DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.116 **中图分类号**：TM73 **文献标志码**：A

基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统低碳经济优化运行研究

赵慧荣[1]，李 草[1]，窦真兰[2]，张春雁[2]，彭道刚[1]
(1.上海电力大学人工智能学部，上海 201306；2.国网上海综合能源服务有限公司，上海 200023)

摘要：为实现当前多个互联综合能源系统发展的经济性与低碳性的同步协调，提出1种基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统低碳经济优化运行的方法。首先利用能源枢纽对各能源站主体进行统一建模，引入奖惩系数建立奖惩阶梯型碳交易机制模型；其次考虑到各综合能源站之间的协调运行与数据隐私问题，基于合作博弈理念建立互联系统的低碳经济优化调度模型，采用非对称纳什议价分配策略对各能源站的收益按贡献进行分配，结合交替方向乘子法算法对其进行求解；最后通过仿真实验验证了所提合作博弈低碳经济运行方案的有效性。

关键词：互联综合能源系统；奖惩阶梯型碳交易；合作博弈；非对称纳什议价分配；交替方向乘子法

Research on Low-carbon Economic and Optimal Operation of Multi-energy Hub Interconnected Integrated Energy System Based on Cooperative Game

ZHAO Huirong[1], LI Cao[1], DOU Zhenlan[2], ZHANG Chunyan[2], PENG Daogang[1]
(1. Faculty of Artificial Intelligence, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 2. State Grid Shanghai Integrated Energy Service Co., Ltd., Shanghai 200023, China)

Abstract: To realize the synchronous coordination of economy and low-carbon performance in the development of multiple interconnected integrated energy systems (IESs), a low-carbon economic and optimal operation method for multi-energy hub interconnected IESs based on cooperative game is proposed. First, energy hubs are used to uniformly model the main bodies of each energy station, and a reward and punishment coefficient is introduced to establish a model of reward and punishment ladder-type carbon trading mechanism. Second, considering the coordinated operation between various comprehensive energy stations and data privacy, a low-carbon economic and optimal scheduling model of the interconnected system based on the concept of cooperative game is set up, the asymmetric Nash bargaining allocation strategy is adopted to the income distribution according to contribution of each power station, and the alternating direction method of multipliers is combined to solve the model. Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed low-carbon economic operation scheme based on cooperative game.

Keywords: Interconnected integrated energy system (IES); reward and punishment ladder-type carbon trading; cooperative game; asymmetric Nash bargaining allocation; alternating direction method of multipliers

收稿日期：2022-10-17；**修回日期**：2023-03-10；**录用日期**：2023-04-14；**网络首发日期**：2023-06-14
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52006131)；上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(20YF1414900)；上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”资助项目(20CG61)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52006131; Shanghai Sailing Program under the grant 20YF1414900; “Chen Guang” project supported by Shanghai Municipal Education Commission and Shanghai Education Development Foundation under the grant 20CG61

近年来，在我国“双碳”目标的提出及能源革命的背景下，如何深度推进互联能源系统低碳转型，实现经济目标和环境目标的兼顾，已成为能源

行业低碳化和可持续发展的一个重要方针[1-2]。

综合能源系统 IES(integrated energy system)是贯穿能源生产、供应和销售等环节的综合系统，考虑绿色低碳的综合能源系统可促使其积极调动各个能源环节的灵活性资源，因此在研究互联综合能源系统的优化调度时考虑碳交易是非常具有现实意义的[3]。文献[4]在对电气互联综合能源的经济运行建模时引入了碳交易成本，分析了碳交易价格与系统运行之间的紧密联系性；文献[5]通过考虑碳交易量等约束，验证了加入碳交易机制能够优化电源结构，激励实现电力系统碳减排；文献[6]在碳交易机制下，建立了能源系统的低碳调度运行模型，对综合能源系统碳交易成本的分析做出了重要的贡献；文献[7]在基于能源枢纽的电-气-热综合能源系统优化调度模型中，证实了所构建的阶梯型碳交易机制在系统风电消纳能力及整体的低碳经济性方面具有很好的提升效果。然而上述文献对于碳交易机制及阶梯型碳交易的考虑并不是十分完善，未能充分考虑多余的碳排放配额如何被合理使用的问题。

实现多能供应安全性、经济性和灵活性的有效手段是优化互联综合能源系统的运行，其运行和优化依赖多个系统主体的协同配合。文献[8]构建了多主多从的 Stackelberg 博弈模型，研究了区域综合能源系统 RIES(regional integrated energy system) 中多个分布式能源站和多个能源用户之间的交互问题；文献[9]在保证各个区隐私的基础上基于非合作博弈建立了实现多园区竞争购电的综合能源系统博弈优化模型，验证了所提模型可以较好地平衡多个园区之间的利益关系；文献[10]建立了以冷热电联产系统 CCHP(combined cooling heating and power system)微网和用户作为不同参与主体的非合作博弈模型，结果表明模型通过纳什均衡实现了利益的最优化；文献[11]构建了多个区域综合能源系统的非合作博弈模型，验证了能源交易价格与交易量的正相关性，研究了上下级运营商博弈的影响；文献[12]基于利益共创、共享机制划分整个区域综合能源系统，以建立不同的联盟主体进行合作博弈，建立了多区域联盟合作博弈的优化调度模型。然而，目前的一些相关研究在对互联综合能源系统合作互动博弈过程中只关注自身利益，未充分考虑碳排放等环境因素对系统的影响，无法实现互联综合能源系统经济性与环保性的双赢。

基于以上不足，本文提出 1 种基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统低碳经济优化运行的方法。首先利用能源枢纽对各能源站进行建模；其次考虑各能源站主体运行过程中的碳排放量，引入奖惩系数构建了奖惩阶梯型碳交易机制；然后利用交替方向乘子法 ADMM(alternating direction method of multipliers)对互联综合能源系统的合作博弈进行求解，并采用建立的非对称纳什议价方式对各能源站的贡献进行分配；最后通过仿真实验验证了上述合作博弈低碳经济优化运行方案的有效性。

