

◀ 节能与环境保护 ▶

考虑碳惩罚和混合博弈的综合能源系统
低碳经济调度王茜¹, 何旺²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节 551700)

摘要 综合能源系统(IES)已成为加快实现碳减排和可持续发展的关键方向。针对多区域 IES 的碳减排和各主体间的利益协调问题, 提出一种考虑碳惩罚和混合博弈的 IES 低碳优化调度策略, 该混合博弈模型采用主从博弈实现上层区域 IES 运营商与下层负荷聚合商和储能服务商的利益协调与低碳调度, 并通过碳惩罚机制引导各区域 IES 运营商高效平衡各供能设备出力。此外, 为最大化挖掘多区域 IES 的降碳潜力, 采用合作博弈方法中的纳什议价模型, 激励区域 IES 运营商进行能量交互, 合作降低碳排放。考虑到各主体的隐私安全问题, 提出一种联合二次规划-遗传算法-交替方向乘子法(ADMM)算法, 实现多区域多层混合博弈问题分布式求解, 鼓励各主体进行低碳化交易, 实现更经济的供能和更合理的用能。算例分析结果表明, 所提方法可以有效减少碳排放并实现各主体共赢。

关键词 综合能源系统 低碳调度 混合博弈 碳惩罚 多主体 能量交互

1 前言

综合能源系统(Integrate Energy System, IES)通过整合不同形式的能源, 实现能源的最优配置和高效利用, 从而减少能源消耗和碳排放, 已成为推动全球绿色低碳转型的关键战略之一^[1~3]。为加快综合能源系统的社会化应用并促进能源市场的多样化发展与创新, 多运营主体参与的 IES 运行机制正受到各国学者的广泛关注。其中, 多主体之间的交互机制和低碳调度方法已成为当前研究热点, 主要分为集中式优化调度和分布式博弈调度。

集中式优化调度是一种通过对系统内各个设备的出力进行统一规划和协调, 以实现整个 IES 总成本或碳排放最小化的策略。例如, 文献[4, 5]探讨了在 IES 优化调度中引入碳交易机制的方法, 通过在经济调度模型中结合运行成本和环境成本, 在提升新能源消纳能力的同时降低了碳排放量。文献[6, 7]提出一种计及阶梯型碳交易和综合需求响应的 IES 优化调度方法, 通过结合多种形式的的需求响应和阶梯型碳交易, 实现多负荷平移与削减, 有效降低了碳排放量和运行成本。然而, 集中式方法忽略了低碳经济调度过程中 IES 内各主体的信息交互与利益诉求。多主体 IES 中的能源生产、存储和

消费分别由不同主体负责, 而这些主体的利益目标并不相同甚至对立。因此, 有学者提出使用分布式调度方法研究 IES 内部多主体之间的博弈, 以提升多主体系统的整体效率和稳定性^[8]。文献[9, 10]提出一种以上层为供电侧、下层为用电侧的主从博弈低碳优化调度模型, 引入碳惩罚或激励因子实现负荷侧低碳需求响应, 达成低碳和经济的双赢。文献[11~13]将多个园区 IES 考虑为博弈多主体, 充分考虑多园区间的合作关系, 进行园区 IES 间的合作能量调度, 实现园区利益最大化。

综上所述, 目前多主体 IES 低碳调度的研究主要集中在供能侧与负荷侧的主从博弈, 或以区域 IES 为单位的联合优化。这些研究无法有效协调区域 IES 内部和区域 IES 之间的竞争与博弈, 限制了各主体的策略空间, 不能充分发挥多区域 IES 的低

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目“面向煤电改造的新型电力系统多能源协调调度技术研究”(编号: 黔科合支撑[2024]一般 018)。

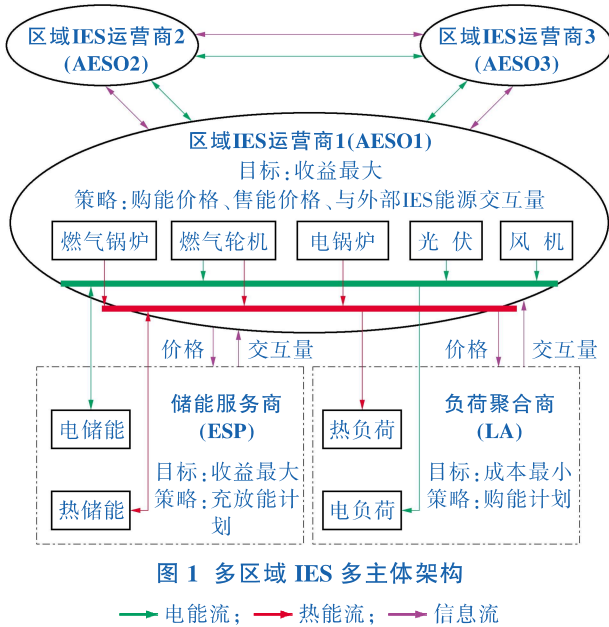
作者简介: 王茜, 硕士, 毕业于贵州大学电气工程学院电气工程专业, 研究方向为综合能源系统优化调度。

E-mail: 2809701235@qq.com

碳调度潜力。为此,本文从区域 IES 间和内部两种博弈角度出发,构建由区域 IES 内部各主体纵向主从博弈和区域 IES 之间横向合作博弈组成的混合博弈模型,通过算例验证了该混合博弈模型在降低碳排放和运行成本等方面的优势。

2 多区域综合能源系统多主体架构

本文所研究的多区域 IES 多主体架构如图 1 所示,每个区域 IES 由区域 IES 运营商(Area Energy System Operator, AESO)、负荷聚合商(Load Aggregator, LA)和储能服务商(Energy Storage Provider, ESP)三类主体组成。



AESO 是所在区域的主要能源提供者,向 ESP 和 LA 提供电能和热能,其内部主要包括光伏、风机、燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉等设备,通过制定购售能价格和各设备出力计划,实现自身收益最大化和区域能源供需平衡。此外,当区域内存在能源供需不匹配时,AESO 除了与上级电网交易外,还可与其他 AESO 交易能源剩余或缺额以实现所在区域能源平衡。LA 是多种能源的最终消费者,根据 AESO 的价格灵活调整用能需求,以降低用能成本和最大化用能满意度。ESP 为系统提供能源缓冲,化解能源供需之间的波动性和不匹配性,采用“低充高放”(低价时段充能,高价时段放能)策略套利获取收益。

3 综合能源系统各主体模型

3.1 区域 IES 运营商模型

3.1.1 目标函数

AESO_i 在综合考虑储能充放电计划、负荷需求、碳排放的基础上制定价格策略,优化目标为收益最大,可以表示为:

$$\max F_{i,ies} = F_{i,s} - F_{i,b} - F_{i,o} - F_{i,c} \quad (1)$$

式中: $F_{i,ies}$ 为 AESO_i 的收益函数; $F_{i,s}$ 、 $F_{i,b}$ 为 AESO_i 的售能收益和购能成本; $F_{i,o}$ 、 $F_{i,c}$ 为 AESO_i 的运行成本和碳排放奖惩费用。

