in N_2} \sum_{t \in T} |P_{nt} - P'_{nt}| \quad (27)$$

$$N(f_n^2) = \exp(f_n^2) \quad (28)$$

式中： E_n^2 为可调度成员的最大调节容量； N_2 为可调度成员总数。

因此可得到各成员风险水平为

$$\varphi_n = \frac{N(f_n)}{\left[\sum_{n \in N_1} N(f_n^1) + \sum_{n \in N_2} N(f_n^2) \right]}, N_1 + N_2 = N \quad (29)$$

2) 收益贡献。

在收益分配时，不仅要考虑到边际贡献，而且还要考虑到各个成员对 VPP 整体的贡献。本文将分布式能源在各组合下参与前后收益提升量与 VPP 整体收益提升量之比定义为收益贡献

$$\chi_n = \sum_S \frac{|R(S) - R(S - \{n\})|}{R(N) - \sum_{n \in N} R(\{n\})} \quad (30)$$

式中： $R(\{n\})$ 为成员 n 不合作时的个体收益。

3) 成员吸引力。

在收益分配时，不仅要考虑风险水平和收益贡献，还需要考虑分配策略对联盟中所有成员的吸引力。本文定义联盟中的成员吸引力为成员 n 拒绝合作时其他成员的人均损失与成员 n 的损失之比。人均损失比越小，分配方式越稳定，对成员参与到联盟的吸引力越大。

$$\phi_n = \frac{1}{|S|-1} \frac{\sum_{m \in \{S-\{n\}\}} R_m - R(S-\{n\})}{R_n - R(\{n\})} \quad (31)$$

3.2.2 综合改进因子

成员 n 的风险水平、收益贡献、成员吸引力基于组合赋权法^[21]进行选取，三者收益分配中的所占权重分别为 η_1 、 η_2 和 η_3 ，且 $\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1$ 。VPP内不同成员承担了不同程度的风险，权重因子 η_1 反映了考虑风险承担在收益分配中的重要作用；收益贡献是衡量各成员对VPP整体收益贡献程度的重要指标，投入更多资源的成员可能在收益方面做出更大的贡献， η_2 反映了收益贡献在收益分配中的重要作用；成员吸引力是指各成员对参与到VPP的吸引程度，吸引力越大，分配方式越稳定，因为相对于风险水平和收益贡献来说，成员吸引力对于收益分配的影响程度较小，所以 η_3 取值一般偏小。本文在后文仿真过程中取 $\eta_1 = \eta_2 = 0.4$ ， $\eta_3 = 0.2$ 。各影响因素修正值为影响因素减去传统Shapley值法所考虑的成员风险，表示为：

$$\begin{cases} \Delta\varphi_n = \varphi_n - 1/N \\ \Delta\chi_n = \chi_n - 1/N \\ \Delta\phi_n = \phi_n - 1/N \end{cases} \quad (32)$$

进一步求得成员 n 的综合改进因子为：

$$\Delta M_n = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3] [\Delta\varphi_n \quad \Delta\chi_n \quad \Delta\phi_n]^T \quad (33)$$

进而可得到修正后成员 n 的改进分配结果 R_n' 。因此，改进Shapley值法的收益分配流程如图2所示。

4 算例分析

4.1 模型求解

本文构建了基于条件风险价值的虚拟电厂优化运行与收益分配模型，整体求解步骤的流程如图3所示。在优化运行阶段，得到了不同风险水

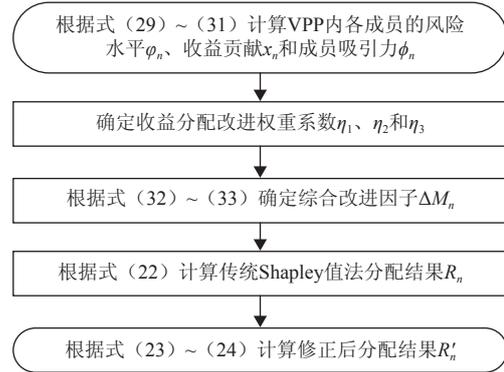


图2 基于改进Shapley值法的收益分配流程
Fig. 2 Profit allocation process based on improved Shapley value method

