

基于主从博弈的虚拟电厂内部购售电价格制定方法

高赐威¹,曹家诚¹,吕冉²,郭明星²,费斐²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210096;2. 国网上海市电力公司,上海 200122)

Method for determining the internal price of virtual power plant based on stackelberg game theory

GAO Ciwei¹, CAO Jiacheng¹, LYU Ran², GUO Mingxing², FEI Fei²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

摘要:随着用户侧分布式电源的广泛接入,虚拟电厂可聚合的资源逐渐向产消者过渡。传统的虚拟电厂聚合用户侧资源主要有2种策略:一是直接控制负荷,二是通过负荷预测进而单方面制定电价引导用户调整用能需求。然而前者无法尊重用户的用能偏好,后者由于用户行为无法准确预测,虚拟电厂单方面发布的价格信号无法准确引导用户行为,且上述策略未考虑用户作为产消者的发电能力。针对上述问题建立了虚拟电厂与内部产消者的主从博弈模型,综合考虑双方的效益,制定虚拟电厂运营商向内部产消者的购售电价格,通过电价信号引导产消者调整发电策略,最终形成虚拟电厂的对外出力。算例分析表明,通过所提出的模型,虚拟电厂和内部产消者均可获得可观收益,同时算例也表明现货市场价格的变化对虚拟电厂内部市场电价的制定存在巨大影响。

关键词:虚拟电厂;产消者;主从博弈;内部购售电价;现货市场

Abstract: With the extensive access of user-side distributed power generation, the resources that can be aggregated in virtual power plants are gradually transiting to prosumers. There are two main strategies for traditional virtual power plants to aggregate user-side resources: One is direct load control, the other one is to guide users to adjust their energy demand through load forecasting and then unilaterally setting the price of electricity. However, the first one cannot respect the user's energy preference, while the second one cannot accurately predict the user behavior, so the price signal cannot accurately guide the user behavior. Moreover, the above strategies don't consider the user's power generation capacity. Aiming at the above problems, a stackelberg game model between the two sides is established, to set the purchase and sale prices inside the virtual power plant, guiding prosumers to adjust the power generation and consumption strategies, and finally the external output of virtual power plant is formed. The case analysis shows that both the virtual power plant and the internal producers and consumers can get considerable benefits through the model proposed. The case also shows that the change of the price of the spot market has a great influence on the determination of the internal market electricity price of the virtual power plant.

Key words: virtual power plant; prosumer; stackelberg game; internal market price; spot market

0 引言

在当前政策背景下,产消者侧的新能源机组采用“自发自用,余量上网”的模式,而虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可以通过先进的通讯和控制手段对产消者资源进行聚合,使其达到电力市场的准入条件,通过参与市场获得更大收益。

目前,针对VPP内部的协调优化已有相关研究。文献[1]至文献[3]建立了含光伏、风电、储能等分布式资源的虚拟电厂调度模型,以实现多能资源的互补。文献[4]建立了智能社区框架下多产消者的合作博弈模型,文献[5]建立了实时市场电价机制

下产消者的供需综合响应模型,文献[6]建立了含产消者的虚拟电厂架构,并研究了不同需求响应模式下产消者集群的协调优化管理方案。然而上述文献中,产消者多作为价格接受者参与优化运行,无法主动参与电价的决策过程,不能实现上层运营商与下层产消者之间的利益均衡。文献[7]与文献[8]以虚拟电厂为领导者,电动汽车为跟随者,建立了主从博弈模型以制定合理的售电价格引导电动汽车充电并网。文献[9]基于stackelberg博弈建立了虚拟电厂双层竞标模型,其内部的分布式电源和负荷作为分裂的主体,分开向虚拟电厂进行售电和购电竞标。

在已有研究中,传统的虚拟电厂聚合用户侧资源主要有2种策略:一是直接控制负荷;二是通过负荷预测进而单方面制定电价引导用户调整用能需

收稿日期:2021-07-10;修回日期:2021-09-20

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52090R200005)

求。然而前者无法尊重用户的用能偏好,后者由于用户行为无法准确预测,虚拟电厂单方面发布的价格信号无法准确引导用户行为,且上述策略仅涉及用户用能需求,很少考虑用户作为产消者的发电能力。综合以上分析,为兼顾内部产消者和虚拟电厂的效益,本文提出了现货市场环境基于主从博弈的虚拟电厂内部购售电价制定方法,虚拟电厂根据对现货市场电价的预测,通过制定合理的内部购售电价格,利用电价信号引导产消者调整发电用电策略,形成虚拟电厂的整体对外出力。最后通过算例验证了本文所建立模型对虚拟电厂和产消者带来的效益提升,并分析了不同现货市场电价场景下虚拟电厂内部购售电价格的变化情况。

