

控制与决策

Control and Decision

考虑碳排放和综合需求响应的电-气联合运行决策博弈

熊炜, 李咸善, 邹宇, 鲁明芳, 李飞, 粟世玮

引用本文:

熊炜, 李咸善, 邹宇, 鲁明芳, 李飞, 粟世玮. 考虑碳排放和综合需求响应的电-气联合运行决策博弈[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1979–1987.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1503>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带尺寸约束的二机流水车间生产运输协调博弈调度问题

Coordinated two-machine flow-shop and transportation scheduling under size constraint and game theory consideration
控制与决策. 2023, 38(7): 1942–1950 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2207>

线性时序逻辑引导的安全强化学习

Linear temporal logic guided safe reinforcement learning
控制与决策. 2023, 38(7): 1835–1844 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1808>

考虑共享电池站和温控负荷响应的综合能源系统优化调度

Optimal scheduling of integrated energy system considering response of shared battery station and thermostatically controlled loads
控制与决策. 2022, 37(2): 370–378 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1111>

计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度

Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints
控制与决策. 2022, 37(1): 97–107 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0913>

损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion
控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

考虑碳排放和综合需求响应的电-气联合运行决策博弈

熊 炜^{1,2}, 李咸善^{1,2†}, 邹 宇³, 鲁明芳^{1,2}, 李 飞^{1,2}, 粟世玮^{1,2}

1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3. 广西电网有限责任公司钦州供电局, 广西 钦州 535000)

摘要: 考虑到当前向国际社会承诺的“碳达峰, 碳中和”目标, 针对电-气联合运行中多方利益的诉求, 运用动态主从博弈理论, 在考虑碳排放和综合需求响应的情况下, 建立以供电公司为主体, 家庭负荷聚合集群为从体的博弈模型. 通过家庭负荷聚合的多能联合负荷特性和价格需求响应的不确定性, 得到博弈双方支付函数. 考虑能源结构的碳排放折算, 以供能方收益最大, 需求侧支付费用最低为目标, 建立主从博弈模型. 主方以价格为策略集, 从方以需求响应为策略集, 通过最优反应函数结合非支配排序遗传算法求解并筛选主从博弈均衡解. 通过算例仿真验证, 所提出模型可实现主体和从体各方的社会效益与经济效益最优化, 为能源互联下的市场决策优化运行提供参考.

关键词: 能源互联; 主从博弈; 家庭负荷聚合; 综合需求响应; 碳排放

中图分类号: TM73 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1503

引用格式: 熊炜, 李咸善, 邹宇, 等. 考虑碳排放和综合需求响应的电-气联合运行决策博弈[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1979-1987.

Decision-making game of power-gas joint operation considering carbon emission and integrated demand response

XIONG Wei^{1,2}, LI Xian-shan^{1,2†}, ZOU Yu³, LU Ming-fang^{1,2}, LI Fei^{1,2}, SU Shi-wei^{1,2}

1. College of Electricity and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Qinzhou Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Limited Liability Company, Qinzhou 535000, China)

Abstract: Considering the current commitment to the international community of the “carbon peak, carbon neutral” target, aiming at the demand of multi-interests in the combined operation of electricity and gas, based on the dynamic master-slave game theory and considering carbon emissions and integrated demand response, a game model with a power supply company as the main body and a household load aggregation cluster as the slave body is established. According to the multi-energy combined load characteristics of household load aggregation and the uncertainty of price demand response, the payoff function of the two players in the game is obtained. Considering the carbon emission conversion of the energy structure, a master-slave game model is established with the goal of maximizing the income of the energy supply side and minimizing the payment cost of the demand side. The master party takes price as the strategy set, and the slave party takes demand response as the strategy set. The optimal response function and the non-dominated sorting genetic algorithm are used to solve the master-slave game equilibrium solution. The simulation results show that the proposed model can optimize the social and economic benefits of the subjects and the participants, and provide a reference for the optimal operation of market decision-making under the context of energy interconnection.

Keywords: energy interconnection; master-slave game; household load aggregation cluster; integrated demand response; carbon emission

0 引言

能源是人类社会发展的物质基础, 环境是社会可持续发展的条件. 近些年来, 在环境逐步恶化的压力

下, 世界各国越来越重视碳排放的污染治理, 我国也向国际社会承诺“碳达峰, 碳中和”的目标. 国家电网参与碳市场的发展, 助力能源低碳转型, 已发布了详

收稿日期: 2021-08-26; 录用日期: 2022-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007103); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金项目(2019KJX10).

†通讯作者. E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn.

细的行动方案^[1-2]。与此同时,人类不仅对能源供给有着更高的要求,且面临着传统能源短缺和污染严重的问题^[3-4]。在此背景下,能源互联网^[5]成为未来能源供应的主流模式,多种能源联合运行,依据各类能源的特性相互补充,既实现能源结构的优化,节能减排,又保障能源使用的稳定性和经济性。然而,随着多种类型能源联合供应,多方能源供应主体存在不同的利益需求和环保要求,负荷需求方同样根据自己的支付成本有更多的响应选择。如何保证供需各方的经济性和社会性,已成为能源互联中亟需研究解决的问题。

