

## 考虑综合需求响应及主从博弈的RIES优化调度

范宏, 王镇高宇

引用本文:

范宏, 王镇高宇. 考虑综合需求响应及主从博弈的RIES优化调度[J]. 上海电力大学学报, 2025, 41(6): 512–520,541.

FAN Hong, WANG Zhengao Yu. RIES Optimization Scheduling Considering Comprehensive Demand Response and Stackelberg Game[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2025, 41(6): 512–520,541.

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 考虑需求侧协同响应的社区综合能源系统低碳经济调度

Low-carbon Economic Dispatch of Community Integrated Energy System Based on Demand Side Cooperative Response

上海电力大学学报. 2020, 36(5): 421–430 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2020.05.002>

### 含多种可再生能源和冷储能装置的冷电联供系统经济优化调度模型研究

Economic Optimization Scheduling of Cogeneration System with Multiple Renewable Energy Sources and Coaling Energy Storage Devices

上海电力大学学报. 2019, 35(5): 486–492 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.014>

### 含冰蓄冷空调的CCHP微电网优化调度

Optimal Scheduling of CCHP Micro-grid with Ice Storage Air-conditioning

上海电力大学学报. 2021, 37(1): 37–43 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2021.01.008>

### 基于经济性和环保性的区域综合能源系统优化调度研究

Research on Regional Integrated Energy System Optimization Scheduling Based on Economic and Environmental Protection

上海电力大学学报. 2019, 35(5): 503–509 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.017>

### 基于非合作博弈的布谷鸟搜索算法在微电网多目标优化中的应用

Application of Cuckoo Search Algorithm Based on Non-cooperative Game in Multi-objective Optimization of Microgrid

上海电力大学学报. 2018, 34(6): 531–536,546 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2018.06.004>

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2025.06.001

# 考虑综合需求响应及主从博弈的 RIES 优化调度

范 宏, 王镇高宇

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 为了更好挖掘需求响应技术的调节能力, 解决区域综合能源系统(RIES)中不同主体的利益冲突, 首先, 对 RIES 中区域能源运营商(REO)和用户的主从博弈动态均衡性进行研究, 分析不同主体在参与调度过程中的定位变化, 确定 RIES 中不同主体间的联络方式; 其次, 分析各主体的策略制定对 RIES 的影响, 确定影响 RIES 调度均衡性的关键参数; 最后, 通过仿真算例进行验证。仿真算例表明, 引入综合需求响应和主从博弈后, 用户的购能成本有所下降, 购能效用获得了提升, REO 的利润有所提高, 实现了双向共赢。

**关键词:** 区域综合能源系统; 综合需求响应; 主从博弈; 日前优化调度

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-8299(2025)06-0512-09

## RIES Optimization Scheduling Considering Comprehensive Demand Response and Stackelberg Game

FAN Hong, WANG Zhengaoyu

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To better explore the regulatory capabilities of demand response technology and solve the conflicts of interest among different entities in the regional integrated energy system (RIES), the dynamic equilibrium of the stackelberg game between regional energy operators (REO) and users in RIES is studied. Firstly, the positioning changes of different entities in the participation scheduling process are analyzed to determine the contact methods between different entities in RIES. Secondly, the study analyzes the impact of each entity's strategy formulation on the regional integrated energy system, and determine the key parameters that affect the equilibrium characteristics of RIES scheduling. Finally, the findings are verified through simulation results. Simulation examples show that the introduction of comprehensive demand response and stackelberg game reduces the cost of energy purchase for users, improves the utility of energy purchase, and increases the profits of REO, achieving a win-win outcome for REO and users.

**Key words:** regional integrated energy system; integrated demand response; master-slave game; day-ahead optimal scheduling

收稿日期: 2025-02-28

通信作者简介: 王镇高宇 (1999—), 男, 在读硕士。主要研究方向为综合能源优化调度。E-mail: 1291327156@qq.com。

区域综合能源系统 (Regional Integrated Energy System, RIES) 优化调度作为综合能源系统稳定运行的关键,对于保证RIES的运行经济性具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。文献[4]首次提出了综合需求响应(Integrated Energy Response, IDR)概念。文献[5]对不同条件下的IDR进行了分析,概括了不同IDR的优缺点。文献[6-7]将负荷进行划分,明确不同负荷的响应机理,强调需求响应模型在提高系统运行经济性、实现负荷削峰填谷方面有较大优势。文献[8]引入需求侧负荷响应实现了多种能源的供需平衡。文献[9]提出的综合能源模型考虑了需求侧响应问题。随着电力市场的逐渐开放,参与RIES调度的主体逐渐增加,文献[10]建立了主从博弈模型。文献[11]将RIES内部主体分为能源销售商、区域能源运营商(Regional Energy Operators, REO)和用户,其中能源销售商以售能收益最大为目标完成售能定价,REO以运行成本最小为目标调整机组输出功率,用户以购能效用最大完成负荷调整,三者形成一主多从的博弈结构。文献[12]建立了考虑系统的电、热供能系统和热电联产系统的多主体博弈模型,并利用变步长迭代算法求解系统中各机组的输出功率情况以及各系统的能源价格。文献[13]考虑配电网运营商、分布式电源运营商、储能运营商和用户4类主体在规划中的交互行为和各自

利益诉求,确立了主从-合作的混合博弈关系。文献[14]构建了各分布式机组制定售能价格,用户跟随制定价格调整负荷需求的主从博弈架构。

针对RIES的优化调度研究有待深化,需求侧负荷的响应形式需要进一步细化等问题,本文首先对RIES中REO和用户的主从博弈动态均衡性进行研究,分析不同主体在参与调度过程中的定位变化,确定RIES中不同主体间的联络方式。其次,分析各主体的策略制定对RIES的影响,确定影响RIES调度均衡性的关键参数。最后,通过仿真算例进行验证,采用改进麻雀算法结合线性规划软件进行求解。

## 1 RIES 结构

RIES的能源供应环节主要由风电机组、光电机组以及与系统直接相连的电网和天然气网组成。能源转换环节主要由冷热电联产机组(Combined Power, Heating and Cooling, CCHP)、电锅炉(Electric Boiler, EB)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)、电制冷(Electric Refrigeration, ER)和电转气(Power to Gas, P2G)等组成;能源储存环节主要由电、热、冷、气等4类储能设备组成。RIES包括控制不同种类能源功率流向的信息管理环节。RIES结构如图1所示。

