第 49 卷 第 1 期：169-179 高电压技术 Vol.49, No.1: 169-179
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211780

考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度

刘哲远[1]，邢海军[1]，程浩忠[2]，叶宇静[1]
（1. 上海电力大学电气工程学院，上海 200090;
2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240）

摘　要：针对综合能源系统低碳经济调度问题，将碳排放流理论和需求响应引入到综合能源系统优化调度中。首先，在电−气综合能源系统框架下，利用碳排放流模型，计算出各负荷的碳排放量。其次，将 Shapley 值法引入到综合能源系统碳交易模型中，并且建立价格型需求响应模型，分析其减排激励作用。最后建立综合能源系统双层调度模型，上层为电网和气网系统，下层为能量枢纽系统，以运行成本最小为目标函数进行低碳经济调度。通过算例验证，该碳交易模型可降低 7.06%的碳排放量，结合需求响应，可降低 4.37%的系统运行成本。该模型具有提高能源利用率、降低运行成本和减少碳排放的作用，可实现低碳经济运行。

关键词：碳排放流；需求响应；综合能源系统；低碳经济调度；能量枢纽

Bi-level Optimal Scheduling of Integrated Energy System Considering Carbon Emission Flow and Demand Response

LIU Zheyuan[1], XING Haijun[1], CHENG Haozhong[2], YE Yujing[1]
(1. College of Electrical Engineering，Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion(SJTU), Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract：Aiming at the low-carbon economic dispatch of integrated energy system,we introduce the theory of carbon emission flow and demand response into the optimal dispatch of the integrated energy system. First, under the framework of the electricity-gas integrated energy system, the carbon emission flow model can be used to calculate the carbon emission of each load. Second, the Shapley value method is introduced into the carbon trading model of the integrated energy system, and a price-based demand response model is established to analyze its emission reduction incentives. Finally, a two-level dispatch model of the integrated energy system is established. The upper layer is the power grid and gas network system, and the lower layer is the energy hub system. The minimum operating cost is the objective function for low-carbon economic dispatch. Verification by calculation examples shows that the carbon trading model can reduce carbon emissions by 7.06%, and combined with demand response, it can reduce system operating costs by 4.37%. This model has the effects of improving energy utilization, reducing operating costs and reducing carbon emissions, and can realize low-carbon economic operation.

Key words：carbon emission flow; demand response; integrated energy system; low-carbon economic dispatch; energy hub

0　引言

为应对全球气候变化的挑战，世界正在积极推进能源系统低碳化和清洁化。中国承诺二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，以及 2060 年前实现碳中和。综合能源系统(integrated energy system, IES)作为能源产供销一体化系统，是实现“双碳”目标的一个有效方案。实现 IES 低碳经济调度，一方面，需要加大高比例可再生能源并网的力度，解决可再生能源间歇性带来的技术性问题[1]，提高系统多能互补特性；另一方面，需要利用碳交易和需求响应机制，激活与释放系统原有的灵活性[2]。

基金资助项目：国家重点研发计划(2017YFB0903400)；电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题(2018AA01)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0903400), the Open Project of Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion(SJTU), Ministry of Education (2018AA01).

碳交易作为减少碳排放和提高 IES 能源利用率的有效方法，已被各国采用。欧盟碳交易市场起步于 2005 年，经历试运营和扩展阶段后，已相对完善[3]。美国在 1997 年成立专门开展低碳项目的碳注册登记系统，目前已经注册 120 多个[4]。

目前对碳交易的研究主要围绕碳交易机制模型以及场景运用[5]。文献[6]将碳交易成本引入目标函数，将碳交易成本分为碳收益、碳权成本、过排放罚金，通过碳权购买裕度控制碳交易成本。文献[7]将 IES 的运行模型引入碳交易机制，以 IES 能源成本与碳交易成本之和最小为目标函数。文献[8]建立考虑阶梯式碳价的 IES 模型，并研究供需灵活性对系统的影响。文献[9]研究碳价对电力系统碳排放量的影响，建立三阶段最优阶梯碳价模型。文献[10]提出一种基于储碳设备的低碳运行模式，并结合碳交易市场，实现低碳经济运行。然而，大部分文献仅研究发电侧对碳排放的影响，并未从需求侧考虑，而碳排放流理论反映了碳排放与碳排放责任的关系。文献[11]提出了电力系统碳排放流的基本概念，完善其理论架构并推导出碳势的计算方法[12]。文献[13]通过引入碳排放流理论，分析碳排放流在配电网系统中的分布规律与计算特点，并建立了储能元件碳排放流分析模型。

随着需求侧的资源不断扩大，对需求响应和负荷聚集商的研究越来越深入，利用需求侧资源减排成为一个研究重点。文献[14]考虑柔性负荷需求响应可提高能源利用率，提出了考虑需求响应的微电网两阶段调度模型。文献[15]在含碳捕集技术的 IES 中引入电价型需求响应，研究其经济性和低碳性。目前，对需求响应的研究大多从基于实时电价和补贴政策的激励出发，而随着碳交易市场的逐步开放，研究需求侧碳排放控制具有重要意义。

综上所述，根据碳排放流理论和需求响应，提出合理的调度模型。首先，将碳排放流理论和 Shapley 值法引入到碳交易模型中，负荷将承担碳排放责任；其次，在价格型需求响应的基础上，对负荷进行碳势控制，进一步减少对高碳排放强度能源的使用，提高系统低碳性；最后，提出双层 IES 低碳经济调度模型，上层以电网和气网运行成本最低为目标函数，利用碳排放流理论求解各个能量枢纽碳排放量，下层以能量枢纽总运行成本最小为目标，求解最优运行方案。

1 考虑碳排放流理论的综合能源系统

1.1 综合能源系统框架

本文考虑的框架如图 1 所示。上层系统由配电网和气网耦合组成；下层系统由多个能量枢纽组成。上层系统将能流和碳排放流通过代理商和联络线路传输给下层系统。下层系统通过分布式调度策略，实现与上层系统协调运行。

本文利用能量枢纽(energy hub, EH)概念对下层系统进行建模，如图 2 所示。每个 EH 的输入端由电能和天然气 2 种能源形式组成；内部元件主要考虑光伏、电转气设备、热电联产、燃气锅炉、热泵和储能等；输出端由电负荷、气负荷和热负荷组成。