1 多产消者虚拟电厂运行框架

本文建立的多产消者虚拟电厂运行框架如图1所示,其中 N 为产消者个数。产消者拥有分布式风电机组、光伏机组、可控负荷等分布式资源;虚拟电厂对多产消者资源进行聚合并参与电力现货市场。对内,虚拟电厂运营商发布购售电价格与产消者进行电能交易;对外,虚拟电厂代表产消者集群在电力现货市场进行交易。产消者作为发用电资源的集合体,可根据电价信号调整自身发用电策略,以实现自身利益最大化。虚拟电厂运营商根据对现货市场价格的预测,制定合理的内部价格,通过价格信号引导产消者调整自身出力,从而达到双方效益最优的目标。

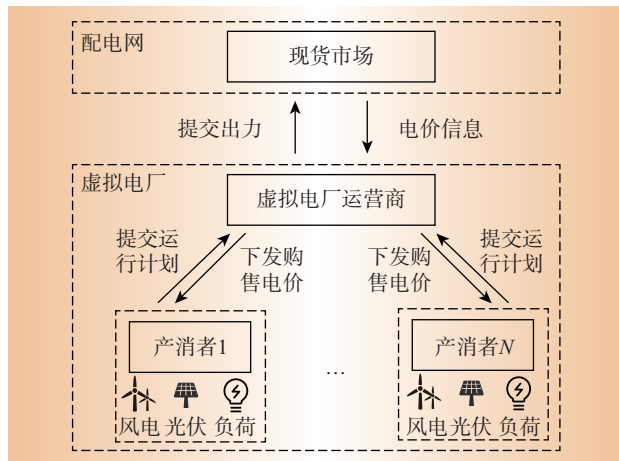


图1 多产消者虚拟电厂运行框架

Fig.1 Structure of multi-prosumers virtual power plant

为保证产消者的收益,虚拟电厂运营商需保证内部购售电价格优于当地电网的并网价格与零售电价。即

$$\lambda_{gb}^t \leq \lambda_{inb}^t \leq \lambda_{ins}^t \leq \lambda_{gs}^t \quad (1)$$

式中: λ_{gb}^t 为 t 时刻当地电网的余量收购价格; λ_{inb}^t 为 t 时刻虚拟电厂向内部产消者的购电价格; λ_{ins}^t 为

t 时刻虚拟电厂向内部产消者的售电价格; λ_{gs}^t 为 t 时刻当地电网的零售电价。

2 虚拟电厂运营商与产消者主从博弈模型

2.1 产消者效益模型

产消者在发电量富余的时刻向虚拟电厂运营商出售剩余电能,在其余时刻作为消费者向虚拟电厂运营商购买电能。

(1) 产消者身份

产消者购售电身份计算^[10]为

$$ID_i^t = \frac{G_i^t}{P_i^t} \quad (2)$$

式中: G_i^t 为产消者 i 在 t 时刻的发电能力; P_i^t 为产消者 i 在 t 时刻的负荷需求;当 $ID_i^t > 1$ 时,产消者 i 的身份为生产者, $ID_i^t < 1$ 时为消费者。

(2) 产消者效益函数

产消者的效益包括用电效用、发电成本、内部市场的购售电收益3部分。

自然对数函数已被证明适用于电力消费领域^[11],本文利用自然对数函数对用电效用进行度量为

$$U_i^t = k_i^t \ln(1 + P_i^t) \quad (3)$$

式中: k_i^t 为产消者 i 在 t 时刻的用电效用系数,取决于产消者的类型以及用电偏好。

产消者 i 在 t 时刻的发电成本 C_i^t 为

$$C_i^t = a_i g_{i,pv}^t + b_i g_{i,wt}^t \quad (4)$$

式中: a_i, b_i 分别为产消者 i 管理的光伏、风电机组单位发电量的运维成本,对每个机组来说是定值; $g_{i,pv}^t$ 和 $g_{i,wt}^t$ 分别为产消者 i 管理的光伏、风电机组在 t 时刻的发电量。

产消者 i 在虚拟电厂内部市场的购售电收益 E_i^t 为

$$E_i^t = \lambda_{inb}^t Q_{i,s}^t - \lambda_{ins}^t Q_{i,b}^t \quad (5)$$

式中: $Q_{i,s}^t$ 和 $Q_{i,b}^t$ 分别为 t 时刻产消者 i 在内部市场的售电量和购电量。

综上可得,产消者 i 在 t 时刻的总效益为

$$\begin{aligned} B_i^t &= U_i^t - C_i^t + E_i^t \\ &= k_i^t \ln(1 + P_i^t) - a_i g_{i,pv}^t - b_i g_{i,wt}^t + F_{i,s}^t \lambda_{inb}^t Q_{i,s}^t - F_{i,b}^t \lambda_{ins}^t Q_{i,b}^t \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $F_{i,s}^t$ 和 $F_{i,b}^t$ 分别为 $[0,1]$ 变量,取1时分别为产消者是生产者或消费者。

2.2 虚拟电厂运营商效益模型

产消者在参与内部市场时需要向虚拟电厂运营商提交各时段的产消者身份、发电预测量、负荷预测量、负荷可调范围以及用电效用系数,虚拟电厂运营商根据预测的电力现货市场价格,结合产消

