

基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度研究

李文竹¹, 杨勇², 周治伊², 彭道刚¹

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了应对当下高比例可再生能源和大规模电动汽车的接入给虚拟电厂双侧运行带来的挑战, 提出了一种改进的 Shapley 值分配方法用于解决联盟收益分配问题。以虚拟电厂为中介, 分别构建了以联盟收益最大化为目标的“需”侧用户-虚拟电厂联盟和“供”侧虚拟电厂-主动配电网联盟, 再将双侧的合作博弈模型联系起来, 构成基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度模型。利用改进的 Shapley 值进行联盟收益再分配, 从而达到用户、虚拟电厂和主动配电网三方主体收益的最大化, 最后进行实验验证。结果表明: 该模型使三方主体收益相较于未合作博弈和任一单层合作博弈分别提高了 15.64%、6.95% 和 6.949%, 提高了系统运行的经济性。

关键词: 虚拟电厂; 双层合作博弈; 供需互动; 改进 Shapley 值; 能量管理

中图分类号: TM734

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.021

[引用本文格式] 李文竹, 杨勇, 周治伊, 等. 基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 163-171. LI Wen-zhu, YANG Yong, ZHOU Zhi-yi, et al. Research on rolling optimal scheduling of virtual power plant based on two-layer cooperative game[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 163-171.

Research on Rolling Optimal Scheduling of Virtual Power Plant based on Two-layer Cooperative Game

LI Wen-zhu¹, YANG Yong², ZHOU Zhi-yi², PENG Dao-gang¹

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090;

2. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou, China, Post Code: 730070)

Abstract: In order to cope with the challenges brought by the current high proportion of renewable energy and the access of large-scale electric vehicles to the bilateral operation of virtual power plants, an improved Shapley value distribution method is proposed to solve the problem of alliance revenue distribution. Taking the virtual power plant as the intermediary, the "demand" side user-virtual power plant alliance and the "supply" side virtual power plant-active distribution network alliance with the goal of maximizing the alliance revenue are constructed respectively. Then, the two-sided cooperative game model is connected to form a rolling optimal scheduling model of virtual power plant based on two-layer cooperative game. The improved Shapley value is used to redistribute the alliance revenue, so as to maximize the revenue of users, virtual power plants and active distribution networks, and the test is verified. The results show that the proposed model makes the revenue of the three parties respectively increase by 15.64%, 6.95% and 6.949% compared with the uncooperative game and any single-layer cooperative game, which improves the economy of system operation.

Key words: virtual power plant, two-layer cooperative game, supply and demand interaction, improved Shapley value, energy management

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52272220002Q)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52272220002Q)

作者简介: 李文竹(1997-), 女, 上海电力大学硕士研究生。

通讯作者: 彭道刚(1977-), 男, 上海电力大学教授。

引 言

随着“碳达峰”与“碳中和”目标的提出,可再生能源在供给侧所占的比重不断加重,构建以新能源为主体的新型电力系统成为当前电力行业的发展趋势^[1]。但高比例的可再生能源和大规模电动汽车接入,对系统的安全平稳运行提出了新的挑战。目前,实现供需双侧的“互动”已成为提高可再生能源利用率和维持电网安全稳定运行的有效方法之一^[2]。

包含高比例可再生能源和大规模电动汽车的虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)作为区域内多种能源的聚合体,近些年广泛接入主动配电网^[3](Active Distribution Network, ADN)。VPP对内以其互通互联的能源架构实现信息和能源的双向流动,通过调节内部的出力负荷水平达到“源-网-荷”的平衡^[4-5],对外可以通过多个虚拟电厂之间互动的方法来灵活并入 ADN^[6-7]。

随着电力行业不断市场化,VPP等主体之间若仅以自身收益最大化为目标则会出现利益冲突,若按照固有的主从关系运行则会大大降低市场的灵活性,因此需要构建各主体之间的合作博弈关系^[8]。目前,针对合作博弈在电力系统的应用情况主要分为两类,一类是从供给侧角度出发,另一类从需求侧角度出发。张海宁等人^[9]建立风-光-储之间的合作联盟,保障供给侧联盟收益的稳定性。邱革非等人^[10]建立了多虚拟电厂与电网之间的博弈联盟,提出了博弈电价出清模型。钟永洁等人^[11]建立了多个区域综合能源系统之间的合作博弈模型,与配电网构成主从博弈关系,通过博弈得出多个区域之间的能量流动。文献[12-13]在文献[11]的基础上,不仅在供给侧建立微网-配网联盟,同时还考虑了需求侧响应,在保证联盟收益的前提下加强了配电网与需求侧之间的关系。程杉等人^[14]将电动汽车与代理商之间看作联盟整体,在保证联盟整体收益的前提下得出电动汽车与代理商之间的交易电价。崇志强等人^[15]将可供可耗的生产性消费者群体看作博弈联盟,采用端对端交易方式制定交易电价,避免了经济冲突。以上文献充分证明了合作博弈理论在电力系统应用的可行性,但还未从多层合作博弈

