

4-15-2024

Distributed Energy Management Strategy of Microgrid Based on Master-slave Game

Miaomiao Ma

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China, mamm@ncepu.edu.cn

Hao Wang

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Lipeng Dong

Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd, China Energy Engineering Group, Nanning 530007, China

Xiangjie Liu

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Distributed Energy Management Strategy of Microgrid Based on Master-slave Game

Abstract

Abstract: Under the operation mode of power market, based on two-layer master-slave game, a distributed energy management strategy for the microgrid is proposed to tackle the conflict between the overall optimal operation of renewable microgrid and the maximum profit of each investor. To fully consider the balance between energy supply and demand, the concept of power trading agent is introduced, and an integrated demand response strategy based on consumer satisfaction and adjustable load is proposed on the user side. Considering the initiative and decision-making ability of power supply and load, the decision-making game model is established with power trading agent as leader and distributed power supply agent and load agent as followers. The existence and uniqueness of Stackelberg game are proved, and the differential evolution algorithm combining quadratic programming is used to solve the proposed model. The excellent convergence and economy of the proposed model and strategy are verified by the case study which include distributed powers and community users.

Keywords

energy management, master-slave game, microgrid, power price strategy, Stackelberg equilibrium

Recommended Citation

Ma Miaomiao, Wang Hao, Dong Lipeng, et al. Distributed Energy Management Strategy of Microgrid Based on Master-slave Game[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 834-843.

基于主从博弈的微电网分布式能量管理策略

马苗苗¹, 王浩¹, 董利鹏², 刘向杰¹

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 中国能源建设集团 广西电力设计研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 针对电力市场运营模式下, 新能源微电网的整体优化运行与多方投资者的最大利益化之间的冲突问题, 提出了基于双层主从博弈的微电网分布式能量管理策略。为充分考虑能源供需两侧的平衡, 引入了电力交易代理商的概念, 在用户侧提出基于消费者满意度和可调节负荷的综合需求响应策略; 考虑源-荷双方的主动性和决策能力, 建立了以电力交易代理商为领导者, 分布式电源代理商和负荷代理商为追随者的交易决策博弈模型, 证明了stackelberg均衡解存在唯一性, 采用结合二次规划的差分进化算法对所提模型进行求解。通过对包含分布式电源和社区用户的案例进行分析, 验证了所提模型和策略具有良好的收敛性和经济性。

关键词: 能量管理; 主从博弈; 微电网; 电价策略; Stackelberg均衡

中图分类号: TP391.9; TM734 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)04-0834-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1405

引用格式: 马苗苗, 王浩, 董利鹏, 等. 基于主从博弈的微电网分布式能量管理策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(4): 834-843.

Reference format: Ma Miaomiao, Wang Hao, Dong Lipeng, et al. Distributed Energy Management Strategy of Microgrid Based on Master-slave Game[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 834-843.

Distributed Energy Management Strategy of Microgrid Based on Master-slave Game

Ma Miaomiao¹, Wang Hao¹, Dong Lipeng², Liu Xiangjie¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd, China Energy Engineering Group, Nanning 530007, China)

Abstract: Under the operation mode of power market, based on two-layer master-slave game, a distributed energy management strategy for the microgrid is proposed to tackle the conflict between the overall optimal operation of renewable microgrid and the maximum profit of each investor. To fully consider the balance between energy supply and demand, the concept of power trading agent is introduced, and an integrated demand response strategy based on consumer satisfaction and adjustable load is proposed on the user side. Considering the initiative and decision-making ability of power supply and load, the decision-making game model is established with power trading agent as leader and distributed power supply agent and load agent as followers. The existence and uniqueness of Stackelberg game are proved, and the differential evolution algorithm combining quadratic programming is used to solve the proposed model. The excellent convergence and economy of the proposed model and strategy are verified by the case study which include distributed powers and community users.

Keywords: energy management; master-slave game; microgrid; power price strategy; Stackelberg equilibrium

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61873091); 国家重点研发计划(2020YFB1506600, 2020YFB1506604); 东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室开放课题(MPSS2021-03)

第一作者: 马苗苗(1982-), 女, 教授, 博导, 博士, 研究方向为模型预测控制、新能源电力系统优化与控制。Email: mamm@ncepu.edu.cn

0 引言

随着微电网与大电网的发展与融合, 安全高效和低碳清洁开始成为能源发展的主流方向。分布式能源的间歇性与负荷需求的时变性, 使微电网的能量管理问题愈加复杂。因此, 如何有效整合供需两侧资源, 提高多能供应的安全性、灵活性与经济性是当前微电网在电力交易市场中亟需解决的问题^[1]。