目前,对于能源互联网的研究分为几个方面。一方面是综合能源系统下的潮流计算和能流计算,如文献[6-7]。同时考虑各类传输管网特性下的能流分析,如文献[8-9]。该方面的研究是在传统电力系统潮流计算的基础上,加入综合能源的元素,即在传统潮流计算方法的基础上,增加了影响因素。另一方面是设定不同背景下,不同对象的综合能源系统,通过决策优化,实现新能源消纳和经济性的最佳。如针对不同的智能科技园、工业产业园和智能生活小区,建立综合能源系统,进行优化分析。文献[10-13]这些研究在优化中,采用了不同的求解方法,有双层优化方法,有采用博弈论的策略优化。还有一方面是结合需求侧方,作综合能源需求响应的联合优化,如文献[14-19]。在以往电力需求响应的相关研究中,仅仅在电能单一能源中,通过电力需求侧的响应进行电力负荷的削峰填谷,即通过电力负荷的时间平移,使得电力负荷的时间曲线趋于水平。在综合能源系统中,用户在一个时段内不再是单一的增加或减少电能的使用,而是可通过转换能源类型来配合响应,同样可达到电力负荷削峰填谷的目的,且对用户的生活便利和舒适度影响不大。综合需求响应研究对象仍然是能源枢纽、智慧园区、社区等,但是加入了需求响应模型或需求响应约束,由于考虑了供需双方的利益,更具意义。但是在上述研究的对象中,含风、光、热电联产,储能的智慧园区,偏于理想化。实际情况中,仅建设有少量区域级和用户级的综合能源系统示范工程,在零基础的环境下,要实现成熟应用,不仅建设成本高,且周期较长。因此大部分处于设定情况下所作的研究,普适性和可推广性尚待考察。本文考虑在家庭负荷聚合集群的现实基础条件下,以现有条件设立电-气联合运行环境,在此基础上进行博弈优化分析,这样建设周期短,成果转化成本低,更具现实意义。

在能源互联网中,天然气作为除电能外,主要的

一种能源类型,已广泛供应于商业和家庭,有成熟的运输管网。全国大多数终端用户均已实现了用电和用气的双入口,电能与天然气组成能源互联,实现互补,既与当前实际能源条件相符合,建设成本低,又能够对传统电网的稳定性起到积极作用^[20-21]。在需求侧用户中,单个家庭负荷由于柔性水平低,分布分散,不易参与到需求侧管理中。引入家庭负荷聚合集群(household load cluster, HLC)参与能源需求侧管理中。HLC群体具有类似的家庭负荷特性,便于统一实现柔性需求响应。

同时在碳减排的政策研究中,低碳是全球各国经济可持续发展的主旋律。电力行业是现代社会的的主要能源形式,围绕电力行业的低碳转型,日美等国纷纷以碳排放的相关政策推动电力行业的绿色发展^[22]。综合各国,碳排放政策主要包括碳税和碳排放权交易两种形式,前者直接纳税,纳入企业的生产成本,后者具有排放额度的交易。无论哪种政策,计税依据的一种方法为实际排放量,另一种方法为碳排放折算量。前者虽然直接反映排放量,但是技术成本和实施成本均较高,只有少数国家采用。在碳折算方面,虽然在多个环节可征税,但是不重复征税,依据谁使用,谁获益,谁排放,谁缴税的原则^[23],未考虑传输过程中的碳排放。

随着能源互联网的发展,以智能化为特征的运营特性日趋繁杂。在此情况下,如何确定各决策主体最佳策略从而优化系统有关各方利益更具挑战性。传统的以单主体决策为主要特征的确定性最优化理论体系难以克服此困难^[24]。在能源系统的多数决策问题中,任何参与者均不能通过单方面改变策略而获益,多个决策主体且各目标间一般具有竞争关系,均企图使自身收益最大。博弈论是传统多目标优化问题的推广,采用博弈论的决策方法能够更好地体现多个决策主体的均衡思想^[25-26]。

综合上述学者的研究和对目前综合能源供给实际情况的分析,本文以供电公司(electric power company, EPC)和HLC二者为研究对象,考虑在需求侧电-气联合供能的环境下,碳排放和天然气公司(natural gas company, NAC)均有自身的经济性和社会性的利益需求。以商业互联的方式,建立主从动态连续博弈模型,EPC为主体,HLC为从体。主方以价格为策略集,从方以需求响应为策略集,通过主从博弈达到均衡。最后,通过仿真算例验证博弈模型的可行性和有效性。由于天然气管道具有储气特点,响应

稍慢,而电能具有响应迅速的特点,且电能对实时供需平衡性有较高要求. 本文在博弈过程中考虑的是供电公司与用户间的动态博弈,天然气公司仅为博弈中的固定存在方.

1 多能联合供应架构

基于HLC的电-气能源互联,可实现家庭中电热能资源间的交互转移. 既有多种能源协调互补,又具有低碳环保的特点. 基于HLC的综合需求响应不再仅仅是传统的电力负荷在时间轴上的横向平移,还可以是在一个时间断面上不同能源类型的纵向转换. 考虑到目前家庭供能的现实情况,系统包括EPC通过电网向家庭用户传输的电能,NAC通过天然气官网向家庭用户传输的天然气. 在用户侧使用热负荷和电负荷两种形式能源,如图1所示. 虽然现有的电网和天然气管网的铺设普及程度相当高,但是组建该电-气联合运行环境,同样需要数据采集和控制物理装置,只因不涉及此次研究,未在图1中绘出. 对于大多数普通家庭而言,能源供应均有成熟的电路入口和气路入口. 在家庭中实际应用的效用,一方面是作为基本电效用使用,如光照、电动机等,另一方面是作为热效用使用,热效用可从电能转化而来,也可通过天然气转换而来. 对于普通家庭,日周期消耗的电效用和热效用基本是不变的. 这里称之为电负荷和热负荷. 对于家庭负荷而言,在电和气的供应中较少有限电限气的情况,这里电能和气能均作为恒定源.

