

计及季节性碳排的综合能源系统经济优化调度

舒征宇¹, 方曼琴¹, 李黄强², 贺 菲², 姚 钦², 鲍 刚¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:为应对气候变暖与能源供应紧张的双重挑战,降低碳排放强度并提升清洁能源利用率,提出了一种计及季节性碳排的经济优化调度方法。首先,建立电-热-气-碳综合能源系统协同运行模型;其次,结合系统内碳排放季节性差异,设计碳排放配额分配机制及其对应的季节性碳交易规则;最后,构建能源层-碳流层-调控层3层耦合的低碳经济优化调度模型。仿真验证表明,该方法可有效降低系统的碳排和运行成本,其中奖惩系数和阶梯碳价的引入强化了碳减排约束效应,证实了其低碳经济协同优化能力。

关键词:综合能源系统;季节性碳交易机制;阶梯碳价;低碳优化调度

中图分类号:TM734

文献标志码:A

DOI:10.20204/j.sp.2025.09005

Economic Optimal Scheduling of Integrated Energy Systems Considering Seasonal Carbon Emissions

SHU Zhengyu¹, FANG Manqin¹, LI Huangqiang², HE Fei², YAO Qin², BAO Gang¹

(1.College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2.State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443002, China)

Abstract: To address the dual challenges of climate warming and energy supply constraints, this study proposes an economic optimal dispatch method that considers seasonal carbon emissions, aiming to reduce carbon emission intensity and enhance clean energy utilization. Firstly, a collaborative operation model for the integrated electricity-heat-gas-carbon energy system is established. Secondly, considering the seasonal variations in system carbon emissions, a carbon emission allowance allocation mechanism and corresponding seasonal carbon trading rules are designed. Finally, a three-layer coupled low-carbon economic optimal dispatch model comprising the energy layer, carbon flow layer, and regulation layer is constructed. Simulation results demonstrate that this method effectively reduces system carbon emissions and operational costs. The introduction of a reward-penalty coefficient and stepped carbon price strengthens the carbon emission reduction constraint effect, confirming its synergistic optimization capability for low-carbon economic performance.

Key words: integrated energy system; seasonal carbon trading mechanism; stepped carbon price; low-carbon optimal dispatch

0 引言

在全球气候变化加剧和能源供应日益紧张的大环境下,探寻有效的策略来降低温室气体排放、推进清洁能源的高效整合和应用,从而推动可持续性的发展进程,已成为国际社会亟待攻克的关键性议题^[1-2]。中国对气候变化给予高度重视,积极倡导

构建以市场机制为核心动力的碳排放权交易制度,以加速推进我国能源体系向“低碳化”方向的快速发展。随着中国碳交易市场的正式启动,面对新能源发电出力及电力负荷随季节波动的复杂情况,完善碳交易机制以实现电网低碳经济运行,并建立能有效应对季节性变化的多能互补发电系统调控策略,是当前急需解决的问题。

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)在提高能源利用效率、降低碳排放方面展现出了巨大潜力,在“双碳”背景下成为研究热点。当前的研究主要集中在系统架构建模、能源转换、多能互补优化

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62476153)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (62476153)

调度等领域。文献[3]基于综合能源系统的供能结构,构建考虑需求响应负载与储能装置的复合能量枢纽模型,通过充分挖掘源荷两侧的调度潜力,进一步增强新能源的利用效率。文献[4]构建电力、热力及制冷负荷的响应机制模型,借助价格策略与激励信号有序引导用户参与 IES 的调度。文献[5]提出一种以天然气和太阳能为驱动力的新型并网一体化能源系统设计,结合氢能存储,实现供冷、供热、供电的协调供应。当前综合能源系统研究主要聚焦于短期优化调度,对长期季节性因素的考量尚未系统纳入。由于不同季节的能源需求特性与碳排放强度存在显著差异,导致电力消费负荷及碳排放呈现明显的季节性波动。

近年来,碳排放交易机制作为一种关键的减排手段,得到了广泛的采纳与应用。同时,为进一步推动清洁能源的利用与系统整体的低碳运行,将碳交易机制引入综合能源系统的经济调度,探索适用于 IES 能量管控的碳交易机制。文献[6]在现有的碳排放结构基础上纳入气负荷的碳排放模块,并采用阶梯式碳交易制度,深入探究阶梯式碳交易体系及其多样化的基准价格对实现低碳运营模式的影响。文献[7]在 IES 经济调度时,采用阶梯碳价进行碳交易,通过与传统碳交易定价模型对比发现,通过设定恰当的阶梯碳价参数,可显著减少系统所产生的碳排放量。文献[8]建立了不同增长率和基准价格下的阶梯碳交易模型,研究综合能源系统运行成本和碳排放量与多个参数之间的关系。阶梯式碳价的奖惩效果虽然优于传统固定碳价,但其更适合长期大额交易机制,不适合中短期交易。此外 IES 存在明显的季节运行特性,在制定碳排放约束时,也应当充分考量碳价在不同季节中的影响。

随着碳交易的引入,IES 低碳经济优化调度问题被广泛关注,许多学者对 IES 多目标分级优化调度进行了深入研究。文献[9]结合日前规划与日内调整的两阶段优化策略,利用碳价趋势预测与低碳激励价格信号,引导用户调整能源消费模式,在优化系统运行成本的同时,有效减少碳排放量。文献[10]将电-热-气能量交换层划分为下层,并将其运行状态反馈至上层优化模块进行优化修正;同时采用遗传算法对涉及多个目标的优化问题展开深入研究。文献[11]将多微电网系统划分为内外 2 层,内层负责电压频率调控,外层负责功率管理;二者通过协同机制保障微电网稳定运行,维持功率平衡与供需均衡。文献[12]从能量流、信息流和资金流 3

个方面,研究多阶段、多目标、多层次博弈优化调度方法。

综上所述,现有综合能源系统分级优化调度方法存在层次结构单一等问题。此外,在电力系统分层过程中,如何兼顾经济性与碳减排双目标,确保综合能源系统内部的能源供需均衡,是本文的研究重点。因此,提出了计及季节性碳排的综合能源系统优化调度方法。本文的创新之处在于:构建“能源层-碳流层-调控层”3 层协同架构,解决现有综合能源系统分级优化中层级结构单一与跨层协同缺失问题;提出季节性碳交易增强机制,通过引入奖惩系数动态调节碳排放配额,提升碳市场对季节性差异的适应性;构建计及季节性碳排的多目标优化模型,耦合电-热-气-碳多能流转换约束,实现经济性与碳减排协同优化;设计分层-分时调度策略,结合 IES 运行特性,通过 3 层联动保障能源-碳流动态平衡。

