

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210888

基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度

王瑞¹, 程杉¹, 汪业乔¹, 代江², 左先旺¹

(1. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 为解决环境污染以及区域综合能源系统中多市场主体利益冲突的问题, 提出一种考虑奖惩阶梯型碳交易机制和双重激励综合需求响应策略的区域综合能源系统多主体博弈协同优化方法。首先, 为充分考虑系统的低碳性, 在博弈模型中引入奖惩阶梯型碳交易机制限制各主体碳排放量, 并在用户侧提出了基于价格和碳补偿双重激励的综合需求响应策略。其次, 考虑源-荷-储三方主动性和决策能力, 以能源管理商为领导者, 供能运营商、储能运营商和用户为跟随者, 建立了基于碳交易和博弈协同优化的多主体低碳交互机制, 并构建了各主体的交易决策模型。最后, 采用结合 Gurobi 工具箱的自适应差分进化算法对所提模型进行求解。仿真结果验证了所提模型和方法的有效性, 即各主体在低碳框架下可以合理调整自身策略, 并兼顾系统经济、环境效益。

关键词: 区域综合能源系统; 低碳交互; 多主体博弈; 碳交易; 综合需求响应

Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders

WANG Rui¹, CHENG Shan¹, WANG Yeqiao¹, DAI Jiang², ZUO Xianwang¹

(1. Engineering Center for Intelligent Energy Technology (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;

2. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: To solve the problems of environmental pollution and the conflict of interests of multi-market players in a regional integrated energy system, a multi-agent game collaborative optimization method for a regional integrated energy system considering a reward and punishment ladder carbon trading mechanism and dual incentive integrated demand response is proposed. First, to fully consider the low-carbon nature of the system, a reward and punishment ladder carbon trading mechanism is introduced to limit the carbon emissions of each stakeholder. Then an integrated demand response strategy based on price and carbon compensation is proposed on the user side. Secondly, considering the initiative and decision-making ability of the source, load and storage parties, a multi-agent low-carbon interaction mechanism based on carbon trading and game collaborative optimization is proposed, and the decision-making model of each stakeholder is constructed. Finally, an adaptive differential evolution algorithm combined with the Gurobi toolbox is used to solve the proposed model. The simulation results verify the effectiveness of the proposed model. In a low-carbon framework, each stakeholder can reasonably adjust its own strategies and take into account the economic and environmental benefits of the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: regional integrated energy system; low-carbon interaction; multi-agent game; carbon trading; integrated demand response

0 引言

随着能源需求上升及环境污染日益严重, 安全高效、低碳清洁已成为能源发展的主流方向^[1-2]。在

此背景下, 统筹多能耦合、协同调度的区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)已成为高效利用能源的重要形式^[3-5]。

实现多能供应的安全性、经济性和灵活性的有效手段是优化 RIES 运行。为降低系统运行成本和提高能源利用率, 文献[6]提出了含可再生能源、储能设备和冷热电联供(Combined Cooling, Heating

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105); 三峡大学硕士学位论文培育基金(2021SSPY067)

and Power, CCHP)的 RIES 经济调度模型及其求解方法。文献[7]充分考虑了源、荷不确定性,提出了多类型储能系统、电转气设备和 CCHP 机组的 RIES 多时间尺度优化调度模型。RIES 用能需求多样化,应用综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)既能实现多能互补又能降低系统的供能压力。为了提高 RIES 用能效率、降低用能成本和增加调节灵活性,文献[8]提出了 IDR 资源的物理、数学模型和协同运行策略。而文献[9]既建立了 IDR 的响应模型,提出了响应补偿机制,又充分考虑了供需双侧的电、热能互动互补关系。上述研究均是 RIES 运行优化行之有效的方法,但未考虑 RIES 内多个不同主体之间的利益冲突,如何保障各方收益是目前 RIES 调度中亟需解决的难题。

RIES 的运行与优化依赖多个利益主体的协同配合,而需要解决的基础问题是如何描述该大规模复杂系统和不同主体之间的交互行为^[10-11]。博弈论是解决不同市场主体利益冲突的重要方法之一^[12]。文献[13]基于 Stackelberg 博弈,建立了微网运营商和含有热电耦合负荷用户的一主多从博弈模型。文献[14]构建了多主多从的 Stackelberg 博弈模型,研究了 IES 中多个分布式能源站和多个能源用户之间的交互问题。文献[15]考虑并建立了可再生能源所有者、微网能源服务商和用户多利益主体的数学模型,提出了考虑多主体交互机制的微网优化调度方法。文献[16]建立了包含系统管理商、产能基地和用户的 RIES,提出了基于多种需求响应和混合博弈协同作用的多主体优化调度策略。文献[13-16]虽然考虑了多个利益主体的博弈互动,但未能同时考虑与供能侧和需求侧利益主体的博弈互动,不能充分发挥能源市场对资源优化配置的作用。而文献[17]考虑了运营商与供能侧之间的交互,并建立了基于主从博弈的社区 IES 分布式协同优化运行模型,但正如作者所指出,该模型未考虑储能装置对市场交易的影响,能源销售商直接与电网交互会导致其收益降低。因此,有必要针对 RIES 中多利益主体的划分、建模以及多主体间能量耦合协同优化等方面进行更深入的研究。

发挥市场作用的碳交易是实现碳达峰目标与碳中和愿景的有效措施之一。文献[18]研究了基于碳交易机制的 IES 运行的低碳特性。文献[19]提出了基于阶梯型碳交易机制的 IES 低碳经济优化调度模型及其求解方法。《碳排放权交易管理办法》规定了各市场主体对碳排放量控制的相关责任和义务,而目前相关研究在 RIES 博弈互动过程中只考虑各主

体自身利益而忽略了污染排放对系统的影响,存在严重的环境威胁,故在多利益主体博弈互动中也需要考虑碳排放等环境因素的影响,即需能兼顾不同主体自身利益和整个 RIES 环境效益的协同优化模型及方法,以此实现 RIES 经济性与环保性的双赢。