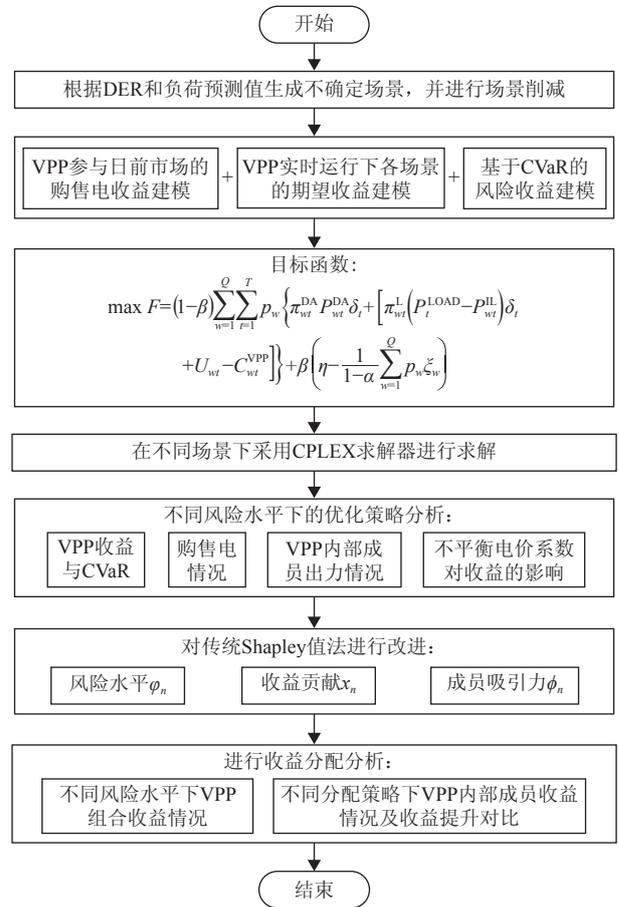


图3 总步骤流程图

Fig. 3 Flowchart of overall process

平下VPP收益和CVaR、购售电情况、VPP内部成员参与市场竞争的出力情况及不平衡电价系数对收益的影响，并将结果传递到收益分配阶段。分配阶段在考虑多种因素的基础上构造综合改进因子，修正了Shapley值法，并对收益进行了二次调整，从而得到考虑VPP内部成员风险水平、

收益贡献和成员吸引力的分配结果。

4.2 算例描述

本文选用某地区的一个 VPP 作为仿真算例，其内部包括了风电机组、燃气机组、储能设备和可中断负荷 4 类 DER 成员。其中，风电机组额定容量为 6 MW，维护成本系数为 29.6 元/MW；燃气机组参数如表 1；储能设备参数如表 2，初始

能量状态为 2 MW·h，充放电成本系数为 84.3 元/MW；可中断负荷上下限分别为 1 MW、2.5 MW， a_{IL} ， b_{IL} 分别为 7 元/MW²，630 元/MW。正负不平衡电价系数分别为 0.9、1.1；本文选取置信水平 $\alpha=0.95$ ；VPP 内部负荷曲线、供电电价及日前电价模拟如图 4 所示；经过场景生成与削减选择 5 组等概率场景作为风电出力场景，如图 5 所示。

表 1 燃气机组参数

Table 1 Parameters of gas turbine

| 最大/最小输出功率/MW·h | 向上/向下爬坡率/MW·h | 最小开/关机时间/h | 初始开/关机时间/h |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------|
| 5.67/2.5 | 3/3 | 2/2 | 0/1 |
| $a_{GT}/(\text{元}/\text{MW}^2)$ | $b_{GT}/(\text{元}/\text{MW})$ | $c_{GT}/\text{元}$ | |
| 234 | 267 | 200 | |

表 2 储能设备参数

Table 2 Parameters of energy storage equipment

| E_{\max} /MW·h | η_{out} | η_{in} | P_{\max}^{in} /MW | P_{\max}^{out} /MW | $\zeta_{\text{min}}^{\text{SOC}}$ | $\zeta_{\text{max}}^{\text{SOC}}$ |
|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 0.8 | 0.8 | 3 | 3.2 | 0.1 | 0.9 |