之间的配合方面开展研究。

为保证合作博弈联盟的稳定性,对联盟收益的合理分配至关重要。文献[12]将 Shapley 值分配中表示联盟后收益增加的部分按照交互功率值进行分配。闫庆友等人^[16]提出了利用 Shapley 值对联盟收益进行分配。文献[17-18]在文献[16]的基础上考虑到联盟成员的个体贡献,加入权重因子对原有的 Shapley 值进行改进,维持了联盟的稳定性。以上研究说明了 Shapley 值在联盟收益分配中的有效性,但还存在分配弊端,在解决实际问题时需要根据成员关系进行再分配。

本文在上述研究的基础上,以 VPP 作为中介,充分利用其与用户和 ADN 的合作关系,在双侧分别建立合作博弈模型,共同构成基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度模型,旨在通过上下双层合作博弈模型的滚动运行,动态制定电价,实现用户、VPP 和 ADN 三方主体收益的最大化,为未来考虑供需互动的优化运行问题提供参考。

1 合作博弈模式

在原有的电力市场中,VPP 双侧固定的电价机制限制了多方主体参与的灵活性和主动性。然而,当供需双侧形成强大的联盟体系时,各成员均以共同收益为目标,不仅提高了联盟收益和成员个人收益,同时加强了供需双侧的联系。

1.1 Shapley 值分配方法

Shapley 值分配法通过各成员对联盟整体收益的边际贡献率来进行收益分配,每个成员分配到的收益值为 Shapley 值。

假设联盟整体中包含 n 个成员,用集合 S 来表示, $S = \{1, 2, \dots, n\}$,其中包含了 2^n 个子联盟,联盟中各成员之间地位平等,无主次之分。联盟的形成必须满足两个条件: n 个成员联盟获得的收益大于成员单独收益的累加;每个成员的加入都给联盟增加收益,设函数 $U(S)$ 作为收益函数,满足 $U(S) - U(S - \{i\}) > 0$ 。

每位成员从联盟收益中分配到的收益为:

$$c(i) = \sum_{i \in S} \frac{(|S| - 1)!(n - |S|)!}{n!} [U(S) - U(S - \{i\})] \quad (1)$$

式中: $U(S - \{i\})$ —除去成员 i 后联盟收益, 元;
 $|S|$ —集合 S 中子集合的个数。

1.2 改进的 Shapley 值

在实际合作情况中, 联盟中成员的联系十分密切, 无法将成员当作完全平等、独立的个体, 因此贡献度大的成员理应获得联盟收益中较大的部分。定义成员 i 的收益贡献度为, 不同组合时成员 i 参与前后引起联盟的收益总增量与当下联盟形成前后收益总增量的比值, 即:

$$\alpha_i = \frac{c(i) - U(\{i\})}{\sum_S [U(S) - U(S - \{i\}) - U(\{i\})]} \quad (2)$$

进行归一化可得:

$$m_i = \alpha_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (3)$$

改进后成员 i 的收益用 $M(i)$ 来表示, 即:

$$M(i) = m_i U(\{i\}) \quad (4)$$

式中: m_i —归一化后的成员贡献度。

2 “需”侧用户 - VPP 优化策略

2.1 价格型需求响应

随着 VPP 中需求侧大规模电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 的加入, 其随机性大大增加, 称为柔性负荷, 与传统刚性负荷相比, 其用电需求对当下电价更敏感, 可调节的范围更大。将用电需求随着电价改变的过程称为价格型需求响应 (Price Demand Respond, PDR), 利用价格弹性系数来表征两者之间的关系, 即:

$$\varepsilon_{at} = \frac{\Delta P_{EV,a}}{P_{EV,a}^0} \bigg/ \frac{\Delta \rho_{s,t}}{\rho_{s,t}^0} \quad (5)$$

式中: ε_{at} — a 时刻电价对 t 时刻用户需求的影响程度, 称为互弹性系数; $P_{EV,a}^0, \Delta P_{EV,a}$ — a 时刻电动汽车原用电需求和响应后需求变化量, kW; $\rho_{s,t}^0, \Delta \rho_{s,t}$ — t 时刻 VPP 内原售电电价和电价变化量, 元。

电动汽车用户 t 时刻参与 PDR 响应后的用电需求可表示为:

$$P_{EV,t} = P_{EV,t}^0 \left(1 + \varepsilon_{tt} \frac{\Delta \rho_{s,t}}{\rho_{s,t}^0} + \sum_{a=1, a \neq t}^T \varepsilon_{at} \frac{\Delta \rho_{s,t}}{\rho_{s,t}^0} \right) \quad (6)$$