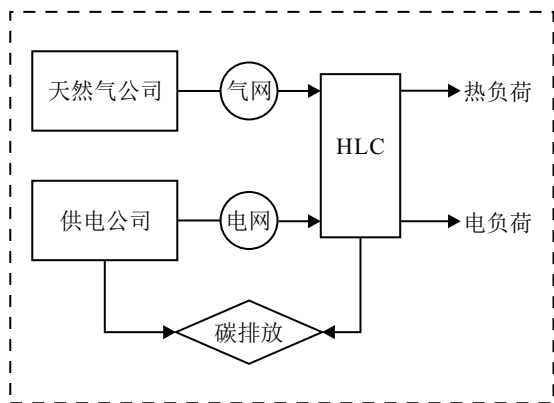


图1 基于HLC的电-气联合运行框架

如图1所示,家庭热负荷的能源入口有两类,一类通过电网电能转换为热负荷,如电取暖器、电磁炉等,另一类通过天然气燃烧所得,如天然气灶、燃气热水器等. 根据目前家庭负荷的实际特性,电能的一部分转化为热负荷,一部分作为电负荷使用. 天然气仅作为热负荷来源. P^{out} 、 H^{out} 为电负荷和热负荷, P^{in} 、 V^{in} 为电-气能源能路入口,分别以功和体积表征,根据能量的转换和守恒定律,针对图1中的HLC综合能

源转换数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ (1-\alpha) \gamma_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{in} \\ V^{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{out} \\ H^{out} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: α 为能源数量转换比例系数,为 $0 \sim 1$ 变量; γ 为不同能源形式转换的效率系数.

2 数学模型建立

2.1 碳排放的折算模型

依据政策原则,能源供给侧在供电公司生产环节纳碳排放税,计入生产成本,能源需求侧在HLC消耗天然气能源作为热负荷时纳碳排放税,计入使用成本,如图1所示.

依据国家发展和改革委员会发布的《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南》,按照能源利用来源情况,使用碳排放强度建立各利益方的碳折算模型^[27]. 以供电公司为例,其电力来源有光伏、风机、水电机组以及火电机组等,各来源形式的碳排放程度是不一样的, k 为各能源利用的碳排放折算强度,单位为 $g/(kW \cdot h)$, A 为各能源结构权重,得到碳排放折算模型,如下式所示:

$$S_p = [k_i^p]^T [P_i] (i = 1, 2, \dots, n) = [A_i]^T [k_i^p] P^{in} \left\{ A_i \in (0, 1), \sum A_i = 1 \right\}. \quad (2)$$

据此,将企业的碳排放社会成本折算为企业的经济成本,与其他生产成本综合计算,在模型计算中,可将折算值直接加入EPC的电力成本中. HLC在消耗气负荷时,同样在成本中加入折算值. 考虑碳排放配额 M ,则如下式所示:

$$\begin{cases} S_p = 0, P^{in} \leq M; \\ S_p = [A_i]^T [k_i^p] (P^{in} - M) \left\{ A_i \in (0, 1), \sum A_i = 1 \right\}, \\ P^{in} > M. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 电力价格需求响应模型

电能作为一种市场商品,同样具有经济中的价格需求特性,在微观经济学中,商品的价格需求(demand response, DR)弹性曲线为反比例函数曲线,这里用一次函数价格需求弹性曲线表示电力需求响应,这也是最基本的产品需求-价格的表示方式^[28],如图2所示.

电力需求响应的数学描述为

$$P^{out} = \begin{cases} P_{max}^{out}, j_p \leq 0; \\ \frac{P_{min}^{out} - P_{max}^{out}}{J_p} j_p + P_{max}^{out}, 0 < j_p \leq J_p; \\ P_{min}^{out}, j_p > J_p. \end{cases} \quad (4)$$

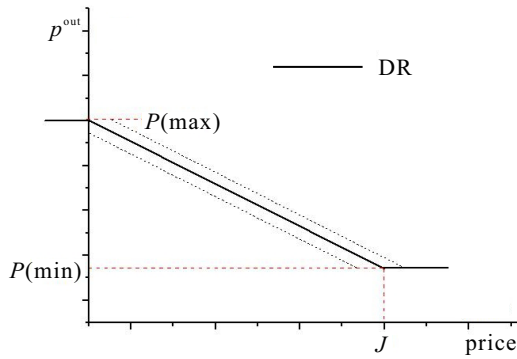


图2 电力价格需求响应曲线

在图2和式(4)中, j_p 为电能价格, 用户在实际价格响应中, 根据自身需求对价格的反应决定用电量. J_p 为价格定值, 当 $j_p \geq J_p$ 时, 用户用电量取最小用电量, 因为用户有其基本的生活用电需求; 当 $j_p \leq 0$ 时, 用户响应为最大用电量, 因为用户用电设备总量是一定的; 当 $0 \leq j_p \leq J_p$ 时, 用户用电需求随着价格的提高而减少.