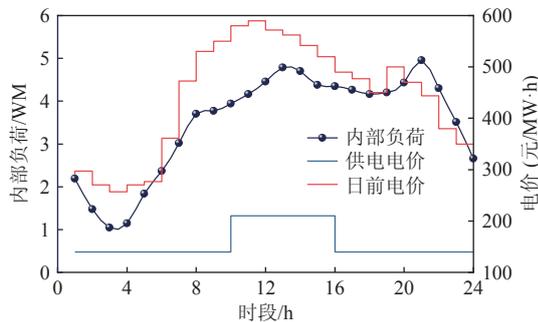


图 4 VPP 内部负荷，供电电价及日前电价曲线
Fig. 4 VPP internal load, supply prices and day-ahead prices curve

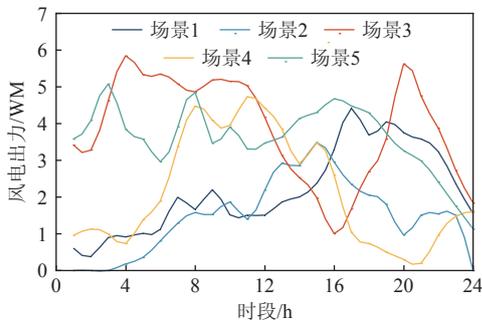


图 5 风电出力场景
Fig. 5 Wind power output scenario

4.3 VPP 收益与 CVaR 分析

图 6 对不同风险水平下 VPP 收益与 CVaR 进

行了描绘。由图中可知，随着风险系数 β 逐步增大，VPP 收益与 CVaR 值逐步降低。这是由于 VPP 的调度策略在风险规避水平较高时趋向于保守，通过与电网交易减少风电机组发电量，以降低不确定风险，从而导致电网买入量的增加和整体收益的降低。换言之，在规避风险时，VPP 会以较少且稳定的收益来换取更少的风险。这进一步表明了 VPP 运营策略的灵活性，可以根据不同的风险水平进行优化调整，以实现最佳的收益与风险平衡。

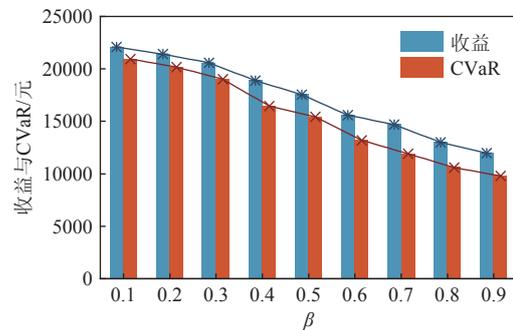


图 6 VPP 收益与 CVaR 分析
Fig. 6 VPP profits and CVaR analysis

4.4 VPP 购售电功率

图 7 展示了风险系数 β 分别为 0.1、0.5 和 0.9 时虚拟电厂在市场中的购售电情况。 $\beta=0.1$ ，表

示在风险评估中不太关注可能出现的极端风险事件, VPP的调度策略更倾向于在高风险环境中追求更高的收益, 此时, VPP在3—5时段向市场购买电能; $\beta=0.5$, 表示在风险评估中对一般情况和极端情况的关注相对均衡, 此时, VPP在2—6时段与23—24时段向市场购买电能; $\beta=0.9$, 表示在风险评估中更加关注极端情况下的损失, 以便更全面地评估VPP在市场竞争中的潜在风险, VPP的调度策略更倾向于保守, 此时, VPP在1—8时段和22—24时段向市场购买电能。可知, VPP在电价较低时段从日前市场买电, 在日内阶段, VPP成员根据市场电价确定其运行状况, 低价时售出少量电能, 高价时售出大量电能, 从而达到总体收益最大化。随着风险系数 β 逐步增大, VPP的购电量逐渐增多, 售电量逐渐减少。

