

# 考虑碳配额及综合需求响应双重激励的综合能源系统多主体博弈协同优化

张岩, 李瑞芳, 赵健, 王莹, 王爽

(郑州工业应用技术学院 机电工程学院, 河南 郑州 451100)

**摘要:** 文章提出了考虑碳配额和综合需求响应双重激励的综合能源系统 (Integrated Energy System, IES) 多主体博弈协同优化调度策略。首先, 基于 Stackelberg 博弈理论, 同时考虑需求侧和储能侧的主动性, 建立了源-荷-储多主体博弈交互框架; 其次, 以 IES 运营商为领导者, 储能运营商和用户为跟随者, 建立了各利益主体的决策模型。其中, 为了引导用户科学用能和降低系统碳排放量, 在 IES 运营商模型中引入了基于碳配额和实时价格引导的双重激励政策, 并以净利润最大为目标, 制定售能价格和内部机组出力计划; 最后, 采用遗传算法结合 CPLEX 的两阶段算法对所提多主体博弈模型进行求解。算例仿真表明, 所提的双重激励策略和博弈模型能够有效兼顾各方主体利益, 在不损害各方利益的情况下, 降低了系统的碳排放量, 实现 IES 多主体低碳协同运行。

**关键词:** 碳配额; 综合能源系统; 综合需求响应; Stackelberg 博弈

**中图分类号:** TK51; TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)03-0388-10

## 0 引言

由于对化石能源的过度依赖与开发, 导致了全球性的能源危机与环境污染。大力发展安全绿色、高效低碳的能源供应模式已成为全球共识<sup>[1,2]</sup>。IES 能够有效减少化石能源消耗和环境污染, 对实现能源可持续发展具有重要意义<sup>[3,4]</sup>。

目前, 国内外学者致力于研究 IES 的商业模式和多主体交互机制<sup>[5]</sup>。博弈论可以有效解决不同主体之间的利益冲突<sup>[6]</sup>。文献[7]考虑了用户的主动性, 建立了能源运营商和用户群体的 IES 能量交易模型及其策略。文献[8]基于 Stackelberg 博弈理论建立了微网运营商和多能用户之间的多主体博弈模型, 研究了系统内多个能源站和多个用户的能量交互问题。文献[9]建立了一种将辅助服务和多能源相结合的 Stackelberg 博弈模型, 以实现园区运营商和用户聚合商之间的互动优化。上述研究仅针对 IES 运营商和用户两个主体展开研究, 随着能源市场的深入改革, IES 内部已浮现出多个不同投资主体。文献[10]提出了含三方参与的 IES 主从博弈模型, 建立了由 IES 运营商、储能服务商和用户组成的多主体博弈交互机制及其数学模型。文献[11]提出了由 IES 运营商、电动汽

车代理商和用户聚合商组成的 IES 主从博弈模型。文献[12]考虑了供能方和 IES 运营商之间的互动, 建立了以能源生产商、能源枢纽运营商和用户构成的供需双侧博弈模型。文献[13]结合氢储能多能联储的特点, 设计了由 IES 运营商为领导者, 能源生产商、储能提供商和用户为跟随者的多主体主从博弈模型。上述文献虽然考虑了 IES 内其他主体的主动性, 但仅以经济利益为目标, 忽略了各主体的绿色调节能力。

碳交易机制是有效降低系统碳排放量的重要措施之一。文献[14]在电-气互联的 IES 优化模型中引入碳交易机制, 引导清洁机组的积极并网。文献[15]针对传统碳交易机制的不足, 提出了计及阶梯型碳交易机制的 IES 源侧集中调度方法, 并分析了碳交易参数对系统优化调度的影响。为了充分发挥需求侧资源的灵活调节能力, 综合需求响应 (Integrated Demand Response, IDR) 策略应运而生。文献[16]研究了园区微网在电热 IDR 策略下的优化调度模型, 验证了 IDR 策略在新能源消纳能力、降低系统运行成本及能效等方面的有效性。文献[17]针对电、气负荷具有相同商品属性的特征, 建立了基于分时价格的电-气-热 IDR 模

收稿日期: 2022-12-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62172142)。

作者简介: 张岩(1989-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为综合能源系统、微网能量管理。E-mail: zhaojian07@126.com

型,实现了 IES 经济运行。然而,上述研究并未充分利用需求侧资源的减排能力,将碳配额激励与 IDR 策略相结合,能够充分发挥用户的绿色调节能力,对降低 IES 的碳排放量具有重要意义。

本文基于 Stackelberg 博弈理论,提出了一种考虑碳配额和综合需求响应双重激励的 IES 多主体博弈协同优化调度策略。首先,针对各投资主体的利益诉求不同,建立了以 IES 运营商为领导者,储能运营商和用户为跟随者的一主多从博弈模型;其次,引入了基于碳配额和实时价格引导的双重激励政策,通过将用户响应价格激励所调整的改变量转化为碳配额奖励给用户;最后,建立了各主体博弈决策模型,并采用遗传算法结合 CPLEX 的两阶段算法对所提博弈模型进行求解。算例仿真设置了不同场景进行对比分析,验证了所提双重激励策略和博弈模型的有效性。