为提高微电网中分布式能源的发电效率, 缓解用户侧负荷需求的压力, 微电网的能量管理策略受到广泛关注, 文献[2]提出了基于非合作博弈的微电网联合供能的能量管理策略, 给出微电网在电力市场交易的一般模型, 并考虑了微电网之间的交易触发条件与影响因素, 为多微网能源调度策略的制订提供了充分的理论依据。文献[3]提出了一种结合强化学习的微电网分布式经济调度方法, 使强化学习在不断迭代过程中获得控制策略的最优解, 实现了经济效益的最大化, 但并未考虑负荷波动所造成的影响。文献[4]针对包含冷热电联供的综合能源系统, 提出了一种混合粒子群优化算法, 在考虑负荷波动补偿的基础上, 实现了主从博弈双方效益的最优化。文献[5]基于热电耦合需求响应, 建立了基于混合整数规划算法的微电网经济调度策略, 实现了微电网短期及超短期的能源管理, 但并未考虑储能单元。文献[6]采用主从博弈模型, 基于用户侧提出了一种针对电价与低碳补偿激励的需求响应策略, 实现了经济效益和环境保护的双重目标。文献[7]将微电网运营商与用户之间的交易模型嵌入到主从博弈框架中, 建立了一主多从博弈协同优化模型, 并引入了负荷满意度, 实现了用户侧最大消费者剩余(消费者消费一定数量的某种商品愿意支付的最高价格与这些商品的实际市场价格之间的差额)。文献[8]提出了多主体主从博弈的微电网优化策略, 通过分析多个分布式能源与用户的交易过程, 提升了微电网群的经济效益, 但并未证明多主体博

弈模型均衡解的存在性。文献[9]针对风光发电的不确定性, 提出了一种新的双层博弈, 建立了计划产出博弈和容量分配博弈, 但并未考虑用户侧的需求响应。

本文针对新能源微电网并网后, 能源供需两侧不平衡问题, 提出了以电力交易代理商为领导者、分布式电源代理商与负荷代理商为跟随者的双层主从博弈的微电网能量管理策略, 并证明了Stackelberg均衡解的存在性和唯一性, 从而实现了主从各方利益的最优化。

1 微电网电力市场交易模型

1.1 系统结构

双层微电网电力市场交易模型如图1所示, 上层交易代理商作为能源供需两侧的桥梁, 与供需两侧进行信息与电能的双向交互。电力交易代理商从分布式电源代理商购买电能, 并将其出售给负荷代理商, 以获取足够多的差价利润为优化目标。当分布式电源代理商的机组出力(分布式电源的发电功率)无法满足用户侧的用能需求时, 电力交易代理商将与主电网进行交互, 购买高价电能。这一模式的引入^[10], 使电力交易市场的电价策略更加灵活。

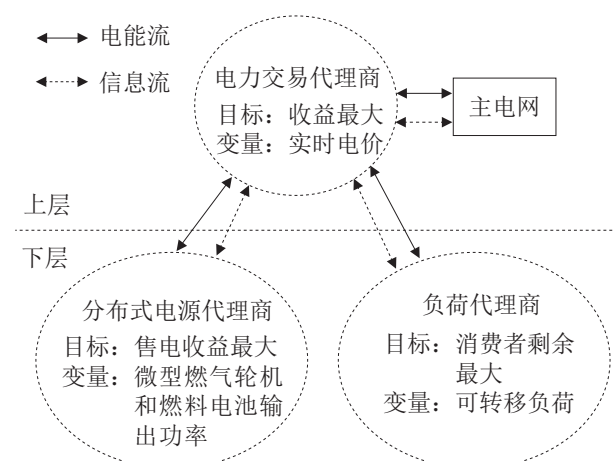


图1 双层微电网电力市场交易模型

Fig. 1 Double layer microgrid electricity market transaction model

下层分布式电源代理商将新能源发电与可控发电单元(微型燃气轮机和燃料电池)相结合,实时优化各机组出力,以获取足够多的售电利润为优化目标,发电过程遵循新能源发电优先(采用最大化消纳准则),可控单元补充发电的原则。

下层负荷代理商引入了可转移负荷,实时优化需求量,以获取最大消费者剩余为优化目标^[11],通过削峰填谷,满足用户侧的利益最大化。

1.2 能源交易过程

微电网电力交易包含定价决策和定量决策2个阶段,二者存在先后次序,彼此互相影响,循环迭代,直至达到博弈均衡。

阶段1(定价):上层电力交易代理商根据下层供需关系和市场信息制定购售电价,以最大化差价利润为优化目标。

阶段2(定量):下层分布式电源代理商和负荷代理商分别根据上层电力交易代理商的价格信号确定最优出力和负荷需求。因此,下层的最优决策可以看作是上层目标函数的决策变量。上层的最优决策(价格策略)可以看作是下层目标函数的变量。彼此构成约束与互动。

2 新能源微电网分布式电源模型

2.1 风电机组模型

风机出力的不确定性主要来源于风速固有的间歇性和随机性,在拟合风速的概率分布模型中,Weibull分布模型应用广泛^[12],其分布函数和概率密度函数为

$$F(v) = 1 - \exp(-(v/c)^k) \quad (1)$$

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp(-(v/c)^k) \quad (2)$$

式中: k 和 c 分别为Weibull分布的形状和尺度参数; v 为给定风速。

风速的不连续性导致了风电机组出力的波动性,其输出功率为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_r \frac{(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})}, & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{ci} 和 v_{co} 分别为风机切入风速和风机切出风速; v 和 v_r 分别为实际风速与额定风速; P_r 为风机额定功率。