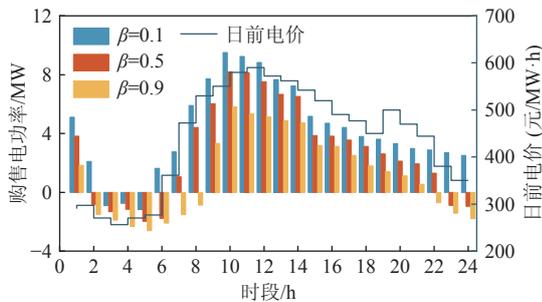


图7 VPP各时段购售电功率

Fig. 7 VPP purchased and sold power by time period

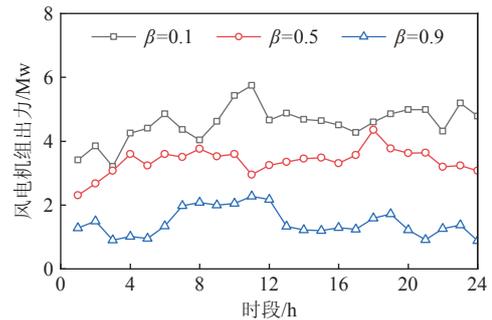
4.5 VPP内部成员在市场竞争中的出力情况

VPP内部成员在风险系数 β 分别为0.1、0.5和0.9时的出力情况如图8所示。从图中可以看出, 在风险系数 β 较小的情况下, 风电机组的发电量处于较高水平, 且随机波动性较高。随着风险系数 β 升高, 风电机组出力逐步下降, 波动性也随之减弱。

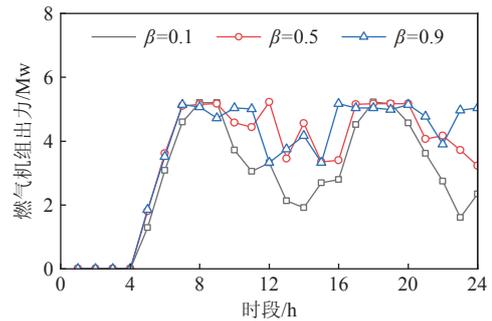
燃气机组发电主要集中在高价期, 随着风险系数增加, 发电量也随之增加。由于1—6时段和14—16时段的电价水平较低, 储能设备在此时充电, 而8—12时段和17—20时段电价较高时, 储能设备通过放电从而达到套利的目的。在1—6时段和22—24时段电价较低时, 可中断负荷需求量较大, 其出力随 β 增大而增大。风险规避水平越高, VPP更愿意让可调度成员参加市场竞争, 以获取更多的收益。

4.6 不平衡电价系数对VPP收益的影响

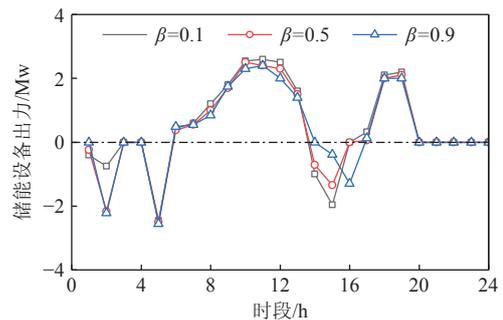
图9为不同风险水平下的不平衡电价系数对



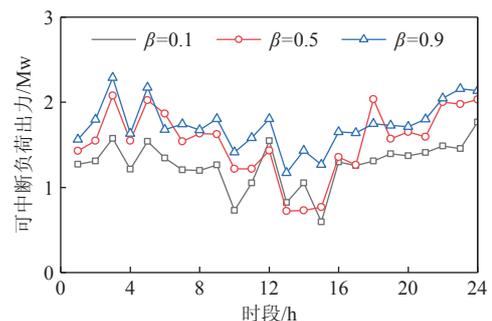
(a) 风电机组出力



(b) 燃气机组出力



(c) 储能设备出力



(d) 可中断负荷出力

图8 不同风险水平下VPP内部成员出力情况
Fig. 8 VPP internal members' output at different risk levels

VPP收益的影响。随着不平衡电价系数和基准值($r_{wt}^+ = r_{wt}^- = 1$)之差的增大, VPP在正不平衡出力状态下的结算电价相比日前电价逐步降低, 在负不平衡出力状态下所受惩罚电价相比日前电价

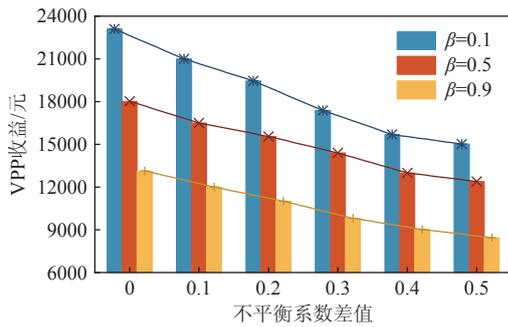


图 9 不同不平衡系数差值下的 VPP 收益

Fig. 9 VPP profits with different deviation values of imbalance coefficient

逐步升高。此外，为了避免超出竞标值而引起的风险，VPP 出力通常会尽可能保持在竞标值的左右，导致收益逐步下降。并且随着风险规避程度的提高，VPP 的收益也会相应地减少。