者提交的信息,决策内部市场的购售电价格以参与现货市场获利。

虚拟电厂运营商 t 时刻在内部市场收购和出售的电能为

$$Q_{\text{inb}}^t = \sum_{i=1}^N F_{i,s}^t Q_{i,s}^t \quad (7)$$

$$Q_{\text{ins}}^t = \sum_{i=1}^N F_{i,b}^t Q_{i,b}^t \quad (8)$$

式中: N 为参与内部市场的产消者数量。

虚拟电厂运营商在现货市场购售电以平衡内部市场的供需,现货市场的交易量可表示为

$$Q_{\text{mkb}}^t = Q_{\text{ins}}^t - Q_{\text{inb}}^t \quad Q_{\text{ins}}^t \geq Q_{\text{inb}}^t \quad (9)$$

$$Q_{\text{mks}}^t = Q_{\text{inb}}^t - Q_{\text{ins}}^t \quad Q_{\text{inb}}^t > Q_{\text{ins}}^t \quad (10)$$

式中: Q_{mkb}^t 为虚拟电厂运营商在现货市场购买的电能; Q_{mks}^t 为虚拟电厂运营商在现货市场出售的电能。

虚拟电厂运营商在 t 时刻的总效益 R^t 包括内部市场收益和参与现货市场收益,分别表示为

$$R^t = \begin{cases} \lambda_{\text{ins}}^t Q_{\text{ins}}^t - \lambda_{\text{inb}}^t Q_{\text{inb}}^t - \lambda_{\text{mkb}}^t Q_{\text{mkb}}^t & Q_{\text{ins}}^t \geq Q_{\text{inb}}^t \\ \lambda_{\text{ins}}^t Q_{\text{ins}}^t - \lambda_{\text{inb}}^t Q_{\text{inb}}^t + \lambda_{\text{mks}}^t Q_{\text{mks}}^t & Q_{\text{ins}}^t < Q_{\text{inb}}^t \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ_{mkb}^t 和 λ_{mks}^t 分别为 t 时刻现货市场的购电价和售电价。

2.3 博弈模型建立

在 t 时刻虚拟电厂内部市场的运行过程中,虚拟电厂运营商和各产消者均以自身效益最大化为目标进行决策。虚拟电厂运营商的目标是决策出最优的内部市场购售电价格,以实现其参与现货市场收益的最大化,优化目标为

$$\max R^t = \begin{cases} \lambda_{\text{ins}}^t Q_{\text{ins}}^t - \lambda_{\text{inb}}^t Q_{\text{inb}}^t - \lambda_{\text{mkb}}^t Q_{\text{mkb}}^t & Q_{\text{ins}}^t \geq Q_{\text{inb}}^t \\ \lambda_{\text{ins}}^t Q_{\text{ins}}^t - \lambda_{\text{inb}}^t Q_{\text{inb}}^t + \lambda_{\text{mks}}^t Q_{\text{mks}}^t & Q_{\text{ins}}^t < Q_{\text{inb}}^t \end{cases} \quad (12)$$

除了满足式(1)外,上述优化问题还需满足

$$-Q_{\text{mks}}^{\max} \leq Q_{\text{mks}}^t \leq Q_{\text{mkb}}^{\max} \quad (13)$$

$$-Q_{\text{mkb}}^{\max} \leq Q_{\text{mkb}}^t \leq Q_{\text{mks}}^{\max} \quad (14)$$

式中: $Q_{\text{mkb}}^{\max}$ 为现货市场交易电量的上限。

各产消者根据虚拟电厂运营商发布的内部购售电价格,以自身效益最大为目标决策在内部市场的购售电量,优化目标为

$$\max B_i^t = k_i^t \ln(1 + P_i^t) - a_i g_{i,pv}^t - b_i g_{i,wt}^t + F_{i,s}^t \lambda_{\text{ins}}^t Q_{i,s}^t - F_{i,b}^t \lambda_{\text{inb}}^t Q_{i,b}^t \quad (15)$$

上述优化问题需满足以下约束条件。

产消者的功率平衡约束为

$$P_i^t - g_{i,pv}^t - g_{i,wt}^t = Q_{i,b}^t - Q_{i,s}^t \quad (16)$$

内部市场交易电量约束为

$$0 \leq Q_{i,b}^t \leq F_{i,b}^t Q_{\text{in}}^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq Q_{i,s}^t \leq F_{i,s}^t Q_{\text{in}}^{\max} \quad (18)$$