针对上述问题,本文提出了一种考虑双重激励的 IDR 策略和奖惩阶梯型碳交易机制的 RIES 多主体博弈协同优化方法。首先,考虑各利益主体的碳排放量,在博弈互动中引入了奖惩阶梯型碳交易机制,并提出了价格和碳补偿双重激励的 IDR 策略,分析了各主体在碳排放制约环境下的交互行为。其次,基于 Stackelberg 博弈理论,建立了以能源管理商(Energy Management Operator, EMO)为领导者,供电运营商(Energy Generation Operator, EGO)、储能运营商(Energy Storage Operator, ESO)和用户为跟随者的低碳交互机制,并根据各主体的角色和利益,构建了含多能互补的多主体主从博弈决策模型。最后,采用自适应差分进化算法结合 Gurobi 工具箱对所提模型进行求解。算例仿真证明了所提方法能够实现 RIES 低碳、经济运行。

1 RIES 结构和碳交易成本计算机制

1.1 RIES 内的能量流

含冷、热、电、气四种能源形式的 RIES 结构图如图 1 所示。

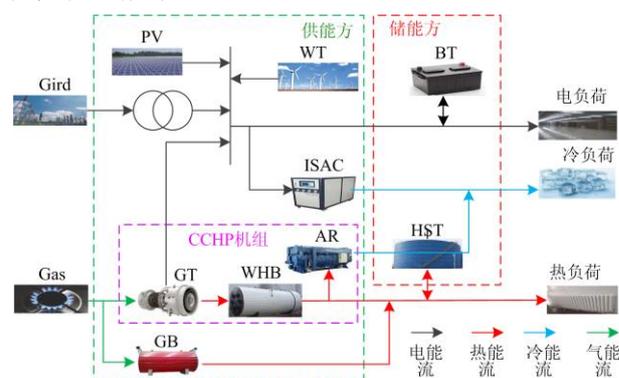


图 1 RIES 结构和能量流示意图

Fig. 1 Illustration of RIES structure and its energy flows

其中,供能设备包括风机(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)和燃气轮机(Gas Turbine, GT);能量转换设备包括冰蓄冷空调(Ice-storage Air-conditioners, ISAC)、吸收式制冷机(Absorption-refrigerator, AR)和余热锅炉(Waste Heat Boiler, WHB);储能装置包括蓄电池(Battery, BT)、蓄热槽(Heat Storage Tank, HST)。

1.2 奖惩阶梯型碳交易成本计算模型

采用基准线法确定各利益主体的无偿碳排放配额, 假设 RIES 从外部电网购得的电能均为火力发电, 则本文的碳排放权初始分配主要包括外购电力、GB 和 CCHP, 其中外购电力产生的碳交易成本归 EMO, 其余部分归 EGO。将其发电量折算成等效的发热量可进行碳配额分配^[20-21]。

$$D_{\text{cEMO}} = \delta_e P_{\text{buy}}^t \quad (1)$$

$$D_{\text{GB}} = \delta_h H_{\text{GB}}^t \quad (2)$$

$$D_{\text{cchp}} = \delta_h (H_{\text{WHB}}^t + Q_{\text{AR}}^t + \varphi P_{\text{GT}}^t) \quad (3)$$

$$D_{\text{cEGO}} = E_{\text{GB}} + E_{\text{cchp}} \quad (4)$$

式中: D_{cEMO} 、 D_{GB} 和 D_{cchp} 分别为外部电网购电、GB 和 CCHP 的无偿碳排放配额; δ_e 和 δ_h 分别为单位电量和单位热量碳排放分配额; P_{buy}^t 为 EMO 从外部电网购买的电量; H_{WHB}^t 、 Q_{AR}^t 和 P_{GT}^t 分别为 CCHP 的供热、供冷和供电量; H_{GB}^t 为 GB 的产热量; φ 为发电量折算成供热量的折算系数。

为了激发利益主体节能减排的积极性, 构建如式(5)所示的奖惩阶梯型碳交易成本 F_c , 当 EMO 和 EGO 的实际碳排放总量 D_p 低于免费的碳排放配额 D_c 时, 给予一定的奖励^[20]; 反之, 则需要购买不足的碳排放权。

$$F_{c_i} = \begin{cases} -c(1+2\mu)(D_{c_i} - h - D_{p_i}) & D_{p_i} \leq D_{c_i} - h \\ -c(1+2\mu)h - c(1+\mu)(D_{c_i} - D_{p_i}) & D_{c_i} - h \leq D_{p_i} \leq D_{c_i} \\ c(D_{p_i} - D_{c_i}) & D_{c_i} < D_{p_i} \leq D_{c_i} + h \\ ch + c(1+\lambda)(D_{p_i} - D_{c_i} - h) & D_{c_i} + h < D_{p_i} \leq D_{c_i} + 2h \\ c(2+\lambda)h + c(1+2\lambda)(D_{p_i} - D_{c_i} - 2h) & D_{c_i} + 2h < D_{p_i} \leq D_{c_i} + 3h \\ c(3+3\lambda)h + c(1+3\lambda)(D_{p_i} - D_{c_i} - 3h) & D_{p_i} > D_{c_i} + 3h \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i \in \{\text{EMO}, \text{EGO}\}$; μ 和 λ 分别为奖励系数和惩罚系数; c 为碳交易价格; h 为碳排放量区间长度。

1.3 考虑价格和碳补偿双重激励的 IDR 策略

影响和调节负荷需求最常用的是价格激励手段, 用户根据 EMO 发布的售能价格, 以最大化用户综合收益为目标, 调整自身冷、热、电负荷。但由于受到用户满意度的限制, 其调节能力有限。为了激发用户对负荷的绿色调节能力, 将用户响应价格激励调节的冷、热、电功率变化量转换成碳补偿奖励给用户, 并且考虑用户满意度, 自主调节用户

侧可调节负荷范围。由于用户调整用能策略既可以促进新能源的消纳, 缓解 EGO 设备的供能压力, 又能使 EMO 减少因购能不足而从外部电网的购电量, 间接增加 EMO 的收益, 因此本文的碳补偿通过 EGO 和 EMO 共同承担, 转付给用户。考虑价格和碳补偿双重激励的 IDR 策略如下:

1) 当负荷处于谷时段, EMO 为了引导用户增加用能量, 此时售能价格处于谷段, 用户根据自身满意度指标调整用能策略。在价格激励的基础上, 将用户响应价格激励增加的冷、热、电负荷变化量转变成碳补偿奖励给用户, 刺激用户调整最佳可调节负荷范围。