4.7 收益分配策略分析

将风电机组、燃气机组、储能设备和可中断负荷按 1~4 编号并进行组合，不同组合情况如表 3，不同风险系数下 VPP 组合收益情况如图 10 所示。其中，各成员在市场上独立交易所取得的收益与其以 VPP 的形式参与市场交易所带来的收益相比，二者之间差异较大。另外由图 10 可知，风险系数 β 分别为 0.1、0.5 和 0.9 时，组成 VPP 均能提高整体收益。从中可以得出，即使 VPP 处于较高的风险规避水平之下，通过分布式能源的合作，也可以获得更多的收益。

表 3 VPP 组合情况

Table 3 VPP portfolio scenario

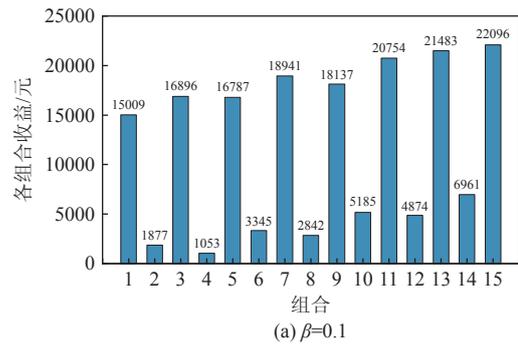
| 组合 | s | 组合 | s | 组合 | s |
|----|-------|----|---------|----|-----------|
| 1 | {1} | 6 | {2,3} | 11 | {1,2,4} |
| 2 | {2} | 7 | {1,2,3} | 12 | {3,4} |
| 3 | {1,2} | 8 | {4} | 13 | {1,3,4} |
| 4 | {3} | 9 | {1,4} | 14 | {2,3,4} |
| 5 | {1,3} | 10 | {2,4} | 15 | {1,2,3,4} |

为直观反映风险水平、收益贡献和成员吸引力在收益分配的影响，对 VPP 内部各成员采用以下 3 种分配策略进行收益分配，不同分配策略下 VPP 内部成员收益情况如表 4 所示。

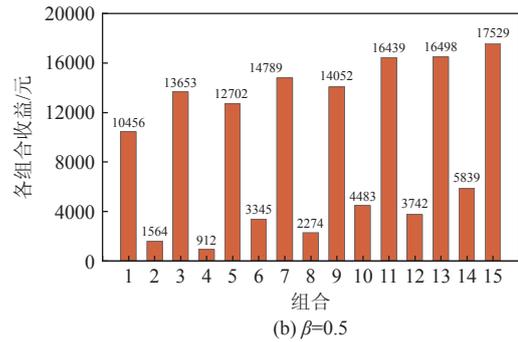
策略 1：独立交易；

策略 2：Shapley 值法；

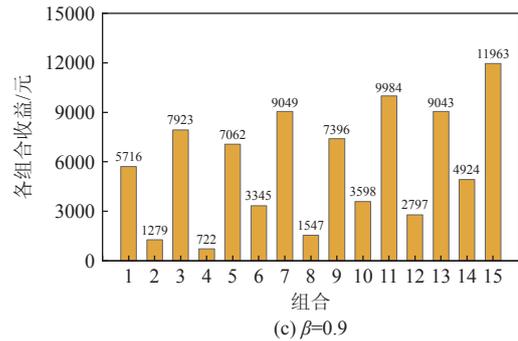
策略 3：考虑风险水平、收益贡献和成员吸引力对分配结果影响的改进 Shapley 值法，各因



(a) $\beta=0.1$



(b) $\beta=0.5$



(c) $\beta=0.9$

图 10 不同风险水平下 VPP 组合收益

Fig. 10 VPP portfolio profit at different risk levels

素权重依次为 0.4、0.4、0.2。

由表 4 可知，通过合作运行，整体收益和个体收益都可以普遍提升。采用改进 Shapley 值法分配时，考虑了风险水平，因此与使用 Shapley 值法相比，风电机组的收益会有所下降。然而，燃气机组、储能设备和可中断负荷作为风险偏好型的可调度成员，在应对风险的过程中能够获得更多收益。因此，采用改进 Shapley 值法分配能够获得更多的收益。此外，当风险系数增大时，VPP 各成员收益越来越小；反之，当 VPP 倾向风险偏好时，各成员的收入会相应提高。图 11 更加直观地展示了 3 种分配策略下 VPP 内部各成员的分配结果。

