

控制与决策

Control and Decision

考虑需求响应激励机制的园区综合能源系统博弈优化调度

王俐英, 林嘉琳, 宋美琴, 董厚琦, 曾鸣

引用本文:

王俐英, 林嘉琳, 宋美琴, 董厚琦, 曾鸣. 考虑需求响应激励机制的园区综合能源系统博弈优化调度[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3192–3200.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0436>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述](#)

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems
控制与决策. 2021, 36(2): 283–294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

[基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system
控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

[多尺度决策系统中代价敏感的最优尺度组合](#)

Cost-sensitive optimal scale combination in multi-scale decision systems
控制与决策. 2021, 36(10): 2369–2378 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0121>

[现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究](#)

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market
控制与决策. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

[社区产消者能量分享研究综述](#)

A review on energy sharing for community energy prosumers
控制与决策. 2020, 35(10): 2305–2318 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0343>

考虑需求响应激励机制的园区综合能源系统博弈优化调度

王俐英[†], 林嘉琳, 宋美琴, 董厚琦, 曾 鸣

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 建设源荷协调、灵活互动的综合能源系统是构建新型电力系统的有效路径. 在综合能源系统下, 通过价格、补贴等激励手段合理调节用户侧需求响应机制可以促进综合能源系统的经济高效运行. 为制定合理的需求响应激励机制, 首先充分考虑源侧可再生能源出力 and 负荷侧多类能源需求的不确定性, 提出随机场景生成策略; 然后提出计及用户需求响应的综合能源系统博弈优化框架, 分别以园区综合能源系统运营商和综合能源用户效益最大化为目标, 建立双主体博弈优化调度模型, 并提出快速高效的求解算法; 最后, 基于某实际园区综合能源系统开展多场景算例仿真分析, 制定合理有效的需求响应价格激励方案. 调度结果表明, 所提出方案可以有效提升综合能源系统运行商和用户的效益.

关键词: 需求响应; 主从博弈; 综合能源系统; 激励机制; 不确定性; 调度优化

中图分类号: TM721

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0436

引用格式: 王俐英, 林嘉琳, 宋美琴, 等. 考虑需求响应激励机制的园区综合能源系统博弈优化调度[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3192-3200.

Optimal dispatch of park integrated energy system considering demand response incentive mechanism

WANG Li-ying[†], LIN Jia-lin, SONG Mei-qin, DONG Hou-qi, ZENG Ming

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Building an integrated energy system with coordinated source and load and flexible interaction is an effective way to build a new type of power system. Under the integrated energy system, reasonable adjustment of the user-side demand response mechanism through incentives such as electricity prices and subsidies can promote the economic and efficient operation of the integrated energy system. In order to formulate a reasonable demand response incentive mechanism, first, the paper fully considers the uncertainty of renewable energy output on the source side and multi-type energy demand on the load side, proposes a random scenario generation strategy, and then proposes a game optimization framework for an integrated energy system that takes into account user demand response. With the goal of maximizing user benefits, a dual-agent game optimal scheduling model is established, and a fast and efficient solution algorithm is proposed. Finally, a multi-scenario simulation analysis is carried out based on the integrated energy system of a real park, and a reasonable and effective demand response price incentive plan is formulated. The scheduling results show that the proposed plan can effectively improve the benefits of system operators and users.

Keywords: demand response; stackelberg game; integrated energy system; incentive mechanism; uncertainty; scheduling optimization

0 引言

建设新能源为主体的新型电力系统, 需要着力构建综合能源系统, 改变传统能源系统建设路径和发展模式, 打破技术、体制和市场三重壁垒, 实现能源转化互补的经济和社会价值^[1]. 综合能源系统的建设以

“横向多能互补、纵向源网荷储协调”为原则, 兼顾能源系统安全性、经济性和清洁化, 整合区域内电力、天然气等多种能源资源, 满足用户的多种用能需求, 因此成为能源领域的研究热点^[2].

目前, 许多国内外学者针对综合能源系统的优化

收稿日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-05-31.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2400700); 国家自然科学基金重大项目(19ZDA081).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: wangliying613@ncepu.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

调度模型进行了研究. 文献[3]考虑综合能源系统的经济性和环保性, 构建了多目标优化调度模型. 文献[4]基于能量枢纽, 提出了面向可再生能源高比例消纳的综合能源系统规划调度模型, 选取风光出力典型日对系统进行调度和配置, 但并未考虑可再生能源在规划调度中的不确定性. 针对综合能源系统中分布式风电、光伏和冷、热、电等多种负荷接入为系统运行带来的多种不确定性问题, 当前学者主要采用机会约束规划、概率场景法、鲁棒优化法等进行建模分析. 文献[5]采用蒙特卡罗法对风、光、荷分布模型进行模拟, 构建计及风、光、荷不确定性的综合能源站随机机会约束规划模型. 文献[6]采用概率场景法, 考虑时间相关性, 确定风力发电场景及相应概率, 提出一种综合能源系统的两阶段随机调度方案. 文献[7]利用改进谱聚类算法确定风光出力典型场景, 构建基于风光典型场景集的综合能源系统两层级协同优化配置模型. 文献[8]利用鲁棒优化理论, 在考虑电源不确定性和负荷不确定性的基础上, 构建了微电网两级鲁棒优化调度模型.

此外, 随着多元互动负荷的广泛接入, 需求响应在优化用电方式、协调供需关系方面发挥着重要作用. 文献[9]通过构建电网公司与多个用户的主从博弈模型, 制定需求响应激励补贴策略. 文献[10]在考虑调度中心、电网公司、需求响应聚合商等多主体利益的基础上, 提出了一种基于博弈论的多跟随者电网双层规划调度方法. 文献[11]提出了考虑多不确定性和需求响应的社区综合能源系统两阶段优化运行方法, 通过在日前阶段引入可平移需求响应、日内阶段引入可转换需求响应, 从而有效促进能源供需平衡. 文献[12]针对用户侧综合能源系统, 考虑基于分时电价的需求响应, 提出了两阶段协调优化调度方法, 在日前阶段确定需求响应基线, 日内阶段优化需求响应量, 从而实现系统的经济效益最大. 文献[13]考虑基于实时价格的需求响应, 构建了一个双层规划调度模型, 上层以供应商利润最大化为目标, 下层以区域综合能源系统利润最大化为目标, 提出了实时价格制定方案和能源优化调度方案. 文献[14]运用鲁棒优化, 建立了考虑风光出力不确定性、基于价格需求响应和激励需求响应的虚拟电厂随机调度模型.

综上, 已有部分文献对综合能源系统运行优化开展了研究, 但较少在考虑源荷不确定性情况下的价格型和补贴型需求响应激励机制设计. 鉴于此, 本文针对园区综合能源系统(park-level integrated energy system, PIES), 考虑园区综合能源系统源荷不

确定性以及园区综合能源系统运营商(PIES operator, PIESO)与综合能源用户之间的博弈行为, 建立计及需求响应激励机制的优化调度模型, 并采用粒子群算法与CPLEX求解器相结合的方法进行求解. 最后通过算例仿真得到不同情景下的日前调度结果和需求响应激励策略, 验证了所提出模型的有效性.