1 电-热-气-碳 IES 协同运行模型

1.1 电-热-气-碳 IES 结构

电-热-气-碳 IES 的模块耦合关系如图 1 所示。该架构主要由以下 4 个层级构成:能量供给层、能量变换层、能量蓄积层及能量需求层。

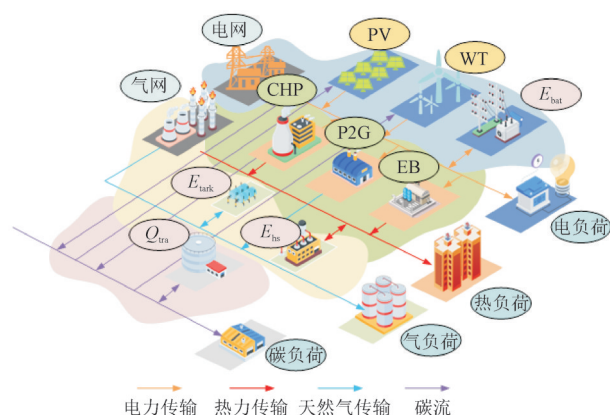


图1 IES结构

Fig.1 IES structure

其中,能量供给层由光伏(PV)、风力发电机(WT)、外部电网(Grid)和气网(Gas)组成;能量转换层包括热电联产机组(CHP)、电锅炉(EB)、电转气设备(P2G);储能层涵盖蓄电池组(E_{bat})、储热罐(E_{hs})和储气罐(E_{tank});负荷层由电负荷、热负荷和气负荷组成。设备运行与负荷消耗电力、燃气的过程产生碳排放。本文将与能源消耗紧密相关的碳排放定义为一种能量流动形式——碳流,实现转换设备及负荷侧碳排放的可量化追踪^[13-19]。

1.2 IES建模

在 IES 中,能量流平衡约束需在调度全过程严格满足负荷需求^[20-24]。IES 具备有效动员各类能源子系统参与电力及热能优化调配的能力。在碳交易机制下,碳流与电力传输、热力传输、天然气传输一样,也需要满足能量平衡方程。

$$\begin{cases} P_{WT} + P_{PV} + P_{CHP} - P_{EB} - P_{P2G} + P_{grid} \pm P_{E_{in}} = P_L \\ G_{P2G} + G_{gas} - G_{CHP} \pm G_{E_{in}} = G_L \\ H_{EB} + H_{CHP} \pm H_{E_{in}} = H_L \\ Q_{grid} + Q_{CHP} - D_{grid} - D_{CHP} \pm Q_{tra} = Car_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{WT}, P_{PV}, P_{CHP}, P_{EB}, P_{P2G}$ 分别为 WT、PV、CHP、EB、P2G 的电功率输出; G_{P2G} 为 P2G 的天然气输出量; G_{CHP} 为 CHP 的天然气消耗量; H_{EB}, H_{CHP} 分别为 EB 和 CHP 的输出热功率; P_{grid} 为系统与电网交换功率; G_{gas} 为系统与气网交换功率; Q_{tra} 为对外交易的碳配额; $P_{E_{in}}, H_{E_{in}}, G_{E_{in}}$ 分别为电储能、热储能和气储能充放功率; P_L, H_L, G_L 分别为电负荷、热负荷和气负荷的需求功率; Q_{grid} 为电网通过 PV 和 WT 获得的碳配额; Q_{CHP} 为 CHP 获得的碳配额; D_{grid} 为购电过程所造成的碳排放; D_{CHP} 为生产过程中对应设备的碳排放量; Car_L 为负荷造成的碳排放量。

在 IES 中,能量转换设备的效率模型可通过输入-输出矩阵表征:

$$\begin{bmatrix} P_{CHP} \\ H_{CHP} \\ G_{P2G} \\ H_{EB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{CHP_P} & 0 & 0 \\ \eta_{CHP_H} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{P2G} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{EB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{CHP} \\ P_{P2G} \\ P_{EB} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: η_{CHP_P} 为 CHP 电能转换率; η_{CHP_H} 为 CHP 热能转化率; η_{P2G} 为 P2G 转化率; η_{EB} 为 EB 转化率。

结合式(1)、式(2),构建 IES 输入与输出关系矩阵,用以分析 IES 中各类能量流分配调度。该矩阵包括能量变换模块、能量蓄积模块和外部能量供给模块。

$$\begin{bmatrix} P_L \\ H_L \\ G_L \\ Car_L \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} P_{WT} \\ P_{PV} \\ G_{CHP} \\ P_{EB} \\ P_{P2G} \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} P_{E_{in}} \\ H_{E_{in}} \\ G_{E_{in}} \end{bmatrix} + \lambda_3 \begin{bmatrix} P_{grid} \\ 0 \\ G_{gas} \\ Q_{tra} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: λ_1 为 4×5 矩阵,描述多能转换设备的输入输出关系; λ_2 为 4×3 矩阵,表征储能设备的充放效率与容量约束; λ_3 为 4×4 矩阵,定义系统与外部能源网络的交互约束与碳排成本。

2 季节性碳交易机制

由于 IES 具有明显的季节运行特性,因此构建

计及季节性碳排的多能耦合系统碳交易机制。以综合能源内部交易中心为 IES 的交易媒介,在确保各类资源供需均衡的同时,将过剩的能源和碳配额用于外部交易。针对我国 IES 存在的碳排放问题^[25-29],研究能源系统多目标的碳排放配额策略,并构建基于奖惩机制的阶梯式碳价模型。

2.1 IES 季节排碳特性

为了揭示 IES 所在区域碳排放季节性波动的影响,构建如下分析框架。

1) 数据预处理。为分析 IES 运行特性,将对应地区清洁能源出力与负荷需求进行归一化处理,求出各个月风电、光伏和电负荷功率在全年的占比。

$$\begin{cases} P_{WT,n}^{nor}(v) = P_{WT,n}(v) / \sum_{v=1}^{12} P_{WT,n}(v) \\ P_{PV,n}^{nor}(v) = P_{PV,n}(v) / \sum_{v=1}^{12} P_{PV,n}(v) \\ P_{L,n}^{nor}(v) = P_{L,n}(v) / \sum_{v=1}^{12} P_{L,n}(v) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{WT,n}(v), P_{PV,n}(v), P_{L,n}(v)$ 为第 n 年第 v 个月风电、光伏和电负荷功率的原始数据; $P_{WT,n}^{nor}(v), P_{PV,n}^{nor}(v), P_{L,n}^{nor}(v)$ 为第 n 年第 v 个月风电、光伏和电负荷功率的归一化值。

2) 净负荷与碳排放关联机制。IES 的碳排放主要源自燃煤或燃气机组,其出力由净负荷需求决定。净负荷需求为:

$$P'_L = P_L - P_{PV} - P_{WT} \quad (5)$$

式中: P'_L 为净负荷需求。

3) 季节性波动量化。基于碳排放机组的净负荷需求,计算由此产生的碳排放量,根据月份汇总得到各季节的碳排放量,采用时间序列分析法确定排碳的季节波动分量。

$$D_{IES} = D_{IES}^{sp} S_{IES}^{sp} + D_{IES}^{su} S_{IES}^{su} + D_{IES}^{au} S_{IES}^{au} + D_{IES}^{wi} S_{IES}^{wi} \quad (6)$$

$$\begin{cases} D_{IES}^{sp} = \sum_{v=3}^5 D_{IES}(v) & D_{IES}^{su} = \sum_{v=6}^8 D_{IES}(v) \\ D_{IES}^{au} = \sum_{v=9}^{11} D_{IES}(v) & D_{IES}^{wi} = \sum_{v=12}^2 D_{IES}(v) \end{cases}$$