3.1.1.1 售能收益和购能成本

AESO_i 的售能收益和购能成本均由与区域内各主体、区域外其他 AESO 以及上级电网三部分交易构成,即:

$$F_{i,s} = f_{i,s}^{in} + f_{i,s}^{out} + f_{i,s}^g \quad (2)$$

$$F_{i,b} = f_{i,b}^{in} + f_{i,b}^{out} + f_{i,b}^g \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_{i,s}^{in} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,s}^{e,in} P_{i,t,s}^{e,in} + p_{i,t,s}^{h,in} P_{i,t,s}^{h,in}] \Delta t \\ f_{i,s}^{out} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,s}^{e,out} P_{i,t,s}^{e,out} + p_{i,t,s}^{h,out} P_{i,t,s}^{h,out}] \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} f_{i,s}^g = \sum_{t=1}^T p_{i,t,s}^{e,g} P_{i,t,s}^{e,g} \Delta t \\ f_{i,b}^{in} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,b}^{e,in} P_{i,t,b}^{e,in} + p_{i,t,b}^{h,in} P_{i,t,b}^{h,in}] \Delta t \\ f_{i,b}^{out} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,b}^{e,out} P_{i,t,b}^{e,out} + p_{i,t,b}^{h,out} P_{i,t,b}^{h,out}] \Delta t \\ f_{i,b}^g = \sum_{t=1}^T p_{i,t,b}^{e,g} P_{i,t,b}^{e,g} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_{i,s}^{in}$ 、 $f_{i,s}^{out}$ 、 $f_{i,s}^g$ 分别代表 AESO_i 向区域内各主体的售能收益、向其他 AESO 以及上级电网的售电收益; $f_{i,b}^{in}$ 、 $f_{i,b}^{out}$ 、 $f_{i,b}^g$ 分别代表 AESO_i 向区域内 ESP 的购能成本、向其他 AESO 以及上级电网的购电成本; T 为总时段数,本文中指一天的 24h; $p_{i,t,s}^{e,in}$ 、 $p_{i,t,s}^{h,in}$ 、 $p_{i,t,b}^{e,in}$ 、 $p_{i,t,b}^{h,in}$ 分别为 t 时刻 AESO_i 向系统内各主体售电、售热、购电、购热价格; $P_{i,t,s}^{e,in}$ 、 $P_{i,t,s}^{h,in}$ 、 $P_{i,t,b}^{e,in}$ 、 $P_{i,t,b}^{h,in}$ 分别为 t 时刻 AESO_i 向系统内各主体售电量、售热量、购电量、购热量; $p_{i,t,s}^{e,out}$ 、 $p_{i,t,s}^{h,out}$ 、 $p_{i,t,b}^{e,out}$ 、 $p_{i,t,b}^{h,out}$ 分别为 t 时刻 AESO_i 向其他 AESO 售电量、售热量、购电量、购热量; $p_{i,t,s}^{e,g}$ 、 $p_{i,t,b}^{e,g}$ 分别为 t 时刻 AESO_i 向上级电网售电价格、购电价格; $P_{i,t,s}^{e,g}$ 、 $P_{i,t,b}^{e,g}$ 分别为 t 时刻 AESO_i 向上级电网售电量、购电量。

3.1.1.2 运行成本

$$F_{i,0} = \sum_{t=1}^T [f_{i,t,GT} + f_{i,t,GB}] \quad (6)$$

式中: $f_{i,t,GT}$ 、 $f_{i,t,GB}$ 分别为 AESO i 内 t 时刻燃气轮机和燃气锅炉的燃料成本函数^[8]。

$$\begin{cases} f_{i,t,GT} = [a_{i,GT}^e (P_{i,t,GT}^e)^2 + b_{i,GT}^e P_{i,t,GT}^e + c_{i,GT}^e] \Delta t \\ f_{i,t,GB} = [a_{i,GB}^e (P_{i,t,GB}^h)^2 + b_{i,GB}^e P_{i,t,GB}^h + c_{i,GB}^e] \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{i,t,GT}^e$ 、 $P_{i,t,GB}^h$ 分别为 t 时刻热电联产机组的输出电功率和燃气锅炉的输出热功率; $a_{i,GT}^e$ 、 $b_{i,GT}^e$ 、 $c_{i,GT}^e$ 为燃气轮机的成本系数; $a_{i,GB}^e$ 、 $b_{i,GB}^e$ 、 $c_{i,GB}^e$ 为燃气锅炉的成本系数。

需要说明的是, 本文未考虑燃气轮机、燃气锅炉和电锅炉等设备的折旧成本, 原因在于本文考虑的调度优化问题周期为 24h, 单一调度周期内燃气轮机、燃气锅炉和电锅炉等设备的折旧成本相对较小。此外, 在博弈框架中, 区域 IES 运营商将优先选择使用清洁能源进行发电, 并尽可能从其他 IES 购买清洁能源, 最大限度地避免依赖燃气轮机和燃气锅炉。因此, 折旧成本对区域 IES 运营商博弈结果的影响非常小, 可以忽略不计。

3.1.1.3 碳排放惩罚费用

为促进各区域减少碳排放, 本文采用了一种碳排放惩罚机制^[1]。在该机制下, 每个产能实体将被分配一定数量的免费碳排放配额, 超出此配额的部分将会面临罚款。因此, 对于各 AESO 而言, 当其碳排放量高于其分配的碳配额时, 则应支付相应的惩罚费用, 即:

$$F_{i,c} = c \times \max(Q_i - Q_i^q) \quad (8)$$

式中: c 为单位 CO₂ 排放量的奖励或惩罚价格; Q_i 、 Q_i^q 分别为 AESO i 的实际碳排放量和碳配额。

AESO i 的实际碳排放量 Q_i 由电网外部购电产生的碳排放量 $Q_{i,t,g}$ 、燃气轮机的碳排放量 $Q_{i,t,GT}$ 以及燃气锅炉的碳排放量 $Q_{i,t,GB}$ 决定, 可由式(9)计算^[14]:

$$P_{i,t,pv} + P_{i,t,wt} + P_{i,t,GT}^e + P_{i,t,GB}^h + P_{i,t,b}^{e,in} + P_{i,t,b}^{e,out} + P_{i,t,b}^{e,g} = P_{i,t,s}^{e,in} + P_{i,t,s}^{e,out} + P_{i,t,s}^{e,g} + P_{i,t,EB}^e \quad (12)$$

$$P_{i,t,GT}^h + P_{i,t,GB}^h + P_{i,t,EB}^h + P_{i,t,b}^{h,in} + P_{i,t,b}^{h,out} + P_{i,t,b}^{h,g} = P_{i,t,s}^{h,in} + P_{i,t,s}^{h,out} + P_{i,t,s}^{h,g} \quad (13)$$

式中: $P_{i,t,pv}$ 、 $P_{i,t,wt}$ 分别为光伏、风机电功率出力; $P_{i,t,EB}^e$ 、 $P_{i,t,EB}^h$ 分别为电锅炉的输入电功率以及输出热功率, 两者计算关系见式(14)。

$$P_{i,t,EB}^h = \eta_{i,EB} P_{i,t,EB}^e \quad (14)$$

式中: $\eta_{i,EB}$ 为电锅炉的效率。

除此之外, 区域内 AESO 内部购售电、热功率

$$\begin{cases} Q_i = \sum_{t=1}^T [Q_{i,t,g} + Q_{i,t,GT} + Q_{i,t,GB}] \Delta t \\ Q_{i,t,g} = a_g^o (P_{i,t,b}^{e,g})^2 + b_g^o P_{i,t,b}^{e,g} + c_g^o \\ Q_{i,t,GT} = a_{i,GT}^o (P_{i,t,GT}^e + \partial_{i,GT} P_{i,t,GT}^h)^2 \\ \quad + b_{i,GT}^o (P_{i,t,GT}^e + \partial_{i,GT} P_{i,t,GT}^h) + c_{i,GT}^o \\ Q_{i,t,GB} = a_{i,GB}^o (P_{i,t,GB}^h)^2 + b_{i,GB}^o P_{i,t,GB}^h + c_{i,GB}^o \end{cases} \quad (9)$$

