



计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型

王冰 陈淑娇 杜亚彬 李彬 祁兵 王婧

Microgrid Energy Bidding Transaction Model Considering the Uncertainty of Power Purchase Demand

WANG Bing, CHEN Shujiao, DU Yabin, LI Bin, QI Bing, WANG Jing

引用本文:

王冰, 陈淑娇, 杜亚彬, 等. 计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 353–361. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0225

WANG Bing, CHEN Shujiao, DU Yabin, et al. Microgrid Energy Bidding Transaction Model Considering the Uncertainty of Power Purchase Demand[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(2): 353–361. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0225

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0225>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不确定性环境下的孤岛型微电网鲁棒优化算法

Robust Optimization Algorithm for Islanded Microgrid in Uncertain Environment

现代电力. 2021, 38(2): 147–155 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0344>

考虑不确定价格型需求响应的多源微网运行优化

Multi-source Micro-grid Operation Optimization Considering Uncertain Electricity Price Demand Response

现代电力. 2020, 37(4): 425–432 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0412>

基于库存理论考虑局部不确定性的互联微电网分布式鲁棒调度

Distributed Robust Dispatch for Interconnected Microgrids Considering Local Uncertainty based on Inventory Theory

现代电力. 2020, 37(1): 19–26 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0121>

可再生能源消纳责任权重制下计及源荷储互动的电力市场均衡研究

Equilibrium Analysis of Microgrids in Renewable Portfolio Standard-Constrained Spot Market Considering Source-load-storage Interaction

现代电力. 2022, 39(3): 302–309 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0095>

考虑源荷双重不确定性的电气互联综合能源系统分布鲁棒优化调度

Robust Optimal Scheduling of Power-Gas Interconnected Integrated Energy System with Double Uncertainty of Source and Load

现代电力. 2019, 36(6): 52–60 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/52>

考虑碳捕集和风电出力不确定性和电热联合系统多阶段鲁棒优化的低碳调度

Multi-stage Low Carbon Robust Dispatch of Integrated Electricity and Heat System Considering Carbon Capture and Wind Power Uncertainty

现代电力. 2023, 40(3): 363–371 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0339>

计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型

王冰¹, 陈淑娇², 杜亚彬², 李彬², 祁兵², 王婧¹

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京市西城区 100052; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

Microgrid Energy Bidding Transaction Model Considering the Uncertainty of Power Purchase Demand

WANG Bing¹, CHEN Shujiao², DU Yabin², LI Bin², QI Bing², WANG Jing¹

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100052, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 微电网可以将发电高峰期盈余的可再生能源出售来促进可再生能源消纳并获取最大收益。采用拍卖机制确定交易价格, 但交易过程中购电需求的变化也会对可再生能源消纳及微电网收益产生影响, 为此, 提出一种计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型。首先采用统一价格同步向上叫价拍卖机制进行定价, 并提出了拍卖机制的改进方案来平衡用能消费者对不同时间段的拍卖需求; 考虑到用能消费者的购电需求不确定性, 采用鲁棒线性优化算法来规避不确定性参数对最优解的影响。最后通过 MATLAB 软件仿真分析, 证明了该模型能够最大限度地提高可再生能源的出售率及微电网的收益。

关键词: 微电网; 统一价格同步向上叫价拍卖机制; 购电需求不确定性; 鲁棒线性优化算法; 可再生能源消纳

Abstract: Microgrid can sell surplus resources in peak load to promote renewable energy usage and to get maximum benefit from them. The auction mechanism is adopted in the trading process, however the change of electricity purchase demand in the trading period also may affect the renewable energy usage and income of the microgrid. Accordingly, the paper has put forward a micro-grid energy auction transaction model that takes into consideration of the uncertain requirement of the power supply. The model adopts the unified price synchronous increasing auction mechanism for the price of electricity. It also

基金项目: 国网综合能源服务集团有限公司科技项目“基于综合能源运营的虚拟电厂关键技术应用及运营模式研究”(52789921N00D)。

Science and Technology Project of State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd. "Research on key technology application and operation mode of virtual power plant based on integrated energy operation" (52789921N00D).

puts forward an improved auction mechanism that balances the requirement of an energy purchaser in a different time period; Based on the uncertainty of energy demand, a linear optimization algorithm was used. As a result, it was found that a robust linear optimal solution was obtained, which can maximize the saleable renewable energy quantity and income of microgrids by using MATLAB simulation analysis.

Keywords: microgrid; unified price synchronous upward bidding auction mechanism; uncertainty of power purchase demand; robust linear optimization algorithm; renewable energy consumption

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0225

0 引言

随着“双碳”目标的推进, 可再生能源设备装机含量进一步提升, 可再生能源发电量占比大幅增长。据中国国家能源局数据披露, 截至2021年12月底, 全国可再生能源发电累计装机容量10.6亿kW, 占全部电力装机的44.8%, 其中水电装机3.91亿kW、风电装机3.28亿kW、太阳能发电装机3.06亿kW^[1]。风、光等产生的不可调度资源大规模并网, 给电网造成极大冲击, 其波动性、不可控特性增加了电网调控难度, 调峰困难问题日益突出^[2-3], 传统能源规划模式和控制方案难以适用于当前能源现状。结合可再生能源的特点及优势, 微电网作为一种灵活性、可靠性更高的系统应运而生^[4]。它既可以通过可再生能源微电网的部署实现可再生能源的就近消纳, 以此减少风光电并网^[5]; 又可以利用微电网储能