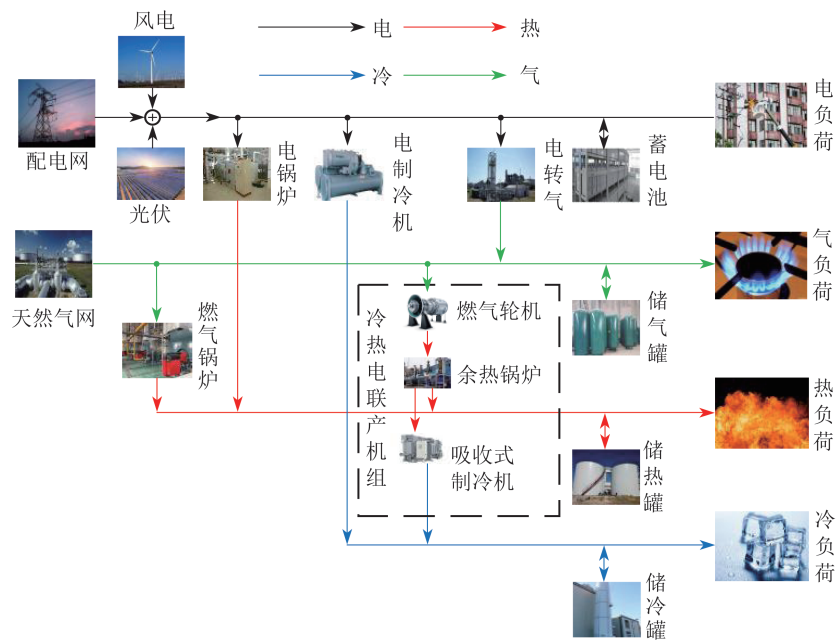


图1 RISE结构

## 2 IDR 数学模型

### 2.1 基础负荷

基础负荷为用户在日常生活中所需要的刚性负荷。 $t$ 时刻的基础负荷功率为

$$P_{\text{lb},\lambda}(t) = \alpha_{\text{lb},\lambda} P_{\lambda}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{lb},\lambda}(t)$ —— $t$ 时刻的基础负荷功率, $\lambda \in \{E, H, C, G\}$ , E、H、C、G 分别表示电负荷、热负荷、冷负荷和负荷;

$\alpha_{\text{lb},\lambda}$ ——基础负荷占总负荷的比例系数;

$P_{\lambda}(t)$ —— $t$ 时刻总负荷功率。

### 2.2 可平移电负荷

可平移电负荷在用电时段可以平移,但使用时长固定且不可中断。假设可平移电负荷可接受的平移区间为 $[T_s, T_e]$ ,可平移电负荷的持续时间为 $T_b$ 。负荷平移到以 $T_c$ 为开始的时间,调度分辨率为1 h,设置工作时长为3 h,则建立的可平移电负荷功率为

$$P_{\text{shfit},E}(t) = \sum_{t=T_c}^{T_c+T_b-1} P_{\text{shfit},E}(t) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{shfit},E}(t)$ —— $t$ 时刻可平移电负荷功率。

### 2.3 可转移负荷

可转移负荷为使用时段可以调整的负荷。可转移负荷功率为

$$P_{\text{tr},\mu}(t) = P_{\text{tr},\mu}^*(t) + \sum_{s=1}^t [\varepsilon_{\text{out},\mu}(s) - \varepsilon_{\text{in},\mu}(s)] \times [\Delta P_{\text{tr},\mu}(s) + \gamma_{\text{tr},\mu} P_{\text{su},\mu}(s)] \quad (3)$$

式中: $P_{\text{tr},\mu}(t)$ —— $t$ 时刻转移后的负荷功率, $\mu \in \{E, G\}$ ;

$P_{\text{tr},\mu}^*(t)$ —— $t$ 时刻转移前的负荷功率;

$\varepsilon_{\text{out},\mu}(s), \varepsilon_{\text{in},\mu}(s)$ —— $s$ 时刻转移负荷的0-1变量;

$\Delta P_{\text{tr},\mu}(s)$ —— $s$ 时刻负荷的实际转移功率;

$\gamma_{\text{tr},\mu}$ ——可转移负荷和可替代负荷的重叠响应因子;

$P_{\text{su},\mu}(s)$ —— $s$ 时刻替代后的负荷功率。

### 2.4 可替代负荷

$t$ 时刻替代后的可替代负荷功率 $P_{\text{su},\mu}(t)$ 为

$$P_{\text{su},\mu}(t) = P_{\text{su},\mu}^*(t) + \sum_{s=1}^t \left[ \delta_{\text{out},\mu}(s) - \delta_{\text{in},\mu}(s) \right] \times \left[ \Delta P_{\text{su},\mu}(s) + \frac{P_{\text{tr},\mu}(s)}{\gamma_{\text{tr},\text{su}}} \right] \quad (4)$$

式中: $P_{\text{su},\mu}^*(t)$ —— $t$ 时刻替代前的可替代负荷功率;

$\delta_{\text{out},\mu}(s), \delta_{\text{in},\mu}(s)$ —— $s$ 时刻替代负荷的0-1变量;

$\Delta P_{\text{su},\mu}(s)$ —— $s$ 时刻实际替代功率;

$\gamma_{\text{tr},\text{su}}$ ——可替代负荷和可转移负荷的重叠响应因子。

### 2.5 灵活热负荷

假设热负荷的温度范围为 $T_H \in [T_{H,\text{min}}, T_{H,\text{max}}]$ , $T_{H,\text{min}}, T_{H,\text{max}}$ 为热负荷的最低温度和最高温度,则热负荷功率为

$$P_{H,\text{min}}(t) = C_w \rho_w V_w (T_{H,\text{min}} - T_w) \Delta t \quad (5)$$

$$P_{H,\text{max}}(t) = C_w \rho_w V_w (T_{H,\text{max}} - T_w) \Delta t \quad (6)$$

$$P_{H,\text{min}}(t) \leq \alpha_{\text{lh},H} P_H(t) \leq P_{H,\text{max}}(t) \quad (7)$$

式中: $P_{H,\text{min}}(t), P_{H,\text{max}}(t)$ —— $t$ 时刻热负荷的最小、最大功率;