2) 当负荷处于平时段, 用户的负荷调整量较少, 只有较少的碳补偿或几乎没有碳补偿奖励, 用户的实际用能负荷与需求负荷接近。

3) 当负荷处于峰时段, EMO 为了引导用户主动降低用能量, 设置较高的售能价格, 用户根据自身满意度指标调整用能策略, 并将响应价格激励减少的冷、热、电负荷变化量转变成碳补偿奖励给用户, 刺激用户调整最佳可调节负荷范围。

2 RIES 多主体博弈低碳交互机制

RIES 多主体主从博弈互动框架如图 2 所示。EMO、EGO、ESO 和用户分别依据自身利益和环境效益制定交易策略, 优化内部运行状态, 满足用户多样化负荷需求。

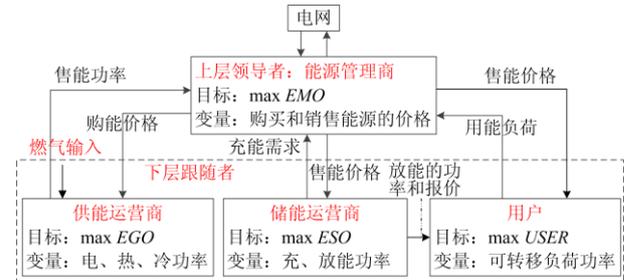


图 2 多利益主体主从博弈框架

Fig. 2 Multi-stakeholder' master-slave game framework

EMO 可以看作是一个具有双向能量流动的虚拟能量池或者能源代理商, 是 RIES 能源市场中的协调者和主导者, 承担着源-荷-储功率平衡的职责。EMO 同时考虑源-荷-储三方能动性 and 决策能力, 以最大化净利润为目标制定购、售能源价格。当 EMO 向 EGO 购买的电量不能满足用户需求时, 需向外部电网购电并承担外购电力产生的碳排放成本。EMO 的引入能提供更加灵活的价格策略, 对引导分布式供能参与能源市场竞争、鼓励用户合理用能具

有积极作用。

EGO 以 CCHP 机组为核心, 考虑 CCHP 和 GB 运行过程中产生的碳排放量, 以售能收益最大、燃料成本和碳交易成本最小为目标函数优化各设备出力。ESO 根据价格信息在 EMO 和用户之间通过低充高放优化自身充、放能功率, 从而实现套利。

在用户侧, 引入一定比例的可调节负荷, 综合考虑购能成本、用能舒适性和碳补偿, 以最大化用户侧综合效益调整用能需求, 其调整后的实际用能需求也会反过来影响各个利益主体自身收益。

3 各利益主体的决策模型

3.1 能源管理商

EMO 基于分时电价制定购、售能源价格, 考虑各设备的出力特性与用户用能特征, 引导各设备出力和通过 IDR 促使用户调整用能需求, 其收益源于其他利益主体间的能量互济, 目标函数为

$$\max E_{\text{EMO}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{sell1}}^t + C_{\text{sell2}}^t - C_{\text{buy}}^t - C_{\text{grid}}^t - C_{\text{h/c}}^t - F_{\text{cEMO}}^t - \varepsilon_1 C_{\text{co}_2}^t) \quad (6)$$

式中: 上标 t 表示 t 时段; C_{sell1}^t 和 C_{sell2}^t 分别为出售给用户和 ESO 的售能收益; C_{buy}^t 和 C_{grid}^t 分别为 EMO 与 EGO 和电网的交互成本; $C_{\text{h/c}}^t$ 为供热/冷中断的惩罚成本; $C_{\text{co}_2}^t$ 和 ε_1 分别为用户的碳补偿函数和 EMO 承担用户碳补偿的权重系数; F_{cEMO}^t 为 EMO 外购电力的碳交易成本; T 为总时间段, 取 24 h。以上各式表达如下。

$$C_{\text{sell1}}^t = (L_e^t p_{e,s}^t + L_h^t p_{h,s}^t + L_c^t p_{c,s}^t) \Delta t \quad (7)$$

$$C_{\text{sell2}}^t = (p_{e,s}^t P_{\text{BT,chr}}^t + p_{h,s}^t P_{\text{HST,chr}}^t) \Delta t \quad (8)$$

$$C_{\text{buy}}^t = (P_{e,s}^t p_{e,b}^t + H_{hs}^t p_{h,b}^t + Q_{cs}^t p_{c,b}^t) \Delta t \quad (9)$$

$$C_{\text{grid}}^t = [\max(L_e^t - P_{e,s}^t, 0) p_{e,s}^t + \min(L_e^t - P_{e,s}^t, 0) p_{g,b}^t] \Delta t \quad (10)$$

$$C_{\text{h/c}}^t = (\max(L_h^t - H_{hs}^t, 0) \alpha_h + \max(L_c^t - Q_{cs}^t, 0) \alpha_c) \Delta t \quad (11)$$

$$C_{\text{co}_2}^t = c(\delta_e L_{e,k}^t + \delta_h (L_{h,k}^t + L_{c,k}^t)) \Delta t \quad (12)$$

式中: L_e^t 、 L_h^t 和 L_c^t 分别为用能侧的实际电、热和冷负荷; $P_{e,s}^t$ 、 H_{hs}^t 和 Q_{cs}^t 分别为 EMO 从 EGO 的购电、热、冷功率; $P_{\text{BT,chr}}^t$ 和 $P_{\text{HST,chr}}^t$ 分别为 EMO 向 ESO 的售电和售热功率; $p_{e,s}^t$ 、 $p_{h,s}^t$ 和 $p_{c,s}^t$ 分别为 EMO 售出的电、热和冷能的价格; $p_{e,b}^t$ 、 $p_{h,b}^t$ 和 $p_{c,b}^t$ 分别为 EMO 从 EGO 的购电、热、冷能的价格; $p_{g,s}^t$ 和 $p_{g,b}^t$ 分别为 EMO 向电网的售电和购电价格; α_h 和 α_c 分