技术平抑风光波动,减少并网对电网造成的负面影响,降低大规模弃风弃光问题^[6-7]。

许多学者对微电网能量管理展开了研究,以保证微电网运行可靠性、经济性。常规方案是通过储能的配置^[8]、灵活性负载的转移^[9]、分布式能源的协调控制^[10]来实现微电网的经济性调度。还有部分学者采用机器学习算法进行微电网的负荷优化分配,实现经济性调度^[11-13];另外也可以通过多目标优化实现微电网的优化调度^[14]。但是上述方法的实现需要以改变微电网常规的运营模式作为代价,不可避免地对园区的生产生活造成一定影响。为了避免这种情况,同时促进可再生能源的消纳,可以考虑在通过可再生能源满足微电网正常运营的前提下,将盈余的可再生能源出售出去。

微电网也可以参与电力市场进行能源交易。2017年10月国家能源局发布《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》,明确了在微电网内进行市场化能源交易的规则。该文件也促进了本地市场化交易的研究与发展^[15]。在微电网本地市场化交易中,为了平衡多方主体的利益,常常采用博弈论来确定合适的售电价格^[16-17]。文献^[18]通过Stackelberg博弈决定最优成交价格来激励微电网间的合作交易。众多学者提出利用区块链技术来确定价格的去中心化市场机制^[19-21]。交易定价问题还可以使用拍卖竞价机制,常见的拍卖机制包括维克瑞-克拉克-格罗夫斯交易机制(Vickery-Clarke-Groves, VCG机制)^[22]、统一价格拍卖(第一价格拍卖)和差别价格拍卖(第二价格拍卖等传统拍卖机制^[23]),VCG机制在国内外电力市场的应用研究较多^[24],其他拍卖机制在国内电力市场的应用研究较少。并且上述文献没有考虑购买者的购电需求不确定性问题。

基于此,本文考虑利用可再生能源满足微电网的正常运营外,出售盈余的可再生能源并以微电网收益最大化为目标,提出一种计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型。

1 微电网的能源收益模型

微电网包含用电设备、小型可再生能源发电设备、储能等装置,可以采用电网与可再生能源相结合的方式使用能源,其中微电网运营商除了

负责微网内所有用户的用能管理外,还负责可再生能源发电设备的日常运维并拥有可再生能源的使用权及出售权。考虑到可再生能源出力具有明显的波动性,微电网园区的出力曲线也无法完全匹配用电曲线;比如受日照影响,中午光伏出力明显增大,导致微电网园区在发电高峰时段不能完全消纳可再生能源,出现可再生能源盈余的情况。针对特定时段盈余的可再生能源,可以考虑与其他用能消费者进行本地能源交易来进行消纳。在每日不同时刻里,若可再生能源发电量超过用户用电需求时,盈余的可再生能源优先出售给附近的用能消费者,还有剩余时再考虑给储能充电。若可再生能源出力小于用户用电需求,可通过储能供电或向公共电网购电。整个交易过程如图1所示。图2给出了微电网能源构成模型^[25]。

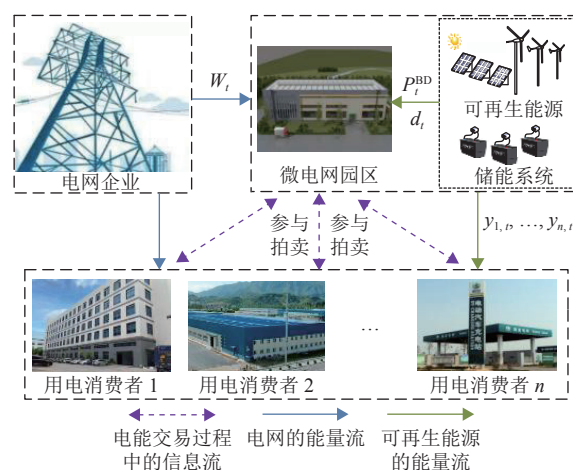


图1 微电网能源交易模型

Fig. 1 Microgrid energy trading model

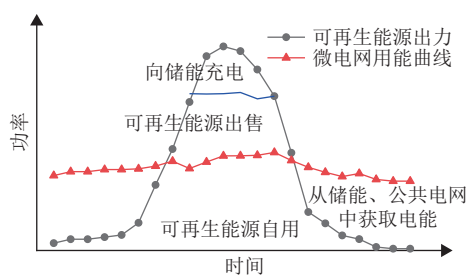


图2 微电网能源构成模型

Fig. 2 Energy composition model of microgrid

已知一天有 $T = 24$ h, $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, 24\}$ 。微电网的风机出力模型、光伏出力模型、储能充放电模型参考文献^[26]。其中:

$$P_t^{\text{RE}} = P_t^{\text{W}} + P_t^{\text{PV}}, \forall t \in T \quad (1)$$

式中： P_t^{RE} 表示可再生能源出力； P_t^{W} 代表风机第 t 时刻的输出功率； P_t^{PV} 代表第 t 时刻光伏出力的输出功率。

微电网的功率平衡约束如下：

$$P_t^{\text{MG}} + P_t^{\text{BC}} = P_t^{\text{RE}} + P_t^{\text{BD}} + W_t, \forall t \in T \quad (2)$$

式中： P_t^{MG} 表示微电网用户的用能功率； P_t^{BC} 、 P_t^{BD} 分别表示储能的放电功率和充电功率； P_t^{RE} 表示第 t 小时微电网消纳的可再生能源； W_t 指第 t 小时微电网向电网购买的电能。