### 1 IES 多主体交互机制

#### 1.1 IES 基本结构

本文所研究的 IES 基本结构如图 1 所示。

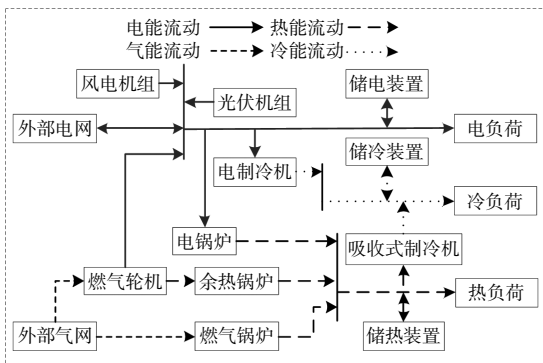


图 1 IES 基本结构

Fig.1 Basic structure of IES

系统包含风电机组 (Wind Turbine, WT)、光伏机组 (Photovoltaic, PV)、燃气轮机 (Gas Turbine, GT)、余热锅炉 (Waste Heat Boiler, WHB)、燃气锅炉 (Gas Boiler, GB)、电制冷机 (Electric Refrigerator, ER)、吸收式制冷机 (Absorption Refrigerator, AR) 以及电锅炉 (Electric Boiler, EB)、储电装置 (Electricity Storage Device, ESD)、储热装置 (Heat Storage Device, HSD)、储冷装置 (Cold Storage Device, CSD)。用户需求包括冷、热、电 3 种负荷。

#### 1.2 多主体交互机制

本文所研究的多主体主从博弈交互框架如图

2 所示。依据 IES 内部结构和各设备投资主体可将其划分为 IES 运营商、储能运营商和用户。

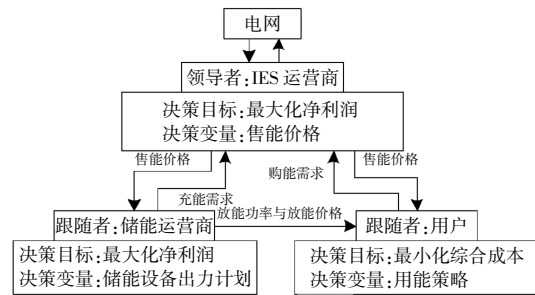


图 2 IES 多主体交互机制

Fig.2 IES multi-agent interaction mechanism

IES 运营商以能源服务公司的形象作为该博弈模型的领导者,其内部包含各冷热电耦合设备及可再生能源设备,以净利润最大为目标,通过制定售能价格和内部机组出力计划实现系统能量供需平衡。储能运营商拥有 IES 内储能装置的控制权。根据领导者发布的价格信息,储能运营商以“低充高放”的策略协调控制储电、储热及储冷装置在各个时段的充、放能功率,通过套利获取收益。在需求侧,用户以用能成本和满意度成本为目标,在满足用户用能满意度的情况下合理调整自身用能策略。此外,为了进一步激发用户的绿色调节能力,通过引入碳配额激励手段让用户深度调节负荷,发挥其间接减排效益,使用户形成低碳减排、绿色安全的用能策略。

### 2 市场各主体决策模型

#### 2.1 IES 运营商模型

##### 2.1.1 基于碳配额和实时价格引导的双重激励政策

本文在 IES 运营商制定实时价格的基础上引入碳配额激励,实施基于碳配额和实时价格引导用户参与需求响应的双重激励策略。策略具体步骤如下。

##### (1) 实时价格策略的制定

① 当用能负荷处于谷时期,可再生能源出力过剩。为了增加可再生能源的消纳能力,该时段 IES 运营商制定的电、热、冷价格较低,引导用户适当提高用能量,减少弃风弃光现象。

② 当用能负荷处于平值时期,系统内源、荷功率相差不大,通过小幅度调整用能负荷就可达到平衡,故此时 IES 运营商制定的电、热、冷价格适中。

③当用能负荷处于峰值时期,IES 机组供能压力较大,不足的能量需由外部电网提供。为了减少外购电力,降低运行成本,IES 运营商制定的电、热、冷价格较大,引导用户主动减少自身用能量,实现削峰填谷。

(2)基于碳配额和实时价格引导的双重激励政策

本文在实时售能价格激励策略的基础上,进一步实施碳配额激励策略,将用户也纳入碳交易市场中。碳配额激励策略的步骤具体如下。

①当用户负荷处于谷值,此时售能价格也处于谷值,用户主动增加该时段的用能量,故可将该时段用户增加的用能量转换成碳配额奖励给用户,进一步引导用户增加用能量。

②当用户负荷处于平值,此时售能价格适中,该时段负荷调整量较小,故几乎没有或者很少有碳配额奖励给用户。

③当用户负荷处于峰值,此时售能价格较高,用户主动减少该时段的用能量,故可将该时段用户减少的用能量转换成碳配额奖励给用户,引导用户进一步降低用能量。

### 2.1.2 碳交易成本模型的建立

为了降低 IES 的碳排放量,在 IES 的目标函数中引入碳交易成本。IES 的碳配额分配主要有 3 部分,分别是外购电力、CCHP 机组和 GB<sup>[18]</sup>,其表达式为

$$\begin{cases} N_{IES} = N_{CCHP} + N_{GB} + N_{Grid} \\ N_{CCHP} = \gamma_g \sum_{t=1}^T [\varphi P_{GT}(t) + P_{WHB}(t) + P_{AR}(t)] \\ N_{GB} = \gamma_g \sum_{t=1}^T P_{GB}(t) \\ N_{Grid} = \gamma_e \sum_{t=1}^T [P_{Grid,b}(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N_{IES}$  为 IES 总的碳排放配额量; $N_{CCHP}$ 、 $N_{GB}$  和  $N_{Grid}$  分别为 CCHP、GB 和外部购电所分配的碳配额; $P_{Grid,b}(t)$  为 IES 的外部购电量; $P_{GT}(t)$  为 GT 的输出电功率; $P_{WHB}(t)$  为 WHB 的供热功率; $P_{GB}(t)$  为 GB 的供热功率; $P_{AR}(t)$  为输入 AR 的供热功率; $\varphi$  为发电量折算成供热量的折算系数; $\gamma_g$ 、 $\gamma_e$  分别为单位供热量和单位发电量的碳排放配额系数<sup>[18]</sup>。