1 园区综合能源系统架构及设备模型

1.1 系统架构

本文所研究的园区综合能源系统是指利用冷、热、电、气等多种能源在时空上的耦合特性, 通过“并网不上网”的运行模式, 协同外部电力和天然气网络, 在满足综合能源用户多种用能需求的同时, 实现多能互补、能源梯级利用的一种新型能源系统. 涉及的利益主体能源供应商(电网公司、天然气公司)、PIESO和综合能源用户3类, 具体系统架构如图1所示.

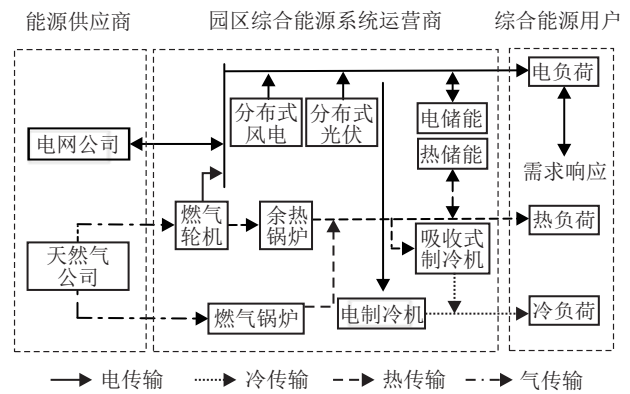


图 1 园区综合能源系统架构

1.2 设备模型

1.2.1 能源生产设备模型

能源生产设备包括风力发电机和光伏发电机, 具体出力模型^[8]为

$$q_t^w = \begin{cases} 0, & v_t < v_{ci} \text{ or } v_t > v_{co}; \\ P_w^r \frac{v_t - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v_t < v_{co}; \\ P_w^r, & v_r \leq v_t < v_{co}. \end{cases} \quad (1)$$

$$q_t^s = P_s^r \frac{G_t}{G_r} [1 + \tau(T_t - T_r)]. \quad (2)$$

其中: q_t^w 为 t 时刻的风电输出功率; v_t 为 t 时刻的风速; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 分别为风速切入、切出和额定速度; P_w^r 为风机额定输出功率^[6]; q_t^s 为 t 时刻的光伏输出功率; P_s^r 为光伏额定输出功率; G_r 、 T_r 分别为额定光照辐射度和额定温度; G_t 、 T_t 分别为 t 时刻实际光照辐射度和实际温度; τ 为温度功率系数, 通常取 $0.0047^\circ\text{C}^{-1}$.

1.2.2 能源转换设备模型

能源转换设备主要包括燃气轮机 (gas turbine, GT)、余热锅炉 (waste heat boiler, WHB)、燃气锅炉 (gas boiler, GB)、热泵 (heat pump, HP)、电制冷机 (electric refrigerator, EF) 和吸收式制冷机 (absorption chiller, AC)。

1) 燃气轮机.

燃气轮机是通过输入天然气输出电功率的一种典型气转热设备,具体模型为

$$q_{c,t}^{gt} = \eta_c^{gt} q_t^{gt} \phi_g. \quad (3)$$

其中: $q_{c,t}^{gt}$ 为 t 时刻燃气轮机输出的电功率, ϕ_g 为天然气热值, η_c^{gt} 为燃气轮机输出电功率效率, q_t^{gt} 为 t 时刻燃气轮机输入的天然气功率。

2) 余热锅炉.

余热锅炉是一种通过吸收燃气轮机的余热输出电功率的设备,具体模型为

$$q_{h,t}^{whb} = \eta_h^{whb} (1 - \eta_c^{gt}) q_t^{gt} \phi_g. \quad (4)$$

其中: $q_{h,t}^{whb}$ 为 t 时刻余热锅炉输出的热功率, η_h^{whb} 为余热锅炉的热效率。

3) 燃气锅炉.

燃气锅炉是一种通过输入天然气输出热功率的设备,具体模型为

$$q_{h,t}^{gb} = \eta_h^{gb} q_t^{gb} \phi_g. \quad (5)$$

其中: $q_{h,t}^{gb}$ 为 t 时刻燃气锅炉输出的热功率, η_h^{gb} 为燃气锅炉输出热功率的效率, q_t^{gb} 为 t 时刻燃气锅炉输入的天然气功率。

4) 热泵.

热泵是一种典型的电转热设备,具体模型为

$$q_{h,t}^{hp} = q_{c,t}^{hp} \eta_h^{hp}. \quad (6)$$

其中: $q_{h,t}^{hp}$ 为 t 时刻热泵输出的热功率, $q_{c,t}^{hp}$ 为 t 时刻热泵消耗的电功率, η_h^{hp} 为热泵的电转热效率。

5) 电制冷机.

电制冷机是一种典型的电转冷设备,具体模型为

$$q_{c,t}^{ef} = q_{c,t}^{ef} \eta_c^{ef}. \quad (7)$$

其中: $q_{c,t}^{ef}$ 为 t 时刻电制冷机输出的冷功率, $q_{c,t}^{ef}$ 为 t 时刻电制冷机输入的电功率, η_c^{ef} 为电制冷机的电转冷效率。

6) 吸收式制冷机.

吸收式制冷机为典型的热转冷设备,具体模型为

$$q_{c,t}^{ac} = q_{h,t}^{ac} \eta_c^{ac}. \quad (8)$$

其中: $q_{c,t}^{ac}$ 为 t 时刻吸收式制冷机输出的冷功率, $q_{h,t}^{ac}$ 为 t 时刻吸收式制冷机输入的热功率, η_c^{ac} 为热转冷效

率。

1.2.3 能源存储设备模型

能源存储设备是PIES中的一个关键设备,包括电储能设备和热储能设备,具体模型为

$$\text{SOC}_{t+1}^{\text{ees}} = (1 - \varepsilon_{\text{ees}}) \text{SOC}_t^{\text{ees}} + \left(\frac{q_{\text{ch},t}^{\text{ees}} \eta_{\text{ch}}^{\text{ees}}}{E_{\text{ees}}} - \frac{q_{\text{dis},t}^{\text{ees}}}{E_{\text{ees}} \eta_{\text{dis}}^{\text{ees}}} \right) \Delta t, \quad (9)$$

$$E_{t+1}^{\text{tes}} = (1 - \varepsilon_{\text{tes}}) E_t^{\text{tes}} + \left(q_{\text{ch},t}^{\text{tes}} \eta_{\text{ch}}^{\text{tes}} - \frac{q_{\text{dis},t}^{\text{tes}}}{\eta_{\text{dis}}^{\text{tes}}} \right) \Delta t. \quad (10)$$