微电网将盈余的可再生能源出售出去以获得最大收益，则微电网不同时刻的收益 S_t 可用公式表示如下：

$$\max S_t = \sum_{i \in N} y_{i,t} p_t, \forall t \in T \quad (3)$$

约束条件：

$$y_{i,t} \geq 0, \forall i \in N, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} y_{i,t} \leq P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}} \geq 0 \quad (6)$$

式 (3) 代表微电网的最大收益。其中： S_t 表示微电网在第 t 小时将可再生能源出售给其他用能消费者获得的收益； $y_{i,t}$ 代表在第 t 小时其他用能消费者 i 的购买量； p_t 为第 t 小时的交易价格； N 表示用能消费者的集合。式 (4)(5)(6) 表示用能消费者购买量的约束，其中 $P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}}$ 表示微电网在第 t 小时可再生能源售电量。

2 拍卖机制及购电模型分析

对比传统的几种拍卖机制，统一价格拍卖具有更高的可行性，能保证拍卖人实现最大化收益，同步向上叫价拍卖的结果很好地反映了竞拍者的渴望程度和心理估值^[27]，所以采用统一价格同步向上叫价拍卖机制进行定价。使用这种拍卖机制还可以支持可再生能源按时段进行拍卖。第一小节具体介绍了这种拍卖机制的拍卖过程并提出了改进方案。第二小节考虑到拍卖者在不同时刻的购电需求具有不确定性，所以对其进行不确定性建模和分析。

2.1 可再生能源拍卖机制

2.1.1 传统的统一价格同步向上叫价拍卖机制

当某些时刻可再生能源出力较大，微电网能

源有盈余时，可以采用拍卖机制将这些时段的可再生能源使用权以小时为单位拍卖给其他用能消费者。现假设有 n 个用能消费者按照统一价格同步向上叫价拍卖模式进行拍卖^[27]，每个人最多可竞拍 b 个时段的使用权，一共有 M 个时段可拍卖。则当市场出清时，该场拍卖的赢家用户数量为 k ， k 为整数；已知所有参与竞拍的微电网初报价一致，并在之后的报价环节逐渐加价，当报价要高于自身预期定价时就会退出拍卖，直到最后剩余 k 个用能消费者匹配 M 个竞拍时段。设消费者的价值信号为 h_i ， h_i 为独自取到 $[0, \bar{h}]$ 的均匀分布， $h_i = ((n-i)/n)\bar{h}$ 。则每个消费者 i 的估价为：

$$p_i = \hat{\alpha} h_i + \hat{\beta} \sum_{j \neq i} h_j, (\hat{\alpha} \geq 0, \hat{\beta} \geq 0) \quad (7)$$

式中： $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ 为拍卖参数， $\hat{\alpha} h_i$ 为拍卖时的私人价值信号； $\hat{\beta} h_j$ 为公共价值信号； $\hat{\beta} = 0$ 时表示仅存私人价值， $\hat{\alpha} = \hat{\beta}$ 为纯粹共同价值。式 (7) 表示拍卖中同时具有私人价值信号和公共价值信号^[28]，每个消费者的估价是私人价值信号与其他消费者公共价值信号的综合函数。拍卖时将所有消费者的拍卖信号按从高到低排列： $h_1 > h_2 > \dots > h_n$ ，消费者估价从高到低排序： $p_1 > p_2 > \dots > p_n$ 。易知竞拍价越高，产生的估价信号越高。最后当剩余的 k 个消费者时竞拍结束，此时的价格即为拍卖交易的定价。

分析可知，当价格为 $(\hat{\alpha} + (n-1)\hat{\beta})h_n$ 时估价最低的消费者退出拍卖，当价格为 $(\hat{\beta}h_n + (\hat{\alpha} + (n-2)\hat{\beta})h_{n-1})$ 时估价排在倒数第二位的消费者退出拍卖；以此类推，当只剩下 k 个消费者拍卖时供需平衡，此时完成拍卖，拍卖价 p_k 为

$$p_k = \left(\hat{\beta} \sum_{j=k+1}^n h_j + (\hat{\alpha} + (k-1)\hat{\beta})h_k \right) \quad (8)$$

$$h_k = \left(\frac{n-k}{n} \right) \bar{h} = \left(\frac{bn-k}{bn} \right) \bar{h} \quad (9)$$

2.1.2 改进的统一价格同步向上叫价拍卖机制

由于消费者在不同时刻的用电需求不同，导致消费者对不同时刻的竞拍需求存在差异。一般情况下消费者更倾向于竞拍用电高峰期的时段（下文称为热门时段），而不愿以相同的价位买到用电低谷期的时段（下文称为冷门时段）。为了平衡对不同时段的购电需求，减少消费者对热

门时段的竞争,并提高冷门时段的出售率,本文参考分时电价的原理,基于拍卖完成时的竞拍价格(拍卖成交价) p_k ,对不同时段微电网售价 p_t 按比例调控,使不同时段的电价 p_t 与 p_k 满足以下关系式:

$$p_t = \varpi_t p_k = \varpi_t \left(\hat{\beta} \sum_{j=k+1}^n h_j + (\hat{\alpha} + (k-1)\hat{\beta})h_k \right) \quad (10)$$