在实际需求响应中, 用户不会准确地按照价格需求响应曲线响应, 会受到多种非经济因素, 甚至情绪的影响, 所以即使理论上存在价格需求曲线, 但是在实际中以价格需求曲线为基线, 存在着不确定性. ΔP^{out} 、 $\Delta P'^{\text{out}}$ 分别为价格需求响应曲线不确定性响应量上下限的模糊表达式, 图2中以虚线示意. 这种实际需求响应的不确定性为

$$\tilde{P}^{\text{out}} = [P^{\text{out}} - \Delta P^{\text{out}}, P^{\text{out}} + \Delta P^{\text{out}}]. \quad (5)$$

以三角模糊函数的期望形式表示价格需求响应的不确定性^[29], 如下式所示:

$$E(\tilde{P}^{\text{out}}) = [(1 - \lambda)\Delta P^{\text{out}} + P^{\text{out}} + \lambda\Delta P'^{\text{out}}]/2, \quad 0 \leq \lambda \leq 1. \quad (6)$$

其中 λ 为决策者趋势态度值, 表示决策者的喜好或风险程度, 当决策者风险中立时, λ 取值 1/2, 即为三角模糊函数的标准期望值.

2.3 供能方的决策数学模型

电力需求侧的电负荷包括基础负荷和柔性负荷. 基础负荷不可中断, 不可转移, 不能参与需求响应. 柔性负荷分为可中断负荷和可转移负荷. 可中断负荷可直接削减, 可转移负荷可根据用电需求调整工作模式, 在不同时间段用电, 即电负荷在时间轴上的平移. 当综合能源联合运行时, 可选择将负荷类型转换为其他负荷类型, 即实现负荷纵向转换, 此为可转换负荷. 在 HLC 中, 是基于现有家庭负荷建立的负荷聚合集群, 为贴近现实家庭用户的基础条件, 在 HLC 需求侧中, 未设定气转电的耦合, 而是将热负荷的功

能方式在电源和气源间选择. EPC 的支付函数包含 3 部分, 电能生产成本、碳排放税收成本和售电收益负成本, 可表示为

$$f_p = c_p P^{\text{in}} + S_p - j_p P^{\text{in}}, \quad (7)$$

其中 c_p 为电能的综合成本系数, 电能运维成本归入电能生产成本中. HLC 负荷要满足日常能源需求, 故电需求和热需求在一定区间内总量是确定的, 电需求只能由电能供应, 热需求在响应时可由电能提供, 也可由天然气提供. 设 $G_{p,p}$ 为电效用的电能, $G_{p,h}$ 为转换为热效用的电能, $G_{q,h}$ 为天然气转化的热效用, 可得到

$$f_p = c_p(G_{p,p} + \gamma_p^{-1}G_{p,h}) + S_p - (G_{p,p} + \gamma_p^{-1}G_{p,h})j_p; \quad (8)$$

$$\begin{cases} G_{p,p} \triangleq P^{\text{out}}, \\ G_{p,h} + G_{q,h} \triangleq H^{\text{out}}. \end{cases} \quad (9)$$

定义 ε 为需求响应值, 即在 HLC 中, 其消耗的热效用负荷有多少是选择用天然气获得, 则 $1 - \varepsilon$ 便是其消耗的热效用负荷是由电能转换而来的部分, 有

$$\varepsilon \triangleq \frac{G_{q,h}}{H^{\text{out}}} \left\{ \varepsilon \in (0, 1), 1 - \varepsilon \triangleq \frac{G_{p,h}}{H^{\text{out}}} \right\}, \quad (10)$$

$$\frac{P^{\text{out}}}{H^{\text{out}}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \alpha}. \quad (11)$$

将式(2)、(6)、(9)和(11)代入(8), 得到

$$f_p = \left(c_p + \sum A_i^p k_i^p - j_p \right) [E(\tilde{P}^{\text{out}}) + \gamma_p^{-1}H^{\text{out}}(1 - \varepsilon)]. \quad (12)$$

2.4 需求方的决策数学模型

HLC 的支付函数包含 3 部分, 用电费用、用气费用和碳排放费用, J_a 为天然气价格, 以数学表示为

$$f_L = J_a V^{\text{in}} + j_p P^{\text{in}} + S_h; \quad (13)$$

以电需求和热需求表示为

$$f_L = J_a G_{q,h} \gamma_h^{-1} + (G_{p,p} + G_{p,h} \gamma_p^{-1}) j_p + G_{q,h} \gamma_h^{-1} \sum A_i^h k_i^h. \quad (14)$$

将式(2)、(6)、(9)和(11)代入(14), 得到

$$f_L = J_a H^{\text{out}} \varepsilon \gamma_h^{-1} + [E(\tilde{P}^{\text{out}}) + \gamma_p^{-1}H^{\text{out}} - \gamma_p^{-1}H^{\text{out}} \varepsilon] j_p + H^{\text{out}} \varepsilon \gamma_h^{-1} \sum A_i^h k_i^h. \quad (15)$$

其中: f_L 为 HLC 的支付函数, S_h 为天然气公司的碳排放税费, γ_h 为天然气转换为热能的效能系数, γ_p 为电能转换为热能的效能系数.

3 博弈分析

3.1 博弈模型构建

本文所建立的基于HLC的综合能源系统博弈模型框架中, 供能侧优先给予其市场能源报价, 因此供能侧为主体, 占据领导地位, 其目标为运行成本最小, 也可描述为收益最大. HLC为用能侧, 通过供能侧给予的能源市场价格, 从而选择需求响应策略, 为从体, 其目标为支付最小.

