

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240604

基于数字孪生模型的主从博弈掺氢综合能源系统 最优决策方法

蒋炜¹, 郭志民², 庞宇航³, 张彤彤³, 王亚男³, 赵健², 丁慧霞³, 王心妍⁴

(1. 国家电网有限公司, 北京 100032; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000;
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 4. 国网河南省电力公司信息通信分公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 建立了一个包含综合能源系统运营商(integrated energy system operator, IESO)、基于碳捕集系统(carbon capture system, CCS)的能源供应商(energy supplier, ES)以及考虑需求响应的负荷聚合商(load aggregator, LA)的综合能源系统(integrated energy system, IES)数字孪生模型系统。首先, 构建了 IES 系统模型, 针对不同系统类型制定相应的约束条件, 同时引入弃风弃光惩罚方法。其次, 采用一种基于主从博弈的 IES 分布式协同优化运行策略, 并结合遗传算法和二次规划算法求解模型, 得到 IES 最优调度方案。在该主从博弈的框架中, IESO 作为主导者, 与 CCS 的 ES 和考虑需求侧响应的 LA 作为跟随者协同优化, 优化 IESO 的定价策略、ES 的出力计划和用户需求。通过数字孪生系统获得实时的 IES 数据, 对不同维度、不同格式的数据进行统一处理分析后, 再利用所提方法进行优化, 得到 IES 最优决策方案。最后, 通过数字孪生模型获得 IES 基础运行数据并基于扩展的 IEEE39 节点系统和 6 节点供暖系统仿真实验得到了 IESO 最优价格策略、ES 最佳出力计划及 LA 最佳用能计划, 使得供能更加经济、用能更加合理。基于数字孪生模型的主从博弈的决策方法能够使电网摆脱对历史运行数据的强依赖, 降低决策的外推误差, 实现 IES 优化决策技术升级。

关键词: 综合能源系统; 主从博弈; 数字孪生; 碳捕集系统; 需求侧响应

Optimal decision-making method for hydrogen-blended integrated energy system based on digital twin models and Stackelberg game theory

JIANG Wei¹, GUO Zhimin², PANG Yuhang³, ZHANG Tongtong³, WANG Yanan³, ZHAO Jian², DING Huixia³, WANG Xinyan⁴

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. State Grid Henan Information & Telecommunication Company (Data Center), Zhengzhou 450000, China)

Abstract: A digital twin model of an integrated energy system (IES) is established, incorporating an integrated energy system operator (IESO), an energy supplier (ES) equipped with carbon capture system (CCS), and a load aggregator (LA) that considers demand response. First, the IES system model is constructed, with tailored constraints for different system components and the introduction of a penalty mechanism for wind and solar curtailment. Then, an IES distributed cooperative optimal operation strategy based on a leader-follower (Stackelberg) game is adopted, and the strategy is solved by combining genetic algorithm and quadratic programming algorithm to obtain the optimal IES scheduling scheme. In this game theory framework, IESO acts as the lead player, while the CCS-based ES and the demand response LA act as followers, jointly optimize the IESO's pricing strategy, ES contribution plan, and user demand schedules. Real-time IES data is obtained by the digital twin system. After the data of different dimensions and formats are processed and analyzed in a unified manner, the proposed method is used to optimize the IES optimal decision scheme. Finally, by using the digital twin model to obtain the basic operation data, simulation experiments based on the extended IEEE 39-node system and 6-node heating system yield IESO optimal price strategy, ES optimal output plan, and LA optimal energy use plan, leading to more economical energy supply and more rational energy consumption. The leader-follower game-based decision-making method based on a digital twin model, allows the power grid to move beyond heavy reliance on historical data, reduces extrapolation errors in decision-making, and enables a technical upgrade in IES optimization strategies.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5700-202224202A-1-1-ZN).

Key words: integrated energy system; Stackelberg game; digital twin; carbon capture system; demand response

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5700-202224202A-1-1-ZN)“面向县域能源互联网高效协同的数字孪生化管理及互动技术研究”

0 引言

随着全球能源形势的变化, 高效、清洁能源正在逐渐融入现行能源系统。为了适应这一变化, 综合能源系统(integrated energy system, IES)应运而生。该系统旨在满足当前能源需求, 促进分布式能源的普及, 支持新能源的大规模应用, 同时实现各种能源之间的互补, 提高社区内能源的有效利用, 因而在研究领域受到了广泛关注^[1-3]。可再生能源的增加为电力系统的稳定运行带来了一系列问题, 包括频率和电压的波动, 增加了系统的安全风险。同时, 电网中发电机组和负荷的可调节能力有限, 难以有效应对可再生能源产生的波动电力, 导致大量的风电和光伏能源被浪费^[4]。IES 具有多能流耦合、多时间尺度和多运行工况等多样化的特点, 这使得其优化运行具有极高的挑战性^[5-9]。

数字孪生(digital twin, DT)是一种集成了多尺度、多物理量、多概率的建模与仿真技术。该项技术在对大型系统进行仿真时具有明显的优势^[10-13]。通过数字孪生技术, 可以对综合能源系统的各种能源资源、设备、负荷和网络进行集成建模, 并提供系统的关键性参数。在本文中 IES 关键设备的运行参数可由数字孪生模型获得。

查阅相关的文献, 目前的研究一类优化是以 IES 供能侧为主要的优化目标, 而在一定程度上忽略了负荷侧的需求侧响应问题。文献[14]提出了一种基于火电厂源侧的 IES, 重点分析了 IES 的火电厂源侧主要运行参数对经济性和效率优化目标的影响。文献[15]则研究了燃气轮机的热电联产、太阳能与压缩空气储能系统的制冷、制热、供电一体化系统(combined cooling, heating and power, CCHP), 主要目标是从投资成本和效率的角度出发, 采用非支配排序遗传算法-II 进行多目标优化。对于 IES 的另一类优化则是以需求侧响应为主要优化目标。文献[16]综述了需求侧响应的概念、框架和模型, 并评述了其优化运行与求解方法。而文献[17]和文献[18]则重点分析了在 CCHP 系统中可控负荷的优化调度对减少系统综合运行成本、减小负荷峰谷差值等方面的作用。IES 迅速发展, 源荷之间的相互作用日益显著, 电价和负荷需求之间相互影响。此外, IES 包括多个不同的系统, 受到的影响因素各不相同, 因此其优化运行是一个大规模复杂系统的优化问题, 具有参数和变量繁多的特点。因此, 可以采用博弈论来进行优化求解。博弈论是研究多个决策主体之间发生利益冲突时, 各主体如何根据自身能力和所掌握信息做出合理决策的理论^[19]。

此外, 氢能作为一种清洁能源, 可以与电力、热力、燃气多能互补, 实现节能减排。目前, 已经有相关研究证明了燃气掺氢(hydrogen blending, HB)技术对 IES 优化运行的重要作用。近几年, 燃气 HB 技术已经得到大力发展, 早在 2020 年, 全球燃氢机组接近 1/2 为通用电气公司的机组, 超过 75 台燃气轮机以掺氢燃料运行, 其中 50 台掺氢比例 50%以上, 机组遍布美国、欧洲、韩国、中国等地^[20-21]。本文采用的掺氢比范围为 0%~30%, 在此掺氢范围内, 相关燃气掺氢发电技术已十分成熟, 且常规燃气设备基本无需改动, 能保证混合燃气燃烧时的安全性。

根据前述内容, 本文提出的 IES 包括综合能源系统运营商(integrated energy system operator, IESO)、基于碳捕集系统(carbon capture system, CCS)的能源供应商(energy supplier, ES)和考虑需求响应(demand response, DR)的负荷聚合商(load aggregator, LA)模型。通过数字孪生系统获得实时的 IES 数据, 对不同维度、不同格式的数据进行统一处理分析后, 再利用本文所提方法进行优化, 得到 IES 最优决策方案。在主从博弈框架下, 研究分布式协同优化运行策略, 以 IESO 作为领导者, 将考虑 DR 的 LA 作为跟随者, 同时优化 IESO 的定价策略、ES 的输出计划和用户需求。本文详细介绍了 IES 的能源交易过程和数学模型, 并采用遗传算法和二次规划相结合的算法进行求解, 最后通过案例进行验证。