式中: D_{IES} 为碳排放量; $D_{IES}^{sp}, D_{IES}^{su}, D_{IES}^{au}, D_{IES}^{wi}$ 分别为 IES 在春、夏、秋、冬的碳排放量; $D_{IES}(v)$ 为第 v 个月 IES 的碳排放量, $v=1, 2, 3, \dots, 10, 11, 12$; $S_{IES}^{sp}, S_{IES}^{su}, S_{IES}^{au}, S_{IES}^{wi}$ 分别为 IES 在春、夏、秋、冬的碳排放季节波动分量。

碳排系数分布如图 2 所示。其中,纵坐标为归一化值。由图 2 可知,冬、夏碳排系数较高,春秋碳排系数较低,说明 IES 碳排放存在明显季节性差异。

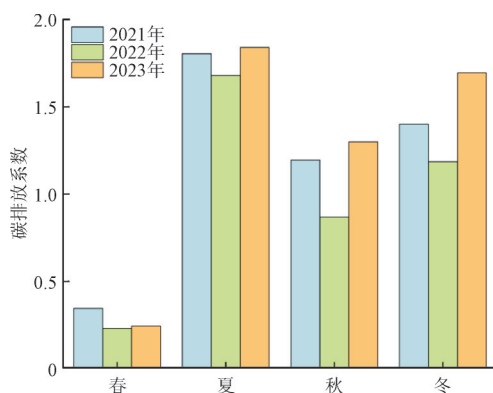


图2 2021—2023年各季节碳排系数分布

Fig.2 Carbon emission factor distribution by season from 2021 to 2023

2.2 碳配额分配方法

碳排放配额的公平分配是保障碳交易过程公正性的关键环节。传统单一指标的分配方法具有局限性,为此,本文提出一种采用灰色关联法的配额分配模型。该模型通过分层结构实现,如图3所示。

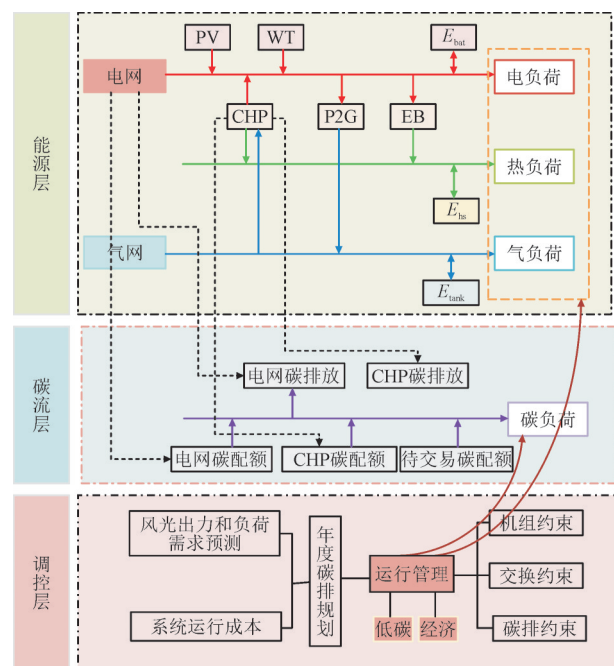


图3 IES分层运行

Fig.3 Hierarchical operation of IES

在图3中,能源层针对 IES 制定低碳运行计划;碳流层实现碳排放配额的动态分配与交易结算;调控层基于 IES 运行数据生成经济性优化目标,并协同下发调度指令,同时确保配额分配的公平性约束。在此基础上,建立一套适用于 IES 系统的能源层和调控层的碳排放份额分配指标体系,如表1所示。其中,相关性“+”表示有利于减少碳排放,相关性“-”表示会导致碳排放上升。

表1 IES碳配额指标

Table 1 IES carbon allowance indicator

层级	原则	指标	相关性
能源层	低碳	季节性碳排系数	+/-
		新能源消纳	+
调控层	公平	对外碳排放差额	-
	经济	运行成本	-

在碳排放量分配机制中,能源层遵循低碳性原则,依据季节性碳排系数与新能源消纳率这2项指标进行评估;调控层遵循公平性与经济性原则,重点考量对外碳排放差额及系统运行成本。根据用户在低碳、公平和经济方面需求,在表1中列出对应关系。

根据历史运行数据预测 IES 年碳排量。采用基于灰色关联法的碳配额模型,设置 L 个层级和 J 个指标,建立碳交易配额指标矩阵为:

$$S_m = \begin{bmatrix} s_m(1,1) & s_m(1,2) & \cdots & s_m(1,J) \\ s_m(2,1) & s_m(2,2) & \cdots & s_m(2,J) \\ \cdots & \cdots & s_m(l,j) & \cdots \\ s_m(L,1) & s_m(L,2) & \cdots & s_m(L,J) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: S_m 为第 m 天碳交易配额指标矩阵, $m = 1, 2, \dots, M$, M 为每个季度测算天数; l 为层级数, $l = 1, 2, \dots, L$; j 为碳配额指标数, $j = 1, 2, \dots, J$; $s_m(l,j)$ 为第 m 天第 l 个层级第 j 个指标碳交易配额。

根据表1中指标体系将 j 的取值定为[1,4],依据 IES 历史数据计算碳交易配额极限值:

$$\begin{cases} \min \bar{S}_{IES} = \frac{1}{4M} \sum_{m=1}^{365} [\bar{S}_m^{sp}(l,j) + \bar{S}_m^{su}(l,j) + \bar{S}_m^{au}(l,j) + \bar{S}_m^{wi}(l,j)] \\ \max \bar{S}_{IES} = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^{365} [\bar{S}_m^{su}(l,j) + \bar{S}_m^{wi}(l,j)] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\min \bar{S}_{IES}$, $\max \bar{S}_{IES}$ 分别为 IES 碳交易配额的最小值和最大值; $\bar{S}_m^{sp}(l,j)$, $\bar{S}_m^{su}(l,j)$, $\bar{S}_m^{au}(l,j)$, $\bar{S}_m^{wi}(l,j)$ 分别为春、夏、秋、冬配额分配的估计量,单季节配额量的最小值为四季配额量平均值。

根据2.1节分析可知,夏、冬季的排碳需求较大,单季节配额的最大值取夏、冬季配额量平均值。

为方便后续计算,对相关数据进行无量纲化处理。第 l 层第 j 个指标配额的无量纲化处理方法为:

$$\begin{cases} S'_m(l,j) = \frac{\max \bar{S}_{IES} - S_m(l,j)}{\max \bar{S}_{IES} - \min \bar{S}_{IES}} \\ S''_m(l,j) = \frac{S_m(l,j) - \min \bar{S}_{IES}}{\max \bar{S}_{IES} - \min \bar{S}_{IES}} \\ \min \Delta_m(l,j) = \min \{S'_m(l,j), S''_m(l,j)\} \\ \max \Delta_m(l,j) = \max \{S'_m(l,j), S''_m(l,j)\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S'_m(lj)$, $S''_m(lj)$ 分别为相较于最大偏差值和最小偏差的无量纲值; $\min \Delta_m(lj)$, $\max \Delta_m(lj)$ 分别为最小偏差和最大偏差的无量纲值。