式中: a_g^o 、 b_g^o 、 c_g^o 为电网购电的碳排放系数; $a_{i,GT}^o$ 、 $b_{i,GT}^o$ 、 $c_{i,GT}^o$ 为燃气轮机的碳排放系数; $a_{i,GB}^o$ 、 $b_{i,GB}^o$ 、 $c_{i,GB}^o$ 为燃气锅炉的碳排放系数; $\partial_{i,GT}$ 为燃气轮机电热功率折换系数; $P_{i,t,GT}^h$ 为 t 时刻燃气轮机产热功率, 其热电联产功率关系见式(10)^[15]。

$$P_{i,t,GT}^h = \frac{1 - \eta_{e,GT}}{\eta_{e,GT}} \eta_{h,RB} P_{i,t,GT}^e \quad (10)$$

式中: $\eta_{e,GT}$ 、 $\eta_{h,RB}$ 分别为发电效率和余热回收效率。

Q_i^q 包含电网购电碳配额、燃气轮机碳配额以及燃气锅炉碳配额三项, 本文采用无偿分配下的碳配额基准线方法确定各碳排放单位分配额, 具体计算如下^[6]:

$$\begin{cases} Q_i^q = Q_{i,g}^q + Q_{i,GT}^q + Q_{i,GB}^q \\ Q_{i,g}^q = \lambda_1 \sum_{t=1}^T P_{i,t,b}^{e,g} \\ Q_{i,GT}^q = \lambda_2 \sum_{t=1}^T (P_{i,t,GT}^e + \partial_{i,GT} P_{i,t,GT}^h) \\ Q_{i,GB}^q = \lambda_3 \sum_{t=1}^T P_{i,t,GB}^h \end{cases} \quad (11)$$

式中: $Q_{i,g}^q$ 、 $Q_{i,GT}^q$ 、 $Q_{i,GB}^q$ 分别为电网购电、燃气轮机和燃气锅炉的碳排放配额; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为向电网购买单位电量的碳配额、燃气轮机生产单位电量的碳配额以及燃气锅炉生产单位热量的碳配额。

3.1.2 约束条件

3.1.2.1 功率平衡约束

区域 i 的电热功率平衡约束分别如下式所示:

$$P_{i,t,pv} + P_{i,t,wt} + P_{i,t,GT}^e + P_{i,t,GB}^h + P_{i,t,b}^{e,in} + P_{i,t,b}^{e,out} + P_{i,t,b}^{e,g} = P_{i,t,s}^{e,in} + P_{i,t,s}^{e,out} + P_{i,t,s}^{e,g} + P_{i,t,EB}^e \quad (12)$$

$$P_{i,t,GT}^h + P_{i,t,GB}^h + P_{i,t,EB}^h + P_{i,t,b}^{h,in} + P_{i,t,b}^{h,out} + P_{i,t,b}^{h,g} = P_{i,t,s}^{h,in} + P_{i,t,s}^{h,out} + P_{i,t,s}^{h,g} \quad (13)$$

需与 LA、ESP 的售电、购电功率之和分别一致, 如下式所示:

$$\begin{cases} P_{i,t,b}^{e,in} = P_{i,t,dis}^{e,dis} \\ P_{i,t,b}^{h,in} = P_{i,t,dis}^{h,dis} \\ P_{i,t,s}^{e,in} = P_{i,t,LA}^e + P_{i,t,ESP}^{e,ch} \\ P_{i,t,s}^{h,in} = P_{i,t,LA}^h + P_{i,t,ESP}^{h,ch} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{i,t,ESP}^{e,dis}$ 、 $P_{i,t,ESP}^{h,dis}$ 、 $P_{i,t,ESP}^{e,ch}$ 、 $P_{i,t,ESP}^{h,ch}$ 分别为区域 i 内 t 时刻 ESP 放电、放热、充电、充热功率; $P_{i,t,LA}^e$ 、 $P_{i,t,LA}^h$ 分别为区域 i 内 t 时刻 LA 购买的电、热功率。

3.1.2.2 设备出力与电网购售能约束

AESO 内部各设备出力和向电网购售能均需在其出力上下限范围内。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t,GT}^e \leq P_{i,GT}^{e,max} \\ 0 \leq P_{i,t,GB}^h \leq P_{i,GB}^{h,max} \\ 0 \leq P_{i,t,EB}^e \leq P_{i,EB}^{e,max} \\ 0 \leq P_{i,t,s}^{e,g} \leq P_{i,s}^{e,g,max} \\ 0 \leq P_{i,t,b}^{e,g} \leq P_{i,b}^{e,g,max} \\ 0 \leq P_{i,t,s}^{h,g} \leq P_{i,s}^{h,g,max} \\ 0 \leq P_{i,t,b}^{h,g} \leq P_{i,b}^{h,g,max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{i,GT}^{e,max}$ 、 $P_{i,GB}^{h,max}$ 、 $P_{i,EB}^{e,max}$ 为 AESOi 燃气轮机、燃气锅炉以及电锅炉的出力上限; $P_{i,s}^{e,g,max}$ 、 $P_{i,b}^{e,g,max}$ 、 $P_{i,s}^{h,g,max}$ 、 $P_{i,b}^{h,g,max}$ 分别为 AESOi 向电网售电、购电、售热、购热功率的最大值。

3.2 储能服务商

区域 i 内的 ESP 基于 AESO 提供的充放能价格, 决定各时段的充放能计划, 其优化目标为:

$$\max(F_{i,ESP}^{dis} - F_{i,ESP}^{ch} - F_{i,ESP}^{age}) \quad (17)$$

式中: $F_{i,ESP}^{dis}$ 、 $F_{i,ESP}^{ch}$ 、 $F_{i,ESP}^{age}$ 分别为储能运营商的放能收益、充能成本、电储能老化成本, 可表示为式(18)^[16]。

$$\begin{cases} F_{i,ESP}^{dis} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,b}^{e,in} P_{i,t,ESP}^{e,dis} + p_{i,t,b}^{h,in} P_{i,t,ESP}^{h,dis}] \Delta t \\ F_{i,ESP}^{ch} = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,s}^{e,in} P_{i,t,ESP}^{e,ch} + p_{i,t,s}^{h,in} P_{i,t,ESP}^{h,ch}] \Delta t \\ F_{i,ESP}^{age} = \gamma_i \sum_{t=1}^T [P_{i,t,ESP}^{e,dis} + P_{i,t,ESP}^{e,ch}] \Delta t \end{cases} \quad (18)$$

式中: γ_i 为电储能单位老化成本。

在制定充放能计划时, ESP 需保证其充放能功率以及电热剩余容量满足如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t,ESP}^{e,dis} \leq P_{i,ESP}^{e,dis,max} \\ 0 \leq P_{i,t,ESP}^{h,dis} \leq P_{i,ESP}^{h,dis,max} \\ 0 \leq P_{i,t,ESP}^{e,ch} \leq P_{i,ESP}^{e,ch,max} \\ 0 \leq P_{i,t,ESP}^{h,ch} \leq P_{i,ESP}^{h,ch,max} \\ 0 \leq E_{i,t,ESP}^e \leq E_{i,ESP}^{e,max} \\ 0 \leq E_{i,t,ESP}^h \leq E_{i,ESP}^{h,max} \\ E_{i,0,ESP}^e = E_{i,T,ESP}^e \\ E_{i,0,ESP}^h = E_{i,T,ESP}^h \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} E_{i,t,ESP}^e = E_{i,t-1,ESP}^e + (P_{i,t,ESP}^{e,ch} - P_{i,t,ESP}^{e,dis}) \Delta t \\ E_{i,t,ESP}^h = E_{i,t-1,ESP}^h + (P_{i,t,ESP}^{h,ch} - P_{i,t,ESP}^{h,dis}) \Delta t \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{i,ESP}^{e,dis,max}$ 、 $P_{i,ESP}^{h,dis,max}$ 、 $P_{i,ESP}^{e,ch,max}$ 、 $P_{i,ESP}^{h,ch,max}$ 分别为储能系统的最大放电功率、最大放热功率、最大充电功率和最大充热功率; $E_{i,t,ESP}^e$ 、 $E_{i,t,ESP}^h$ 分别为 t 时刻的电、热储能剩余容量, 均不高于电储能容量上限 $E_{i,ESP}^{e,max}$ 和热储能容量上限 $E_{i,ESP}^{h,max}$, 且日周期内始末电、热储量需一致。