1 综合能源系统模型

1.1 综合能源系统运营商

1.1.1 目标函数

IESO 的目标函数用式(1)表示。

$$\max F_{\text{IESO}} = \sum_{t=1}^T (f_s^t + f_g^t - f_b^t) \quad (1)$$

式中: F_{IESO} 为 IESO 的目标函数; T 表示 24 h; f_s^t 表示 t 时刻销售电和热的收入; f_g^t 表示 t 时刻与电网的能源交换成本; f_b^t 表示 t 时刻从 ES 购买能源的成本。

此外, 在本文中多个变量 t 和变量 $t-1$ 均以上标形式存在。因此, 在后文中以上标形式出现的变量 t 和变量 $t-1$ 均表示 t 时刻和 $t-1$ 时刻。

t 时刻销售电和热的收入 f_s^t 可用式(2)表示。

$$f_s^t = (P_{\text{el,dr}}^t - P_{\text{EL}}^t - P_{\text{CCS,to}}^t) p_{\text{el,s}}^t + Q_{\text{hl,dr}}^t p_{\text{hl,s}}^t \quad (2)$$

式中: $P_{\text{el,dr}}^t$ 和 $Q_{\text{hl,dr}}^t$ 分别表示 DR 后的电负荷和热负荷; P_{EL}^t 为电解槽(electrolyzer, EL)的充电功率;

$P'_{CCS,to}$ 表示来自 CCS 的总电力消耗量; $p'_{el,s}$ 和 $p'_{hl,s}$ 分别表示售电和售热价格。

t 时刻电网的能源交换成本 f'_g 可用式(3)表示。

$$f'_g = \max(P'_n - P'_{supply}, 0)p'_{el,tup} + \min(P'_n - P'_{supply}, 0)p'_{el,tbp} \quad (3)$$

$$P'_n = P'_{el,dr} - P'_{EL} - P'_{CCS,to} \quad (4)$$

$$P'_{supply} = \sum_{k=1}^{n_{wind}} P'_{wind,k} + \sum_{k=1}^{n_{pv}} P'_{PV,k} + P'_{HBS-GT} \quad (5)$$

式中: P'_{supply} 和 P'_n 分别为电力的供应和需求; $P'_{wind,k}$ 和 $P'_{PV,k}$ 分别为第 k 台风电机组和光伏机组并网发电的功率; P'_{HBS-GT} 为掺氢燃气汽轮机(hydrogen blending system-gas turbine, HBS-GT)的发电功率; $p'_{el,tup}$ 和 $p'_{el,tbp}$ 分别为上网电价(time-of-use pricing, TUP)和分时电价(time-based pricing, TBP); n_{wind} 和 n_{pv} 分别为风力涡轮机和光伏涡轮机的数量。

t 时刻从 ES 购买能源的成本 f'_b 可用式(6)表示。

$$f'_b = f'_{el,b} + f'_{hl,b} \quad (6)$$

$$f'_{el,b} = P'_{supply} p'_{el,b} \quad (7)$$

$$f'_{hl,b} = (Q'_{HBS-GT} + Q'_{HBS-GB})p'_{hl,b} \quad (8)$$

式中: $f'_{el,b}$ 和 $p'_{el,b}$ 分别表示购电的成本和价格; $f'_{hl,b}$ 和 $p'_{hl,b}$ 分别表示购热的成本和价格; Q'_{HBS-GT} 和 Q'_{HBS-GB} 分别表示 HBS-GT 和掺氢燃气锅炉(hydrogen blending system-gas boiler, HBS-GB)产生的热功率。

1.1.2 约束条件

为了确保 ES 侧和 LA 侧不直接与电网交易, 应确保 IESO 购买和销售价格符合式(9)和式(10)所示的约束条件。

$$\begin{cases} p'_{el,tup} < p'_{el,s} < p'_{el,tbp} \\ p'_{el,tup} < p'_{el,b} < p'_{el,tbp} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} p'_{hl,min} < p'_{hl,s} < p'_{hl,max} \\ p'_{hl,min} < p'_{hl,b} < p'_{hl,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $p'_{hl,max}$ 和 $p'_{hl,min}$ 分别为售热的最高价格和最低价格。

此外, $p'_{el,s}$ 和 $p'_{hl,s}$ 也必须符合平均价格的约束条件, 具体可以用式(11)表示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T p'_{el,s} \leq T \cdot \bar{p}_{el,max} \\ \sum_{t=1}^T p'_{hl,s} \leq T \cdot \bar{p}_{hl,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\bar{p}_{el,max}$ 和 $\bar{p}_{hl,max}$ 分别表示电均价和热均价的最大值。

1.2 基于碳捕集与存储的能源供应商模型

1.2.1 单元系统模型

1) 氢能混合系统

氢能混合系统(hydrogen blending system, HBS)包含 EL、氢气罐(hydrogen tank, HT)、HBS-GT 和 HBS-GB, 分别对这 4 个部分建模^[22]。

EL 产生氢气并将其传递给 HT, 可以用式(12)表示, 其约束条件用式(13)表示。

$$L'_{HT} = L'_{HT} - \frac{P'_{EL}}{n_{H_2}} \eta_{EL} t \quad (12)$$

$$\begin{cases} P'_{EL,max} \leq P'_{EL} \leq 0 \\ P'_{EL,min} \leq |P'_{EL} - P'_{EL}^{(t-1)}| \leq P'_{EL,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: L'_{HT} 为 HT 的容量; n_{H_2} 表示氢的热值; η_{EL} 为 EL 的转换效率, 其值取 0.68^[23]; $P'_{EL,max}$ 为 EL 的最大消耗功率; $P'_{EL,max}$ 和 $P'_{EL,min}$ 分别为 EL 爬坡功率的最大值和最小值。

HBS-GT 的模型可以用式(14)和式(15)表示^[24]。

$$P'_{HBS-GT} = (M'_{HBS-GT,H_2} n_{H_2} + M'_{HBS-GT,og} n_{og}) \eta_{HBS-GT}^p \quad (14)$$

$$Q'_{HBS-GT} = (M'_{HBS-GT,H_2} n_{H_2} + M'_{HBS-GT,og} n_{og}) \eta_{HBS-GT}^T \quad (15)$$

式中: P'_{HBS-GT} 和 Q'_{HBS-GT} 分别为 HBS-GT 产生的电功率和热功率; M'_{HBS-GT,H_2} 和 $M'_{HBS-GT,og}$ 分别为 HBS-GT 消耗氢气和天然气的质量; n_{og} 为天然气的热值; η_{HBS-GT}^p 和 η_{HBS-GT}^T 分别为 HBS-GT 电和热的转换效率, 其值分别取 0.4 和 0.3。

HBS-GT 掺氢比 $Y'_{H_2,HBS-GT}$ 可以用式(16)表示。

$$Y'_{H_2,HBS-GT} = \frac{\frac{M'_{HBS-GT,H_2}}{\rho_{H_2}}}{\frac{M'_{HBS-GT,og}}{\rho_{og}} + \frac{M'_{HBS-GT,H_2}}{\rho_{H_2}}} \quad (16)$$

式中: ρ_{H_2} 和 ρ_{og} 分别为氢气和天然气的密度。

HBS-GT 模型的约束条件如式(17)一式(21)所示。

$$\eta_{HBS-GT}^p + \eta_{HBS-GT}^T \leq 1 \quad (17)$$

$$0 \leq P'_{HBS-GT} \leq P'_{HBS-GT,max} \quad (18)$$

$$0 \leq Q'_{HBS-GT} \leq Q'_{HBS-GT,max} \quad (19)$$

$$P'_{HBS-GT,CP} \leq P'_{HBS-GT} - P'_{HBS-GT}^{(t-1)} \leq P'_{HBS-GT,max} \quad (20)$$

$$Q'_{HBS-GT,CP} \leq Q'_{HBS-GT} - Q'_{HBS-GT}^{(t-1)} \leq Q'_{HBS-GT,max} \quad (21)$$