根据文献[15],可得各部分实际碳排放量如下:

$$\begin{cases} N_{IES}^{act} = N_{Grid}^{act} + N_{total}^{act} \\ N_{Grid}^{act} = \sum_{t=1}^T [a_1 + b_1 P_{Grid,b}(t) + c_1 P_{Grid,b}^2(t)] \\ N_{total}^{act} = \sum_{t=1}^T [a_2 + b_2 P_{total}(t) + c_2 P_{total}^2(t)] \\ P_{total}(t) = \varphi P_{GT}(t) + P_{GB}(t) + P_{WHB}(t) + P_{AR}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N_{IES}^{act}$  为 IES 总的实际碳排放量; $N_{Grid}^{act}$  为外部购电的实际碳排放量; $N_{total}^{act}$  为 CCHP 和 GB 的实际碳排放量; $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  和  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  分别为外购电力和燃气机组的碳排放计算参数; $P_{total}(t)$  为总的燃气机组的等效输出功率。

根据式(1)、(2),可计算 IES 运营商承担的碳交易成本  $F_c$  为

$$F_c = c (N_{IES}^{act} - N_{IES}) \quad (3)$$

式中: $c$  为碳交易价格。

### 2.1.3 IES 运营商目标函数

IES 运营商主要考虑了售能收益、运行成本、碳交易成本和碳配额激励成本,其中本文运行成本表达式为

$$\max F_{IESO} = F_{Sell} - F_{Oper} - F_c - F_p \quad (4)$$

式中: $F_{IESO}$  为 IES 运营商的净利润; $F_{Sell}$  为 IES 运营商出售给用户或者储能运营商的收益; $F_{Oper}$  为 IES 的运行成本; $F_p$  为 IES 运营商奖励用户所承担的碳配额激励成本。

#### (1)售能收益

IES 运营商的售能收益包括向用户的售能收益和向储能运营商的售能收益两部分。

$$F_{Sell} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_i c_i(t) P_i(t) + \sum_j c_j(t) P_j^{chr}(t) \right] \quad (5)$$

式中: $i$  为能源种类, $i \in \{e, h, c\}$ ;  $c_i(t)$  为 IES 运营商出售给用户的第  $i$  类能源的售能价格; $P_i(t)$  为用户的第  $i$  类用能负荷; $j$  为储能设备的种类; $c_j(t)$  为 IES 运营商出售给储能运营商的售能价格; $P_j^{chr}(t)$  为储能设备  $j$  的充能功率。

#### (2)运行成本

IES 的运行成本为购能成本和设备运行维护成本之和,即:

$$F_{\text{Oper}} = \sum_{t=1}^T \left[ \lambda_{\text{Grid}}(t) P_{\text{Grid,b}}(t) + \lambda_{\text{Gas}}(t) P_{\text{Gas}}(t) + \sum_m \alpha_m P_m(t) \right] \quad (6)$$

式中:  $\lambda_{\text{Grid}}(t)$  为 IES 运营商向外部电网的购电价格;  $\lambda_{\text{Gas}}(t)$ ,  $P_{\text{Gas}}(t)$  分别为 IES 运营商的购气价格和购气功率;  $m$  为能源设备的种类;  $\alpha_m$  为第  $m$  类能源设备的运行维护系数;  $P_m(t)$  为第  $m$  类能源设备的输出功率。

### (3) 碳配额激励成本

$$F_{\text{P}} = \sum_{t=1}^T c \cdot \left( \begin{array}{l} \varepsilon_e |P_e(t) - P_e^{\text{DA}}(t)| + \varepsilon_h |P_h(t) - P_h^{\text{DA}}(t)| + \\ \varepsilon_c |P_c(t) - P_c^{\text{DA}}(t)| \end{array} \right) \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon_e, \varepsilon_h, \varepsilon_c$  分别为单位电、热、冷能变化量的碳配额激励系数;  $P_e(t)$ ,  $P_h(t)$  和  $P_c(t)$  分别为用户实际的用电、热、冷功率;  $P_e^{\text{DA}}(t)$ ,  $P_h^{\text{DA}}(t)$  和  $P_c^{\text{DA}}(t)$  分别为用户需求响应前的电、热、冷负荷。

### 2.1.4 约束条件

#### (1) 能源设备运行约束

对于系统内部每种能源设备,除了需要满足功率平衡约束,还需满足能源设备出力上、下限约束。

$$P_m^{\min}(t) \leq P_m(t) \leq P_m^{\max}(t) \quad (8)$$

式中:  $P_m^{\max}(t)$  和  $P_m^{\min}(t)$  分别为能源设备  $m$  的输出功率上、下限。

#### (2) 售能价格约束

为了保证各主体利益,IES 运营商的售能价格需满足以下约束<sup>[19]</sup>。

$$c_{\text{Grid,s}}(t) < c_e(t) < c_{\text{Grid,b}}(t) \quad (9)$$

$$\begin{cases} c_h^{\min} \leq c_h(t) \leq c_h^{\max} \\ c_c^{\min} \leq c_c(t) \leq c_c^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T c_e(t) \leq \bar{T}c_e(t), \sum_{t=1}^T c_h(t) \leq \bar{T}c_h(t), \sum_{t=1}^T c_c(t) \leq \bar{T}c_c(t) \quad (11)$$