1　互联综合能源系统架构及模型

1.1　系统组成架构

图1为多个不同类型能源站互联的综合能源系统典型结构示意图，互联综合能源系统由配电网、燃气网、能源站 EH(energy hub)及用户多层次结构组成。其中，配电网和燃气网为最上层，配电网与上级大电网相连，面向各个能源站制定电价并满足其交易请求，同样处于上层的燃气网为各个能源站提供燃气需求。各个不同类型的能源站为中间层，在配电网不同节点处分散并网，通过用联络线互联的方式实现彼此之间电能的互补互济，在有电能剩余时向配网出售或对其他能源站进行交互售卖，同时根据从配网购电价、交易售电价、气价和负荷曲线，优化各站内设备的运行策略。能源站暂不考虑从外部购热，站内热负荷由内部供热设备进行供给。用户层为最下层，包含了用户的多种能源负荷需求。

1.2　分布式综合能源站模型

分布式综合能源站涉及电、气、热多种能源的

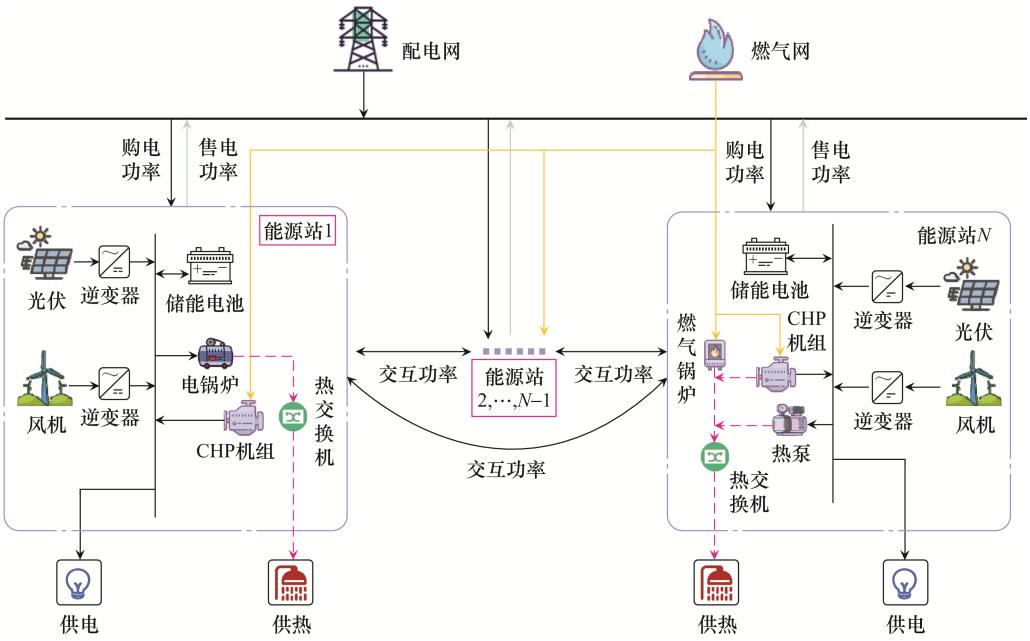


图 1 含多能源站的互联综合能源系统典型结构

Fig. 1 Typical structure of interconnected IES with multiple EHs

等效转化及能量存储，如图 2 所示。每个能源站内部都包含光伏 PV(photovoltaic)发电机组、热电联产机组 CHP(combined heat and power)、燃气锅炉 GB(gas boiler)、储能 ES(energy storage)等设备，分别从能量流的等效转化角度建立电、气、热能量之间的等效转化模型。在综合能源系统中，EH 模型不受系统规模大小的限制，它能集成任何的能源载体，简化系统的建模，根据能源站的能源耦合关系构建本文单个 EHi 的模型为

$$\begin{bmatrix} L_t^{\mathrm{e}} \\ L_t^{\mathrm{h}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}} & 1 & v_{\mathrm{g},t}^{1}\eta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CHP}} \\ 0 & 0 & v_{\mathrm{g},t}^{1}\eta_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CHP}} + v_{\mathrm{g},t}^{2}\eta_{\mathrm{h}}^{\mathrm{GB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t^{\mathrm{PV}} \\ P_t^{\mathrm{e}} \\ P_t^{\mathrm{g}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_t \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：L_t^{e}、L_t^{h} 分别为用户实际电、热负荷；$f_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{PV}}$ 为光伏发电机组向分布式综合能源站系统输出的有功电能；$v_{\mathrm{g},t}^{1}$、$v_{\mathrm{g},t}^{2}$ 分别为输入能源站的气能流入 CHP 和 GB 的调度系数；$\eta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CHP}}$、$\eta_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CHP}}$、$\eta_{\mathrm{h}}^{\mathrm{GB}}$ 分别为 CHP 发电效率、CHP 产热效率、GB 产热效率；P_t^{PV}、P_t^{e}、P_t^{g} 分别为光伏、购买的电能、天然气的输入量；S_t 为储能设备的充放电功率。在各能源站采购天然气的总量一定的情况下，$v_{\mathrm{g},t}^{1}$、$v_{\mathrm{g},t}^{2}$ 分别为输入能源站的天然气调度系数，该系数表示了流入 CHP 和 GB 设备的天然气分配比例情况，由于调度系数是可变的，故供给侧天然气流入能源站各设备的调度系数满足 $v_{\mathrm{g},t}^{1}+v_{\mathrm{g},t}^{2}=1$，这反映了天然气供应对优化的自由度。

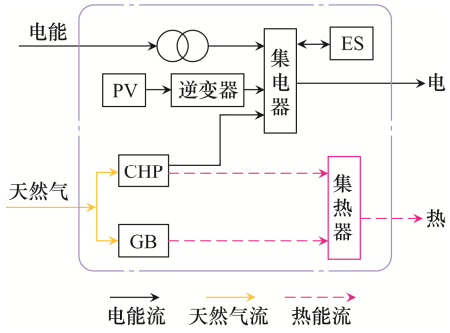


图 2 分布式综合能源站

Fig. 2 Distributed integrated energy hub

1.3 系统内部电力传输及碳排放模型

类比基尔霍夫定律建立系统内部基于节点平衡的站间电功率传输模型。根据正常的功率流方程，将电力潮流表示为复功率的节点功率平衡[13]。在节点 m 处的复功率平衡为

$$S_m - \sum_{n\in N_m} S_{mn} = 0 \tag{2}$$

式中：S_m 为节点 m 处注入的复功率；S_{mn} 为节点 m 处所有相邻节点 n 的功率流，归入集合 N_m。S_{mn} 的

计算公式为

$$S_{mn}=y_{mn}^{*}V_m\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_m}(V_m\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\theta_m}-V_n\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_n})-\mathrm{j}b_{mn}V_m^2 \tag{3}$$