2.2 光伏机组模型

光伏发电机组的工作原理是利用半导体界面的光生伏特效应将光能直接转变为电能,并通过储能元件向设备供电。光伏电池输出功率的大小不仅受光照强度影响,还受外界温度的影响。其输出功率为

$$P_{PV} = F_f IU \quad (4)$$

式中: F_f 为填充因子; I 为负载电流; U 为端电压。

$$\begin{cases} F_f = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \\ I = s [I_{SC} + K_I (T_c - 25)] \\ U = U_{OC} - K_V \cdot T_c \\ T_c = T_a + \frac{s(T_{OT} - 20)}{0.8} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_{MPP} 和 I_{MPP} 分别为光伏电池最大功率点电压和电流; V_{OC} 和 I_{SC} 分别为光伏电池的开路电压和短路电流; s 为光照强度; K_I 和 K_V 分别为电流系数和电压系数; T_c 为光伏电池表面温度; T_{OT} 为光伏电池标准工作温度; T_a 为环境温度。

2.3 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机是一种以燃料(燃油或燃气)和空气为介质的旋转式热力发动机。因其输出功率稳定且对电网影响较小,而受到广泛应用。微型燃气轮机的输出功率为

$$P_{MT} = \eta_{MT} V_{MT} L \quad (6)$$

式中: η_{MT} 为微型燃气轮机的发电效率; V_{MT} 为消耗的天然气的量; L 为天然气低热热量值。其发电成本为

$$C_{MT} = a_1 P_{MT}^2 + b_1 P_{MT} + c_1 \quad (7)$$

式中: a_1 、 b_1 和 c_1 为成本系数。

微型燃气轮机输出功率约束:

$$0 \leq P_{MT} \leq P_{MT}^{\max} \quad (8)$$

式中: P_{MT}^{\max} 为微型燃气轮机最大输出功率。

2.4 燃料电池模型

燃料电池作为一种效率极高的能量转换装置, 可直接将燃料的化学能转换为电能。

输出功率约束:

$$0 \leq P_{FC} \leq P_{FC}^{\max} \quad (9)$$

式中: P_{FC}^{\max} 为燃料电池最大输出功率。

3 微电网优化目标函数

3.1 上层电力交易代理商目标函数

电力交易代理商从供电侧购买电能, 并出售给用户侧, 从而获取差价利润^[13]。其购售电价格为

$$\begin{aligned} p_{cb} &= [p_{cb}^1, p_{cb}^2, \dots, p_{cb}^T] \\ p_{cs} &= [p_{cs}^1, p_{cs}^2, \dots, p_{cs}^T] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: p_{cb}^t 、 p_{cs}^t 分别为电力交易代理商在 t 时段从分布式电源代理商购电和向用户侧售电的价格。

考虑到电力交易代理商的优化目标是最大化自身收益, 故其目标函数为

$$\max f_{ERA} = \sum_{t=1}^T (p_{cs}^t P_{LA}^t - p_{cb}^t P_{DA}^t - C_g^t) \quad (11)$$

式中: P_{LA}^t 、 P_{DA}^t 分别为电力交易代理商在 t 时段向负荷代理商出售和向分布式电源代理商购买的电能; C_g^t 为和主电网的交互成本。

$$C_g^t = \max(P_{LA}^t - P_{DA}^t, 0) p_{gs}^t + \min(P_{LA}^t - P_{DA}^t, 0) p_{gb}^t \quad (12)$$

式中: p_{gb}^t 、 p_{gs}^t 分别为主电网在 t 时段的上网电价和售电电价。

目标优化过程中, 各参数变量约束如下。

保证电力交易代理商的差价利润:

$$p_{cb}^t < p_{cs}^t, t \in [1, 2, \dots, T] \quad (13)$$

避免下层供需两侧直接与主电网交易, 需要

保证电力交易代理商的购电价格高于主电网的上网价格, 且售电价格低于主电网的售电电价:

$$p_{gb}^t < p_{cb}^t < p_{gs}^t, t \in [1, 2, \dots, T] \quad (14)$$

$$p_{gb}^t < p_{cs}^t < p_{gs}^t, t \in [1, 2, \dots, T] \quad (15)$$

保证电力交易代理商的平均售电价不得超过规定的平均售电价格上限:

$$\sum_{t=1}^T p_{cs}^t \leq T \cdot \bar{p}_{cs, \max} \quad (16)$$

3.2 下层分布式电源代理商目标函数

当下层分布式电源代理商收到电力交易代理商的电价信号后, 需要优化内部各机组单元的出力。为获取最大利润, 其目标函数为

$$\max f_{DA} = \sum_{t=1}^T (p_{cb}^t P_{DA}^t - C_{DA}^t) \quad (17)$$

式中: p_{cb}^t 为电力交易代理商在 t 时段向下层分布式电源代理商提供的购电价格; C_{DA}^t 为分布式电源代理商的发电成本; P_{DA}^t 为分布式电源的总输出功率。

$$P_{DA}^t = P_{WT}^t + P_{PV}^t + P_{MT}^t + P_{FC}^t \quad (18)$$

式中: P_{WT}^t 和 P_{PV}^t 分别为风电机组和光伏机组的输出功率; P_{MT}^t 和 P_{FC}^t 分别为微型燃气轮机和燃料电池的输出功率。