式中: $P_{EV,t}^0, P_{EV,t}$ —电动汽车用户原用电需求和 PDR 后的电量需求, kW; ε_{tt} — t 时刻电价对 t 时刻用户

需求的影响程度, 称为自弹性系数。

2.2 非合作博弈下运营模式

合作博弈建立在参与博弈双方单独收益的基础上, 在建立用户和 VPP 之间合作博弈联盟之前, 首先需要定义双方单独的运营模式。含大规模电动汽车的用户侧收益 F_{demand} 和 VPP 收益 F_{vpp} 均以收益最大为目标, 其目标函数分别为:

$$\max F_{\text{demand}} = \sum_{t=1}^T (P_{L,t} + \sum_{m=1}^M P_{EV,t}) \Delta \rho_{s,t} \Delta t \quad (7)$$

$$\max F_{\text{vpp}} = \sum_{t=1}^T (P_{L,t} + P_{EV,t}) (\rho_{s,t} - \rho_{b,t}) \Delta t \quad (8)$$

式中: $P_{L,t}$ — t 时刻用户侧传统用电需求, kW; $\rho_{s,t}, \rho_{b,t}$ — t 时刻 VPP 内部售电电价和购电电价, 元。

非合作博弈时, 越接近用电高峰, VPP 与用户之间的电量交互越大, 此时 VPP 的收益主要来源于内部购电电价和售电电价的差额; 需求侧用户的收益主要由 VPP 售电电价变化和自身用电需求决定, 其与 VPP 之间非合作关系, VPP 的定价过程中并不考虑需求侧用户的收益。

2.3 合作博弈下运营模式

提出“需”侧用户 - VPP 合作博弈模型, 用户和 VPP 构成联盟体系, 以共同收益 $F_{\text{vpp-de}}$ 最大为目标, 即:

$$\max F_{\text{vpp-de}} = F_{\text{vpp}} + F_{\text{demand}} \quad (9)$$

用户 - VPP 联盟的约束条件如下:

EVS 充电约束:

$$P_{EV,\min} \leq P_{EV,t} \leq P_{EV,\max} \quad (10)$$

式中: $P_{EV,\min}, P_{EV,\max}$ —电动汽车用户充电的电量上、下限, kW。

为保证市场稳定, VPP 内部购电电价和售电电价需要满足一定比例, 定价不能悬殊, 即电价约束为:

$$\Delta \rho_{s,t} \leq 0.2 \quad (11)$$

在调度时间内, 电动汽车参与 PDR 后用电总量不变, 即电量约束为:

$$\sum_{t=1}^T (P_{EV,t} - P_{EV,t}^0) = 0 \quad (12)$$

3 “供”侧 VPP-ADN 优化策略

3.1 非合作博弈下运营模式

在构成合作博弈联盟之前,首先需要定义 VPP 和供给侧 ADN 各自的运行模式。

VPP 以收益最大为目标,即:

$$\max F_{\text{vpp2}} = \sum_{t=1}^T \left[F_{\text{sell},t} - C_{\text{buy},t} - C_{\text{pv},t} - C_{\text{pw},t} - C_{\text{bes},t} \right] \Delta t \quad (13)$$

式中: $F_{\text{sell},t}$, $C_{\text{buy},t}$, $C_{\text{pv},t}$, $C_{\text{pw},t}$, $C_{\text{bes},t}$ — t 时刻 VPP 售电收益、VPP 购电成本、光伏发电成本、风力发电成本和储能系统使用成本,元。

其中,各项成本函数为:

VPP 售电收益:

$$F_{\text{sell},t} = (P_{\text{EV},t} + P_{\text{L},t}) (\rho_{\text{s},t} - \rho_{\text{b},t}) \quad (14)$$

VPP 购电成本:

$$C_{\text{buy},t} = P_{\text{g},t} \Delta \rho_{\text{b},t} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{g},t}$ — t 时刻 VPP 与 ADN 交互功率, kW; $\Delta \rho_{\text{b},t}$ — t 时刻 VPP 购电电价变化量,元。

可再生能源使用成本:

$$\begin{cases} C_{\text{pv},t} = P_{\text{pv},t} \alpha_{\text{pv}} \\ C_{\text{pw},t} = P_{\text{pw},t} \alpha_{\text{pw}} \\ C_{\text{bes},t} = |P_{\text{bes},t}| \alpha_{\text{bes}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{pv},t}$, $P_{\text{pw},t}$, $P_{\text{bes},t}$ — t 时刻 VPP 内光伏、风机和储能系统出力值, kW; α_{pv} , α_{pw} , α_{bes} — 光伏、风机和储能系统使用成本系数,元/kW。

ADN 同样以日内收益最大为目标,即:

$$\max F_{\text{ADN}} = \sum_{t=1}^T [F_{\text{gsell},t} - C_{\text{G},t}] \Delta t \quad (17)$$

式中: $F_{\text{gsell},t}$ — ADN 售电收益,元; $C_{\text{G},t}$ — 电网侧 t 时刻机组发电成本,元。

各项收益分别为:

$$\begin{cases} F_{\text{gsell},t} = \rho_{\text{b},t} P_{\text{g},t} \\ C_{\text{G},t} = AP_{\text{g},t}^2 + BP_{\text{g},t} + X \end{cases} \quad (18)$$