式中：V、θ 分别为线路节点电压、角度；y_{mn}、b_{mn} 分别为线路串联导纳和并联电阻；上标*为该值的共轭。

电力系统中的碳排放是由机组发电产生的，与各机组所提供的有功功率呈线性关系。因此，系统中各部分所产生的碳排放流应与其各自所消耗的机组端的有功功率对应的碳排放对等，即

$$S_m=P_m+\mathrm{j}Q_m \tag{4}$$

式中：P_m 为节点 m 的有功功率；Q_m 为节点 m 的无功功率。

本文中，电力传输网络上的碳排放主要来源于输电过程中电能损失所产生的碳排放量。引用碳流追踪模型，可以获得电力传输过程的碳流信息，为网损碳排放量、网损碳排放强度的计量提供依据[14]。

由于线路阻抗等的存在，系统支路的有功损耗用 P_1 表示，则支路 mn 上有功损耗的碳流量[15]为

$$R_{\mathrm{s},t,mn}^{\mathrm{e}}=\sum_{t=1}^{24}\mathrm{diag}(E_{\mathrm{m},t,mn}^{\mathrm{e}})P_{\mathrm{l},t,mn} \tag{5}$$

$$\begin{cases}E_m^{\mathrm{e}}=\dfrac{\sum P_n\rho_n}{\sum P_n}\\ \rho_{mn}^{\mathrm{e}}=\dfrac{R_{mn}^{\mathrm{e}}}{P_{mn}^{\mathrm{e}}}\\ R_{mn}^{\mathrm{e}}=\dfrac{\mathrm{d}(F_m^{\mathrm{e}}-F_n^{\mathrm{e}})}{\mathrm{d}t}\\ F_m^{\mathrm{e}}=\sum\limits_{n\in m}\lambda_{\mathrm{g}mk}P_{\mathrm{g}mk}\end{cases} \tag{6}$$

式中：E_m^{e} 为节点 m 的碳势；ρ_n 为节点 n 的电力碳排放流密度系数；ρ_{mn}^{e} 为支路碳流密度；R_{mn}^{e} 为支路碳流率；F_m^{e} 为节点 m 的电力碳排放流；$\lambda_{\mathrm{g}mk}$ 为节点 m 接入的第 k 台发电机组的碳排放因子；$P_{\mathrm{g}mk}$ 为节点 m 接入的第 k 台发电机组的有功输出。

2　奖惩阶梯型碳交易机制

为充分调动系统节能减碳的积极性，本文基于传统碳交易机制，引入奖惩系数来构建奖惩阶梯型碳交易模型。

2.1　碳排放初始配额模型

在电力系统中，一次能源不同的发电机组所具有的碳排放强度各有不同，即使相同的发电技术也会因各种原因导致碳排放强度存在差异。电网排放因子与可再生能源、火电机组单位供电标煤耗密切相关。从理论上讲，可再生能源比例越高，火电机组单位供电标煤耗越低，电网排放因子越小。光伏发电系统在运行过程中发生故障的机率很小，能耗可以忽略，所以碳排放量以 0 计算[16]。本文假设各能源站从外部电网购得的电能均为火力发电，因此为简化计算，将各能源站外购电力的碳配额系数用外部电网的碳排放因子代替[17]。t 时段 EHi 的碳排放额分配主要包括外购电力、CHP、GB 机组及传输网络损耗，无偿分配方式下的初始配额为

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{p},i}(t)=&\mu_{\mathrm{e}}P_{i,t}^{\mathrm{e}}+\mu_{\mathrm{s}}P_{\mathrm{l},i,t}^{\mathrm{e}}+\mu_{\mathrm{h}}(\gamma L_{i,t}^{\mathrm{CHP,e}}+\\ &L_{i,t}^{\mathrm{CHP,h}}+L_{i,t}^{\mathrm{GB,h}})\end{aligned} \tag{7}$$

式中：$E_{\mathrm{p},i}$ 为能源站 EHi 的无偿碳排放配额；μ_{e}、μ_{h}、μ_{s} 分别为单位电量、单位热量、传输网络损耗的碳配额系数[18]；$P_{i,t}^{\mathrm{e}}$、$P_{\mathrm{l},i,t}^{\mathrm{e}}$ 分别为能源站 EHi 的外购电量、传输损耗电量；$L_{i,t}^{\mathrm{CHP,e}}$、$L_{i,t}^{\mathrm{CHP,h}}$、$L_{i,t}^{\mathrm{GB,h}}$ 分别为 EHi 中 CHP 的供电量、供热量和 GB 的产热量，将 CHP 的发电量折算成等效的发热量来进行碳配额分配[19]；γ 为发电量换算成供热量的换算系数。

2.2　奖惩阶梯型碳交易机制模型

引入奖惩系数构建奖惩阶梯型碳交易机制，通过将实际碳排放量分段线性化处理来求解模型，设定了若干排放区间，如果 EHi 的实际二氧化碳排放量少于其未兑换的二氧化碳配额，系统可以将多余的二氧化碳配额出售以获得额外的奖励补贴；否则，就必须承担多余的二氧化碳排放成本。随着碳排放量的区间越大，相应的碳交易价格也将增加，可表示为

$$C_{\mathrm{CO}_2,i}(t)=\begin{cases}-p(1+2a)(E_{\mathrm{p},i}-l-E_{\mathrm{s},i})\\ \quad E_{\mathrm{s},i}\leqslant E_{\mathrm{p},i}-l\\ -p(1+2a)l-p(1+a)(E_{\mathrm{p},i}-E_{\mathrm{s},i})\\ \quad E_{\mathrm{p},i}-l\leqslant E_{\mathrm{s},i}\leqslant E_{\mathrm{p},i}\\ p(E_{\mathrm{s},i}-E_{\mathrm{p},i})\\ \quad E_{\mathrm{p},i}<E_{\mathrm{s},i}\leqslant E_{\mathrm{p},i}+l\\ pl+p(1+b)(E_{\mathrm{s},i}-E_{\mathrm{p},i}-l)\\ \quad E_{\mathrm{p},i}+l<E_{\mathrm{s},i}\leqslant E_{\mathrm{p},i}+2l\\ p(2+2b)l+p(1+2b)(E_{\mathrm{s},i}-E_{\mathrm{p},i}-2l)\\ \quad E_{\mathrm{p},i}+2l<E_{\mathrm{s},i}\leqslant E_{\mathrm{p},i}+3l\\ p(3+3b)l+p(1+3b)(E_{\mathrm{s},i}-E_{\mathrm{p},i}-3l)\\ \quad E_{\mathrm{p},i}+4l<E_{\mathrm{s},i}\end{cases}\tag{8}$$