绝对差值及其所对应的关联系数为:

$$\begin{cases} \Delta_m(lj) = \left| \frac{1}{4M} S_{\text{year}}(lj) - S_m(lj) \right| \\ \xi_m(lj) = \frac{\min \Delta_m(lj) + \rho \max \Delta_m(lj)}{\Delta_m(lj) + \rho \max \Delta_m(lj)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta_m(lj)$ 为第 l 层第 j 个指标的绝对差值; $\xi_m(lj)$ 为第 l 层第 j 个指标所对应的关联系数; $S_{\text{year}}(lj)$ 为以年为结算周期的每日配额分配量; $S_m(lj)$ 为以季节为结算周期的每日配额分配量; ρ 为分辨系数, $\rho = 0.5$ 。

配额的关联度为:

$$\gamma_m(lj) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \xi_m(lj) \quad (11)$$

式中: $\gamma_m(lj)$ 为第 l 层第 j 个指标配额的关联度。

将 j 个指标对配额分配的影响量化为:

$$\bar{S}_{\text{IES}}(lj) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \gamma_m(lj) S'_m(lj) \quad (12)$$

式中: $\bar{S}_{\text{IES}}(lj)$ 为第 l 层第 j 个指标的配额。

当第 l 层第 j 个指标下 $\bar{S}_{\text{IES}}(lj)$ 越大时, 配额分配越多。IES 中各个层级的配额比重系数为:

$$W_{\text{IES}}(lj) = \frac{\bar{S}_{\text{IES}}(lj)}{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \bar{S}_{\text{IES}}(lj)} \quad (13)$$

式中: $W_{\text{IES}}(lj)$ 为 IES 中各个层级的配额比重系数。

以各主体配额分配比例 $W_{\text{IES}}(lj)$ 为依据, 对各主体在各阶段的配额进行测算。

2.3 季节性阶梯式碳交易机制

为引导 IES 内部主体按照季节碳排放规划运行, 采用基于奖惩系数的阶梯碳价方法, 根据季节性排碳系数设置各季节下的奖惩系数。阶梯碳价 C_{car} 的梯级分布情况为:

$$C_{\text{car}} = \begin{cases} -cD_{\text{max}} - c(1+\gamma)(D_{\text{all}} - D_{\text{max}}), & D \leq D_{\text{all}} - D_{\text{max}} \\ -cD, & D_{\text{all}} - D_{\text{max}} < D \leq D_{\text{all}} \\ c(D - D_{\text{all}}), & D_{\text{all}} < D \leq D_{\text{all}} + D_{\text{max}} \\ cD_{\text{max}} + c(1+\gamma)(D - D_{\text{all}} - D_{\text{max}}), & D_{\text{all}} + D_{\text{max}} < D \leq D_{\text{all}} + 2D_{\text{max}} \\ cD_{\text{max}} + c(1+\gamma)(D - D_{\text{all}} - D_{\text{max}}) + c(1+2\gamma)(D - D_{\text{all}} - 2D_{\text{max}}), & D_{\text{all}} + 2D_{\text{max}} < D \leq D_{\text{all}} + 3D_{\text{max}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: c 为免费碳排放额度下的交易价格; D_{all} 为 IES 所获得的碳排放配额; D_{max} 为允许超出的碳排放最大限额; D 为各个单元实际产生的碳排放总量; γ 为与奖惩机制相关联的价格增长率系数。

确保碳排放量与碳配额一致并避免配额超限, 提出季节性碳交易机制以取代传统年度结算方式。该机制通过分析历史数据预测当年碳排放趋势, 实现分季节碳排放规划, 并规定: (1) 电网购电产生的碳排放由 IES 承担; (2) 内部实体各自负责其运营产生的碳排放; (3) 负荷侧能耗碳排放计入负荷侧排放责任。季节性碳排放交易机制的运行模式如图 4 所示。

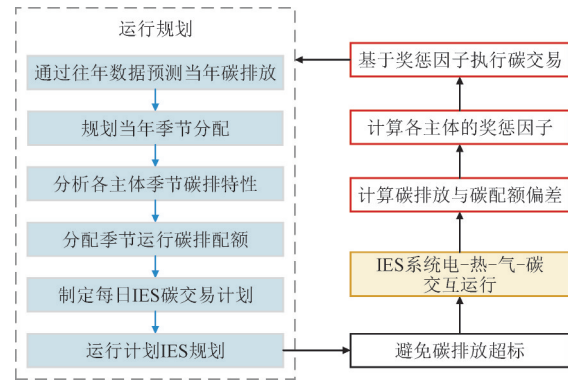


图4 季节性碳交易机制运行模式
Fig.4 Operational model of seasonal carbon trading mechanism

各季节碳排放关系为:

$$\begin{cases} \{D_{i1}^{\text{sp}}, D_{i2}^{\text{su}}, D_{i3}^{\text{au}}, D_{i4}^{\text{wi}}\} = \{\alpha_{\text{sp}} D_{\text{all}}, \alpha_{\text{su}} D_{\text{all}}, \alpha_{\text{au}} D_{\text{all}}, \alpha_{\text{wi}} D_{\text{all}}\} \\ \sum_{i=1}^I (D_{i1}^{\text{sp}} + D_{i2}^{\text{su}} + D_{i3}^{\text{au}} + D_{i4}^{\text{wi}}) \leq D_{\text{all}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: i 为 IES 内部主体编号; I 为系统总单元数; $\alpha_{\text{sp}}, \alpha_{\text{su}}, \alpha_{\text{au}}, \alpha_{\text{wi}}$ 分别为 4 个季节的碳排放占比, $\alpha_{\text{sp}} + \alpha_{\text{su}} + \alpha_{\text{au}} + \alpha_{\text{wi}} = 1$; $D_{\text{all}}^{\text{max}}$ 为 IES 所有的配额最大值; $D_{i1}^{\text{sp}}, D_{i2}^{\text{su}}, D_{i3}^{\text{au}}, D_{i4}^{\text{wi}}$ 分别为 4 个季节中第 i 个主体的碳排放量。

为提升碳排放核算的公平性与准确性, 本文优化了碳排放计算模型。鉴于负荷供能过程伴随有碳排放, 所以重构了实际碳排放统计方法, 建立 IES 多源碳排放计算模型:

$$\begin{cases} D_i(t) = \psi_P P_i(t) + \psi_G G_i(t) + \psi_H H_i(t) \\ D_i(t) \in \{D_{i1}^{\text{sp}}, D_{i2}^{\text{su}}, D_{i3}^{\text{au}}, D_{i4}^{\text{wi}}\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $D_i(t)$ 为 t 时段第 i 个主体碳排放量; ψ_P, ψ_G, ψ_H 分别为电、热、气 3 类供能设备对应的碳排系数; $P_i(t), G_i(t), H_i(t)$ 为 t 时段第 i 个主体的输出能量。