式中:  $c_{\text{Grid,s}}(t)$ ,  $c_{\text{Grid,b}}(t)$  分别为 IES 运营商与外部电网交互时的售电价格和购电价格;  $c_h^{\min}$ ,  $c_h^{\max}$  分别为 IES 运营商的售热价格的最小、最大值;  $c_c^{\min}$ ,  $c_c^{\max}$  分别为 IES 运营商的售冷价格的最小、最大值;  $\bar{c}_e(t)$ ,  $\bar{c}_h(t)$  和  $\bar{c}_c(t)$  分别为平均售电、售热和售冷

价格。

### 2.2 用户负荷模型

在博弈过程中,用户接收到 IES 运营商发布的电、热、冷价格之后,在考虑自身用能舒适度的情况下,科学合理的调整自身用能策略。用户的决策目标包含用能成本和用能满意度指标两部分,其目标函数如下所示:

$$\min F_{\text{user}} = F_u + F_m \quad (12)$$

式中:  $F_{\text{user}}$  为用户的综合成本函数;  $F_u$  为用户的用能成本;  $F_m$  为用户的满意度指标函数。

用户的用能成本为购能成本  $F_{\text{buy}}$  与碳配额奖励收益  $F_{\text{p}}$  之差,即:

$$F_u = F_{\text{buy}} - F_{\text{p}} \quad (13)$$

$$F_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T [c_e(t)P_e(t) + c_h(t)P_h(t) + c_c(t)P_c(t)] \quad (14)$$

本文引入效用函数表征用户购买电、热、冷能所获得的满意度指标<sup>[12]</sup>:

$$F_m = \sum_{t=1}^T \sum_i \left[ \frac{k_i}{2P_i^{\text{DA}}(t)} P_i(t) - k_i P_i(t) + \frac{k_i}{2} P_i^{\text{DA}}(t) \right] \quad (15)$$

式中:  $P_i^{\text{DA}}(t)$  为用户的第  $i$  类能源的初始负荷;  $k_i$  为用户消耗的第  $i$  类能源的偏好系数,反映了用户对第  $i$  类能源的需求偏好,影响用户实际用能需求的大小。

### 2.3 储能运营商模型

储能运营商掌管着 IES 内的储能设备,根据 IES 运营商制定的能源价格,决定各时段储能设备的充、放能功率,其目标函数为

$$\max F_{\text{ESO}} = F_{\text{ESO}}^{\text{dis}} - F_{\text{ESO}}^{\text{chr}} - F_{\text{ESO}}^{\text{oper}} \quad (16)$$

式中:  $F_{\text{ESO}}$  为储能运营商的净利润;  $F_{\text{ESO}}^{\text{dis}}$ ,  $F_{\text{ESO}}^{\text{chr}}$  分别为储能运营商的售能收益和购能成本;  $F_{\text{ESO}}^{\text{oper}}$  为各储能设备的运行维护成本。

$$F_{\text{ESO}}^{\text{dis}} = \sum_{t=1}^T \sum_j c_{\text{ESO}}^j(t) P_j^{\text{dis}}(t) \quad (17)$$

$$F_{\text{ESO}}^{\text{chr}} = \sum_{t=1}^T \sum_j c_j(t) P_j^{\text{chr}}(t) \quad (18)$$

$$F_{\text{ESO}}^{\text{oper}} = \sum_{t=1}^T \sum_j \beta_j [P_j^{\text{chr}}(t) + P_j^{\text{dis}}(t)] \quad (19)$$

式中:  $\beta_j$  为储能装置  $j$  的运行维护成本系数;  $c_{\text{ESO}}^j(t)$  为储能运营商向用户制定的第  $j$  类能源

的售能价格,为了保证储能运营商竞价成功,本文取储能运营商最高报价为 IES 运营商的 95%。

各储能设备需满足下述约束:

$$\begin{cases} I_{j,chr}(t)P_{j,min}^{chr} \leq P_{j,chr}(t) \leq I_{j,chr}(t)P_{j,max}^{chr} \\ I_{j,dis}(t)P_{j,min}^{dis} \leq P_{j,dis}(t) \leq I_{j,dis}(t)P_{j,max}^{dis} \\ I_{j,chr}(t) + I_{j,dis}(t) \leq 1 \\ S_{j,min} \leq S_j(t) \leq S_{j,max} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{j,max}^{chr}, P_{j,min}^{chr}, P_{j,max}^{dis}, P_{j,min}^{dis}$  分别为储能装置  $j$  的充、放能功率的上、下限;  $I_{j,chr}(t), I_{j,dis}(t)$  分别为储能装置  $j$  的充、放能状态标志位;  $S_{j,max}, S_{j,min}$  分别为储能装置  $j$  的容量上、下限。

