

考虑阶梯碳交易机制下的源荷储协同优化调度

张子见¹, 刘兴艳², 雷 爽¹, 孙启宸¹, 黎舜瑀¹, 曹国强¹, 杨 志¹

¹贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

²贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年12月7日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月6日

摘 要

随着低碳经济的发展, 新能源比重不断提升, 仅依靠火电机组的调节能力难以完全消纳新能源出力的随机性与波动性, 需要进一步挖掘负荷侧的可调节能力, 构建包含柔性负荷、储能、燃气轮机等模糊机会约束电热综合能源系统(IEHS)数学模型。该模型综合考虑价格型和替代性负荷特性。最终建立考虑模糊机会约束和阶梯碳交易机制的IEHS日前源荷储协同优化调度模型, 并通过3种典型场景分析了模糊机会约束和碳交易机制对能源调度的影响, 以及考虑柔性负荷和储能对IEHS降碳、降低成本的作用, 研究结果表明, 在考虑阶梯碳交易机制下, 源荷储协同优化能有效降低系统综合成本。

关键词

柔性负荷, 综合能源系统, 阶梯碳交易机制, 优化调度

Considering the Collaborative Optimization Scheduling of Source-Load-Storage under the Step Carbon Trading Mechanism

Zijian Zhang¹, Xingyan Liu², Shuang Lei¹, Qichen Sun¹, Shunyu Li¹, Guoqiang Cao¹, Zhi Yang¹

¹School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Dec. 7th, 2024; accepted: Dec. 30th, 2024; published: Jan. 6th, 2025

Abstract

With the development of low-carbon economy, the proportion of new energy is increasing. It is difficult to fully absorb the randomness and volatility of new energy output only by relying on the

文章引用: 张子见, 刘兴艳, 雷爽, 孙启宸, 黎舜瑀, 曹国强, 杨志. 考虑阶梯碳交易机制下的源荷储协同优化调度[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 39-49. DOI: 10.12677/mos.2025.141005

adjustment ability of thermal power units. It is necessary to further explore the adjustable ability of the load side and construct a fuzzy chance constrained electrothermal integrated energy system (IEHS) mathematical model including flexible load, energy storage and gas turbine. The model considers both price-based and alternative load characteristics. Finally, a day-ahead source-load-storage collaborative optimization scheduling model of IEHS considering ladder carbon trading mechanism is established, and the influence of carbon trading mechanism on energy scheduling is analyzed through three typical scenarios, as well as the effect of flexible load and energy storage on IEHS carbon reduction and cost reduction. The research results show that under the consideration of ladder carbon trading mechanism, the source-load-storage collaborative optimization can effectively reduce the comprehensive cost of the system.

Keywords

Flexible Load, Integrated Energy System, Stepped Carbon Trading Mechanism, Optimized Scheduling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候问题的日益严峻，电力行业作为主要的碳排放源之一，其低碳转型已成为迫切需求。为此，我国正在积极推行碳交易市场，以市场手段促进二氧化碳的“零排放”[1]。

碳交易机制能够优化电力系统的资源分配、促进节能减排。文献[2]分别从发电侧和电网侧阐述了碳交易对我国电力行业的影响，提出其参与碳交易市场的政策建议。文献[3]引入碳交易，提出了一种同时兼顾电能生产经济性和系统排放低碳性的新型低碳经济调度模型。文献[4]提出考虑风电和负荷不确定性的低碳经济调度模型，将碳交易成本引入目标函数中，旨在降低系统碳排放量，提高系统风电消纳量。针对综合能源系统提出了一种基于碳交易机制的低碳经济运行模型。碳交易机制的实施，不仅能优化系统资源配置，还能有效促进节能减排。

同时，可再生能源发电过程中不可避免的间歇性、波动性，影响电力系统的安全稳定运行，增加电力系统调度难度。为了有效利用可再生能源并且保证电力系统运行可靠性，电力系统调度最直接的方式是采用储能系统平抑功率波动，但是该方法成本较高、建设周期较长，利用负荷侧需求响应对系统进行反向调节是更经济有效的功率调节手段[5]。文献[6]建立了用户调度优先级评价指标，为不同优先级的用户制定对应优惠政策，进而提出了由需求响应引导的储能规划配置策略。文献[7]将用户负荷分为易转移、易节约和刚性负荷，建立了基于分类负荷对实时电价响应模型，并依此建立微网优化运行模型，增加微网收益的同时降低用户平均购电成本。然而，现有研究多集中于碳交易机制或需求响应的单一方面，缺乏对二者协同作用的深入探讨，这限制了系统低碳性和经济性的协调发展。