式中: ϖ_t 为价格波动参数,参数的设置与时间段 t 有关, $\varpi_t \in (0,1]$ 。由于 ϖ_t 的设置,拍卖成交价 p_k 可以表示为单日内的最高售价。

考虑到改进拍卖机制后,拍卖商品的价值信号会增加,相应的信号上限 \bar{h} 会上升。为简化模型,可以认为 \bar{h} 与 ϖ_t 满足以下关系式:

$$\bar{h}' = \frac{24}{\sum_{t \in T} \varpi_t} \bar{h} \quad (11)$$

经过拍卖后,拍卖赢家用户集合为 K , $K = \{1,2,\dots,k\}$,则第 t 小时微电网收益 S_t 可以表述为以下形式:

$$S_t = \sum_{i \in K} y_{i,t} p_t = \sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \left[(\hat{\alpha} + (k-1)\hat{\beta})h_k + \hat{\beta} \sum_{j=k+1}^n h_j \right] \quad (12)$$

式中: $\sum_{i \in K} y_{i,t}$ 为第 t 时段所有消费者购电量总和。将上式整理后可以得到以下形式:

$$S_t = \sum_{i \in K} y_{i,t} p_t = \sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \left(\frac{\beta(n-k)(2bn - (n+k+1))\bar{h}'}{2bn} + \frac{(\alpha + (k-1)\beta)(n-k)\bar{h}'}{n} \right) \quad (13)$$

在该拍卖机制下,分析微电网收益与参数 n 、 k 的关系,这里分别对其求导:

$$\frac{\delta S_t}{\delta n} = \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' (2\hat{\alpha}b + \hat{\beta}\bar{h}'k^2 + \hat{\beta}\bar{h}'k + \hat{\beta}\bar{h}'n^2)}{2bn^2} + \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' (-2b\hat{\beta}\bar{h}'k^2 - 2b\hat{\beta}\bar{h}'n^2 + 2b\hat{\beta}\bar{h}'k)}{2bn^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 S_t}{\partial n^2} = \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' (2\hat{\alpha}b + \hat{\beta}\bar{h}'k^2 + \hat{\beta}\bar{h}'k)}{bn^3} + \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' (-2b\hat{\beta}\bar{h}'k^2 + 2b\hat{\beta}\bar{h}'k)}{bn^3} \quad (15)$$

$$\frac{\delta S_t}{\delta k} = \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' (2b + 2k - 4ek + 1)}{2bn} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 S_t}{\partial k^2} = \frac{-\sum_{i \in K} y_{i,t} \varpi_t \bar{h}' \hat{\beta} (2b - 1)}{bn} \quad (17)$$

由公式(14)(15)可知, $\delta^2 S_t / \delta n^2 < 0$, $\delta S_t / \delta n > 0$;由公式(16)(17)可知 $\partial^2 S_t / \partial k^2 < 0$, $\delta S_t / \delta k > 0$,所以在售电量不变的情况下,微电网收益 S_t 关于 k 、 n 单调递减,关于 b 单调递增。

2.2 用能消费者购电需求不确定性模型

受电价及外界因素影响,参与竞拍的用能消费者用能负荷会产生波动,购电需求具有不确定性,本文采用鲁棒线性优化算法来规避不确定性参数对最优解的影响^[29]。假设用 $\tilde{y}_{i,t}$ 表示用能消费者 i 在时段 t 的购电需求, $\tilde{y}_{i,t} \in [\tilde{y}_{i,t} - \hat{y}_{i,t}, \tilde{y}_{i,t} + \hat{y}_{i,t}]$, $i \in K$ 。则购电约束(5)可改写为:

$$\sum_{i \in K} \tilde{y}_{i,t} \leq P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}}, \forall t \in T \quad (18)$$

为了方便求出该模型的可行解,引入不确定性参数 $H_{i,t}$, $\forall i \in K, t \in T$, $H_{i,t}$ 为整数,含义是在保证交易正常进行的前提下,最多只能有 $H_{i,t}$ 个需求点偏离均值, $H_{i,t}$ 的值还要经过后续仿真计算才能确定。则约束(18)可以转化为:

$$\sum_{i \in K} \tilde{y}_{i,t} + f(H_{i,t}) \leq P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}}, \forall t \in T \quad (19)$$

$$f(H_{i,t}) = \max \sum_{i \in K} \hat{y}_{i,t} \quad (20)$$

为了方便解决这个最大值问题,引入辅助变量 $A_{i,t}$, $\forall i \in K, \forall t \in T$,将式(20)扩展为以下形式:

$$f(H_{i,t}) = \max \sum_{i \in K} \hat{y}_{i,t} A_{i,t} \quad (21)$$

$$\sum_{i \in K} A_{i,t} = H_{i,t}, \forall t \in T \quad (22)$$

$$0 \leq A_{i,t} \leq 1, \forall i \in K, t \in T \quad (23)$$

分析可知,当 $H_{i,t} = 0$ 时,意味着为了使交易顺利完成,所有消费者均不能出现购电需求的波动,此时 $f(H_{i,t}) = 0$,模型是确定性模型。当 $H_{i,t} = k$ 时,意味着所有消费者都出现购电需求波动时,交易也能顺利完成,此时 $f(H_{i,t}) = 1$, $A_{i,t} = 1, \forall i \in K$,模型转化为完全鲁棒模型。所以为了获得准确的计算结果,可通过控制不确定预算 $H_{i,t}$