### 3 多主体博弈互动分析及其求解方法

#### 3.1 多主体博弈互动分析

本文所提的多主体博弈包含了参与者、策略和效用。参与者包括 IES 运营商 (IESO)、用户 (user) 和储能运营商 (ESO)。策略即决策变量, IES 运营商的决策变量包含售能价格和各设备出力, 用  $p_{IES}$  表示; 用户的决策变量为自身的用能策略  $p_{user}$ ; 储能运营商的决策变量为各储能设备的充、放能功率  $p_{ESO}$ 。效用则为各主体的目标函数, 分别为式(4), (12)和(16)。因此, 该多主体博弈模型可表示为

$$\Omega = \{IESO, [IESO, user]; p_{IESO}, [p_{ESO}, p_{user}]; F_{IESO}, [F_{ESO}, F_{user}]\} \quad (21)$$

在博弈过程中, 当任何主体都不能通过单方面改变均衡解的策略来提高收益时, 说明该博弈达到 Stackelberg 均衡。当所提多主体博弈达到 Stackelberg 均衡, 且为均衡解时, Stackelberg 均衡的表达式为

$$\begin{aligned} E_{IESO}(p_{IESO}^*, p_{ESO}^*, p_{user}^*) &\geq E_{IESO}(p_{IESO}, p_{ESO}^*, p_{user}^*) \\ E_{ESO}(p_{IESO}^*, p_{ESO}^*, p_{user}^*) &\geq E_{ESO}(p_{IESO}^*, p_{ESO}, p_{user}^*) \\ E_{user}(p_{IESO}^*, p_{ESO}^*, p_{user}^*) &\geq E_{user}(p_{IESO}^*, p_{ESO}^*, p_{user}) \end{aligned} \quad (22)$$

#### 3.2 多主体博弈求解方法

由于本文所建模型是一种双层优化模型, 其领导者首先给出策略, 跟随者依据该策略给出最优反应并将优化结果传递给领导者。由于策略信息的不完全性, 故需通过多次迭代才能使各主体

达到收敛。为此, 本文采用遗传算法联合 CPLEX 求解器的双层优化算法对所提模型进行求解。算法的求解流程如图 3 所示。

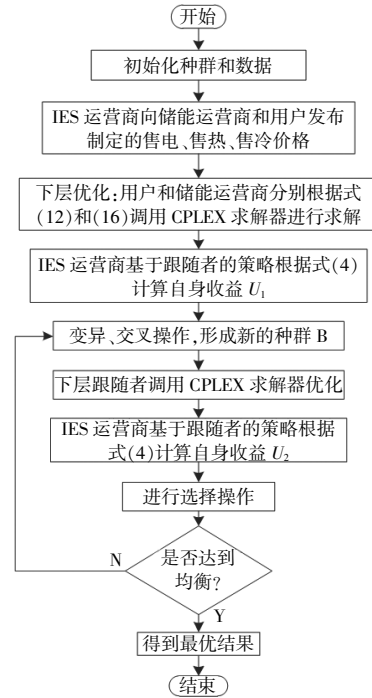


图 3 Stackelberg 博弈求解流程图  
Fig.3 Stackelberg game solving flow chart

### 4 算例分析

#### 4.1 基础数据

以某 IES 为案例, 对所提多主体主从博弈优化模型进行算例分析。系统内初始冷、热、电负荷以及风电、光伏预测数据如图 4 所示。外部电网设置的分时电价如表 1 所示。IES 运营商和储能运营商的设备参数如表 2 所示。天然气价格为 2.67 元/m<sup>3</sup>。外购电力和燃气机组的碳排放计算参数可见文献[15]; 平均售电、热、冷价格约束分别取 0.83, 0.4, 0.37 元。

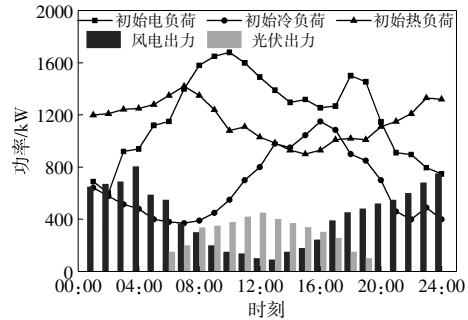


图 4 电、热、冷、预测负荷和风电、光伏的预测曲线  
Fig.4 Power, heat and cooling load forecasting and forecasting curve of wind power and photovoltaic

表1 分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price

参数	电价/元·(kW·h) <sup>-1</sup>
峰值	1.25
平值	0.80
谷值	0.40
热、冷价上限	0.5
热、冷价下限	0.2

表2 能源设备参数和储能设备参数

Table 2 Parameters of energy equipment and energy storage equipment

IES 运营商设备参数	数值
ER 容量/kW	120
AR 容量/kW	400
GT 容量/kW	700
EB 容量/kW	400
GB 容量/kW	900
GB 效率	0.9
GT 发电效率	0.4
WHB 效率	0.8
储能运营商设备参数	数值
ESD 最大、小充电功率/kW	200,0
HSD 最大、小充电功率/kW	200,0
CSD 最大、小充电功率/kW	200,0
ESD 充、放电效率	0.98,0.98
HSD 充、放热效率	0.97,0.97
CSD 充、放冷效率	0.95,0.95

#### 4.2 碳配额激励策略对各主体优化影响

为了验证碳配额激励策略对各主体利润的影响,本文设置以下几种方案进行对比:方案1,三方主体交互,但未考虑用户的 IDR 策略和碳配额激励;方案2,三方主体交互,考虑用户的 IDR 策略,但未引入碳配额激励;方案3,三方主体交互,引入碳交易成本,考虑本文所提基于碳配额和实时价格引导的双重激励政策。