根据上述基于HLC的综合能源系统能源结构的描述, 供能侧和用能侧符合主从博弈情况, 由于供能侧为领导者, HLC作为跟随者, 建立主从Stackelberg动态博弈模型. 首先主体选择初步价格策略, 从体根据主体的价格策略, 选择需求响应策略. 主体根据从体的需求响应策略, 进行综合计算, 更新价格策略, 进入下一轮博弈, 直至达到博弈均衡点. 在博弈中, EPC通过电能价格引导HLC调节用能, 获得其最小支付, 即通过商业互联实现主从双方的联系. 在考虑碳排放的折算和NAC的情况下, EPC只需要通过策略集电价的变化, 便可使得HLC根据策略集需求响应对电和气进行协调联动.

上述博弈模型包含主从双方参与者、各方的策略集、支付或收益. 其中参与者为EPC和HLC. EPC的策略集为电价, HLC的策略集为响应值, 则博弈模型可表示为

$$G = \{EPC, HLC; j_p, \varepsilon; f_p, f_L\}. \quad (16)$$

3.2 博弈模型求解

j_p, ε 为非空凸集, f_p, f_L 连续且拟凹, 故存在均衡最优解. 角标带星为最优策略, 则以数学描述为

$$\begin{cases} f_p(j_p^*, \varepsilon^*) \leq f_p(j_p, \varepsilon^*), \\ f_L(j_p^*, \varepsilon^*) \leq f_L(j_p^*, \varepsilon). \end{cases} \quad (17)$$

若分别对主方EPC和从方HLC的支付函数直接求一阶偏导, 则根据最优反应函数, 可得到Nash均衡解为

$$\begin{cases} \partial f_p / \partial j_p, \nabla f_p; \\ \partial f_L / \partial \varepsilon, \nabla f_L. \end{cases} \quad (18)$$

根据Nash均衡与Pareto最优的关系定理, 博弈方支付函数的梯度向量 ∇f_p 与 ∇f_L 线性无关, 故Nash均衡解并不是Pareto最优解. 而且从博弈类别判断, Nash均衡解为完全信息下的对等博弈模型均衡解, 不适用于这里的动态主从博弈模型. 这里是主方EPC先预估从方HLC的响应情况, 然后选择主方策略. 从方HLC根据主方EPC的策略作出响应, 即从方是在主方的策略下, 再作出自己的最优选择. f_p

为关于 j_p 的二次凸函数, 存在极小值, 根据最优反应函数 $\partial f_p / \partial j_p, f_p$ 极小值由 ε 确定在一个区间内变化. f_L 为关于 ε 的一次线性函数, 斜率由电价、气价、电和气的热转换效率共同确定, 故在不考虑热需求响应不确定的情况下, ε 为0-1二进制数. 按照 $\partial f_L / \partial \varepsilon$ 的正负情况, 将 ε 值代入, 按照目前电和气的市场价格, 且气燃烧热经济比值远远高于电转热经济比值, 一般情况下, 斜率为负, ε 为最大边界值1. 采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)求Pareto前沿, 并根据支付函数与策略集间的反应关系, 筛选Pareto最优解, 即主从博弈Stackelberg解.

4 算例分析

4.1 环境数据假设和求解验证

本文主要研究博弈模型和求解方法, 所以按照当下市场的平均值假设, 部分数据参考文献[30]. 气价格约为5元/ m^3 , 天然气热值约为 $30 \times 10^6 J/m^3$, 电能热值约为 $3 \times 10^6 J/kW \cdot h$, 天然气热值转换为电热值约为 $10 kW \cdot h/m^3$. 假设单一家庭日用电最小值为 $2 kW \cdot h$, 最高为 $8 kW \cdot h$, 电能成本为 $0.3 元/kW \cdot h$, 热需求 $15 \times 10^6 J$, 且电价超过 $2 元/kW \cdot h$ 后, 用户保持为最小用电量. 家庭用户聚合集群设定为100户, 优化周期为一天. 基于Matlab平台, 采用NSGA-II算法求解Pareto前沿.

图3为NSGA-II算法求解的Pareto前沿, 横纵坐标轴分别为博弈双方的支付函数, Pareto前沿个体解的具体数值如表1所示. 如第3.2节所述, HLC是在EPC的策略条件下再选择自己的最优. 因此图2左上角的个体解为本主从博弈的Pareto最优解, 具体数值对应表1的第2行与第14行的个体解. 此时EPC的支付为-192元, 即收益为192元, 在此前提下, HLC的支付为777.934元. 综上所述, 在EPC最大收益192元的情况下, HLC的最小支付为777.934元, 无更小个体解. 对应策略电价为 $1.199 元/kW \cdot h$, 综合需求响应值为1.