3.3 负荷聚合商

区域 i 内的 LA 基于 AESO 提供的购能价格, 优化用能需求响应量, 最小化用能成本。

$$\min(F_{i,LA}^b + F_{i,LA}^{DR}) \quad (21)$$

式中: $F_{i,LA}^b$ 为 IESi 内 LA 的购能费用; $F_{i,LA}^{DR}$ 为实施负荷平移以及负荷削减等响应手段所带来的不舒适成本^[15]。

$$F_{i,LA}^b = \sum_{t=1}^T [p_{i,t,s}^{e,in} P_{i,t,LA}^e + p_{i,t,s}^{h,in} P_{i,t,LA}^h] \Delta t \quad (22)$$

$$F_{i,LA}^{DR} = \sum_{t=1}^T [u_i^e (P_{i,t,DR}^e)^2 + u_i^h (P_{i,t,DR}^h)^2] \Delta t \quad (23)$$

式中: $P_{i,t,LA}^e$ 、 $P_{i,t,LA}^h$ 分别为 t 时刻 LA 购买的电、热功率; $P_{i,t,DR}^e$ 、 $P_{i,t,DR}^h$ 分别为 t 时刻电负荷平移量和热负荷削减量; u_i^e 、 u_i^h 为 LAi 的电、热响应系数。

负荷平移需保证平移前后负荷总量不变, 负荷削减则需满足上限约束^[15]。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{i,t,DR}^e \Delta t = W_{i,DR}^e \\ 0 \leq P_{i,t,DR}^h \leq P_{i,t,DR}^{h,max} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $W_{i,DR}^e$ 为单个调度周期内可平移负荷总量; $P_{i,t,DR}^{h,max}$ 为 t 时刻最大可削减热负荷。

4 综合能源系统多主体混合博弈框架

4.1 博弈架构

基于图 1 中多区域 IES 多主体架构, 本文提出一种混合博弈模型以实现多区域综合能源系统低碳经济调度。如图 2 所示, 该混合博弈模型由 AESO 与其下层各主体间的纵向主从博弈和 AESO 之间的横向合作博弈组成。

4.1.1 纵向主从博弈

纵向博弈采用 Stackelberg 主从博弈模型, 其中各 AESO 为领导者, 区域内 LA 和 ESP 为跟随者。该主从博弈模型可表示为:

参与者: AESO、ESP、LA 为该博弈的3个参与者。

策略: 领导者 AESO 的策略为制定区域内购能价格和机组出力计划, 跟随者 ESP 的策略为制定充放能计划, 跟随者 LA 的策略为调整负荷需求响应量。

收益: AESO、ESP、LA 在主从博弈中的收益分别见式(25)、式(17)和式(21)。

$$F_{i,ies}^m = f_{i,s}^m - f_{i,b}^m \quad (25)$$

式中: $F_{i,ies}^m$ 为 AESO*i* 在区域内部交易中的收益。

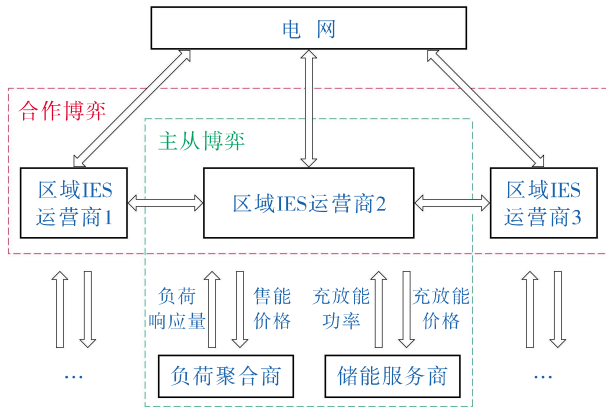


图2 IES多主体混合博弈框架

4.1.2 横向合作博弈

除上述主从博弈外, 本文在 AESO 之间引入合作博弈来进一步提升能源利用效率。相比各 AESO 独立规划设备出力, AESO 合作规划拥有更大的策略空间, 可以通过协调各区域的设备出力和共享清洁能源, 优化能源利用效率, 减少不必要的碳排放并降低系统运行成本。合作博弈方法中, 纳什议价模型可以最大化合作效率且实现利益公平分配, 因此本文采用纳什议价模型用于实现 AESO 之间的能源交易和利益分配, 其数学表达式见式(26)。该模

$$L = \sum_{i=1}^N \tilde{F}_{i,ies}^c + \sum_{t=1}^T p_t^{e,out} \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{e,out} - P_{i,t,s}^{e,out}) + \sum_{t=1}^T p_t^{h,out} \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{h,out} - P_{i,t,s}^{h,out}) + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^T \left\| \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{e,out} - P_{i,t,s}^{e,out}) \right\|_2^2 + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^T \left\| \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{h,out} - P_{i,t,s}^{h,out}) \right\|_2^2 \quad (30)$$

L 更新迭代为:

$$\begin{cases} \{P_{i,t,s}^{e,out}, P_{i,t,b}^{e,out}, P_{i,t,s}^{h,out}, P_{i,t,b}^{h,out}\} = \arg \max L \\ (p_t^{e,out})^{(k+1)} = (p_t^{e,out})^{(k)} + \rho \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{e,out} - P_{i,t,s}^{e,out}) \\ (p_t^{h,out})^{(k+1)} = (p_t^{h,out})^{(k)} + \rho \sum_{i=1}^N (P_{i,t,b}^{h,out} - P_{i,t,s}^{h,out}) \end{cases} \quad (31)$$

上述迭代中, 单个子优化问题为:

型以所有 AESO 的合作破裂点(即非合作时的预期供能成本)为基准, 旨在最大化各主体相较于各自合作破裂点的效用, 确保所有主体通过合作获得相对均衡的成本降低, 实现共同利益最大化。

$$\min \prod_{i=1}^N (F_{i,ies}^{c0} - F_{i,ies}^c) \quad (26)$$

$$F_{i,ies}^c = F_{i,ies}^m - F_{i,ies} \quad (27)$$

式中: $F_{i,ies}^c$ 为 AESO*i* 参与合作博弈的供能成本; $F_{i,ies}^{c0}$ 为 AESO*i* 参与合作博弈前的供能成本, 即合作破裂点, 可通过求解非合作情况下的最小供能成本得到, 具体方法为通过 $P_{i,t,s}^{e,out}$ 、 $P_{i,t,b}^{e,out}$ 、 $P_{i,t,s}^{h,out}$ 、 $P_{i,t,b}^{h,out}$ 取 0 时的 $F_{i,ies}^c$ 得到。

合作能源交易需满足购电、购热与售电、售热功率相等:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{i,t,s}^{e,out} = \sum_{i=1}^N P_{i,t,b}^{e,out} \\ \sum_{i=1}^N P_{i,t,s}^{h,out} = \sum_{i=1}^N P_{i,t,b}^{h,out} \end{cases} \quad (28)$$

参考文献[2]的模型等效转换, 式(26)可转化为:

$$\min \prod_{i=1}^N (F_{i,ies}^{c0} - F_{i,ies}^c) \triangleq \min \sum_{i=1}^N F_{i,ies}^c \triangleq \min \sum_{i=1}^N \tilde{F}_{i,ies}^c \quad (29)$$

