[文章编号] 1003－4684(2026)02-0036-08

考虑碳排放流的电-热-氢综合能源系统低碳调度策略

贺忠尉[1]，向　勇[1]，王　宇[2]，罗　杰[2]，肖健波[2]

(1 国家电网恩施供电公司，湖北 恩施 445000；
2 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘　要] 提出一种电-热-氢一体化综合能源系统，对电、热、氢能进行协同分析，引入碳排放流理论分配碳排放量。同时建立阶梯碳价的碳交易机制，加强综合能源系统节能减排能力。最后建立考虑综合能源运行成本、二氧化碳排放成本、风光消纳惩罚成本以及能量损失最少的低碳经济调度模型。通过仿真验证，新方案比传统方案在总成本提高 16.10%情况下碳排量减少 53.97%，弃风弃光量减少 68.89%。该模型具有提高清洁能源利用率、降低碳排放量的作用，实现了低碳经济调度。

[关键词] 碳排放流；综合能源系统；阶梯碳价；低碳经济调度；弃风弃光

[中图分类号] TM172　　[文献标识码] A

双碳目标下，提高清洁能源利用率成为了当务之急[1]。因此近几年大力发展综合能源系统(integrated energy system，IES)，IES 系统包含各类能源，同时将其耦合互补，在能源利用以及转换上发挥着巨大作用[2-3]。当前 IES 的研究方向大部分为电热气、电热冷以及 IES 不确定性等方面[4-5]。文献[4]在考虑机组耦合效率、用户需求响应以及不同环境的多重不确定性下建立多目标优化调度模型。文献[5]建立电、热、气多种储能模型进行经济性建设，提高能量利用率。现有文献大部分都是基于传统电热冷气等负荷进行研究，对于氢能研究较少。清洁氢能可以被用作储能介质，以便在风能或太阳能供应过剩时储存能量。通过利用风能或太阳能电力来产生氢气，可以将电能转化为氢能，并在需要时将其转化回电能，提高能源系统的灵活性和稳定性。

在 IES 中，氢能可以与其他能源形式进行协同利用，实现能源的互补和平衡。例如，利用弃风弃光，通过电解水将其转化成氢气并储存起来，以供不足时使用，通过电转气技术制取天然气，减少天然气制取过程中的碳排放。这样可以优化能源框架，提高能源利用效率。本文建立电-热-氢综合能源系统(electric-heat-hydrogen integrated energy system，EHH-IES)引入清洁氢能进一步优化 IES 能量框架，提高清洁能源增强消纳风光能力。

EHH-IES 中不同类型的能源转换产生的碳排放是耦合在一起的，无法进行精确的碳责任分责。目前流行的碳排放计算方式主要为统计学方法和生命周期分析法[6]，两种方案都是从供能发电侧出发。文献[7-9]通过发电侧利用化石燃料生产能源的消耗量和不同化石燃料的排放因子来计算碳排放量，建立碳排放成本目标函数，减少碳排放量。但是对于在 IES 中碳排放与负荷侧的关系也密不可分，为此本文考虑引入碳排放流理论(carbon emissions stream，CES)，文献[10-11]完善了 IES 中碳排放流的理论架构以及各能源网络相应的计算方法，为 IES 中各能源转换装置的碳排放分责提供了新方法。随着“双碳”目标的推进，在调度研究中除了碳责任分责，碳交易机制也是有效降低碳排放的途径。文献[12]在 IES 调度中考虑碳交易机制达到低碳调度结果。文献[13]通过将碳交易细化为碳收益、碳成本以及碳惩罚来控制碳交易。文献[14]考虑在多主体合作下通过碳交易机制来减少综合碳排放。文献[15]构建阶梯碳价的碳交易机制，有效降低电力系统的碳排量。本文提出考虑碳排放流及风光消纳的综合能源系统优化调度：首先利用碳排放流理论计算 EHH-IES 中各能源转换装置的碳排放量，在系统中进行精确的初始化碳排放权配额；其次在碳交易机制中引入阶段阶梯碳价，进一步降低系统

[收稿日期] 2023－07－21
[第一作者] 贺忠尉(1986－)，男，湖北恩施人，国家电网高级工程师，研究方向为电力系统运行与控制。
[通信作者] 王　宇(1999－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为电力系统运行与控制。