别为供热和供冷的中断惩罚系数; $L_{e,k}^t$ 、 $L_{h,k}^t$ 和 $L_{c,k}^t$ 分别为用户的可调节电、热、冷负荷。

为了保证各主体利益, EMO 的购、售能价格满足以下约束^[17]。

$$p_{g,b}^t < p_{e,s}^t < p_{g,s}^t, \quad p_{g,b}^t < p_{c,b}^t < p_{g,s}^t \quad (13)$$

$$p_{\text{h/c,min}}^t < p_{\text{h/c,s}}^t < p_{\text{h/c,max}}^t, \quad p_{\text{h/c,min}}^t < p_{\text{h/c,b}}^t < p_{\text{h/c,max}}^t \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{e,s}^t \leq T \bar{p}_{e,\text{max}}^t, \quad \sum_{t=1}^T p_{h,s}^t \leq T \bar{p}_{h,\text{max}}^t, \quad \sum_{t=1}^T p_{c,s}^t \leq T \bar{p}_{c,\text{max}}^t \quad (15)$$

式中: $p_{\text{h,min}}^t / p_{\text{c,min}}^t$ 和 $p_{\text{h,max}}^t / p_{\text{c,max}}^t$ 分别为热、冷能的最底/最高价格; $\bar{p}_{e,\text{max}}^t / \bar{p}_{h,\text{max}}^t / \bar{p}_{c,\text{max}}^t$ 为平均售电/热/冷价格。

此外, EMO 还需满足与外部电网联络线的交互功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{g,s}^t \leq I_{g,s}^t P_{g,s}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{g,b}^t \leq I_{g,b}^t P_{g,b}^{\text{max}} \end{cases} \quad (16)$$

$$I_{g,b}^t + I_{g,s}^t \leq 1 \quad (17)$$

式中: $P_{g,s}^t / P_{g,b}^t$ 为 EMO 向外部电网售/购电功率; $I_{g,s}^t$ 和 $I_{g,b}^t$ 为 0-1 变量, 表示 EMO 向外部电网购售电标志位; $P_{g,s}^{\text{max}} / P_{g,b}^{\text{max}}$ 为售/购电的功率上限。

3.2 供能运营商

EGO 根据 EMO 制定的能源价格, 通过最大化自身利润优化各可控设备出力, 其目标函数为

$$\max E_{\text{EGO}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{sell}}^t - C_{\text{cchp}}^t - F_{\text{cEGO}}^t - \varepsilon_2 C_{\text{co}_2}^t - C_{\text{QT}}^t) \quad (18)$$

式中: C_{sell}^t 为 EGO 的售能收益; ε_2 表示 EGO 承担用户碳补偿的权重系数; F_{cEGO}^t 表示 EGO 的碳交易成本; C_{cchp}^t 表示 CCHP 和 GB 的燃料成本; C_{QT}^t 表示 GT 的启停成本。CCHP 和 GB 的输出功率与 C_{cchp}^t 之间的关系为^[22-23]

$$C_{\text{cchp}}^t = a_e (P_{\text{GT}}^t)^2 + b_e P_{\text{GT}}^t + c_e + a_h (H_{\text{GB}}^t)^2 + b_h H_{\text{GB}}^t + c_h \quad (19)$$

式中: a_e 、 b_e 、 c_e 和 a_h 、 b_h 、 c_h 分别表示 CCHP 和 GB 的成本系数。GT 的启停成本如式(20)所示。

$$C_{\text{QT}}^t = \sum_{i=1}^T (c_Q I_{\text{GT,Q}}^t + c_T I_{\text{GT,T}}^t) \quad (20)$$

式中: c_Q 、 c_T 为 GT 的单个启、停成本系数; $I_{\text{GT,Q}}^t$ 、 $I_{\text{GT,T}}^t$ 为 GT 的启、停状态, 为 0-1 整数变量。

EGO 在 t 时段输出的电、热、冷功率满足

$$P_{es}^t = P_{WT}^t + P_{PV}^t + P_{GT}^t - P_{ISAC}^t \quad (21)$$

$$H_{hs}^t = H_{GB}^t + H_{WHB}^t \quad (22)$$

$$Q_{cs}^t = Q_a^t + Q_d^t + Q_{AR}^t \quad (23)$$

式中: P_{WT}^t 、 P_{PV}^t 分别为 WT、PV 的输出功率; P_{GT}^t 、 H_{WHB}^t 和 Q_{AR}^t 分别为 CCHP 系统输出的电、热、冷功率; P_{ISAC}^t 为 ISAC 的耗电功率; H_{GB}^t 为 GB 输出热功率; Q_a^t 和 Q_d^t 分别为 ISAC 的输出冷功率和融冰功率。

3.3 储能运营商

ESO 在 EMO 和用户之间通过“低充高放”实现套利, 设备包含 BT 和 HST。其目标函数为

$$\max E_{ESO} = \sum_{t=1}^T (C_{ESO,dis}^t - C_{ESO,chr}^t - C_{ESO,m}^t) \quad (24)$$

$$C_{ESO,dis}^t = (p_{e,ESO}^t P_{BT,dis}^t + p_{h,ESO}^t P_{HST,dis}^t) \Delta t \quad (25)$$

$$C_{ESO,chr}^t = (p_{e,s}^t P_{BT,chr}^t + p_{h,s}^t P_{HST,chr}^t) \Delta t \quad (26)$$

式中: $C_{ESO,chr}^t$ 、 $C_{ESO,dis}^t$ 分别为储能的充能成本、放能收益; $C_{ESO,m}^t$ 为 ESO 的运维成本, 其中 $C_{ESO,m}^t$ 设为 $C_{ESO,chr}^t$ 的 10%; $p_{e,ESO}^t$ 和 $p_{h,ESO}^t$ 分别为 ESO 的售电和售热价格。

考虑到充、放能的能量损失和效率, 储能设备的储能状态约束满足

$$E_x^t = E_x^{t-1} (1 - \gamma_x) + (P_{x,chr}^t \eta_{x,chr} - \frac{P_{x,dis}^t}{\eta_{x,dis}}) \Delta t \quad (27)$$

$$E_x^{\min} \leq E_x^t \leq E_x^{\max} \quad (28)$$

$$E_x^0 = E_x^{24} \quad (29)$$

式中: $x \in \{BT, HST\}$; $\eta_{x,chr}$ 、 $\eta_{x,dis}$ 分别为储电、热装置的充、放能效率; E_x^{\min} 和 E_x^{\max} 分别为 E_x^t 的最小和最大值; γ_x 为储能设备的能量自损率。

3.4 用户

考虑用户满意度指标 U_{user}^t 、购能支付函数 C_{user}^t 和碳补偿函数 $C_{co_2}^t$ 的用户负荷调整优化目标函数为

$$\max E_{user} = \sum_{t=1}^T (U_{user}^t - C_{user}^t + C_{co_2}^t) \quad (30)$$