式中: $\tilde{F}_{i,ies}^c = F_{i,ies}^c (p_t^{e,out} = 0, p_t^{h,out} = 0, t = 1, \dots, T)$, $\sum_{i=1}^N F_{i,ies}^c$ 和 $\sum_{i=1}^N \tilde{F}_{i,ies}^c$ 等效的原因在于 AESO 之间交易成本与收益和为 0。

考虑到 AESO 的各设备参数、成本系数等隐私问题, 本文采用交替方向乘子法(ADMM)^[17]对 AESO 合作博弈进行分布式求解。

将总运行成本优化问题的交易量约束式(28)进行拉格朗日松弛, 得到式(30):

$$\min \tilde{F}_{i,ies}^c + \sum_{t=1}^T [p_t^{e,out} (P_{i,t,b}^{e,out} - P_{i,t,s}^{e,out}) + p_t^{h,out} (P_{i,t,b}^{h,out} - P_{i,t,s}^{h,out})] \quad (32)$$

s.t. (2)~(17)

4.2 求解方法

本文讨论的混合博弈问题包括横向合作博弈和纵向主从博弈两种不同类型, 横向合作博弈涉及多主体单目标优化, 各合作主体共享一个总目标函

数,进行协作优化;而纵向主从博弈则为多主体多目标优化,各主体的目标函数不一致且相互冲突,单一的主从博弈算法(如二次规划-遗传算法)或合作博弈算法(如常规 ADMM 算法)无法解决这种混合博弈问题。因此,本文提出一种联合二次规划-遗传算法-ADMM 的分布式求解算法,如图 3 所示。该算法允许各主体在多区域多层的混合博弈框架下,制定策略以最大化自身利益,而无需暴露成本系数或设备参数等机密数据。

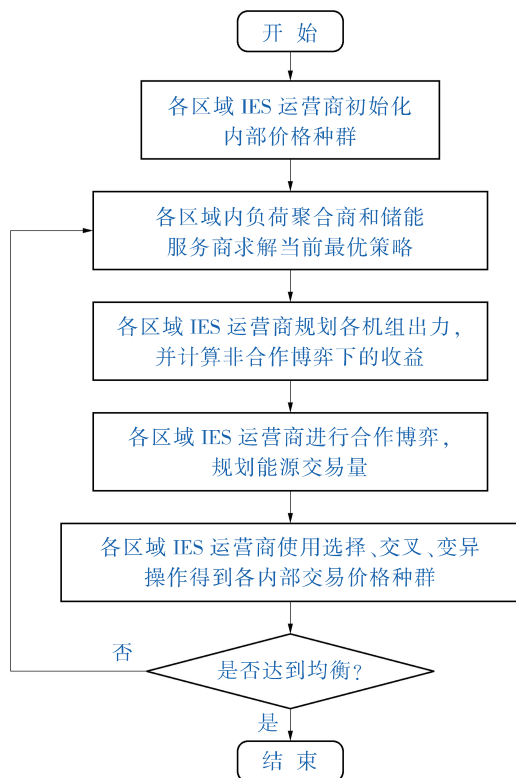


图 3 混合博弈求解算法

步骤 1:各 AESO 初始化内部价格种群,将区域内部购售能价格下发给 LA 和 ESP;

步骤 2:各区域内 LA 和 ESP 根据当前价格制定用能和充放能计划;

步骤 3:各 AESO 根据下层的反馈求取非合作博弈下的收益,即合作破裂点;

步骤 4:各 AESO 参与合作博弈,用 ADMM 算法实现分布式求解,决定各设备出力,具体见 3.1.2 节;

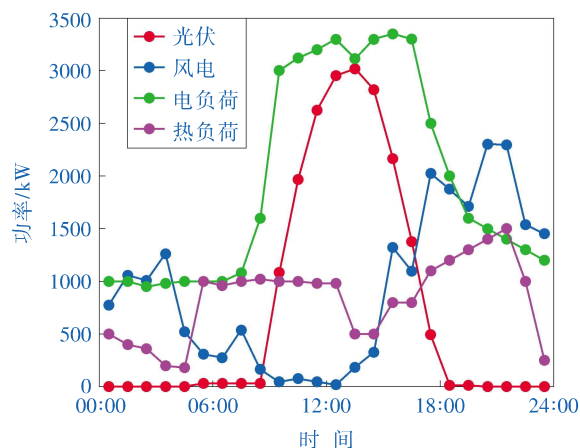
步骤 5:各 AESO 利用遗传算法选择、交叉、变异等操作生成新的购售能价格;

步骤 6:若各 AESO、LA 和 ESP 的策略与上一

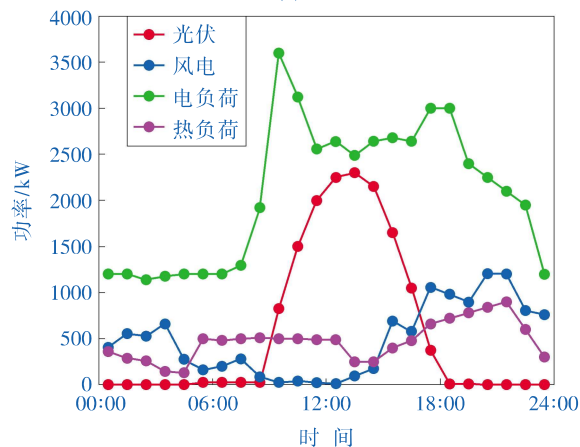
次相同,则认为该混合博弈达到均衡,否则重复步骤 2~5。

5 算例分析

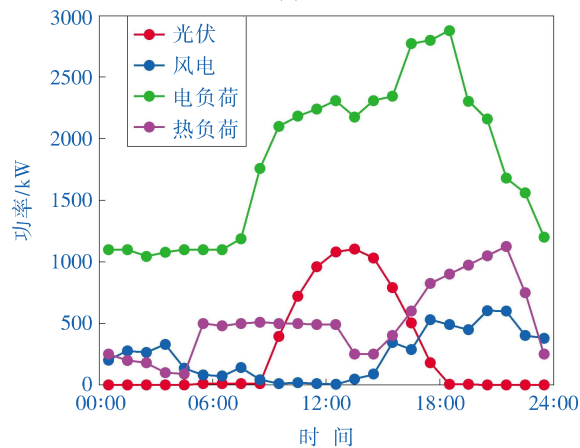
本文以图 1 中三区域 IES 为对象进行算例分析,各区域内的风电、光伏以及电、热负荷功率预测曲线如图 4 所示。



(a) AESO1



(b) AESO2



(c) AESO3

图 4 各区域负荷、新能源预测曲线

需要说明的是,鉴于本文的研究重点在于如何通过博弈实现具有不同利益目标主体间的利益协调与能源(主要是清洁能源)交互,因此所选择的算例数据为风资源和光资源均较充足或适中的天气,并通过该算例来验证本文所提出方法相较于其他方法,在引导不同区域之间以及区域内部各主体协同实现碳减排和降低运行成本方面的优势。至于风光资源匮乏(如冬天阴雨无风天气)的情形,本文所提出方法依然能通过价格主从博弈尽可能降低碳排放和运行成本,而这一方法已在大量相关文献中得到验证,本文不再赘述。

各 AESO 的设备容量参数、效率、出力上下限均参考文献[18],各设备碳排放系数参考文献[6],各 LA 的可平移负荷和可削减热负荷最大可占负荷总量的 20%^[15],ESP 的充放能效率均为 0.9^[18]。价格参数见表 1,向电网购电电价采用分时电价,而上网电价、向热网购热电价、上网热价均采用统一价格,不区分时段。案例研究均在 YALMIP 中建模,在 MATLAB 2022b 中进行,求解器为 CPLEX。