3种方案下的各主体利润如表3所示。

表3 不同方案下的各主体利润

Table 3 Profit of each entity under different schemes

方案	IES 运营商 利润/元	用户综合 成本/元	储能运营商 利润/元	碳排放量 kg
1	14 557.6	22 857.6	768.6	15 676.2
2	14 124.8	21 563.1	731.3	14 989.6
3	14 653.8	21 088.3	816.3	14 032.8

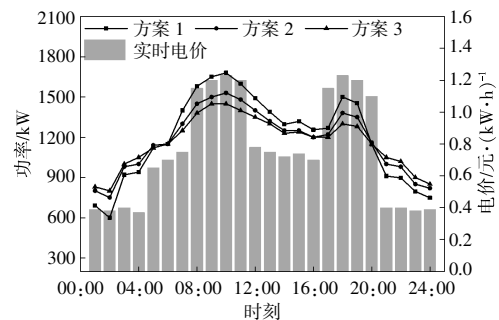
由表3可知,由于方案1未考虑用户侧的需求响应,IES 运营商制定的售能价格不会因用户

负荷的改变而产生变化,故 IES 运营商的报价与外部电网持平,并且由于用户负荷未出现削减,因此 IES 运营商的利润会呈现上涨的趋势。但是由于负荷峰值较高导致外购电量较多,故 IES 的碳排放量较大。方案2考虑了价格型 IDR 策略,用户在 IES 运营商发布的实时价格的基础上,根据自身用能满意度合理的调整负荷需求大小,达到削峰填谷的作用。这不仅能够降低用户自身综合成本,还能进一步降低系统的碳排放量。但由于用户负荷减少,使 IES 的售能收益降低,故 IES 运营商的利润略微下降。方案1,2中用户综合成本下降了 5.66%,系统碳排放量下降了 4.38%,IES 运营商利润下降了 2.97%。储能运营商由于用户购能需求而受到影响,其利润下降了 37.3 元。方案3在方案2的基础上,引入了碳交易成本和碳配额激励策略,用户可以在削减自身负荷的同时将调整量转换成碳配额进而获得碳配额奖励。碳配额激励策略不仅能进一步增加用户参与需求响应的积极性,还能降低用户的综合成本,有效发挥了用户的绿色调节特性。对 IES 运营商来说,由于引入了碳交易成本,IES 运营商能够主动降低外购电力,使清洁机组积极产能,从而有效降低了系统碳排放量和 IES 运营商承担的碳交易成本,虽然会承担一定的碳配额成本,但总体增加了 IES 运营商的利润。IES 运营商利润增加了 3.74%,用户综合成本下降了 2.21%,且系统碳排放量也下降了 6.38%。故该策略既实现了各方主体经济性的增加,也降低了系统环境污染。

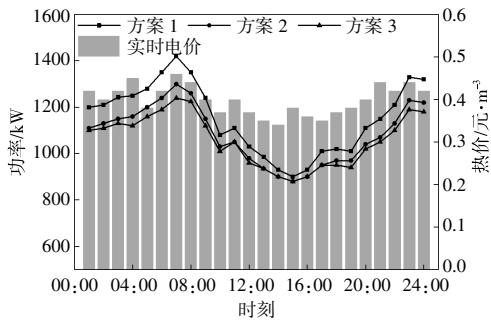
#### 4.3 双重激励策略对用户用能负荷的影响

图5为3种方案下的用户电负荷和热负荷曲线优化结果。

由图5可知,方案2和3与方案1相比较,用户实际电负荷和实际热负荷的峰谷差都有所降



(a) 电负荷及售电价格优化结果



(b)热负荷及售电价格优化结果

图5 用户负荷曲线及电、热价格优化结果

Fig.5 The optimization results of user load curve and electricity and heat price

低。以用户电负荷为例,当仅考虑电价激励时(方案2),在21:00-24:00和01:00-04:00,IES运营商在分时电价的基础上,制定的实时电价为谷价,则该时段用户有足够的经济能力进行购电,会优先考虑自身用电满意度,故选择提高该时段的用电负荷。在05:00-07:00和12:00-16:00,IES运营商制定的售电价格为平价,该时段用电需求处于中间值,在考虑用户用电满意度基础上,用户小比例调整自身用电功率。而在其余时段,IES运营商制定的电价策略为峰值,由于该时段用电负荷处于峰值,故为了降低自身的购能成本,用户此时偏向于转出该时段的负荷用电量,忽略了此时用户用电满意度。

方案3进一步考虑了碳配额激励策略。由于用户增加或者削减负荷时会有碳配额收益,因此为了进一步增加自身的综合效益,用户会选择在电负荷高峰时段进一步降低用电量以及在电负荷低谷时段进一步增加用电量,从而使用户综合效益达到最优。由图5(b)可知,在实时热价策略及碳配额和实时热价的双重激励策略引导下,用户的热负荷均出现了不同程度的削减,特别在01:00-08:00和22:00-24:00用热高峰时期,用户削减量较大。但由于考虑了用户舒适度,为了保证用户的温度舒适度,在双重激励下的用户热负荷削减程度改变较小。冷负荷的优化结果与电、热负荷类似,此处不再赘述。