由于 P2G 能够吸收 CO_2 , 因此每日的碳排放量为:

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^I D_i(t) \leq \alpha_u W_{\text{IES}} \bar{S}_{\text{IES}} \quad (17)$$

式中: α_u 为各季节的碳排系数, $\alpha_u \in \{\alpha_{\text{sp}}, \alpha_{\text{su}}, \alpha_{\text{au}}, \alpha_{\text{wi}}\}$ 。

3 计及季节性碳排的经济优化调度模型

为实现运行成本及碳排放交易成本的最小化,对 IES 实施分层运行调度策略。在能源层和碳流层建立调度模型,通过调控层制定的运行计划对系统实现低碳经济调控。同时将季节性碳配额折算到每日,对系统运行进行约束。

3.1 能源层调度模型

构建能源层调度模型 f_{eco} , 主要计及运行成本、弃风弃光成本和购能成本,并满足系统供需平衡约束。

$$f_{\text{eco}} = f_{\text{cost}} + f_{\text{wpv}} + f_{\text{buy}} \quad (18)$$

$$f_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T [c_i^P P_i(t) + c_i^G G_i(t) + c_i^H H_i(t)] \quad (19)$$

式中: $f_{\text{cost}}, f_{\text{wpv}}, f_{\text{buy}}$ 分别为运行成本、弃风弃光成本、购能成本; c_i^P, c_i^H, c_i^G 分别为电、热、气的成本系数; $P_i(t), H_i(t), G_i(t)$ 为电、热、气在 t 时段的输出功率。

$$f_{\text{wpv}} = \chi_i \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{WT}_i}(t) - \bar{P}_{\text{WT}_i}(t) + P_{\text{PV}_i}(t) - \bar{P}_{\text{PV}_i}(t)] \quad (20)$$

式中: χ_i 为弃风、弃光惩罚系数; $P_{\text{WT}_i}(t), P_{\text{PV}_i}(t)$ 分别为 t 时段风电、光伏的发电功率; $\bar{P}_{\text{WT}_i}(t), \bar{P}_{\text{PV}_i}(t)$ 分别为 t 时段风电、光伏的消耗功率。

$$f_{\text{buy}} = r_p \Delta P_{\text{grid}}(t) + r_g \Delta G_{\text{gas}}(t) + r_h \Delta H_{\text{heat}}(t) \quad (21)$$

式中: r_p, r_g, r_h 分别为与电网、气网、热网进行能量交互的成本系数; $\Delta P_{\text{grid}}(t), \Delta G_{\text{gas}}(t), \Delta H_{\text{heat}}(t)$ 分别为 t 时段与电、气、热网络交换的电力功率、天然气流量及热量。

能源层在满足式(3)动态平衡的同时,还满足以下约束条件:

$$\begin{cases} P_{\min_CHP} \leq P_{\text{CHP}_i}(t) \leq P_{\max_CHP} \\ R_{\text{CHP_down}} \leq |P_{\text{CHP}_i}(t) - P_{\text{CHP}_i}(t-1)| \leq R_{\text{CHP_up}} \\ P_{\min_EB} \leq P_{\text{EB}_i}(t) \leq P_{\max_EB} \\ P_{\min_P2G} \leq P_{\text{P2G}_i}(t) \leq P_{\max_P2G} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{CHP}_i}(t), P_{\text{CHP}_i}(t-1)$ 分别为 $t, t-1$ 时段 CHP 输出功率; $P_{\text{EB}_i}(t), P_{\text{P2G}_i}(t)$ 分别为 t 时段 EB、P2G 输出功率; $P_{\min_CHP}, P_{\max_CHP}, P_{\min_EB}, P_{\max_EB}, P_{\min_P2G}, P_{\max_P2G}$ 分别为 CPH、EB、P2G 输出功率的最小值和最大值; $R_{\text{CHP_down}}, R_{\text{CHP_up}}$ 分别为爬坡速率的最小值和最大值。

为实现系统整体经济效益最大化及低碳排放

目标,需对 IES 与电网、气网间的交换功率施加限制约束与调控。具体约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\max_trans} \\ 0 \leq \Delta G_{\text{grid}}(t) \leq G_{\max_trans} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\max_trans}, G_{\max_trans}$ 分别为电网和气网在进行功率交换时所能达到的最大极限值。

储能设备运行约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{t=1}^{24} E_i^N(t) \leq E_{i_max}^N \\ P_{i_min}^N \leq P_i^N(t) \leq P_{i_max}^N \end{cases} \quad (24)$$

式中: $E_i^N(t)$ 为储能设备在 t 时段容量; $E_{i_max}^N$ 为储能设备所能达到的最大存储容量; $P_i^N(t)$ 为储能设备 t 时段充放电功率; $P_{i_min}^N, P_{i_max}^N$ 分别为储能设备允许的最小及最大输出功率范围; $N = E_{\text{bat}}, E_{\text{tank}}, E_{\text{hs}}$ 。

3.2 碳流层模型

构建碳流层目标函数 C_{CO_2} , 需要综合分析系统碳排放量、碳配额,使其最小并满足碳流的动态平衡。

$$C_{\text{CO}_2} = C_1 + C_2 \quad (25)$$

$$C_1 = C_{\text{car}} \left[\lim \bar{S}_{\text{IES}} - \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{24} d_i P_i(t) \right] \quad (26)$$

式中: C_1, C_2 分别为碳交易成本和碳排放成本; $\lim \bar{S}_{\text{IES}}$ 为 IES 碳排放配额极限, $\lim \bar{S}_{\text{IES}} \in [\min \bar{S}_{\text{IES}}, \max \bar{S}_{\text{IES}}]$; d_i 为配额分配系数。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{24} d_i P_i(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^{24} D_i(t) \quad (27)$$

IES 向电热气网的购能对应碳排成本为:

$$C_2 = C_{\text{car}} [d_{\text{grid}} \Delta P_{\text{grid}}(t) + d_{\text{gas}} \Delta G_{\text{gas}}(t) + d_{\text{heat}} \Delta H_{\text{heat}}(t)] \quad (28)$$

式中: $d_{\text{grid}}, d_{\text{gas}}, d_{\text{heat}}$ 分别为向电网、气网、热网获取能量所产生的碳排系数。

碳流层需要遵循每日碳排放限制,如式(16)所示,并且需维持碳交易与碳排放之间的动态平衡状态:

$$D_{\text{sell}}(t) = \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{i=1}^I D_i(t) + D_{\text{buy}}(t) \right] \quad (29)$$

式中: $D_{\text{sell}}(t), D_{\text{buy}}(t)$ 为与碳交易市场的配额交互值。

3.3 调控层模型

构建调控层模型,需综合考虑设计能源层和碳流层的调度决策互动方案,保障系统低碳经济运行。

$$f_{\text{IES}} = \min \left(\tau_1 f_{\text{eco}} + \tau_2 \frac{\gamma_{\text{year}}}{4M} C_{\text{CO}_2} \right) \quad (30)$$

