

彭爽, 杨仁增, 何旺. 计及用户需求响应的电热综合能源系统博弈优化策略[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(1): 123-129.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250119

计及用户需求响应的电热综合能源系统博弈优化策略

彭爽¹, 杨仁增², 何旺³

(1 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2 贵州理工学院 贵州省电力大数据重点实验室, 贵阳 550003;
3 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节 550081)

摘要: 由于传统集中式优化方法难以揭示多主体之间的交互作用, 电力企业和消费者间的利益博弈关系有待进一步研究, 本文提出一种基于演化博弈的考虑需求响应电热综合能源系统双层协同优化模型。首先对含电热气综合能源系统的互动优化进行建模, 上层运营商将售能价格发给用户, 下层用户群通过调节自身用能策略并提交给运营商, 以及运营商针对用户响应程度的反馈, 调节供能价格, 两者都以自身收益的最大化为目标, 直至双方实现博弈决策平衡。最后, 以中国某实际工业园区为算例进行了研究, 用双层协同优化模式——蚂蚁狮子优化算法和 YALMIP+GUROBI 优化包在 MATLAB 环境下实现求解, 并论证了该运行方案, 该方案将有助于改善综合能源体系中的社会福利。

关键词: 综合能源系统; 需求响应; 演化博弈; 定价策略; 蚁狮算法

中图分类号: TM731

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)01-0123-07

Game optimisation strategies for electricity and heat integrated energy systems accounting for user demand response

PENG Shuang¹, YANG Renzeng², HE Wang³

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

2 Key Laboratory of Electric Big Data of Guizhou, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

3 Bijie Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd, Bijie 550081, Guizhou, China)

Abstract: This paper proposes a two-layer collaborative optimization model for demand responsive electric heating integrated energy systems based on evolutionary games because traditional centralized optimization methods struggle to reveal the interaction between multiple agents and the game relationship between integrated energy operators and users needs further exploration. The integrated energy system with electric heating gas is first modeled for interactive optimization. While the lower level user groups modify their energy consumption tactics and report them to the operators, the top level operators communicate energy sales prices to consumers. The operators respond to consumer comments and modify the cost of energy supply. Until a game equilibrium is established, each player tries to maximize their own interests. Finally, a two-layer collaborative optimization model—Ant Lion Optimization Algorithm and YALMIP+GUROBI Optimization Package—was used to solve in the MATLAB environment, showing that this operating strategy can enhance the social welfare of the comprehensive energy system. The analysis used an actual industrial park in China as the example.

Key words: integrated energy system; demand response; evolutionary game; pricing strategy; Ant Lion algorithm

0 引言

随着全球能源需求的不断攀升, 环境污染问题也变得越来越突出。因此, 将电热综合能源系统

(IEHS) 与清洁能源相结合, 已经成为改善能源消费结构的有效手段^[1-2]。研究如何引导系统内部用户合理使用能源, 提高系统运营商和用户在 IEHS 中的利益, 具有重要意义。

基金项目: 贵州省科技基金(黔科合基础 20181068)。

作者简介: 彭爽(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力综合能源系统; 何旺(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 经济调度, 优化调度。

通信作者: 杨仁增(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电子化系统的运行与控制。Email: yangrze@foxmail.com。

收稿日期: 2023-07-27

作为综合能源市场的主要参与者,综合能源服务运营商(IEHSO)与用户之间的博弈研究一直是热点之一^[3-4]。通过运营商与用户之间的积极互动,可以有效提高各自收入^[5]。许多学者对IEHSO的动态定价和最优调度进行了深入研究。张静等^[6]提出了IEHSO参与碳排放管理的电力系统低碳调度模型,建立了电力、天然气和IEHSO的联合优化模型,并使用交替方向乘数法实现了该模型的有效求解。王海洋等^[7]进一步考虑了风力发电的不确定性和风电场之间的相关性,并建立了IEHSO的两阶段随机优化模型,同时考虑了热量价格。YANG等^[8]关注IEHSO的市场运作机制,并使用非合作博弈模型来描述不同IEHSO之间的竞争关系。

上述文献研究了IEHSO的运行调度和市场交易,但研究主要集中于不同IEHSO之间的竞争关系,很少有集中于IEHSO与电热用户之间的互动关系的研究。演化博弈是解决动态博弈问题的一种方法,其动态结果描述有限理性条件下,用户群体的行为趋势^[9-10]。目前,演化博弈论提出并应用了新的演化博弈机制和进化规则^[11]。梁涛等^[12]利用深度学习建立对综合能源系统优化调度模型,有效实现能源灵活利用,提高综合能源系统的经济性和低碳性。