鉴于此，本文提出一种在碳交易机制下考虑需求响应的 IEHS 优化运行模型。首先，不仅利用价格响应机制引导用户调整用能需求，降低负荷波动，而且通过多能互补、协同优化降低系统运行成本。其次，考虑碳交易机制对系统风电消纳的影响，然后，基于模糊机会约束考虑电源侧与负荷侧的预测误差，构建了模糊机会约束下的需求侧响应 IEHS 低碳经济调度模型，实现扩大风电消纳空间、平滑负荷曲线实现削峰填谷的作用。最后，通过算例仿真验证，本文展示了在模糊机会约束和碳交易机制下考虑需求响

应能够有效实现削峰填谷, 协同提升电热综合能源系统的经济性和低碳性, 为电热综合能源系统的低碳经济运行提供了重要参考。

2. 考虑 DR 的 IEHS 模型

2.1. IEHS 模型

IEHS 含有电、热、气多种能源形式, 对各类异质能源子系统进行协调规划、优化运行可以提高系统运行灵活性和供能可靠性, 同时能够解决单个能源系统独立运行时可再生能源利用效率不高, 导致系统运行成本高、污染严重的问题。

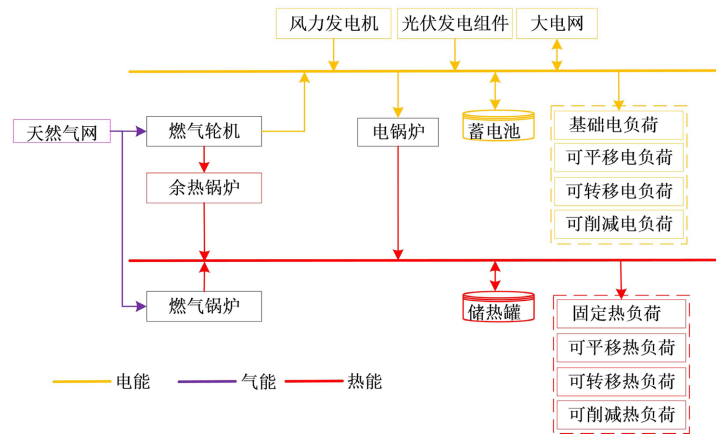


Figure 1. IEHS model
图 1. IEHS 模型

本文构建 IEHS 基本架构及能量交互情况如图 1 所示, 系统消耗电能及天然气能源以满足电、热负荷需求, 同时使用蓄电池、以及储热罐实现电、热能源的能量储存及释放, 提高系统调度灵活性以及供能可靠性。本文系统电负荷需求由风力、光伏发电设备、大电网、燃气轮机以及蓄电池协同供应; 由余热锅炉、燃气锅炉以及储热罐共同满足热负荷需求。

2.2. 需求响应负荷模型

需求响应负荷是指在电力系统中, 电力用户根据市场价格信号或激励措施, 主动调整其用电行为, 以达到平衡电力供需、保障系统稳定运行的目的。根据其特性, 本文考虑价格型需求响应。按照负荷参与需求响应的方式, 将负荷分为可平移负荷(shiftable load, SL)、可转移负荷(transferable load, TL)、可削减负荷(curtable load, CL) 3 种。

1) SL

可以根据需求调整负荷使用时间, 但是需要整体调整, 不能中断或者改变功率需求。设可平移时段区间为 $[t_{sf-}, t_{sf+}]$, 持续时间为 t_D , 则起始时段集合 S_{shift} 为:

$$S_{shift} = [t_{sf-}, t_{sf+} - t_D + 1] \quad (1)$$

平移后补偿成本 F_{shift} :

$$F_{shift} = F_{shift}^{cost} \sum_{t \in S_{shift}} P_t^{shift} \quad (2)$$

式中, $F_{\text{shift}}^{\text{cost}}$ 为平移补偿系数; P_{τ}^{shift} 为时段 τ 平移的功率; T 为总的调度周期。