式中: $P'_{HBS-GT,max}$ 和 $Q'_{HBS-GT,max}$ 分别为 HBS-GT 最大输出电

功率和热功率; $P_{\text{HBS-GT,CP}}^{\max}$ 和 $P_{\text{HBS-GT,CP}}^{\min}$ 分别为 HBS-GT 电爬升功率的最大值和最小值; $Q_{\text{HBS-GT,CP}}^{\max}$ 和 $Q_{\text{HBS-GT,CP}}^{\min}$ 分别为 HBS-GT 热爬升功率的最大值和最小值。

HBS-GB 的数学模型用式(22)表示。

$$Q_{\text{HBS-GB}}^t = (M_{\text{HBS-GB,H}_2}^t n_{\text{H}_2} + M_{\text{HBS-GB,og}}^t n_{\text{og}}) \eta_{\text{HBS-GB}}^T \quad (22)$$

$$Y_{\text{H}_2, \text{HBS-GB}}^t = \frac{\frac{M_{\text{HBS-GB,H}_2}^t}{\rho_{\text{H}_2}}}{\frac{M_{\text{HBS-GB,og}}^t}{\rho_{\text{og}}} + \frac{M_{\text{HBS-GB,H}_2}^t}{\rho_{\text{H}_2}}} \quad (23)$$

式中: $Y_{\text{H}_2, \text{HBS-GB}}^t$ 为 HBS-GB 掺氢比; $M_{\text{HBS-GB,H}_2}^t$ 和 $M_{\text{HBS-GB,og}}^t$ 分别为 HBS-GB 消耗氢气和天然气的质量; $\eta_{\text{HBS-GB}}^T$ 为 HBS-GB 的热转换效率, 其值取 0.92。

HBS-GB 的模型约束条件用式(24)表示。

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{\text{HBS-GB}}^t \leq Q_{\text{HBS-GB}}^{\max} \\ Q_{\text{HBS-GB,CP}}^{\min} \leq Q_{\text{HBS-GB}}^t - Q_{\text{HBS-GB}}^{(t-1)} \leq Q_{\text{HBS-GB,CP}}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $Q_{\text{HBS-GB}}^{\max}$ 为 HBS-GB 最大输出功率; $Q_{\text{HBS-GB,CP}}^{\max}$ 和 $Q_{\text{HBS-GB,CP}}^{\min}$ 分别为 HBS-GB 爬坡功率的最大值和最小值。

此外, 为了防止氢气供应不足, 将从氢交易市场购买氢气。HT 容量 L_{HT}^t 的变化可以表示为

$$L_{\text{HT}}^t = L_{\text{HT}}^{(t-1)} + \left(-\frac{P_{\text{EL}}^t}{n_{\text{H}_2}} \cdot \eta_{\text{EL}} - M_{\text{CH}_4, \text{H}_2}^t - M_{\text{HBS-GB, H}_2}^t - M_{\text{HBS-GT, H}_2}^t + M_{\text{H}_2, \text{pu}}^t \right) \Delta t \quad (25)$$

$$L^{\min} \leq \frac{L_{\text{HT}}^t}{L_{\text{HT, rated}}} \leq L^{\max} \quad (26)$$

式中: $M_{\text{CH}_4, \text{H}_2}^t$ 和 $M_{\text{H}_2, \text{pu}}^t$ 分别表示甲烷化所需的氢质量和从氢交易市场购买的氢质量; $L_{\text{HT, rated}}$ 表示 HT 的额定容量; L^{\max} 和 L^{\min} 分别表示 HT 氢水平(levels of hydrogen, LOH)的平均最高水平和最低水平, 其值分别为 0.1 和 1; Δt 表示时间段。

2) 碳捕获系统模型

CCS 的总电力消耗 $P_{\text{CCS, total}}$ 主要由两部分组成, 分别是固定用电量 $P_{\text{CCS, f}}$ 和运行用电量 $P_{\text{CCS, o}}$, 由式(27)表示。

$$P_{\text{CCS, total}}^t = P_{\text{CCS, o}}^t + P_{\text{CCS, f}}^t \quad (27)$$

$$P_{\text{CCS, o}}^t = C_{\text{CCS}}^t E_{\text{car}} \quad (28)$$

式中: C_{CCS}^t 表示 CCS 吸收的二氧化碳质量; E_{car} 为

捕集二氧化碳所消耗的电量, $E_{\text{car}} = 0.269 \text{ MWh/t}$ 。

为了有效去除二氧化碳吸收过程和再生过程的强耦合关系, 可以在 CCS 设备中增加储液设备能量时移, 具体如下所示^[25-26]。

$$V_{\text{TL}}^t = V_{\text{TL}}^{(t-1)} + V_{\text{TL, in}}^t - V_{\text{TL, out}}^t \quad (29)$$

$$V_{\text{CL}}^t = V_{\text{CL}}^{(t-1)} + V_{\text{CL, in}}^t - V_{\text{CL, out}}^t \quad (30)$$

$$V_{\text{CL}}^t + V_{\text{TL}}^t = V^{\max} \quad (31)$$

$$V_{\text{TL, in}}^t = \frac{C_{\text{in}}^t \eta_{\text{CCS}}}{25 \rho_{\text{CO}_2}} \quad (32)$$

$$V_{\text{TL, out}}^t = \frac{C_{\text{CCS}}^t}{25 \rho_{\text{CO}_2}} \quad (33)$$

式中: V_{TL}^t 和 V_{CL}^t 分别表示贫液和富液存储设备的容积; C_{in}^t 表示由 CCS 捕获的二氧化碳; η_{CCS} 表示 CCS 的效率; ρ_{CO_2} 表示二氧化碳的密度; V^{\max} 表示液体储罐的最大容积; $V_{\text{TL, in}}^t$ 和 $V_{\text{TL, out}}^t$ 分别表示流进和流出资液存储设备的体积流量; $V_{\text{CL, in}}^t$ 和 $V_{\text{CL, out}}^t$ 分别表示流进和流出富液存储设备的体积流量。

捕获的二氧化碳用于甲烷化反应, 其质量可以用式(34)表示。

$$C_{\text{CH}_4}^t = \frac{M_{\text{CH}_4, \text{H}_2}^t n_{\text{H}_2}}{n_{\text{og}}} \quad (34)$$

CCS 的约束条件如式(35)~式(38)所示。

$$0 \leq P_{\text{CCS}}^t \leq P_{\text{CCS}}^{\max} \quad (35)$$

$$P_{\text{CCS, CP}}^{\min} \leq P_{\text{CCS}}^t - P_{\text{CCS}}^{(t-1)} \leq P_{\text{CCS, CP}}^{\max} \quad (36)$$

$$0 \leq C_{\text{in}}^t \leq C_{\text{HBS-GT}}^t + C_{\text{HBS-GB}}^t + C_{\text{grid}}^t \quad (37)$$

$$C_{\text{CCS}}^t = C_{\text{CH}_4}^t \quad (38)$$

式中: P_{CCS}^t 为 CCS 消耗的功率; $C_{\text{CH}_4}^t$ 为甲烷化吸收的二氧化碳的质量; P_{CCS}^{\max} 为 CCS 的最大消耗功率; $P_{\text{CCS, CP}}^{\max}$ 和 $P_{\text{CCS, CP}}^{\min}$ 分别表示 CCS 爬升功率的最大值和最小值; $C_{\text{HBS-GT}}^t$ 、 $C_{\text{HBS-GB}}^t$ 和 C_{grid}^t 分别是由 HBS-GT、HBS-GB 和热单元排放的二氧化碳的质量。

$$C_{\text{HBS-GT}}^t = \frac{M_{\text{HBS-GT, og}}^t}{\rho_{\text{og}}} \epsilon_{\text{og}} \quad (39)$$

$$C_{\text{HBS-GB}}^t = \frac{M_{\text{HBS-GB, og}}^t}{\rho_{\text{og}}} \epsilon_{\text{og}} \quad (40)$$

$$C_{\text{grid}}^t = P_{\text{th}}^t \epsilon_{\text{th, re}} \quad (41)$$

$$P_{\text{th}}^t = -\min(P_{\text{n}}^t - P_{\text{supply}}^t, 0) \quad (42)$$

式中: ϵ_{og} 表示燃烧每立方米天然气产生的二氧化碳; P_{th}^t 表示热电单元发电量; $\epsilon_{\text{th, re}}$ 为热电单元的