武瑞泽等^[13]采用蜻蜓算法对综合能源系统经济调度模型进行求解,对经济调度进行合理优化分配,实现了在各种设备出力合理的条件下大幅缩减成本。栗然等^[14]探索了基于仿生算法机制求解电力系统的最优潮流问题,验证了改进算法在潮流计算中的优越性能,对实际电力系统的规划和运行具有参考意义。上述方法在电力需求响应中有一些应用,但是在含需求响应电热综合能源系统中应用较少。

因此,本文建立了一个互动优化的演化博弈模型。在模型中,上层运营商向用户提供售能价格,而下层用户则通过调整可削减的电负荷、转移的电负荷和减少的热负荷来向运营商提交反馈。运营商会根据用户的反馈来调整供能价格,以实现上层运营商的经济效益最大化,并让跟随的消费者剩余最大化,最终实现博弈的平衡。为提高能源利用灵活性,本文利用双层协同优化模型-蚂蚁狮子优化算法^[15]和YALMIP+GUROBI优化包^[16],在MATLAB环境中进行求解,并以实际案例证明,该策略可以有效地改善能源供应和消耗的效率。

1 电热综合能源系统架构

IEHS系统拥有一种多层次的能源分配模式,通

过将电能、气能以及其他多种能源相结合,提高能源利用效率。旨在为客户提供多种能源选择,并确保其长期稳定的电力供应。本文构建了含需求响应的IEHS框架,如图1所示。

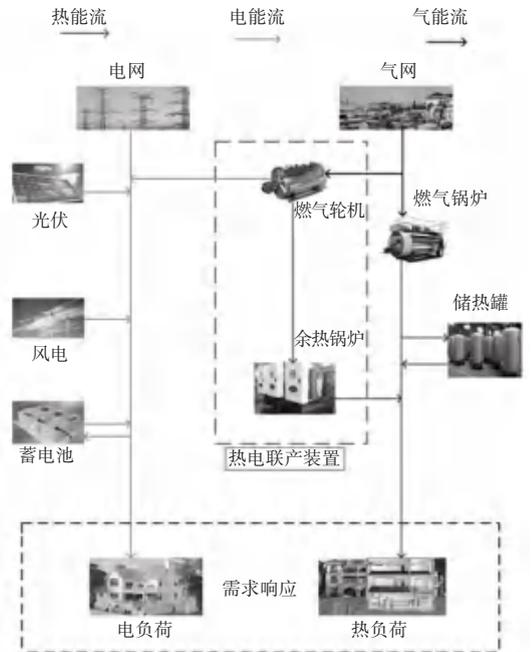


图1 IEHS架构

Fig. 1 Structure of IEHS

IEHS的能源分配模式包括电能、气能以及其他多种能源。在这种能源分配模式下,热电联产装置(CHP)和燃气锅炉(GB)的气能由上级网提供,剩余电能可出售给上级电网。能量耦合设备有CHP和GB,能实现电热能量双向流动^[17],CHP由燃气轮机(GT)、余热锅炉(WHB)组成,运行方式为热电解耦,可以根据系统的不同工况来调整运行;蓄电池储能(ES)和储热罐(HS)分别在高峰时储存能量,低谷时释放能量,与电网和热网中进行能量交换。采用DR技术能够有效地减少负载变化,从而达到减少高峰和低谷的目的,同时也能够节省运营费用。

1.1 热电联产机组

热电联产机组由燃气轮机(GT)和余热锅炉(WHB)组成,其简化物理模型如下:

$$\begin{cases} Q_{GT,t} = a(P_{GT,t})^2 + bP_{GT,t} + c\kappa_{GT,t} \\ H_{GT,t} = G_{GT,t} \cdot \eta_{GT}^h \end{cases} \quad (1)$$

$$H_{WHB,t} = H_{GT,t} \cdot \eta_{WHB}^h \quad (2)$$

式中: $P_{GT,t}$ 、 $H_{GT,t}$ 分别为燃气轮机的输出电、热功率, $Q_{GT,t}$ 为燃气轮机的输入气功率, η_{GT}^e 为燃气轮机的发电效率, $\kappa_{GT,t}$ 为燃气轮机的启停状态,是0~1变量, a 、 b 、 c 为燃气轮机的成本系数, $H_{WHB,t}$ 为余热锅炉的输出热功率, η_{WHB}^h 为热回收效率。

1.2 燃气锅炉

燃气锅炉(GB)物理模型如下:

$$H_{GB,t} = \tau_{GB} Q_{GB,t} \quad (3)$$

$$0 \leq H_{GB} \leq H_{GB,max} \quad (4)$$

式中: $H_{GB,t}$ 为燃气锅炉的输出热功率, $Q_{GB,t}$ 为燃气锅炉的输入气功率, τ_{GB} 为燃气锅炉转换效率, $H_{GB,max}$ 为燃气锅炉产热最大功率。