1.2 碳排放流概念和计算方法

能源产业二氧化碳多由源侧产生，而碳排放的最终驱动力却在负荷侧。碳排放流模型基于比例分

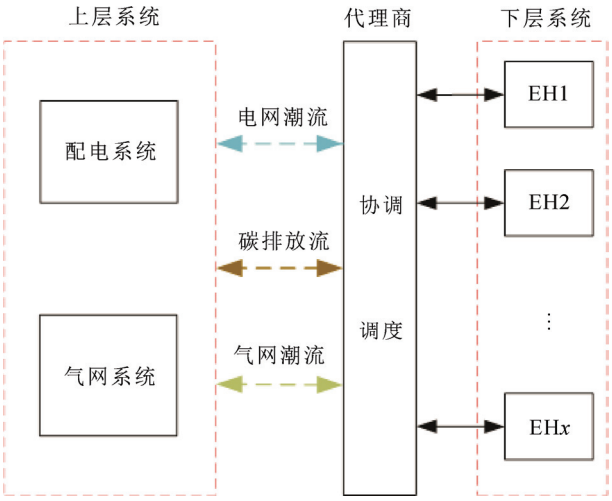


图 1 综合能源系统框架

Fig.1 Integrated energy system framework

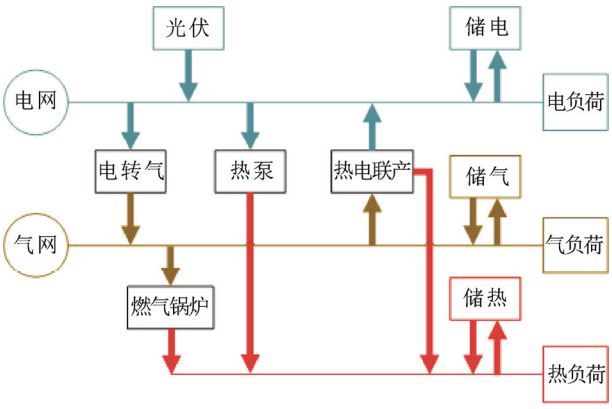


图 2 能量枢纽结构图

Fig.2 Energy hub structure diagram

担原则，可以计算能源在生产、运输和消费环节的碳排放[16]。目前，碳排放流理论的计算方法已逐步成熟，可根据已知的潮流分布计算各时段各节点的碳排放流[12]。以下简述碳排放流理论的概念与计算，示意图如图 3 所示，图 3 中，G1、G2 和 G3 分别为 3 个发电机组；ρ_{1-2}、ρ_{1-3}、ρ_{2-3}、ρ_{2-4} 和 ρ_{3-4} 分别为各支路的碳排放流；L_4 为节点 4 的负荷。

1.2.1 碳流率

碳流率(carbon emission flow rate, CEFR)表示单位时间内通过网络节点或支路的能量流所对应的碳排放，用 R 表示，单位为 t/h，如式(1)所示。

$$R=\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：F 表示流入的碳排放量；t 表示时间。

1.2.2 碳流密度

碳流密度(carbon intensity, CI)表示单位电量所对应的碳排放量，CI 包括发电机碳排放强度、支路碳流密度和节点碳势这 3 个概念，单位均为 t/(MW·h)。

发电机碳排放强度(generator carbon intensity, GCI)表示电厂实时的发电碳排放强度，根据发电特性得出，用 e_{G} 表示。

支路碳流密度(branch carbon intensity, BCI)表示支路传输单位电量消费所造成的发电侧的碳排放量，即支路碳流率与有功潮流的比值，计算式为

$$\rho=\frac{R}{P} \tag{2}$$

式中，P 为支路对应的有功潮流。支路碳流密度应与流入该支路的首节点碳势相等。

节点碳势(node carbon intensity, NCI)表示节点消费单位电量所造成的等效于发电侧的碳排放量。数值上等于所有流入节点的支路的碳流密度关于有功潮流的加权平均，用 e 表示。例如节点 n 的碳势为

$$e_n=\frac{\sum_{i=1}^{I_{\mathrm{i}}}(P_i\rho_i)+P_{\mathrm{G}n}e_{\mathrm{G}n}}{\sum_{i=1}^{I_{\mathrm{i}}}P_i+P_{\mathrm{G}n}} \tag{3}$$

式中：e_n 为节点 n 的碳势；$e_{\mathrm{G}n}$ 为发电机 Gn 的碳排放强度；P_i 为支路 i 注入节点的功率；$P_{\mathrm{G}n}$ 为节点 n 的发电机 Gn 的输出功率；ρ_i 为支路 i 注入节点的支路碳流密度；I_{i} 为与此节点相连的注入功率的支路数量。

得到 NCI 后就可以计算节点负荷的碳排放量

$$E_n=e_nL_n \tag{4}$$

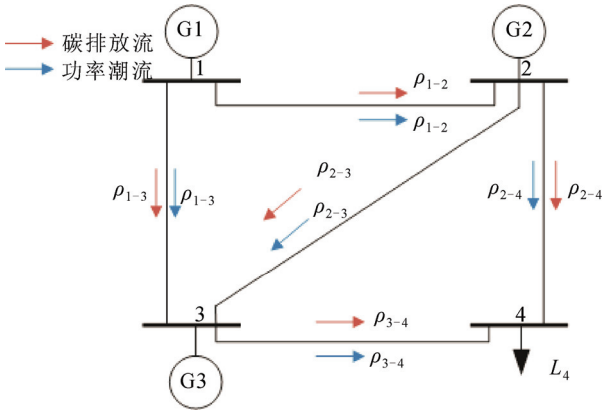


图 3 电力系统碳排放流和潮流示意图

Fig.3 Schematic diagram of power system carbon emission flow and tidal current

式中：E_n 为节点 n 的碳排放量；L_n 为节点 n 的负荷量。例如节点 2 的 NCI 为

$$e_2=\frac{P_{1-2}\rho_{1-2}+P_{\mathrm{G2}}e_{\mathrm{G2}}}{P_{1-2}+P_{\mathrm{G2}}} \tag{5}$$

式中：P_{G2} 为节点处的机组 2 的输出功率；P_{1-2} 为支路 1-2 的支路潮流功率；e_{G2} 为机组 2 的发电机碳排放强度。

1.3 气网碳排放流模型

由于甲烷燃烧会产生二氧化碳，文献[17]根据潮流跟踪的数学方法，建立了燃气网的碳排放流模型。气网碳排放流模型为

$$e_{\mathrm{gas},n}=\frac{Q_{\varpi,n}e_{\varpi,n}+\sum_{i=1}^{I_{\mathrm{gas}}}Q_{\mathrm{gas},i}\rho_{\mathrm{gas},i}}{Q_{\varpi,n}+\sum_{i=1}^{I_{\mathrm{gas}}}Q_{\mathrm{gas},i}} \tag{6}$$

式中：$e_{\mathrm{gas},n}$ 为燃气节点 n 的碳势；$Q_{\varpi,n}$ 为节点 n 处的气井 ϖ 的气流量；$e_{\varpi,n}$ 为节点 n 处的气井 ϖ 的碳排放强度；$Q_{\mathrm{gas},i}$ 为管道 i 气流量；$\rho_{\mathrm{gas},i}$ 为管道 i 中气流量的碳势；I_{gas} 为节点 n 处流入气流量的支路数量。同理，气网节点 n 的碳势数值上等于所有流入节点的支路的碳流密度关于气网潮流的加权平均。

1.4 能量枢纽的碳排放流模型

源侧产生的碳排放传输到 EH 的输入端后，还需要将其分配至各 EH 负荷端，因此，需对 EH 进行碳排放流建模[17]。可将 EH 视为多个多能互补的转换器组成的系统，将能量转化器分成单输入单输出转换器(光伏、电转气、热泵)和单输入多输出转换器(热电联产)。