式中: A , B , X — ADN 侧发电成本系数,元/kW。

3.2 合作博弈下运营模式

合作博弈下的 VPP 和 ADN 共同构成联盟体系,以 VPP-ADN 联盟收益最大为目标,即为:

$$\max F_{\text{vpp-ADN}} = F_{\text{vpp2}} + F_{\text{ADN}} \quad (19)$$

VPP-ADN 收益函数包括以下约束:

功率平衡约束:

$$P_{\text{pv},t} + P_{\text{pw},t} + P_{\text{bes},t} + P_{\text{g},t} = P_{\text{EV},t} + P_{\text{L},t} \quad (20)$$

交互功率约束:

$$P_{\text{g},\min} \leq P_{\text{g},t} \leq P_{\text{g},\max} \quad (21)$$

式中: $P_{\text{g},\min}$, $P_{\text{g},\max}$ — 交互功率的上、下限, kW。

发电设备出力约束:

$$\begin{cases} P_{\text{pv},\min} \leq P_{\text{pv},t} \leq P_{\text{pv},\max} \\ P_{\text{pw},\min} \leq P_{\text{pw},t} \leq P_{\text{pw},\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{pv},\min}$, $P_{\text{pv},\max}$ — 光伏出力上、下限, kW; $P_{\text{pw},\min}$, $P_{\text{pw},\max}$ — 风机出力上、下限, kW。

储能装置容量约束:

$$\begin{cases} P_{\text{bes},\text{dis},\min} \leq P_{\text{bes},t} \leq P_{\text{bes},\text{ch},\max} \\ Soc_{\min} E_{\text{bn}} \leq E_{\text{bes},t} \leq Soc_{\max} E_{\text{bn}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{bes},\text{dis},\min}$, $P_{\text{bes},\text{ch},\max}$ — 储能系统充放电范围, kW; $E_{\text{bes},t}$, E_{bn} — 储能系统电量状态和额定容量, kW·h; $Soc_{\min}$, $Soc_{\max}$ — 储能系统荷电状态的上、下限,取 10% 和 90%。

同样,为了维持电力市场稳定,VPP 购电电价不能与原定价相差太大,即电价约束:

$$\Delta \rho_{\text{b},t} \leq 0.2 \quad (24)$$

提出的基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度模型按照供需角度分为上、下两层,以讨价还价为核心,以联盟收益最大化为目标,旨在通过不同合作博弈联盟之间的滚动运行实现多方主体收益的最大化。其整体架构如图 1 所示。

整个双层合作博弈模型运行的流程如下:

(1) VPP 制定初始购、售电电价作为初始均衡解,并将售电电价通知需求侧用户,需求侧用户根据电价水平决定自身用电需求;

(2) 下层用户与 VPP 构成用户 - VPP 联盟,以共同收益最大为目标开展合作博弈,直至达到博弈平衡,采用改进的 Shapley 值对联盟收益进行合理分配,得出博弈后的售电电价和用户用电需求量;

(3) 根据下层博弈得出的用户用电需求和售电电价,加上各风、光等可再生能源的出力预测情况,得出当下 VPP 内部负荷水平;

(4) VPP 与上层 ADN 构成 VPP-ADN 联盟,以共同收益最大为目标开展合作博弈,直至达到博弈平衡并采用改进的 Shapley 值进行收益分配,得出博弈后的购电电价和与 ADN 交互功率;

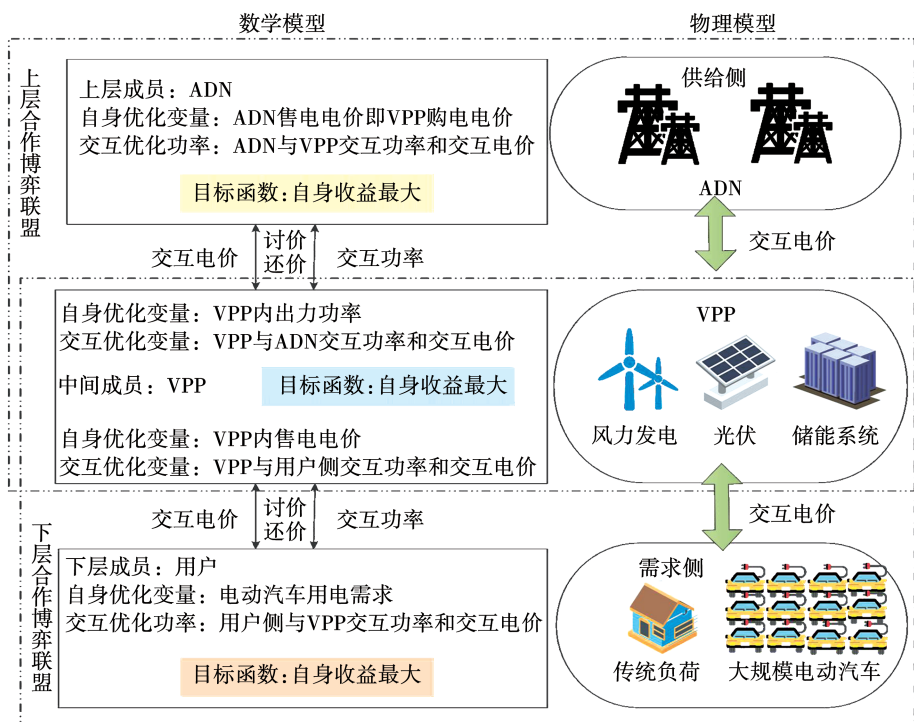


图 1 双层合作博弈的整体架构

Fig.1 Overall framework of two-layer cooperative game

(5) VPP 将上层制定的购电电价通知用户侧,在下层重新进行博弈,上、下层据此不断更新策略,直至达到双层模型均衡点,以下层售电电价更新变化稳定在极小的范围内作为均衡标准。