其中: $\text{SOC}_{t+1}^{\text{ees}}$ 、 $\text{SOC}_t^{\text{ees}}$ 分别为 $t+1$ 、 t 时刻电储能设备的荷电状态, E_{t+1}^{tes} 、 E_t^{tes} 分别为 $t+1$ 、 t 时刻热储能设备的储热容量, ε_{ees} 、 ε_{tes} 分别为电储能设备和热储能设备的自损率, $q_{\text{ch},t}^{\text{ees}}$ 、 $q_{\text{dis},t}^{\text{ees}}$ 为 t 时刻电储能设备的充电和放电功率, $q_{\text{ch},t}^{\text{tes}}$ 、 $q_{\text{dis},t}^{\text{tes}}$ 为 t 时刻热储能设备的储热和放热功率, $\eta_{\text{ch}}^{\text{ees}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{ees}}$ 为电储能设备的充电和放电效率, $\eta_{\text{ch}}^{\text{tes}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{tes}}$ 为热储能设备的储热和放热功率; E_{ees} 为电储能设备的额定容量; Δt 为调度时长。

2 优化调度模型框架

2.1 调度模型框架

综合能源供应商、PIESO和综合能源用户的三方互动框架如图2所示。其中,综合能源供应商由外部电网和天然气供应商组成,主要向PIESO传达电力和天然气价格信号,并供给电力和天然气能源。PIESO既是PIES的调度中心也是运营商,通过向综合能源供应商购买能源并向用户出售能源的形式获取价差收益。同时,PIESO通过优化PIES调度策略和对用户实施基于需求响应补贴价格的激励型需求响应提高自身的收益。园区内的综合能源用户是指同时具有冷、热、电负荷需求且负荷存在一定可削减性的用户,

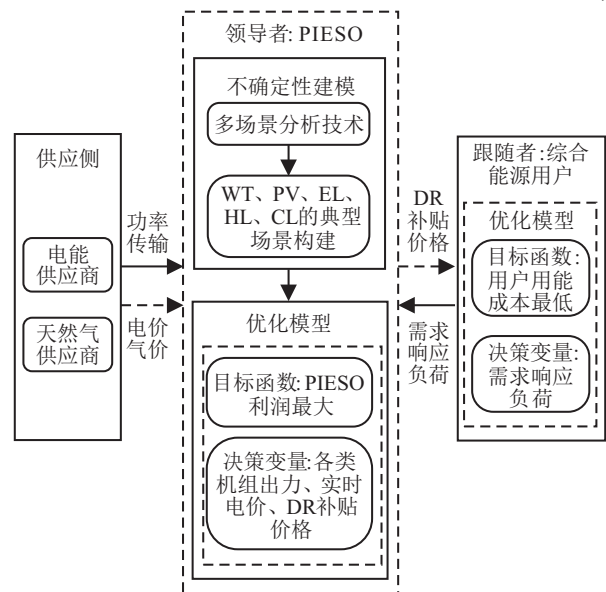


图2 调度模型框架

能够以自身用能成本最低为目标, 根据PIESO提供的需求响应补贴或价格信号自愿削减自身的电负荷需求. 因此, 本文建立了以PIESO为领导者、园区综合能源用户为跟随者的主从博弈模型, 各主体的目标函数和优化变量如图2所示. PIESO向用户提供需求响应补贴价格, 用户据此调整电负荷的削减量并上传至PIESO, PIESO基于用户的需求响应量重新调整PIESO内部各个设备的出力以及向综合能源供应商购买的能源.

2.2 不确定性建模

风电(wind turbine, WT)和光伏(photovoltaic, PV)的出力以及用户的电负荷(electric load, EL)、热负荷(heat load, HL)、冷负荷(cold load, CL)具有较强的随机性. 大量研究表明, 风速服从Weibull分布^[8], 光伏出力服从Beta分布^[15], 用户的用能负荷预测误差一般服从正态分布^[16], 概率分布表达式为

$$f(v_t) = \frac{k_t}{c_t} \left(\frac{v_t}{c_t}\right)^{k_t-1} \exp\left(-\left(\frac{v_t}{c_t}\right)^{k_t}\right), \quad (11)$$

$$f\left(\frac{q_t^s}{P_s^r}\right) = \frac{\Gamma(\alpha_t + \beta_t)}{\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)} \left(\frac{q_t^s}{P_s^r}\right)^{\alpha_t-1} \left(1 - \frac{q_t^s}{P_s^r}\right)^{\beta_t-1} = \frac{1}{B(\alpha_t, \beta_t)} \left(\frac{q_t^s}{P_s^r}\right)^{\alpha_t-1} \left(1 - \frac{q_t^s}{P_s^r}\right)^{\beta_t-1}, \quad (12)$$

$$f(q_t^d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{d,t}} \exp\left(-\frac{(q_t^d - \tilde{q}_t^d)^2}{2\sigma_{d,t}^2}\right). \quad (13)$$

其中: c_t, k_t 分别为Weibull分布的形状和尺度参数, q_t^s 为 t 时刻光伏发电机组的输出功率; α_t, β_t 分别为Beta分布的形状系数; $B(\alpha_t, \beta_t)$ 为Beta分布函数; Γ 为Gamma函数. 考虑负荷的随机性, 认为 t 时刻用户冷、电、气负荷 q_t^d 服从以负荷预测 \tilde{q}_t^d 为均值、 $\sigma_{d,t}$ 为标准差的正态分布, $\sigma_{d,t}$ 可取预测负荷的 $\gamma_{d,t}$, 即 $\sigma_{d,t} = \tilde{q}_t^d \times \gamma_{d,t}$, $\gamma_{d,t}$ 为标准差 $\sigma_{d,t}$ 占负荷预测出力的比例系数, 本文取冷、热、电负荷标准差占负荷预测出力的比例系数相等, 为 $\gamma_{e,t} = \gamma_{h,t} = \gamma_{c,t} = 10\%$ ^[17].

基于WT、PV、EL、HL和CL的概率分布, 选择拉丁超立方抽样技术进行多场景生成, 通过K-means法进行多场景聚类, 最终分别得到WT、PV、EL、HL和CL的典型场景 $n_w n_s n_e n_h n_c$, 共计 n_ω 个场景和对应的概率 $\theta_w, \theta_s, \theta_e, \theta_h, \theta_c$. 基于同步回代法进行场景缩减, 最终得到 n'_ω 个组合场景及其概率, 有

$$n_\omega = n_w n_s n_e n_h n_c, \quad (14)$$

$$\theta_\omega = \theta_w \theta_s \theta_e \theta_h \theta_c, \quad (15)$$

其中 n_ω 和 θ_ω 分别为场景数和场景对应的概率. 具体流程如图3所示.