微电网运行过程中, 为鼓励新能源发电, 在此假设新能源发电无成本, 且采用最大化消纳原则^[14], 即新能源发电量能够全部售出。微型燃气轮机和燃料电池的成本函数为

$$C_{MT}^t = a_1 (P_{MT}^t)^2 + b_1 P_{MT}^t + c_1 \quad (19)$$

$$C_{FC}^t = a_2 (P_{FC}^t)^2 + b_2 P_{FC}^t + c_2 \quad (20)$$

$$C_{DA}^t = C_{MT}^t + C_{FC}^t \quad (21)$$

式中: C_{MT}^t 和 C_{FC}^t 分别为燃气轮机和燃料电池的发电成本; a_i 、 b_i 和 c_i 为成本系数。

分布式电源机组出力约束:

$$0 \leq P_{MT}^t \leq P_{MT}^{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{FC}^t \leq P_{FC}^{\max} \quad (23)$$

3.3 下层负荷代理商目标函数

负荷代理商接收到上层电力交易代理商的电

价信号后, 需要优化自身需求, 以最大消费者剩余作为优化目标。其目标函数为

$$\max f_{LA} = \sum_{t=1}^T (U_{LA} - p_{cs}^t P_{LA}^t) \quad (24)$$

式中: U_{LA} 为用户侧的效用函数; $p_{cs}^t P_{LA}^t$ 为用户侧的购电成本。两者之差反映了用户在电力交易过程中, 主观程度上所获得的额外收益。

$$U_{LA} = v P_{LA}^t - \frac{\mu}{2} (P_{LA}^t)^2 \quad (25)$$

式中: v 和 μ 为用户的偏好系数; P_{LA}^t 为用户侧的负荷需求, 根据负荷的重要性进行划分。

$$P_{LA}^t = P_{vl}^t + P_{sl}^t \quad (26)$$

式中: P_{vl}^t 为重要负荷; P_{sl}^t 为可转移负荷。且需满足约束:

$$0 \leq P_{sl}^t \leq P_{sl,max}^t \quad (27)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{sl}^t = E_{sl} \quad (28)$$

式中: $P_{sl,max}^t$ 为负荷代理商在 t 时段可转移负荷的上限; E_{sl} 为可调节负荷的总量。

3.4 优化过程

上层电力交易代理商根据下层代理商的供需关系等信息制定购售电价格, 下层分布式电源代理商根据上层的购电价格, 在追求最大化售电利润的过程中, 优化自身燃气轮机和燃料电池的机组出力。下层负荷代理商根据上层的售电价格, 在追求最大化消费者剩余的过程中, 优化自身的可转移负荷。继而上层电力交易代理商接收到更新的机组出力和负荷需求后, 在最大化差价利润的过程中, 调整价格策略。如此循环往复, 直至达到博弈均衡。

4 主从博弈模型的构建及求解

4.1 主从博弈模型的构建

供能侧与用户侧的优化都是基于电力交易代理商的定价策略进行的, 而它们的优化结果同样会反作用于电力交易代理商的定价策略, 这种交

易模式符合主从递阶结构的动态博弈情况^[15]。因此, 本文将电力交易代理商作为领导者, 分布式电源代理商和负荷代理商为跟随者, 建立了一主多从的双层 Stackelberg 博弈模型:

$$G = \{X; \lambda_{ERA}; \{\theta_{DPA}, \theta_{LA}\}; f_{ERA}; \{f_{DPA}, f_{LA}\}\} \quad (29)$$

以参与者、策略和收益为3个组成要素。

(1) 参与者: 电力交易代理商、分布式电源代理商和负荷代理商。

(2) 策略: 领导者电力交易代理商的策略为购售电定价集合, 以向量形式表示为 $\lambda_{ERA} = (p_{cb}, p_{cs})$; 分布式电源代理商的策略为微型燃气轮机和燃料电池的输出功率, 以向量形式表示为 $\theta_{DPA} = (P_{MT}, P_{FC})$; 负荷代理商的策略为可调节负荷的功率, 表示为 $\theta_{LA} = P_{sl}$ 。

(3) 收益: 各参与方收益分别为第3节中所定义各个目标函数值, 通过式(11)(17)(24)计算。

4.2 Stackelberg 均衡的证明

在博弈论中, 所有参与者的最佳策略集合称为均衡解, 当领导者与跟随者们的任何一方都无法通过单方面改变策略获取更大收益, 此时便称博弈达到 Stackelberg 均衡^[16-17]。

假设 $(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*)$ 为电力交易过程中的最佳策略集合, 即满足 $f_{ERA}(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*) \geq f_{ERA}(\lambda_{ERA}, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*)$; $f_{DPA}(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*) \geq f_{DPA}(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}, \theta_{LA}^*)$; $f_{LA}(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*) \geq f_{LA}(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA})$, 则 $(\lambda_{ERA}^*, \theta_{DPA}^*, \theta_{LA}^*)$ 就称为本文主从博弈模型的 Stackelberg 均衡解。当然, 在求解均衡解之前, 需要证明它的存在性与唯一性。

定理1: 在多参与者博弈中, 当博弈模型满足以下条件时, 则存在唯一的 Stackelberg 均衡解。

(1) 每个参与者的策略集合在欧式空间中皆为非空的、封闭的、有界的凸集;

(2) 针对领导者的策略, 所有跟随者的策略存在唯一最优解;

(3) 针对追随者的策略, 领导者的策略存在唯一最优解。

证明如下:

(1) 根据本文双层主从博弈模型可知, 领导者的策略需满足式(13)~(16), 追随者分布式电源代理商的策略需满足式(22)(23), 追随者负荷代理商的策略需满足式(27)(28), 故每个参与者的策略集合都是非空且紧凸的。