烟花算法是通过模拟烟花爆炸过程进行寻优,在处理寻优问题上具有较强的搜索能力。本文采用烟花算法进行求解,基于双层合作博弈的滚动优化调度流程如图 2 所示。

4 计算结果及分析

以某 VPP 为例,VPP 内有 600 kW 的光伏、2 台 300 kW 的风机、150 辆电动汽车和传统负荷,同时配置容量为 1 MW·h 的储能系统,共同构成一个能量供需互动、信息互通互联的 VPP。采取日前调度,调度单位时间间隔为 1 h,调度周期 $T=24$ h。VPP 内日前风、光、负荷预测曲线如图 3 所示。双侧出力参数和成本系数如表 1 所示。无双侧合作博弈前 VPP 采用分时电价,其初始售、购电电价如表 2 所示。

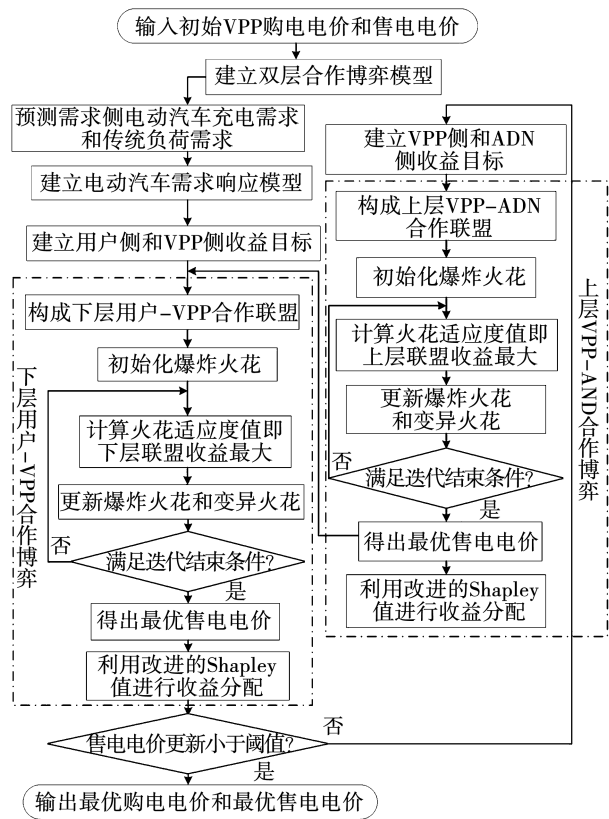


图 2 基于双层合作博弈的滚动优化调度流程图

Fig.2 Flow chart of rolling optimal scheduling based on two-layer cooperative game

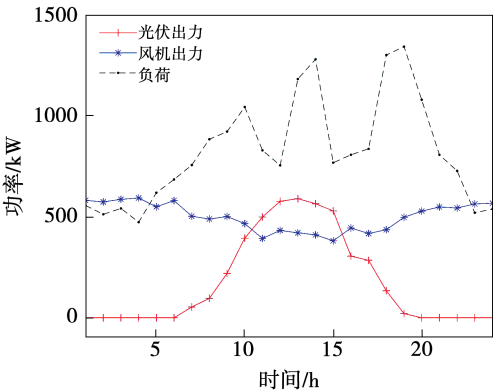


图3 风机、光伏、负荷预测曲线
Fig.3 Wind-PV- load forecast curves

表1 设备参数

Tab.1 Various equipment parameters

设备	出力下限/kW	出力上限/kW	成本系数/元·kW ⁻¹
光伏	0	600	0.009 06
风机	0	600	0.002 96
储能	-1 000	1 000	0.012 2
ADN	-1 500	1 500	$A=0.000\ 4$
	-1 500	1 500	$B=0.025$
	-1 500	1 500	$X=20$

表2 VPP 原始电价

Tab.2 VPP original electricity price

时段	时刻	售电价格/ 元·(kW·h) ⁻¹	购电价格/ 元·(kW·h) ⁻¹
峰时段	8:00 – 11:00	1.09	0.89
	13:00 – 15:00	1.09	0.89
	18:00 – 21:00	1.09	0.89
平时段	6:00 – 7:00	0.74	0.54
	11:00 – 13:00	0.74	0.54
	15:00 – 18:00	0.74	0.54
	21:00 – 23:00	0.74	0.54
谷时段	23:00 – 次日 6:00	0.47	0.27