$C_w, \rho_w, V_w, T_w$ ——水的比热容、密度、体积和温度;

$\Delta t$ ——灵活热负荷使用时间;

$\alpha_{\text{lh},H}$ ——灵活热负荷占热负荷的比例系数。

### 2.6 灵活冷负荷

灵活冷负荷类似于灵活热负荷。考虑用户对周围温度的接受范围,室内温度范围可以表示为 $T_{\text{in}} \in [T_{C,\text{min}}, T_{C,\text{max}}]$ , $T_{C,\text{min}}, T_{C,\text{max}}$ 为室内最低温度和最高温度,则冷负荷功率为

$$P_{C,\text{min}}(t) = \frac{T_{C,\text{min}}(t) - T_{\text{out}}(t)}{R_s(1-K)} \quad (8)$$

$$P_{C,\text{max}}(t) = \frac{T_{C,\text{max}}(t) - T_{\text{out}}(t)}{R_s(1-K)} \quad (9)$$

$$P_{C,\text{min}}(t) \leq \alpha_{\text{lh},C} P_C(t) \leq P_{C,\text{max}}(t) \quad (10)$$

$$K = e^{-\Delta t/\tau} \quad (11)$$

$$\tau = R_s C_{\text{air}} \quad (12)$$

式中: $P_{C,\text{min}}(t), P_{C,\text{max}}(t)$ —— $t$ 时刻冷负荷的最小、最大功率;

$T_{\text{out}}(t)$ —— $t$ 时刻室外温度;

$R_s$ ——建筑物热阻;

$K$ ——热电阻衰减因子;

$\alpha_{\text{lh},C}$ ——灵活冷负荷占冷负荷的比例系数;

$\tau$ ——热电阻时间衰减常数;

$C_{\text{air}}$ ——室内比热容。

## 2.7 用能满意度模型

本文引入美国采暖制冷与空调工程学会的7级量表,利用预测平均值(Predicted Mean Vote, PMV)指标描述热舒适度等级。PMV指标对应的人体舒适度感觉如表1所示。

表1 PMV指标对应的人体舒适度感觉

指标	人体舒适度感觉
-3	寒冷
-2	凉
-1	微凉
0	适中
1	微暖
2	暖
3	热

引入预测不满意百分比(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)指标描述用户对周围环境不满意度。两个指标的公式为

$$I_{\text{PMV}} = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] Q_L \quad (13)$$

$$I_{\text{PPD}} = 100 - 95 \exp[-(0.03353 I_{\text{PMV}}^4 + 0.2179 I_{\text{PMV}}^2)] \quad (14)$$

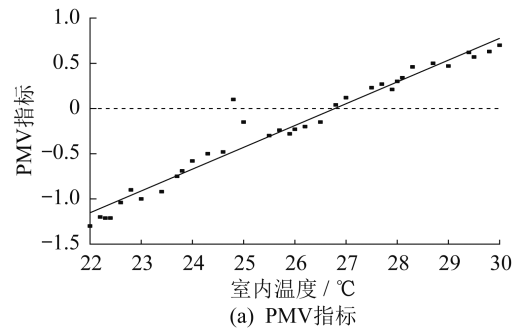
式中: $I_{\text{PMV}}$ ,  $I_{\text{PPD}}$ ——热舒适度评价指标PMV和PPD;

$M$ ——人体能量代谢率;

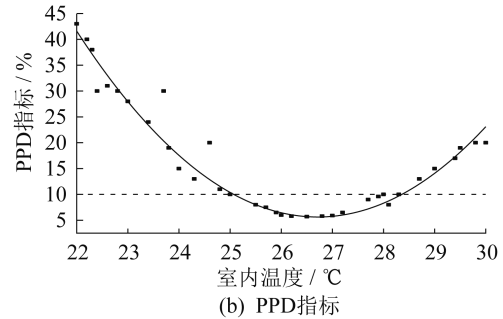
$Q_L$ ——人体吸热和散热的热量差。

根据ISO 7730规定,当PMV指标的变化范围为 $[-0.3, 0.3]$ ,PPD指标小于0.1时,人体的热舒适度满足要求,温度的波动范围为 $0.5^\circ\text{C}$ ,室内的温度变化控制为 $25\sim 28^\circ\text{C}$ ,即当人体周围的环境温度变化值在 $25\sim 28^\circ\text{C}$ 内变化时,用户的热舒适度不受影响。利用式(11)和式(12)得到PMV指标、PPD指标与室内温度关系曲线如图2所示。

热负荷的水温在用户期望水温范围内变化时,对用户热舒适满意度的影响较小。本文假设冷水的水温为 $18^\circ\text{C}$ ,初始的热水水温为 $70^\circ\text{C}$ ,水的比热容为 $1.167 \times 10^3 \text{ kWh/kg} \cdot \text{K}$ ,水的密度为 $1000 \text{ kg/m}^3$ ,热水水温的变化范围为 $\pm 5 \text{ K}$ ,此时用户的热舒适度不受影响。



(a) PMV指标



(b) PPD指标

图2 PMV指标、PPD指标与室内温度关系曲线

用能方式满意度由E、H、C、G负荷的变化量确定。由于不同用户的用能偏好不同,因此本文统一设定用户使用E、H、C、G的满意度区间范围分别为 $\theta_E \in [0.6, 1]$ 、 $\theta_H \in [0.8, 1]$ 、 $\theta_C \in [0.7, 1]$ 、 $\theta_G \in [0.6, 1]$ 。定义用户用能方式满意度 $\theta_\lambda$ 为

$$\theta_\lambda = 1 - \frac{\sum_{s=1}^t |P_\lambda(t) - P_\varepsilon(t)|}{\sum_{t=1}^T P_\lambda(t)} \quad (15)$$

式中: $P_\varepsilon(t)$ —— $t$ 时刻参与需求响应后的总负荷功率。

## 3 博弈结构分析及优化模型

### 3.1 供需双侧主从博弈结构

本文研究的主从博弈模型包含REO和用户。REO作为领导者,根据可再生能源输出功率和需求侧负荷信息,在保证系统功率平衡的基础上,以自身收益最大为目标,制定电、热、冷、气4类能源的销售价格。需求侧用户作为跟随者,接收上层运营商发布的价格信息,利用需求响应技术以综合效益最大化为目标制定需求响应策略,然后将需求响应策略上报至上层运营商,两者形成一个上下两级的Stackelberg主从博弈结构。供需双侧主从博弈结构如图3所示。