单输入单输出转换器的碳排放流模型为

$$\rho_{\mathrm{o}}V_{\mathrm{o}}=\rho_{\mathrm{i}}V_{\mathrm{i}} \tag{7}$$

式中：ρ_{o} 和 ρ_{i} 分别为转换器输出端和输入端的碳流密度；V_{o} 和 V_{i} 分别为转换器 i 的输出端和输入端的能流功率，MW。

单输入多输出转换器的碳排放流模型为：

$$\rho_{\mathrm{o}1}V_{\mathrm{o}1}+\rho_{\mathrm{o}2}V_{\mathrm{o}2}=\rho_{\mathrm{i}}V_{\mathrm{i}} \tag{8}$$

$$V_{\mathrm{o}1}=V_{\mathrm{i}}\eta_{\mathrm{o}1} \tag{9}$$

$$V_{\mathrm{o}2}=V_{\mathrm{i}}\eta_{\mathrm{o}2} \tag{10}$$

式中：$\rho_{\mathrm{o}1}$、$\rho_{\mathrm{o}2}$ 分别为该转换器第 1 输出端、第 2 输出端的碳流密度；$V_{\mathrm{o}1}$、$V_{\mathrm{o}2}$ 分别为该转换器第 1 输出端、第 2 输出端的能流功率，单位为 MW；$\eta_{\mathrm{o}1}$ 和 $\eta_{\mathrm{o}2}$ 为能量转换效率。通过各个能量转换公式的组合求解，可得出 EH 负荷端的碳势以及碳排放量。

2 基于碳排放流理论的低碳策略

2.1 基于碳排放流和 Shapley 值的碳交易模型

目前，全国碳排放权交易市场已经启动，碳交易机制主要由 3 部分组成：碳排放配额、碳排放量和碳交易价格。碳排放配额由政府部门发放，当企业的碳排放量低于配额时，可将剩余配额出售，反之则需购买。文献[18]将 Shapley 值法引入配电网碳排放责任分摊中，本文将该方法延伸至 IES，以每个 EH 为负荷主体进行分析，计算每个 EH 的碳排放责任，制定合理碳排放配额。

Shapley 值法是一种多人合作博弈求解方法，其值体现了联盟成员对联盟目标贡献程度或责任。基于 Shapley 值的碳排放分摊量为：

$$\phi(i)=\sum_{i\in S}P(S)(v(S)-v(S-\{i\})) \tag{11}$$

$$P(S)=\frac{(m-|S|)!(|S|-1)!}{m} \tag{12}$$

式中：$\phi(i)$ 为联盟中成员 i 的碳排放责任分摊量；S 为子联盟；$|S|$ 为子联盟的数量；$P(S)$ 为联盟 S 的发生概率；$v(S)-v(S-\{i\})$ 为成员 i 加入联盟 S 所得到的承担的责任[18]。成员的碳排放责任应该在其边际作用的范围之内，不超过 $\phi(i)$ 的最大值，不小于其最小值。因此得出阶梯碳交易的区间：$0\sim\phi_{\min}(i)$ 为无碳责任区间；$\phi_{\min}(i)\sim\phi_{\mathrm{v}}(i)$ 为低碳责任区间；$\phi_{\mathrm{v}}(i)\sim\phi_{\max}(i)$ 为中等碳责任区间；$\phi_{\max}(i)\sim\infty$ 为高碳责任区间；$\phi_{\mathrm{v}}(i)$ 为 $\phi(i)$ 的平均值。根据区间得出碳交易模型为

$$\begin{cases}c_{\mathrm{co}_2,i,t}=\begin{cases}0,\ 0\le E_{\mathrm{co}_2,i,t}\le\phi_{\min}(i)\\ \lambda_1(E_{\mathrm{co}_2,i,t}-\phi_{\min}(i)),\ \phi_{\min}(i)<E_{\mathrm{co}_2,i,t}\le\phi_{\mathrm{v}}(i)\\ \lambda_1(\phi_{\mathrm{v}}(i)-\phi_{\min}(i))+\lambda_2(E_{\mathrm{co}_2,i,t}-\phi_{\mathrm{v}}(i)),\\ \phi_{\mathrm{v}}(i)<E_{\mathrm{co}_2,i,t}\le\phi_{\max}(i)\\ \lambda_1(\phi_{\mathrm{v}}(i)-\phi_{\min}(i))+\lambda_2(\phi_{\max}(i)-\phi_{\mathrm{v}}(i))+\\ \lambda_3(E_{\mathrm{co}_2,i,t}-\phi_{\max}(i)),\ \phi_{\max}(i)<E_{\mathrm{co}_2,i,t}\end{cases}\\ E_{\mathrm{co}_2,i,t}=e_{i,t}L_{i,t}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$c_{\mathrm{co}_2,i,t}$ 为负荷 i 在 t 时刻的碳交易成本；$E_{\mathrm{co}_2,i,t}$ 为负荷 i 在 t 时刻的碳排放量；$e_{i,t}$ 为负荷 i 在 t 时刻的碳势；$L_{i,t}$ 为其负荷量；λ_1、λ_2 和 λ_3 为 3 档碳交易单价，元/t。

2.2 价格型需求响应模型

价格型需求响应根据消费者心理学制定出合理能源价格，改变用户负荷与用能方式。以电负荷为例，以需求弹性矩阵 $\boldsymbol{E}$ 表示电价变化对电负荷的影响，如下：

$$\left[\frac{\Delta q_1}{q_1}\ \cdots\ \frac{\Delta q_t}{q_t}\ \cdots\ \frac{\Delta q_T}{q_T}\right]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{E}\left[\frac{\Delta p_1}{p_1}\ \cdots\ \frac{\Delta p_t}{p_t}\ \cdots\ \frac{\Delta p_T}{p_T}\right]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

$$P_{\mathrm{DR},t}=P_t+\Delta q_t \tag{15}$$

$$\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{DR},t}=\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{YC},t} \tag{16}$$

式中，Δq_t 和 Δp_t 分别为 t–1 到 t 时刻负荷和电价的变化值；q_t 和 p_t 分别为 t 时刻负荷量和电价值；$\frac{\Delta q_t}{q_t}$ 和 $\frac{\Delta p_t}{p_t}$ 分别为 t 时刻的负荷变化率和电价变化率；需求弹性矩阵 $\boldsymbol{E}$ 主对角线为自弹性系数，副对角线为互弹性系数，本文分别取值–0.2 和 0.033；需求响应前后负荷总量不变，$P_{\mathrm{DR},t}$ 为 t 时刻负荷预测值；$P_{\mathrm{YC},t}$ 为需求响应前负荷预测值；T 为整个调度周期，本文取 24 h。同理，可得出气负荷和热负荷的价格型需求响应模型。

为了减少负荷对高碳排放强度源侧的依赖，利用碳势控制的方法，优化需求响应模型，降低碳排放量，如下：

$$e_n\le e_{\mathrm{v}} \tag{17}$$

$$e_{\mathrm{v}}=\frac{\sum_{i}^{I_{\mathrm{G}}}e_{\mathrm{G},i}+\sum_{j}^{J_{\mathrm{gas}}}e_{\mathrm{gas},j}}{I_{\mathrm{G}}+J_{\mathrm{gas}}} \tag{18}$$

式中：e_{v} 为所有机组和气井的平均碳排放强度；$e_{\mathrm{G},i}$ 和 $e_{\mathrm{gas},j}$ 分别为机组和气井的碳排放强度；I_{G} 和 J_{gas} 分别为机组和气井的数量。通过此约束可限制对高

碳强度能源的依赖。

3 综合能源系统双层低碳经济调度模型

本文利用双层调度模型，研究系统的经济性与低碳性。上层模型得到电网和气网的能流信息，并利用碳排放流模型计算出各 EH 输入端碳势；下层的各个 EH 将承担购能成本和碳交易成本，得到系统联络线功率。经过迭代将实现上下层模型的耦合。模型框架图如附录 A 图 A1 所示。