1.3 分布式能源机组

分布式能源机组,其中包括风机、太阳能发电机组等。由于风能发电的可靠性和可用的能源的实际发电量通常低于预期,其约束如下:

$$P_{WT,t} \leq P_{WT,F} \quad (5)$$

$$P_{PV,t} \leq P_{PV,F} \quad (6)$$

式中: $P_{WT,t}$ 、 $P_{WT,F}$ 分别为 t 时刻风电实际出力和预测出力, $P_{PV,t}$ 、 $P_{PV,F}$ 分别为 t 时刻光伏实际出力和预测出力。

1.4 蓄电池

由于风电的反调峰特性,蓄电池可以在负荷高峰期时段放电,作为改善源荷匹配的辅助手段。蓄电池的储能容量和充放电功率关系模型如下:

$$E_t^{EES} = (1 - \mu) E_{t-1}^{EES} + \sum_{ch} P_t^{EES,in} \eta_{t,ch} - \frac{P_t^{EES,dis}}{\eta_{t,dis}} \Delta t \quad (7)$$

式中: E_t^{EES} 为时段 t 电储能的储电容量, μ 为蓄电池的损失率, $P_t^{EES,in}$ 、 $P_t^{EES,dis}$ 分别为时段 t 内电储能充、放电功率。

1.5 储热罐

储热罐是一种用于储存和利用热能的设备,其储热量与放热功率之间存在联系,表示如下:

$$S_{t+1} = (1 - \lambda_{loss}) S_t + \left(H_{in} \tau_{in} - \frac{H_{out}}{\tau_{out}} \right) \Delta T \quad (8)$$

式中: S_t 为储热罐在时间 t 时的储热量, λ_{loss} 为热耗散系数, H_{in} 、 H_{out} 及 τ_{in} 、 τ_{out} 分别为储热罐的储放热功率与效率。

2 IEHSO 动态定价博弈模型

2.1 运营商 (IEHSO) 模型

IEHSO 通过综合分析供电侧的运行情况和负荷侧的需求设立了价格政策,旨在实现最佳的经济效益,可表示如下:

$$\max f_{IEHSO} = \sum_t^T (C_{sell,t} - C_{buy,t} - C_{op,t} - C_{CT-GB,t}) \quad (9)$$

式中: T 为总时段数(24 h), $C_{sell,t}$ 为第 t 时段向用户侧的供能收入, C_{buy} 为购能成本, $C_{op,t}$ 为设备运维成

本, $C_{CT-GB,t}$ 为燃料成本,表示如下:

1) 供能收入

$$C_{sell,t} = (P_{l,t} c_{s,t}^e + H_{l,t} c_{s,t}^h) \Delta t \quad (10)$$

式中: Δt 为时间长度, $P_{l,t}$ 和 $H_{l,t}$ 分别为 t 时刻用户侧的电、热负荷功率, $c_{s,t}^e$ 和 $c_{s,t}^h$ 分别为 t 时刻出售给用户侧电(热)能价格。

2) 购能成本

$$C_{Buy} = \sum_{t=1}^T (P_{gb,t} c_{gb,t}^e - P_{gs,t} c_{gs,t}^e) \quad (11)$$

式中: $P_{gb,t}$ 、 $P_{gs,t}$ 分别为 t 时刻从上级电网购、售电功率, $c_{gb,t}^e$ 、 $c_{gs,t}^e$ 分别为 t 时刻上网电价和售电电价。

3) 运维成本 C_{op}

$$C_{op} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 C_{mi} | P_{i,t} | \Delta t \quad (12)$$

式中: i 取 1, 2, 3, 4 分别代表风机、光伏、蓄电池、储热罐, C_{mi} 为设备 i 的单位维护成本, $P_{i,t}$ 为设备 i 的出力。

4) 燃料成本 C_{CT-GB}^t

$$C_{CT-GB}^t = a_e (P_{CT,t})^2 + b_e P_{CT,t} + c_e + a_h (H_{GB,t})^2 + b_h H_{GB,t} + c_h \quad (13)$$

a_e 、 b_e 、 c_e (a_h 、 b_h 、 c_h) 为燃气轮机(锅炉)的成本系数。为了避免直接与电网交易,确保 IEHS 的售能价格低于市场价格,则需要满足如下约束:

$$c_{gb,t}^e < c_{s,t}^e < c_{gs,t}^e \quad (14)$$

$$c_{hmin,t}^h < c_{hs,t}^h < c_{hmax,t}^h \quad (15)$$

式中: $c_{hmin,t}^h$ 、 $c_{hmax,t}^h$ 分别为热能最低和最高价格限制。

2.2 需求响应模型

根据其对于相同的电价变化的反映,把负载区分成两类:可降低负载(CL)和可移动负载(SL)。两类负载相关建模^[18]如下。

1) 可降低负载

CL 可以通过比较 DR 前后的电价变化来决定是否降低自身的负荷。这种方法可以用价格需求弹性矩阵来表示,该矩阵的定义如下:

$$k_{t,j} = \frac{\Delta P_{L,t} / P_{L,t}^0}{\Delta \pi_j / \pi_j^0} \quad (16)$$