基于上述博弈结构,本文假设:REO和用户

在追求彼此利益的同时都属于理性的独立个体,寻求自身目标最优化;REO制定价格策略,用户调整用能需求制定负荷响应策略,两者在博弈关系中信息公开。

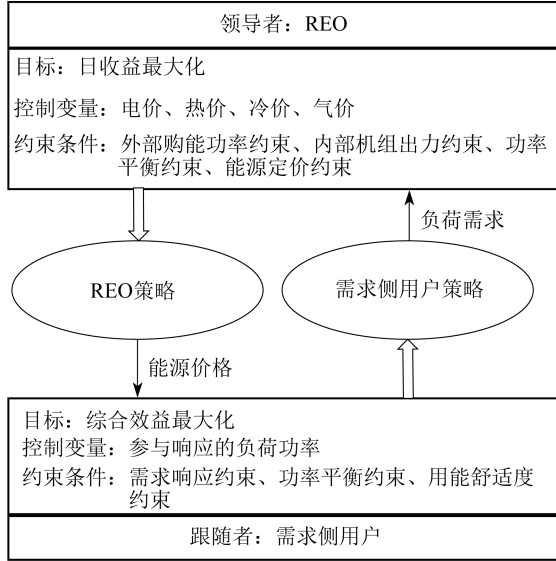


图3 供需双侧主从博弈结构

## 3.2 REO模型

### 3.2.1 目标函数

REO以电能和天然气为基础能源,利用系统内部的耦合机组生产电、热、冷、气4种能源用以满足需求侧用户的负荷需求。

通过制定售电、售热、售冷、售气价格,实现收益最大化。

REO的收益最大化目标可表示为

$$\max F_{\text{REO}} = \max \sum_{s=1}^t (F_{\text{sell}} - F_{\text{b}} - F_{\text{w}} - F_{\text{q}} - F_{\text{co}_2}) \quad (16)$$

式中: $F_{\text{REO}}$ ——REO收益;

$F_{\text{sell}}$ ——REO售能收益;

$F_{\text{b}}$ ——系统购能成本;

$F_{\text{w}}$ ——机组运行维护成本;

$F_{\text{q}}$ ——弃风弃光惩罚成本;

$F_{\text{co}_2}$ ——环境效益成本。

REO的售能收益 $F_{\text{sell}}$ 为

$$F_{\text{sell}}(t) = P_{\text{sell,E}}(t)c_{\text{sell,E}}(t) + P_{\text{sell,H}}(t)c_{\text{sell,H}}(t) + P_{\text{sell,C}}(t)c_{\text{sell,C}}(t) + P_{\text{sell,G}}(t)c_{\text{sell,G}}(t) \quad (17)$$

式中: $P_{\text{sell,E}}(t), P_{\text{sell,H}}(t), P_{\text{sell,C}}(t), P_{\text{sell,G}}(t)$ —— $t$ 时刻REO的售电、售热、售冷、售气功率;

$c_{\text{sell,E}}(t), c_{\text{sell,H}}(t), c_{\text{sell,C}}(t), c_{\text{sell,G}}(t)$ —— $t$ 时刻REO的售电、售热、售冷、售气价格。

购能成本 $F_{\text{b}}$ 为

$$F_{\text{b}} = \sum_{s=1}^t [c_{\text{buy,E}}(s)E_{\text{buy}}(s) + c_{\text{buy,G}}(s)G_{\text{buy}}(s)] \quad (18)$$

式中: $c_{\text{buy,E}}(s), c_{\text{buy,G}}(s)$ —— $s$ 时刻购电、购气价格;

$E_{\text{buy}}(s), G_{\text{buy}}(s)$ —— $s$ 时刻购电、购气量。

机组的运行维护成本 $F_{\text{w}}$ 为

$$F_{\text{w}} = \sum_{s=1}^t \sum_{z=1}^Z c_z P_z(s) \quad (19)$$

式中: $Z$ ——系统机组数量;

$c_z$ ——系统各类机组的单位功率运行成本;

$P_z(s)$ —— $s$ 时刻系统各类机组的输出功率。

弃风弃光成本 $F_{\text{q}}$ 为

$$F_{\text{q}} = \sum_{s=1}^t [c_{\text{q,WT}} P_{\text{q,WT}}(t) + c_{\text{q,PV}} P_{\text{q,PV}}(t)] \quad (20)$$

式中: $c_{\text{q,WT}}, c_{\text{q,PV}}$ ——单位功率弃风、弃光惩罚系数;

$P_{\text{q,WT}}(t), P_{\text{q,PV}}(t)$ —— $t$ 时刻弃风、弃光功率。

环境效益成本 $F_{\text{co}_2}$ 为

$$F_{\text{co}_2} = \sum_{s=1}^t c_{\text{co}_2} [d_{\text{CCHP}} P_{\text{CCHP}}(s) + d_{\text{GB}} P_{\text{GB}}(s)] \quad (21)$$

式中: $c_{\text{co}_2}$ —— $\text{CO}_2$ 单位处理成本;

$d_{\text{CCHP}}, d_{\text{GB}}$ ——CCHP机组和GB的 $\text{CO}_2$ 排放系数;

$P_{\text{CCHP}}(s), P_{\text{GB}}(s)$ —— $s$ 时刻CCHP机组和GB的 $\text{CO}_2$ 排放量。

### 3.2.2 价格约束

分时定价参考外部购能费用,不考虑系统内的耦合机组,并采用经典机组模型计算不同能源的基线价格。REO的基线价格约束为

$$\begin{cases} c_{\text{sell,E, min}} < c_{\text{sell,E}} < c_{\text{E}} \\ c_{\text{sell,G, min}} < c_{\text{sell,G}} < c_{\text{G}} \\ c_{\text{sell,H, min}} < c_{\text{sell,H}} < \frac{c_{\text{G}}}{\eta_{\text{GB}}} \\ c_{\text{sell,C, min}} < c_{\text{sell,C}} < \frac{c_{\text{E}}}{\eta_{\text{ER}}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $c_{\text{sell,E, min}}, c_{\text{sell,G, min}}, c_{\text{sell,H, min}}, c_{\text{sell,C, min}}$ ——售电、售气、售热、售冷的最低价格;