4.1 下层合作博弈调度

为了验证合作博弈理论应用到电力调度过程中的有效性,设置不同策略对上述下层合作博弈效果进行分析:

- (1) 策略1:不考虑合作博弈,成员之间构成主从关系;
- (2) 策略2:考虑合作博弈,但不考虑 Shapley

- 值分配;
- (3) 策略3:考虑合作博弈,但仅考虑原 Shapley 值分配;
- (4) 策略4:考虑合作博弈且考虑改进 Shapley 值重新分配。

用户 – VPP 联盟的合作博弈后电价和负荷变化情况如图4和图5所示。

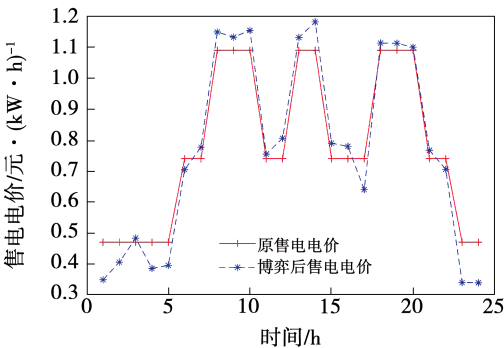


图4 电价变化情况
Fig.4 Changes in electricity prices

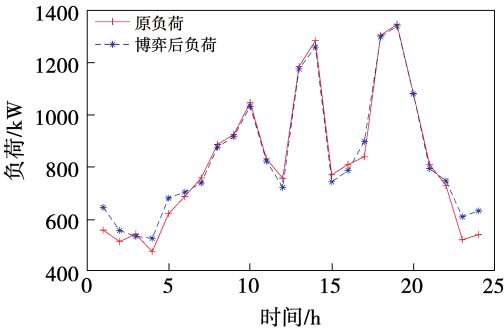


图5 负荷变化情况
Fig.5 Load changes

从图4和图5中可以看出,高峰时期售电电价较高,严重影响了用户侧的收益。但此时用电需求较大,较高的售电电价使VPP获利较大,且随着峰时段售电电价的进一步提高,用户侧会调整自身用电需求,通过减少用电需求量来增加自身收益。合作博弈的目标是取得上述过程的平衡点,经过双方部分让利,使用户 – VPP 联盟的整体收益达到最高。平时段电价较低,用户收益和VPP收益维持在相对稳定的平衡状态,此时售电电价和用户需求量较原来变化不大。谷时段需求侧用电量大幅降低,此时降低电价会促使用户侧调整用电量,用电量明显增

加,通过合作博弈达到稳定,使用户 - VPP 联盟的收益达到最大。

日内总收益如表 3 所示。根据表 3 中各方收益可以看出,未进行合作博弈时,在定价过程中仅以 VPP 收益最大为目标,不考虑用户侧,此时 VPP 收益较高而用户侧收益为零;策略 2 通过合作博弈后,用户侧收益和 VPP 侧收益均有所提高,整体联盟收益提高了 4.7%,体现了合作联盟模型的有效性。

表 3 用户 - VPP 联盟收益
Tab.3 User-VPP alliance revenue

策略	用户侧 收益/元	VPP 侧 收益/元	用户 - VPP 联盟 收益/元
1	0	3 961.983	3 961.983
2	65.258	4 086.282	4 151.540
3	94.778	4 056.762	4 151.540
4	140.462	4 011.078	4 151.540

策略 3 利用 Shapley 值法,根据边际贡献率进行收益分配。根据表 3 可以得出,VPP 不参与联盟时收益 $U\{1\}$ 为 3 961.983 元,用户不参与联盟时收益 $U\{2\}$ 为 0 元,而用户 - VPP 联盟收益 $U\{1,2\}$ 为 4 151.540 元。通过 Shapley 分配后可得出 VPP 与用户在联盟中分配到的收益为:

$$c\{1\} = \frac{0!1!}{2!}[U\{1\} - U\{0\}] + \frac{1!0!}{2!}[U\{1,2\} - U\{2\}] = 4\,056.762 \tag{25}$$

同理可计算出 $c\{2\}$ 为 94.778,与策略 2 相比,用户侧收益提高了 45.24%,VPP 收益降低了 0.72%。策略 4 采用了改进的 Shapley 值,根据成员对联盟收益的贡献进行了分配。可以看出,在分配过程中更大程度上通过牺牲了部分 VPP 侧收益使用户侧收益提高,但双方相对于策略 1 都有所提高,满足了参与合作博弈的目的。

4.2 双层合作博弈调度

为了验证上述基于双层合作博弈滚动优化调度模型的效果,本文设置不同的场景进行分析:

- (1) 场景 1:不构建任何联盟,三者之间为主从配合关系;
- (2) 场景 2:仅构建“需”侧用户 - VPP 合作博

- 弈模型,ADN 仅作为补给配合参与;
- (2) 场景 3:仅构建“供”侧 VPP - ADN 合作博弈模型,需求侧仅提供需求电量信息;
- (3) 场景 4:构建供需双侧的合作博弈滚动优化模型。