U_{user}^t 采用常用的二次函数来表征^[14]。 U_{user}^t 和 C_{user}^t 的表达式分别为

$$U_{user}^t = \sum_i (v_i L_i^t - \frac{u_i}{2} (L_i^t)^2) \Delta t \quad (31)$$

$$C_{user}^t = \sum_i L_i^t p_{i,s}^t \Delta t \quad (32)$$

式中: $i \in \{e, h, c\}$; v_e 、 u_e 、 $v_{h/c}$ 、 $u_{h/c}$ 分别为用户消费电、热/冷能的偏好系数^[14]。

用户的用能负荷是由固定负荷 $L_{i,g}^t$ 和可调节负荷 $L_{i,k}^t$ 组成, 前者对可靠性要求较高, 后者可由用户根据售能价格自由调整, 其改变程度和用户用能满意度相关并满足如下约束。

$$L_i^t = L_{i,g}^t + L_{i,k}^t \quad (33)$$

$$0 \leq L_{i,k}^t \leq L_{i,k,max}^t \quad (34)$$

$$\sum_t L_{i,k}^t \Delta t = W_{i,k}^t \quad (35)$$

式中: $L_{i,k,max}^t$ 表示 t 时段 $L_{i,k}^t$ 的最大值; $W_{i,k}^t$ 表示 t 时段电、热、冷负荷的可转移负荷总量。

4 多主体博弈互动分析

4.1 多主体 Stackelberg 博弈互动均衡

多主体 Stackelberg 博弈是描述 EMO、EGO、ESO 和用户追求各自目标最优的决策过程。EGO、ESO 和用户作为跟随者, 根据领导者 EMO 的价格策略来优化自身策略, 最终得到 Stackelberg 均衡最优解, 该 Stackelberg 博弈模型可表示为

$$\Phi = \{EMO; \{EGO, ESO, USER\}; p_{EMO}; \{W_{EGO}, D_{ESO}, L_{user}\}; E_{EMO}; \{E_{EGO}, E_{ESO}, E_{user}\}\} \quad (36)$$

该模型包含了参与者、策略和效用。其中参与者包括领导者 EMO 和跟随者 EGO、ESO、用户; 策略包括 EMO 的购、售能源价格 p_{EMO} , EGO 中供能设备输出功率 W_{EGO} , ESO 中 BT 和 HST 的充、放能功率 D_{ESO} 和用户的可调节电、热、冷负荷 L_{user} ; 各参与者的效用则为前述各利益主体的目标函数。

在博弈过程中, 当任何利益主体都不能单方面改变均衡解的策略来获取收益时, 说明该博弈达到 Stackelberg 均衡, 即满足式(37)的条件, 则 $(p_{EMO}^*, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*)$ 为 Stackelberg 博弈的均衡。

$$\begin{aligned} E_{EMO}(p_{EMO}^*, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*) &\geq E_{EMO}(p_{EMO}, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*) \\ E_{EGO}(p_{EMO}^*, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*) &\geq E_{EGO}(p_{EMO}, W_{EGO}, D_{ESO}^*, L_{user}^*) \\ E_{ESO}(p_{EMO}^*, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*) &\geq E_{ESO}(p_{EMO}, W_{EGO}, D_{ESO}, L_{user}^*) \\ E_{user}(p_{EMO}^*, W_{EGO}^*, D_{ESO}^*, L_{user}^*) &\geq E_{user}(p_{EMO}, W_{EGO}, D_{ESO}, L_{user}^*) \end{aligned} \quad (37)$$

4.2 博弈求解方法

采用自适应差分进化算法(ADE)结合 Gurobi 求解器对所建立的多主体主从博弈模型进行求解。由于 EMO 的决策是一类非线性规划问题, 求解过程中采用自适应变异算子 F , 将 F 设置为随迭代次数变化的值, 即迭代初期保持较大的值以保证种群多样性, 后期逐渐减小以保证优良的种群信息和较好的收敛性。其博弈求解步骤和流程图如图 3 所示。

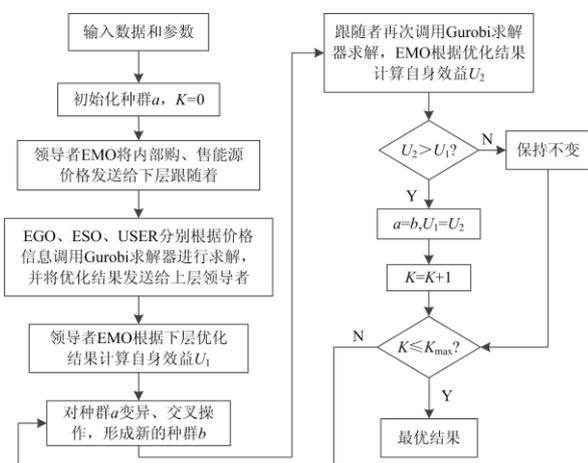


图3 主从博弈求解流程图

Fig. 3 Solving flow chart of master-slave game

上层 ADE 算法包括以下步骤:

步骤 1) 输入初始数据并设置参数。

步骤 2) 初始化种群 a , 令迭代次数 $K=0$ 。

步骤 3) EMO 将优化后的购、售能源价格下发给下层跟随者, EGO、ESO 和用户分别调用下层算法计算自身收益。

步骤 4) EMO 根据式(6)计算自身效益 U_1 。

步骤 5) 对种群 a 进行交叉、变异操作, 得到新的种群 b 。

步骤 6) 再次调用下层算法对跟随者目标函数进行寻优求解, EMO 根据式(6)计算自身效益 U_2 。

步骤 7) 选择操作, 若 $U_2 > U_1$, 则 $a=b$, $U_1=U_2$, 若 $U_2 < U_1$, 则保持不变。

步骤 8) 判断操作, 若达到迭代要求次数, 则输出结果, 否则跳转至步骤 5)。

下层算法为: EGO、ESO 和用户调用 Gurobi 求解工具, 分别根据式(18)、式(24)和式(30)计算 EGO 的供能设备最优出力、ESO 的储能装置最优充、放能功率和用户的冷、热、电可调节负荷, 将优化结果发送给上层领导者。