2) TL

在可平移时段内可以灵活调节功率需求,但平移前后总负荷需求不变。设可转移时段区间为 $[t_{\text{tr-}}, t_{\text{tr+}}]$ 。为了防止负荷被过度切分为多个时段,导致用电负荷频繁启停,增加连续运行时间约束。

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{main}}^{\text{tran}}-1} Z_{\tau}^{\text{tran}} \geq T_{\text{main}}^{\text{tran}} \quad (3)$$

$$Z_{\tau}^{\text{tran}} P_{\min}^{\text{tran}} \leq P_{\tau}^{\text{tran}} \leq Z_{\tau}^{\text{tran}} P_{\max}^{\text{tran}} \quad (4)$$

式中: $T_{\text{main}}^{\text{tran}}$ 为最小连续运行时间; Z_{τ}^{tran} 为转移状态变量,为 1 时表示负荷转移,为 0 零时表示负荷无变化; P_{τ}^{tran} 为转移的功率; $P_{\min}^{\text{tran}}$, $P_{\max}^{\text{tran}}$ 为转移功率上下限值。

转移后补偿成本 F_{tran} :

$$F_{\text{tran}} = F_{\text{tran}}^{\text{cost}} \sum_{\tau} P_{\tau}^{\text{tran}} \quad (5)$$

式中: $F_{\text{tran}}^{\text{cost}}$ 为转移补偿系数。

3) CL

可以通过定量减少负荷以维持系统稳定和平,但考虑到用户满意度需要增加削减上下限与削减次数约束:

$$T_{\min}^{\text{cut}} \leq \sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{cl}}-1} Z_{\tau}^{\text{cut}} \leq T_{\max}^{\text{cut}} \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=t}^T Z_{\tau}^{\text{cut}} \leq N_{\max} \quad (7)$$

式中: T_{cl} 为削减时长; $T_{\min}^{\text{cut}}$, $T_{\max}^{\text{cut}}$ 为连续削减时长上下限; Z_{τ}^{cut} 为削减状态变量,为 1 时表示削减,为 0 时表示负荷无变化。

3. 阶梯式碳交易模型

阶梯碳交易模型是一种碳交易机制,以不同的碳排放水平设立不同阶梯的交易成本或价格。随着碳排放水平的增加,对应的交易成本逐级上升,激励各方采取更积极的碳减排措施。这种模型通过经济激励推动企业和个人降低碳排放,促进低碳经济的发展,并为不同行业提供更具体、差异化的碳交易政策。

3.1. IEHS 碳排放配额与实际碳排放量

目前,国内碳排放配额的初始分配方式主要有两种:分别为无偿分配方式和自由拍卖的有偿分配方式。无偿分配方式分为基准线法和历史法两种,结合我国实际情况,本文的碳排放配额通过基准线法确定,系统无偿分配到的碳排放配额计算公式如式所示:

$$E_c = \delta(P_{\text{GT}}^{\text{h}} + \varphi P_{\text{GT}}^{\text{e}} + P_{\text{GB}}^{\text{h}}) \quad (8)$$

式中, E_c 表示系统无偿分配到的总碳排放配额; P_{GT}^{h} 、 P_{GT}^{e} 分别为 GT 输出的电、热功率; φ 为电量的热折算系数; P_{GB}^{h} 为 GB 输出的热功率。

实际碳排放量 E_{ac} 为:

$$E_{\text{ac}} = \delta_{\text{GT}}(P_{\text{GT}}^{\text{h}} + \varphi P_{\text{GT}}^{\text{e}}) + \delta_{\text{GB}} P_{\text{GB}}^{\text{h}} \quad (9)$$