在上述 4 种场景下,VPP 内部定价情况如图 6 和图 7 所示。

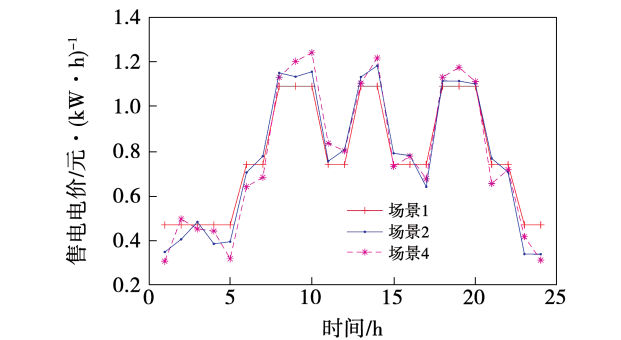


图 6 售电电价变化情况
Fig.6 Changes in electricity sale prices

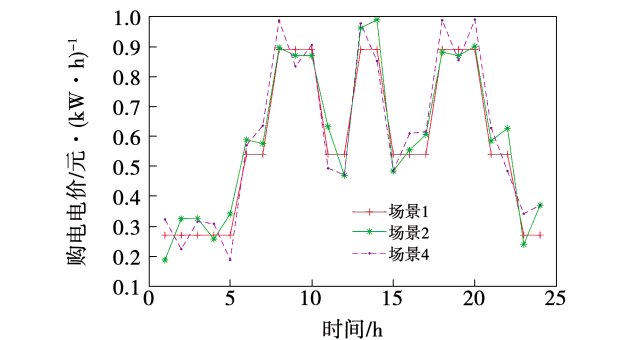


图 7 购电电价变化情况
Fig.7 Changes in electricity purchase prices

从图 6 售电电价的变化中可以看出,在峰时段,电价为主导因素,此时用电量较多,可以通过提高电价的方式提高联盟收益;在谷时段,用电量为主导因素,此时电价较低,降低电价可以通过需求响应的方式引导用户调整到此时段用电,从而达到提高联盟收益的目的。

从图 7 中购电电价变化可知,购电电价主要与 VPP 与 ADN 之间交互量有关。在峰时段电价高,VPP 内主要采用内部可再生能源和储能系统出力,交互量较少。为保证 VPP - 电网联盟整体收益目标,尤其是 ADN 的收益,此时购电电价较高。而在

低谷时段,为保证峰时段储能系统的状态,需要对 VPP 内部储能系统充电,交互量较大,为保证 VPP-ADN 联盟整体收益目标,尤其是 VPP 的收益,此时购电电价较低。

各部分收益情况如表 4 所示。由表 4 可以看出,场景 2 在场景 1 的基础上构成下层用户-VPP 联盟,用户侧收益提高了 65.258 元,VPP 收益降低了 375.841 元,通过牺牲部分 VPP 收益达到联盟收益的最大化,整体收益提高了 484.562 元,证明了下层联盟的有效性;场景 3 相较于场景 1,仅构成上层 VPP-ADN 联盟,用户侧仅提供需求,收益为零,此时上层联盟中 VPP 收益降低了 9.60%,ADN 收益提高了 41.14%,三者整体收益有大幅度提高,证明了上层联盟模型的有效性;场景 4 通过上、下两层的合作博弈联盟进行滚动优化,三方整体收益相较于场景 1,2,3 分别提高了 15.64%,6.95%和 6.949%,达到所有运行模式中的最高,从而证明了基于双层合作博弈的虚拟电厂供需滚动优化调度的有效性。

表 4 各场景下多主体收益对比

Tab.4 Comparison of multi-agent revenues under each scenario

场景	用户侧 收益/元	VPP 测 收益/元	ADN 收益/元	三方整体 收益/元
1	0	3 883.700	2 084.669	5 968.369
2	94.778	4 056.762	2 879.814	6 452.931
3	0	3 510.906	2 942.347	6 453.253
4	149.407	3 737.581	3 014.717	6 901.705

基于上述结论,取双层合作博弈下各分时段内售电电价和购电电价平均值作为该时段电价参考值,结果如表 5 所示,为将来广域 VPP 和多 VPP 互联运行提供参考。

表 5 VPP 内电价定价结果

Tab.5 Electricity pricing results within VPP

时段	购电电价/元·(kW·h) ⁻¹	售电电价/元·(kW·h) ⁻¹
峰时段	0.902	1.134
平时段	0.598	0.747
谷时段	0.250	0.385

5 结 论

本文提出了基于双层合作博弈的虚拟电厂滚动优化调度模型,验证结果表明:

(1) 仅“需”侧合作博弈时,整体收益相较于非合作博弈时提高了 4.7%,采用改进后的 Shapley 值重新分配后,通过牺牲部分 VPP 收益的方式平衡了用户侧的收益,证明了下层联盟的有效性。