5 算例分析

以某冷热电联供型 RIES 为研究对象, 该区域用户需求负荷和新能源预测数据如图 4 所示。设用户可调节电负荷占需求电负荷总量的 20%, 可调节热、冷负荷占需求热、冷负荷总量的 10%。用户对电、热/冷能的偏好系数 v_e 、 u_e 、 $v_{h/c}$ 、 $u_{h/c}$ 分别为 1.6, 0.001 2, 1.4, 0.001。碳交易基本数据见文献[20], EGO 和 ESO 的机组参数见文献[24]。

5.1 Stackelberg 均衡分析

博弈均衡后的 EMO 定价策略如图 5 所示。图

5(a)中, EMO 为了优先消纳系统内新能源, 其电价策略始终包含在外部电网定价之间, 为供能端和用能端提供更优价格。此外, EMO 的售电价格波动趋势和外部电网分时电价一致, 购电价格则与用户实际用电负荷趋势一致, 目的是为了激励用户积极购电和 EGO 发电。同样, 热价和冷价的分析与电价类似, 购热价格和购冷价格的趋势与用户实际用热负荷和用冷负荷趋势大致相同, 如图 5(b)所示。

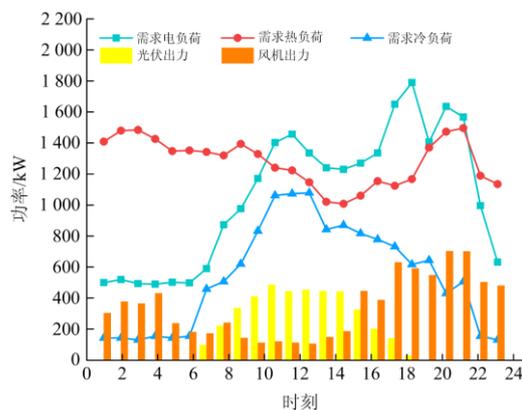
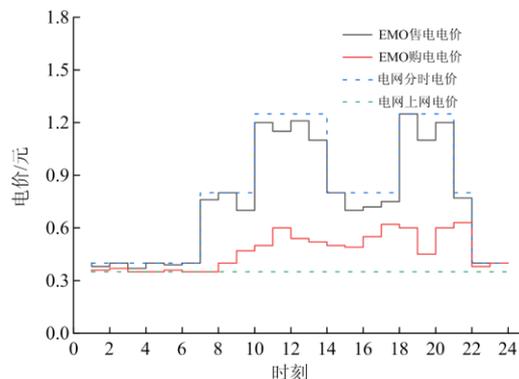
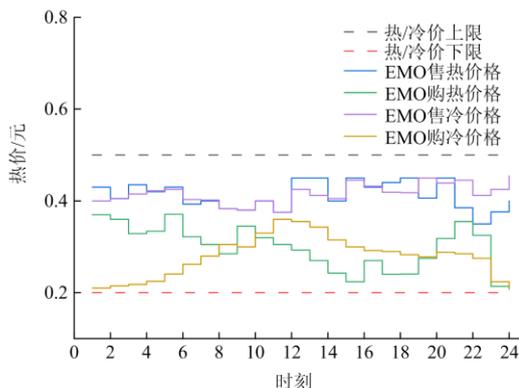


图4 负荷和新能源预测曲线

Fig. 4 Load and new energy forecast curve



(a) 电价优化结果



(b) 热价优化结果

图5 内部交易能源价格曲线

Fig. 5 Internally traded energy price curve

此外,为了验证本文所提算法的优越性,将本文算法与传统的差分进化算法(DE)和遗传算法(GA)进行对比分析,对比结果如表1所示。由表1可知,本文算法在迭代次数和收敛时间上都有较大的缩短,验证了本文算法的优势。

表1 算法迭代数据对比

算法	迭代次数	收敛时间/s
GA	211	381
DE	208	374
本文算法	116	153

5.2 不同策略结果及对比分析

为了说明考虑双重激励IDR策略和奖惩阶梯型碳交易机制的多主体博弈优化调度的经济、环境效益,设计以下四种策略与本文策略进行对比。

情景1 考虑EMO、EGO和用户,考虑价格型IDR。

情景2 考虑EMO、EGO、ESO和用户,不考虑价格型IDR。

情景3 考虑EMO、EGO、ESO和用户,考虑价格型IDR。

情景4 考虑EMO、EGO、ESO和用户,考虑常规型碳交易机制和双重激励的IDR策略。

5种场景结果如表2、表3所示,现分析如下:

情景1和情景3中,由表2可见,情景3中EMO、EGO和用户的收益相较于情景1分别上升了1.88%、5.26%和2.67%。情景3中加入储能装置,虽然会占据EMO少量的用户购能份额,但ESO通过低充高放既能缓解EGO设备出力压力又能减少EMO在负荷峰值时直接与外部电网的交互成本,还能使用户得到比EMO更为优惠的购能价格,减少用户的购能成本,由此体现加入ESO的优势。

情景2和情景3中,由表2、表3可见,情景3中EGO和用户的收益相较于情景2分别上升了8.5%和6.47%,系统碳排放量减少了6.96%。因为情景3考虑了价格型IDR,有效平缓了用户负荷的峰谷差,降低用户购能成本和EMO的外购电所产生的碳排放量。但由于情景2中用户实际负荷没有出现转移,EMO不用根据用户负荷调整自身能源价格,其售能价格与大电网价格接近,故情景2中EMO收益相比情景3会出现略微的上升。

情景3和情景4中,由表2、表3可见,情景4中EGO和用户的利润相较于情景3分别上升了10%和8.3%,系统碳排放总量减少了13.76%。由于EMO会承担外购电力产生的碳交易成本,所以EMO的利润相比情景3降了2.56%,但EGO获得

了碳交易收益之后主动增加了设备出力,减少了EMO向外部电网的购电成本并降低了碳排放量。对比说明,考虑EMO和EGO的碳交易成本能有效降低系统的碳排放总量,并且用户通过将参与价格激励调节的电、热、冷能变化量转化为碳补偿在碳交易市场中获取奖励,不仅增加用户综合效益,还能进一步促进削峰填谷,减少EGO的供能压力。