3.1 上层经济调度模型

3.1.1 目标函数

上层模型以 IES 调度成本最小为目标，包括电厂总燃料成本和天然气开采成本，具体目标函数为

$$\min F_1 = f_{\mathrm{e}} + f_{\mathrm{g}} \tag{19}$$

式中：f_{e} 为电厂总燃料成本；f_{g} 为天然气开采成本。其计算式分别为：

$$f_{\mathrm{e}} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}(a_i P_{\mathrm{G},i,t}^2 + b_i P_{\mathrm{G},i,t} + c_i) \tag{20}$$

$$f_{\mathrm{g}} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{\varpi=1}^{J}\rho_{\varpi} Q_{\varpi,t} \tag{21}$$

式中：$P_{\mathrm{G},i,t}$ 为电厂 i 在 t 时刻的发电功率；a_i、b_i 和 c_i 为机组 i 的发电系数；ρ_{ϖ} 为天然气井 ϖ 单位开采价格；$Q_{\varpi,t}$ 为天然气井 ϖ 在 t 时刻的开采量；I 和 J 分别为系统的总电厂数和气井数。

3.1.2 电网潮流约束

本文采用直流潮流约束作为电力网络约束，约束条件包括节点功率平衡约束、相角约束、机组出力约束和输电线路约束，参考文献[19]。

3.1.3 气网约束

天然气网主要由气井、管道和气负荷组成。其约束主要考虑节点供需平衡约束、节点压力约束、气网管道约束和气源约束，如下：

$$Q_{\varpi,i,t} - L_{\mathrm{gas},i,t} = Q_{\mathrm{p}i,t} \tag{22}$$

$$P_{\mathrm{r,min},i} \le P_{\mathrm{r},i,t} \le P_{\mathrm{r,max},i} \tag{23}$$

$$Q_{\mathrm{p}i,t} = \mathrm{sgn}(P_{\mathrm{r1},i,t}, P_{\mathrm{r2},i,t}) C_{\mathrm{P}} \sqrt{\left| P_{\mathrm{r1},i,t}^2 - P_{\mathrm{r2},i,t}^2 \right|} \tag{24}$$

$$\mathrm{sgn}(P_{\mathrm{r1},i}, P_{\mathrm{r2},i}) = \begin{cases} +1, & P_{\mathrm{r1},i} \ge P_{\mathrm{r2},i} \\ -1, & P_{\mathrm{r1},i} < P_{\mathrm{r2},i} \end{cases} \tag{25}$$

式中：$Q_{\mathrm{p}i,t}$ 为管道 i 在 t 时刻的流量；$L_{\mathrm{gas},i,t}$ 为管道 i 末端在 t 时刻的天然气负荷；$P_{\mathrm{r},i,t}$ 为天然气管道 i 在 t 时刻的压力；$P_{\mathrm{r1},i,t}$ 为天然气管道 i 首端节点 r1 在 t 时刻的压力；$P_{\mathrm{r2},i,t}$ 为天然气管道 i 末端节点 r2 在 t 时刻的压力；$P_{\mathrm{r,max},i}$ 和 $P_{\mathrm{r,min},i}$ 分别为天然气管道 i 压力上、下限；C_{P} 为管道常数。

从约束条件看出此为非凸规划问题，常规求解困难，因此本文采用增量分段线性化方法，将此问题转换为线性规划问题。

3.1.4 碳排放流计算

根据第 1.2~1.4 节的内容，计算各 EH 的碳势，从而得负荷端的碳排放量，传递给下层。

3.2 下层调度模型

3.2.1 目标函数

下层模型以 EH 购能成本和碳交易成本之和最小为目标函数，目标函数为：

$$\min F_2 = f_{\mathrm{EH,e}} + f_{\mathrm{EH,g}} + f_{\mathrm{co_2}} \tag{26}$$

$$f_{\mathrm{EH,e}} = \sum_{t}^{T}\sum_{i}^{I_{\mathrm{EH}}} \lambda_{\mathrm{e},t} P_{\mathrm{cl},i,t} \tag{27}$$

$$f_{\mathrm{EH,g}} = \sum_{t}^{T}\sum_{i}^{I_{\mathrm{EH}}} \lambda_{\mathrm{g},t} Q_{\mathrm{cl},i,t} \tag{28}$$

$$f_{\mathrm{co_2}} = \sum_{t}^{T}\sum_{i}^{I_{\mathrm{EH}}} c_{\mathrm{co_2},i,t} \tag{29}$$

式中：I_{EH} 为系统 EH 数量；$f_{\mathrm{EH,e}}$ 为 EH 总购电成本；$f_{\mathrm{EH,g}}$ 为 EH 总购气成本；$f_{\mathrm{co_2}}$ 为碳交易总成本；$\lambda_{\mathrm{e},t}$ 和 $\lambda_{\mathrm{g},t}$ 分别为 t 时刻 EH 购电和购气单价；$P_{\mathrm{cl},i,t}$ 和 $Q_{\mathrm{cl},i,t}$ 分别为 t 时刻 EH 的电网和气网联络线功率，下层模型将 $P_{\mathrm{cl},i,t}$ 和 $Q_{\mathrm{cl},i,t}$ 传递给上层。

3.2.2 能量枢纽约束

本文利用 EH 概念对区域 IES 进行建模[20]，EH 如图 2 所示，模型为

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{P} - \boldsymbol{C}\boldsymbol{I} \pm \boldsymbol{S}\boldsymbol{W} \tag{30}$$

式中：$\boldsymbol{L}$、$\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{I}$、$\boldsymbol{S}$ 和 $\boldsymbol{W}$ 分别为输出矩阵、输入矩阵、耦合矩阵、设备矩阵、储能转换矩阵和储能充放矩阵。输出矩阵和输入矩阵分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{L} = \left[L_{\mathrm{E}} \ L_{\mathrm{G}} \ L_{\mathrm{H}} \right]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{P} = \left[P_{\mathrm{E}} \ P_{\mathrm{G}} \ 0 \right]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{31}$$

式中：L_{E}、L_{G}、L_{H} 分别为电负荷、气负荷和热负荷；P_{E} 和 P_{G} 分别为电网电能输入和天然气网输入。

耦合矩阵和设备矩阵分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\eta_{\mathrm{chp,e}} & 0 \\ -\eta_{\mathrm{ptg,g}} & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -\eta_{\mathrm{hp,h}} & -\eta_{\mathrm{chp,h}} & -\eta_{\mathrm{gf,h}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{I} = \left[S_{\mathrm{ptg}} \ S_{\mathrm{hp}} \ S_{\mathrm{chp}} \ S_{\mathrm{gf}} \right]^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{32}$$

式中：$\eta_{\mathrm{ptg,g}}$、$\eta_{\mathrm{hp,h}}$、$\eta_{\mathrm{chp,e}}$、$\eta_{\mathrm{chp,h}}$ 和 $\eta_{\mathrm{gf,h}}$ 分别为电转气设备电转甲烷系数、热泵的电转热系数、热电