#### 4.4 调度结果分析

##### 4.4.1 各主体博弈结果分析

IES运营商、用户和储能运营商的优化目标迭代收敛结果如图6所示。

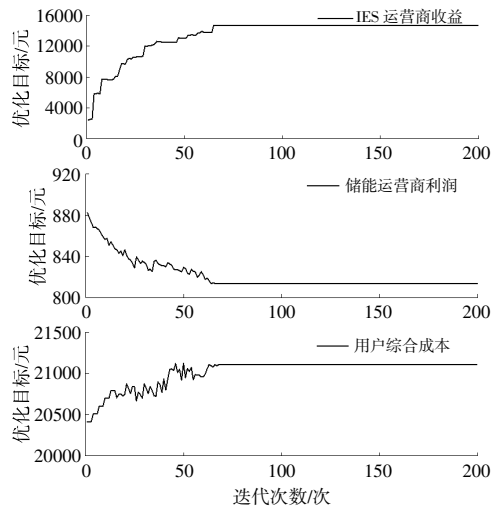


图6 Stackelberg 博弈均衡收敛结果

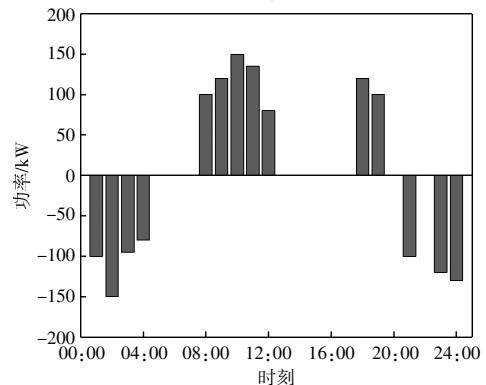
Fig.6 Convergence results of Stackelberg game equilibrium

由图6可知,领导者和跟随者的收敛趋势不同,领导者IES运营商通过合理调整售能价格和机组设备出力,其利润随着迭代次数的增加而逐级上升。对于跟随者,储能运营商的收益在逐级下降,而用户的综合成本呈现轻微上升的趋势。当迭代次数约为70次时,他们的策略不再改变,说明已达到Stackelberg均衡,此时任何参与者都不能通过独立改变策略来获取收益。最终,IES运营商的利润稳定在14638元,储能运营商的利润稳定在816.3元,用户的综合成本稳定在21088.3元。

##### 4.4.2 储能运营商优化结果分析

图7为储能运营商的电、热、冷储能装置的优化结果。

储能运营商通过“低充高放”的策略进行获利,以储电装置为例,在01:00-04:00和23:00-24:00,电价较低,储能运营商选择充电。而在07:00-11:00,18:00-19:00的电负荷高峰时期,为缓解IES运营商的供能压力,储能运营商选择在此



(a)储电装置充放电功率

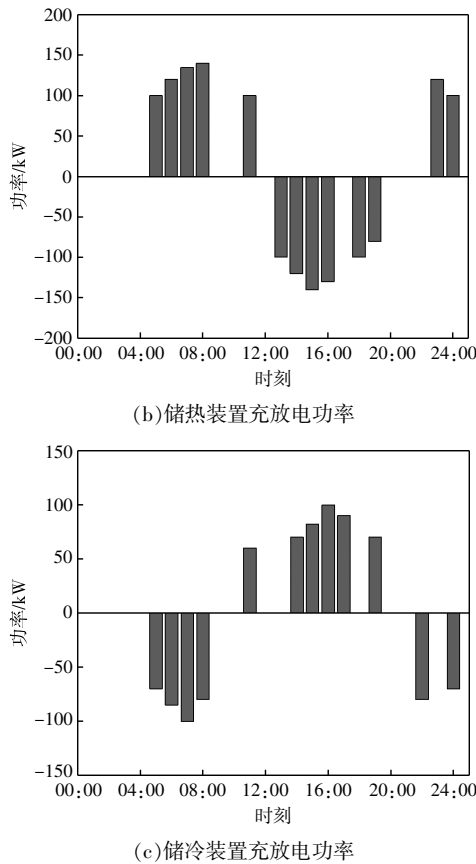


图7 储能运营商的优化结果

Fig.7 Optimization results of energy storage operators

时充电。储热装置和储冷装置的充、放能策略分析与储电装置类似,此处不再赘述。

#### 4.4.3 源、荷功率平衡分析

图8为本文方案下的源、荷功率平衡优化结果。

首先分析电功率调度结果,在01:00-04:00和21:00-24:00电价谷时期,IES运营商为了降低运行成本,在消纳完风电出力之后,不足的电能主要通过外部购电满足。而在08:00-11:00和17:00-20:00电价峰时期,为了降低系统碳排放,电负荷主要由WT,PV以及GT提供,不足的

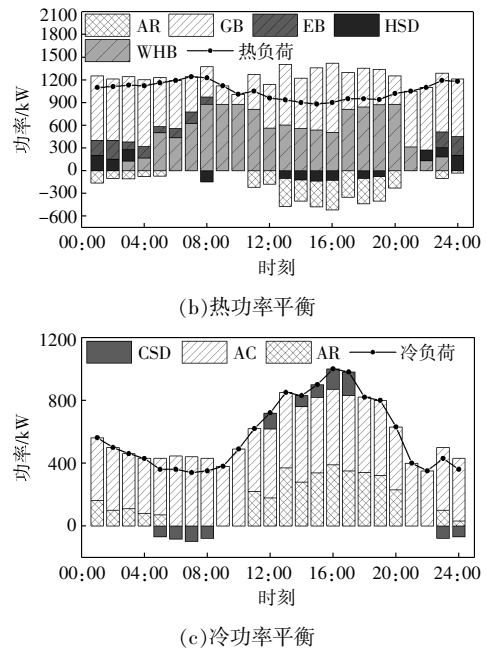
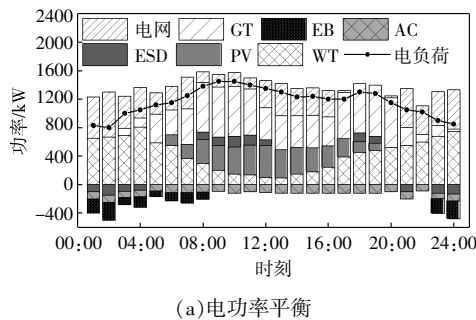