式中 δ_{GT} 、 δ_{GB} 分别为 GT、GB 的碳排放系数。

自由交易碳排放额 E_{IEHS} 为:

$$E_{IEHS} = E_{ac} - E_c \quad (10)$$

3.2. 阶梯型碳交易成本计算模型

$$F_{CO_2} = \begin{cases} \dots \\ -c(1+2\lambda)(E_{IEHS} - d) \\ E_{IEHS} \leq -d \\ -c(1+\lambda)d - c(1+\lambda)E_{IEHS} \\ -d \leq E_{IEHS} \leq 0 \\ cE_{IEHS} \\ 0 \leq E_{IEHS} \leq d \\ c(1+\lambda)(E_{IEHS} - d) + cd \\ d \leq E_{IEHS} \leq 2d \\ c(1+2\lambda)(E_{IEHS} - 2d) + c(2+\lambda)d \\ 2d \leq E_{IEHS} \leq 3d \\ c(1+3\lambda)(E_{IEHS} - 3d) + c(3+3\lambda)d \\ 3d \leq E_{IEHS} \leq 4d \\ \dots \end{cases} \quad (11)$$

式中 F_{CO_2} 为总碳交易成本； d 为碳排放区间长度； λ 为价格增长率； c 为碳交易价格。

4. IEHS 优化运行模型

4.1. 目标函数

IEHS 日运行成本 F 包含碳交易成本 F_{CO_2} 、分布式电源运行成本 F_{DG} 、电网购电成本 F_{net} 、燃气锅炉、燃气轮机运行成本 F_{MT} 、 F_{GB} ；储热槽、蓄电池的折旧成本 F_{HST} 、 F_{BAT} ；柔性负荷补偿成本 F_L ；目标函数如式所示。

$$\min F = F_{CO_2} + F_{IEHE} \quad (12)$$

$$F_{IEHE} = F_{DG} + F_{net} + F_{MT} + F_{GB} + F_{HST} + F_{BAT} + F_L \quad (13)$$

其中:

$$F_{DG} = \sum_{t=1}^T [K_w P_w(t) + K_{pv} P_{pv}(t)] \quad (14)$$

$$F_{net} = \sum_{t=1}^T [K_{net}(t) P_{net}(t)] \quad (15)$$

$$F_{MT} = \sum_{t=1}^T [K_{MT} P_{MT}(t)] \quad (16)$$

$$F_{GB} = \sum_{t=1}^T K_{GB} P_{GB}(t) \quad (17)$$

$$F_{HST} = \sum_{t=1}^T K_{HST} |P_{HST}(t)| \quad (18)$$

$$F_{\text{BAT}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{BAT}} |P_{\text{BAT}}(t)| \quad (19)$$

$$F_L = F_{\text{shift}} + F_{\text{tran}} + F_{\text{cut}} \quad (20)$$

式中, $K_{\text{net}}(t)$ 为分时电价; $P_{\text{net}}(t)$ 为与电网交换功率大小; K_w 、 K_{pv} 、 K_{MT} 、 K_{GB} 、 K_{HST} 、 K_{BAT} 、 $P_w(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{MT}}(t)$ 、 $P_{\text{GB}}(t)$ 、 $P_{\text{HST}}(t)$ 、 $P_{\text{BAT}}(t)$ 分别为风电、光伏、燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、储热槽的运行成本系数、输出功率, 其中 $P_{\text{HST}}(t)$ 、 $P_{\text{BAT}}(t)$ 可正可负, 为正时表示吸收功率, 为负时表示释放功率。

4.2. 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{load}} = P_w + P_{\text{pv}} + P_{\text{net}} + P_{\text{MT}} - P_{\text{BAT}} \\ Q_{\text{load}} = Q_{\text{HT}} + Q_{\text{GB}} - Q_{\text{HST}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_{load} 、 Q_{load} 分别为电热负荷需求。

由于系统功率平衡中含有不确定变量, 因此在安排日前调度计划时, 本文引入一种模糊处理方法, 通过负荷模糊参数 $\tilde{P}_{\text{load}}$ 、风光模糊参数 $\tilde{P}_w$ 、 $\tilde{P}_{\text{pv}}$ 将式 2 松弛为成立置信水平不低于 α 下的功率约束平衡。

$$\begin{cases} \min P_r(P_{\text{load}} = P_w + P_{\text{pv}} + P_{\text{net}} + P_{\text{MT}} - P_{\text{BAT}}) \geq \alpha \\ \min P_r(Q_{\text{load}} = Q_{\text{HT}} + Q_{\text{GB}} - Q_{\text{HST}}) \geq \alpha \end{cases} \quad (22)$$