表 1 基本经济参数 元/(kW·h)

参 数	价 格
分时电价(峰值)	1.35
分时电价(平值)	0.82
分时电价(谷值)	0.38
上网电价	0.35
热价上限	0.5
热价下限	0.15

为证明本文所提方法的有效性,以如下四种场景开展算例研究。

场景 1:不考虑碳惩罚、主从博弈和合作博弈调度;

场景 2:考虑碳惩罚,不考虑主从博弈和合作博弈调度;

场景 3:考虑碳惩罚和主从博弈调度,不考虑合作博弈调度;

场景 4:考虑碳惩罚、主从博弈和合作博弈调度。

5.1 低碳经济调度结果分析

使用图 3 所示的算法分别对上述四种场景进行求解,四种场景下各区域的碳排放量和运行成本分别见表 2、表 3,具体碳排放量构成如图 5 所示。

表 2 四种场景下的碳排放量 kg

场 景	碳排放量			
	区域 1	区域 2	区域 3	总 量
1	81848.5	67383.6	84696.2	233928.3
2	28600.7	39150.0	49965.2	117716.0
3	23715.0	36195.2	46358.1	106268.3
4	30787.6	30787.6	30787.6	92363.0

表 3 四种场景下的运行成本 元

场 景	运行成本			
	区域 1	区域 2	区域 3	合 计
1	18114.1	20714.6	27158.9	65987.7
2	10548.0	17448.8	23269.0	51265.7
3	8466.3	15945.8	21237.6	45649.7
4	7315.4	13912.3	18864.1	40091.8

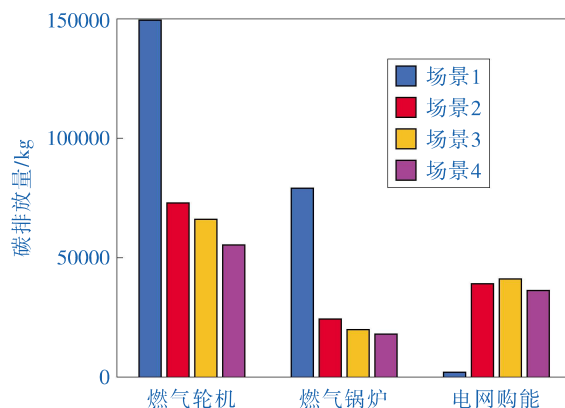


图 5 各场景下碳排放量构成

对比场景 1 和场景 2 可以看出,碳配额的降低减少了各 AESO 对传统火电机组(如燃气轮机、燃气锅炉)的依赖,使部分需求通过电网购能方式得到满足。在设立碳配额后,场景 2 并未完全依赖燃气轮机和燃气锅炉进行供能,而是将部分需求通过电网购能来满足。尽管电网购能的碳排放量仅有少量增加,但燃气轮机和燃气锅炉产生的碳排放量显著降低。这表明各区域 IES 运营商能更加合理和高效地分配燃气轮机、燃气锅炉和电网购能等资源。可以看出,各区域的碳排放和运行成本都有所减小,总碳排放量和总运行成本分别降低了 116212.3kg 和 14722 元。

相较于场景 2,场景 3 通过各 AESO 与 LA、ESP 的主从博弈调度实现低碳需求响应,两个场景下所有区域的热电总负荷及平均价格曲线如图 6、图 7 所示。场景 3 的电负荷表现出“削峰填谷”的特点,

各 AESO 通过使用遗传算法根据负荷侧的需求响应不断优化用能价格,引导 LA 调整用能需求,将原电负荷曲线里的 10:00~19:00 峰值平移到电负荷谷值时刻的 00:00~07:00 和 20:00~24:00。热负荷则

通过负荷削减的方式降低了需求。相较于不考虑 AESO 与 LA、ESP 的主从互动和需求响应,场景 3 将总碳排放量从 117716.0kg 降低到 106268.3kg,总运行成本从 51265.7 元降低到 45649.7 元。

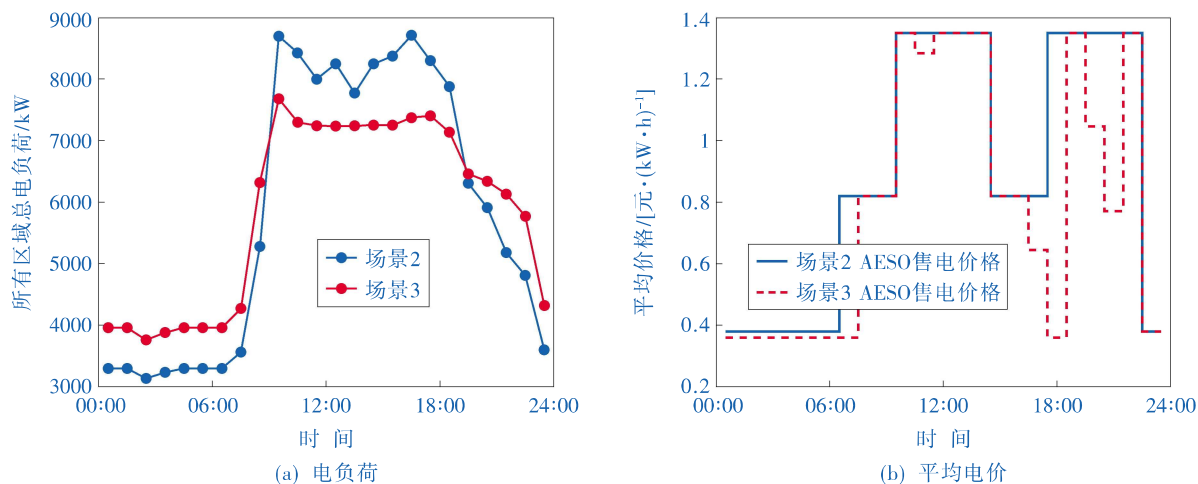


图 6 场景 2 与场景 3 的电负荷和平均电价曲线

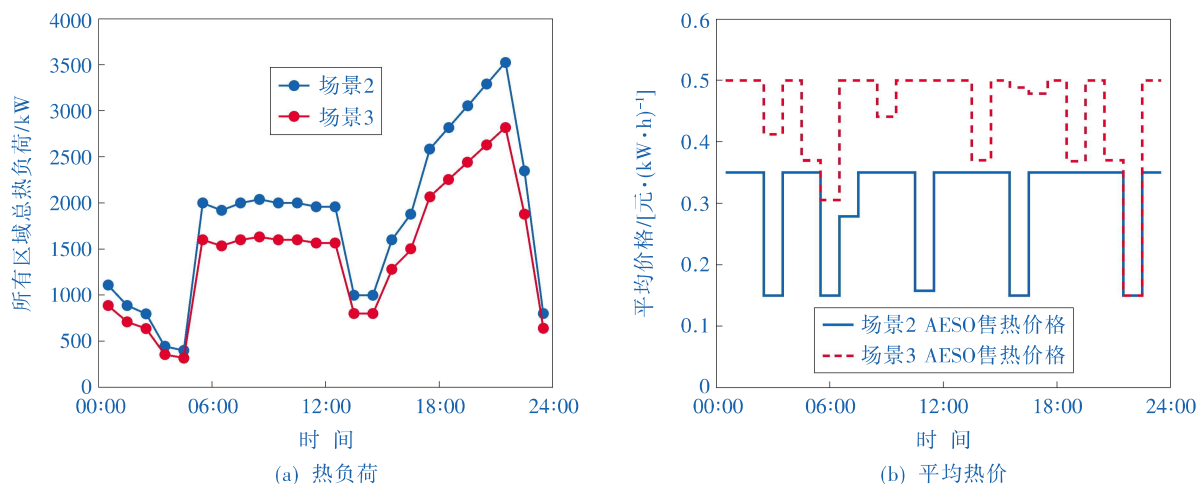


图 7 场景 2 与场景 3 的热负荷和平均热价曲线

然而场景 3 未能最大程度地减少碳排放,因为它忽略了 AESO 之间的能源交易。场景 3 和场景 4 的结果表明,通过合作博弈,可以进一步降低碳排放和运行成本。图 8、图 9 展示了场景 4 下各 AESO 的合作能源交易功率。由于区域 1 的风光资源较为丰富,因此在合作交易中,AESO2 和 AESO3 选择从 AESO1 购买部分电力。与此同时,区域 1 的热负荷较大,因而它从区域 2 和区域 3 购入热功率,降低自身的设备出力,从而减少碳排放量并降低运行成本。相比于场景 3,场景 4 显著提高了清洁能源利用率,降低了对传统能源的依赖,实现了 13.09% 的碳减排,并将总运行成本降低了 12.18%。