最后对比情景4和本文所提方法。从表2、表3可知,本文策略中EGO的利润和系统总碳排放量相比情景4分别提升了3.34%和下降了2.12%。这是因为EGO产生的碳排放量小于规定的碳排放分配额,故在碳交易市场中获得了奖励。并且由于EGO设备出力的增加,EMO间接减少了向外部电网的购电量和碳排放量。对比说明,本文采用的奖惩阶梯型碳交易成本模型能更好地提升系统的减排效果。

表2 不同模式下各主体的利润

情景	EMO/元	EGO/元	ESO/元	USER/元
1	15 530	5 639	—	20 577
2	16 012	5 471	670	19 843
3	15 822	5 936	654	21 127
4	15 417	6 531	679	22 882
本文	15 485	6 749	683	22 940

表3 不同模式下EMO和EGO碳排放量

情景	EMO	EGO	系统
	碳排放量/t	碳排放量/t	总碳排放量/t
1	4.635	7.151	11.770
2	5.281	6.760	12.071
3	4.233	6.997	11.230
4	2.196	7.488	9.684
本文	1.918	7.565	9.483

综上所述可知,考虑多利益主体互动交易既符合目前能源市场的多主体竞争特点,也能够保障多方利益。此外,在多主体博弈互动框架中考虑奖惩阶梯型碳交易机制和双重激励的IDR能同时兼顾系统经济性和环保性。

5.3 优化调度结果及供需平衡分析

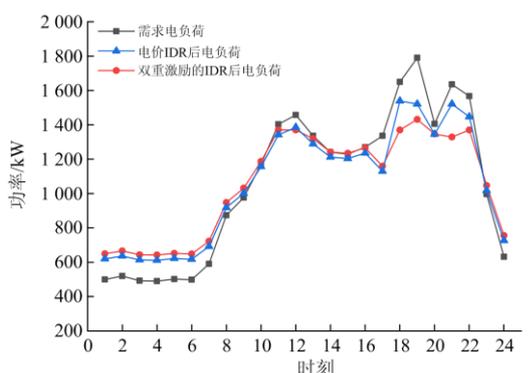
考虑不同IDR策略时优化后的负荷曲线对比结果如表4和图6所示。以电负荷为例,在只考虑价格型IDR时,23:00—07:00电负荷谷时段,用户愿意把峰时段值的可移电负荷转移到该时段,从而使用户的综合效益最大;08:00—10:00和14:00—17:00电负荷平时段,考虑用电满意度和购能成本,用户小比例地改变自身用电策略;11:00—13:00

和 18:00—23:00 电负荷峰时段, 用户会忽略此时的用电满意度, 主动转移大量可移电负荷至电价谷时段, 降低了用户的购能成本。

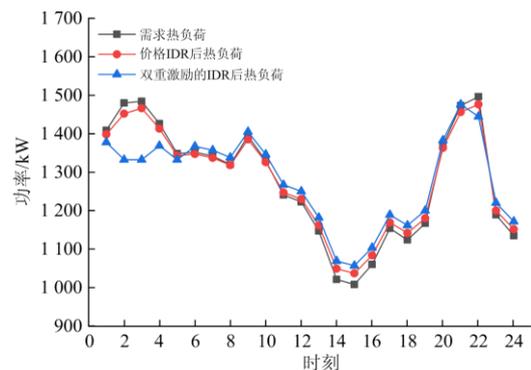
表 4 不同 IDR 策略对比结果

Table 4 Comparison results of different IDR strategies

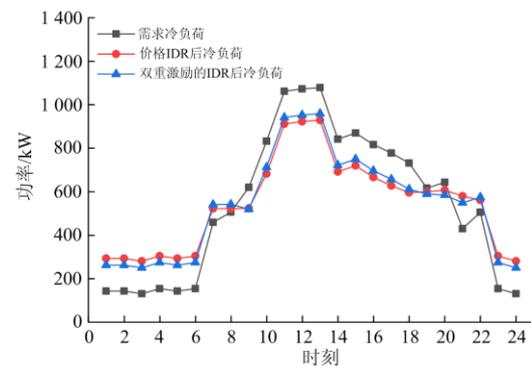
策略	用户收益/元	碳排放量/t	峰谷差/%
无 IDR	21 136	10.68	72.6
价格 IDR	22 068	9.87	59.8
双重激励 IDR	22 940	9.48	55.2



(a) IDR前后电负荷曲线



(b) IDR前后热负荷曲线



(c) IDR前后冷负荷曲线

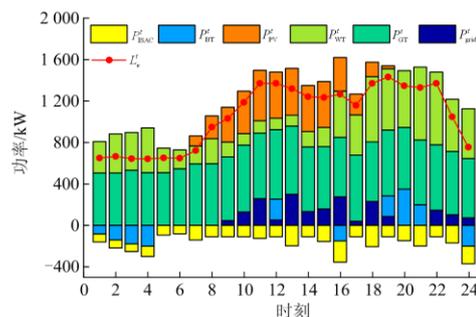
图 6 用户负荷曲线优化结果

Fig. 6 Optimization results of user load curve

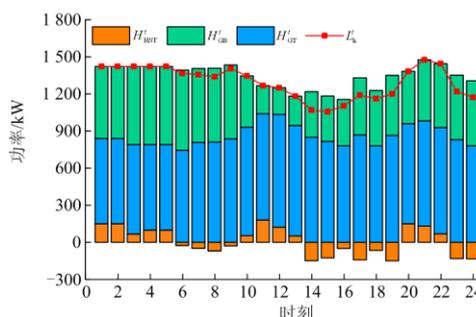
但上述分析只考虑了价格型 IDR, 此时用户受到用能满意度的影响, 可调节负荷力度受到限制,

当加入碳补偿时, 刺激用户将响应电价激励时增加或减少的负荷变化量转变成碳补偿奖励给用户, 提高了用户的综合收益, 使用户在考虑用能满意度的同时更大尺度地调整自身用能策略。由表 4 可知, 相比价格 IDR 策略, 采用双重激励的 IDR 策略时用户收益上升了 3.5%, 系统碳排放量和用户电负荷峰谷差分别下降了 3.95% 和 7.69%, 可见用户通过响应电价与碳补偿激励不仅提高自身收益, 也提升了系统环境效益。此外, 用户侧的削峰填谷既能平缓 EGO 的供能压力, 也能减少 EMO 向外部电网的购电量。结合表 2 和表 3, 可见双重激励策略能够有效提升多个利益主体的综合效益, 实现整个能源市场的双赢。冷、热负荷的分析与此类似, 此处不再赘述。