式中: $Q_{\text{in}}^{\max}$ 为内部市场交易电量上限。

产消者身份约束为

$$F_{i,b}^t + F_{i,s}^t \leq 1 \quad (19)$$

产消者负荷调整范围为

$$P_i^{t,\min} \leq P_i^t \leq P_i^{t,\max} \quad (20)$$

式中: $P_i^{t,\min}$ 为可调负荷下限; $P_i^{t,\max}$ 为可调负荷上限。

虚拟电厂运营商和各产消者的优化模型共同形成了两者之间的主从博弈模型,其中虚拟电厂运营商为领导者,各产消者作为跟随者响应领导者的策略,虚拟电厂运营商和产消者的策略互相影响,最终达到博弈均衡,实现双方效益最大的目标。

3 博弈模型分析

3.1 博弈均衡解的存在性

对前述建立的主从模型进行分析,虚拟电厂运营商作为领导者,其决策变量集合为内部市场的购售电价格 λ_{ins}^t 和 λ_{inb}^t , 即 $\lambda_{\text{in}}^t = \{\lambda_{\text{ins}}^t, \lambda_{\text{inb}}^t\}$, 式(1)构成虚拟电厂运营商的策略空间 Ω^{vp} , 则虚拟电厂运营商的策略集可表示为

$$\lambda_{\text{in}}^t \in \Omega^{\text{vp}} \quad (21)$$

各产消者作为跟随者,决策变量为内部市场交易电量,由于新能源机组出力不可控,其决策变量的实质为负荷消费量,式(16)至式(20)构成各产消者的策略空间 Ω^{ps} , 其策略集可表示为

$$P^t = \{P_i^t\} \in \Omega^{\text{ps}} \quad (22)$$

根据主从博弈的定义,若存在策略 $(\lambda_{\text{in}}^*, P^*)$ 使得该策略 $(\lambda_{\text{in}}^*, P^*)$ 为主从博弈的纳什均衡解,在该策略下,双方都无法通过调整自身策略获得更大收益。

$$R(\lambda_{\text{in}}^*, P^*) \geq R(\lambda_{\text{in}}^t, P^*) \quad (23)$$

$$B_i(\lambda_{\text{in}}^*, P^*) \geq B_i(\lambda_{\text{in}}^*, P_i^t, P_{-i}^*) \quad \forall i \in N \quad (24)$$

式中: P_{-i}^* 为除产消者 i 外其余产消者的策略集合。

上述均衡解存在且唯一的条件有以下3方面^[9]: ① 各参与者的策略集均非空紧凸; ② 在领导者给定策略的条件下,跟随者的最优策略存在且唯一; ③ 在跟随者的策略条件下,领导者的最优策略存在且唯一。

根据前述建立的虚拟电厂运营商和产消者的模型,双方策略空间的约束条件均为线性,因此各参与者的策略集均为非空紧凸集。

产消者的效益函数包括用电效用、发电成本、内部市场的购售电收益3部分,其中发电成本和内部市场收益为线性函数,因此是拟凸函数,用电效用为自然对数函数,在可行域内单调递增,因此也为拟凸函数。综上,产消者的效益函数为拟凸函数,在领导者给定策略的条件下,存在唯一最优解。

虚拟电厂运营商的效益函数为线性函数,显然

在给定跟随者策略的条件下,存在唯一最优解。

综上所述,本文建立的主从博弈模型存在均衡解且唯一。

3.2 模型求解方法

目前主要有解析法和迭代法2种方法应用于主从博弈的求解^[12]。主从博弈的领导者 and 跟随者问题可以分别看作双层问题的上下层^[13]。解析法是先根据跟随者的目标函数对下层求解,得到下层最优策略的函数表达式,再将下层最优策略代入领导者的目标函数,从而将双层问题转化为单层问题,解得主从双方的最优策略。

迭代法是首先由领导者给定策略初值,跟随者依据领导者发布的策略优化出自身的最优策略,将跟随者的最优策略再代入领导者目标函数,求取领导者的最优策略,如此反复迭代,直至求得博弈均衡解。

由式(15)可得,若产消者*i*在*t*时刻为生产者,在虚拟电厂运营商给定的内部购电价为 λ_{inb}^t 时,产消者*i*的最优策略为

$$P_i^t = \begin{cases} \min(g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t, P_i^{t,\text{max}}) & \lambda_{\text{inb}}^t < \frac{k_i^t}{\min(g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t, P_i^{t,\text{max}}) + 1} \\ \frac{k_i^t}{\lambda_{\text{inb}}^t} - 1 & \frac{k_i^t}{\min(g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t, P_i^{t,\text{max}}) + 1} \leq \lambda_{\text{inb}}^t \leq \frac{k_i^t}{P_i^{t,\text{min}} + 1} \\ P_i^{t,\text{min}} & \lambda_{\text{inb}}^t > \frac{k_i^t}{P_i^{t,\text{min}} + 1} \end{cases} \quad (25)$$