联产天然气发电系数、热电联产天然气转热系数和燃气锅炉天然气转热系数；S_{ptg}、S_{hp}、S_{chp}和S_{gf}分别为电转气设备输入电功率、热泵输入电功率、热电联产输入天然气流量和燃气锅炉输入天然气流量。

储能转换矩阵和储能充放矩阵分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} \eta_{\mathrm{se}} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{\mathrm{sg}} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\mathrm{sh}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} P_{\mathrm{se}} & P_{\mathrm{sg}} & P_{\mathrm{sh}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{33}$$

式中：η_{se}、η_{sg}和η_{sh}分别为储电、储气和储热效率；P_{se}、P_{sg}和P_{sh}分别为储电、储气和储热充放功率。

储能的充放电约束如下

$$W_{\mathrm{se},n}=W_{\mathrm{se},n\text{-}1}(1-\sigma_{\mathrm{se}})+P_{\mathrm{se,c}}\eta_{\mathrm{se}}-\frac{P_{\mathrm{se,d}}}{\eta_{\mathrm{se}}} \tag{34}$$

式中：$W_{\mathrm{se},n\text{-}1}$、$W_{\mathrm{se},n}$分别为充放电前后储能的储蓄量；$\sigma_{\mathrm{se}}$为自放电率；$P_{\mathrm{se,c}}$和$P_{\mathrm{se,d}}$分别为蓄电池充放电功率。

各设备的功率上下限约束如下

$$S_{i,\min}\le S_i\le S_{i,\max} \tag{35}$$

式中：S_i为各个设备的功率；$S_{i,\min}$为各个设备的功率下限；$S_{i,\max}$为各个设备的功率上限。

3.2.3 碳交易和需求响应约束

碳交易约束如式(11)—式(13)所示，需求响应约束如式(15)—式(18)所示。

3.2.4 模型求解

求解流程图如图 4 所示。

模型求解步骤如下：

(1)输入线路参数、节点参数、设备参数等进行初始化。

(2)进行初步调度，得到初始化的电网、气网联络线功率$P_{\mathrm{cl},i,t}$和$Q_{\mathrm{cl},i,t}$，利用 Shapley 值法计算各 EH 各个时段的碳配额。

(3)进行上层电网、气网调度，计算电网、气网碳排放流，并传输到下层。

(4)进行下层 EH 调度，得到新联络线功率$P_{\mathrm{cl},i,t+1}$和$Q_{\mathrm{cl},i,t+1}$。

(5)分别判断判别式$\left|P_{\mathrm{cl},i,t+1}-P_{\mathrm{cl},i,t}\right|\le\varepsilon_{\mathrm{P}}$和$\left|Q_{\mathrm{cl},i,t+1}-Q_{\mathrm{cl},i,t}\right|\le\varepsilon_{\mathrm{Q}}$是否同时成立，若成立则迭代终止，若不成立则转向步骤(3)。为防止出现震荡情况，利用二分法对联络线功率进行约束。其中ε_{P}和ε_{Q}分别为电网和气网的收敛精度，取值为 0.05 MW。

(6)输出调度结果进行分析。

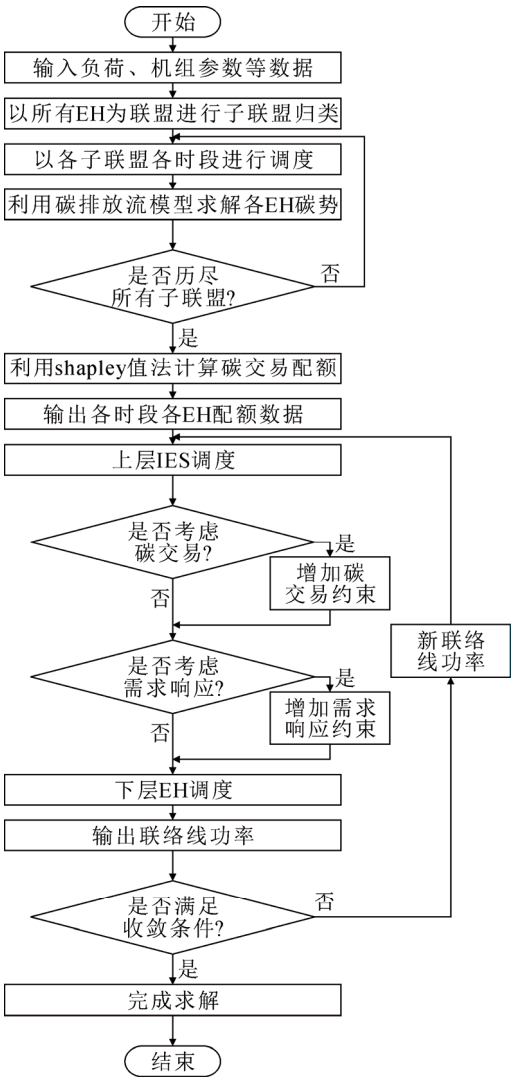


图 4 模型求解流程图

Fig.4 Model solving flowchart

4 算例分析

4.1 基础数据

本文采用 6 节点电网、6 节点天然气网和 3 个 EH 组成的 IES 进行算例分析[21]。EH 结构图和系统结构图分别如图 2 和附录 A 图 A2 所示，G 为电厂，W 为风电，EH 为能量枢纽，GW 为天然气气井。EH 基础数据曲线附录 A 图 A3 所示，EH1 电气热负荷基准值和光伏风电基准值如表 1 所示。EH2 和 EH3 的负荷为 EH1 的 1/2，各设备参数如附录 A 表 A1—表 A4 所示，部分数据选自文献[22]。本文利用 CPLEX 进行优化求解，系统以 24 h 为周期，以 1 h 为步长进行仿真，设置 3 个场景：

场景 1：考虑碳交易和需求响应的 IES 低碳经济调度。

场景 2：考虑碳交易，不考虑需求响应的 IES

低碳经济调度；

场景 3：不考虑碳交易和需求响应的 IES 经济调度。

比较各个场景下的碳排放量和经济运行成本，得出各个场景的减排力度。

4.2 碳配额计算和分析

首先，利用 shapley 值法对各个 EH 进行碳排放配额计算。由附录 A 图 A2 可知，以{EH1,EH2,EH3}为联盟，则{EH1}、{EH2}、{EH3}、{EH1,EH2}、{EH2,EH3}、{EH1,EH3}为 6 个子联盟。以时刻 t=1 h 为例，计算各子联盟独立运行时的总碳排放量，如图 5 所示。