来规避参数的扰动。

由于公式 (20) 最大值问题为可行、有界问题，基于对偶定理可知，其对偶模型也是可行、有界，并且二者的目标函数值相同。所以为方便求解，可写出公式 (20) 的对偶模型：

$$f(H_{i,t}) = \min \chi_{i,t} H_{i,t} + \varphi_{i,t} \quad (24)$$

$$\chi_{i,t} + \varphi_{i,t} \geq \hat{y}_{i,t}, \forall i \in K, t \in T \quad (25)$$

$$\chi_{i,t} \geq 0, \forall i \in K, t \in T \quad (26)$$

$$\varphi_{i,t} \geq 0, \forall i \in K, t \in T \quad (27)$$

式中 $\chi_{i,t}$ 、 $\varphi_{i,t}$ 为模型中的对偶变量。

将上述对偶模型代入公式 (5)，即得到基约束鲁棒方法的微电网售电问题：

$$\max S_t = \max \left(\sum_{i \in K} \tilde{y}_{i,t} p_t \right), \forall t \in T \quad (28)$$

$$\tilde{y}_{i,t} \geq 0, \forall i \in K, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{i \in K} \tilde{y}_{i,t} + \chi_{i,t} H_{i,t} + \varphi_{i,t} \leq P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}}, \forall i \in K, \forall t \in T \quad (30)$$

$$P_t^{\text{RE}} - P_t^{\text{MG}} \geq 0 \quad (31)$$

$$\chi_{i,t} + \varphi_{i,t} \geq \tilde{y}_{i,t}, \forall i \in K, \forall t \in T \quad (32)$$

$$\chi_{i,t} \geq 0 \quad (33)$$

$$\varphi_{i,t} \geq 0 \quad (34)$$

3 结果仿真与分析

本文实验采用 MATLAB 软件作为仿真平台，GUROBI 求解器用于上述问题的求解。分别将使用电网电价、使用统一价格密封拍卖机制 [27] 以及采用本文改进的统一价格同步向上叫价拍卖机制设置为 case1、case2、case3，将考虑不确定性分析并使用改进拍卖机制的交易设置为 case4。首先对参数分析，验证参数 b 、参数 n 对微电网收益的影响，之后分别从微电网的能源交易情况、微电网收益两方面进行对比分析，检验本次优化模型的实际效果。

统一价格密封拍卖机制如下：假设每个竞拍消费者对单位时段可再生能源的估价取自区间 $[p_1, p_n]$ 上的均匀分布的随机变量中，则最终定价为：

$$p_k = p_n + \left(\frac{n-k}{n+1} \right) (p_1 - p_n) \quad (35)$$

在算例仿真中，规定 $p_1 = \bar{h}$ ， $p_n = 0.8\bar{h}$ 。

3.1 优化拍卖仿真结果分析

为了对仿真参数进行验证，本文对初始化参数数值进行如表 1 所示设定。

表 1 仿真实验参数设定值

Table 1 Parameter setting value of simulation experiment

参数/单位	数值	参数/单位	数值
$P_{\text{Max},0}^S/\text{MW}$	2.5	$v^{\text{W,out}}/(\text{m/s})$	25
$G_{a,0}/(\text{W}/\text{m}^2)$	1000	$\hat{\alpha}$	0.1
$T_0/^\circ\text{C}$	25	$\hat{\beta}$	0.035
$N_{\text{ct}}/^\circ\text{C}$	44	\bar{h}	60
$v^{\text{W,in}}/(\text{m/s})$	2	$P_{k_1}^{\text{id}}/\text{W}$	200
$v^{\text{W,ra}}/(\text{m/s})$	14	$P_{k_2}^{\text{id}}/\text{W}$	150
$P_{k_1}^{\text{pe}}/\text{W}$	400	ω_{t1}	0.35
$P_{k_2}^{\text{pe}}/\text{W}$	300	ω_{t2}	0.58
P^{W}/MW	2.05	ω_{t3}	1.0

注： ω_{t1} 、 ω_{t2} 、 ω_{t3} 分别代表冷时段权重、普通时段权重、热门时段权重 [30]。

根据上述数据，经过 Matlab 仿真可得微电网的可再生能源出力情况及能源使用等情况如图 3 所示。

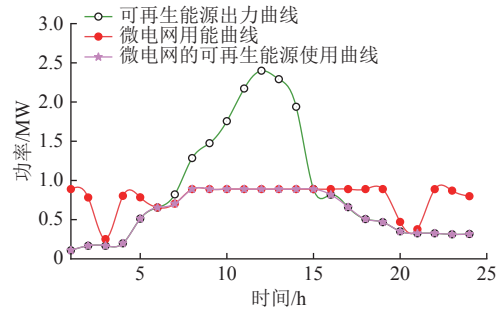


图 3 微电网的能源出力及使用情况

Fig. 3 Energy output and use of microgrid

从图中可知，微电网负载的用电量为 18.943 MW，可再生能源出力一共为 20.216 MW，其中有 13.707 MW 供给微电网自身使用，微电网其余所需电量由电网补足。另外有 6.509 MW 可用于出售，出售时间段在 6:00—15:00。

首先在不考虑用能消费者购电不确定问题下，分析参数 b 、参数 n 对微电网收益的影响，以此确定拍卖电价。在其他参数值保持不变的情况下，不断改变两个参数的值并通过 MATLAB 仿真计