同理可得,产消者*i*为消费者时的最优策略为

$$P_i^t = \begin{cases} P_i^{t,\text{max}} & \lambda_{\text{ins}}^t < \frac{k_i^t}{P_i^{t,\text{max}} + 1} \\ \frac{k_i^t}{\lambda_{\text{ins}}^t} - 1 & \frac{k_i^t}{P_i^{t,\text{max}} + 1} \leq \lambda_{\text{ins}}^t \leq \frac{k_i^t}{\max(P_i^{t,\text{min}}, g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t) + 1} \\ \max(P_i^{t,\text{min}}, g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t) & \lambda_{\text{ins}}^t > \frac{k_i^t}{\max(P_i^{t,\text{min}}, g_{i,\text{pv}}^t + g_{i,\text{wt}}^t) + 1} \end{cases} \quad (26)$$

由式(25)和式(26)可知,在给定领导者策略下,产消者的最优策略为分段函数,因此如果直接利用解析法,随产消者数量的增加,复杂程度呈指数型增加,因此不适合解决本文建立的模型。而虚拟电厂运营商的目标函数为关于产消者决策量的显性线性函数,且策略空间的约束条件也为线性,因此也无法利用迭代法求解本文的模型。综上,本文将前述建立的模型转化为优化问题,利用改进粒子群算法进行求解。

3.3 模型求解流程

针对本文建立的主从博弈模型,采用解析法与改进粒子群算法结合的方式进行求解。每个粒子的维度为2,分别对应内部市场的售电价 λ_{inb}^t 和购电价 λ_{ins}^t ,虚拟电厂运营商在*t*时刻发布的内部市场购

售电价格对应每个粒子的位置,虚拟电厂运营商的效益对应粒子的适应度值,*t*时刻粒子*j*的速度和位置更新公式如下

$$v_j^{d+1} = wv_j^d + c_1r_1(pbest_j^d - x_j^d) + c_2r_2(gbest^d - x_j^d) \quad (27)$$

$$x_j^{d+1} = x_j^d + v_j^d \quad (28)$$

式中:*d*为迭代次数; v_j^d 和 x_j^d 分别为第*d*次迭代时粒子*j*的速度和位置; $pbest_j^d$ 和 $gbest^d$ 分别为截止至第*d*次迭代时粒子*j*和全局粒子的最优位置; c_1 和 c_2 分别为个体、社会加速因子; r_1 和 r_2 分别为取值在[0,1]的随机数;*w*为惯性因子。

惯性因子的取值决定了粒子的寻优能力,其数值较大时有益于全局搜索,而较小时则更利于局部搜索,为了提高算法的收敛速度和精度,本文采用自适应惯性因子法对迭代过程中惯性因子的选取进行改良,公式如下

$$w_j^d = \begin{cases} w_{\text{min}} + (w_{\text{max}} - w_{\text{min}}) \frac{f(x_j^d) - f_{\text{min}}^d}{f_{\text{mean}}^d - f_{\text{min}}^d} & f(x_j^d) \leq f_{\text{mean}}^d \\ w_{\text{max}} & f(x_j^d) > f_{\text{mean}}^d \end{cases} \quad (29)$$

$$f_{\text{mean}}^d = \frac{\sum_{i=1}^n f(x_i^d)}{n} \quad (30)$$

$$f_{\text{min}}^d = \min\{f(x_1^d), f(x_2^d), \dots, f(x_n^d)\} \quad (31)$$

式中: w_{min} 和 w_{max} 分别为预先取定的惯性因子上下限值,通常取值为0.4和0.9; $f(x)$ 为适应度函数;*n*为粒子总数; f_{mean}^d 和 f_{min}^d 分别为粒子群体在第*d*次迭代时的平均和最小适应度值。

由式(29)可见,改进后惯性因子的取值和迭代次数、每个粒子的适应度均有关联,能根据每个粒子的适应度及时调整搜索策略,提高寻优的速度和精度。

模型求解具体步骤如下:

步骤1:设定粒子群算法参数。

步骤2:初始化每个粒子对应的*t*时刻购电价格和售电价格。

步骤3:根据式(25)和式(26)计算每个粒子对应的产消者最优策略。

步骤4:根据式(12)计算粒子适应度值。

步骤5:根据式(27)至式(31)更新粒子的速度和购售电价格。

按照设定的迭代次数重复步骤2至步骤5,即可求得内部市场的最优购售电价格,结合式(25)和式(26)可得到博弈模型的均衡解。

4 算例分析

4.1 初始参数设置

假设某虚拟电厂内部有3个产消者,分别为居民型、

工业型和商业型。居民型和商业型产消者拥有的发电资源为分布式光伏机组,工业型产消者拥有的发电资源为分布式风电机组,各产消者的新能源发电和负荷预测量分别如图2、图3所示。风电、光伏的折算单位发电成本均取0.05元/kWh,余量上网电价取0.2元/kWh,现货市场电价参考文献[14]取得,当地电网电价见图4,产消者的效益系数和其负荷以及偏好程度近似呈正相关,产消者的负荷调整范围取20%。