氧化碳排放强度。

1.2.2 目标函数

ES 联合 CCS 的效益目标函数表示为^[27]

$$\max F_{ES-CCS} = \sum_{t=1}^T (f_{RES}^t + f_{HBS}^t + f_{CCS}^t - f_{CET}^t) \quad (43)$$

式中: f_{RES}^t 、 f_{HBS}^t 和 f_{CCS}^t 分别表示可再生能源系统 (renewable energy systems, RES)、HBS 和 CCS 的利润; f_{CET}^t 表示碳排放交易(carbon emission trading, CET)成本。

RES 的利润表示为

$$f_{RES}^t = f_{RES,s}^t - f_{RES,om}^t - f_{RES,pe}^t \quad (44)$$

$$f_{RES,s}^t = \left(\sum_{k=1}^{n_{wind}} P_{wind,k}^t + \sum_{k=1}^{n_{pv}} P_{PV,k}^t \right) p_{el,pu}^t \quad (45)$$

$$f_{RES,om}^t = \left(\sum_{k=1}^{n_{wind}} P_{wind,k}^t + \sum_{k=1}^{n_{pv}} P_{PV,k}^t \right) c_{RES,om} \quad (46)$$

$$f_{RES,pe}^t = \left(\sum_{k=1}^{n_{wind}} P_{wind,k}^t + \sum_{k=1}^{n_{pv}} P_{PV,k}^t \right) c_{RES,pe} \quad (47)$$

式中: $f_{RES,s}^t$ 、 $f_{RES,om}^t$ 和 $f_{RES,pe}^t$ 分别为销售收入、运维(operation and maintenance, OM)成本和弃风弃光的处罚成本; $p_{el,pu}^t$ 为购电价格; $c_{RES,om}$ 和 $c_{RES,pe}$ 分别表示单位电量的 OM 成本和单位电量的处罚成本; $P_{wind,k}^t$ 和 $P_{PV,k}^t$ 分别代表第 k 个风力发电机组和光伏的实际发电量。

HBS 的利润可以表示为

$$f_{HBS}^t = f_{HBS,s}^t + f_{HBS,pu}^t + f_{HBS,om}^t \quad (48)$$

$$f_{HBS,s}^t = P_{HBS-GT}^t (p_{hl,pu}^t + c_{sub, HBS-GT}) + (Q_{HBS-GT}^t + Q_{HBS-GB}^t) p_{hl,pu}^t \quad (49)$$

$$f_{HBS,pu}^t = -P_{EL}^t (p_{el,s}^t - c_{sub, EL}) + V_{og,pu}^t p_{og} - M_{H_2,pu}^t p_{H_2} \quad (50)$$

$$f_{HBS,om}^t = Q_{HBS-GB}^t c_{HBS-GB, om} - P_{EL}^t c_{EL, om} + c_{HBS-GT, om} (P_{HBS-GT}^t + Q_{HBS-GT}^t) \quad (51)$$

式中: $f_{HBS,s}^t$ 、 $f_{HBS,pu}^t$ 和 $f_{HBS,om}^t$ 分别为 HBS 的收益、购能成本和运维成本; $p_{hl,pu}^t$ 为购热价格; $c_{sub, HBS-GT}$ 为政府对 HBS-GT 售电的补贴; $c_{sub, EL}$ 为政府对 EL 购电的补贴; $V_{og,pu}^t$ 表示天然气购买量; p_{og} 为每立方米天然气价格; p_{H_2} 为氢气的购买价格; $c_{HBS-GB, om}$ 、 $c_{EL, om}$ 和 $c_{HBS-GT, om}$ 分别为 HBS-GB、EL 和 HBS-GT 的单位 OM 成本。

CCS 的利润如式(52)所示。

$$f_{CCS}^t = P_{CCS,to}^t p_{el,pu}^t \quad (52)$$

碳排放交易成本 f_{CET}^t 可以根据贸易中涉及的二氧化碳排放量的不同采用不同的公式计算。其中: C_{trade}^t 为贸易中所涉及的 CO_2 的排放量; L_{CO_2} 为二氧化碳排放间隔的长度。

当 $C_{trade}^t \leq -2L_{CO_2}$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(53)表示。

$$f_{CET}^t = -p_{base} (2 + 3\delta) L_{CO_2} + p_{base} (1 + 3\delta) (C_{trade}^t + 2L_{CO_2}) \quad (53)$$

当 $-2L_{CO_2} < C_{trade}^t \leq -L_{CO_2}$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(54)表示。

$$f_{CET}^t = -p_{base} (1 + \delta) L_{CO_2} + p_{base} (1 + 2\delta) (C_{trade}^t + L_{CO_2}) \quad (54)$$

当 $-L_{CO_2} < C_{trade}^t \leq 0$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(55)表示。

$$f_{CET}^t = p_{base} (1 + \delta) C_{trade}^t \quad (55)$$

当 $0 < C_{trade}^t \leq L_{CO_2}$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(56)表示。

$$f_{CET}^t = p_{base} e_{jy}^t \quad (56)$$

当 $L_{CO_2} < C_{trade}^t \leq 2L_{CO_2}$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(57)表示。

$$f_{CET}^t = p_{base} L_{CO_2} + p_{base} (1 + \theta) (C_{trade}^t - L_{CO_2}) \quad (57)$$

当 $2L_{CO_2} < C_{trade}^t$ 时, 碳排放交易成本 f_{CET}^t 用式(58)表示。

$$f_{CET}^t = p_{base} (2 + \theta) L_{CO_2} + p_{base} (1 + 2\theta) (C_{trade}^t - 2L_{CO_2}) \quad (58)$$

式中: p_{base} 为 CET 基准价格; δ 为补偿因子; e_{jy}^t 为能源交易量; θ 为 CET 价格涨幅。

贸易中所涉及的 CO_2 的排放量 C_{trade}^t 可以用式(59)表示。

$$C_{trade}^t = C_{real}^t - C_{eq}^t \quad (59)$$

$$C_{real}^t = C_{HBS-GT}^t + C_{HBS-GB}^t + C_{grid}^t - (2 - \eta_{CCS}) C_{in}^t \quad (60)$$

$$C_{eq}^t = P_{HBS-GT}^t \epsilon_{HBS-GT,ep} + Q_{HBS-GT}^t \epsilon_{HBS-GT,ep} + Q_{HBS-GB}^t \epsilon_{HBS-GB,ep} + P_{th}^t \epsilon_{th,ep} \quad (61)$$

式中: C_{real}^t 和 C_{eq}^t 分别表示实际 CO_2 排放量和碳配额; $\epsilon_{HBS-GT,ep}$ 和 $\epsilon_{th,ep}$ 分别表示 HBS-GT 电力和热电单元供电过程中 CO_2 的排放分配权; $\epsilon_{HBS-GT,ep}$ 和 $\epsilon_{HBS-GB,ep}$ 分别代表 HBS-GT 和 HBS-GB 供热过程中 CO_2 的排放分配权。

1.2.3 约束条件

对于 IES 而言, 约束条件包括 RES 平衡、电力平

衡、热功率平衡、天然气制约平衡和氢平衡 5 个方面。

RES 平衡约束条件表示如下。

$$P'_{PV} = P'_{PV,or} - P'_{PV,cut} \quad (62)$$

$$P'_{Wind} = P'_{wind,or} - P'_{wind,cut} \quad (63)$$

$$0 \leq P'_{PV,cut} \leq P'_{PV} \quad (64)$$

$$0 \leq P'_{wind,cut} \leq P'_{Wind} \quad (65)$$

式中: P'_{PV} 和 P'_{Wind} 分别为光伏和风力发电机的实际发电量; $P'_{PV,cut}$ 和 $P'_{wind,cut}$ 分别为光伏和风力发电的弃电量; $P'_{PV,or}$ 和 $P'_{wind,or}$ 分别为光伏和风电机组的原始功率。