式中: f_{IES} 为调控层目标函数; τ_1, τ_2 分别为经济目标

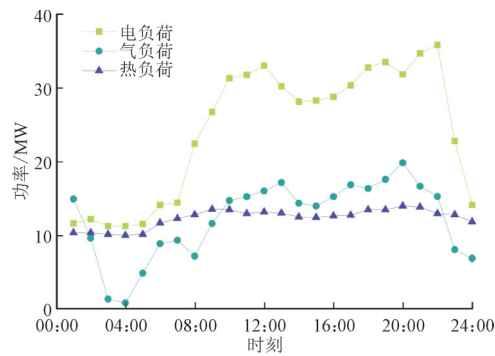


图7 电、热、气负荷预测值

Fig.7 Forecasted load profiles for electricity, heating, and gas

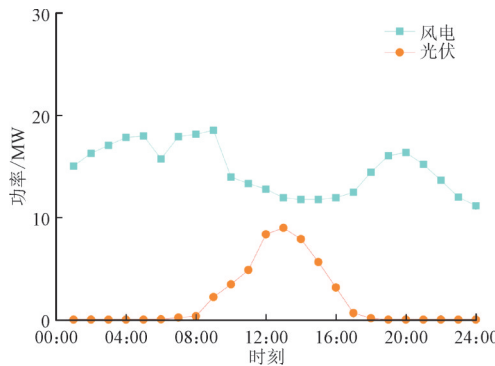


图8 清洁能源出力预测值

Fig.8 Forecasted output of clean energy sources

4.2 基于奖惩系数的阶梯式碳交易机制对 IES 调度影响分析

为了分析季节性阶梯式碳交易机制对 IES 系统调度流程的影响,设计 5 组场景如表 6,通过多维度指标评估其低碳经济性提升效果。

表6 不同设置条件下的5组场景

Table 6 Five scenario sets under different configuration settings

场景	设置条件
1	固定碳价
2	阶梯碳价
3	基于奖惩系数的年度交易阶梯式碳价
4	基于奖惩系数的按季度平分交易阶梯式碳价
5	基于奖惩系数的季节性阶梯式碳价

对场景 1、场景 2、场景 3 进行对比分析,评估奖惩系数及多样化的碳定价策略对碳排放总量及碳交易成本的影响,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,阶梯碳价机制通过奖惩措施显著降低 IES 碳排放量,降幅分别为 6.23% 与 7.98%。然而,该机制同步推高碳交易成本,增幅分别达 36.89% 和 36.03%。对比场景 2 与场景 3 可知,引入奖惩系数后,IES 碳排放量进一步减少 5 688 t,碳交易成本不升反降,降幅 0.48%,节约 17 535 元,表明奖惩机制在引导低碳运行方面效果更优。

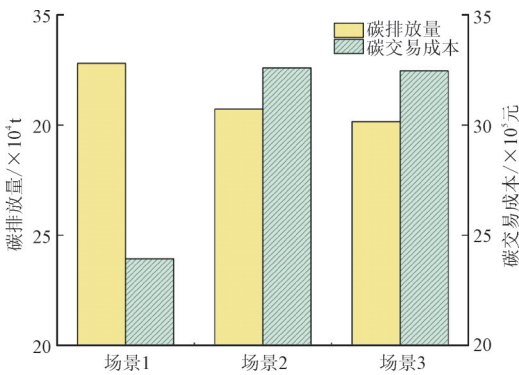


图9 不同场景下碳排放量和碳交易成本对比

Fig.9 Comparison of carbon emissions and carbon trading costs under different scenarios

为进一步分析 γ 对系统经济调度产生的影响,在场景 3 中设置 γ 分别为 0,0.15,0.3,0.45,分析不同碳交易基准价格、运行成本及碳排放量的变动趋势,详见图 10、图 11。

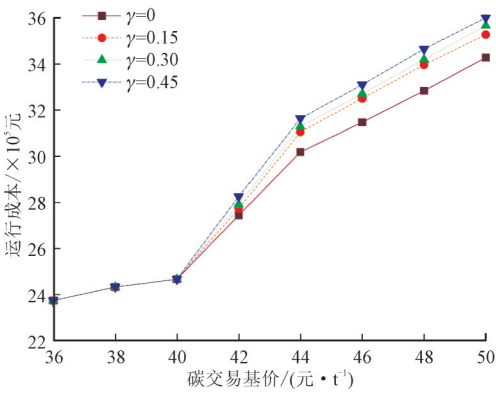


图10 不同基价下 γ 对运行成本的影响

Fig.10 Impact of γ on operating costs under different base carbon prices

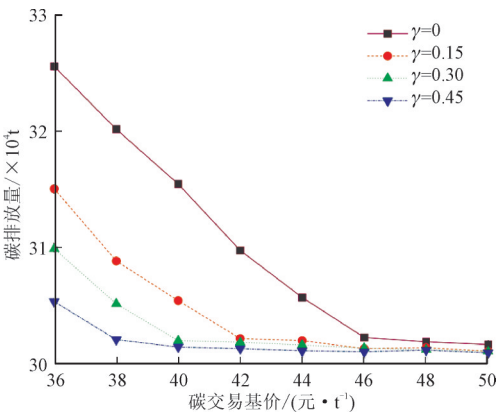


图11 不同基价下 γ 对碳排放量的影响

Fig.11 Impact of γ on carbon emissions under different base carbon prices

由图 10、图 11 可知,当碳价基准值过低时, γ 对运行成本的调节作用失效;碳价升至 40 元/t 以上后,运行成本随 γ 增大而显著上升。这表明通过协

同配置 γ 与碳价可引导系统低碳运行。同时,调节碳价基准值能直接约束碳排放,但当碳价超过临界值后, γ 与碳价的调节对减排效果提升有限,因系统在满足供需平衡时存在固有碳排放下限。综上, γ 的取值对低碳经济调度效果具有决定性影响:在保障负荷需求前提下, γ 增大将同时推高运行成本并增强碳减排约束强度。为平衡系统经济性与低碳性,当 $\gamma=0.15$ 时,可在控制成本的同时实现较优减排效果。

4.3 季节性碳交易的 IES 经济调度分析

由于 IES 碳排放存在明显季节性差异,为分析季节性交易策略对 IES 调度的影响,设置 $\gamma=0.15$,选择场景 3—场景 5 进行对比分析。不同季节下各场景碳排放量如图 12 所示。

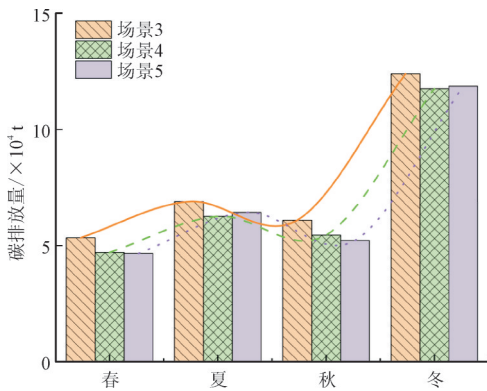


图 12 各场景碳排放量

Fig.12 Carbon emissions under various scenarios

由图 12 可知,相较于场景 3 的年度碳交易机制,场景 4 与场景 5 在各季节均实现碳排放量下降;场景 4 各季减排率相同,均为 2.15%;场景 5 的季节性减排率为春季 2.27%、夏季 1.55%、秋季 2.94%、冬季 1.84%。为验证季节性碳交易机制的经济性,进一步对比场景 4 与场景 5 的系统年度运行成本,如表 7 所示。