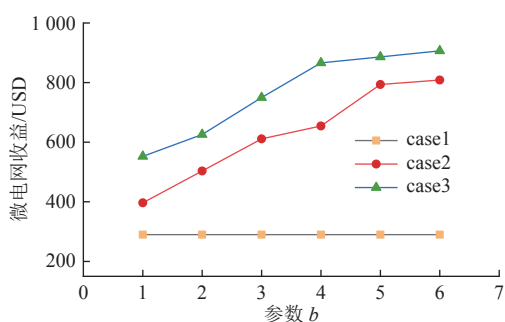


图 4 参数 b 对微电网收益的影响

Fig. 4 The influence of parameter b on the income of microgrid

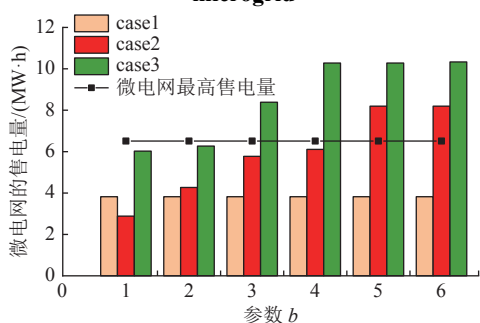


图 5 参数 b 对微电网售电量的影响

Fig. 5 The influence of parameter b on microgrid power sales

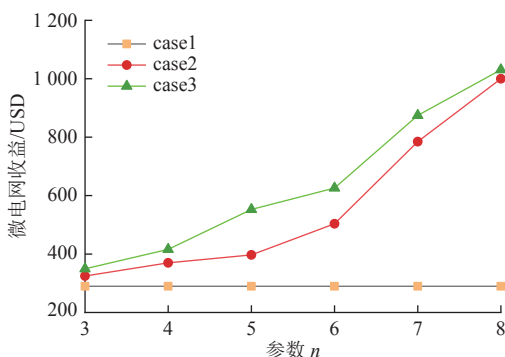


图 6 参数 n 对微电网收益的影响

Fig. 6 The influence of parameter n on the income of microgrid

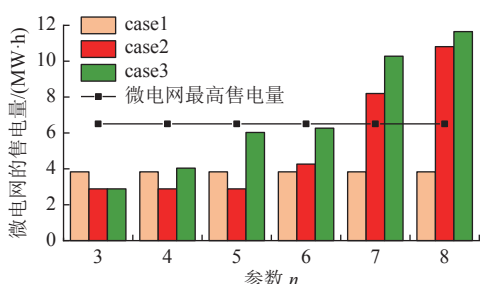


图 7 参数 n 对微电网售电量的影响

Fig. 7 The influence of parameter n on microgrid power sales

算后得到如图 4—7 所示结果。

由上述 4 图分析可知，由于不采用拍卖机制，case1 的收益不会受到参数影响。由图 4、图 5 可知，在两种拍卖机制下，随着参数 b 的增大，当售电量一定时，微电网的收益逐渐增加，证实了微电网收益与拍卖的时段数量呈正相关，所以可以通过控制参数 b 提高收益，并且 case3 的收益为 3 种情况下最高。当参数 $b \geq 4$ 时，微电网的售电量超过其最高售电量，表明微电网为获取更多的收益，减少了自身对于可再生能源的使用，违背微电网能用尽用的使用初衷，不予考虑。综上可知，改进的统一价格同步向上叫价拍卖机制更有利于微电网获取收益，并且每个拍卖者拍卖的时段数越少，微电网获得的收益越大。

同理由图 6、图 7 可知，3 种交易模式下，case1 获取的收益最少；case3 获取的收益最多。同时证实了在两种拍卖机制下，微电网的收益及售电量随着 n 的增大而增大。但是当参数 $n \geq 7$ 时，case2、case3 的售电量大于微电网最高售电量，不予考虑。综上可知改进的拍卖机制更有利于微电网获取收益，并且在可控范围内，拍卖者越多，微电网获得的收益越大。

综合上述情况，可以得知参数 b、n 对微电网的收益均有很大影响，所以在拍卖机制作用下，微电网运营商可对 2 个参数合理控制以获取更高收益。

表 2 单日内 3 种情况下微电网收益、售电量及电价
Table 2 Income, electricity sales and electricity price of microgrid in three cases in a single day

	case1	case2	case3
实际收益/USD	289.7237	503.4177	625.7837
售电量/MW·h	3.823	4.267	6.269
电价/(MW/USD)	75.979	57	32.299 (7:00—10:00、 13:00—18:00) 60.942 (10:00—13:00) 21.330 (18:00—7:00)

结合上表可知，case1 由于售价过高，可再生能源出售率只有 58.73%，剩余能源储存在储能中。case2 的售电量有所上升，出售率占比 65.66%，微电网收益上升。case3 的售电量明显出现明显上升，出售率占比提升到 96.31%，但是微电网收益上升幅度较小，这是由于拍卖电价较低的原因，但是也因此刺激了消费者的购买需求增大。

3.2 考虑购电需求不确定性的仿真结果

考虑到消费者的购电需求出现波动，为了保证交易的正常进行，即保证系统的鲁棒性，本节计算并展示了不确定性参数 $H_{i,t}$ 对微电网售电量和收益的影响。在其他参数值保持不变的情况下（这里列举 $b=3, n=6$ 时的情况），不断改变参数 $H_{i,t}$ 的值并通过 MATLAB 软件计算后得到如图 8 所示结果。