电力平衡约束条件为

$$P'_{el,dr} = P'_{th} + \sum_{k=1}^{n_{wind}} P'_{wind,k} + \sum_{k=1}^{n_{pv}} P'_{PV,k} + P'_{HBS-GT} + P'_{CCS,to} + P'_{EL} \quad (66)$$

热功率平衡约束条件为

$$Q'_{hl,dr} = Q'_{HBS-GT} + Q'_{HBS-GB} \quad (67)$$

天然气制约平衡约束条件为

$$V'_{HBS-GB,ng} + V'_{HBS-GT,ng} = V'_{og,pu} + V'_{CH_4,H_2} \quad (68)$$

式中: $V'_{HBS-GB,ng}$ 和 $V'_{HBS-GT,ng}$ 分别表示 HBS-GB 和 HBS-GT 的天然气消耗量; V'_{CH_4,H_2} 为甲烷化产生的天然气。

氢平衡约束条件: 日耗氢量和产氢量应满足式(68)。

$$\sum_{t=1}^T \left(-\frac{P'_{EL}}{n_{H_2}} \cdot \eta_{EL} + M'_{H_2,pu} \right) = \sum_{t=1}^T (M'_{CH_4,H_2} + M'_{HBS-GB,H_2} + M'_{HBS-GT,H_2}) \quad (69)$$

此外, 直流潮流模型和热网温度的约束参见文献[28-29]。

1.3 负荷聚合商模型

1.3.1 目标函数

LA 的目标函数为最大化消费者剩余, 即用户的效用函数与能源成本之差, 如式(70)所示[30]。

$$\max F'_{user} = \sum_{t=1}^T (f'_{user} - (P'_{el,user} D'_{e,s} + Q'_{hl,user} D'_{h,s})) \Delta t \quad (70)$$

$$f'_{user} = v_c P'_{el,user} - \frac{a_c}{2} (P'_{el,user})^2 + v_h Q'_{hl,user} - \frac{a_h}{2} (Q'_{hl,user})^2 \quad (71)$$

式中: F'_{user} 为 LA 的目标函数; f'_{user} 为用户的效用函数, 即对购电和购热的满意水平; $P'_{el,user}$ 和 $Q'_{hl,user}$ 分别为 t 时刻用户侧的电、热负荷功率; $D'_{e,s}$ 和 $D'_{h,s}$ 分别为 t 时刻出售给用户侧和从供能侧买入的电价

格和热能价格; v_c 、 a_c 和 v_h 、 a_h 分别为用户对消费电、热能的偏好系数。

对于用户侧的电负荷功率 $P'_{el,user}$ 主要由固定电负荷 $P'_{fel,user}$ 和可平移电负荷 $P'_{sel,user}$ 组成, 如式(72)所示。热负荷 $Q'_{hl,user}$ 也包含两部分: 固定热负荷 Q'_{fhl} 和可削减热负荷 Q'_{chl} , 如式(73)所示。

$$P'_{el,user} = P'_{fel,user} + P'_{sel,user} \quad (72)$$

$$Q'_{hl,user} = Q'_{fhl} - Q'_{chl} \quad (73)$$

1.3.2 约束条件

可平移电负荷 $P'_{sel,user}$ 需要满足式(74)和式(75)所示的约束条件[27]。

$$0 \leq P'_{sel,user} \leq P'_{sel,max} \quad (74)$$

$$\sum_{t=1}^T P'_{sel,user} \Delta t = W'_{sel} \quad (75)$$

式中: $P'_{sel,max}$ 为可平移电负荷的最大值; W'_{sel} 为 24 h 内可平移电负荷的总值。

可削减热负荷 Q'_{chl} 满足的约束条件为

$$0 \leq Q'_{chl} \leq Q'_{chl,max} \quad (76)$$

式中: $Q'_{chl,max}$ 为可削减热负荷的最大值。

2 求解方法

2.1 主从博弈基本框架

根据上述对 IESO 的描述, 建立了一主多从的 Stackelberg 博弈模型, 如式(77)所示。

$$G = \{N, \rho_{IESO}; \{\delta_{RES-PTG}, \delta_{LA}\}; F_{IESO}; \{\delta_{RES-PTG}, \delta_{LA}\}\} \quad (77)$$

1) 参与者。IESO、ES 和 LA 作为该博弈的 3 个参与者: $N = \{IESO, ES, LA\}$ 。

2) 策略。作为领导者的 IESO 的策略为 24 h 购入和售出的电价、热价: ρ_{IESO} ; 作为跟随者的 ES 的策略为各时刻内 HBS-GT、HBS-GB 的输出功率、CCS 的耗电功率和 EL 的耗电功率: $\delta_{RES-PTG}$; 作为跟随者的 LA 策略为各时刻可平移电负荷和可削减热负荷的功率: δ_{LA} 。

3) 收益。各参与者的收益分别为第 1 节中定义的几个目标函数。当博弈达到均衡, 即 IESO 的均衡解 $(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}^*)$ 需要满足以下条件:

$$\begin{cases} F_{IESO}(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}^*) \geq F_{IESO}(\rho_{IESO}, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}^*) \\ F_{IESO}(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}^*) \geq F_{IESO}(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}, \delta_{LA}^*) \\ F_{IESO}(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}^*) \geq F_{IESO}(\rho_{IESO}^*, \delta_{RES-PTG}^*, \delta_{LA}) \end{cases} \quad (78)$$

2.2 模型求解方法和流程

考虑到传统的集中式优化算法需要获取所有设备信息和用能偏好等参数信息,为了找到 Stackelberg 博弈的纳什均衡解,本文采用遗传算法与 CPLEX 求解器相结合的方法^[30-31]。整个算法的求解流程如下所述。

步骤 1 输入参数: RES 的机组参数、负荷参数、初始电价、初始输出功率并计算初始功率。

步骤 2 向跟随者(LA 和 EL)输入初始价格,并计算跟随者的初始适应度(F_{LA} 和 $F_{RES-PTG}$), 设置迭代次数 k , $k=1$ 。

步骤 3 向领导者(IESO)反馈跟随者的信息,并计算初始适应度(F_{IESO})。

步骤 4 突变-交叉-生成新的种群并检查范围。

步骤 5 $k = k + 1$ 。

步骤 6 向跟随者输入新的价格并计算适应度值(F_{LA}^{new} 和 $F_{RES-PTG}^{new}$)。

步骤 7 向领导者反馈跟随者的信息并重新计算适应度值函数(F_{IESO}^{new})。

步骤 8 判断: 如果 $F_{IESO}^{new} > F_{IESO}$, 则 $F_{IESO} = F_{IESO}^{new}$, $F_{LA} = F_{LA}^{new}$ 和 $F_{RES-PTG} = F_{RES-PTG}^{new}$; 否则 $F_{IESO} = F_{IESO}$, $F_{LA} = F_{LA}$ 和 $F_{RES-PTG} = F_{RES-PTG}$, 即保留此次迭代过程中的结果值。

步骤 9 判断: 如果纳什平衡, 输出结果值, 即跟随者和领导者的最优目标值、最佳能源价格、不同能源种类的最佳输出功率和 LA 的行为; 否则, 重新从步骤 4 开始循环, 直至纳什平衡, 输出最终结果。

此外需要明确的是, ES 主要负责能源供应设备的正常运行, 而 IESO 会基于负荷需求, 以自身利益最大化为目标, 日前制定电、热、气 3 种能源的收购和出售价格。因此, 本文的交易机制均是多个主体之间的联合交易机制, 具体为 ES 和 IESO 进行电、热、气交易以及参与绿证和碳交易时, 均是由 ES 先对一个时段内的电、热、气能源进行整合后, 再进行交易。