$\eta_{GB}, \eta_{ER}$ ——气转热、电转冷的价格系数。  
REO的售能价格约束为

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^t c_{\text{sell}, E}(t) < 24 \bar{c}_{E, \max} \\ \sum_{s=1}^t c_{\text{sell}, H}(t) < 24 \bar{c}_{H, \max} \\ \sum_{s=1}^t c_{\text{sell}, C}(t) < 24 \bar{c}_{C, \max} \\ \sum_{s=1}^t c_{\text{sell}, G}(t) < 24 \bar{c}_{G, \max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\bar{c}_{E, \max}, \bar{c}_{H, \max}, \bar{c}_{C, \max}, \bar{c}_{G, \max}$ ——最高平均售电、售热、售冷、售气价格。

### 3.3 用户模型

用户的综合效益函数由用户向REO购能所获得的效用及用户通过购能所需缴纳的费用组成。本文引入效用函数描述用户向上级能源供应商购买电、热、冷、气4种能源所获得的效用。建立的描述购能所带来的效用二次函数为

$$\begin{aligned} F_{\text{ef}}(t) = & v_e P_{\text{sell}, E}(t) - \alpha_e P_{\text{sell}, E}^2(t) + v_h P_{\text{sell}, H}(t) - \\ & \alpha_h P_{\text{sell}, H}^2(t) + v_c P_{\text{sell}, C}(t) - \alpha_c P_{\text{sell}, C}^2(t) + \\ & v_g P_{\text{sell}, G}(t) - \alpha_g P_{\text{sell}, G}^2(t) \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $F_{\text{ef}}$ ——用户购能所带来的效用;  
 $v_e, \alpha_e$ ——用户的用电偏好系数;  
 $v_h, \alpha_h$ ——用户的用热偏好系数;  
 $v_c, \alpha_c$ ——用户的用冷偏好系数;  
 $v_g, \alpha_g$ ——用户的用气偏好系数。

用户为满足自身的能源需求,需要向上级进行购能,并交纳购能费用,函数为

$$\begin{aligned} F_{\text{buy}}(t) = & c_{\text{sell}, E}(t) P_{\text{sell}, E}(t) + c_{\text{sell}, H}(t) P_{\text{sell}, H}(t) + \\ & c_{\text{sell}, C}(t) P_{\text{sell}, C}(t) + c_{\text{sell}, G}(t) P_{\text{sell}, G}(t) \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $F_{\text{buy}}(t)$ —— $t$ 时刻用户的购能费用。

综上建立的用户利益诉求最大化综合效益函数为

$$\max F_{\text{USER}} = \max \sum_{s=1}^t [F_{\text{ef}}(t) - F_{\text{buy}}(t)] \quad (26)$$

式中: $F_{\text{USER}}$ ——用户综合效益。

### 3.4 求解算法

本文运用迭代法对所建模型进行优化求解,采用改进麻雀算法结合Yalmip插件,并调用Gurobi求解器联合求解。为提高算法的收敛速度,对麻雀算法中发现者的移动方式进行调整,引

入自适应权重因子。改进后的发现者位置为

$$x_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} x_{i,j}^n + \text{wrand}(x_{\text{best},j}^n - x_{i,j}^n), & R_2 < S_T \\ x_{i,j}^n + QL, & R_2 > S_T \end{cases} \quad (27)$$

式中: $x_{i,j}^n$ ——第 $n$ 次迭代时第 $i$ 只麻雀的位置;

$w$ ——权重因子;

$x_{\text{best},j}^n$ ——第 $n$ 次迭代时最优解位置;

$Q$ ——服从正态分布的随机数;

$L$ ——元素全为1的矩阵;

$R_2$ ——预警值;

$S_T$ ——安全值。

权重因子 $w$ 的计算公式为

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})n}{n_{\max}} \quad (28)$$

式中: $w_{\max}, w_{\min}$ ——权重因子的最大值和最小值;

$n_{\max}$ ——最大迭代次数。

## 4 算例分析

### 4.1 算例介绍

某工业园区可再生能源风电、光伏及负荷日前预测值如图4所示。其中,用户对电、热、冷、气的偏好系数 $[v_e, \alpha_e, v_h, \alpha_h, v_c, \alpha_c, v_g, \alpha_g]$ 分别为 $[9, 0.0005, 8, 0.0006, 8, 0.0006, 9, 0.0005]$ ,电、气负荷重叠响应系数均为0.15,电替热的替代系数为0.98,电替冷的替代系数为3,电替气的替代系数为0.15,气替电的替代系数为6.8。改进麻雀算法的相关参数设置为:种群规模为100,最大迭代次数为100,发现者的比例为0.8,警戒者的比例为0.2, $R_2=0.8$ 。