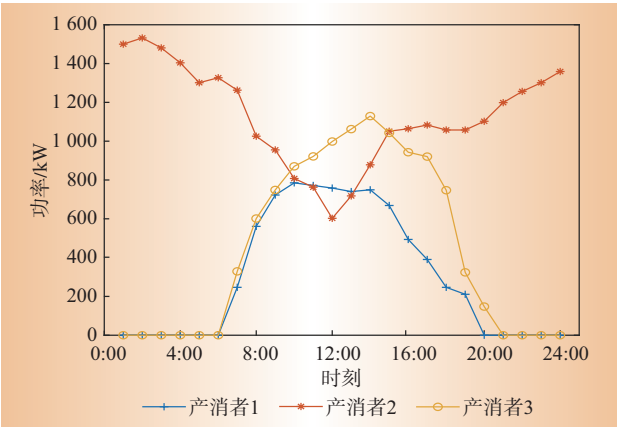


图2 各产消者新能源发电量
Fig. 2 Renewable energy generation of each prosumer

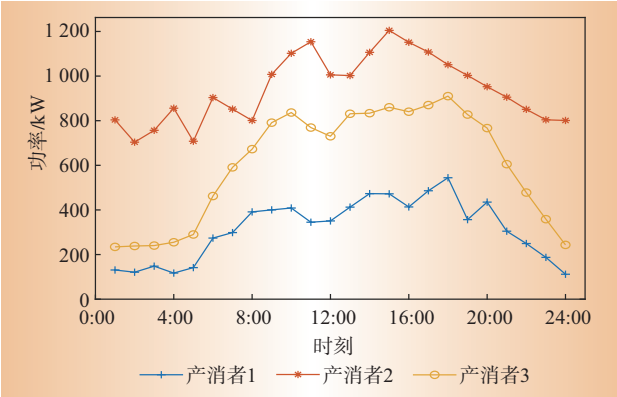


图3 产消者负荷量
Fig. 3 Load of prosumers

4.2 内部市场购售电价格分析

根据本文所建立的主从博弈模型解得的虚拟电厂内部各时段购售电价格如图4所示。

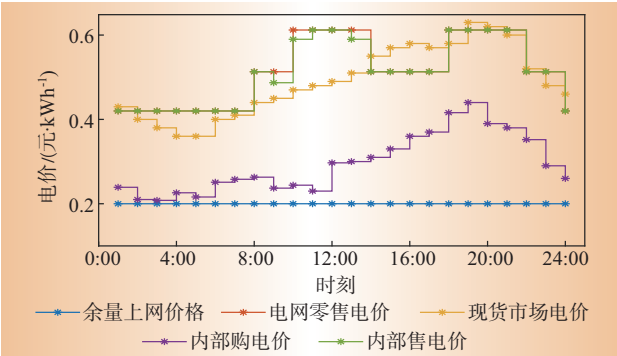


图4 虚拟电厂内部电价与外部市场电价
Fig. 4 Internal market price and outside market price

从图4可以看出,在现货市场电价较高的时段,虚拟电厂运营商倾向于发布相对更高的内部购电价格以向产消者收购更多的电能,在现货市场上出售提高自身利润。而内部购电价格在大部份时段与当地电网的零售电价保持一致,这是因为虚拟电厂运营商倾向于以较高的价格向内部产消者出售电能以获得更大利润。在9:00—13:00时段由于电网零售电价高于现货市场电价,因此虚拟电厂运营商结合内部产消者总体供需情况,倾向于降低内部售电价格以引导产消者多消费负荷,从而增加内部市场售电收入以使得总利润增加。在3:00—6:00时段虽然电网零售电价也高于现货市场电价,但由于处于夜间,产消者的负荷效用系数较低,产消者倾向于少用负荷,需要极低的内部售电价格才能引导产消者多消费负荷,无法使虚拟电厂获得额外利润,因此虚拟电厂在该时段维持电网零售电价。总体来看,相较于电网的余量上网价格和零售电价曲线,内部市场的购售电价曲线得到了明显优化,可以证明本文所建立的主从博弈模型是有效的。

4.3 产消者负荷调整量分析

产消者负荷调整量如图5所示。

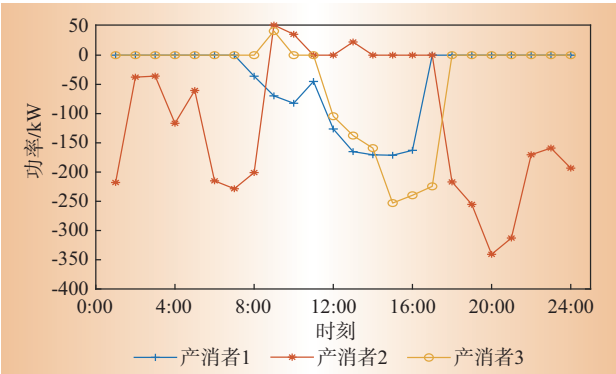


图5 产消者负荷调整量
Fig. 5 Load adjustment of prosumers

从图5可以看出,由于内部购电价相对现货市场电价存在优势,在1:00—8:00、18:00—24:00时段产消者2拥有的风电机组出力过剩,此时产消者2作为生产者,虚拟电厂运营商通过提高内部购电电价引导其降低负荷需求,提高产消者2在内部市场的售电量。9:00—17:00时段产消者1和3拥有的光伏机组有出力盈余,虚拟电厂运营商同样通过优化购电电价引导其降低负荷,增加在内部市场的售电量。15:00—21:00时段产消者的负荷调整量较大,结合图4可知,此时现货市场价格较高,且白天产消者的负荷效益系数较高,因此虚拟电厂运营商只能以相对较高的内部购电价格向产消者尽可能多地收购电能,从而利用内部和外部市场的电价差增加自身收入。在9:00、10:00、13:00这3个时刻,虚拟电厂运营