3 算例分析

3.1 数据

将不同维度、不同格式的既有历史电负荷、热负荷数据代入系统进行分析, 选取典型日作为算例所用负荷。通过在数字孪生系统模拟器中对 IES 中的光伏系统、风电机组、EL、HBS-GT、HBS-GS 和 HT 等设备的实时运行状态进行提取并模拟, 使

其基础运行状态满足负荷约束。

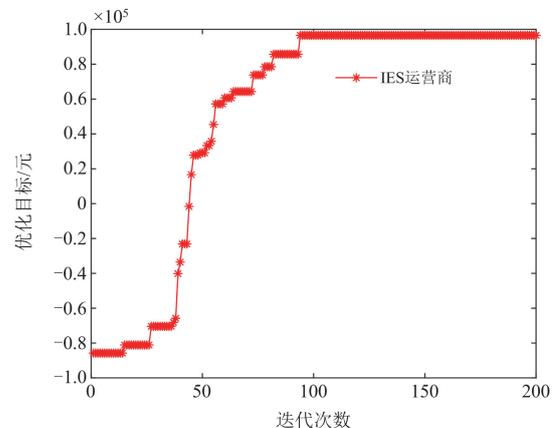
本文基于扩展的 IEEE39 节点系统和 6 节点供暖系统, 在 Matlab 环境下进行仿真分析^[27]。对于该系统结构, 1 号光伏场和 2 号光伏场分别布置在 2 节点和 31 节点, 1 号风电机组和 2 号风电机组分别布置在 32 节点和 33 节点, 对于 35 号节点布置 HBS, 该系统包括 EL、HBS-GT、HBS-GS 和 HT。此外, 表 1 提供了 IES 电价和热价参数。HBS 的额定掺氢比率设定为 10%^[20]。

表 1 IES 电价和热价参数

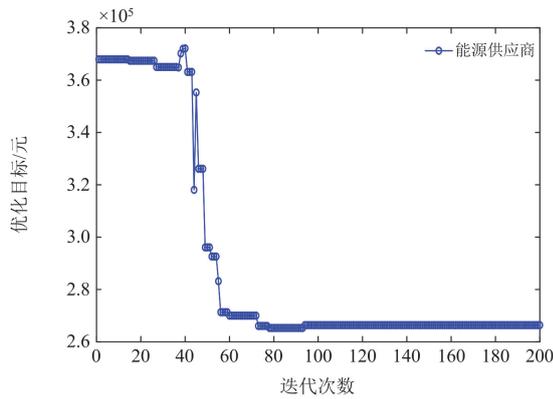
参数	时段	数值/(元/kWh)
分时电价	11:00—15:00,	1.5
	18:00—23:00	
	08:00—11:00,	0.88
	15:00—18:00	
上网电价	00:00—08:00,	0.67
	23:00—24:00	
上网电价	00:00—24:00	0.45
热价上限	00:00—24:00	0.6
热价下限	00:00—24:00	0.2

3.2 结果分析

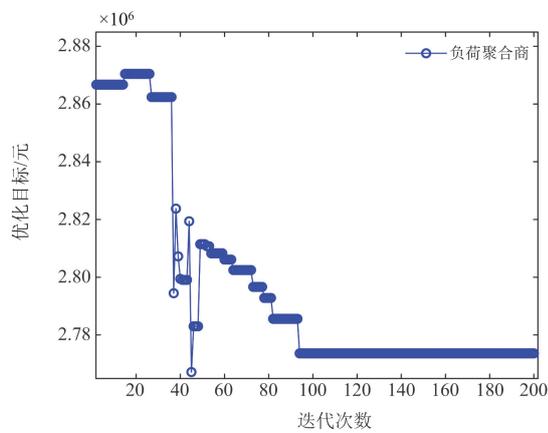
IESO、ES 以及 LA 的优化迭代过程如图 1 所示。从图中可以观察到, 程序设置的总迭代次数为 200 次, 三者的收敛曲线都在第 94 次迭代次数下开始收敛。其中, IESO 的收敛值为 96 584.9 元, 而 ES 和 LA 的收敛值分别为 266 396 元和 2 773 620 元。尽管三者在同一迭代次数下达到收敛, 但它们的收敛趋势是不同的。随着迭代次数的增加, IESO 的收益持续增加, 而 ES 和 LA 的收益则持续下降, 最终达到收敛。



(a) IES 运营商目标函数收敛曲线图



(b) ES目标函数收敛曲线图

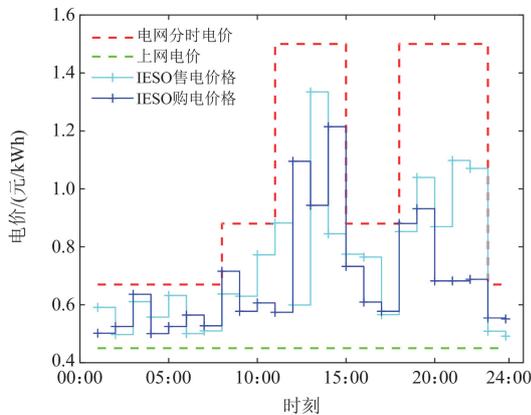


(c) LA目标函数收敛曲线图

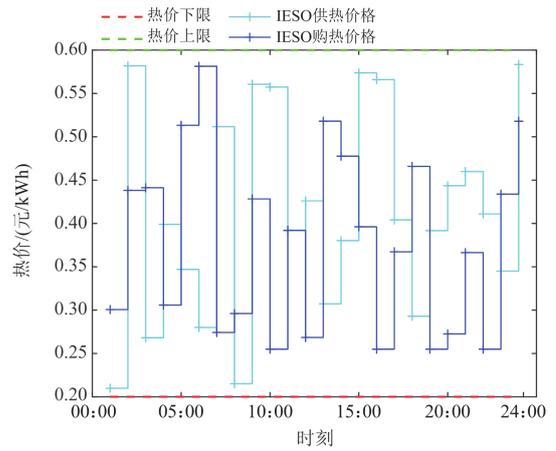
图 1 Stackelberg 均衡收敛结果

Fig. 1 Convergence process of Stackelberg equilibrium

IESO 的电价和热价示意图如图 2 所示。从图 2(a)可以看出, 红色虚线表示电网分时电价, 绿色虚线表示上网电价, 而 IESO 的购电和售电价格均位于两者之间。IESO 逐时售电价格的波动趋势与电网的分时电价相近, 售电电价在 13:00—14:00、19:00—20:00 和 21:00—22:00 出现了 3 处峰值。



(a) IESO 电价曲线示意图



(b) IESO 热价曲线示意图

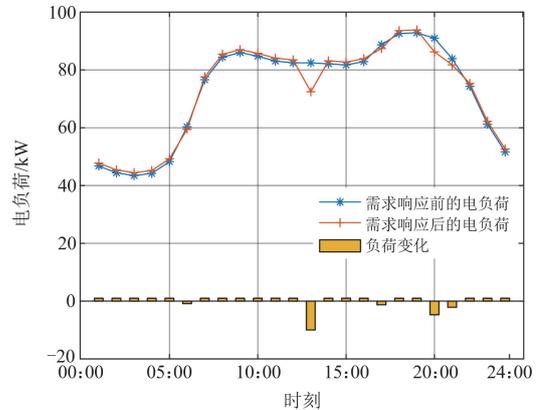
图 2 IESO 电价和热价曲线示意图

Fig. 2 Illustration of IESO electricity and heat price curves

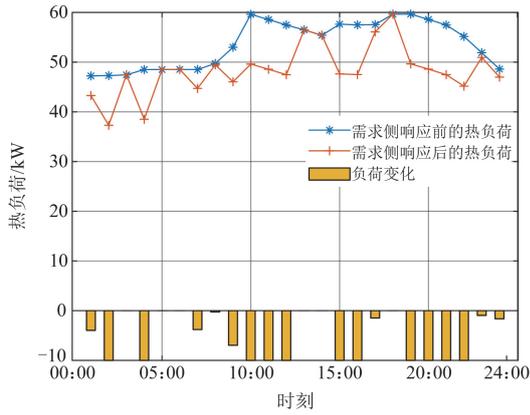
而购电电价与负荷变化趋势相似, 电价在 08:00—09:00、12:00—15:00 和 18:00—20:00 出现了 3 处峰值, 这旨在激励能源供应商增加发电量, 减少从电网购入电量, 从而提高收益。当在同一个时段内, 售电价格大于购电价格时, IESO 就是盈利的。