(2) 由式(10)可知, 在时刻分布式电源代理商的收益函数为

$$f_{DA}^t = p_{cb}^t P_{DA}^t - C_{DA}^t \quad (30)$$

对式(30)分别求关于 P_{MT}^t 和 P_{FC}^t 的一阶偏导:

$$\frac{\partial f_{DA}^t}{\partial P_{MT}^t} = p_{cb}^t - 2a_1 P_{MT}^t - b_1 \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_{DA}^t}{\partial P_{FC}^t} = p_{cb}^t - 2a_2 P_{FC}^t - b_2 \quad (32)$$

令一阶偏导等于0, 可得

$$P_{MT,0}^t = (b_1 - p_{cb}^t) / -2a_1 \quad (33)$$

$$P_{FC,0}^t = (b_2 - p_{cb}^t) / -2a_2 \quad (34)$$

对式(30)分别求关于 P_{MT}^t 和 P_{FC}^t 的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 f_{DA}^t}{\partial (P_{MT}^t)^2} = -2a_1 \quad (35)$$

$$\frac{\partial^2 f_{DA}^t}{\partial (P_{FC}^t)^2} = -2a_2 \quad (36)$$

由于成本系数皆为正, 则二阶偏导始终为负, 故 $(P_{MT,0}^t, P_{FC,0}^t)$ 为式(30)的极大值点。由于受策略区间上下限的约束, 当购售电价格变化时, 极值点有可能落在端点上, 故分布式电源代理商的最优策略取值为

$$P_{MT,opt}^t \in \{0, P_{MT,0}^t, P_{MT}^{\max}\} \quad (37)$$

$$P_{FC,opt}^t \in \{0, P_{FC,0}^t, P_{FC}^{\max}\} \quad (38)$$

因此, 不论取值如何, 当上层领导者的购电价格给定后, 跟随者分布式电源代理商的发电策略存在唯一最优解。

同样地, 在 t 时刻对负荷代理商的收益函数求关于 P_{sl}^t 的一阶偏导, 可得

$$\frac{\partial f_{LA}^t}{\partial P_{sl}^t} = v - \mu(P_{vl}^t - P_{sl}^t) - p_{es}^t \quad (39)$$

令一阶偏导等于0, 可得

$$P_{sl,0}^t = (v - \mu P_{vl}^t - p_{es}^t) / \mu \quad (40)$$

对负荷代理商的收益函数求关于 P_{sl}^t 的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 f_{LA}^t}{\partial (P_{sl}^t)^2} = -\mu \quad (41)$$

已知 μ 为大于0的系数, 故二阶偏导为负, 收益函数具有唯一的极大值点。又因为优化变量的区间约束, 负荷代理商的最优策略取值为

$$P_{sl,opt}^t \in \{0, P_{sl,0}^t, P_{sl}^{\max}\} \quad (42)$$

因此, 不论取值如何, 当领导者的售出电价给定后, 追随者负荷代理商的用能策略存在唯一最优解。

(3) 假设在 t 时刻电力交易代理商向用能侧售出的电量大于从供能侧购买的电量, 则其收益函数为

$$f_{ERA}^t = P_{LA}^t (p_{es}^t - p_{gs}^t) + P_{DA}^t (p_{gs}^t - p_{cb}^t) \quad (43)$$

对式(43)分别求关于 p_{es}^t 和 p_{cb}^t 的一阶偏导:

$$\frac{\partial f_{ERA}^t}{\partial p_{es}^t} = \frac{v + p_{gs}^t - 2p_{cb}^t}{\mu} \quad (44)$$

$$\frac{\partial f_{ERA}^t}{\partial p_{cb}^t} = \frac{(a_1 + a_2)(p_{gs}^t - 2p_{cb}^t)}{a_1 a_2} - (P_{WT}^t + P_{FC}^t) \quad (45)$$

令一阶偏导等于0, 可得

$$\begin{cases} p_{es,0}^t = \frac{(v + p_{gs}^t)}{2} \\ p_{cb,0}^t = \frac{p_{gs}^t}{2} - \frac{a_1 a_2 (P_{WT}^t + P_{FC}^t)}{2(a_1 + a_2)} \end{cases} \quad (46)$$

对式(43)分别求关于 p_{es}^t 和 p_{cb}^t 的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 f_{ERA}^t}{\partial (p_{es}^t)^2} = -\frac{2}{\mu} \quad (47)$$

$$\frac{\partial^2 f_{ERA}^t}{\partial (p_{cb}^t)^2} = -\frac{2(a_1 + a_2)}{a_1 a_2} \quad (48)$$

显然电力交易代理商收益函数的二阶偏导皆为负数, 故当跟随者策略确定后, 领导者的策略集合存在唯一最优解。当 $P_{LA}^t < P_{DA}^t$ 时, 同理可证领导者存在唯一最优解, 证明过程与上述类似, 这里不再赘述。至此, 证明完毕, 即本文提出的主从博弈模型存在唯一的 Stackelberg 均衡解。

4.3 主从博弈模型的求解

在传统的针对多目标优化的各种方法中，通常需要知道所有参与者的具体信息，比如，目标函数、策略等，然而，在博弈优化中，各参与者需要独立决策，且电力交易市场中信息并不透明^[18-19]。