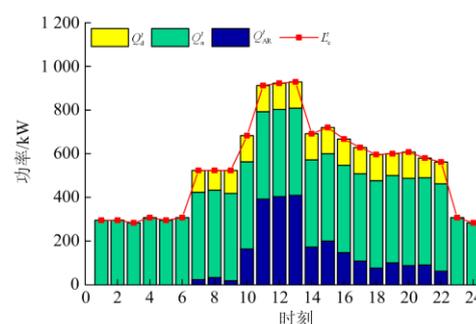
Stackelberg 博弈优化后的电、热、冷能调度结果如图 7 所示。考虑环保性, EMO 优先消纳可再生



(a) 电能优化调度结果



(b) 热能优化后调度结果



(c) 冷能优化调度结果

图 7 能源优化调度结果

Fig. 7 Energy dispatching optimal results

新能源 PV 和 WT。首先,对于 23:00—07:00 时段,电、冷负荷较低,电价处于谷段,电负荷主要由 WT 提供,不足部分由 GT 补给。EGO 为了获利,GT 出力较多,多余部分由 ESO 的蓄电池储存。EMO 通过价格激励 GB 出力,与 WHB 一起满足热能需求,若不能满足则由 ESO 的蓄热槽通过低充高放补充。冷负荷需求较低,主要由 ISAC 提供。

其次,在 08:00—10:00 和 14:00—17:00 时段,随着电、冷负荷的逐渐上升,EGO 的 PV、WT 出力被完全消纳,GT 出力增加。但 EGO 通过比较售能收入和运行成本,又制约 GT 和 GB 出力,故 EGO 不能满足负荷需求部分,由 EMO 通过外购电量补充。冷负荷由耗电量较少的 ISAC 通过空调模式和融冰制冷同时供应,不足部分由 AR 补充。热负荷依然由 WHB 和 GB 提供,不足部分再由蓄热槽补充。最后,在 11:00—13:00 和 18:00—23:00 时段,电负荷处于高峰期,用户不足的电能通过蓄电池放电以及 EMO 外购电补充。AR 制冷量增大,和 ISAC 共同满足冷负荷需求。

6 结论

本文基于奖惩阶梯型碳交易机制、双重激励 IDR 策略和多主体的利益诉求,构建了以 EMO 为领导者,EGO、ESO 和用户为跟随者的多利益主体低碳交互机制,实现了 RIES 多主体间博弈互动和多能耦合的低碳经济优化调度。主要得到以下结论:

1) 考虑源-荷-储三方主动性,建立了 RIES 多能互补的多主体主从博弈优化模型,通过合理的价格信息引导 EGO 的可控设备出力、ESO 的充放能功率以及用户的用能策略,实现了多主体多能源协同优化调度。

2) 在博弈模型中引入了奖惩阶梯型碳交易机制,分析了各主体在碳约束环境下的决策行为,并在用户侧考虑价格和碳补偿双重激励的 IDR 策略,充分发挥了各主体的绿色调节能力。仿真结果表明,所提方法提高了各主体的综合效益,兼顾了系统的经济和环境效益。

在后续的研究中需进一步考虑多主体博弈模型中源荷功率波动和需求响应资源在不同时间尺度上的调度特性对 RIES 经济运行的影响。

参考文献

[1] WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, MA Ziming, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.

[2] WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Modeling and optimal operation of community integrated energy systems: a case study from China[J]. Applied Energy, 2018, 230: 1242-1254.

[3] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.

CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.

[4] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20.

[5] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.

HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.

[6] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120, 141.

LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120, 141.

[7] 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).

[8] 何仲潇, 徐成司, 刘育权, 等. 考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 69-74.

HE Zhongxiao, XU Chengsi, LIU Yuquan, et al. Industrial park IDR model considering multi-energy cooperation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 69-74.

[9] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 57(11): 166-174.

CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power[J]. Power System Technology, 2020, 57(11): 166-174.

[10] 游阳, 荆朝霞. 考虑电动汽车的车-站-路-网多主体联合优化[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(1): 7-12.

- YOU Yang, JING Zhaoxia. Vehicle-station-road-network multi-agent joint optimization considering electric vehicles[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(1): 7-12.
- [11] 陈磊, 牛玉刚, 贾廷纲. 基于主从博弈的多微网能量调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 35-42.
- CHEN Lei, NIU Yugang, JIA Tinggang. Multi-microgrid energy scheduling strategy based on master-slave game[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 35-42.
- [12] 刘晓峰, 高丙团, 李扬, 等. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2704-2711.
- LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang, et al. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711.
- [13] LIU N, HE L, YU X, 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.
- [14] WEI F, JING Z X, PETER Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200(15): 315-329.
- [15] 宫建锋, 曹雨晨, 屈高强, 等. 基于全局优化和多主体博弈的微网日前电热联合经济调度[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 22-30.
- GONG Jianfeng, CAO Yuchen, QU Gaoqiang, et al. Research on day ahead power and heat combined dispatch of microgrid based on global optimization and multi-agent game[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 22-30.
- [16] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2506-2518.
- XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and game[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2506-2518.
- [17] 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 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): 5435-5445.
- [18] 白宏坤, 尹硕, 李虎军, 等. 计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 11-19.
- BAI Hongkun, YIN Shou, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 11-19.
- [19] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.
- [20] 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.
- 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): 6132-6142.
- [21] 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.
- ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [22] BAO Z, ZHOU Q, YANG Z, et al. A multi time-scale end multi energy-type coordinated scheduling solution: part I model and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2257-2266.
- [23] 马一鸣, 周夕然, 董鹤楠, 等. 考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 118-127, 138.
- MA Yiming, ZHOU Xiran, DONG Henan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 118-127, 138.
- [24] 程杉, 黄天力, 魏荣宗. 含冰蓄冷空调的冷热电联供型微网多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 30-40.
- CHENG Shan, HUANG Tianli, WEI Rongzong. Multi-time-scale optimal scheduling of CCHP microgrid with ice-storage air-conditioning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 30-40.

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-09-15

作者简介:

王瑞(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统能量优化管理; E-mail: 1094888438@qq.com

程杉(1981—), 男, 通信作者, 博士、教授、博导, 主要从事电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理与优化、智能计算及其应用等方向的研究工作。E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

(编辑 张爱琴)