从图 2(b)可以看出, 热价上限为 0.6 元/kWh, 下限为 0.2 元/kWh, 与电价实体图相似, IESO 的购热价格和售热价格介于两者之间, 热价的分析与电价类似。

用户侧需求侧响应前后的电、热负荷曲线如图 3 所示。由图 3(a)可见, 在电价的激励下, 为了降低总的用电成本, 在 00:00—05:00 电价较低的时段, 需求侧响应后的负荷略有增加, 大致增加了 1 kW; 消费者原有的电负荷曲线两个峰值出现在 08:00—12:00 和 17:00—21:00, 此时电价较高, 经过用户侧优化, 在 19:00—21:00 负荷峰值明显下降, 减少了 4.72 kW; 在 12:00—14:00 电价较高时, 负荷值减小了 10 kW。综上所述, 需求侧响应



(a) 需求侧响应前后电负荷曲线示意图



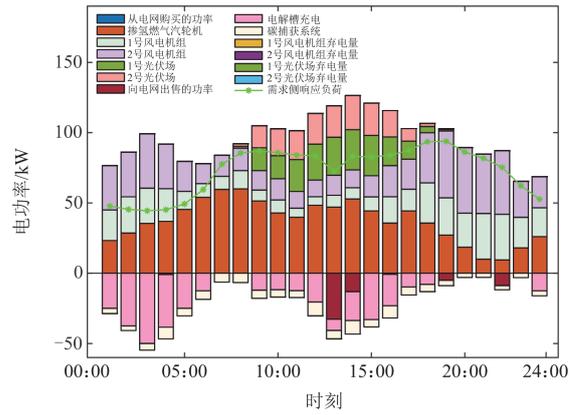
(b) 需求侧响应前后热负荷曲线示意图

图 3 需求侧响应前后电负荷和热负荷曲线示意图

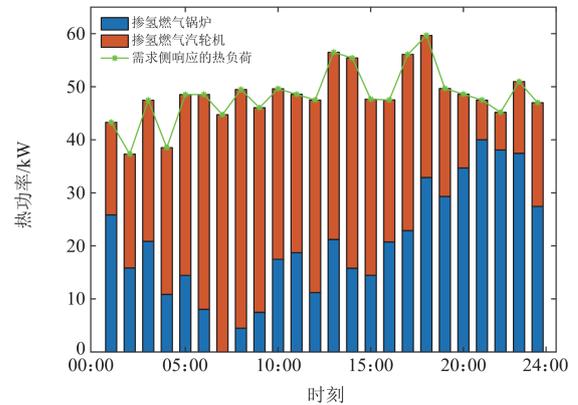
Fig. 3 Electric and thermal load curve illustration pre and post demand response

后的负荷曲线实现了一定程度的削峰填谷效果。由图 3(b)可知,热负荷整体有所削减,削减范围在 0~10 kW 之间,变化幅度较小的主要原因是考虑了用户的舒适性问题。这表明本文提出的运行方法在确保用能舒适性的前提下,降低了用能成本,提高了用能的经济性。

IESO 系统电能和热能优化调度结果如图 4 所示。在用电的谷时段,即在需求侧响应后的负荷曲线的谷时段,即 00:00—05:00, 22:00—24:00 时段,在 00:00—05:00 时段主要依靠 HBS-GT 出力,其次为 1 号风电机组和 2 号风电机组;在 22:00—24:00 时段主要依靠 1 号风电机组和 2 号风电机组出力,此时 HBS-GT 的出力在降低。在需求侧响应后的负荷曲线的用电峰时段,即 08:00—12:00 和 17:00—21:00 这两个时段,主要还是依靠 HBS-GT,但相比用电谷时段来看,其输出功率也是在增加的,但值得注意的是,这个时段 RES 发电也开始增大输出,除了先前的风电机组参与出力以外,1 号光伏机组和 2 号光伏机组也参与功率输出,以满足负荷需求。但此时需求侧响应后的负荷曲线相比于优化前的负荷曲线,有着削峰的效用,所以在 12:00—14:00 这个时段内,负荷在减小,由于此时正值中午,所以 1 号光伏场和 2 号光伏场的发电出力在增加,所以向电网售电。对于第二个用电高峰期,即 17:00—21:00,该时段由于两个风机机组出力都比较大,所以此时的 HBS-GT 出力可以减少。



(a) 电能优化调度结果示意图



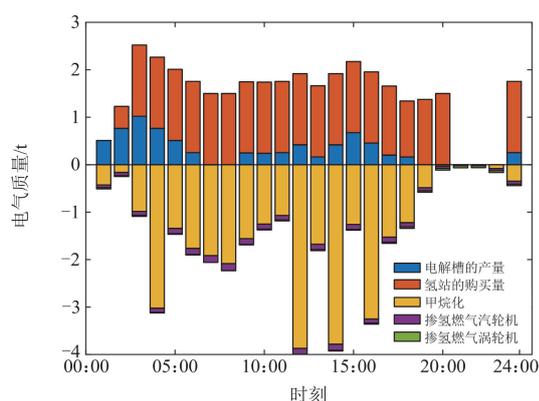
(b) 热能优化调度结果示意图

图 4 IESO 系统优化调度结果示意图

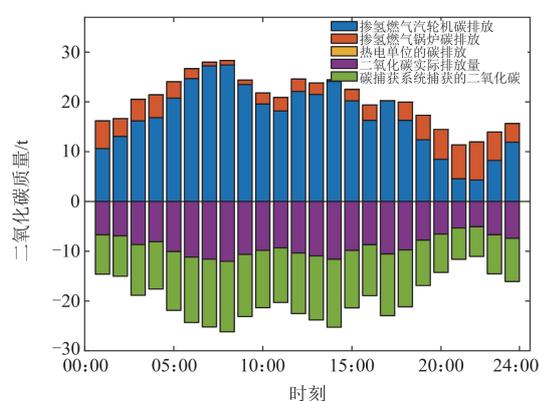
Fig. 4 Illustration of IESO system optimization scheduling results

综上所述,考虑到 RES 的环保性,光伏和风电出力会优先出售给 IESO, HBS-GT 和 HBS-GB 作为补充,弥补新能源的缺失。在需求响应后的用电谷时段(00:00—05:00, 22:00—24:00), HBS-GT 和风力机组出力较多,导致供大于求,多余的电能通过 IESO 并网。在用电峰时段(10:00—12:00, 17:00—23:00),由于此时的风力机组和光伏场的出力相比于用电负荷谷时段增加,所以可以作为用电高峰时段缺失的电能补充,进一步提高能源的清洁性和环保性。

如图 4(b)所示,供热主要由 HBS-GT 和 HBS-GB 共同供热。为了保证热能的供应,避免支付惩罚费用,IESO 通过调整购热价格来引导锅炉出力,达到供需平衡。氢气平衡和二氧化碳平衡示意图如图 5 所示。



(a) 氢气平衡示意图



(b) 二氧化碳平衡示意图

图 5 氢气平衡和二氧化碳平衡示意图

Fig. 5 Illustration of hydrogen balance and carbon dioxide balance

4 结论

本研究构建了一个 Stackelberg 模型,旨在平衡各方利益,全面考虑了经济、环境和用户满意度因素。同时,利用数字孪生模型搜集 IES 中关键性掺氢设备的主要运行参数,并利用该项参数进行详细建模。主要的研究成果如下。

1) 提出的 Stackelberg 博弈模型针对 IES 中不同的系统建立不同的约束条件,考虑了需求侧负荷响应以及引入 CCS 的 ES,在整个博弈框架中,IESO 作为领导者,而 ES 和 LA 作为跟随者,为实施实际调度管理提供了基础。