其中, $P_r(\cdot)$ 表示事件的可信性。

用模糊参数表示系统中的不确定变量, 以常规机组出力满足含有模糊参数的不等式作为一个事件, 使因预测误差导致的不确定环境下的随机事件发生的概率满足预先设定的置信度水平, 这就是模糊机会约束规划问题。

2) 蓄电池约束

$$0 \leq p_t^{\text{dis}} \leq U_{s,t} P_s^{\text{max}} \quad (23)$$

$$0 \leq p_t^{\text{ch}} \leq [1 - U_{s,t}] P_s^{\text{max}} \quad (24)$$

$$\eta \sum_{t=1}^{24} p_t^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^{24} p_t^{\text{dis}} = 0 \quad (25)$$

$$E_s^{\min} \leq E_s(0) + \eta \sum_{t=1}^T p_t^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^T p_t^{\text{dis}} \leq E_s^{\max} \quad (26)$$

式中: P_s^{max} 为储能允许的最大充放电功率; $U_{s,t}$ 为充放电状态, 为 1 时表示放电, 为 0 时表示充电; $E_s(0)$ 为在初始时刻的储能容量; $E_s^{\max}$ 和 $E_s^{\min}$ 为储能在调度过程中剩余容量的上下限值;

3) 出力上下限约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_w \leq P_{w,\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{pv}} \leq P_{\text{pv},\text{max}} \\ P_{\text{net},\text{min}} \leq P_{\text{net}} \leq P_{\text{net},\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{MT}} \leq P_{\text{MT},\text{max}} \\ 0 \leq Q_{\text{HT}} \leq Q_{\text{HT},\text{max}} \\ 0 \leq Q_{\text{GB}} \leq Q_{\text{GB},\text{max}} \\ Q_{\text{HST},\text{min}} \leq Q_{\text{HST}} \leq Q_{\text{HST},\text{max}} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{w,\max}$ 、 $P_{pv,\max}$ 、 $P_{\text{net},\min}$ 、 $P_{\text{net},\max}$ 、 $P_{\text{MT},\max}$ 、 $Q_{\text{HT},\max}$ 、 $Q_{\text{GB},\max}$ 、 $Q_{\text{HST},\min}$ 、 $Q_{\text{HST},\max}$ 风电、光伏、购售电、燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、储热槽的出力限值。

4.3. 源荷不确定性建模

建立风光出力与电负荷需求的不确定性模型:

$$\begin{cases} \tilde{P}_w(t) = [P_{w1}(t), P_{w2}(t), P_{w3}(t)] \\ \tilde{P}_{pv}(t) = [P_{pv1}(t), P_{pv2}(t), P_{pv3}(t)] \\ \tilde{P}_{\text{load}}(t) = [P_{\text{load}1}(t), P_{\text{load}2}(t), P_{\text{load}3}(t)] \end{cases} \quad (28)$$

式中, $\tilde{P}_w(t)$ 为风电并入电网值, $\tilde{P}_{pv}(t)$ 为光伏并入电网值, $\tilde{P}_{\text{load}}(t)$ 为负荷大小。 $P_w(t)$ 为风电预测值, $P_{pv}(t)$ 为光伏预测值, $P_{\text{load}}(t)$ 为负荷预测值。

4.4. 基于模糊机会约束的调度模型

对所建立的风光出力与电负荷需求的不确定性模型求均值, 可得到

$$\begin{cases} E(\tilde{P}_w(t)) = \frac{1}{2}[(1-\alpha)P_{w1}(t) + P_{w2}(t) + \alpha P_{w3}(t)] \\ E(\tilde{P}_{pv}(t)) = \frac{1}{2}[(1-\alpha)P_{pv1}(t) + P_{pv2}(t) + \alpha P_{pv3}(t)] \\ E(\tilde{P}_{\text{load}}(t)) = \frac{1}{2}[(1-\alpha)P_{\text{load}1}(t) + P_{\text{load}2}(t) + \alpha P_{\text{load}3}(t)] \end{cases} \quad (29)$$