式中：$C_{\mathrm{CO}_2,i}(t)$ 为 t 时段 EHi 的碳交易成本；p 为当天市场上的碳交易价格；l 为碳排放量区间长度；E_{p} 为系统的碳排放配额；E_{s} 为实际碳排放量总量[20]；a 为奖励系数；b 为惩罚系数，即碳交易价格的增长幅度。

3 合作博弈下的互联综合能源系统低碳经济优化调度

3.1 优化目标函数

为实现分布式互联综合能源系统的低碳经济运行，从经济与环保性最优的角度出发，考虑各能源站之间的交互，构建优化目标。目标函数为第 i 个能源站全天的最小运行成本，主要由向外部能源网络购能成本、碳交易成本、能源站之间的交互费用构成，可表示为

$$\begin{cases}C_i=\min\sum_{t=1}^{24}(C_i^{\mathrm{buy}}+C_i^{\mathrm{CO_2}}+C_i^{\mathrm{int}})\\ C_i^{\mathrm{buy}}=\sum_{t=1}^{24}q_t^{\mathrm{e}}P_{i,t}^{\mathrm{e}}+q_t^{\mathrm{g}}P_{i,t}^{\mathrm{g}}\\ C_i^{\mathrm{CO_2}}=\sum_{t=1}^{24}C_{\mathrm{CO}_2,i}(t)\\ C_i^{\mathrm{int}}=\sum_{t=1}^{24}\sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{N}q_{ij}^{\mathrm{e}}P_{ij}^{\mathrm{e}}\end{cases}\tag{9}$$

式中：C_i^{buy}、$C_i^{\mathrm{CO_2}}$、C_i^{int} 分别为向外部能源网络的购能成本、碳交易成本及与其他能源站之间的交互成本；q_t^{e}、q_t^{g} 分别为向外部能源网络的购能单价；q_{ij}^{e} 为区域 i 向区域 j 传输电功率价格；$P_{i,t}^{\mathrm{e}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{g}}$ 分别为向外部能源网络购能的电、气功率；P_{ij}^{e} 为区域 i 向区域 j 传输的电功率。

3.2 约束条件

负荷功率平衡约束的表达式为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Le}}=P_t^{\mathrm{e}}+P_t^{\mathrm{PV}}+P_t^{\mathrm{CHP,e}}-P_t^{\mathrm{char,e}}+P_t^{\mathrm{dis,e}}+P_{ij,t}^{\mathrm{int,e}}\\ P_{\mathrm{Lh}}=P_{i,t}^{\mathrm{GB,h}}+P_{i,t}^{\mathrm{CHP,h}}-P_{i,t}^{\mathrm{loss,h}}\\ Q_t^{\mathrm{buy,g}}=Q_t^{\mathrm{CHP,g}}+Q_t^{\mathrm{GB,g}}\end{cases}\tag{10}$$

式中：P_t^{e}、P_t^{PV}、$P_{ij,t}^{\mathrm{int,e}}$ 分别为购电功率、光伏出力以及与 EHj 的交互功率；$P_t^{\mathrm{CHP,e}}$、$P_t^{\mathrm{CHP,h}}$ 分别为 CHP 机组的电、热功率；$P_t^{\mathrm{char,e}}$、$P_t^{\mathrm{dis,e}}$ 分别为储能设备储能充、放电功率；$P_t^{\mathrm{loss,h}}$ 为热功率的损耗；$Q_t^{\mathrm{buy,g}}$、$Q_t^{\mathrm{CHP,g}}$、$Q_t^{\mathrm{GB,g}}$ 分别为购气量、CHP 机组的耗气量及 GB 的耗气量。

能源设备约束的表达式为

$$\begin{cases}P_x^{\min}\leqslant P_x\leqslant P_x^{\max}\\ 0\leqslant P^{\mathrm{PV}}\leqslant P^{\mathrm{N}}\end{cases}\tag{11}$$

式中：$P_x^{\min}$、$P_x^{\max}$ 分别为设备 x 最小、最大运行功率；P^{PV} 为新能源实际功率；P^{N} 为新能源预测发电功率。

电功率交互耦合约束的表达式为

$$P_{ij}^{\mathrm{min,e}}\leqslant P_{ij,t}^{\mathrm{e}}\leqslant P_{ij}^{\mathrm{max,e}}\tag{12}$$

式中：$P_{ij,t}^{\mathrm{e}}$ 为 EHi 在 t 时段与第 j 个能源站的电功率交互；$P_{ij}^{\mathrm{min,e}}$、$P_{ij}^{\mathrm{max,e}}$ 分别为第 i 个能源站与第 j 个能源站的电功率交互的下限和上限。

储能充放电功率约束的表达式为

$$\begin{cases}0\leqslant P_t^{\mathrm{char,e}}\leqslant\alpha_t^{\mathrm{char}}P_t^{\mathrm{char,e}}\\ 0\leqslant P_t^{\mathrm{dis,e}}\leqslant\alpha_t^{\mathrm{dis}}P_t^{\mathrm{dis,e}}\\ \alpha_t^{\mathrm{char}}+\alpha_t^{\mathrm{dis}}\leqslant 1\end{cases}\tag{13}$$

式中，α_t^{char}、α_t^{dis} 分别表示充、放能状态，数值取 0 或 1，其中 0 表示设备停止充能，1 表示设备正处于充能状态。

3.3 合作博弈模型

本文将互联综合能源系统之间通过电能交易

来实现自身运行成本最小化的问题视为 1 个合作博弈优化模型，各能源站之间的协调过程则被视为博弈者之间的纳什议价过程。传统的纳什议价模型无法将每一个博弈者之间的贡献度进行具体表征[21]，故本文采用改进后的纳什议价方法进行分配，即在传统纳什议价模型中引入参与者的议价能力 d_i 建立了非对称纳什议价模型。该模型的数学表达式为

$$\begin{cases}\max \prod_{i}^{M}[C_i^0 - C_i]^{d_i} \\ \text{s.t.} C_i \leqslant C_i^0\end{cases} \tag{14}$$