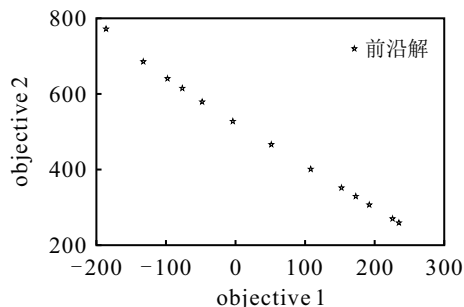


图3 Pareto前沿

表1 Pareto前沿

index	f_p	f_L	j
1	238.101	252.111	0.003
2	-192	777.934	1.199
3	238.101	252.111	0.003
4	194.265	300.959	0.065
5	109.2	396.63	0.198
6	-101.08	643.039	0.649
7	-49.622	580.51	0.511
8	-136.284	687.807	0.769
9	-5.097	527.952	0.411
10	-79.929	617.033	0.589
11	50.75	463.287	0.3
12	174.635	322.926	0.095
13	228.712	262.55	0.016
14	-192	777.934	1.199
15	154.084	345.991	0.126

若用微分方程解析,则根据 $\partial f_p / \partial j_p = 0$, 得到支付函数精确解, f_p 为 -192 元, f_L 为 778 元, j_p 为 1.2 元/kW·h. 表明用 NSGA-II 算法求解并筛选出的最优解, 达到预期效果.

4.2 动态博弈和非博弈优化分析讨论

根据 $\partial f_L / \partial \varepsilon = 0$ 的判断, $j_p = 0.5$ 为分界值. $\varepsilon = 1$, $j_p \in (0.5, 2]$ 博弈均衡结果为第 4.1 节结果. $\varepsilon = 0$, $j_p \in (0, 0.5]$, $\partial f_p / \partial j_p = 0$, 求得 $j_p(f_p^{\min}) > 0.5$, 则此时 EPC 根据自己的利益需求, 选择的策略值只能在边界值 0.5. HLC 的支付函数值不受需求响应策略的影响, 即 HLC 响应电能或响应天然气是等效的, 因此此时具有不稳定的博弈均衡点 $\{0.5, 0; -140, 575\}$. 之所以

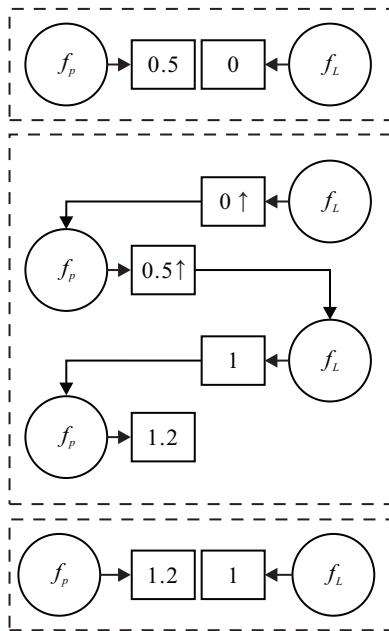


图4 动态博弈过程

称为不稳定的博弈均衡点, 是因为 HLC 的策略极易增大, 若稍微变化, 则进入博弈过程, 不稳定的博弈均衡点过渡到稳定的博弈均衡点, 即第 4.1 节所求解, 博弈过程如图 4 所示.

若不采用动态主从博弈决策优化, 则本文所研究问题转变为一般优化问题. 决策问题为静态的目标优化问题, 博弈模型转变为两个独立的单目标优化问题. HLC 是被动依据 EPC 的电价进行响应的, 因此首先 EPC 依据 HLC 的历史需求响应值 ε' 做出收益最大化决策. 历史需求响应值根据决策前期调研所得, 代入目标函数, 得到最小支付函数优化解

$$j_p(f_p^{\min}) = f(\varepsilon') = 2 - \frac{5}{6}\varepsilon'$$

然后 HLC 根据 EPC 的决策结果电价, 代入其目标函数, 依据支付最小化目标, 得到其需求响应值. 可见, 一般优化策略无动态主从博弈过程, 所得不是实际意义上的最优解.

4.3 Pareto 最优解与 Nash 均衡解的对比分析

联立 2 位博弈参与方的支付函数, 以式 (18) 可得到最优反应方程, 从而得到 Nash 均衡解为

$$(j_p^*, \varepsilon^*) = (0.5, 1.82).$$

根据 Nash 均衡解得到 EPC 和 HLC 的支付函数值, 与第 4.1 节所得到的 Pareto 最优解进行比较讨论, 如表 2 所示.

表2 不同均衡解对比

	f_p	f_L	j_p	ε
Pareto 最优解	-192	777.934	1.199	1
Nash 均衡解	-42	575	0.5	1.82

根据 Pareto 最优解与 Nash 均衡解的对比分析, EPC 在 Nash 均衡解中的盈利比 Pareto 最优解少, HLC 在 Nash 均衡解中的支出比 Pareto 最优解少. 虽然表面看仍然是平衡的, 但是 EPC 为主方, 在 Nash 均衡解中收益减少不符合主从博弈模型设定. 在 Nash 均衡解中 HLC 的策略值为 1.82, 大于 1. 由于在研究环境设定中, 未有直接的气转电设备, 如小型燃气轮机, 同样表明 Nash 均衡解中的策略值也不适用. 另在本文研究环境中, 博弈参与方对于互相策略出牌有先后, 且为动态博弈, 并非一次性博弈, 即主方出策略, 然后从方选择策略, 主方调整后, 从方根据主方策略再调整, 策略信息是公开的. Nash 均衡解是在双方信息并未公开, 而且无第 3 方统筹规划的情况下, 仅仅根据自身最有利的情况作出的一次性选择. 如经典囚徒博弈模型, 正是因为策略信息不公开, 2 位囚徒仅能按

照自身状况选择,才会达到Nash均衡,均会选择“坦白”.若2位囚徒了解全部策略信息,提前联盟,则均会选择“不坦白”,这时才是对他们各自最优的策略情况,达到Pareto最优.综上所述,Nash均衡解并不适用本文研究环境.