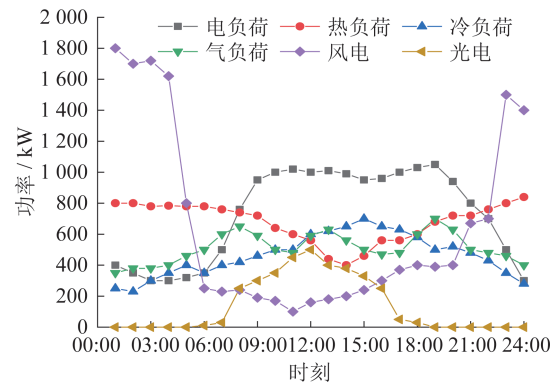


图4 风电、光伏及负荷日前预测值

需求响应前电负荷和气负荷构成如图5所示。其中:可平移电负荷为电动汽车;可转移电负荷为工业用电负荷;可替代电负荷为电热水器(电

热替代)、空调(电冷替代)、工业电气两用设备等;可转移气负荷为工业用气负荷;可替代气负荷为家用炊具(气电替代)、工业气电两用设备等。

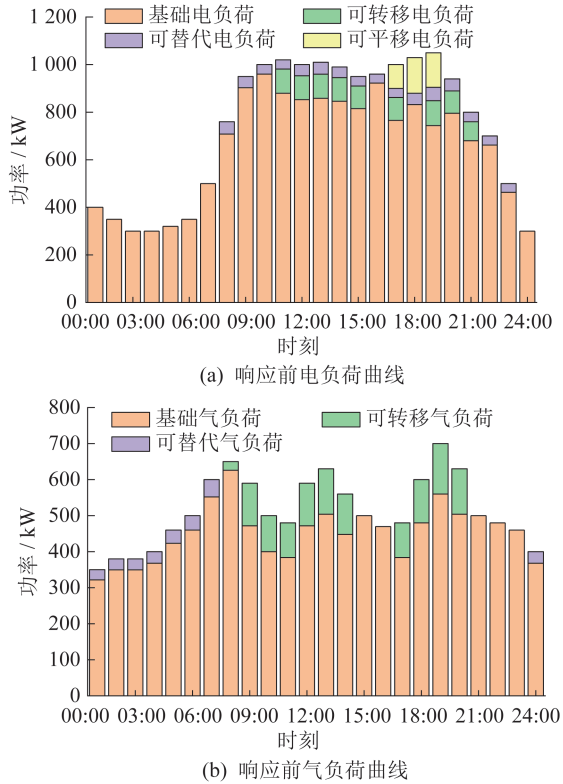


图5 需求响应前电负荷和气负荷构成

4.2 优化结果分析

为了说明本文所提出的博弈策略的合理性和可行性,设立以下2种方案进行对比:方案1,考虑REO和用户的博弈过程,售能价格和用户的负荷响应进行博弈,确定最终的售能价格和负荷响应结果,并求解得到日前调度结果;方案2,不考虑REO和用户的博弈过程,即不考虑用户的需求响应过程,售能价格遵循方案1制定的价格,求解得到日前调度结果。

通过本文所提的求解方法,得到两种方案下各主体的收益及成本如表2所示。

表2 两种方案下各主体的收益及成本 单位:元

方案	REO 利润	REO 成本	用户综合效益	用户成本	综合效用
1	9 422.0	10 145.0	5 298.2	19 567.0	14 643.5
2	9 281.1	11 395.9	4 163.1	20 677.0	14 212.1

由表2可知,与方案2相比,方案1的用户在进行需求响应的过程中,系统总的负荷需求有所

降低;用户根据价格信息实现了负荷从价格峰时段向平时段、谷时段的转移,购能成本有所降低,综合效益获得了提升。虽然考虑需求响应后REO的售能收益有所下降,但由于其运行成本下降了1 250.90元,因此REO的利润反而上升,年利润有明显提高。

REO制定的电、热、冷、气价格如图6所示。

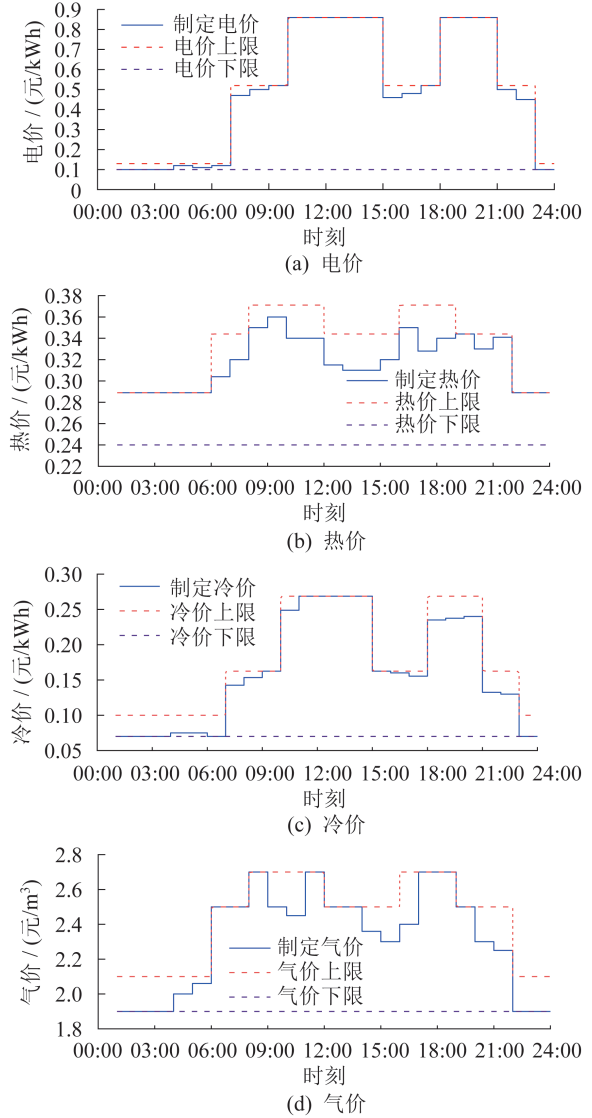


图6 REO制定的电、热、冷、气价格

由图6可知,REO制定售电价格的趋势接近上级电网价格,REO的售电价格策略和用户的负荷调整呈反相关,这是因为在建立的主从博弈关系中,存在着先定价后响应的主次顺序,用户为实现自身购能效用的最大化,减少在电价高峰的使用量,从而在价格谷时段提高自身的用电量。热、冷、气价格的优化结果和电价相似。

考虑需求响应后的电、气负荷组成如图7所示。

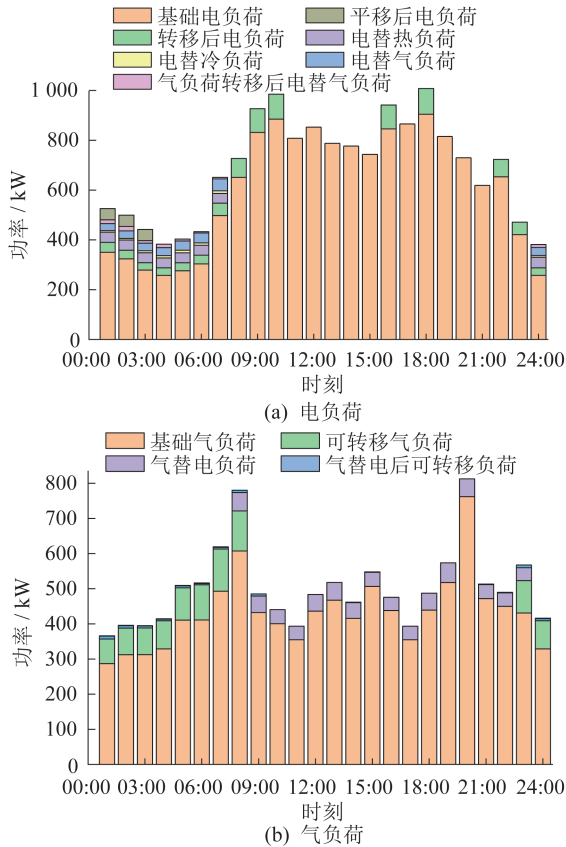


图7 考虑需求响应后电、气负荷组成

由图7可知,用户对比上层运营商制定的售电价格,将可平移电负荷由电价的峰时段17:00—19:00平移到电价的谷时段01:00—03:00,同时用户对比不同时段的价格,将电负荷从时段11:00—15:00和时段19:00—21:00向其他时段完成转移。夜间系统的风电高发,系统降低在夜间的售电价格,用户对比电价和气价,通过电气负荷的替代作用,在时段01:00—07:00、21:00—24:00实现电替气,在08:00—23:00时段实现气替电。