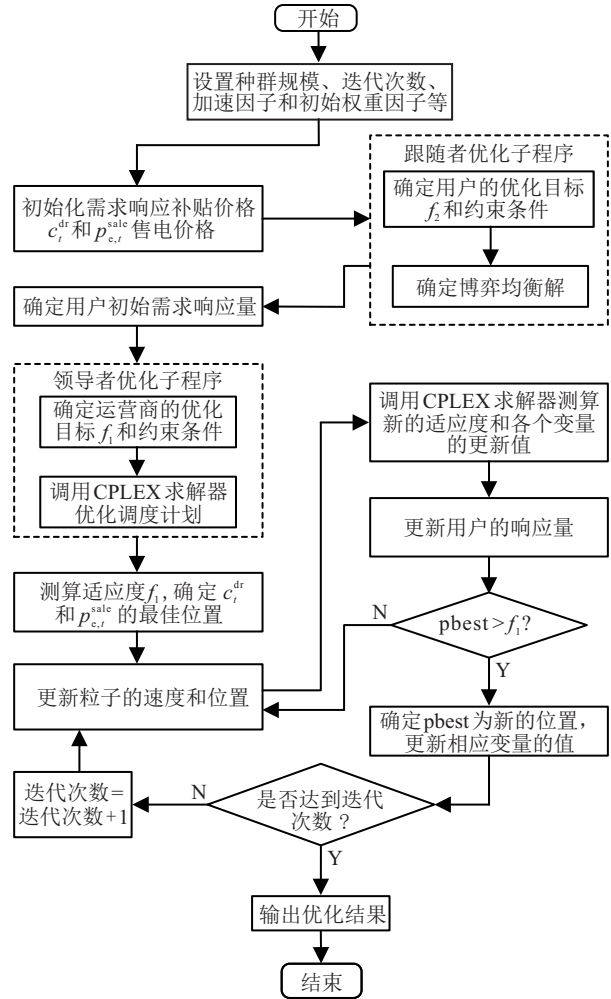


图 3 模型求解流程

3 基于主从博弈的PIES优化调度模型

3.1 各主体优化模型

3.1.1 领导者优化模型

PIESO作为领导者, 其利益诉求为日运行收益最大化, 收益函数为日售能收益与购能成本、机组运维成本、需求响应成本和污染物排放成本之差.

1) 优化目标为

$$\max f_1 = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \chi_\omega (R_e^1(\omega) - C_e^1(\omega) - C_{ope}(\omega) - C_{dr}^1(\omega) - C_p(\omega)). \quad (16)$$

其中: $\chi_{t,\omega}$ 为场景 ω 发生的概率, Ω 为总场景个数, f_1 为PIESO的日总收益, $R_e^1(\omega)$ 为场景 ω 下的售能收益, $C_e^1(\omega)$ 为场景 ω 下的购能成本, $C_{ope}(\omega)$ 为场景 ω 下各类机组的运维成本, $C_{dr}^1(\omega)$ 为需求响应成本, $C_p(\omega)$ 为污染物排放成本. 且有

$$R_e^1(\omega) = \sum_{t=1}^{24} (p_{e,t}^{sale} (q_t^e(\omega) - q_{e,t}^{dr}(\omega)) + p_h^{sale} q_t^h(\omega) + p_c^{sale} q_t^c(\omega)), \quad (17)$$

$$C_e^l(\omega) = \sum_{t=1}^{24} p_{e,t}^{\text{buy}} q_{e,t}^{\text{buy}}(\omega) + \sum_{t=1}^{24} p_g^{\text{buy}} q_t^{\text{gas}}(\omega), \quad (18)$$

$$C_{\text{ope}}(\omega) = \sum_{t=1}^{24} (c_{\text{gb}} q_{\text{h},t}^{\text{gb}}(\omega) + c_{\text{gt}} q_t^{\text{gt}}(\omega) + c_{\text{whb}} q_{\text{h},t}^{\text{whb}}(\omega) + c_{\text{hp}} q_{\text{h},t}^{\text{hp}}(\omega) + c_{\text{ef}} q_{\text{c},t}^{\text{ef}}(\omega) + c_{\text{ac}} q_{\text{c},t}^{\text{ac}}(\omega) + c_{\text{wt}} q_t^{\text{wt}}(\omega) + c_{\text{pv}} q_t^{\text{pv}}(\omega) + c_{\text{ees}} (q_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega) + q_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega)) + c_{\text{tes}} (q_{\text{ch},t}^{\text{tes}}(\omega) + q_{\text{dis},t}^{\text{tes}}(\omega))), \quad (19)$$

$$C_{\text{dr}}^l(\omega) = \sum_{t=1}^{24} c_t^{\text{dr}} q_{e,t}^{\text{dr}}(\omega), \quad (20)$$

$$C_p(\omega) = \sum_{t=1}^{24} (c_{\text{p},t}^{\text{gb}} q_t^{\text{gb}}(\omega) + c_{\text{p},t}^{\text{gt}} q_t^{\text{gt}}(\omega) + c_{\text{p},t}^{\text{grid}} q_{e,t}^{\text{buy}}(\omega)). \quad (21)$$

其中: $p_{e,t}^{\text{sale}}$ 为 t 时刻售电价格, $q_t^e(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下用户的用电负荷, $q_{e,t}^{\text{dr}}(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下用户削减的电力负荷, p_h^{sale} 为售热价格, $q_t^h(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下用户的用热负荷, p_c^{sale} 为售冷价格, $q_t^c(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下用户的用冷负荷, $p_{e,t}^{\text{buy}}$ 为 t 时刻向电网购买电力的价格, $q_{e,t}^{\text{buy}}(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下向电网购买的电量, p_g^{buy} 为购买天然气的价格, $q_t^{\text{gas}}(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下购买的天然气量, c_{gb} 、 c_{gt} 、 c_{whb} 、 c_{hp} 、 c_{ef} 、 c_{ac} 、 c_{wt} 、 c_{pv} 、 c_{ees} 和 c_{tes} 分别为 GB、GT、WHB、HP、EF、AC、WT、PV、EES 和 TES 的单位功率运维成本, c_t^{dr} 为 t 时刻的需求响应补贴, $c_{\text{p},t}^{\text{gb}}$ 、 $c_{\text{p},t}^{\text{gt}}$ 和 $c_{\text{p},t}^{\text{grid}}$ 分别为 GB、GT 和电网的污染物排放成本, $q_t^{\text{gb}}(\omega)$ 、 $q_t^{\text{gt}}(\omega)$ 分别为 t 时刻场景 ω 下 GB 和 GT 输出功率。

2) 约束条件.