4.4 不同碳排放政策对决策的影响

国家要达到双碳目标,也许在不同时期会采取不同政策,不同的碳排放政策会使得博弈双方有不同的表现,影响博弈均衡策略,也会影响博弈各方的经济利益.首先设定为碳排放配额内,再逐步提高碳排放税额进行讨论分析.如图5所示,首先设定为税额为0,即在碳排放配额内,然后逐步提高至0.6,逐渐接近电-气价格.虚线为HLC的支付函数值,实线为EPC的支付函数值,点线为对应均衡时的HLC策略值.

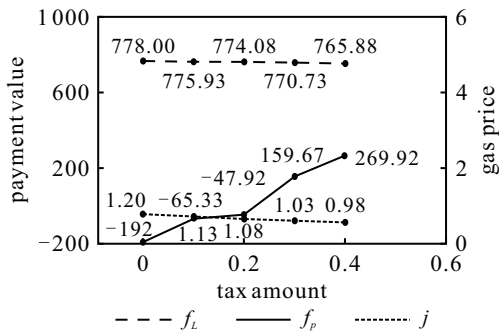


图5 不同碳排放尺度下的博弈解

如图5所示,随着碳排放税额的增大,均衡电价逐步减小,EPC的支付函数值越来越大,表明收益越来越小,直至支付函数值为正值,即收益为负.HLC的支付函数值近乎不变.由此可知,改变碳排放的配额和税额对于用能方影响不大,即碳响应会较为迟钝.但是对于供能方影响较大,且存在边际条件.当碳税过高,供能方收益为负时,则有可能打破均衡,不再单纯地改变价格,而是会减少产量,造成供不应求.此种情况,所提出模型不再适用,主从博弈均衡已被破坏;另一方面表明,监管部门在制定政策时,在碳减排工作中,只能循序渐进,以政策促进企业以技术为手段逐年减排,而不是一蹴而就,以减产达到减排目标.

5 结 论

在电-气联合运行环境下,考虑碳排放和电力价格需求响应的不确定性,本文构建了动态主从博弈经济优化模型,并进行求解验证,经过讨论分析得到如下结论.

1) 利用NSGA-II算法结合最优反应函数能够较好地筛选出最优的Stackelberg解,使得博弈主从方能

够在均衡条件下达到博弈各方最优经济目标.

2) 在多能源联合供应的环境下,考虑了多方的利益诉求,通过商业互联手段,构建了动态主从博弈模型,通过Pareto最优解与Nash均衡解的比较分析,结果表明,Pareto最优解适合所构建的动态博弈模型.

3) 分析不同碳排放政策对博弈均衡的影响,以此讨论所提出博弈模型的适用性,并根据结果表明了碳排放政策的宏观条件.

在研究电-气联合运行环境下的主从博弈模型时,暂未考虑气的策略集.未来将在此环境下,进一步研究将气加入博弈方,建立多方博弈模型,并研究较好的求解方法,同时考虑热需求的不确定性因素,提高博弈模型的精确度.

参考文献(References)

[1] 辛保安. 为实现“碳达峰、碳中和”目标贡献智慧和力量[J]. 国家电网, 2021(3): 2-3.
(Xin B A. Contribute wisdom and strength to achieve the goal of “carbon peak, carbon neutralization” [J]. State Grid, 2021(3): 2-3.)

[2] 杨素. 电网企业参与碳市场发展, 助力能源低碳转型[N]. 国家电网报, 2021-03-02(005).
(Yang S. Power grid enterprises participate in the development of carbon market to help energy low-carbon transformation[N]. State Grid News, 2021-03-02(005).)

[3] 张雪寒, 余涛. 计及风速与负荷相关性的电-气互联系统概率可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3263-3272.
(Zhang X H, Yu T. Probabilistic reliability evaluation method of electricity-gas integrated energy system considering correlation of wind speeds and loads[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3263-3272.)

[4] 邱晓燕, 赵劲帅, 史光耀, 等. 基于HSMOPSO算法的微电网经济与环保协同优化方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1223-1230.
(Qiu X Y, Zhao J S, Shi G Y, et al. Collaborative optimization method of economic and environment in microgrid based on HSMOPSO[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1223-1230.)

[5] 孙宏斌. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-5.
(Sun H B. Energy internet[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-5.)