因此，本文提出了一种差分进化算法联合二次规划(differential evolution algorithm and quadratic programming, DEA-QP)的分布式均衡求解方法。在上层，差分进化算法不断进行最优解的搜索逼近，下层采用二次规划算法，在接受上层给定的价格信号的基础上，求解分布式电源代理商与负荷代理商的最优策略。算法流程如图2所示。

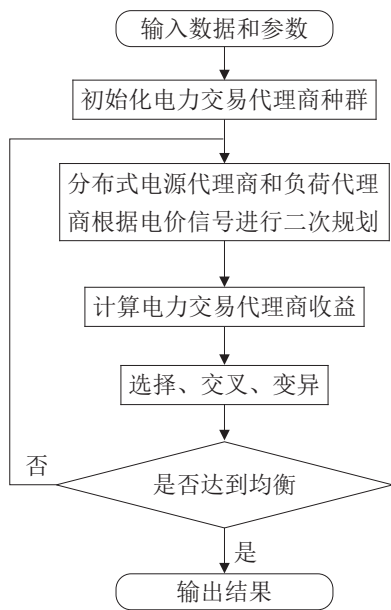


图2 DEA-QP 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of DEA-QP algorithm

具体博弈求解过程如下。

(1) 上层博弈求解步骤

步骤 1: 电力交易代理商根据供需关系及市场信息，制定购售电价格；

步骤 2: 分布式电源代理商和负荷代理商根据价格信号，利用二次规划算法确定最优的机组出力和负荷需求；

步骤 3: 根据更新的 P_{DA}^t 和 P_{LA}^t ，电力交易代理商及时更新价格策略，并反馈给下层博弈求解的步骤 2。

(2) 下层博弈求解步骤

步骤 1: 输入 P_{WT} 、 P_{PV} 、 p_{vl}^t 等参数；

步骤 2: 供需两侧接收上层的价格策略；

步骤 3: 利用二次规划确定最优机组出力和负荷需求，并反馈给上层博弈求解的步骤 1。

5 算例分析

5.1 基础数据

为验证本文所提模型和策略的可行性与有效性，以北京某社区为算例进行相关仿真分析。以 24 h 为一周期，典型日的风电、光伏和负荷需求功率曲线如图 3 所示。风电功率根据风速变化及风机出力模型所得^[20]；光伏功率根据温度、光强变化及光伏出力模型所得；负荷需求由该社区的用户能耗数据所得；本算例假设可转移负荷量占负荷总量的 20%，可转移负荷功率上限为 25 kW。负荷代理商具体参数如表 1 所示，分布式电源代理商的参数如表 2 所示，主电网的上网电价和售电电价如图 4 所示。

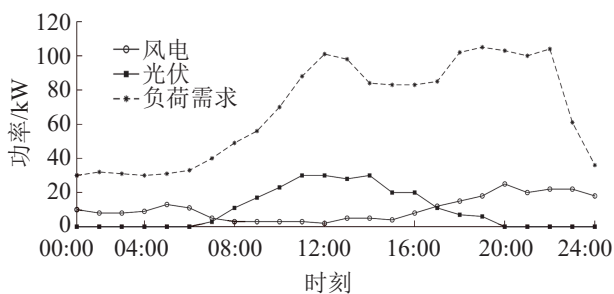


图3 典型日的功率预测曲线

Fig. 3 Power prediction curves for typical day

表1 负荷代理商参数

Table 1 Parameters of load agent

参数	数值
可转移负荷量上限/kW	25
偏好常系数 ν	60
偏好常系数 μ	0.15

表2 分布式电源代理商参数
Table 2 Parameters of distributed power agent

参数	微型燃气轮机	燃料电池
额定功率/kW	65	35
a	0.55	0.83
b	0.92	1.12
c	0	0

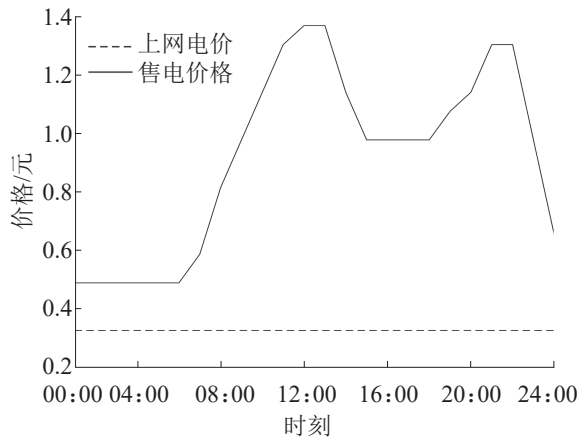


图4 主电网的电价曲线
Fig. 4 Price curves of main grid

5.2 结果分析

在上层博弈中, 经过不断的迭代优化, 最终给出电力交易代理商在周期内的定价策略如图5所示。比较图4与图5可知, 电力交易代理商售电价格的波动趋势与主电网的售电电价较为接近, 而整体价格略低于主电网的售电电价, 使负荷用户更愿意从电力交易代理商购买电能, 其购电价紧随负荷需求变化趋势, 以便激励分布式电源的发电。