在图 12 中，进一步比较了 Shapley 值法和改进 Shapley 值法 2 种分配策略的收益提升情况。

表4 不同分配策略下VPP内部成员收益
Table 4 VPP internal member profit under different allocation strategies

| 分配策略 | 风险系数 | 风电机组 | | | 燃气机组 | | | 储能设备 | | | 可中断负荷 | | |
|-------------|------|-------|--------|----------|------|--------|----------|------|--------|----------|-------|--------|----------|
| | | 收益/元 | 收益增量/元 | 收益提升比例/% | 收益/元 | 收益增量/元 | 收益提升比例/% | 收益/元 | 收益增量/元 | 收益提升比例/% | 收益/元 | 收益增量/元 | 收益提升比例/% |
| 独立交易 | 0.1 | 15009 | — | — | 1877 | — | — | 1053 | — | — | 2842 | — | — |
| | 0.5 | 10456 | — | — | 1564 | — | — | 912 | — | — | 2274 | — | — |
| | 0.9 | 5716 | — | — | 1279 | — | — | 722 | — | — | 1547 | — | — |
| Shapley值法 | 0.1 | 15913 | 904 | 6.0 | 2018 | 141 | 7.5 | 1182 | 129 | 12.2 | 2983 | 141 | 5.0 |
| | 0.5 | 12214 | 1758 | 16.8 | 1686 | 122 | 7.8 | 1029 | 117 | 12.8 | 2420 | 146 | 6.4 |
| | 0.9 | 7874 | 2158 | 37.8 | 1520 | 241 | 18.2 | 835 | 113 | 15.6 | 1734 | 187 | 12.1 |
| 改进Shapley值法 | 0.1 | 15454 | 445 | 2.9 | 2194 | 317 | 16.9 | 1239 | 186 | 17.7 | 3209 | 367 | 12.9 |
| | 0.5 | 12175 | 1719 | 16.4 | 1778 | 214 | 13.7 | 1061 | 149 | 16.3 | 2515 | 241 | 10.6 |
| | 0.9 | 8072 | 2356 | 40.4 | 1447 | 168 | 12.5 | 788 | 66 | 9.1 | 1656 | 109 | 7.0 |

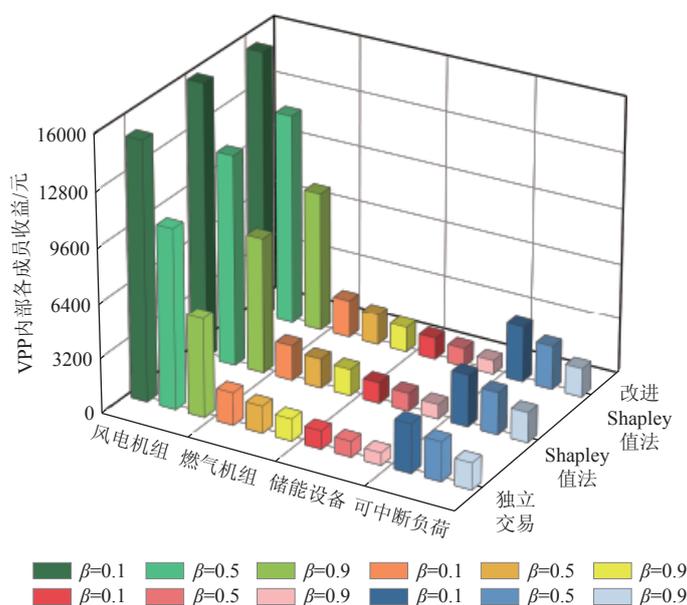


图11 VPP成员收益分配结果

Fig. 11 VPP member profit allocation results

在考虑成员吸引力的情况下，风险系数愈高，风电机组波动风险愈小，反映成员风险水平的权重也就愈大。风电机组作为日前市场重要组成部分，对VPP的整体收益贡献最大，其收益贡献也相对较高，因此，在风险系数较大的情况下，采用改进Shapley值法进行收益分配，相较于Shapley值法，能够实现更大的收益提升。当风险系数减小时，不可调度成员波动风险随之上升，燃气机组、储能设备和可中断负荷作为可调度成员，能够有效地调整VPP在市场上的风险，促进可再生能源的消纳，因此，在风险系数较小的情况下，可调度成员的风险水平的权重较大，获利空间更大，