(2) 仅“供”侧合作博弈时,VPP 侧和 ADN 收益相较于非合作博弈时提高了 9.6%和 41.4%,使整体联盟大幅度提高,证明了上层联盟的有效性。

(3) 当虚拟电厂供需双侧合作博弈之间滚动运行时,三方整体收益相较于无合作博弈和单层博弈表现出更好的经济性,分别提高了 15.64%,6.95%和 6.949%,达到所有运行模式中的最高,证明本文提出的基于双层合作博弈的滚动优化模型的有效性。

本文只针对单 VPP 与供需双侧之间的合作博弈,未来可在 VPP 集群之间合作博弈和多能源互联方面展开研究。

参考文献:

[1] 赵剑波,王 蕾.“十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 中国能源,2021,43(5):17-21.
ZHAO Jian-bo,WANG Lei. "14th Five-Year Plan" to build a new power system with new energy as the main body[J]. Energy of China,2021,43(5):17-21.

[2] HONG Ying-yi,CHANG Wen-chun,CHANG Yung-ruei,et al. Optimal sizing of renewable energy generations in a community micro-grid using Markov model[J]. Energy,2017,135:21-33.

[3] 卫志农,余 爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhi-nong,YU Shuang,SUN Guo-qiang,et al. Concept and development of virtual power-plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):1-9.

[4] 刘红岩,李明扬,梁 钰,等. 计及风火系统聚合特性的虚拟电厂经济调度研究[J]. 热能动力工程,2017,32(12):61-65,139.
LIU Hong-yan,LI Ming-yang,LIANG Yu,et al. Economic dispatch of wind-thermal power system by using aggregated output characteristics of virtual power plants[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2017,32(12):61-65,139.

[5] LIANG H,MA J. Data-driven resource planning for virtual power

- plant integrating demand response customer selection and storage [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1833–1844.
- [6] WANG Y, AI X, TAN Z, et al. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 510–519.
- [7] 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(2): 642–656.
- LIU Fang, XU Yao-jie, YANG Xiu, et al. Multi-time scale coordinated operation strategy of virtual power plant clusters considering power interactive sharing [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 642–656.
- [8] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009–5017.
- LU Qiang, CHEN Lai-jun, MEI Sheng-wei. Typical applications and prospects of game theory in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009–5017.
- [9] 张海宁, 陶以彬, 梅惠, 等. 基于合作博弈的风光储集群协同优化调度模型 [J]. 热力发电, 2021, 50(8): 87–94.
- ZHANG Hai-ning, TAO Yi-bin, MEI Hui, et al. Collaborative optimal scheduling model of photovoltaic-wind-battery cluster based on cooperative game [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 87–94.
- [10] 邱革非, 余欣蓉, 金乐婷, 等. 多虚拟电厂博弈的区域电网经济调度 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(6): 75–83.
- QIU Ge-fei, YU Xin-rong, JIN Le-ting, et al. Economic dispatch of regional power grid based on multi-virtual power plant game [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(6): 75–83.
- [11] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 55–64.
- ZHONG Yong-jie, LI Yu-ping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 55–64.
- [12] 范添圆, 王海云, 王维庆, 等. 计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微网-配电网协调优化调度 [J]. 电网技术, 2022, 46(2): 453–463.
- FAN Tian-yuan, WANG Hai-yun, WANG Wei-qing, et al. Coordinated optimization scheduling of microgrid and distribution network based on cooperative game considering active/passive demand response [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 453–463.
- [13] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及条件风险价值下基于合作博弈的多微网协同优化调度 [J]. 电网技术, 2022, 46(1): 130–138.
- SHUAI Xuan-yue, WANG Xiu-li, WU Xiong, et al. Multi-microgrid collaborative optimal scheduling based on cooperative game considering conditional value at risk [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 130–138.
- [14] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时电价电动汽车有序充放电方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 15–21.
- CHENG Shan, CHEN Zi-ming, XU Kang-yi, et al. An orderly charging and discharging method of electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15–21.
- [15] 崇志强, 陈培育, 李树青, 等. 基于合作博弈论的 P2P 电力交易方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(12): 87–92, 100.
- CHONG Zhi-qiang, CHEN Pei-yu, LI Shu-qing, et al. P2P energy trading method based on cooperative game theory [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(12): 87–92, 100.
- [16] 闫庆友, 于振华. 基于 Shapley 值的园区分布式综合能源系统利益分配研究 [J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 25–30.
- YAN Qing-you, YU Zhen-hua. Research on benefit distribution of park distributed integrated energy system based on Shapley value [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(9): 25–30.
- [17] 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 Xiu-fan, YU Si-yu, ZHU Si-jia, et al. Profit allocation of virtual power plant members based on improved multifactor Shapley value method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 585–595.
- [18] 赵显翔, 曾成碧. 基于合作博弈机制的电动汽车交易策略研究 [J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 32–38, 102.
- ZHAO Yu-xiang, ZENG Cheng-bi. Electric vehicles electricity trading strategy based on cooperative game mechanism [J]. Smart Power, 2021, 49(9): 32–38, 102.

(刘颖 编辑)