不同方案下热、冷负荷的优化曲线如图8所示。

由图8可知,以热负荷为例,夜间用户的购电价格最高为0.13元/kW,夜间用户的购热价格为0.29元/kW,电热的替代系数为0.98,购冷价格为0.07元/kW。由于用户通过购电换算得到单位购热价格为0.133元/kW,低于直接购热价格,因此,用户倾向于利用电负荷替代部分热负荷。在日间购热价格低于电价时,用户直接通过购买热能

来满足负荷需求。此外,在满足热舒适性的基础上,用户倾向降低热负荷使用。

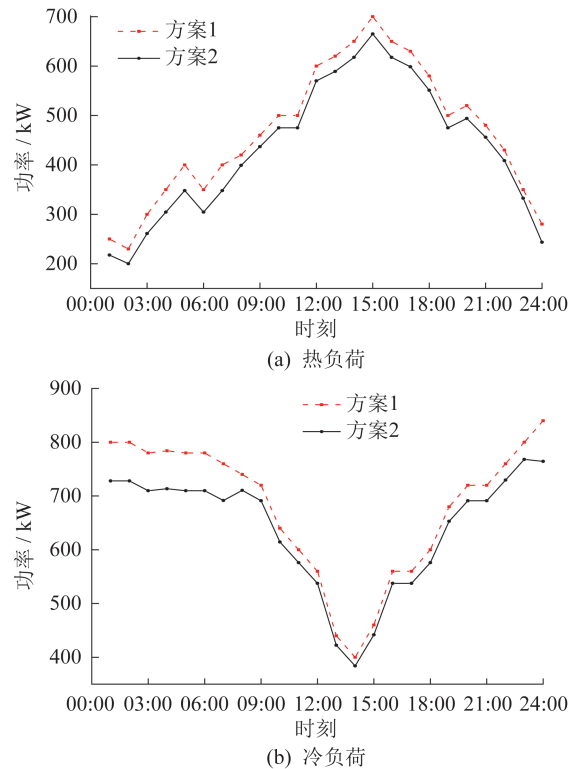


图8 不同方案下热、冷负荷的优化曲线

系统电、热、冷、气的功率平衡曲线如图9所示。

由图9可知,在夜间,尽管用户完成需求响应后,电负荷低谷有所上升,但此时风电处于高发时段,在优先满足电负荷的基础上,系统引导EB和ER将电能转化为热能和冷能进行供能;由于热负荷处于高需求阶段,因此EB在夜间始终满载运行;冷负荷的需求较小,ER跟随冷负荷需求进行调整,满足冷功率平衡,引导P2G机组将多余的电能转化为天然气以满足气负荷的需求,同时蓄电池进行充电;P2G机组在夜间处于满载运行,通过向上级天然气网购买天然气以满足供需平衡。在日间,用户完成需求响应后,电负荷高峰有所降低,且日间的天然气价格低于电价,系统利用CCHP机组消耗天然气以满足用户的电、热、冷负荷需求。由于CCHP机组在额定冷、热、电比的工作状态下运行,系统的供热功率缺额利用GB供给,系统的供冷功率缺额利用ER供给,满足日前调度的供需平衡。在日间,储能设备利用夜间储存的能量发挥辅助供能的作用,提升系统运行的可靠性和经济性。