① 功率平衡约束为

$$\begin{cases} q_t^w(\omega) + q_t^s(\omega) + q_t^{\text{gt}}(\omega) + q_{\text{dis},t}^{\text{ees}}(\omega) + q_{e,t}^{\text{buy}}(\omega) + q_{e,t}^{\text{dr}}(\omega) = \\ q_{e,t}^{\text{hp}}(\omega) + q_{e,t}^{\text{ef}}(\omega) + q_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega) + q_t^e(\omega), \\ q_{\text{h},t}^{\text{whb}}(\omega) + q_{\text{h},t}^{\text{hp}}(\omega) + q_{\text{dis},t}^{\text{tes}}(\omega) = \\ q_{\text{h},t}^{\text{ac}}(\omega) + q_{\text{ch},t}^{\text{tes}}(\omega) + q_t^h(\omega), \\ q_{\text{c},t}^{\text{ef}}(\omega) + q_{\text{c},t}^{\text{ac}}(\omega) = q_t^c(\omega), \\ q_t^{\text{gas}}(\omega) = q_t^{\text{gt}}(\omega) + q_t^{\text{gb}}(\omega). \end{cases}$$

其中: $q_t^e(\omega)$ 、 $q_t^h(\omega)$ 和 $q_t^c(\omega)$ 分别为 t 时刻场景 ω 下用户的用电、用热、用冷负荷, $q_t^{\text{gas}}(\omega)$ 为 t 时刻场景 ω 下天然气的输入量。

② 设备出力和爬坡约束为

$$0 \leq q_t^m(\omega) \leq q_{\text{max}}^m, \quad (22)$$

$$|q_{t+1}^m(\omega) - q_t^m(\omega)| \leq \Delta q_{\text{max}}^m \cdot \Delta t. \quad (23)$$

其中: $q_t^m(\omega)$ 为设备 m 在 t 时刻场景 ω 下的出力, q_{max}^m 为设备 m 的最大容量, Δq_{max}^m 为设备 m 的爬坡功率。

③ 联络线约束为

$$q_{\text{min}}^{\text{grid}} \leq q_{e,t}^{\text{buy}}(\omega) \leq q_{\text{max}}^{\text{grid}}, \quad (24)$$

其中 $q_{\text{min}}^{\text{grid}}$ 、 $q_{\text{max}}^{\text{grid}}$ 为 PIES 与配电网交互功率的最小、最大值。

④ 储能装置约束为

$$\begin{cases} 0 \cdot \lambda_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega) \leq q_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega) \leq q_{\text{max}}^{\text{ees}} \lambda_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega), \\ 0 \cdot \lambda_{\text{dis},t}^{\text{ees}}(\omega) \leq q_{\text{dis},t}^{\text{ees}}(\omega) \leq q_{\text{max}}^{\text{ees}} \lambda_{\text{dis},t}^{\text{ees}}(\omega), \\ 0 \cdot \lambda_{\text{ch},t}^{\text{tes}}(\omega) \leq q_{\text{ch},t}^{\text{tes}}(\omega) \leq q_{\text{max}}^{\text{tes}} \cdot \lambda_{\text{ch},t}^{\text{tes}}, \\ 0 \cdot \lambda_{\text{dis},t}^{\text{tes}} \leq q_{\text{dis},t}^{\text{tes}}(\omega) \leq q_{\text{max}}^{\text{tes}} \cdot \lambda_{\text{dis},t}^{\text{tes}}, \\ \text{SOC}_{\text{min}}^{\text{ees}} \leq \text{SOC}_t^{\text{ees}}(\omega) \leq \text{SOC}_{\text{max}}^{\text{ees}}, \\ E_{\text{min}}^{\text{tes}} \leq E_t^{\text{tes}}(\omega) \leq E_{\text{max}}^{\text{tes}}, \\ \lambda_{\text{ch},t}^{\text{ees}}(\omega) + \lambda_{\text{dis},t}^{\text{ees}}(\omega) \leq 1, \\ \lambda_{\text{ch},t}^{\text{tes}}(\omega) + \lambda_{\text{dis},t}^{\text{tes}}(\omega) \leq 1, \\ \text{SOC}_1^{\text{ees}}(\omega) = \text{SOC}_{24}^{\text{ees}}(\omega), \\ E_1^{\text{tes}}(\omega) = E_{24}^{\text{tes}}(\omega). \end{cases}$$

其中: $q_{\text{max}}^{\text{ees}}$ 为 t 时刻 EES 充/放电最大功率, $q_{\text{max}}^{\text{tes}}$ 为 TES 储/放热最大功率, $\text{SOC}_{\text{min}}^{\text{ees}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{max}}^{\text{ees}}$ 为 EES 在 t 时刻的最小、最大荷电状态; $E_{\text{min}}^{\text{tes}}$ 、 $E_{\text{max}}^{\text{tes}}$ 为 TES 在 t 时刻的最小、最大储热量; $\lambda_{\text{ch},t}^{\text{ees}}$ 、 $\lambda_{\text{dis},t}^{\text{ees}}$ 为 EES 充电与放电状态变量, $\lambda_{\text{ch},t}^{\text{tes}}$ 、 $\lambda_{\text{dis},t}^{\text{tes}}$ 为 TES 储热与放热状态变量, 均为 0-1 变量。

⑤ 成本约束. 为防止用户直接与能源供应商进行交易, 需保证用户从 PIES 购买能源的成本不高于用户直接从能源供应商购买能源的成本, 即

$$\sum_{t=1}^{24} p_{e,t}^{\text{sale}} q_t^e(\omega) + \sum_{t=1}^{24} p_h^{\text{sale}} q_t^h(\omega) + \sum_{t=1}^{24} p_c^{\text{sale}} q_t^c(\omega) \leq \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^{24} p_{e,t}^{\text{buy}} q_t^e(\omega) + \sum_{t=1}^{24} p_h^{\text{buy}} q_t^h(\omega) + \sum_{t=1}^{24} p_c^{\text{buy}} q_t^c(\omega), \quad (26)$$

其中 p_h^{buy} 、 p_c^{buy} 为向热/冷网购买热/冷的价格。

3.1.2 跟随者模型

综合能源用户作为跟随者, 其利益诉求为日用能成本最小化, 成本函数为日购能成本、需求响应成本和需求响应补贴收益之差。

1) 优化目标为

$$\min f_2 = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \chi_{\omega} (C_e^f(\omega) + C_{\text{dr}}^f(\omega) - R_{\text{dr}}^f(\omega)). \quad (27)$$

其中: $C_e^f(\omega)$ 为用户的购能成本, $C_{\text{dr}}^f(\omega)$ 为用户的需求响应成本^[11], $R_{\text{dr}}^f(\omega)$ 为用户参与需求响应获得的收

益. 有

$$\begin{cases} C_e^f(\omega) = R_e^l(\omega), \\ C_{dr}^f(\omega) = \sum_{t=1}^{24} (a(q_{e,t}^{dr}(\omega))^2 + bq_{e,t}^{dr}(\omega)), \\ R_{dr}^f(\omega) = C_{dr}^l(\omega), \end{cases} \quad (28)$$

其中 a 和 b 均为该用户需求响应成本系数.