商通过降低内部售电价格,引导身份为消费者的产消者增加负荷消费量,以提高其在内部市场的售电收入。

4.4 虚拟电厂运营商收益

虚拟电厂运营商各时段参与内部和外部市场的总收益如图6所示。

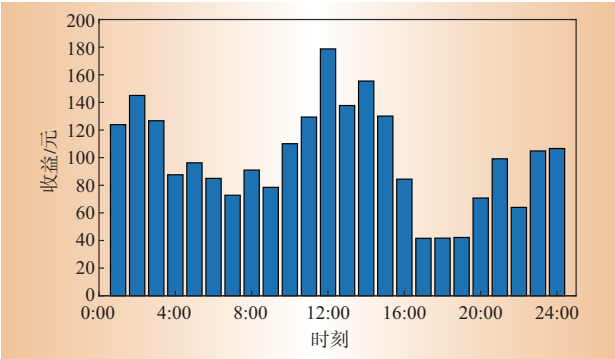


图6 虚拟电厂运营商收益
Fig. 6 Profit of the VPP operator

从图6可以看出,虚拟电厂运营商通过内部市场和外部市场的协同优化在各个时段均获得了一定收益,其中在1:00—3:00、11:00—15:00、20:00—24:00这3个时段收益相对较高,这3个时段是新能源机组的出力高发期,虚拟电厂运营商通过优化内部购电电价,尽可能多的对内收购电能,在现货市场出售获利。在11:00—15:00时段虚拟电厂的收入尤其要高,这是因为在该时段不仅有充足的光伏出力,内部市场的售电价格和现货市场电价也相对较高,生产能力和价格这两个因素共同促成了虚拟电厂的高额利润。

4.5 产消者效益增量

产消者日效益对比如表1所示,产消者效益增量如图7所示。

表1 产消者日效益对比			
Table 1 Comparison of the prosumers' daily benefits			
项目	产消者1 效益	产消者2 效益	产消者3 效益
协同优化	10 551	58 185	28 213
不参与优化	10 172	57 749	27 768

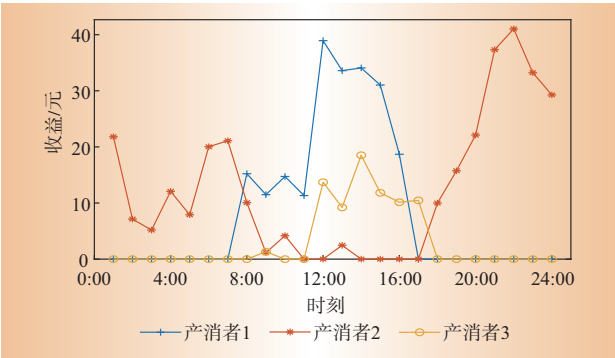


图7 产消者效益增量
Fig. 7 Incremental utilities of prosumers

从图7可以看出,通过参与虚拟电厂内部的协同优化,各个产消者在不同时段均获得了一定的效益增量。结合表1的日效益对比可得,与和电网直接交易相比,参与虚拟电厂的协同优化分别为产消者1、产消者2、产消者3,实现了3.59%、0.76%、1.60%的效益提升。