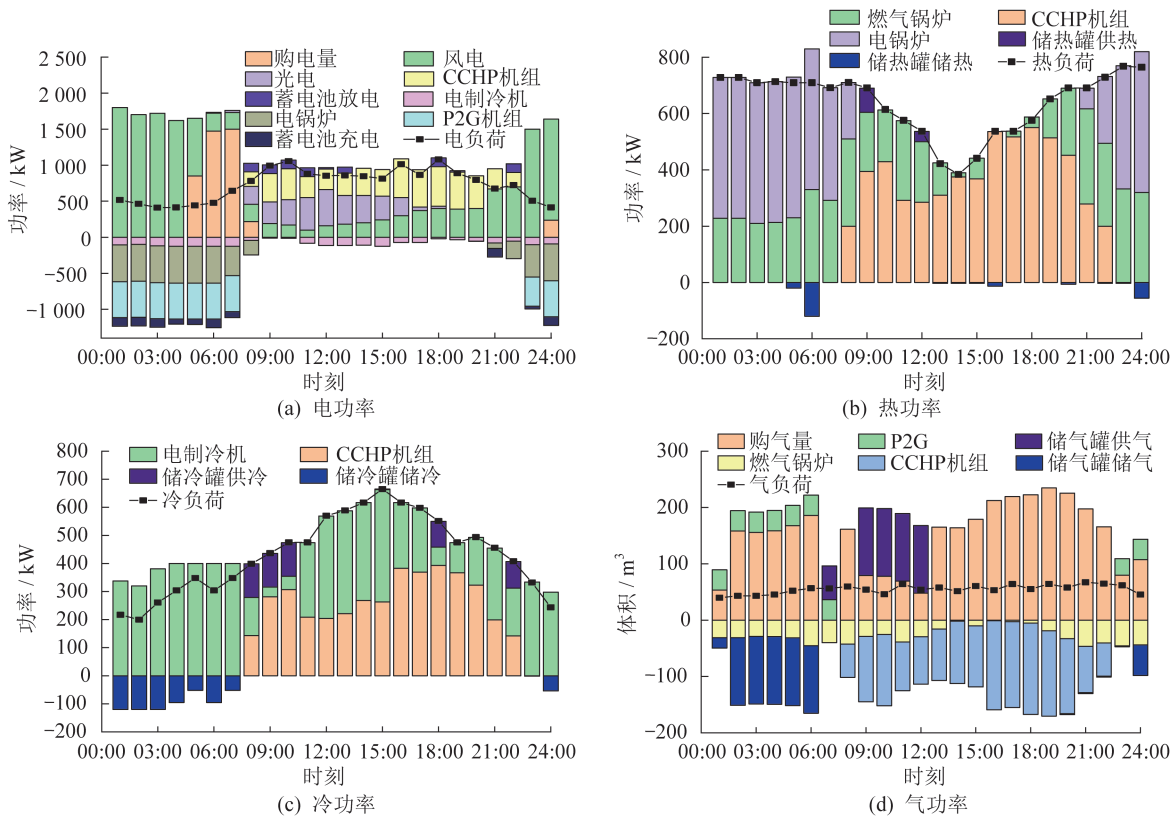


图9 电、热、冷、气功率平衡曲线

### 5 结 语

本文建立了REO的收益模型和用户综合效益模型,利用改进麻雀算法结合Gurobi求解器联合求解,得到了REO的定价策略和用户的需求响应策略,并进一步求解得到日前优化调度的结果。算例验证结果表明,引入IDR和主从博弈可以有效提高REO运行收益和用户综合效益,改善负荷高峰低谷现象,缓解系统的供能压力。

#### 参考文献:

[1] 陈磊,戎士敏,王聪,等. 考虑需求侧资源参与的区域综合能源系统低碳协同调度[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 54-64.

[2] 袁世琦,潘鹏程,魏业文,等. 园区综合能源系统低碳经济优化调度模型研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 347-356.

[3] ZHANG D, YANG C. Development of integrated energy system and impact on power grid [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering(REPE). Beijing, China:IEEE, 2021:233-237.

[4] SHEIKHI A, BAHRAMI S, RANJBAR A M. An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs [J]. Energy,

2015, 89:490-499.

[5] 战鹏帆,蔺红,田易之. 电-碳联合市场下基于混合博弈的多园区综合需求响应策略[JOL]. 电力系统及其自动化学报, 2025: 1-10 [2025-02-15]. <https://http-kns.cnki.net.shiep.vpn358.com/kcms/detail/12.1251.tm.20250115.1438.003.html>.

[6] 王云龙,韩璐,罗树林,等. 计及热舒适度提升的家庭电热综合能源系统调度优化[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 165-174.

[7] KARPETYAN A. A competitive scheduling algorithm for online demand response in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3430-3440.

[8] 刘洁彤,刘对,林兵,等. 计及垃圾焚烧电厂与源荷双侧响应的综合能源系统优化调度[JOL]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2025: 1-12 [2025-02-15]. <https://http-kns.cnki.net.shiep.vpn358.com/kcms/detail/35.1074.N.20250306.1121.002.html>.

[9] 朱霄珣,刘占田,薛劲飞,等. 计及柔性负荷参与的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 29-38.

[10] 龚诚嘉锐,林顺富,边晓燕,等. 基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 30-40.

[11] 练小林,李晓露,曹阳,等. 考虑多主体主从博弈的多微网协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 85-93.

(下转第541页)

辅相成,提升了系统运行效率和用户的积极性,具有重要的实际应用价值。

本文的研究在用户一定参与响应的前提下开展,后续将结合用户心理学进一步分析用户响应的不确定性,并考虑与电能市场的交互,使售能价格更加灵活。

### 参考文献:

- [ 1 ] 别朝红,王旭,胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6445-6462.
- [ 2 ] 赵永凯,王靖韬,赵维,等. 计及多目标的园区级综合能源系统协同优化模型研究[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(11):123-130.
- [ 3 ] YU M M, HONG S H. Supply-demand balancing for power management in smart grid: a Stackelberg game approach [J]. Applied Energy, 2016, 164: 702-710.
- [ 4 ] ZHENG S L, SUN Y, LI B, et al. Incentive-based integrated demand response for multiple energy carriers considering behavioral coupling effect of consumers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3231-3245.
- [ 5 ] 闫梦阳,李华强,王俊翔,等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):163-175.
- [ 6 ] 晋旭东,孙磊,丁明,等. 考虑用户响应不确定性的园区综合能源系统分布鲁棒低碳调度[J]. 电力系统自动化,2023,47(16):10-21.
- [ 7 ] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等. 考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):154-162.
- [ 8 ] 王勇,吕华灿,姚文亮,等. 基于消费者耦合行为的综合需求响应建模与主从博弈运行策略研究[J]. 电网技术,2024,48(7):2873-2883.
- [ 9 ] WEI W, LIU F, MEI S W. Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1364-1374.
- [ 10 ] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-Peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6087-6097.
- [ 11 ] 丛昊,王旭,蒋传文,等. 基于联盟博弈的综合能源系统优化运行方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):14-22.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 李东东,王啸林,沈运帷,等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(5):210-217.
- [ 14 ] WANG L, HOU C Q, YE B, et al. Optimal operation analysis of integrated community energy system considering the uncertainty of demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3681-3691.
- [ 15 ] 崔晓昱. 计及用户不确定性的需求响应激励优化策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [ 16 ] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(4):1307-1321.
- [ 17 ] 董军,方琳怡,姚文璐,等. 基于主从博弈的综合能源系统多能定价及调度优化[J]. 浙江电力,2024,43(9):19-28.
- [ 18 ] LIN S F, LIN M C, SHEN Y W, et al. An optimal scheduling strategy for integrated energy systems using demand response [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10:920441.

(责任编辑 桂金星)

### (上接第 520 页)

- [ 12 ] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(4):1307-1321.
- [ 13 ] 王菲菲,张沈习,宋毅,等. 考虑多主体混合博弈的配电网源网荷储协同规划[J/OL]. 南方电网技术,2025: 1-16 [2025-02-15]. <https://http-kns.cnki.net. shiep. vpn358.com/kcms/detail/44. 1643. TK. 20250217. 1128. 008. html>.
- [ 14 ] 孙毅,胡亚杰,郑顺林,等. 考虑用户响应特性的综合需求响应优化激励策略[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1402-1413.

(责任编辑 谢 冉)