下层博弈中, 负荷代理商优化前后的负荷需求响应曲线如图6所示。优化前, 负荷需求的2个峰值分别在11:00—14:00和18:00—22:00时段, 负荷需求的谷值在00:00—07:00和23:00—24:00时段; 优化后, 2个峰值都有些许下降, 而谷值时段的负荷需求值有了明显上升, 实现了一定程度上的削峰填谷, 即经过优化, 负荷代理商将峰值时段电价较高的部分负荷转移到了电价较低的谷值时段, 降低了用户的用能成本, 增加了消费者剩余。

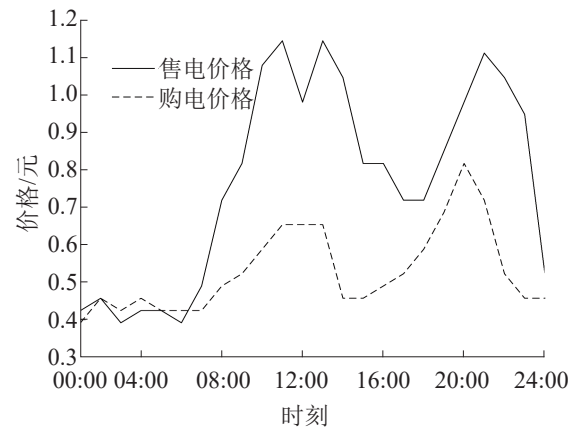


图5 电力交易代理商的购售电价曲线
Fig. 5 Curves of purchase and sale price of electricity trading agent

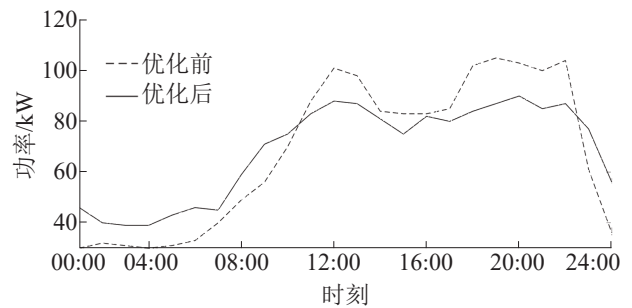


图6 负荷代理商的负荷需求曲线
Fig. 6 Load demand curves of load agent

分布式电源代理商的各机组出力如图7所示。在负荷需求的谷值时段, 虽然新能源出力已满足负荷需求, 但为了获得更大收益, 微型燃气轮机和燃料电池继续发电, 使得供大于求, 由电力交易代理商将多余电能并网。然而在用电峰值时段, 分布式电源代理商总体输出功率不足, 缺失的电能由电力交易代理商从主网购买。

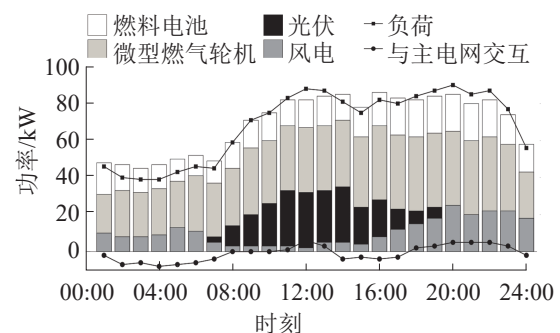


图7 分布式电源代理商的功率输出
Fig. 7 Power output of distributed power agent

主从博弈中三方参与者的目标优化迭代过程如图8所示。大概70次迭代后，三方目标已经收敛，说明本文采用的算法具有较好的收敛效果。随着迭代次数的增加，上层电力交易代理商的收益逐渐增加，而下层分布式电源代理商的收益和负荷代理商的剩余价值逐渐减小，领导者与追随者不同的收敛趋势恰恰反映了他们之间的博弈过程，最终达到 Stackelberg 均衡，此时各方参与者都不能独立改变策略获取更大收益。

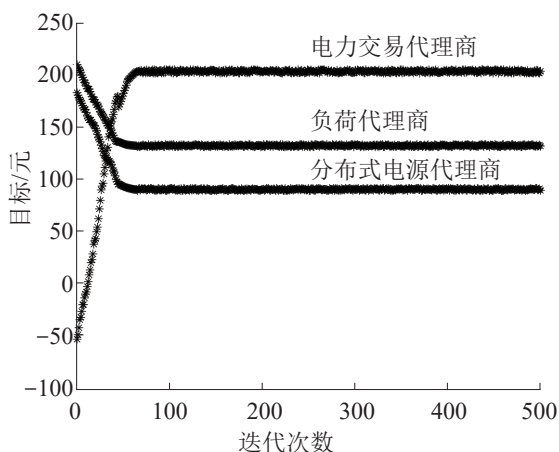


图8 主从博弈的优化迭代过程

Fig. 8 Optimization iterative process of master-slave game

6 结论

本文建立了含电力交易代理商、分布式电源代理商和负荷代理商三方的双层主从博弈协同优化模型，通过理论与推导，证明了所提博弈模型具有唯一 Stackelberg 均衡解，并利用 DEA-QP 算法进行均衡交互策略的求解，实现了新能源微电网运行中的多目标协同优化。仿真结果表明：通过引入电力交易代理商，以给定价格信号为导向，能够一定程度优化供需两侧的策略集合，既提升了供能侧的发电收益，又降低了用户侧的能耗成本。