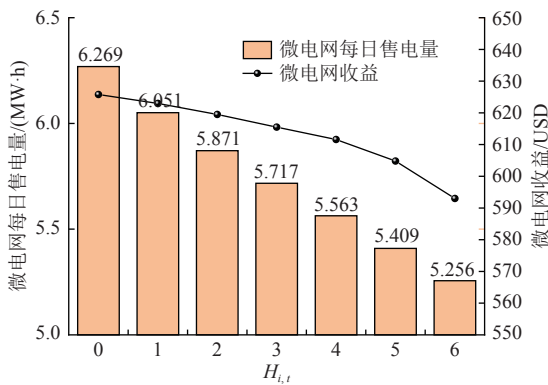


图 8 不确定性参数 $H_{i,t}$ 对微电网售电量及收益的影响
Fig. 8 Influence of uncertain parameters on $H_{i,t}$ microgrid power sales and income of data center

由图 8 可知，当不确定性参数 $H_{i,t}$ 增加，即购电需求出现波动的消费者数量增多时，为了确保交易的正常进行，需要以售电量下降作为代价，所以微电网售电量随着 $H_{i,t}$ 的增加而下降，微电网的收益随之下降。取 $H_{i,t}=3$ 时的仿真结果，可以得到 4 种场景下微电网的分时段能源交易情况，此时 case4 的售电量为 5.717 MW·h，微电网收益为 615.48 USD。4 种场景下能源交易情况如图 9 所示。

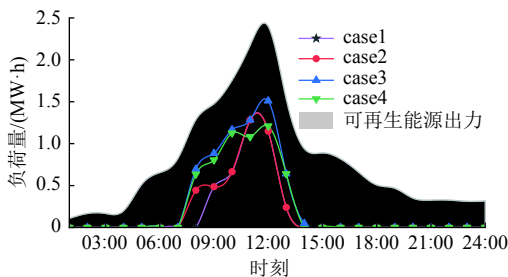


图 9 单日可再生能源出力与能源交易情况
Fig. 9 Daily renewable energy output and energy trading

图 9 给出了微电网单日可再生能源的出力情况，通过与 case1、case2、case3、case4 下的售电量做对比，并结合表 2 可以得出以下结论：4 种

交易场景中，case3 可再生能源出售率最高，微电网获取的收益最大。case1 的能源出售率最低，微电网获取的收益最小。case4 由于考虑了交易系统的鲁棒性，售电量受到一定影响，收益有所下降，但是售电量和收益情况还是要优于 case1 和 case2。

综合上述分析，可知在不影响微电网对可再生能源的日常使用下，可通过拍卖交易将可再生能源出售出去，获取一定收益。并且采用改进的统一价格同步向上叫价拍卖机制使得出售率明显提高，在考虑拍卖者购电需求不确定的情况下，实现了微电网收益最大化的目标。

4 结语

本文针对微电网盈余的可再生能源消纳问题，提出了计及购电需求不确定性的微电网能源竞价交易模型。其中采用统一价格同步向上叫价拍卖机制进行定价，并提出了拍卖机制的改进方案来平衡消费者对不同时间段的拍卖需求；采用鲁棒线性优化算法来解决用能消费者购电需求不确定性问题。该模型提高了能源的出售率，并且在保证较低出售电价的同时，最大限度地提高了微电网的收益。

结合上述研究基础，后续研究将进一步围绕多个微电网之间的联合交易进行，以期实现微电网间的电能供需平衡，促进微电网的绿色化发展。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局关于2021年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知[EB/OL]. [2022-06-20]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-04/21/c_1310587748.htm.
- [2] 柳逸月. 中国能源系统转型及可再生能源消纳路径研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [3] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 193–207.
- [4] QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, *et al.* Review and prospect of distribution network planning considering flexible load access[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 193–207(in Chinese).
- [4] RAHBAR K, CHAI C C, ZHANG R. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016:

- 1482-1493.
- [5] 孟明, 陈世超, 赵树军, 等. 新能源微电网研究综述[J]. *现代电力*, 2017, 34(1): 1-7.
MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, *et al.* Review of new energy microgrid research[J]. *Modern Electric Power*, 2017, 34(1): 1-7(in Chinese).
- [6] PAPANIKOLAOU D, PUDJANTO D, STRBAC G. Decentralized coordination of microgrids with flexible demand and energy storage[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 5(4): 1406-1414.
- [7] GIRALDO J S, CASTRILLON J A, JC LÓPEZ, *et al.* Microgrids energy management using robust convex programming[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4):4520-4530.
- [8] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(01): 1-18.
LIU Chang, ZHOU Jiankun, ZHAO Dongming, *et al.* Review on flexible and safe operation of renewable energy microgrid using energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(01): 1-18(in Chinese).
- [9] THIRUGANANAM K, MOURSI M S E, KHADKIKAR V, *et al.* Energy management of grid interconnected multi-microgrids based on P2P energy exchange: a data driven approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(2): 1546-1562.
- [10] VALENCIA F, COLLADO J, D SÁEZ, *et al.* Robust Energy management system for a microgrid based on a fuzzy prediction interval model[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1486-1494.
- [11] 周步祥, 徐艺宾. 基于机器学习的源荷互动微电网优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(02): 144-150.
ZHOU Buxiang, XU Yibin. Optimal dispatching of source load interactive microgrid based on machine learning [J] *Journal of Power System and Automation*, 2022, 34 (02): 144-150.
- [12] 周开乐, 沈超, 丁帅, 等. 基于遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(03): 68-73.
ZHOU Kaile, SHEN Chao, DING Shuai, *et al.* Power economic dispatch of microgrid based on genetic algorithm[J]. *China Management Science*, 2014, 22(03): 68-73(in Chinese).
- [13] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(20): 43-49.
WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatching of microgrid based on intelligent single particle algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(20): 43-49(in Chinese).
- [14] NUNNA H S V S K, SRINIVASAN D. Multiagent-based transactive energy framework for distribution systems with smart microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017.
- [15] 梁永强. 分布式发电及其市场化交易问题研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [16] 张建华, 马丽, 刘念. 博弈论在微电网中的应用及展望[J]. *电力建设*, 2016, 37(06): 55-61.
ZHANG Jianhua, MA Li, LIU Nian. Application and prospect of game theory in microgrid[J]. *Power Construction*, 2016, 37(06): 55-61(in Chinese).
- [17] 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. Coordinated scheduling of virtual power plants with electric vehicles based on master-slave game[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 48-55(in Chinese).
- [18] 周步祥, 彭昊宇, 臧天磊, 等. 基于Stackelberg博弈的多微电网系统点对点交易策略[J/OL]. *电力系统及其自动化学报*: 1-9[2022-06-20]. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000980.
ZHOU Buxiang, PENG Haoyu, ZANG Tianlei, *et al.* Point to point trading strategy of multi microgrid system based on Stackelberg game [J/OL] *Journal of Power System and Automation*: 1-9[2022-06-20]. DOI:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000980.
- [19] 周步祥, 杨明通, 史述青, 等. 基于区块链的微电网市场博弈模型[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 15-22.
ZHOU Buxiang, YANG Mingtong, SHI Shuqing, *et al.* Blockchain based potential game model of microgrid market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 15-22(in Chinese).
- [20] BOKKISAM H R, SINGH S, ACHARYA R M, *et al.* Blockchain-based Peer-to-Peer transactive energy system for community microgrid with demand response management[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(1): 198-211.
- [21] 王辉, 廖昆, 陈波波, 等. 低碳形势下基于区块链技术的含微电网电力市场交易出清模型[J]. *现代电力*, 2019, 36(01): 14-21.
WANG Hui, LIAO Kun, CHEN Bobo, *et al.* Transaction clearing model of power market with microgrid based on blockchain technology in low-carbon situation[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(01): 14-21(in Chinese).
- [22] 李咸善, 王苗. 考虑源荷不确定性的多微电网鲁棒优化调度与VCG机制竞价策略[J/OL]. *电网技术*: 1-15[2022-07-

- 17]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0843.
LI Xianshan, WANG Miao. Robust optimal dispatch and VCG mechanism bidding strategy for multi-microgrid considering source load uncertainty [J/OL]. *Power System Technology*: 1-15 [2022-07-17]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0843.
- [23] 宫汝凯. 电力市场竞价上网的拍卖机制设计[J/OL]. *中国管理科学*: 1-13[2022-07-27]. DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.2071.
GONG Rukai. Design of auction mechanism for bidding in power market [J/OL]. *Chinese Management Science*: 1-13 [2022-07-15]. DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.2071.
- [24] MADANI M, VAN VYVE M. A MIP framework for non-convex uniform price day-ahead electricity auctions[J]. *Euro Journal on Computational Optimization*, 2017, 5(1-2).
- [25] 刘杨, 刘天羽. 基于区块链和动态定价模型的微电网P2P能源交易[J]. *智慧电力*, 2022, 50(03): 30-36.
LIU Yang, LIU Tianyu. Microgrid P2P energy trading based on blockchain and dynamic pricing model[J]. *Smart Power*, 2022, 50(03): 30-36(in Chinese).
- [26] 李彬, 杜亚彬, 曹望璋, 等. 考虑风光储互补与工作负载分配的数据中心优化调度[J]. *现代电力*, 2022, 39(03): 356-363.
LI Bin, DU Yabin, CAO Wangzhang, *et al.* Optimal scheduling of data center considering wind power storage complementarity and workload distribution[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(03): 356-363(in Chinese).
- [27] 宋起柱. 无线电频谱资源的市场分配机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [28] MILGROM P, WEBER R J. The value of information in a sealed-bid auction[J]. *Journal of Mathematical Economics*, 1982, 10(1): 105-114.
- [29] 刘慧. 不确定因素下网络设施选址鲁棒性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [30] 汤波, 蒋向兵, 余光正, 等. 一种面向新能源就地消纳的园区储能与电价协调优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(5): 11.
TANG Bo, JIANG Xiangbing, YU Guangzheng, *et al.* A coordinated optimization method of park energy storage and electricity price for local consumption of new energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(5): 11(in Chinese).

收稿日期: 2022-06-23

作者简介:

王冰(1989), 男, 博士, 工程师, 研究方向为需求侧管理与综合能源系统优化运行, E-mail: bingwang1025@163.com;

陈淑娇(1999), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网能源优化管理、需求侧能源管理, E-mail: 18438696689@163.com;

杜亚彬(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据中心能耗优化、需求侧管理, E-mail: dyb19980214@126.com;

李彬(1983), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气信息技术及智能电网信息通信技术, E-mail: direfish@163.com;

祁兵(1965), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统信息、通信及智能用电, E-mail: qbing@ncepu.edu.cn;

王婧(1984), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力需求侧管理、通信及智能用电, E-mail: pingjingbei@126.com。