碳排量；最后建立考虑运行成本、碳交易成本、风光消纳惩罚成本以及综合能源系统能耗最小的 EHH-IES 调度模型，求解最优调度方案，达到经济低碳调度效益。

1　基于 CES 理论的综合能源系统模型

1.1　碳排放流基础理论模型

在综合能源系统中不同能量进行生产、转换、传输、交换的过程中都会产生碳排放。CES 是指在包含各类能源的综合能源系统中与各类能量流相关的碳排放，根据潮流网络和构建虚拟碳排放潮流网络流，在综合能源系统的各线路上加入碳排放潮流，将碳排放量合理分配到系统各个节点以及支路。

数据化碳排放流理论在综合能源系统中的应用，提出若干相关碳排放基础定义以及计算方法。

1）碳排量（carbon emissions）　碳排量 M_{ces} 为一定时间 t 内能量流通过某条系统支路的碳排放量。

2）碳排率（carbon emissions rate）　碳排率为单位时间内通过系统节点或者支路的碳排量，用 R_{cef} 表示。

$$R_{\mathrm{cef}}=\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{ces}}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

3）碳排密度　在综合系统中碳排放流是建立在能量潮流基础上，对于两者之间的关系，定义碳排密度表示在综合能源系统中单位能量所产生的碳排放量。碳排密度可分为支路碳排密度和节点碳势：

a）支路碳排密度（branch carbon intensity）。表示在支路上流通单位能量所产生的碳排量，即支路碳排率与能量潮流的比值。

$$\rho_{\mathrm{BCI}}=\frac{R_{\mathrm{bces}}}{E_L} \tag{2}$$

式中：ρ_{BCI} 为支路碳排密度；R_{bces} 为支路碳排率；E_L 为能量潮流。

b）节点碳势。根据能量合并原则，节点碳势可以表示为所有流入支路碳排率的加权求和。

$$\rho_{\mathrm{NCI}_i}=\frac{\sum_{i\in\Omega^+}\rho_{\mathrm{BCI}_i}E_i}{\sum_{i\in\Omega^+}E_i} \tag{3}$$

式中：ρ_{NCI_i} 为节点 i 的碳势；Ω^+ 为能量潮流流入节点 i 的所有支路集合。

1.2　基于 CES 的 EHH-IES 模型

在 EHH-IES 中，将光伏（PV）、风力（WT）以及传统电厂的电力联合起来，以满足 EHH-IES 的电力负荷。同时，EHH-IES 的热量需求由热泵（HP）、燃气锅炉（GB）和热电联合装置（CHP）提供。此外，氢气需求由蒸汽甲烷重整（SMR）和水电解槽（WE）提供。