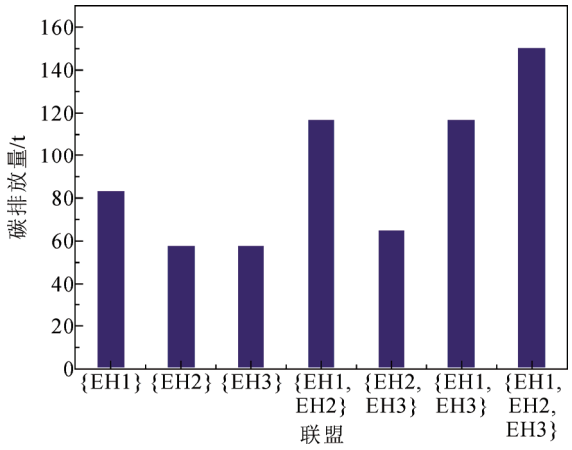


图 5 t=1 h 时刻各联盟碳排放责任量

Fig.5 Carbon emission responsibility of each alliance at t=1 h

以计算 t=1 h 时，EH1 碳排放责任量为例，根据式(11)，计算子联盟$\{\mathrm{EH1}\}$情况下的碳排放量，包括 $E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH1}\}$，$E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH1,EH2}\}-E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH2}\}$，$E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH1,EH3}\}-E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH3}\}$ 和 $E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH1,EH2,EH3}\}-E_{\mathrm{CO_2}}\{\mathrm{EH2,EH3}\}$，其中最小值 $\phi_{\min}(\mathrm{EH1})$ 为 58.50 t，最大值 $\phi_{\max}(\mathrm{EH1})$ 为 85.77 t，根据式(11)、(12)计算 $\phi_v(\mathrm{EH1})$ 为 76.20 t。因此得到了 t=1 h 时刻 EH1 的碳排放配额区间分别为[58.50, 76.20]、[76.20, 85.77]、[85.77, ∞]，设置阶梯碳交易单价为 30、60、80 元/t，得到 24 h 各 EH 的碳配额如图 6 所示。

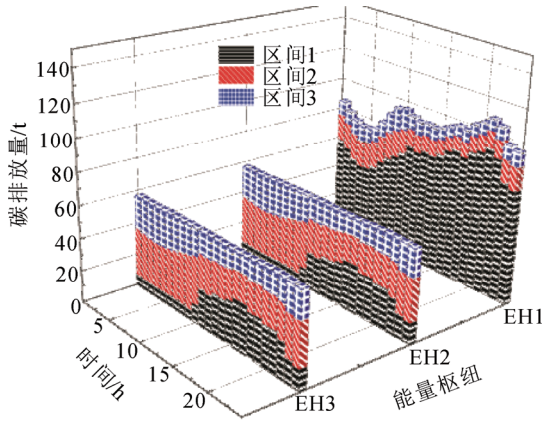


图 6 各 EH 碳排放配额区间图

Fig.6 Chart of EH carbon emission allowance intervals

从图 6 中可看出，EH1 各个时段的碳排放配额均大于 EH2 和 EH3，而 EH2 和 EH3 配额比较相似，原因在于 EH1 的负荷量最高，其碳排放量最大，因此其碳排放区间较高。可以看出，08:00—20:00 时段各个 EH 碳排放配额区间位置较高，而 00:00—07:00 时段位置较低，这是由于 EH 中热负荷比例较小，气负荷和电负荷占主要部分，而电负荷和气负荷的需求主要在日间，热负荷主要在夜间，因此区间走势和电负荷、气负荷走势相近，这也体现了碳排放流模型可以追踪到从源侧到负荷侧的碳排放，体现碳排放的足迹。也证明了基于 Shapley 值法的碳交易模型对碳排放责任分摊的合理性。以电负荷为例分析碳势。

图 7 为各 EH 电负荷碳势大小。可以看出碳势趋势基本相同，在 16:00—23:00 时段碳势突增，这是由于此时间段为热负荷高峰时段，热负荷由热泵、燃气锅炉和热电联产供应。由于 EH 设备中热泵的输出功率高于燃气锅炉和热电联产，因此热负荷主要由热泵输出，而热泵由电网中的机组供电，机组的碳排放强度远大于气井的碳排放强度，因此造成了此段时间的碳势增加。而 EH1 的平均碳势远大于 EH2 和 EH3，这也是 EH1 的热负荷较高所引发的现象。因此碳排放流模型可以比较准确地反映系统的碳排放情况，追踪到碳足迹。

4.3 调度结果分析

对 3 个场景进行调度结果分析，如表 1 所示。

比较场景 1 和场景 2 可知，在同时考虑碳交易的情况下，场景 1 考虑了需求响应后，系统总成本减少 4.37%，购电成本降低了 17.73%，购买天然气成本增加了 30.67%，碳排放量减少约 7.06%。通过对上述数据进行分析，可以得出，一方面，场景 2 下，系统更加依赖能源价格相对便宜的电网系统供能，而减少了碳排放强度较低的气网系统供能，经过需求响应后，下层系统逐渐提高了气网的利用量，减少了电网的功能，从而降低了碳排放量，提高了系统的低碳性。另一方面，需求响应也提高了碳交易的激励效果，从而降低了碳排放和减少运行成本。比较场景 2 和场景 3 可知，场景 2 考虑了碳交

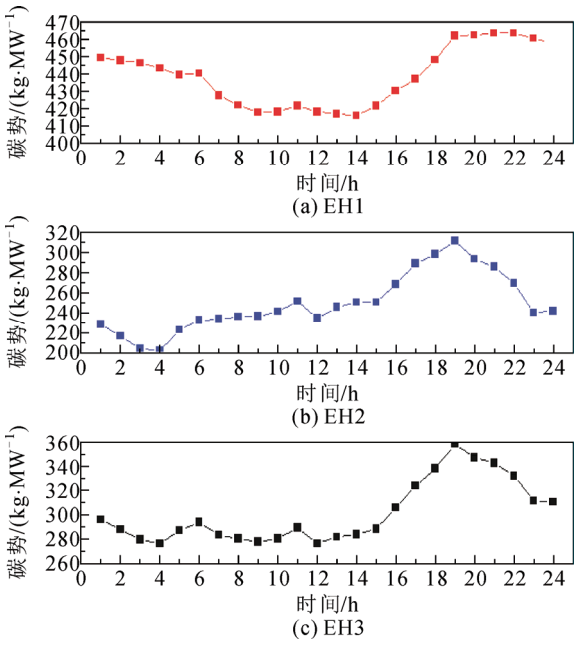


图 7 EH 的电负荷碳势

Fig.7 EH electric load carbon emission intensity

表 1 各场景的下层系统成本

Table 1 Lower-level system cost of each scenario

场景	总成本/元	购电成本/元	购气成本/元	碳交易成本/元	碳排放量/t
场景 1	2 634 375	1 449 655	734 498	450 224	7360
场景 2	2 754 699	1 761 996	522 157	470 548	7919
场景 3	2 516 946	1 971 857	545 089	0	8679

易模型，系统的总成本提高了 9.45%，碳排放量减少了 9.68%，并且进一步减少了电网供能，可以得出，利用基于 Shapley 值法的碳交易模型可以在增加部分系统运行成本的情况下，提高系统的运行效率，减少对高碳强度源侧的依赖程度，从而大幅减少碳排放量。通过对比场景 1 和场景 3 可得，在同时考虑碳交易和需求响应的情况下，系统总成本提高了 4.45%，碳排放量减小 15.2%。因此可以得出，本文提出的模型可以在小幅提高系统运行成本的情况下，大幅减少碳排放量，虽然一定程度上增加了系统运行负担，但是有效提高了系统的低碳性。图 8 为 EH1 的电母线功率图。图 9 为场景 1 需求响应前后 EH2 电负荷的变化，纵坐标的基准值为 122.8 MW。

可以看出，01:00—07:00 为用电的低谷时期，此时的碳势相对较低，需求响应后，系统将一天中 08:00—12:00 的用电量进行了时移，增加了 01:00—07:00 的用电量。而 16:00—23:00 为一天用