式中：各综合能源站 i 为纳什议价的参与者；M 为参与议价的人数；C_i、C_i^0 分别为议价参与者协同运行与独立运行时的综合成本；参与者的议价策略为 $\left\{q_{ij}^{\mathrm{e}}, P_{ij}^{\mathrm{e}}\right\}$，其相关约束共同构成议价策略的集合；$C_i^0 - C_i$ 为参与者通过合作所收获的支付效益。

对于各综合能源站来说，其对系统的正贡献意味着向其他能源站供给电能，负贡献意味着从其他能源站吸收电能。由于参与电能的贡献减少了对配电网的消费需求，所以无论供给电能还是吸收电能都应被视为对整个系统经济性的贡献。此外，由于从配电网购买电力的价格高于出售电力的价格，因此供给电能的贡献理应高于消耗同样电能的贡献，没有电能贡献应视为零贡献。

基于此，将参与者议价能力的评估通过非线性贡献映射法进行设计，该方法确保了能源站向另一能源站提供电能或接受另一能源站提供的电能的行为都被视为贡献，但零互动意味着零贡献，本文议价能力的非线性设计是基于指数模型的，因为任何大于 1 的底数都不会影响这一特性，但会影响具体结果。因此，它也是模型中 1 个可调整的估值参数。

d_i 为第 i 个参与者的议价能力，其表达式为

$$d_i = \mathrm{e}^{\frac{E_i^{\mathrm{s}}}{\max(E_1^{\mathrm{s}}, E_2^{\mathrm{s}}, \cdots, E_m^{\mathrm{s}})}} - \mathrm{e}^{\frac{E_i^{\mathrm{r}}}{\max(E_1^{\mathrm{r}}, E_2^{\mathrm{r}}, \cdots, E_m^{\mathrm{r}})}} \tag{15}$$

$$\begin{cases} E_i^{\mathrm{s}} = \sum_{t=1}^{T} \max(0, P_{i-j(\mathrm{e})}^{t} + P_{i-j(\mathrm{g})}^{t}) \\ E_i^{\mathrm{r}} = -\sum_{t=1}^{T} \max(0, P_{i-j(\mathrm{e})}^{t} + P_{i-j(\mathrm{g})}^{t}) \end{cases} \tag{16}$$

式中，E_i^{s} 和 E_i^{r} 分别为第 i 个综合能源站参与合作博弈时给其余能源站提供的电能和从其余能源站处获得的电能。

通过文献[22]中的方法对上述非凸非线性问题进行数学转换得到 2 个凸子问题为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{M} C_i \\ \max \sum_{i=1}^{M} d_i \ln(C_i^0 - C_i^* + T_i) \end{cases} \tag{17}$$

式中：C_i^* 为第 i 个能源站运行求解后的最优值；T_i 为第 i 个综合能源站的运行成本转移。

3.4 分布式交替乘子算法求解

交替方向乘子法是 1 种针对大规模多变量问题的求解算法，ADMM 将具有可分结构的大型凸优化问题分解为若干个小的优化问题，该算法可以将多域耦合约束以惩罚函数的形式应用于目标函数中，它可以通过多个领域之间变量互动的迭代过程来协调所有参与者。使用 ADMM 算法来解决上述谈判模型可以实现模型的分布式计算，同时解的难度和算法复杂度也被降低。

ADMM 算法的一般模型和解法为

$$\begin{cases} \min f(x) + g(y) \\ \text{s.t.} \boldsymbol{A}x + \boldsymbol{B}y = b \end{cases} \tag{18}$$

式中：f、g 为凸函数；x、y 为函数变量；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为系数矩阵；b 为常量。

模型(18)通过乘子法引入对偶变量 z，构造增广拉格朗日函数，即

$$L_\beta(x, y, z) = f(x) + g(y) + z^T(\boldsymbol{A}x + \boldsymbol{B}y - b) + \frac{\beta}{2}\left\|\boldsymbol{A}x + \boldsymbol{B}y - b\right\|_2^2 \tag{19}$$

式中，β 为惩罚函数，$\beta > 0$。

ADMM 算法求解最优化问题的基本思路是：得到拉格朗日惩罚函数之后，交替对 x、y 的子问题进行求解来得到原来问题的解，具体包括原始变量 x、y 和对偶变量 z 的迭代更新，更新策略为

$$\begin{cases} x^{k+1} = \arg\min_x L_\beta(x, y^k, z^k) \\ y^{k+1} = \arg\min_y L_\beta(x^{k+1}, y\ , z^k) \\ z^{k+1} = z^k + \beta(\boldsymbol{A}x^{k+1} + \boldsymbol{B}x^{k+1} - b) \end{cases} \tag{20}$$

式中，k 为迭代次数。

函数收敛条件为

$$\begin{cases}\left\|r^k\right\|_2 \leqslant \kappa^{\text{pri}} \\ \left\|s^k\right\|_2 \leqslant \kappa^{\text{dual}}\end{cases} \tag{21}$$

式中：r^k、s^k 分别为目标函数原始残差和对偶残差；κ^{pri}、κ^{dual} 为收敛判据参数。在 ADMM 算法中，原始变量 x、y 的迭代更新是交替进行的，每次求解只需要求解一部分变量，这大大降低了求解的规模，提高了收敛速度。

本文建立的非对称纳什议价模型采用 ADMM 算法进行修改后求解，从而实现模型的分布式计算，降低求解的难度和算法的复杂性。以第 i 个能源站为例，收益分配各耦合变量为议价成本，取其收敛精度为 ε，则其增广拉格朗日函数为

$$\min L_i = -\ln(C_i^0 - C_i^* + C_i^{\text{int}}) + \sum_{t=1}^{24}\sum_{j\in i}^{M}\left[\lambda_j(q_{ij}+q_{ji}) + \frac{\rho_j}{2}\left\|(q_{ij}+q_{ji})\right\|_2^2\right] \tag{22}$$

式中，λ_j、ρ_j 分别为议价问题的拉格朗日乘子和惩罚系数。

迭代计算步骤为

$$\begin{cases}q_{ij}(k+1) = \arg\min L_{i,2}[q_{ij}(k), q_{ji}(k), \lambda_{j,2}(k)] \\ q_{ji}(k+1) = \arg\min L_{i,2}[q_{ij}(k), q_{ji}(k), \lambda_{j,2}(k)] \\ \lambda_{j,2}(k+1) = \lambda_{j,2}(k) + \rho_{j,2}[q_{ij}(k) + q_{ji}(k)]\end{cases} \tag{23}$$