式中: $\Delta P_{L,t}$ 为 DR 后 t 时刻的负荷变化量, $P_{L,t}^0$ 为 t 时刻初始负荷, $\Delta \pi_j$ 为需求响应后 j 时刻电价变化量, π_j^0 为 j 时刻初始电价^[18]。

DR 后 t 时刻的可削减负荷变化量 $\Delta P_{cl,t}$ 如下:

$$\Delta P_{cl,t} = P^{(0)} \sum_{cl,t} \sum_{j=1}^{24} K_{CL}(t,j) \frac{\pi_j - \pi_j^0}{\pi_j^0} \quad (17)$$

式中: $P_{cl,t}^{(0)}$ 为 t 时刻初始可削减负荷量, $\mathbf{K}_{CL}(t,j)$ 为 CL 价格需求弹性矩阵, 为对角阵; π_j 为 j 时刻电价。

2) 可移动负荷

IEHSO 提供的可转移负荷功能, 允许用户根据电价变动和自身需求, 在指定的售出价格范围内, 将高峰时段的负荷转移至低谷或平谷时段, 从而实现更加灵活的负荷调整^[18]。

2.3 负荷模型

根据 IEHSO 提供的售出价格, 优化自身的电热负荷, 以降低电力消耗、转移电力和降低热量消耗。目标函数尽可能地提高消费者的剩余, 即通过提高用户的效用函数来降低能源成本, 具体表现如下:

$$\max f_{\text{loader}} = \sum_{t=1}^T [f_{u,t} - (P_{l,t} c_{s,t}^e + H_{l,t} c_{s,t}^h)] \Delta t \quad (18)$$

式中: $f_{u,t}$ 为用户的效用函数, 表示用户对购电、购热的满意度, 通常为非减凸函数:

$$f_{u,t} = v_e P_{l,t} - \frac{\alpha_e}{2} (P_{l,t})^2 + v_h H_{l,t} - \frac{\alpha_h}{2} (H_{l,t})^2 \quad (19)$$

式中: v_e 、 α_e 、 v_h 、 α_h 分别为对消费电能和热能的偏好系数, 反映用户对能源的需求^[18]。

消费者的电负荷可以分为两类: 一类是固定的 (FL), 另一类是可以通过调整或转移来改变的, 具体表达如下:

$$P_{l,t} = P_{fl,t} + \Delta P_{cl,t} + \Delta P_{sl,t} \quad (20)$$

式中: $P_{fl,t}$ 为 t 时刻的固定负荷。

文中的热负荷包含两部分: 固定热负荷和可削减热负荷, 如下所示:

$$H_{l,t} = H_{f,t} + \Delta H_{cl,t} \quad (21)$$

式中: $H_{f,t}$ 为 t 时刻用户最低标准的固定热负荷, 但可以通过调整用户的舒适度和供能充裕度来降低热负荷, 从而达到节能的目的, 以 $\Delta H_{cl,t}$ 表示。为实现消减需遵守以下约束:

$$0 \leq \Delta H_{cl,t} \leq \Delta H_{cl-\max,t} \quad (22)$$

式中: $\Delta H_{cl-\max,t}$ 为 t 时刻可削减热负荷的最大限度。

2.4 演化博弈策略

如图 2 所示, IEHSO 的售能价格将影响用户的电、热消耗量。同时, 用户的电能和热能消耗也将影响 IEHSO 的定价。本文将 IEHSO 分为上层, 结合市场价格和内部燃气轮机和燃气锅炉出力限制, 以最大化自身利益为目标, 制定电热交易价格; 下层为各用户, 收到 IEHSO 的交易价格信息后, 以最大化消费者剩余为目标, 调整用能策略。IEHSO 根据用户