4.6 现货市场价格对内部购售电价的影响

现货市场价格对内部购售电价影响如图8所示。

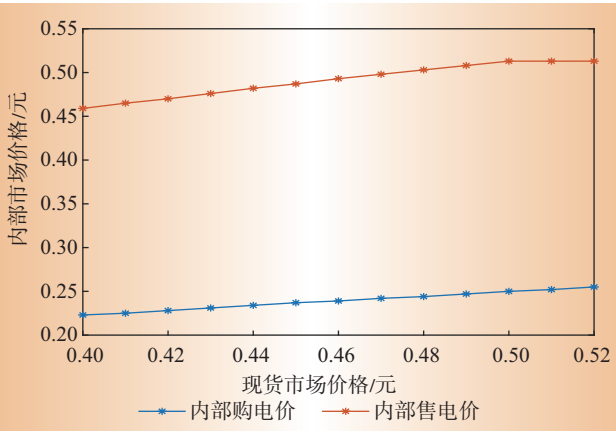


图8 现货市场价格对内部购售电价影响
Fig. 8 Impact of spot market price on the internal price

为分析不同现货市场价格对虚拟电厂内部市场价格的影响,图8以时段9(9:00—10:00)为例,给出了现货市场价格在[0.40,0.52]范围内变化时,虚拟电厂内部购售电价格的变化情况。时段9的电网零售电价为0.513元/kWh,从图8可以看出,随着现货市场价格的增加,虚拟电厂制定的内部购电价格也随之增加,虚拟电厂倾向于尽可能多的在内部市场购电,通过购售电价差获取更高利润。而随着现货市场价格的降低,虚拟电厂内部的售电价也随之降低,这是因为此时内部售电价格高于现货市场电价,且现货市场电价越低,虚拟电厂越倾向于降低内部市场售电价,引导产消者消费,从而增加其在内部市场的售电收入。当现货市场价格高于0.5元/kWh时,虚拟电厂内部的售电价保持0.513元/kWh不变,这是因为此时现货市场电价接近电网零售电价,虚拟电厂无法通过提高内部售电量获得超额利润,因此虚拟电厂选择以可制定的价格上限出售电能。

5 结束语

虚拟电厂运营商通过聚合内部产消者参与现货市场获利的同时,可以提高内部产消者的效益。本文以虚拟电厂运营商为领导者,内部多产消者为跟随者建立了主从博弈模型,对模型进行分析并证明了均衡解的存在性和唯一性,采用改进的粒子群

算法对模型进行了求解,决策出最优的虚拟电厂内部购售电价格。算例分析表明,通过本文提出的内部市场优化方法为各产消者和虚拟电厂均能带来一定的效益提升,同时本文对产消者的负荷调整以及现货市场电价变化对内部市场的电价影响也进行了分析,为虚拟电厂运营商在不同的市场环境下决策内部购售电价提供参考。D

参考文献:

- [1] JU L W, TAN Z F, YUAN J Y, et al. A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response[J]. Applied Energy, 2016(171):184-199.
- [2] 刘春蕾,庞鹏飞,石纹赫,等. 计及碳中和效益及清洁能源消纳的虚拟电厂双层协同优化调度[J]. 供用电, 2021,38(9):19-27.
LIU Chunlei, PANG Pengfei, SHI Wenhe, et al. Taking into account carbon neutrality benefit and clean energy consumption of virtual power plant two-layer cooperative optimization dispatching[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9):19-27.
- [3] 王金明,张卫国,朱庆,等. 含风电及电动汽车虚拟电厂参与电力市场的优化调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2020,22(1):28-34,47.
WANG Jinming, ZHANG Weiguo, ZHU Qing, et al. Optimal scheduling strategy for VPP participating in the power market including wind power and EV[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1):28-34, 47.
- [4] 冯昌森,沈佳静,赵崇娟,等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021,41(4):85-93.
FENG Changsen, SHEN Jiajing, ZHAO Chongjuan, et al. Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):85-93.
- [5] 李彪,万灿,赵健,等. 基于实时电价的产消者综合响应模型[J]. 电力系统自动化, 2019,43(7):81-88.
LI Biao, WAN Can, ZHAO Jian, et al. Real-time electricity price based integrated response model for prosumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):81-88.
- [6] MARCO P, STEFANO R, DANIELE M. A virtual power plant architecture for the demand-side management of smart prosumers[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3):432.
- [7] 张高,王旭,蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018,42(11):48-55.
ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):48-55.
- [8] 马英姿,马兆兴. 基于博弈算法的电动汽车有序充电优化及效益分析[J]. 电力工程技术, 2021,40(5):10-16.
MA Yingzi, MA Zhaoxing. Orderly charging optimization and benefit analysis of electric vehicles based on game algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):10-16.
- [9] 方燕琼,甘霖,艾芊,等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017,41(14):61-69.
FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):61-69.
- [10] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8):6 087-6 097.
- [11] LIU N, CHENG M Y, YU X H, et al. Energy sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(18):6 740-6 750.
- [12] 郭昆健,高赐威,林国营,等. 现货市场环境下售电商激励型需求响应优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020,44(15):28-35.
GUO Kunjian, GAO Ciwei, LIN Guoying, et al. Optimization strategy of incentive based demand response for electricity retailer in spot market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15):28-35.
- [13] 梁易乐,黄少伟,张星,等. 基于主从博弈的碳排放税制定方法[J]. 系统科学与数学, 2016,36(8):1 055-1 067.
LIANG Yile, HUANG Shaowei, ZHANG Xing, et al. Taxing strategies for carbon emissions based on Stackelberg game[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(8):1 055-1 067.
- [14] 杨皓钦,魏震波,黄宇涵,等. 跨区域现货市场下多主体购售能主从博弈模型[J]. 电网技术, 2019,43(8):2 781-2 791.
YANG Haoqin, WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, et al. Multi-agent purchase and sale master-slave game model in cross-regional spot market[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2 781-2 791.

(责任编辑 郝洁 张紫涛)