EHH-IES 能量转换都存在碳排放，由图 1 可知碳排放如何在 EHG-IES 中耦合的。

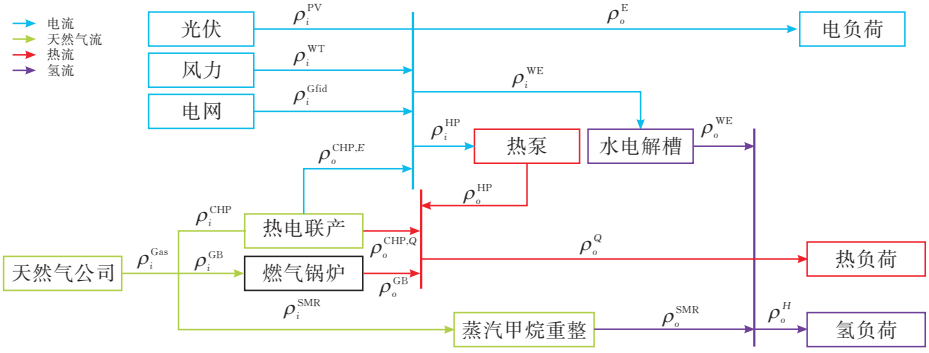


图 1　碳排放在 EHG-IES 中的耦合路径

图 1 中，ρ_i^{PV}、ρ_i^{WT}、ρ_i^{Grid}、ρ_i^{Gas} 分别为光伏、风力、电网以及天然气能源输入接口的碳排密度。ρ_o^{E}、ρ_o^{Q}、ρ_o^{H} 分别为电、热、氢输出端口碳排密度。ρ_i^{WE}、ρ_i^{HP}、ρ_i^{CHP}、ρ_i^{GB}、ρ_i^{SMR} 分别为水电解槽、热泵、热电联产、燃气锅炉、蒸汽甲烷重整设备输入端碳排密度。ρ_o^{WE}、ρ_o^{HP}、ρ_o^{GB}、ρ_o^{SMR} 分别为水电解槽、热泵、燃气锅炉和甲烷重整设备的输出端碳排密度。$\rho_o^{\mathrm{CHP},E}$、$\rho_o^{\mathrm{CHP},Q}$ 分别为热电联产设备对电网和对热网输出端口碳排密度。

由于能源转换装置的多样性，本文构建能量耦合模型，将 EHH-IES 中多种能量输入-转换-输出复杂过程简化为输入和输出端口关系，方便计算出 EHH-IES 中能量转化的碳排密度，其模型可表示为：

$$\rho_p^{E}=\frac{\rho_i^{\mathrm{PV}}P_i^{\mathrm{PV}}+\rho_i^{\mathrm{WT}}P_i^{\mathrm{WT}}+\rho_i^{\mathrm{Grid}}P_i^{\mathrm{Grid}}+\rho_o^{\mathrm{CHP},E}P_o^{\mathrm{CHP},E}}{P_i^{\mathrm{PV}}+P_i^{\mathrm{WT}}+P_i^{\mathrm{Grid}}+P_o^{\mathrm{CHP},E}} \tag{4}$$

式中：P_i^{PV} 为光伏输入功率；P_i^{WT} 为风力输入功率；P_i^{Grid} 为电网输入功率；$P_o^{\mathrm{CHP},E}$ 为热电联产用于发电的输出功率。

$$\rho_o^{Q}=\frac{\rho_o^{\mathrm{CHP},Q}P_o^{\mathrm{CHP},Q}+\rho_o^{\mathrm{HP}}P_o^{\mathrm{HP}}+\rho_o^{\mathrm{GB}}P_o^{\mathrm{GB}}}{P_o^{\mathrm{CHP},E}+P_o^{\mathrm{HP}}+P_o^{\mathrm{GB}}} \tag{5}$$

式中：$P_o^{\mathrm{CHP},Q}$ 为热电联产用于制热的输出功率；P_o^{HP} 为热泵输出功率；P_o^{GB} 为燃气锅炉输出功率。

$$\rho_o^E = \frac{\rho_o^{\mathrm{SMR}} P_o^{\mathrm{SMR}} + \rho_o^{\mathrm{WE}} P_o^{\mathrm{WE}}}{P_o^{\mathrm{SMR}} + P_o^{\mathrm{WE}}} \tag{6}$$

式中：P_o^{SMR} 为甲烷重整设备输出功率；P_o^{WE} 为水电解槽输出功率。

在 EHG-IES 中，能量转换设备由于转换方式以及转换能量的不同，存在不同的转换效率，由此可以得出：

$$\rho_i^{Gas} = \rho_i^{\mathrm{GB}} = \rho_i^{\mathrm{CHP}} = \rho_i^{\mathrm{SMR}} \tag{7}$$

$$\rho_o^E = \rho_i^{\mathrm{WE}} = \rho_i^{\mathrm{HP}} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \rho_o^{\mathrm{WE}} = \rho_i^{\mathrm{WE}} / \omega_{\mathrm{WE}} \\ \rho_o^{\mathrm{HP}} = \rho_i^{\mathrm{HP}} / \omega_{\mathrm{HP}} \\ \rho_o^{\mathrm{SMR}} = \rho_i^{\mathrm{SMR}} / \omega_{\mathrm{SMR}} \\ \rho_o^{\mathrm{GB}} = \rho_i^{\mathrm{GB}} / \omega_{\mathrm{GB}} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \rho_o^{\mathrm{CHP},Q} = \rho_i^{\mathrm{CHP}} / \omega_{\mathrm{CHP},Q} \\ \rho_o^{\mathrm{CHP},E} = \rho_i^{\mathrm{CHP}} / \omega_{\mathrm{CHP},E} \end{cases} \tag{10}$$