2) 约束条件. 需求响应量约束为

$$0 \leq q_{e,t}^{dr}(\omega) \leq \mu_t^{\max} q_t^e(\omega), \quad (29)$$

其中 μ_t^{\max} 为 t 时刻用户最大响应负荷占比.

3.2 均衡解分析

综合能源用户作为跟随者, 只能被动地接受PIESO制定的补贴价格, 而用户的需求响应量反过来也会影响综合能源零售商的收益. 当领导者的最优补贴价格 c_t^{dr} 确定后, 利用解析式法可以确定用户在 t 时刻场景 ω 下的需求响应负荷 $q_{e,t}^{dr}(\omega)$ 为

$$q_{e,t}^{dr}(\omega) = \begin{cases} 0, & 0 \leq c_t^{dr} \leq b - p_{e,t}^{\text{sale}}; \\ \frac{c_t^{dr} + p_{e,t}^{\text{sale}} - b}{2a}, & b - p_{e,t}^{\text{sale}} < c_t^{dr} < 2a\mu_t^{\max} q_t^e(\omega) + b - p_{e,t}^{\text{sale}}; \\ \mu_t^{\max} q_t^e(\omega), & c_t^{dr} \geq 2a\mu_t^{\max} q_t^e(\omega) + b - p_{e,t}^{\text{sale}}. \end{cases} \quad (30)$$

由式(31)可知, 当 t 时刻的补贴价格确定后, 可以确定 t 时刻的电力需求响应量.

3.3 模型求解

对于本文而言, 粒子群算法能较好地模拟PIESO与用户间博弈互动的过程, 同时个体和群体的协同优化有助于快速找到博弈的均衡解. 因此, 考虑采用粒子群优化算法和 CPLEX 商业求解器相结合的方法求解模型的最优解. 对于领导者PIESO, 采用粒子群优化算法, 以PIESO利润最大为适应度函数, 迭代求解最优需求响应补贴价格 c_t^{dr} 和最优售电价格 $p_{e,t}^{\text{sale}}$. 采用 CPLEX 求解PIESO各个机组的最优出力; 对于跟随者用户, 结合需求响应补贴价格 c_t^{dr} 和售电价格 $p_{e,t}^{\text{sale}}$ 的值, 利用式(30)直接求解需求响应策略, 保证解的计算效率.

4 算例分析

4.1 参数设置

选取北方某典型工业园区为案例, 以一天24h为调度周期, 以1h为步长进行仿真. 天然气购买价格为0.25元/kWh, ϕ_g 为9.7kWh/m³, PIESO的售热价格和售冷价格分别为0.3元/kWh、0.65元/kWh^[18], 储能

设备自损率为0.0035, 运维费用为0.35元/kW. 假定该园区用户参与高峰时刻可削减需求响应, 用户响应成本系数 $a = 0.001$, $b = 2$, 各个时段的最大响应负荷占比 μ_t^{\max} 均为10%^[11], PIESO向电网购电上限为1000kW.

4.2 结果分析

为充分分析需求响应, 风电、光伏出力和冷、热、电负荷的不确定性对系统优化运行的影响, 考虑设置3类情景. 情景1为基础情景, 既不考虑需求响应, 也不考虑源荷不确定性; 情景2仅考虑需求响应; 情景3同时考虑需求响应和源荷不确定性.

4.2.1 情景1

情景1: 假设不考虑需求响应和风电、光伏出力预测值及冷、热、电负荷预测值的不确定性, PIESO的日运行收益如图4所示. 经过40次迭代结果收敛, PIESO的日运行收益为17539.85元, 用户用能成本为24670.03元. 此情景下为保证PIESO的日运行收益最大且用户用能成本不增加, 得到的日前调度计划如图5所示.

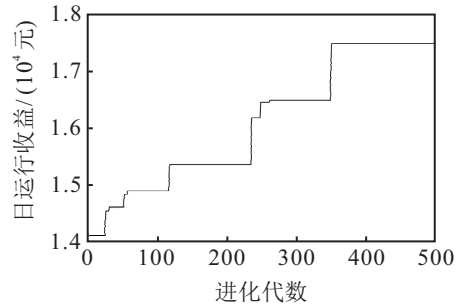


图4 情景1 PIESO日运行收益

从图5可以看出, 在1:00~6:00时间段, 相较于用热需求, 用户的用电需求和用冷需求处于低谷阶段, 且风电出力水平较高, 因此该阶段的用冷需求主要通过电制冷机满足, 用热需求则通过燃气锅炉和余热锅炉满足, 吸收式制冷机用热量为0. 在7:00~16:00时间段, 光伏出力开始增加, 风电出力减少, 用户的用热需求开始减少, 用电需求和用冷需求开始增加, 此时用户的用冷需求主要通过吸收式制冷机满足, 电制冷出力显著减少, 且随着12:00以后风电出力显著减少, PIESO开始从电网购买电量满足部分电负荷的需求. 在17:00~21:00时间段, PIESO购电量最高, 由于此时购电价格最高, 导致PIESO的购电成本也相应增加. 为减少17:00~21:00时间段的购电量, 此阶段的电制冷机用电量显著减少, 储能放电增加, 用户的用冷需求主要通过吸收式制冷机满足. 在22:00~24:00时间段, 随着风电出力的增加以及用电需求的减少, PIESO的购电量显著减少,

电制冷机的用电负荷增加,部分用冷需求通过电制冷机出力满足,同时此阶段用户用热需求增加,导致吸收式制冷机的用热负荷减少,吸收式制冷机的出力显著减少.

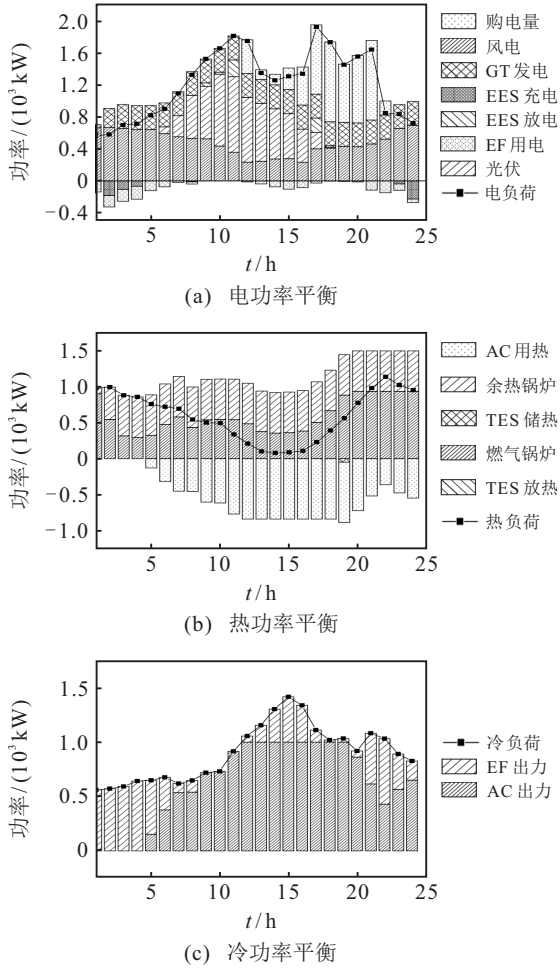


图5 情景1日前调度结果

4.2.2 情景2

情景2:考虑用户参与需求响应,此情景下PIESO的日运行收益如图6所示,经过100次迭代后结果收敛,PIESO的日运行收益为17980.22元,用户用能成本为23472.31元,相较于情景1,用户购能成本减少1070.76元,需求响应成本增加4631.29元,参与需求响应获得的收益增加4758.24元,PIESO的需求响应激励策略和实时电价制定策略如图7所示,日前调度结果如图8所示.