各变量需要满足的收敛为

$$\begin{cases}\sum_{j\in i}(q_{ij}+q_{ji}) \leqslant \varepsilon \\ \sum_{j\in i}[q_{ij}(k+1) - q_{ij}(k)] \leqslant \varepsilon\end{cases} \tag{24}$$

4 算例分析

4.1 基础数据

为验证本文所提方法的正确性，将某个含 3 个能源站的分布式互联综合能源系统作为研究对象，选取该系统冬季典型日结果进行分析。其中，3 个能源站内的终端用户分别为工业区、住宅区和商业区。算例的调度周期为 24 h，调度时间间隔为 1 h。天然气价格取 2.55 元/m^3，碳交易价格为 150 元/t，奖励系数 a=0.2，区间长度 l=8 500 kg，碳交易价格增长幅度 b=0.25，能源站其他参数见表 1，分时电价见表 2。各能源站冬季典型日的电、热负荷及光伏出力曲线如图 3 和图 4 所示。

表 1 能源站运行参数

Tab. 1 Operating parameters of EH

类型	功率下限/kW	功率上限/kW	效率
光伏	0	预测值	—
CHP	0	1 000	$\eta_{\text{e}}^{\text{CHP}}$=0.80, $\eta_{\text{h}}^{\text{CHP}}$ = 0.45
燃气锅炉	0	1 000	$\eta_{\text{h}}^{\text{GB}}$ = 0.90
储能电池	荷电状态 35%~95%		$\eta_{\text{c}}^{\text{ES}}$=0.95、$\eta_{\text{d}}^{\text{ES}}$ = 0.90

表 2 分时电价

Tab. 2 Time-of-use electricity price

时段类型	时段/h	电价/(元/kW·h)
谷	0:00—7:00	0.40
平	07:00—10:00, 15:00—18:00, 22:00—24:00	0.75
峰	10:00—15:00, 18:00—22:00	1.20

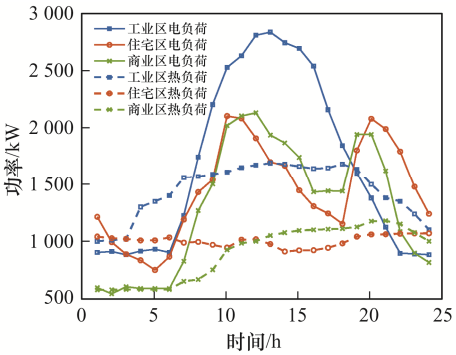


图 3 各能源站电、热负荷

Fig. 3 Power and heat load of each EH

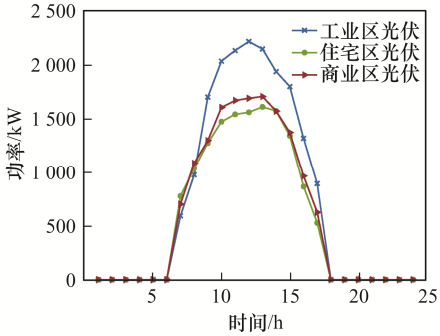


图 4 各能源站光伏出力预测值

Fig. 4 Predicted PV output from each EH

4.2 合作博弈优化结果分析

合作模式下各能源站之间进行的电能交易情况如图 5 所示。由于站间合作紧密的关系，各能源站为降低自身的运行成本，会选择将多余的电能进行对外出售。光伏发电的时间段集中在 7:00—18:00，对应各能源站之间在时间段 7:00—18:00 发生了大量的电能交易，其余时段无多余的电能，同时各能源站还得向外购入电能，故无交易。因 3 个能源站之间电能的交易量要保持实时的平衡状态，所以每个时段内交换的电功率总和为 0。也进一步说明，合作模式下各能源站可通过调节自身的能源比例在站间进行时空上的能量平移优化。

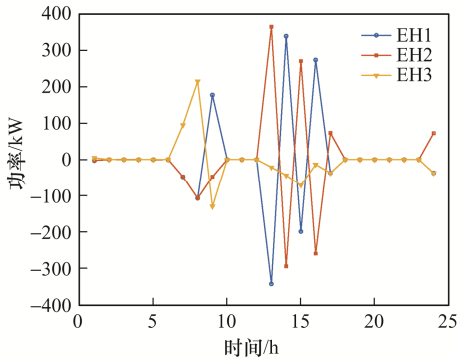


图 5　能源站之间电能交易结果

Fig. 5 Electric energy trading results between EHs

图 6 为各个能源站对应负荷用户电能合作博弈优化后的调度结果。可以看出，考虑到系统的经济性与环保性，各能源站会优先消纳可再生能源 PV 出力，并且优化后的各能源站电负荷均有很大程度的削减，主要是在各负荷用电高峰期 10:00—12:00 时段、工业区的 15:00—23:00 时段、住宅区和商业区的 17:00—23:00 时段。在光伏无出力的时间段，各区域主要的电负荷需求由外部购电、CHP 机组及储能电池的充放电来提供。在负荷、电价高峰期，光伏资源充沛，出力比重大，各区域向外部电网的购电量明显减小，且在 10:00—12:00 时段系统会反向给电网售电来节约成本。各区域之间的电能交互主要集中在 7:00—9:00 时段和 13:00—17:00 时段。