式中, $E(\tilde{P}_w(t))$ 、 $E(\tilde{P}_{pv}(t))$ 和 $E(\tilde{P}_{\text{load}}(t))$ 分别为风电、光伏出力并入电网值求均值和负荷大小的均值。

4.5. 模糊机会约束的清晰等价类

若约束函数 $g(x, z)$ 具有如下形式:

$$g(x, \zeta) = h_1(x)\zeta_1 + h_2(x)\zeta_2 + \cdots + h_t(x)\zeta_t + h_0(x) \quad (30)$$

式中, z_k 为梯形模糊参数 rk_1, rk_2, rk_3, rk_4 , $rk_1 \sim rk_4$ 为隶属度参数。

置信水平 $\alpha \geq 0.5$ 时, 机会约束的清晰等价类为:

$$\begin{aligned} & (2-2\alpha)[P_{\text{load}2}(t) - P_{w2}(t) - P_{pv2}(t)] \\ & + (2\alpha-1)[P_{\text{load}3}(t) - P_{w1}(t) - P_{pv1}(t)] \\ & + P_{\text{BAT}} - P_{\text{net}} - P_{\text{MT}} = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

5. 算例分析

5.1. 系统参数设置

为验证模型的有效性, 选取某区域 IEHS 进行分析。

电负荷以及风电、光伏出力的预测值如图 2 所示。负荷的模糊隶属度取值如表 1 所示。

算例中的能源价格分为分时电价和固定气价。将全天 24 h 分成谷、平、峰三种时段: 其中谷时段为: 00:00~07:00; 平时段为: 07:00~10:00, 15:00~18:00, 21:00~24:00; 峰时段为: 10:00~15:00, 18:00~21:00。分时电价见表 2。天然气价格为 2.5 元/m³。

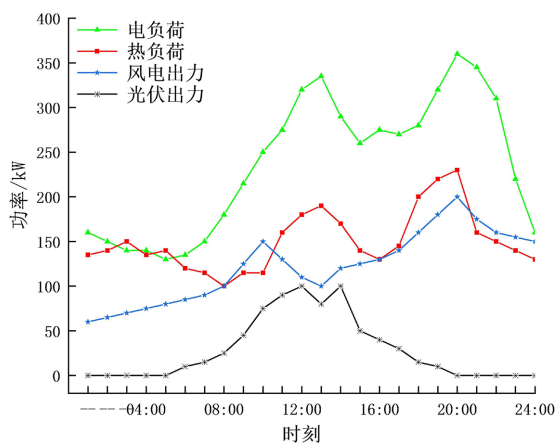


Figure 2. Load and predicted output of new energy
图 2. 负荷与新能源预测出力

Table 1. Fuzzy parameters
表 1. 模糊参数

模糊参数	ω_1	ω_2	ω_3
风电出力	0.6	1	1.4
光伏出力	0.5	1	1.5
负荷	0.9	1	1.1

Table 2. Electricity price by period
表 2. 各时段电价

时段	谷电价	平电价	峰电价
购电价	0.25	0.53	0.82
售电价	0.22	0.42	0.65

优化前各柔性电、热负荷分布情况如图 3 和图 4 所示:

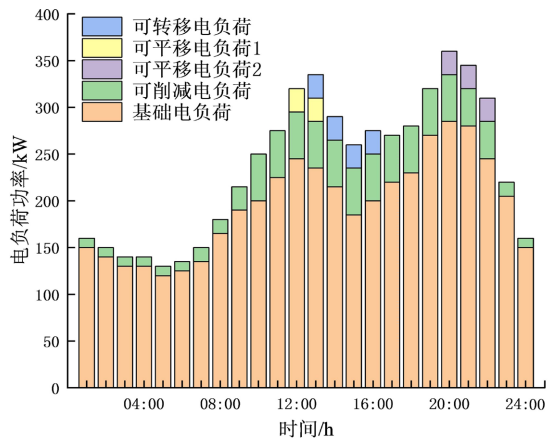


Figure 3. Electrical load curve before optimization
图 3. 优化前电负荷曲线

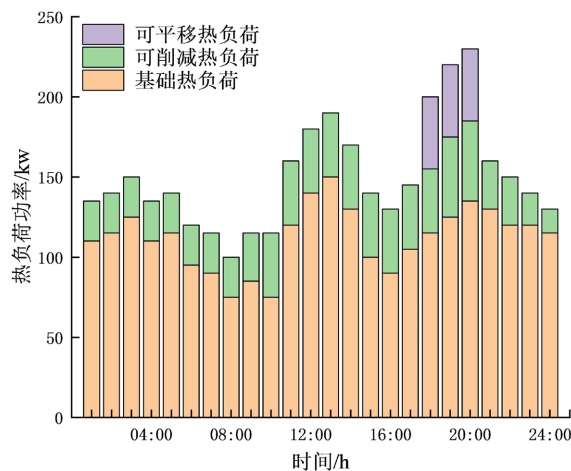


Figure 4. Heat load distribution before optimization
图 4. 优化前热负荷分布

5.2. 算例调度结果及分析

为验证所提模型的合理性，本文对以下 3 种场景进行对比分析。

- 场景 1：不考虑模糊机会约束、碳交易机制和需求响应；
- 场景 2：考虑碳交易机制下的需求响应；
- 场景 3：考虑模糊机会约束的碳交易机制下的需求响应。

Table 3. Cost per scenario
表 3. 各场景成本

场景	总成本/元	运行成本/元	新能源出力/kW·h	碳交易成本/元	碳排放量/t
1	3697.40	3697.40	2286.10	0	2.27
2	3409.80	3262.56	2740.00	147.24	1.83
3	3515.50	3323.14	2550.00	192.36	2.15

由表 3 可知，对比场景 1，场景 2 的碳排放量减少了 0.44 t，场景 3 的碳排放量减少了 0.12 t，这表明考虑阶梯碳交易后可以降低系统的碳排放量。与此同时，相较于场景 1，场景 2 的新能源出力增加了 453.9 kW·h，场景 3 的新能源出力增加了 263.9 kW·h，这是因为考虑阶梯碳交易与需求响应后，碳交易使得购电成本与燃气轮机供电成本增加，而需求响应负荷通过调整用能时间，减少了峰谷差，使得系统能够选择更为经济的购能方式，消纳了更多的新能源。对比场景 2，场景 3 的新能源出力减少了 190 kW·h，碳排放量增加了 0.32 t，这是因为考虑源荷不确定性后，场景 3 通过模糊机会约束留出一定的裕度应对风光出力的不确定性和负荷的预测误差，在牺牲一定的经济性的情况下，使得系统拥有更强的鲁棒性。

场景 3 的各能源出力以及优化后电热负荷的分布如图 5~8 所示。

由图 5 可知，电负荷功率需求主要由风电、燃气轮机和电网满足，并且 00:00~07:00 无新能源出力，这是因为此时处于电价谷时段，新能源运行成本大于购电成本，导致弃风弃光。而蓄电池出力也未完全按照谷电价存电、峰电价放电的传统调度模式，这是因为当系统考虑源荷不确定性后，系统通过源荷储协同留出裕度应对新能源与负荷的不确定性，证明了本文模型的有效性。对比图 3 与图 7 可知，可平移与可转移负荷从功率需求峰时段转移到谷时段，降低了峰谷差，增加了新能源的消纳空间，可削减负荷