的反馈再次调整能源交易价格, 进行下一次博弈。

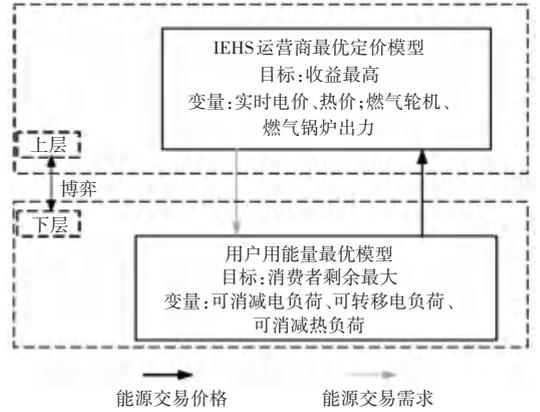


图 2 演化博弈策略

Fig. 2 Evolutionary game strategy

博弈模型的优化函数如下:

$$F_{\text{IEHSO}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{sell},t} - C_{\text{buy},t} - C_{\text{op},t} - C_{\text{GT-CB},t}) \quad (23)$$

$$F_{\text{loader}} = \sum_{t=1}^T [f_{u,t} - (P_{l,t} c_{s,t}^e + H_{l,t} c_{s,t}^h)] \Delta t \quad (24)$$

当下层各用户根据上层运营商的策略做出最佳反应, 运营商得到最佳策略时, 博弈达到平衡。

3 模型求解

蚁狮算法是根据蚁狮幼虫狩猎蚂蚁的行为机制所定义的启发式优化算法。蚁狮通常沿着圆形路径移动, 并用其下颚在沙土中制成的漏斗形坑, 并在底部隐蔽等待蚂蚁入坑。一旦蚂蚁落入陷阱, 蚁狮将不断把沙子扔向陷阱的外缘以阻止猎物的任何逃跑尝试将其捕食。最后, 蚁狮为后续的目标猎物修改坑形以准备下一次狩猎。

针对上述演化博弈模型, 采用分布式优化方法对各用户及运营商的收益函数进行优化求解^[19], 上层运营商的决策采用蚁狮优化算法进行求解; 用户群的优化目标是二次函数, 故利用 YALMIP + GUROBI 工具包在 MATLAB 环境下的优化方法求解互动流程, 提高求解速度和精度。

分布式算法数学模型及求解流程:

步骤 1 输入初始数据并设置参数。其中包括各用户典型日热、电负荷, 风、光伏出力分时电价及相关经济参数和设备运行参数。

步骤 2 设置约束条件并结合运行参数初始化蚂蚁群和掠食者 (蚁狮群) (该种群包括运营商售能价格 $(c_{s,0}^e, c_{s,0}^h)$ 及运营商优化目标 f_{IEHSO}^0), 并择选适应度最高的蚁狮作为初代精英蚁狮。

步骤 3 运营商将出售给用能侧的电、热 $(c_{s,0}^e,$

$c_{s,t,0}^h$) 价格发给用户。

步骤 4 调用 GUROBI 求解器来评估用户的效益, 并将结果 $(P_{l,t}, H_{l,t})$ 提交给运营商。

步骤 5 使用蚁狮优化算法求解运营商模型。

步骤 6 通过机会法则选择蚁狮进行捕食。因为 IEHSO 动态定价博弈策略的约束条件, 其可行性受到上下限的限制, 为了确保生成的解能够满足博弈策略的要求, 必须采用无量纲化的方法, 具体表现如下:

$$\begin{cases} X(t) = [0, \text{cumsum}(2r(t_1 - 1)) \cdots \text{cumsum}(2r(t_k - 1))] \\ X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (d_i^t - c_i^t)}{(b_i - a_i)} + c_i^t \end{cases} \quad (25)$$

式中: $X(t)$ 是一组蚂蚁随机移动的次数, cumsum 是计算累积的结果, k 为最大迭代次数, 而 $r(t)$ 为一个随机函数, 定义如下:

$$r = \begin{cases} 1, & \text{rand} > 0.5 \\ 0, & \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

其中, a_i, b_i 为解析参数在随机移动时的上边界和下边界, c_i^t 和 d_i^t 为解析参数在 t 次迭代后的上边界和下边界。

步骤 7 在迭代过程中, 将每个试验解和局部最优解定义于目标函数, 确定其可行性。第 $t + 1$ 代第 i 个蚂蚁的位置:

$$\text{Ant}_i^{t+1} = \frac{R_A^t(l) + R_E^t(l)}{2} \quad (27)$$

式中: $R_A^t(l)$ 和 $R_E^t(l)$ 为 t 次迭代后蚂蚁在对应级别蚁狮和精英蚁狮的环境中随机移动发生的值, l 为移动区间内发生的值。

步骤 8 评估精英蚁狮和蚁狮适应度, 当某只蚂蚁的适应度变得高于蚁狮时, 即认为其被蚁狮捕获, 蚁狮通过观察蚂蚁的行动情况确定其位置, 表示如下:

$$Al_j^t = \text{Ant}_i^t, \text{Iff}(\text{Ant}_i^t) > f(Al_j^t) \quad (28)$$

式中: Ant_i^t 为第 i 只蚂蚁在第 t 代的位置, 为适应度函数。

步骤 9 若达到最大迭代次数, 则输出全局最优解, 即 $c_{s,t,1}^e, c_{s,t,1}^h, J_{\text{IEHSO}}^t$ 和各设备出力。