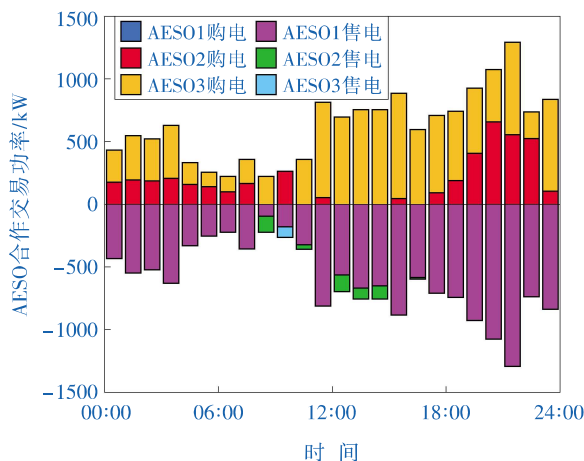


图 8 AESO 间合作交易电功率

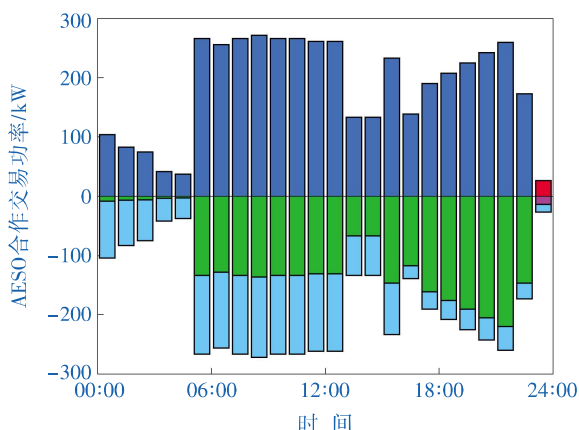


图9 AESO间合作交易热功率

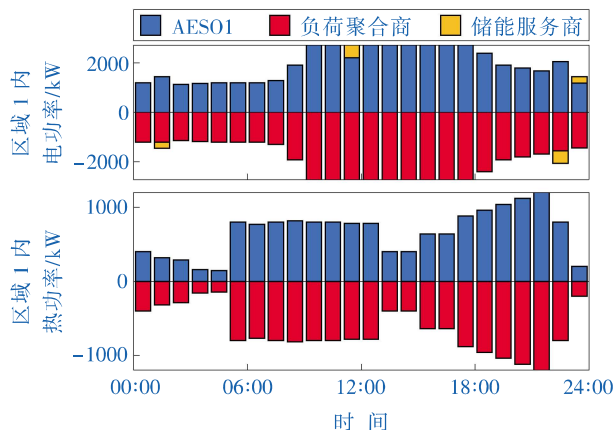
■ AESO1购热；■ AESO2购热；■ AESO3购热；
■ AESO1售热；■ AESO2售热；■ AESO3售热

5.2 功率平衡结果分析

场景4下各AESO、LA和ESP的优化结果如图10所示,以功率0为分界线,分界线以上表示提供电能,分界线以下表示消耗电能。可以看出,各区域在由主从博弈和合作博弈组成的混合博弈调度下可以实现能源供需平衡,保障各区域用能的同时减少碳排放量和降低运行成本。

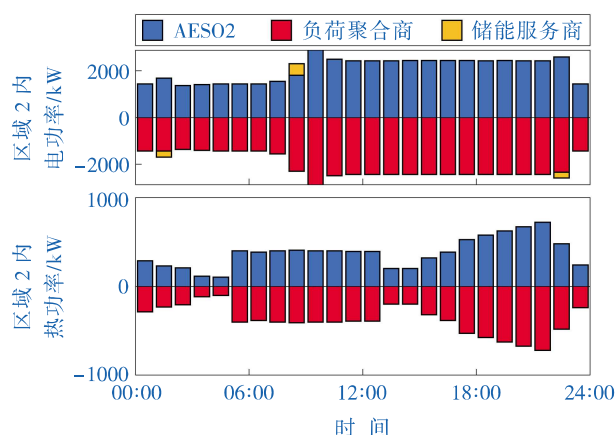
5.3 博弈算法分析

本节将从主从博弈和合作博弈两个角度,验证本文提出的求解算法在处理混合博弈模型中的有效性。图11记录了场景4下所有区域总运行成本的主从博弈迭代过程。结果显示,总运行成本和各区域运行成本随着迭代次数的增加逐渐降低,最终在160次迭代后完成收敛,求解时间为208.3s。这表明所提出的联合二次规划-遗传算法-ADMM算法具有良好的收敛效果。

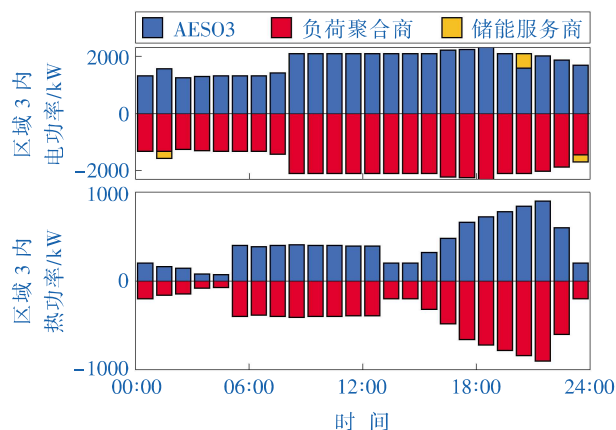


(a) 区域1电热功率供需

图10 各区域电热功率供需



(b) 区域2电热功率供需



(c) 区域3电热功率供需

续图10 各区域电热功率供需

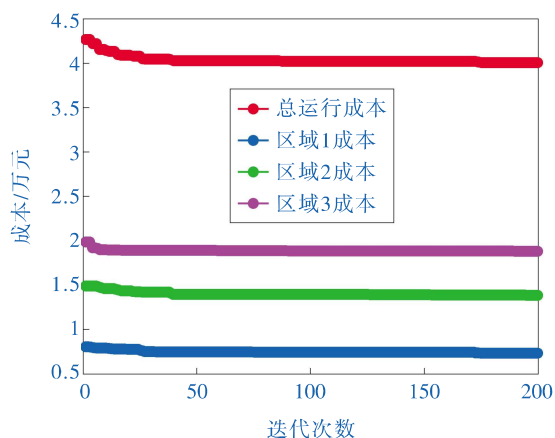


图11 主从博弈收敛结果

收敛后的结果中,各区域采用合作博弈前后运行成本的对比见表4,其中非合作博弈列和合作博弈列分别记录了场景3和场景4的各区域运行成本。区域1、区域2和区域3通过合作博弈分别降低了1150.9元、2033.5元和2373.5元的运行成本,总成本降低了5557.9元。这表明,每个区域通过合