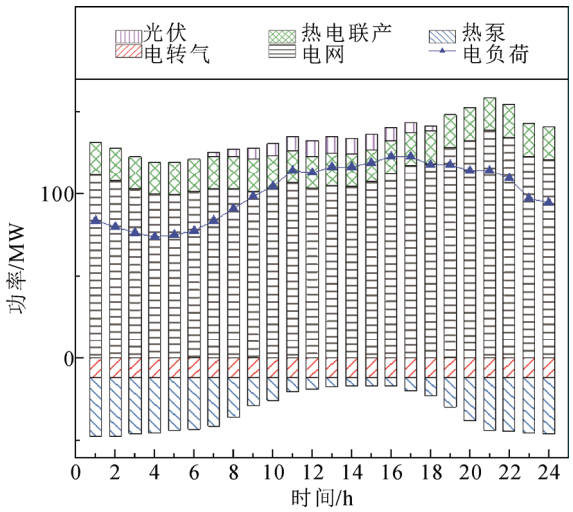


图 8 EH1 电母线功率图

Fig.8 EH1 electric bus power diagram

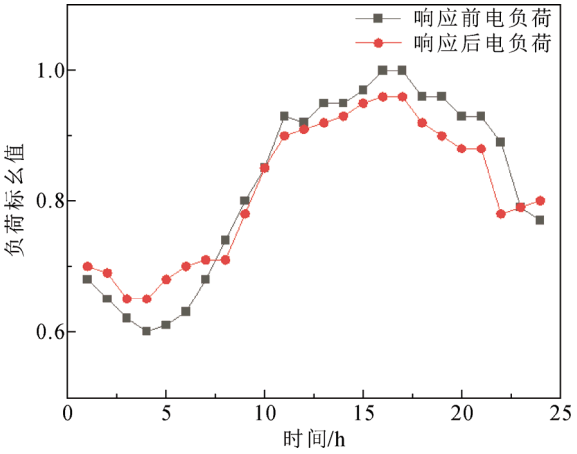


图 9 需求响应前后 EH2 电负荷

Fig.9 EH2 electric load before and after demand response

电的高峰，此时的碳交易价格较高，各个节点的碳势也比较高，因此，此时的碳交易规模以及需求响应较大，系统对此时的负荷进行了削减和时移。从图 9 中整体可以看出，需求响应在一定程度上对电负荷起到了削峰填谷的作用。

4.4 敏感性分析

对影响系统运行成本和碳排放量的因素进行分析。分别分析机组发电单位成本、气源开采成本对上层系统的影响，碳交易单价对下层系统运行成本的影响，并进行敏感性分析，如图 10 所示。

从图 10 可以看出，对于上层系统运行成本，机组发电成本的影响大于气源开采成本，一方面是由于机组的发电成本相对较低，系统对电力的需求相对较大；另一方面，由于机组的碳排放强度大于

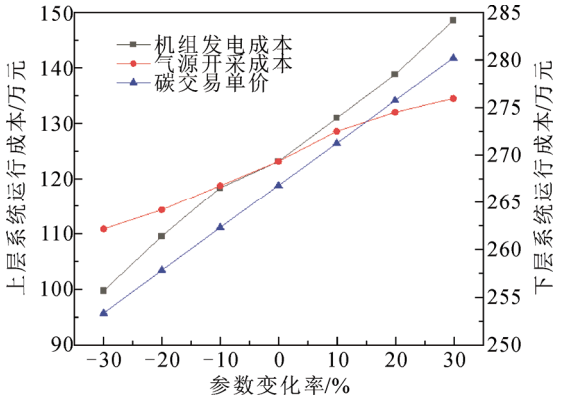


图 10　敏感性分析

Fig.10　Sensitivity analysis

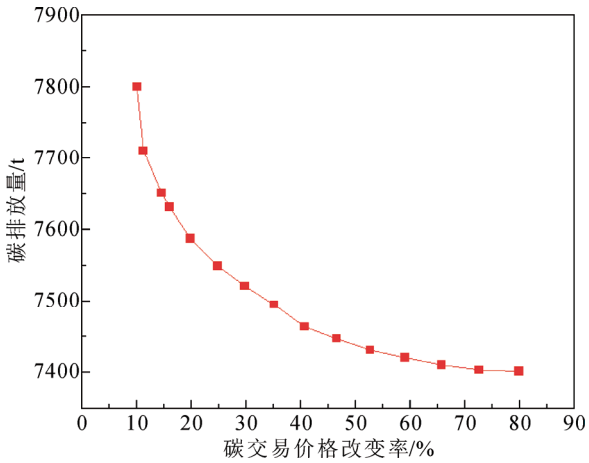


图 11　碳交易价格–碳排放曲线

Fig.11　Carbon trading price-carbon emission curve

气源，机组的减排能力较大，因此其敏感度较高。对于下层系统的成本，碳交易单价对其影响较为稳定。从图 11 可看出：当碳交易价格增加 50%以内时，可减少大量碳排放量；而当碳交易价格增加 60%以上时，碳排放量变化不明显，其减排能力减弱，可知系统减排能力已经释放殆尽，通过对比可得出合理的碳交易价格，兼顾经济性与低碳性。

5　结论

本文利用碳排放流模型计算负荷侧的碳排放量，将基于 Shapley 值的碳责任分摊方法引入到 IES 碳交易模型中，并且结合需求响应，研究 IES 的经济性与低碳性，提出了考虑碳排放流和需求响应的 IES 双层调度模型。通过算例验证得到以下结论：

1）将碳排放流模型引入 IES 后可以有效将源侧产生的碳排放量归算到负荷侧，该模型体现出负荷所对应的碳排放量。

2）基于 Shapley 值的碳责任分摊方法体现了负荷的碳排放责任，相比于传统的碳交易模型，本文提出的模型具有更好的减排作用，与不考虑碳交易的情况相比，可减少碳排放量 9.68%。

3）考虑需求响应与碳交易模型后，引入碳势控制，系统运行成本降低 4.37%。因此该模型可合理平衡系统的经济性与低碳性。

后续研究：本文将 IES 的碳排放责任归算到负荷侧进行分析，之后可研究源荷两侧共同承担碳排放责任的模型。下阶段工作可以探究考虑碳价和电价相结合的需求响应模型。此外，构建无碳的 IES 也值得研究。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 卓振宇，张　宁，谢小荣，等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 张　翔，陈　政，马子明，等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J]. 电网技术，2019，43(8)：2682-2690.
ZHANG Xiang, CHEN Zheng, MA Ziming, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.

[3] 高　令. 碳金融交易风险形成的原因与管控研究——以欧盟为例[J]. 宏观经济研究，2018(2)：104-111，125.
GAO Ling. A study on the cause of formation and control of carbon financial transaction risk: taking EU as an example[J]. Macroeconomics, 2018(2): 104-111, 125.

[4] 刘牧心，梁　希，林千果，等. 碳中和驱动下 CCUS 项目衔接碳交易市场的关键问题和对策分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(14)：4731-4739.
LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739.

[5] 生态环境部. 碳排放权交易管理办法(试行)[J]. 中华人民共和国国务院公报，2021(7)：46-50.
Ministry of Ecology and Environment. Measures for administration of carbon emissions trading (For Trial Implementation)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(7): 46-50.

[6] 马燕峰，范振亚，刘伟东，等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[J]. 电网技术，2016，40(2)：412-418.
MA Yanfeng, FAN Zhenya, LIU Weidong, et al. Environmental and economic dispatch considering carbon trading credit and randomicity of wind power and load forecast error[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 412-418.