4 仿真分析

4.1 参数设置

本文探讨位于北方的工业园区, 其运行周期为 24 h, 每小时的运行时长为 1 h, 参数见表 1。蓄电池

和储热罐参数见表 2; 分时电价及相关经济参数见表 3。负荷群对电、热消费的偏好系数 $v_e, \alpha_e, v_h, \alpha_h$ 分别为 0.001、1.5、0.001 2、1.1^[19]。

表 1 设备参数

Table 1 Equipment parameters

| ID | 类型 | P_{\min}/kW | P_{\max}/kW | C_m |
|----|------|----------------------|----------------------|-------|
| 1 | 微燃机 | 150 | 500 | 0.025 |
| 2 | 燃气锅炉 | 50 | 400 | 0.026 |
| 3 | 电锅炉 | 0 | 500 | 0.017 |
| 4 | 风电 | 0 | 100 | 0.020 |
| 5 | 光伏 | 0 | 100 | 0.024 |

表 2 储能系统参数

Table 2 Energy storage system parameters

| 类型 | 充放率 | 自耗率 | C_m | 最大容量/kW | 最小容量/kW |
|-----|-----|-------|-------|---------|---------|
| 电储能 | 0.9 | 0.001 | 0.018 | 30 | 150 |
| 热储能 | 0.9 | 0.01 | 0.016 | 0 | 100 |

表 3 RIES 经济参数

Table 3 RIES economic parameter

| 参数 | 数值/(元 · kWh ⁻¹) | |
|----------|-----------------------------|------|
| | 峰值 | 谷值 |
| 分时电价 | 1.25 | 0.40 |
| 上网电价 | 0.80 | 0.35 |
| 热价上限 | 0.50 | 0.20 |
| 热价下限 | 0.20 | 0.45 |
| 平均售电电价 | 0.75 | 2.00 |
| 平均售热热价 | 0.45 | |
| 供热中断惩罚系数 | 2.00 | |

电力价格型需求响应自弹性系数取 -0.2, 交叉弹性系数取 0.03; 设用户可削减热负荷占需求电负荷总量的 20%; 燃气轮机和燃气锅炉的成本系数分别为 0.001 3、0.16、0、0.000 5、0.11、0^[19]。系统初始电负荷、热负荷曲线以及风光联合出力预测见图 3。

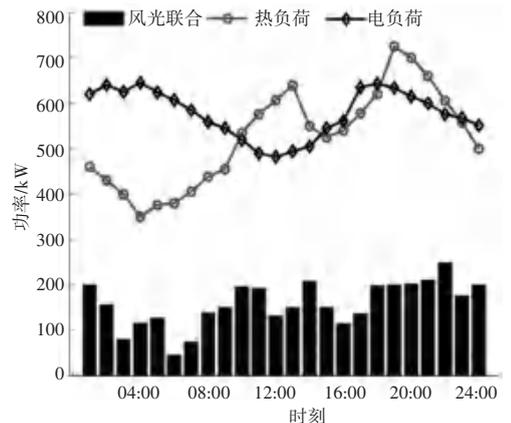


图 3 电热负荷及风光联合

Fig. 3 Electric heating load and scenery combination

4.2 仿真结果分析

综合能源运营商和用户的迭代收敛结果如图4和图5所示,在迭代次数约为180次左右达到收敛。在上层博弈中,综合能源运营商通过不断调整自身售能价格,其收益呈现逐渐上升的趋势;在下层博弈中,用户通过结合上层领导者的售能价格合理调整自身用能策略,其收益函数出现波动,双方有明显的博弈互动,并最终都到达了收敛。通过上述博弈分析,可以很好地反映出双方之间的博弈过程。当达到博弈平衡后,其策略不再改变,最终导致综合能源运营商的收益为5 075.40元,跟随着用户消费者剩余量为13 867.05元。