作有效降低了成本,验证了合作博弈的有效性。

表4 合作前后运行成本对比 元

项 目	非合作博弈	合作博弈
区域 1	8466.3	7315.4
区域 2	15945.8	13912.3
区域 3	21237.6	18864.1
总成本	45649.7	40091.8

6 结论

本文提出一种多区域 IES 混合博弈低碳优化框架,采用主从博弈实现区域内部各主体的竞争交互,并引入 AESO 间的合作博弈进一步提升能源利用效率,实现多区域多层主体分布式协同低碳优化调度。最后,通过算例仿真验证了该方法的有效性,并得到以下结论:

① 本文提出的多区域 IES 混合博弈低碳优化调度框架,通过主从博弈引导 LA 和 ESP 制定交易策略,实现了低碳化用能和充放能套利。通过碳惩罚机制引导各 AESO 科学规划各供能设备出力,充分挖掘各层主体的减碳潜力。此外,采用合作博弈刺激 AESO 共享清洁能源,优化供能侧能源出力结构,通过协作降低了碳排放量和运行成本。

② 本文提出的联合二次规划-遗传算法-ADMM 算法能够以分布式的方式求解混合博弈问题,允许各区域/各层独立制定博弈策略。该算法在保障隐私安全的前提下,鼓励各主体进行低碳化交易,实现更经济的供能和更合理的用能。

需要指出的是,本文的混合博弈框架尚未考虑风光、电热负荷的预测出力与实际出力的偏差对博弈结果的影响,未来可在这方面进行深入探讨,以使该框架更贴近实际应用。

参考文献:

- [1] 易文飞,张潼,岳东,等.考虑不确定性的楼宇综合能源系统日前调度[J].电力工程技术,2024,43(4):166-176.
- [2] CHEN Maozhi,LU Hao,CHANG Xiqiang,et al.An Optimization on an Integrated Energy System of Combined Heat and Power,Carbon Capture System and Power to Gas by Considering Flexible Load[J].Energy,2023,273(4):127203.
- [3] 邢家维,程艳,于芃,等.基于合作博弈的多园区互联综合能源系统低碳经济调度[J].山东电力技术,2024,51(5):19-29.
- [4] 肖秋瑶,杨骥,宋政湘.考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J].高电压技术,2023,49

(4):1392-1401.

- [5] 任德军,刘自发,高峰,等.考虑碳交易机制与需求响应的园区综合能源系统电热协同运行优化研究[J].热力发电,2022,51(3):119-130.
- [6] 杨玉龙,王明伟,卢晓东.考虑阶梯式碳交易与电热需求响应的综合能源系统经济调度[J].电气应用,2024,43(5):74-85.
- [7] 袁桂丽,杨彪,丁宁,等.考虑综合需求响应和阶梯型碳交易的综合能源系统协调优化调度[J].现代电力,网络首发.(2024-04-29).<https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0210>.
- [8] 张岩,李瑞芳,赵健,等.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[J].可再生能源,2024,42(3):388-397.
- [9] 叶宇静,邢海军,米阳,等.考虑低碳需求响应及主从博弈的综合能源系统低碳优化调度[J].电力系统自动化,2024,48(9):34-43.
- [10] 颜宁,马广超,李相俊,等.基于季节性碳交易机制的园区综合能源系统低碳经济调度[J].中国电机工程学报,2024,44(3):918-932.
- [11] 梁刚,黄家凯,马世乾,等.基于多主体博弈的园区综合能源系统优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(5):95-103.
- [12] 李鹏,徐伟成,丁茂生,等.基于合作博弈与矩阵半张量积的多园区综合能源系统协同优化运行方法[J].中国电机工程学报,2025,45(7):2605-2616.
- [13] 赵楠,王俊,黄桦,等.计及氢电混合动力车响应的多区域综合能源系统协调优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(12):257-264.
- [14] 吴哲城,施峥靖,史雷敏,等.考虑碳排放的综合能源微网调度[J].电测与仪表,网络首发.(2024-04-30).<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20240429.1932.007.html>.
- [15] 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.
- [16] 汪雅静,张帅,宋弘亮,等.计及需求侧灵活资源的综合能源系统合作博弈优化运行[J].能源工程,2022,42(6):86-94.
- [17] 赵慧荣,李草,窦真兰,等.基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统低碳经济优化运行研究[J].电源学报,网络首发.(2023-06-14).<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20230612.1818.006.html>.
- [18] 赵军,张敏,常潇,等.考虑设备变工况特性的多主体综合能源系统低碳经济调度策略[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(12):110-118.

(编辑 张 峰)

Low-carbon Economic Scheduling for Integrated Energy System Considering Carbon Penalty and Hybrid Game Theory

Wang Xi¹, He Wang²

(1.College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025;

2.Guizhou Bijie Power Supply Bureau of China Southern Power Grid, Bijie Guizhou 551700)

[Abstract] Integrated energy system (IES) has become a key direction for accelerating carbon emission reduction and promoting sustainable development. To address carbon emission reduction and interest coordination among multiple agents in multi-regional IES, a low-carbon optimal scheduling strategy considering carbon penalty and hybrid game theory is proposed in this paper for IES. The proposed hybrid game model employs a master-slave game to coordinate the interest conflict between upper-level regional IES operators and lower-level load aggregators and energy storage service providers and to achieve low-carbon scheduling. Also, a carbon penalty mechanism is included to guide the regional IES operators to efficiently balance the output of various energy supply equipment. In addition, to maximize the carbon reduction potential of multi-regional IES, the Nash bargaining model is used to incentivize the regional IES operators to perform energy interactions and cooperate to reduce carbon emissions. Considering the privacy and security concerns of each agent, a distributed algorithm which combines quadratic programming-genetic algorithm-alternating direction method of multipliers (ADMM) is proposed to solve the multi-region and multi-layer hybrid game problem in a decentralized way, encourage low-carbon transactions among agents, and achieve more economical energy supply and more rational energy consumption. It is validated by the case study results that the proposed method can effectively reduce carbon emissions and achieve a win-win situation among all agents.

[Keywords] integrated energy system; low-carbon scheduling; hybrid game; carbon penalty; multi-agent; energy interaction

· 能源链接 ·

我国氢能产业发展应对挑战的战略锚点

技术创新是氢能产业发展的核心驱动力,国际合作是拓展发展空间的必由之路。氢能产业正站在“技术突破”与“全球布局”的历史交汇点,但总体看,全球氢能产业仍未成熟,我国需克服氢能技术成果转化、创新资源协同、政策市场统筹等障碍,支撑氢能技术创新和产业高质量发展。

一是强化“场景导向”的技术攻关。针对工业、交通、能源三大主战场,开展定向研发,持续降低应用成本。通过场景需求倒逼技术创新,形成“研发—示范—迭代”的良性循环。二是构建“双循环”的合作格局。“引进来”方面,创新国际氢能人才机制,引进海外顶尖团队;“走出去”方面,依托“一带一路”倡议,建立氢能合作伙伴网络,输出中国技术标准与项目管理经验,布局海外研发中心,实现技术本地化创新。三是完善政策赋能和市场协同机制。将氢能纳入“新型能源体系”规划,创新绿氢优先消纳机制,推动绿色价值实现;优化市场准入机制,推动各地完善氢能项目管理政策。通过政策精准赋能,降低市场主体风险,加速产业规模化进程。

中国氢能产业通过技术创新突破与国际合作拓展,已进入关键发展阶段。未来需以场景驱动技术、以政策赋能市场,推动氢能成为能源转型的核心支柱,为全球能源转型贡献中国智慧与解决方案。

(供稿 舟 丹)