表 7 2 种场景下系统运行成本

Table 7 System operating costs under two scenarios

项目	场景 4	场景 5
春	553 700	553 980
夏	734 200	723 800
秋	547 320	548 260
冬	1 490 210	1 465 471
总计	3 325 430	3 291 511

分析表明,通过季节性碳配额优化分配,IES 全年运行成本较场景 4 降低 1.02%,在保障系统低碳运行的同时实现经济性提升,验证了该调度策略的

优越性。基于季节性优化调度框架,进一步选取冬季典型日进行验证。该日具有负荷需求高、清洁能源出力低、IES 调度复杂度大等特征,调度结果如图 13 所示。

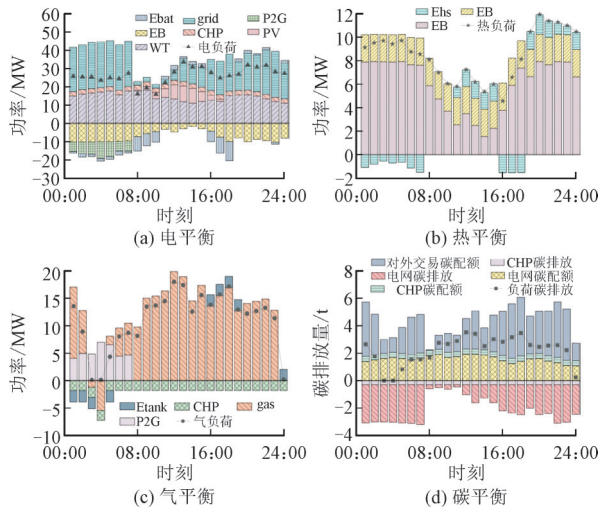


图 13 IES 冬季低碳调度结果

Fig.13 Winter low-carbon dispatching results for IES

系统运行主要受负荷需求主导,并受分时电价调节。电价谷时段:系统大量购电驱动 P2G 与 EB 运行,P2G 高效生产天然气供给 CHP,富余天然气外售;电价平时段:维持稳定购电量以保障电力供需平衡,EB 重点承担热力动态平衡调节;电价峰时段:储能系统最小化电网购电行为。辅助设备协同策略:储气装置以维持 IES 多能流平衡为目标进行充放调节;EB 作为供暖稳定性的核心保障设备;为强化减排,提升 P2G 运行强度以吸收系统内 CO₂ 排放;CHP 机组采用小功率平稳输出策略,既确保出力稳定性,又减少功率频繁调节导致的额外损耗及碳排放。若当日碳排放量超过预设目标,则通过碳配额交易实现日级碳流平衡。

5 结论

本文针对 IES 的碳排放季节性差异,提出了计及奖惩系数的季节性碳交易机制,构建了能源层-碳流层-调控层低碳经济优化调度模型。基于算例仿真分析,得到以下结论:

1) 本文将碳流引入到电-热-气能量枢纽中,构建电-热-气-碳多能流能量枢纽模型,实现 IES 碳足迹可视化与精准管控。

2) 阶梯碳价+奖惩机制增效:较固定碳价减排 6.23%;引入奖惩系数后,减排量提升至 7.98%,交易成本降低 0.48%。

3)季节性碳交易策略优势:春、夏、秋、冬碳减排率分别为 2.27%, 1.55%, 2.94%, 1.84%。相比于各季度平分碳配额策略,该策略的全年系统运行成本降低了 1.04%。

该策略实现碳排-成本双降,为 IES 低碳经济运行提供新路径。后续将融合碳捕集装置深化研究。

参考文献

- [1] 柳思贤,丁坤,董海鹰.考虑碳捕集和电转气的零碳园区综合能源系统经济调度[J].太阳能学报,2024,45(9):188-196.
LIU Sixian, DING Kun, DONG Haiying. Economic dispatch of integrated energy system in zero-carbon park considering carbon capture and power-to-gas[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 188-196.
- [2] 潘路欣,王东林,葛津铭,等.计及需求响应与碳-绿证交易的P2G系统园区综合能源优化[J].电网与清洁能源,2025,41(3):92-102.
PAN Luxin, WANG Donglin, GE Jinming, et al. Comprehensive energy optimization of P2G park considering demand response and carbon - green certificate trading[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 92-102.
- [3] 李云鹭,刘吉臻,胡阳.计及低碳响应的综合能源系统多时间尺度源-荷互动优化调度[J].太阳能学报,2024,45(11):84-98.
LI Yunyu, LIU Jizhen, HU Yang. Optimal scheduling of multi-time scale source-load interaction in integrated energy system considering low-carbon response[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(11): 84-98.
- [4] 许周,孙永辉,谢东亮.计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J].电力系统自动化,2020,44:53-59.
XU Zhou, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering electric/ thermal flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 53-59.
- [5] 李建林,孙浩元,梁忠豪,等.多能需求场景下的综合能源系统容量优化配置[J].高电压技术,2025,51(5):2114-2124.
LI Jianlin, SUN Haoyuan, LIANG Zhonghao, et al. Optimal capacity allocation of integrated energy systems under multi-energy demand scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2114-2124.
- [6] 周建华,梁昌誉,史林军,等.计及阶梯式碳交易机制的综合能源系统优化调度[J].中国电力,2025,58(2):77-87.
ZHOU Jianhua, LIANG Changyu, SHI Linjun, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering the ladder-type carbon Trading Mechanism[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 77-87.
- [7] YAN N, MA G C, LI X J, et al. Low-carbon economic dispatch method for integrated energy system considering seasonal carbon flow dynamic balance[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 14(1): 576-586.
- [8] JIAO P, CAI X, WANG L, et al. Flexibility operation for integrated energy system considering hydrogen energy under inertia characteristics and stepped carbon trading mechanism[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104809.
- [9] 刘可真,李林耘,林铮,等.考虑碳排放流的电-气互联系统源荷互动低碳经济调度[J].电力自动化设备,2024,44(5):1-10.
LIU Kezhen, LI Linyun, LIN Zheng, et al. Low-carbon Economic
- Dispatch of Source-Load Interaction in Electricity-Gas Interconnected System Considering Carbon Emission Streams[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 1-10.
- [10] 高强,王天群,高挺,等.碳源/汇作用下气电热综合能源系统多目标分层协调优化调度[J].电测与仪表,2024,61(9):12-22.
GAO Qiang, WANG Tianqun, GAO Ting, et al. Multi-objective hierarchical coordination and optimal scheduling of gas-power-heat integrated energy system under the action of carbon source/sink[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 12-22.
- [11] KARIMI H, JADID S, HASANZADEH S. Optimal-sustainable multi-energy management of microgrid systems considering integration of renewable energy resources: A multi-layer four-objective optimization[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 36: 126-138.
- [12] 李威善,方子健,李飞,等.含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6611-6625.
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.
- [13] WANG H, LI B, ZHAO A, et al. Two-stage planning model of power-to-gas station considering carbon emission flow[J]. Energy, 2024, 296: 131088.
- [14] 黄元平,苏睿,何国彬,等.考虑电-氢混合储能的电-热综合能源系统最优规划[J].电力系统保护与控制,2025,53(13):152-162.
HUANG Yuanping, SU Rui, HE Guobin, et al. Optimal planning of electric-heat integrated energy systems considering electric-hydrogen hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 152-162.
- [15] 程远林,张舒,张毅,等.计及价格敏感区间下惩罚型碳价的CCS-P2G虚拟电厂鲁棒优化[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):251-259.
CHENG Yuanlin, ZHANG Shu, ZHANG Yi, et al. Robust optimization of CCS-P2G virtual power plants considering penalized carbon prices in price-sensitive intervals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 251-259.
- [16] 杨丰任,王鸿,王致杰.基于碳排放生产优先级的综合能源虚拟电厂优化运行策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):192-202.
YANG Fengren, WANG Hong, WANG Zhijie. Optimal operation strategy of integrated energy virtual power plant based on production priority of carbon emission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 192-202.
- [17] 程杉,卢瀚涛,王灿.考虑P2G-CCS-HFC协调运行的园区综合能源系统分布鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2025,53(10):87-101.
CHENG Shan, LU Yuantao, WANG Ca. Distributed robust optimal scheduling for a regional integrated energy system considering coordinated operation of P2G-CCS-HFC[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 87-101.
- [18] 李欣,陈英彰,李涵文,等.考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J].电力建设,2024,45(6):58-69.
LI Xin, Chen Yingzhang, LI Hanwen, et al. Two-stage robust optimization of low-carbon economic dispatch for electricity-