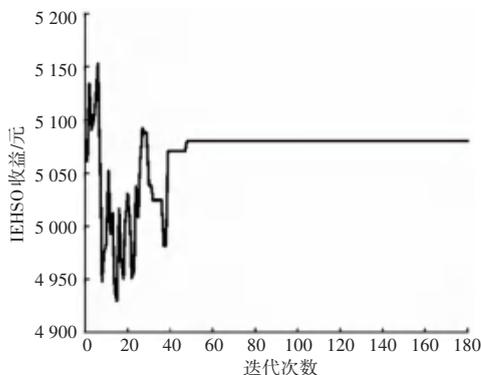


图4 运营商收益收敛结果

Fig. 4 IEHSO revenue convergence results

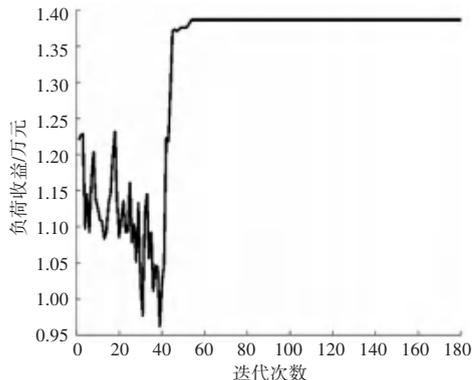


图5 用户收益收敛结果

Fig. 5 User revenue convergence results

如图6所示,上层运营商采取的定价策略是:与电网交互时采用上网电价,分时电价则采用分时电价,优先消纳系统内新能源,并将这些策略融入大电网定价体系,为用能端提供更优惠价格;运营商售电价格波动趋势与电网分时电价一致,目的是激励用户购电。同样,热价的分析与电价类似,其购热价格与用户热负荷趋势相关,如图7所示。

用户侧优化前后的电负荷曲线如图8所示。由此可见,电力负载变得更平稳并且CL对于高峰期的电力需求更加敏感,可在高需求期间(11:00—

13:00、18:00—21:00)对负荷削减;SL将部分高需求期间负荷转移到低需求期间,使得用电情况更加稳定。

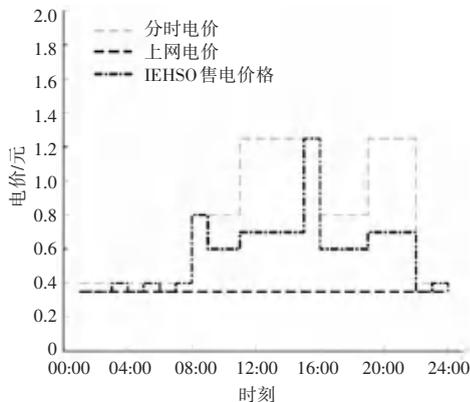


图6 动态电价曲线

Fig. 6 Dynamic electricity price curve

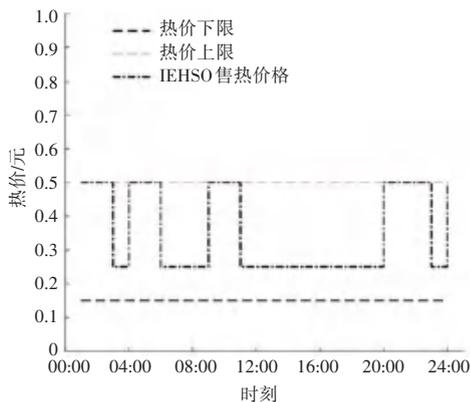


图7 逐时热价曲线

Fig. 7 Hourly heat price curve

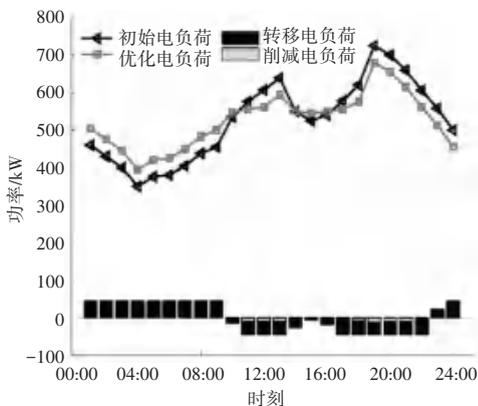


图8 需求响应前后用户电负荷优化曲线

Fig. 8 Optimization curve of customer electric load before and after demand response