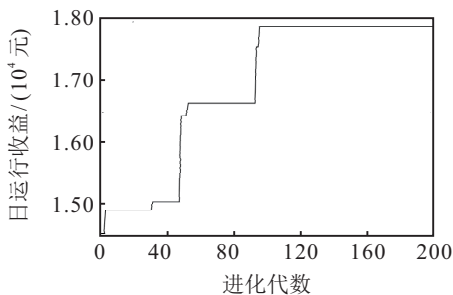


图6 情景2 PIESO日运行收益

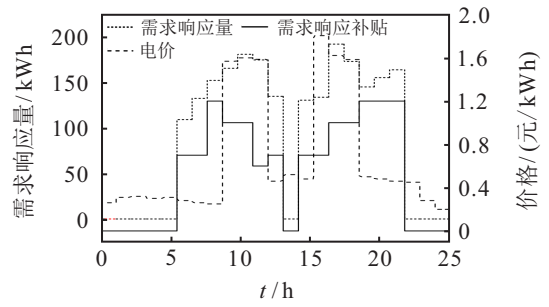


图7 需求响应量与电价和需求响应补贴之间的关系

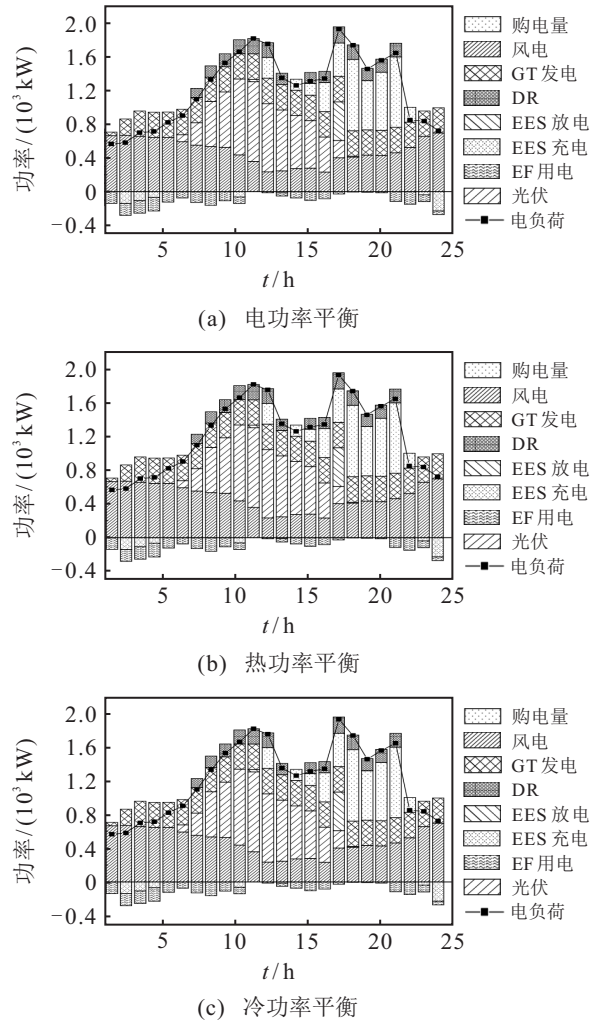


图8 情景2日前调度结果

从图7可以看出,同时对用户实施实时电价和需求响应激励补贴的综合激励措施后,用户的需求响应量占比达到了用电负荷的10%,为该用户最高响应量.

从图8可以看出,相较于情景1的调度结果,在7:00~16:00时间段,电制冷机的用电开始增加,吸收式制冷机的用热减少,因此余热锅炉承担了主要的热需求,其余的热负荷通过燃气锅炉满足.同时,由于用户参与了需求响应,12:00以后PIESO从电网购买的电量显著减少,表明需求响应项目的实施不仅为用户节省了用能成本,还为PIESO节省了购电成本和环

保成本. 储能设备主要在用能低谷时期进行充电, 在高峰时刻放能, 减少了高峰时刻从电网购买的电量, 提高了PIESO的运行经济性.

4.2.3 情景3

情景3: 考虑用户参与需求响应以及风电、光伏、电负荷、热负荷和冷负荷的不确定性. 图9为 $t = 12$ 时的场景削减结果, 各场景概率分别为0.20、0.24、0.27、0.12和0.16. 此情景下PIESO的日运行收益为18 589.8元, 用户用能成本为22 289.322元, 相较于情景2, 用户购能成本减少522.83元, 用户需求响应成本增加267.32元, 需求响应收益增加927.48元, 较情景1用户购能成本减少1 593.59元, 需求响应成本增加4 898.61元, 需求响应收益增加5 685.72元.

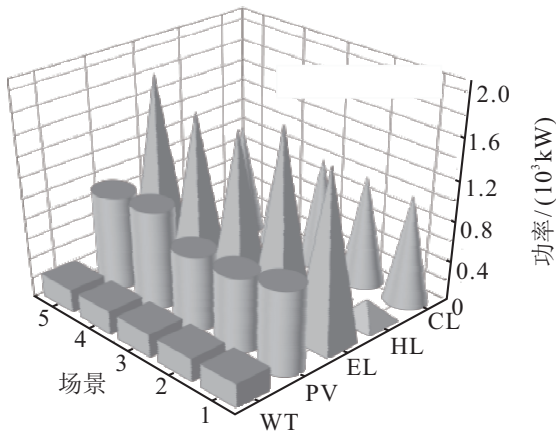


图9 $t = 12$ 时5种典型不确定性组合的概率

由情景3中5个典型场景的调度结果可知, 由于风电、光伏、电负荷、热负荷和冷负荷的不确定性, 导致各类机组的出力值相较于情景1和情景2有偏差. 以 $t = 12$ 和 $t = 18$ 时为例, 不同场景下PIESO向电网购买的电量如图10所示. 场景3在 $t = 18$ 时刻的购电量最高, 主要原因在于该场景下该时刻的电负荷预测值最高, 场景5在 $t = 12$ 时刻的购电量最低, 主要原因在于该场景下该时刻的光伏出力预测值最高. 表明与情景2相比, 情景3调度结果的偏差主要来自源荷预测值的不确定性.