- thermal integrated energy system considering carbon trade[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 58-69.
- [19] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 102-114.
- WANG Limeng, LIU Xuemeng, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 102-114.
- [20] NEZHED A E, JOWKAR S, SABOUR T T, et al. A short-term wind-hydrothermal operational framework in the presence of pumped-hydro storage[J]. E-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2024; 8: 100577.
- [21] 闫振靖, 李然, 杨欣可, 等. 基于不确定性分析与电价波动的电-氢-热综合能源系统分析[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 69-77.
- YAN Zhenjing, LI Ran, YANG Kexin, et al. Analysis of electric-hydrogen-thermal integrated energy system based on uncertainty analysis and electricity tariff fluctuation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 69-77.
- [22] 许乐, 徐玉韬, 袁旭峰, 等. 计及动态碳排的含氢综合能源系统低碳调度[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(2): 120-129.
- XU Le, XU Yutao, YUAN Xufeng, et al. Low-carbon dispatching of hydrogen-based integrated energy systems considering dynamic carbon emissions[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(2): 120-129.
- [23] 孙靛雨, 林泽源, 李伟. 考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 88-96.
- SUN Jingyu, LIN Zeyuan, LI Wei. Research on multi-objective comprehensive energy optimization configuration scheme considering hydrogen storage[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 88-96.
- [24] 张浩, 陆海, 罗恩博, 等. 考虑资源灵活性的多区域综合能源系统协同调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(9): 148-154.
- ZHANG Hao, LU Hai, LUO Enbo, et al. Coordinated scheduling of multi-region integrated energy systems considering resource flexibility[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 148-154.
- [25] 吴文睿, 于洋, 张迎迎, 等. 考虑生命周期碳排放与绿证-碳联合交易的能源综合服务站低碳经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4): 58-67.
- WU Wenrui, YU Yang, ZHANG Yingying, et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated energy service station considering life cycle carbon emission and green certificate-carbon joint trading[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4): 58-67.
- [26] 魏伟, 叶利, 方毅, 等. 考虑碳排放配额和碳交易的新能源电力系统日前优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 130-136.
- WEI Wei, YE Li, FANG Yi, et al. Day-ahead optimal scheduling of new energy power system considering carbon emission quota and carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 130-136.
- [27] 王金锋, 于广亮, 姜炎君, 等. 基于阶梯碳交易的多微网电能合作运行优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 28-39.
- WANG Jinfeng, YU Guang liang, JIANG Yanjun, et al. The optimization strategy for collaborative operation of multi-microgrids based on tiered carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 28-39.
- [28] 庞清仑, 刘文颖, 申自裕, 等. 基于碳排放分析的综合能源系统低碳优化调度方法[J]. 智能电网, 2022, 12(3): 82-91.
- PANG Qinglun, LIU Wenying, SHEN Ziyu, et al. A low-carbon optimal dispatch method for integrated energy systems based on carbon emission analysis[J]. Smart Grid, 2022, 12(3): 82-91.
- [29] 刘珊珊, 李柯睿, 刘柏康, 等. 绿证-碳联合机制下含多类型需求响应和氢能多元利用的综合能源系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 203-215.
- LIU Shanshan, LI Kerui, LIU Baikang, et al. Optimal dispatching of integrated energy systems with diverse demand response and multifaceted hydrogen utilization under green certificate-carbon joint mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 203-215.
- [30] 赵北涛, 刘光宇, 韩东升. 考虑氢能耦合及阶梯碳交易的综合能源系统多时间尺度低碳优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 35-46.
- ZHAO Beitao, LIU Guangyu, HAN Dongsheng. Multi-time-scale low-carbon optimal scheduling of integrated energy systems considering hydrogen energy coupling and ladder carbon trading[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 35-46.
- [31] 吕东, 冒烨颖, 丁敏. 考虑热-电-气-氢-碳耦合与源荷响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(3): 65-70.
- LYU Dong, MAO Yeying, DING Min. Optimal scheduling of integrated energy system considering heat-electricity-gas-hydrogen-carbon coupling and the source-load response[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(3): 65-70.
- [32] 刘涛, 王瑞琪, 刘松, 等. 考虑碳-绿证交易与需求响应的综合能源系统合作博弈调度[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(6): 8-15.
- LIU Tao, WANG Ruiqi, LIU Song, et al. Collaborative game scheduling of integrated energy systems considering carbon-green certificate trading and demand response[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6): 8-15.
- [33] 颜宁, 马广超, 李相俊, 等. 基于季节性碳交易机制的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 918-932.
- YAN Ning, MA Guangchao, LI Xiangjun, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system in parks based on seasonal carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 918-932.

(责任编辑 付小平)

收稿日期: 2024-12-02; 修改日期: 2025-08-02

作者简介: 舒征宇(1983), 男, 湖北宜昌人, 博士, 副教授, 主要研究方向为含新能源的电力系统运行与调度控制。E-mail: 18702031@qq.com

方曼琴(2000), 女, 通信作者, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化调度。E-mail: fmq13886710182@163.com