图8 源、荷功率平衡分析

Fig.8 Source and load power balance analysis

通过ESD以及外部购电弥补,此时外购电力较少或基本为零。对于热功率调度结果,在01:00-07:00以及23:00-24:00热负荷较高时段,由于WHB输出较少,导致GB基本满发,故通过EB电产热进行供热,不足的热能则由HSD补充。13:00-20:00,热负荷较低,且WHB出力较多,富裕的热能通过HSD储热以及AR供冷满足冷负荷需求。冷功率平衡分析与电、热功率类似,此处不再赘述。

## 5 结论

本文针对综合能源系统多主体博弈协同优化问题,建立了考虑碳配额和综合需求响应双重激励的多主体博弈模型,分析了不同主体的决策行为,对未来构建“源-荷-储”多主体参与下的能源互联网具有积极作用。通过算例分析可得到如下结论。

①分别构建了面向不同利益诉求的多主体决策模型,通过价格引导储能侧充放能功率和用能侧的用能计划,充分考虑了用户和储能运营商的主动性。相比未考虑用户IDR策略时,考虑用户IDR策略后,用户综合成本下降了5.66%,系统碳排放量下降了4.38%,IES运营商利润下降了2.97%。

②所提的碳配额和综合需求响应双重激励策

略能够充分发挥用户的需求响应能力,在不损害 IES 运营商及用户利益的情况下,能够有效减少系统的碳排放量,引导用户绿色科学用能。相比仅考虑用户 IDR 时,所提模型的 IES 运营商利润增加了 3.74%,用户综合成本下降了 2.21%,且系统碳排放量也下降了 6.38%。

③通过在 IES 运营商中引入碳交易成本,能够加强清洁机组的出力,降低系统碳排放量,营造了一种绿色环保的能量交易模式。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Cheng S, Wang R, Xu J Y, et al. Multi-time scale coordinated optimization of an energy hub in the integrated energy system with multi-type energy storage systems [J].Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47(22): 1-10.
- [3] 张世翔,吕帅康.面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J].电网技术,2018,42(8):2431-2438.
- [4] 降国俊,崔双喜,樊小朝,等.考虑电转氢气过程及综合需求响应的电-氢-气综合能源系统协调优化运行[J].可再生能源,2021,39(1):88-94.
- [5] 刘宇明,仰文林,赵选宗,等.基于主从博弈理论的综合能源系统优化运行方法[J].可再生能源,2021,39(1): 123-129.
- [6] Yang S, Tan Z, Zhou J, et al. A two-level game optimal dispatching model for the park integrated energy system considering Stackelberg and cooperative games [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130(3): 1-16.
- [7] Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [8] Wei F, Jing Z X, Wu P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200: 315-329.
- [9] 周长城,马溪原,郭晓斌,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统互动优化运行方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):74-80.
- [10] 顾洁,白凯峰,时亚军.基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J].电网技术,2019, 43(9): 3119-3134.
- [11] 杨铮,彭思成,廖清芬,等.面向综合能源园区的三方市场主体非合作交易方法[J].电力系统自动化,2018, 42(14): 32-39, 47.
- [12] 向恩民,高红均,刘畅,等.基于供需双侧博弈互动的园区多能运营商能源交易优化决策[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2744-2757.
- [13] 熊宇峰,司杨,郑天文,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电工技术学报,2021, 36(3): 507-516.
- [14] 卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J].电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- [15] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等.考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设备,2021,41(9):48-55.
- [16] 方绍凤,周任军,许福鹿,等.考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(1):50-57.
- [17] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等.计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.
- [18] 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):6132-6142.
- [19] 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.

## Multi agent game collaborative optimization of integrated energy system considering carbon quota and integrated demand response

Zhang Yan, Li Ruifang, Zhao Jian, Wang Ying, Wang Shuang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451100, China)

**Abstract:** This paper presents an integrated energy system (IES) multi-agent game cooperative optimal scheduling strategy considering carbon quota and integrated demand response. Firstly, based on Stackelberg game theory and considering the initiative of demand side and energy storage side, a multi-agent game interaction framework of source – load – storage is established. Secondly, with IES operators as leaders and energy storage operators and users as followers, the decision-making model of each stakeholder is established. In order to guide users to use energy scientifically and reduce system carbon emissions, a dual incentive policy based on carbon quota and real-time price guidance is introduced into IES operator model, and energy selling price and internal unit output plan are formulated with the goal of maximum net profit. Finally, genetic algorithm combined with CPLEX two-stage algorithm is used to solve the proposed multi-agent game model. The simulation results show that the proposed dual incentive strategy and game model can effectively take into account the interests of all parties, reduce the carbon emissions of the system without harming the interests of all parties, and realize the multi-agent low-carbon collaborative operation of IES.

**Keywords:** carbon quota; integrated energy system; integrated demand response; Stackelberg game