图 7 为 3 个能源站总成本议价过程的迭代图。由图可知，各能源站在第 24 次迭代优化后达到结

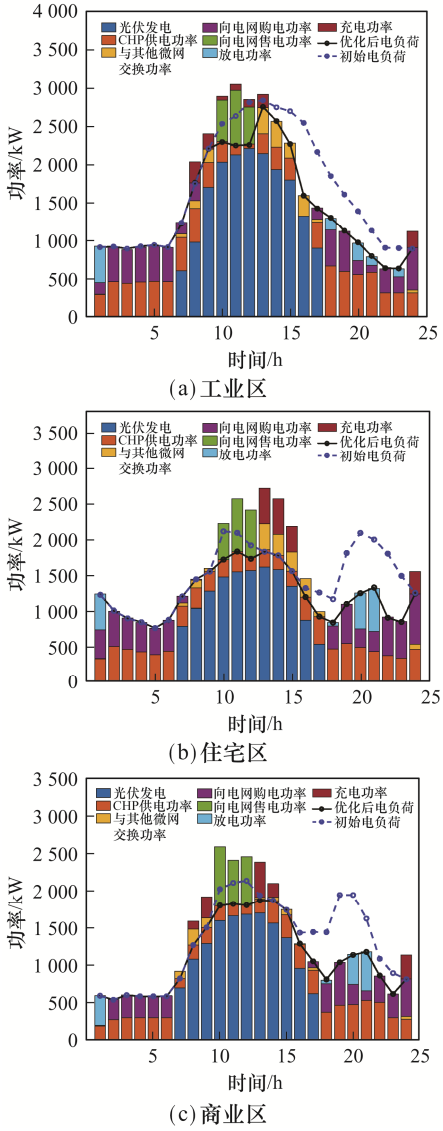


图 6　各能源站合作博弈后的优化调度结果

Fig. 6 Optimal scheduling results of each EH after cooperative game

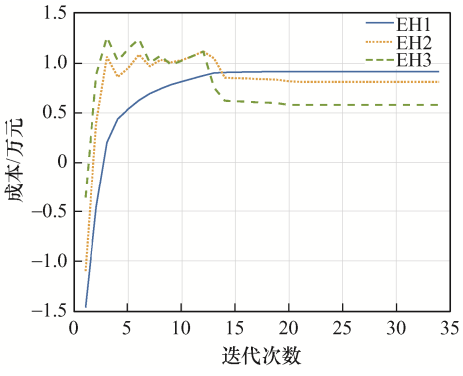


图 7　各能源站总成本议价迭代收敛

Fig. 7 Iterative convergence of total cost bargaining of each EH

果的收敛。因各能源站对外购售电情况的差异性，导致其总成本的变化趋势有所不同，随着迭代次数的增加，工业区的总成本逐步上升，而住宅区与商业区在迭代过程中价格出现上下波动，最终获得收敛。这也体现出了 3 个能源站间合作博弈的过程，最终维持了各自利益的稳定，获得各自的运行成本依次为 9 008.24 元、8 212.45 元和 5 878.14 元。

表 3 为非合作博弈和合作博弈 2 种运行方式下的各能源站低碳经济运行成本结果。由表可知，合作前后互联综合能源系统的整体运行成本分别为 23 433.59 元和 23 118.83 元，合作之后的盈余为 314.76 元，整体的运行成本下降了 1.34%；从各个能源站来看，合作之后仅 EH1 的成本有所下降，EH2 与 EH3 的成本均有所增加，说明 EH2 和 EH3 牺牲了各自的利益。然而为实现利益的合理议价分配，不出现某个 EH 亏损的情况，需通过纳什议价分配方法对各个 EH 的运行成本做进一步的调整，议价后各个 EH 的成本依次为 9 188.24 元、8 122.45 元和 5 808.14 元，合作盈余依次为 56.94 元、127.75 元和 130.07 元，说明三者在合作过程中的贡献排名分别为 EH3>EH2>EH1。综上可以得出，合作博弈运行通过合理的议价分配激励各个能源站主动参与合作，能实现较好的经济效益和运行效果，具有可行性。

表 3 不同模式下的经济运行结果

Tab. 3 Economic operation results in different modes

模式	EH1/元	EH2/元	EH3/元	总和/元
非合作模式成本	9 245.18	8 250.20	5 938.21	23 433.59
合作模式成本	7 512.19	8 401.35	7 205.29	23 118.83
议价后成本	9 188.24	8 122.45	5 808.14	23 118.83
合作盈余	56.94	127.75	130.07	314.76

为验证本文所得优化结果的最优性，将文献[8]中提出的多主多从 Stackelberg 博弈模型与本文的合作博弈模型优化结果进行了对比分析，相关的对比见表 4。由于主从博弈模型描述的是各层级之间的垂直交互和分层决策，没有考虑能源层级站与站之间的交易合作，目的是实现配电网和各能源站总运行成本最小；而本文的合作博弈低碳经济模型描述的是能源站之间基于长期稳定的合作联盟关系，在制定合理的利益分配机制下，以各能源站间的利益平衡和低碳运行成本最小为目标。2 种模型下的总运行成本分别为 25 876.54 元和 23 118.83 元，合作博弈模型下的总运行经济成本较低，降低了 10.65%，并且各能源站运行成本都有所下降，分别降低了 8.55%、7.17%、16.33%，提高了经济性，达到了双赢状态，因此，本文模型的优势得到验证。

表 4 不同博弈模型下的经济运行结果

Tab. 4 Economic operation results under different game models

博弈模型	EH1/元	EH2/元	EH3/元	总和/元
非合作主从博弈	8 214.78	9 050.35	8 611.41	25 876.54
合作博弈模式	7 512.19	8 401.35	7 205.29	23 118.83

4.3 系统节能减排分析

图 8 为不同奖励系数下碳交易成本随单位碳交易价格的变化曲线。可以看出，当各能源站开始为碳交易付费时，奖励系数 a 对碳交易的成本没有产生影响；反之，如果各能源站开始从碳交易中获利，奖励系数 a 越高，碳交易的收益就越高，从而更快地降低系统的碳排放。当单位碳交易价格增加到一定值时，碳交易成本下降趋势会变得越来越慢，甚至无下降趋势，说明各机组已经基本达到恒定值。

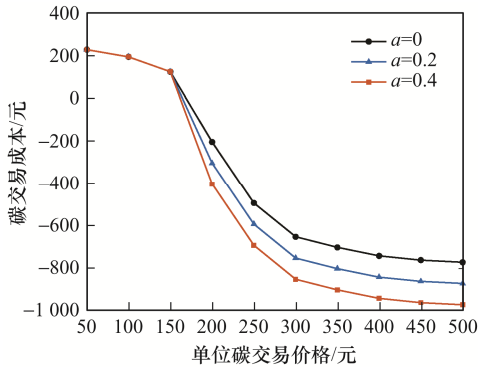


图 8 不同奖励系数下的碳交易成本

Fig. 8 Cost of carbon trading with different reward coefficients

根据文献[2]的碳排放配额数据与碳排放系数及文献[20]所提的碳排放量的计算方法，2 种碳交易机制下各 EH 的碳排放量见表 5。由表可知，引入奖惩阶梯型碳交易机制后，各 EH 的碳排量较传统碳交易下的碳排放量均有所下降，整个系统总的碳排放量减少了 4 849.28 kg，减排率为 12.41%。这是因为在奖惩阶梯型碳交易机制下，碳配额呈阶梯式的增加，而各能源站为了避免支付过多的碳交易惩罚成本，对于各自系统运行中的碳排放量约束力加大，从而减少了碳排放，同时在奖励机制下，也更愿意对多余的碳配额进行出售来换取经济奖励。综上，对比传统的碳交易机制，奖惩阶梯型的碳交易机制能有效约束系统的碳排放量，在提升系统经济效益的同时也提升了环境效益。