采用改进Shapley值法进行收益分配能够实现更大的收益提升。

综合来看，改进Shapley值法在收益分配时偏向于在一定范围内给予能够帮助应对VPP面临风险，提升收益的成员更多的经济性鼓励。采用改进Shapley值法所得的收益分配结果相比于Shapley值法更加公平合理，对维护VPP联盟的稳定具有重要意义。

5 结论

本文基于CVaR理论构建了VPP的优化运行模型，求出不同风险水平下VPP的运营策略和收

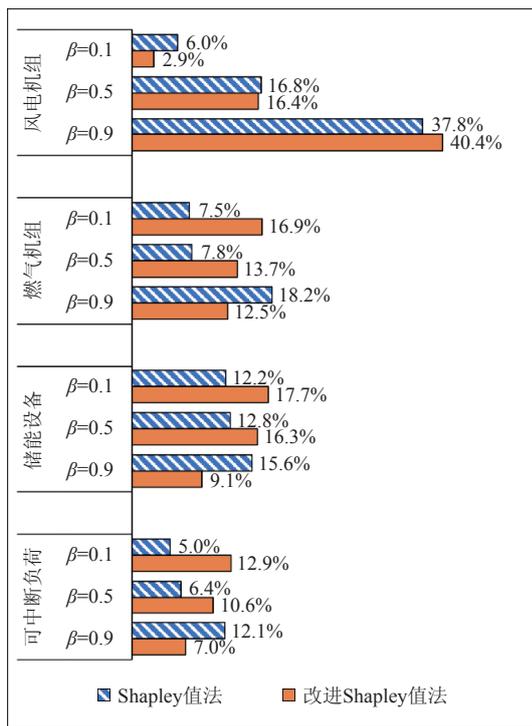


图 12 Shapley 值法和改进 Shapley 值法分配后 VPP 成员收益提升对比

Fig. 12 Comparison of VPP members' profit enhancement after Shapley value method and improved Shapley value method allocation

益；并从 VPP 成员视角出发，综合考虑各成员的风险水平、收益贡献和成员吸引力，提出了一种改进 Shapley 值法的 VPP 成员收益分配模型，提高了收益分配的公平性与合理性。

VPP 的收益和风险与投资组合理论中风险越高回报越高，风险越低回报越低的特征相一致，因此 VPP 运行人员可以按照自己的风险偏好来权衡收益与风险的关系。VPP 的购售电情况与日前电价紧密关联，购电行为多发生在日前的低价时段，售电行为多出现在日前的高价时段，以达到总体收益最佳。不同风险偏好程度会对不可调度成员出力造成较大影响，可调度成员可以通过电价差来均衡不可调度成员的出力波动，使 VPP 的收益最大化。随着不平衡系数差值的逐渐增大，VPP 收益逐渐降低。风电机组具有高风险、高收益的特点，VPP 需要将其与燃气机组、储能设备等可调度成员进行组合，方能达到收益最大化。VPP 通过对各类资源进行整合与优化，可以充分利用这些资源之间的互补性，获得较大的收益提升。

参考文献

- [1] KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(2): 794–806.
- [2] NOSRATABADI S M, HOOSHMAND R A, GHOLIPOUR E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 341–363.
- [3] 赵波, 汪湘晋, 张雪松, 等. 考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3284–3295.
ZHAO Bo, WANG Xiangjin, ZHANG Xuesong, *et al.* Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284–3295 (in Chinese).
- [4] 赵冬梅, 殷加玦. 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.
ZHAO Dongmei, YIN Jiafu. Fuzzy random chance constrained preemptive goal programming scheduling model considering source-side and load-side uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(05): 1076–1085(in Chinese).
- [5] NGUYEN H T, LE L B, WANG Z. A bidding strategy for virtual power plants with the intraday demand response exchange market using the stochastic programming[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3044–3055.
- [6] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(03): 753–761.
LUI Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, *et al.* Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(03): 753–761(in Chinese).
- [7] EMARATI M, KEYNIA F, RASHIDINEJAD M. A two-stage stochastic programming framework for risk-based day-ahead operation of a virtual power plant[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(3): e12255.
- [8] RIVEROS J Z, BRUNINX K, PONCELET K, *et al.* Bidding strategies for virtual power plants considering CHPs and intermittent renewables[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 103: 408–418.