[6] 刘洪, 赵晨晓, 葛少云, 等. 基于精细化热网模型的电热综合能源系统时序潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 63-72.
(Liu H, Zhao C X, Ge S Y, et al. Sequential power flow calculation of power-heat integrated energy system based on refined heat network model[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2021, 45(4): 63-72.)
- [7] 黎晨阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及相关性的电-气互联区域综合能源系统概率多能流计算[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 42-49.
(Li C Y, Zhang S X, Cheng H Z, et al. Correlation-based probabilistic multi-energy flow calculation of regional integrated energy system with combined electricity and natural gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 42-49.)
- [8] Dai Y H, Chen L, Min Y, et al. Dispatch model of combined heat and power plant considering heat transfer process[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1225-1236.
- [9] Li Z G, Wu W C, Shahidepour M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [10] 丁煜蓉, 陈红坤, 吴军, 等. 计及综合能效的电-气-热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 64-73.
(Ding Y R, Chen H K, Wu J, et al. Multi-objective optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering comprehensive energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 64-73.)
- [11] 崔雪, 邹晨露, 王恒, 等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 74-81.
(Cui X, Zou C L, Wang H, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 74-81.)
- [12] 陈永龙, 朱金大, 杨冬梅, 等. 基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 102-112.
(Chen Y L, Zhu J D, Yang D M, et al. Research on economic optimization operation technology of park-level integrated energy system based on multi-party interest game[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 102-112.)
- [13] 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): 5435-5445.
(Wang H Y, Li K, Zhang C H, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5445.)
- [14] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 基于多能互补的电/热综合需求响应[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 480-489.
(Xu H, Dong S F, He Z X, et al. Electro-thermal comprehensive demand response based on multi-energy complementarity[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 480-489.)
- [15] 胡泽升, 陆俊, 黄瑞, 等. 计及需求响应的智慧能源小区热电耦合系统用能优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 22-30.
(Hu Z S, Lu J, Huang R, et al. Optimization method of energy consumption for thermoelectric coupling system in smart energy community considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 22-30.)
- [16] 王丹, 黄德裕, 胡庆娥, 等. 基于电-热联合市场出清的综合需求响应建模及策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 13-21.
(Wang D, Huang D Y, Hu Q E, et al. Modeling and strategy of integrated demand response based on joint electricity-heat clearing market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 13-21.)
- [17] 黄旭锐, 苏亚纳, 侯宏娟, 等. 计及综合需求侧响应的能源枢纽多目标运行优化方法[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 23-29.
(Huang X R, Su Y N, Hou H J, et al. Multi-objective optimization method of energy hub operation considering integrated demand response[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 23-29.)
- [18] 张加贝, 孙恒一, 钱锋, 等. 基于需求响应的用户侧综合能源系统分布式博弈均衡策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 36-42.
(Zhang J B, Sun H Y, Qian F, et al. A distributed game equilibrium strategy of customer-side integrated energy system based on demand response[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 36-42.)
- [19] 陈锦涛, 杨苹, 陈滢, 等. 基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 222-228.
(Chen J T, Yang P, Chen Y, et al. Optimized operation of multi-energy system in the industrial park based on integrated demand response strategy[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2): 222-228.)
- [20] 王雁凌, 李蓓, 崔航. 天然气分布式能源站综合价值分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 136-142.
(Wang Y L, Li B, Cui H. Comprehensive value analysis for gas distributed energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 136-142.)
- [21] 徐海华, 王旭东, 朱星阳, 等. 用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(2): 13-20.
(Xu H H, Wang X D, Zhu X Y, et al. Research on the optimal configuration of energy storage in user

- side integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2): 13-20.)
- [22] 姚明涛, 熊小平, 康艳兵. 以碳排放指标为引领推动电力行业绿色低碳转型[J]. 中国能源, 2017, 39(3): 39-43.
(Yao M T, Xiong X P, Kang Y B. Carbon emission index as a guide to promote the power industry green low-carbon transformation[J]. Energy of China, 2017, 39(3): 39-43.)
- [23] 人民银行国际司课题组. 为碳定价: 碳税和碳排放权交易[N]. 第一财经日报, 2021-02-22(第A12版).
(Research Group, International Department of the People's Bank of China. Pricing carbon: Carbon taxes and carbon emissions trading[N]. China Business News, 2021-02-22(The A 12 edition).)
- [24] 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 Q, Chen L J, Mei S W. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.)
- [25] 吴英俊, 刘成骏, 林智威, 等. 考虑成本与收益摊配的电力需求响应博弈模型[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 135-144.
(Wu Y J, Liu C J, Lin Z W, et al. Game model of electric demand response considering benefit sharing and cost allocation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 135-144.)
- [26] 梅生伟, 刘锋, 魏韡. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-6.
(Mei S W, Liu F, Wei W. Engineering game theory and application in power system[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-6.)
- [27] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 88-92.
(Gao J Q, Song T T, Yang D J. Research and application of carbon emission conversion method for coal-fired generating units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 88-92.)
- [28] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 67-73.
(Wang Z Q, Wang S, Zhang X Y, et al. Load characteristics modeling of regional electric heating system considering difference of users response behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67-73.)
- [29] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 66-74.
(Qiu G F, He C, Luo Z, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 66-74.)
- [30] 赵银波, 高红均, 王仲, 等. 考虑用户电能替代的商业园区运营商多能交易博弈优化决策[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1320-1331.
(Zhao Y B, Gao H J, Wang Z, et al. Optimal decision of multi-energy trading game for commercial park operators considering user-side electricity substitution[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1320-1331.)

作者简介

熊炜(1980—), 男, 讲师, 博士生, 从事综合能源系统优化的研究, E-mail: xwei@ctgu.edu.cn;

李咸善(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与控制等研究, E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn;

邹宇(1979—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统配电网运行与控制等研究, E-mail: 27106124@qq.com;

鲁明芳(1982—), 女, 讲师, 博士生, 从事微电网运行优化的研究, E-mail: 28139164@qq.com;

李飞(1980—), 男, 讲师, 博士生, 从事抽水蓄能电站调度运行优化的研究, E-mail: 253781795@qq.com;

粟世玮(1979—), 女, 副教授, 硕士, 从事新能源与智能电网运行的研究, E-mail: 474197655@qq.com.