[7] 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.

[8] 陈锦鹏，胡志坚，陈嘉滨，等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3094-3104.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.

[9] 胡静哲，王 旭，蒋传文，等. 考虑区域碳排放均衡性的电力系统最优阶梯碳价[J]. 电力系统自动化，2020，44(6)：98-105.
HU Jingzhe, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Optimal tiered carbon price of power system considering equilibrium of regional carbon emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 98-105.

[10] 康丽虹，贾燕冰，田 丰，等. 含 LNG 冷能利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 高电压技术，2022，48(2)：575-583.
KANG Lihong, JIA Yanbing, TIAN Feng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system containing LNG cold energy utilization[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 575-583.

[11] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化，2012，36(7)：38-43，85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.

[12] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化，2012，36(11)：44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.

[13] 周天睿，康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. 全球能源互联网，2019，2(3)：241-247.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247.

[14] 张 涛，刘 景，杨晓雷，等. 计及主/被动需求响应与条件风险价值的微网经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3292-3302.
ZHANG Tao, LIU Jing, YANG Xiaolei, et al. Economic dispatch of microgrid considering active/passive demand response and conditional value at risk[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3292-3302.

[15] 崔 杨，曾 鹏，王 铮，等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电–气–热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术，2021，45(2)：447-459.
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 447-459.

[16] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.

[17] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.

[18] 陈厚合，茅文玲，张儒峰，等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(10)：1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.

[19] 张伊宁，何宇斌，晏鸣宇，等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化，2018，42(20)：1-8.
ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 1-8.

[20] 李志伟，赵书强，李东旭，等. 基于改进ε-约束与采样确定性转化的电力系统日前调度机会约束模型快速求解技术[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4679-4691.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LI Dongxu, et al. Fast solving of day-ahead power system scheduling chance-constrained model based on improved ε-constrained and deterministic transform by sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4679-4691.

[21] 丁煜蓉，陈红坤，吴 军，等. 计及综合能效的电–气–热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(2)：64-73.
DING Yurong, CHEN Hongkun, WU Jun, et al. Multi-objective optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering comprehensive energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 64-73.

[22] 何良策. 电–气综合能源系统环境经济调度研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2020.
HE Liangce. Research on environmental economic dispatch of integrated electricity and natrual gas system[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2020.



刘哲远
1997—，男，硕士生
主要从事综合能源系统低碳运行的研究工作
E-mail: liuzheyuan97@mail.shiep.edu.cn

LIU Zheyuan



邢海军(通信作者)
1979—，男，博士，讲师
主要从事电力系统规划、智能电网及综合能源系统研究
E-mail: xinghj@shiep.edu.cn

XING Haijun
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2021-11-05 在线出版日期 2022-03-28 编辑 程子丰

附录 A

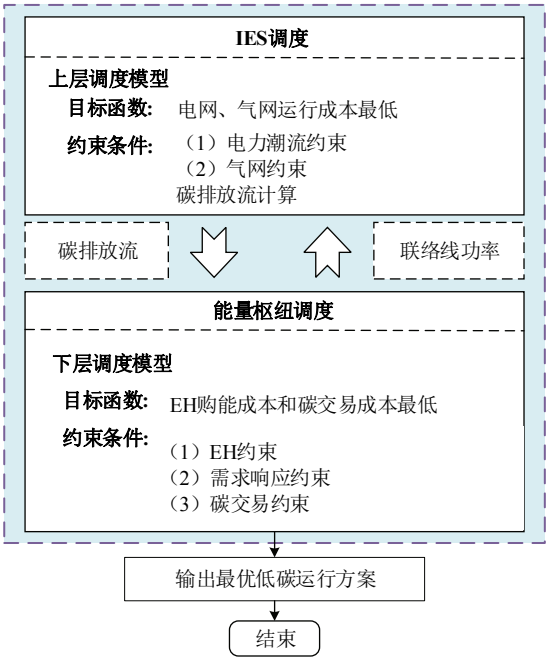


图 A1　模型求解框架图

Fig.A1　Model solving flowchart

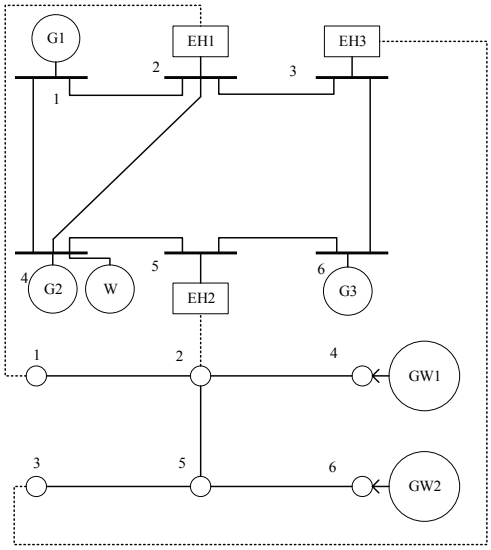


图 A2　IES 结构图

Fig.A2　Integrated energy system structure diagram

图 A2 中 G 为电厂，W 为风电，EH 为能量枢纽，GW 为天然气气井。

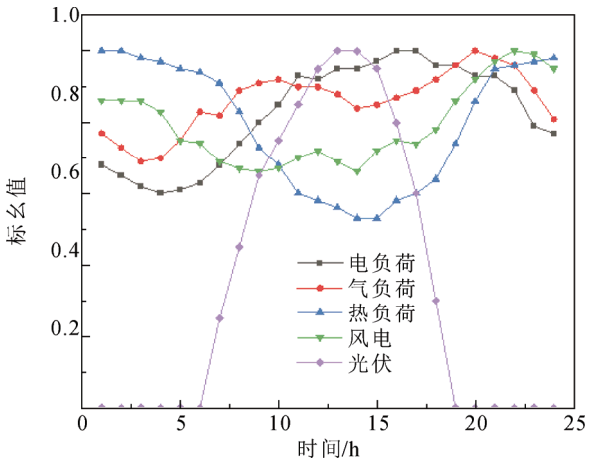


图 A3　EH 基础数据曲线

Fig.A3　EH basic data curve

表 A1　参数基准值

Table A1　Parameter reference value

参数	电负荷/MW	气负荷/MW	热负荷/MW	风电/MW	光伏/MW
基准值	122.8	443.52	202.46	20	50

表 A2　各机组参数

Table A2　Parameters of each unit

机组	出力上限/MW	出力下限/MW	燃料成本系数			碳排放强度/(kg·MW^{-1})
			a/(元·MW^{-2})	b/(元·MW^{-1})	c/元	
G1	500	50	0.014	150	55	800
G2	100	10	0.023	200	50	600
G3	80	20	0.069	200	60	400

表 A3　各气井参数

Table A3　Parameters of each gas well

气井	开采上限/MW	开采下限/MW	成本系数/(元·MW^{-1})	碳排放强度/(kg·MW^{-1})
GW1	1200	1000	195	200
GW2	600	500	175	200

表 A4　EH 设备参数

Table A4　EH equipment parameters

设备	转换系数	功率上限/MW	功率下限/MW
电转气	0.6	60	12
热泵	3.0	80	20
热电联产	0.6	40	10
燃气锅炉	0.8	40	20