在功率需求峰时段受到了一定的削减，而在谷时段基本不受影响，保证了用户的用电需求的同时，增加了新能源的消纳空间。

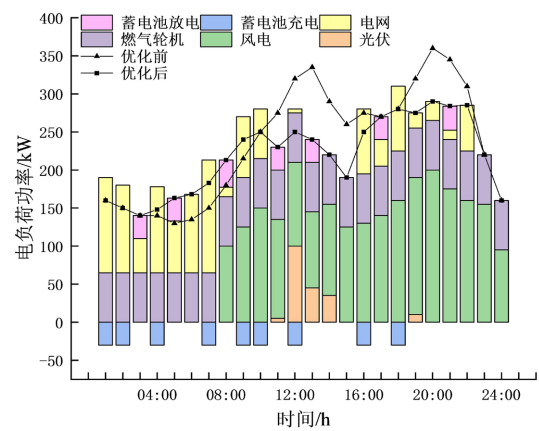


Figure 5. Electric load output of each energy source
图 5. 电负荷各能源出力情况

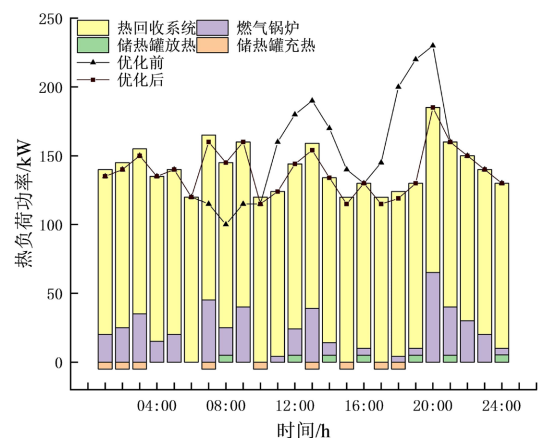


Figure 6. Heat load output of each energy source
图 6. 热负荷各能源出力情况

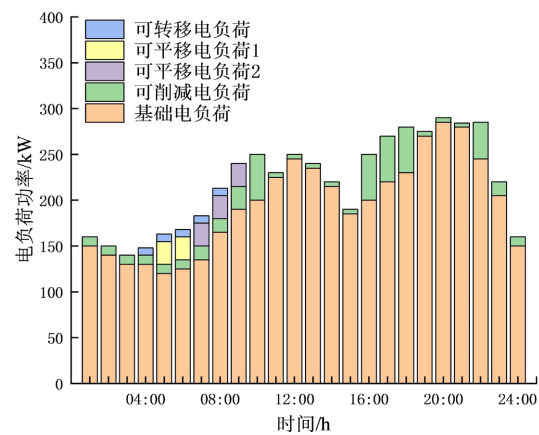


Figure 7. Optimized electrical load curve
图 7. 优化后电负荷曲线

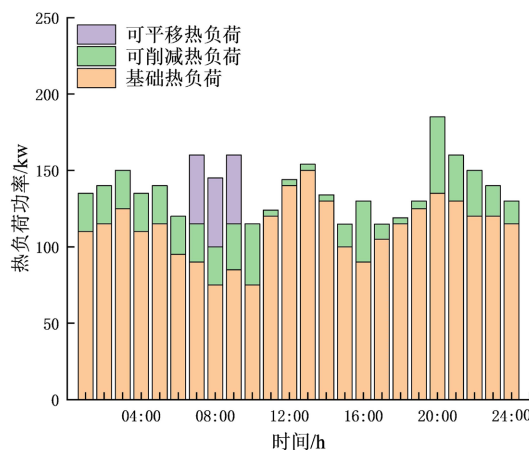


Figure 8. Optimized heat load distribution
图 8. 优化后热负荷分布

由图 6 可知, 热负荷需求主要由热回收系统提供, 而且对比图 4 和图 7 可知, 热负荷由峰时段转移到谷时段, 大幅度降低了热负荷的峰谷差, 而且热回收系统提高了系统能源的利用率, 减少了碳排放量。

6. 结论

本文考虑碳交易机制下的源荷储协同优化作用, 对比分析了三种场景的成本、新能源消纳量和碳排放量。通过场景对比, 验证了源荷储协同优化在提高系统资源的利用率, 减少碳排放量方面的作用。与此同时, 考虑碳交易机制与需求响应负荷, 降低了峰谷差, 平滑了负荷曲线, 提高了新能源的消纳, 降低了系统的运行成本与碳排放量。进一步, 通过模糊机会约束留出一定的裕度, 虽然会增加一定的运行成本和碳排放, 但是系统具有更好的鲁棒性, 在经济性与鲁棒性之间拥有更好的均衡性。

参考文献

- [1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [2] 许小虎, 邹毅. 碳交易机制对电力行业影响分析[J]. 生态经济, 2016, 32(3): 92-96.
- [3] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697-2704.
- [4] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 85-91.
- [5] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2608-2626.
- [6] 南斌, 董树锋, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1340-1349.
- [7] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.