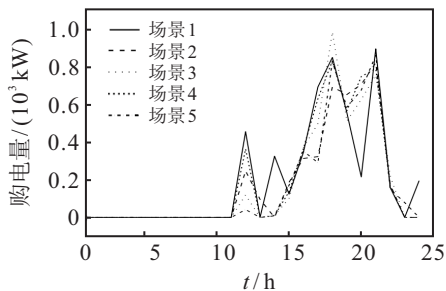


图10 不同场景下的购电量

通过对比3个情景下PIESO的收益和用户的用能成本可知, 考虑需求响应以及风电、光伏、电负荷、

热负荷和冷负荷预测值不确定性的情景下, PIESO的收益最高, 用户用能成本最低, 具体如图11所示.

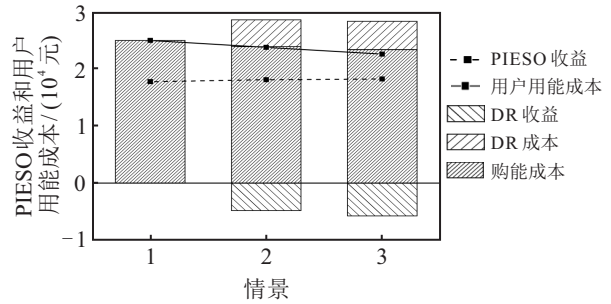


图11 不同情景下PIESO的收益和用户用能成本

5 结论

本文针对园区级的综合能源系统, 考虑需求响应激励机制和源荷多类不确定场景, 构建了以PIESO为领导者, 以综合能源用户为跟随者的主从博弈优化模型, 模型分别以领导者日运行收益最大, 跟随者日用能成本最小为优化目标, 并提出了可行的求解算法. 通过实际分析可知, 所构建的模型与未考虑需求响应和源荷不确定性的基础情景相比, PIESO日运行收益提高了5.99%, 综合能源用户的日用能成本减少了9.65%, 充分验证了所提出模型的有效性.

参考文献(References)

- [1] 曾鸣. 打好实现碳达峰碳中和这场硬仗[N]. 人民日报, 2021-07-28(009).
(Zeng M. Fight a hard battle to achieve carbon peak and carbon neutralization[N]. The People's Daily, 2021-07-28(009).)
- [2] 曾鸣, 许彦斌. 综合能源系统要义: 源网荷储一体化+多能互补[N]. 中国能源报, 2021-04-12(004).
(Zeng M, Xu Y B. Principle of integrated energy system: Integration of generation grid, load and storage +multi-energy complementarity[N]. China Energy News, 2021-04-12(004).)
- [3] 司方远, 韩英华, 袁怀通, 等. 计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 97-107.
(Si F Y, Han Y H, Yuan H T, et al. Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints[J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 97-107.)
- [4] 张子阳, 张聂鹏, 王满商, 等. 面向可再生能源高比例消纳的综合能源系统优化规划模型研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(8): 1085-1091.
(Zhang Z Y, Zhang N P, Wang M S, et al. Research on optimal planning model of integrated energy system for high proportion of re-newable energy utilization[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(8): 1085-1091.)
- [5] 朱刘柱, 尹晨旭, 王宝, 等. 计及风/光/荷不确定性的综合能源站随机规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2021,

- 37(5): 96-105.
(Zhu L Z, Yin C X, Wang B, et al. Stochastic programming of integrated energy station considering the uncertainties of wind power, photovoltaic and load[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 96-105.)
- [6] Turk A, Wu Q W, Zhang M L, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated multi-energy system for flexibility synergy and uncertainty balancing[J]. Energy, 2020, 196: 117130.
- [7] 姚志力, 王志新. 计及风光不确定性的综合能源系统两层级协同优化配置方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4521-4531.
(Yao Z L, Wang Z X. Two-level collaborative optimal allocation method of integrated energy system considering wind and solar uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4521-4531.)
- [8] Chen J J, Qi B X, Rong Z K, et al. Multi-energy coordinated microgrid scheduling with integrated demand response for flexibility improvement[J]. Energy, 2021, 217: 119387.
- [9] 林国营, 卢世祥, 郭昆健, 等. 基于主从博弈的电网公司需求响应补贴定价机制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 59-67.
(Lin G Y, Lu S X, Guo K J, et al. Stackelberg game based incentive pricing mechanism of demand response for power grid corporations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 59-67.)
- [10] Haghifam S, Dadashi M, Zare K, et al. Optimal operation of smart distribution networks in the presence of demand response aggregators and microgrid owners: A multi follower Bi-Level approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102033.
- [11] Li P, Wang Z X, Wang J H, et al. Two-stage optimal operation of integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response[J]. Energy, 2021, 225: 120256.
- [12] Ding Y X, Xu Q S, Xia Y X, et al. Optimal dispatching strategy for user-side integrated energy system considering multiservice of energy storage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106810.
- [13] Yuan G X, Gao Y, Ye B. Optimal dispatching strategy and real-time pricing for multi-regional integrated energy systems based on demand response[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1424-1446.
- [14] Ju L W, Tan Z F, Yuan J Y, et al. A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response[J]. Applied Energy, 2016, 171: 184-199.
- [15] 赵洪斌. 多时间尺度下基于相关系数的光伏电站出力特性分析[J]. 青海大学学报, 2020, 38(5): 60-65.
(Zhao H B. Analysis on the output characteristics of photovoltaic power station based on the correlation coefficient over multiple time scales[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(5): 60-65.)
- [16] 孙国强, 袁智, 许晓慧, 等. 碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J]. 电力自动化设备, 2017(2): 97-103.
(Sun G Q, Yuan Z, Xu X H, et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017(2): 97-103.)
- [17] Qiu H F, Zhao B, Gu W, et al. Bi-level two-stage robust optimal scheduling for AC/DC hybrid multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5455-5466.
- [18] 吴鸣, 季宇, 郑楠, 等. 基于序列运算的风光储混合微电网可信容量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 251-258.
(Wu M, Ji Y, Zheng N, et al. Assessment on credible capacity of hybrid microgrid containing wind/photovoltaic/storage based on sequence operation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 251-258.)

作者简介

王俐英(1997—), 女, 博士生, 从事综合能源系统运行优化、电力需求侧管理等研究, E-mail: wangliying@ncepu.edu.cn;

林嘉琳(1998—), 女, 硕士生, 从事综合能源系统运行优化、电力市场等研究, E-mail: 747785319@qq.com;

宋美琴(1998—), 女, 硕士生, 从事综合能源系统运行优化、电力市场等研究, E-mail: 1953165975@qq.com;

董厚琦(1993—), 男, 博士生, 从事综合能源系统运行优化、电力需求侧管理等研究, E-mail: 349237801@qq.com;

曾鸣(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事综合能源系统运行优化、电力需求侧管理、能源互联网等研究, E-mail: zengmingbj@vip.sina.com.