随着能源交易市场竞争愈加激烈，未来的相关工作可以从两方面展开：

(1) 本文的分布式发电单元为多智能体系统，

并未考虑它们之间的通信，后面可以将各发电单元之间的通信考虑进去，提升机组出力的科学性和经济性。

(2) 未来可以考虑多个能源供应商介入后的博弈过程，并深入分析其对供需两侧策略的影响。

参考文献：

- [1] 郭骏. 风光储互补微电网的优化调度与能量管理策略研究[J]. 电气工程, 2020, 8(1): 36-47.
Guo Jun. Research on Optimal Scheduling and Energy Management Strategy of Wind-PV-ES Complementary Micro-grid[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 8(1): 36-47.
- [2] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, et al. A Game-theoretic Approach to Analyzing Power Trading Possibilities in Multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [3] Seongwoo Lee, Joonho Seon, Chanuk Kyeong, et al. Novel Energy Trading System Based on Deep-reinforcement Learning in Microgrids[J]. Energies, 2021, 14(17): 5515.
- [4] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5829-5839.
Lin Wei, Jin Xiaolong, Mu Yunfei, et al. Multi-objective Optimal Hybrid Power Flow Algorithm for Integrated Local Area Energy System[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.
- [5] Liu Nian, He Li, Yu Xinghuo, et al. Multiparty Energy Management for Grid-connected Microgrids with Heat and Electricity-coupled Demand Response[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 1887-1897.
- [6] 张晓辉, 刘小琰, 钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6132-6141.
Zhang Xiaohui, Liu Xiaoyan, Zhong Jiaqing. Integrated Energy System Planning Considering a Reward and Punishment Ladder-type Carbon Trading and Electric-thermal Transfer Load Uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6141.
- [7] 高雪莹, 唐昊, 苗刚中, 等. 储能系统能量调度与需求响应联合优化控制[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1165-1172.
Gao Xueying, Tang Hao, Miao Gangzhong, et al. Joint

- Optimization Control of Energy Storage System Management and Demand Response[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(5): 1165-1172.
- [8] Yang Peng, Tang Gongguo, Nehorai A. A Game-theoretic Approach for Optimal Time-of-use Electricity Pricing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 884-892.
- [9] Fang Fang, Zhu Zhongyan, Jin Shunping, et al. Two-layer Game Theoretic Microgrid Capacity Optimization Considering Uncertainty of Renewable Energy[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(3): 4260-4271.
- [10] 林凯骏, 吴俊勇, 刘迪, 等. 基于双层Stackelberg博弈的微电网能量管理优化[J]. *电网技术*, 2019, 43(3): 973-981.
Lin Kaijun, Wu Junyong, Liu Di, et al. Energy Management Optimization of Micro Energy Grid Based on Hierarchical Stackelberg Game Theory[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(3): 973-981.
- [11] Li Yang, Yang Zhen, Li Guoqing, et al. Optimal Scheduling of an Isolated Microgrid with Battery Storage Considering Load and Renewable Generation Uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1565-1575.
- [12] 刘帅. 基于智能算法的微电网能量协调管理研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
Liu Shuai. Research on Energy Coordination Management of Microgrid Based on Intelligent Algorithms[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [13] 肖健, 钊星, 彭依明, 等. 基于主从博弈的配电网分布式电源电能定价[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(10): 32-41.
Xiao Jian, Chuan Xing, Peng Yiming, et al. Electricity Pricing of Distribution Network with Distributed Generations Based on Stackelberg Game[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(10): 32-41.
- [14] Liu Nian, Yu Xinghuo, Wang Cheng, et al. Energy Sharing Management for Microgrids with PV Prosumers: A Stackelberg Game Approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1088-1098.
- [15] 罗俊仁, 张万鹏, 袁唯淋, 等. 面向多智能体博弈对抗的对手建模框架[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(9): 1941-1955.
Luo Junren, Zhang Wanpeng, Yuan Weilin, et al. Research on Opponent Modeling Framework for Multi-agent Game Confrontation[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(9): 1941-1955.
- [16] 马华红, 吴红海, 郑国强, 等. 基于合作博弈的性能均衡机会路由及仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(3): 404-413.
Ma Huahong, Wu Honghai, Zheng Guoqiang, et al. Performance Balanced Opportunistic Routing and Simulation Analysis Based on Cooperative Game[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(3): 404-413.
- [17] 张忠会, 刘故帅, 谢义苗. 基于博弈论的电力系统供给侧多方交易决策[J]. *电网技术*, 2017, 41(6): 1779-1785.
Zhang Zhonghui, Liu Gushuai, Xie Yimiao. A Game Theory Approach to Analyzing Multi-party Electricity Trading on Supply Side[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(6): 1779-1785.
- [18] 王海洋, 李珂, 张承慧, 等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5435-5444.
Wang Haiyang, Li Ke, Zhang Chenghui, et al. Distributed Coordinative Optimal Operation of Community Integrated Energy System Based on Stackelberg Game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5435-5444.
- [19] Jaber Alipoor, Yushi Miura, Toshifumi Ise. Stability Assessment and Optimization Methods for Microgrid with Multiple VSG Units[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1462-1471.
- [20] 赵振宇, 马旭, 包格日乐图. 基于风速预测模型的风电一次调频仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(10): 2233-2243.
Zhao Zhenyu, Ma Xu, Bao Geriletu. Wind Power Primary Frequency Regulation Simulation Based on Wind Speed Prediction Model[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(10): 2233-2243.