2) 通过价格信号引导新能源发电系统的输出和调整用户的用能计划,能够提高供能侧收益,并在保证用能满意度的前提下降低用能成本,平抑负荷波动,使供能更加经济、用能更加合理。

3) 分析了 HBS 的关键参数,结果显示当掺氢比例达到 10%时,IESO 和配置有 CCS 的 ES 的收

入变化趋势逐渐稳定,从而验证了 HBS 的有效性。

随着能源市场竞争日趋激烈,本文提出的 IES 主从博弈模型有助于深入分析不同决策主体之间的互动过程,并找到最优的均衡策略。这为市场和政府的决策者提供了宝贵的参考信息,具有重要的实践价值。然而,本研究尚未考虑储能装置的影响,而直接与电网进行交互可能导致其收益下降。因此,未来的研究可以进一步探讨储能装置对 IES 能源交易的影响,或者专注于将电动车辆和氢动力车辆的充电管理系统引入到 IES 的负载端,以实现“源-荷-储”协同优化运行。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李贵君,赵兴勇,刘昊炆,等.考虑梯级碳交易机制和电转气两阶段运行的综合能源系统优化[J].全球能源互联网,2023,6(3):331-340.
LI Guijun, ZHAO Xingyong, LIU Haoyang, et al. Integrated energy system optimization considering cascading carbon trading mechanism and two-stage operation of power-to-gas[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 331-340.
- [3] 王永利,韩煦,刘晨,等.基于生-光耦合利用的乡村电-热综合能源系统规划[J].电力建设,2023,44(3):1-14.
WANG Yongli, HAN Xu, LIU Chen, et al. Rural electricity-heat integrated energy system planning based on coupling utilization of biomass and solar resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 1-14.
- [4] 程杉,陈诺,徐建宇,等.考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J].电力工程技术,2023,42(2):44-54.
CHENG Shan, CHEN Nuo, XU Jianyu, et al. Energy management optimization of building integrated energy systems considering comprehensive demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 44-54.
- [5] 李剑峰,姜涛,窦文雷,等.电-热-氢综合能源系统鲁棒区间优化调度[J].电力工程技术,2024,43(2):44-54.
LI Jianfeng, JIANG Tao, DOU Wenlei, et al. Robust interval optimization scheduling of electric-thermal-hydrogen integrated energy systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 44-54.
- [6] 岑增光,耿斌,高明海,等.考虑天然气混氢的园区综

- 合能源系统电制氢优化配置[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 55-64.
CEN Zengguang, GENG Bin, GAO Minghai, et al. Optimization configuration of park integrated energy system for power generation and hydrogen production considering natural gas blending with hydrogen[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 55-64.
- [7] 王桂兰, 曾康为, 刘宏, 等. 结合区块链的园区综合能源系统可信协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 168-178.
WANG Guilan, ZENG Kangwei, LIU Hong, et al. A trustworthy coordination optimization method for a comprehensive energy system in parks based on blockchain[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 168-178.
- [8] 彭超逸, 徐苏越, 顾慧杰, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂参与多元竞争市场投标策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 125-137.
PENG Chaoyi, XU Suyue, GU Huijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant participating in a multiple competitive market based on the Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 125-137.
- [9] 田海东, 何山, 艾纯玉, 等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 29-41.
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 29-41.
- [10] 徐海, 何伟, 谷金健, 等. 基于数字孪生的智慧综合供能站架构建设方案[J/OL]. 西南石油大学学报(自然科学版): 1-11[2024-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20240522.1650.012.html>.
XU Hai, HE Wei, GU Jinjian, et al. Architecture construction scheme of intelligent comprehensive energy supply station based on digital twin[J/OL]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition): 1-11[2024-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20240522.1650.012.html>.
- [11] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述[J/OL]. 电网技术: 1-21[2024-05-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2108>.
WANG Rongtai, WU Xixiu, LENG Yukuan, et al. A review of the development of digital twin technology in new type power systems[J/OL]. Power System Technology: 1-21[2024-05-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2108>.
- [12] 罗昊, 王长江, 王建国. 面向数字孪生的电-气综合能源系统可用输电能力计算[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 113-127.
LUO Hao, WANG Changjiang, WANG Jianguo. Calculation of available transmission capacity of electricity-gas integrated energy system for digital twin[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 113-127.
- [13] 郭俊韬, 张珏, 郑宁敏, 等. 数字孪生技术在电网工程中的应用研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 136-142.
GUO Juntao, ZHANG Jue, ZHENG Ningmin, et al. Research on the application of digital twin technology in power grid engineering[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 136-142.
- [14] 员盼锋, 徐舒涵, 丹慧杰, 等. 基于火电厂源侧的综合能源系统集成及优化配置研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(4): 650-657.
YUAN Panfeng, XU Shuhan, DAN Huijie, et al. Integration and optimal energy allocation of integrated energy system based on source side of thermal power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(4): 650-657.
- [15] WANG Xusheng, YANG Cheng, HUANG Manman, et al. Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 93-101.
- [16] 徐箬, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205.
XU Zhong, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [17] 吴艳娟, 张亦炫, 王云亮. 计及多重需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 21-32.
WU Yanjuan, ZHANG Yixuan, WANG Yunliang. Multi-time scale low carbon operation of integrated energy system considering multiple integrated demand responses[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 21-32.
- [18] 刘蓉晖, 李阳, 孙改平, 等. 考虑含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1317-1324.
LIU Ronghui, LI Yang, SUN Gaiping, et al. Coordinated optimal dispatch of community CCHP system considering multiple controllable loads[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(9): 1317-1324.
- [19] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.

- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [20] 崔耀欣, 刘晓佩, 陈明敏. F 级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(2): 38-42.
- CUI Yaoxin, LIU Xiaopei, CHEN Mingmin. Experimental study of natural gas mixed with hydrogen under full pressure of F-class heavy duty gas turbine burner[J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(2): 38-42.
- [21] 罗舒钰, 李奇, 阳洋, 等. 计及电-热-氢差异化激励需求响应的园区综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 214-221.
- LUO Shuyu, LI Qi, YANG Yang, et al. Community integrated energy system optimal scheduling considering differentiated power-heat-hydrogen incentive based demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 214-221.
- [22] LI Jiale, YANG Bo, HUANG Jianxiang, et al. Optimal planning of electricity-hydrogen hybrid energy storage system considering demand response in active distribution network[J]. Energy, 2023, 273.
- [23] CORREA G, SANTARELLI M. Evaluation of levelized cost of hydrogen produced by wind electrolysis: Argentine and Italian production scenarios[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52.
- [24] 陈登勇, 刘方, 刘帅. 基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2042-2053.
- CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2042-2053.
- [25] 彭元, 娄素华, 吴耀武, 等. 考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4508-4516.
- PENG Yuan, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power considering solvent stored carbon capture power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4508-4516.
- [26] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683.
- ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683.
- [27] LI Jian, LIN Yusong, SU Qingyu. Identifying critical nodes in power grids containing renewable energy based on electrical spreading probability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 154.
- [28] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [29] 雷婧婷, 安婷, 杜正春, 等. 含直流配电网的交直流潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 911-918.
- LEI Jingting, AN Ting, DU Zhengchun, et al. A unified AC/DC power flow algorithm with DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918.
- [30] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 142-150.
- WU Lilan, JING Zhaoxia, WU Qinghua, et al. Equilibrium strategies for integrated energy systems based on Stackelberg game mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 142-150.
- [31] 赵文会, 祁宇, 范韩璐. 区域电网的主从博弈调度[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 71-79.
- ZHAO Wenhui, QI Yu, FAN Hanlu. Stackelberg game scheduling for regional power grids[J]. Control Theory and Technology, 2018, 35(5): 71-79.

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-07-03

作者简介:

蒋 炜(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为能源互联网新技术研究及管理; E-mail: wei-jiang@sgcc.com.cn

郭志民(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力信息安全、人工智能、能源智慧化; E-mail: guozhimin@msn.com

庞宇航(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 中级工程师, 研究方向为电力系统通信数智化。E-mail: 1132672500@qq.com

(编辑 魏小丽)