表 5　不同模式下的节能减排结果

Tab. 5 Results of energy saving and emission reduction in different modes

机制	EH1 碳排放量/kg	EH2 碳排放量/kg	EH3 碳排放量/kg	总排放量/kg	减排率
传统碳交易	14 595.88	15 214.67	9 254.15	39 064.70	—
奖惩阶梯型碳交易	12 401.35	12 898.71	8 915.36	34 215.42	12.41%

5　结论

为实现互联系统各能源站主体之间博弈互动和多能耦合的低碳经济优化，提出 1 种基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统低碳经济优化运行的调度方法。通过对所提优化运行方法的调度结果分析，得出以下结论。

(1)本文提出的基于合作博弈的多能源站互联综合能源系统协调运行，可以有效保护各能源站之间的隐私，并且通过合理的议价分配激励各个能源站主动参与合作，能实现较好的经济效益和运行效果。

(2)在博弈模型中引入奖惩阶梯型碳交易机制，在提高系统运行经济效益的同时提高了各主体的绿色调节能力，能够有效减少系统碳排放量，助力我国“双碳”目标达成。

参考文献：

[1] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
Zhang Shenxi, Wang Danyang, Cheng Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207. (in Chinese)

[2] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.
Wang Zesen, Shi Yan, Tang Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858. (in Chinese)

[3] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 3-12.
Chen Sheng, Wei Zhinong, Gu Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: Multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12. (in Chinese)

[4] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
Wei Zhinong, Zhang Side, Sun Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16. (in Chinese)

[5] 张晓辉, 梁军雪, 赵翠妹, 等. 基于碳交易的含燃气机组的低碳电源规划[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 92-98.
Zhang Xiaohui, Liang Junxue, Zhao Cuimei, et al. Research on low-carbon power planning with gas turbine units based on carbon transactions [J]. Acta Energiae

Solaris Sinica, 2020, 41(7): 92-98. (in Chinese)

[6] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
Qu Kaiping, Huang Linni, Yu Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707. (in Chinese)

[7] 秦婷. 基于碳交易机制的综合能源系统最优经济调度[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Qin Ting. Carbon trading based optimal economic dispatching for integrated energy system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)

[8] Wei F, Jing Z X, Wu P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems [J]. Applied Energy, 2017, 200: 315-329.

[9] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊媚, 等. 基于冷热电联供的多园区博弈优化策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68-75.
Wu Fubao, Liu Xiaofeng, Sun Yiqian, et al. Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75. (in Chinese)

[10] 林凯骏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 25-32.
Lin Kaijun, Wu Junyong, Hao Liangliang, et al. Optimization of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32. (in Chinese)

[11] Chen Feifan, Liang Haifeng, Gao Yajing, et al. Research on double-layer optimal scheduling model of integrated energy park based on non-cooperative game [J]. Energies, 2019, 12(16): 3164.

[12] Cong Hao, Wang Xu, Jiang Chuanwen. Robust coalitional game theoretic optimisation for cooperative energy hubs with correlated wind power [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(13): 2391-2399.

[13] Arnold M, Negenborn R R, Andersson G, et al. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks [M]// Intelligent Infrastructures. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 235-273.

[14] 袁书林. 基于电力系统碳排放流理论的碳排放分摊模型[D]. 长沙：长沙理工大学, 2014.
Yuan Shulin. Allocation model of carbon emission in power system based on carbon emission flow theory [D]. Changsha：Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)

[15] 袁加梅, 尤佳, 周永刚, 等. 电热耦合系统全流程碳排放计量技术[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 18-25.
Yuan Jiamei, You Jia, Zhou Yonggang, et al. The whole-process carbon emission metering technology for electro-thermal coupled system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 18-25. (in Chinese)

[16] 张朝祥, 戴前进, 朱状, 等. 5 MW 风光互补发电系统的碳排放核算[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(9): 108-110.
Zhang Chaoxiang, Dai Qianjin, Zhu Zhuang, et, al. Accounting for carbon emissions from a 5 MW wind and solar complementary power system [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2022, 42(9): 108-110. (in Chinese)

[17] 张森林. “双碳” 背景下优化调整电网碳排放因子的思考[J]. 广西电业, 2022(10): 56-60.
Zhang Senlin. Thoughts on optimizing and adjusting carbon emission factors of power grid under the background of “double carbon” [J]. Guangxi Electric Power, 2022(10): 56-60. (in Chinese)

[18] 冯欣, 杨军. 考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 81-86.
Feng Xin, Yang Jun. Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 81-86. (in Chinese)

[19] 陈志, 胡志坚, 翁菖宏, 等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 148-155.
Chen Zhi, Hu Zhijian, Weng Changhong, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism [J].

Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155. (in Chinese)

[20] 赵依茗，彭道刚，徐春梅，等. 计及奖惩阶梯型碳交易和源荷不确定性的综合能源调度研究[J]. 电测与仪表，2025, 62(3): 208-216.
Zhao Yiming, Peng Daogang, Xu Chunmei, et al. Research on integrated energy dispatch with a reward and punishment ladder-type carbon trading and source load uncertainty [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 208-216. (in Chinese)

[21] Fan Songli, Ai Qian, Piao Longjian. Bargaining-based cooperative energy trading for distribution company and demand response [J]. Applied Energy, 2018, 226: 469-482

[22] 芮涛，李国丽，王群京，等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法[J]. 电网技术，2019，43(7): 2576-2585.
Rui Tao, Li Guoli, Wang Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2576-2585. (in Chinese)



赵慧荣

作者简介：

赵慧荣(1990—)，女，博士，副教授。研究方向：智能发电技术，综合能源系统建模、优化及控制。E-mail：hrzhao@shiep.edu.cn。

李草(1997—)，女，通信作者，硕士研究生。研究方向：综合能源系统气热管网能路特性分析与建模。E-mail：mrli0428@163.com。

窦真兰(1980—)，女，博士，高级工程师。研究方向：电气工程。E-mail：douzhl@126.com。

张春雁(1967—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：热能动力。E-mail：zhcytongji@126.com。

彭道刚(1977—)，男，博士，教授。研究方向：低碳智能发电，综合智慧能源与能源互联网。E-mail：pengdaogang@126.com。

(责任编辑：郭凯凯)