经过优化后,使负荷曲线平滑,实现了削峰填谷,优化后的电负荷曲线波动明显下降。

根据图9,热负荷总体上有所下降,但在11:00—13:00的时间段内,原本的需求量略微降低,为了确保用户的舒适度,这一降幅也相对较小。

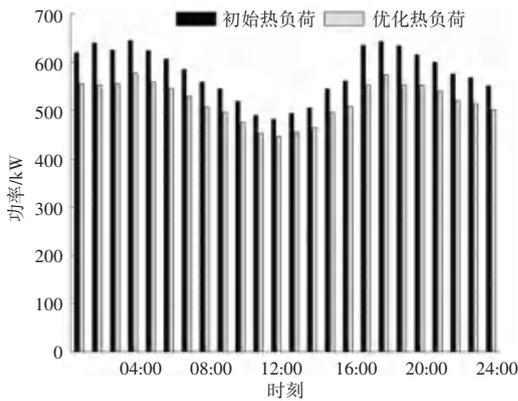


图 9 需求响应前后用户热负荷优化曲线

Fig. 9 Optimization curve of user thermal load before and after demand response

优化之后,用户侧的消费者剩余^[20]从 12 270.03 元增加到 13 867.05 元,其中用能成本从 12 217.16 元降低到 11 825.56 元,而效用函数值^[20]却从 24 487.19 元增加到 24 610.57 元。

当综合能源运营商按照传统的以电定热模式运行时,收益为 4 669.27 元,若按照本文提出的优化运行方法,收益提高到 5 075.40 元,说明本文提出的运行方法可以降低用能成本,提高用能的经济性。

5 结束语

本文提出一种基于演化博弈的含需求响应电热综合能源系统双层协同优化模型。将综合能源运营商作为上层,用户群作为下层,求解双方在追求利益最大化时的互动策略,算例结果表明:

(1) 经过双层协同优化,电力负荷峰谷差显著降低,负荷曲线变得更加平缓,说明双层协同优化技术不仅能够有效地满足用户的日常需求,而且还能够有效地抑制峰谷差,达到良好的削峰填谷效果;

(2) 在上层博弈中,电热综合能源运营商通过不断调整自身供能价格与燃气轮机和燃气锅炉出力,收入逐渐增加。在下层博弈中,用户通过调整可削减电负荷、可转移电负荷以及可削减热负荷上报给运营商,运营商对于用户响应做出反馈,使双方利益最大化。

(3) 上层 IESHO 售电价格、售热价格的波动趋势与电网的分时电价一致,可以鼓励用户积极购电、购热。

参考文献

- [1] 李健,李雪峰,张娜,等. 计及储能备用效益的电热综合能源系统优化调度模型[J]. 电网技术,2021,45(10):3851-3859.
- [2] 史喆,金宇飞,王勇,等. 基于用户舒适度区间约束的电热区域综合能源系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):168-177.
- [3] 修志坚. 计及需求响应的含火—储新能源电力系统调峰辅助服务策略研究[D]. 吉林:东北电力大学,2022.
- [4] 张涛,郭现彤,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.
- [5] 孙云涛,宋依群,姚良忠,等. 售电市场环境下的电力用户选择售电公司行为研究[J]. 电网技术,2018,42(4):1124-1131.
- [6] 张静,张鹏,林晶怡,等. 考虑用户综合需求响应的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 科学技术与工程,2021,21(6):2314-2320.
- [7] 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.
- [8] YANG Z, HU J, AI X, et al. Transitive energy supported economic operation for multi-energy complementary micro grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12:4-17.
- [9] 窦迅,王俊,王湘艳,等. 基于演化博弈的区域电-气互联综合能源系统用户需求侧响应行为分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3775-3786.
- [10] 翟学文. 基于随机演化博弈的综合能源系统交易与优化调度策略研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2023.
- [11] 喻洁,曹阳,鄢鹏阳,等. 考虑用户需求响应博弈推演的区域综合能源运营策略[J]. 电网技术,2024,48(9):3745-3757.
- [12] 梁涛,柴露露,谭建鑫,等. 基于深度强化学习算法的氢耦合电热综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力自动化设备,1-16 [2024-10-10]. DOI:10.16081/j.epae.202405010
- [13] 伍瑞泽,尤敬尧,段洁,等. 基于改进蜻蜓算法的综合能源系统经济调度[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2024,29(3):90-97.
- [14] 栗然,张凡,靳保源,等. 基于改进蚁狮算法的电力系统最优潮流计算[J]. 电力科学与工程,2017,33(9):15-22.
- [15] 陈伟,杨盘隆,吴宣够. 改进蚁狮优化算法及其工程应用[J]. 传感技术学报,2023,36(4):565-574.
- [16] 度巍,张星宇. 基于 Matlab 工具箱 YALMIP 的 Dantzig-Wolfe 分解算法实现研究[J]. 电脑知识与技术,2024,20(3):39-42.
- [17] 崔杨,修志坚,刘闯,等. 计及需求响应与火—储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4403-4415.
- [18] 魏震波,马新如,郭毅,等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设,2022,43(1):1-9.
- [19] 周长城,马溪原,郭晓斌,等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统互动优化运行方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):74-80.
- [20] 魏震波,任小林,黄宇涵. 考虑综合需求响应的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力建设,2020,41(7):92-299.