- [9] 孙晶琪, 王愿, 郭晓慧, 等. 考虑环境外部性和风光出力不确定性的虚拟电厂运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(08): 50-59.
SUN Jingqi, WANG Yuan, GUO Xiaohui, *et al.* Optimal operation of virtual power plant considering environmental externality and output uncertainty of wind and photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(08): 50-59(in Chinese).
- [10] ZHANG Y, LIU F, WANG Z, *et al.* Robust scheduling of virtual power plant under exogenous and endogenous uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(2): 1311-1325.
- [11] BARINGO A, BARINGO L, ARROYO J M. Day-ahead self-scheduling of a virtual power plant in energy and reserve electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(3): 1881-1894.
- [12] 卫志农, 陈好, 黄文进, 等. 考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(04): 39-46.
WEI Zhinong, CHEN Yu, HUANG Wenjin, *et al.* Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(04): 39-46(in Chinese).
- [13] 李雅婷, 唐家俊, 张思等. 考虑多重不确定性因素的售电公司购电决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(07): 33-41.
LI Yating, TANG Jiajun, ZHANG Si, *et al.* Decision-making model of electricity procurement and sale for electricity retailers considering multiple uncertain factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(07): 33-41(in Chinese).
- [14] TAN Z, LI H, JU L, *et al.* Joint scheduling optimization of virtual power plants and equitable profit distribution using shapely value theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018.
- [15] 胡殿刚, 刘毅然, 王坤宇, 等. 多商业型虚拟发电厂联合竞标及分配策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(05): 1550-1557.
HU Diangang, LIU Yiran, WANG Kunyu, *et al.* Joint bidding and distribution strategies for multiple commercial virtual power plants[J]. Power System Technology, 2016, 40(05): 1550-1557(in Chinese).
- [16] 郭红霞, 高瑞, 杨莘. 基于条件风险价值的微电网现货市场两阶段调度 [J]. 电网技术, 2019, 43(08): 2665-2674.
GUO Hongxia, GAO Rui, YANG Ping. Two-stage dispatch of microgrid based on CVaR theory under electricity spot market[J]. Power System Technology, 2019, 43(08): 2665-2674(in Chinese).
- [17] 陈星莺, 郁清云, 谢俊, 等. 基于利用 Aumann-Shapley 值分摊网损和排放减少量的 DLMP 计算研究 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(04): 17-23.
CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, *et al.* DLMP calculation based on power loss and emission reduction allocation using Aumann-Shapley method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(04): 17-23(in Chinese).
- [18] CHENG Y, FAN S, NI J, *et al.* An innovative profit allocation to distributed energy resources integrated into virtual power plant[C]//International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). IET, 2015: 1-6.
- [19] 陆丹, 袁越. 基于故障树蒙特卡洛模拟法的孤岛微电网薄弱环节识别 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(04): 38-44.
LU Dan, YUAN Yue. Weak part identification based on fault-tree Monte Carlo simulation for islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(04): 38-44(in Chinese).
- [20] 麻秀范, 余思雨, 朱思嘉, 等. 基于多因素改进 Shapley 的虚拟电厂利润分配 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 585-595.
MA Xiufan, YU Siyu, ZHU Sijia, *et al.* Profit allocation to virtual power plant members based on Improved Multi-factor Shapley value method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 585-595(in Chinese).
- [21] 陈云翔, 董骁雄, 项华春, 等. 基于信息熵的群组聚类组合赋权法 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(06): 142-146.
CHEN Yunxiang, DONG Xiaoxiong, XIANG Huachun, *et al.* Method for combination weighting experts based on information entropy and cluster analysis[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(06): 142-146(in Chinese).

收稿日期: 2023-07-24

作者简介:

李新聪 (1990), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划和配电网自动化工作, E-mail: 19117165496@163.com;

黄滢 (1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行、虚拟电厂, E-mail: 2116506020@qq.com;

李振坤 (1982), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网规划及运行控制、分布式电源并网及微电网、主动配电网技术等, E-mail: lzk021@163.com;

袁明翰 (1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: yuan49545@126.com;

季亮 (1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: jihome2002@sina.cn.