式中：ω_{WE}、ω_{HP}、ω_{SMR}、ω_{GB}、$\omega_{\mathrm{CHP},Q}$、$\omega_{\mathrm{CHP},E}$ 分别为水电解槽、热泵、甲烷重整设备、燃气锅炉、热电联产用于制热、热电联产用于发电的能量转换效率。通过将上述综合能源系统调度策略。基于碳排放流理论可以合理分配 EHH-IES 中的能量流所产生的碳排密度，并对碳责任进行分责。

2 阶梯碳交易机制

2.1 初始碳排放权配额

在 EHH-IES 中，主要能源网络为电网、热网以及氢网，初始碳排放权配额主要由这三个网络构成：

$$C_{EHG\text{-}IES} = C^E + C^Q + C^H \tag{11}$$

式中：$C_{EHG\text{-}IES}$、C^E、C^Q、C^H 分别为 EHH-IES 总初始碳排放权配额、EHG-IES 电网、EHH-IES 热网、EHH-IES 氢网的总初始碳排放权配额。

综合能源系统在调度运行中需要受到电网潮流以及联络线功率方面的约束，相应的电网约束表达式如下。

1)电网等式约束：

$$C^E = C^{\mathrm{PV}} + C^{\mathrm{WT}} + C^{\mathrm{Grid}} + C^{\mathrm{CHP},E} \tag{12}$$

$$\begin{cases} C^{\mathrm{PV}} = \lambda_o \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{PV}}(t) \\ C^{\mathrm{WT}} = \lambda_e \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{WT}}(t) \\ C^{\mathrm{Grid}} = \lambda \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{Grid}}(t) \\ C^{\mathrm{CHP},E} = \lambda \omega_{\mathrm{CHP},E} \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{CHP},E}(t) \end{cases} \tag{13}$$

式中：C^{PV}、C^{WT}、C^{Grid}、$C^{\mathrm{CHP},E}$ 分别为光伏发电、风力发电、电力网络传输的初始碳排放权配额；λ_e 为单位电功率碳排放权配额；$P_{\mathrm{PV}}(t)$、$P_{\mathrm{WT}}(t)$、$P_{\mathrm{Grid}}(t)$、$P_{\mathrm{CHP},E}(t)$ 分别为 t 时段光伏发电功率、风力发电功率、电网发电功率和热电联产发电功率。

2)热网等式约束：

$$C^Q = C^{\mathrm{CHP},Q} + C^{\mathrm{HP}} + C^{\mathrm{GB}} \tag{14}$$

$$\begin{cases} C^{\mathrm{CHP},Q} = \lambda_q \omega_{\mathrm{CHP},Q} \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{CHP},Q}(t) \\ C^{\mathrm{HP}} = \lambda_q \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{HP}}(t) \\ C^{\mathrm{GB}} = \lambda_q \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{GB}}(t) \end{cases} \tag{15}$$

除了电网层面约束之外，还需要满足综合能源系统热网等式约束条件。式中：$C^{\mathrm{CHP},Q}$、C^{HP}、C^{GB} 分别为热电联产发热、热泵发热、燃气锅炉发热的初始碳排放权配额；λ_q 为单位热功率碳排放权配额；$P_{\mathrm{CHP},Q}(t)$、$P_{\mathrm{HP}}(t)$、$P_{\mathrm{GB}}(t)$ 分别为 t 时段热电联产发热功率、热泵发热功率、燃气锅炉发热功率。

3)氢网等式约束：

$$C^H = C^{\mathrm{SMR}} + C^{\mathrm{WE}} \tag{16}$$

$$\begin{cases} C^{\mathrm{SMR}} = \lambda_h \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{SMR}}(t) \\ C^{\mathrm{WE}} = \lambda_h \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{WE}}(t) \end{cases} \tag{17}$$

综合能源系统在氢网等式约束条件下来优化调度运行策略。式中：C^{SMR}、C^{WE} 分别为蒸汽甲烷重整、水电解槽产氢的初始碳排放权配额；λ_n 为单位氢功率碳排放权配额；$P_{\mathrm{SMR}}(t)$、$P_{\mathrm{WE}}(t)$ 分别为 t 时段蒸汽甲烷重整、水电解槽产氢功率。

2.2 实际碳排放模型

根据《IPCC 国家温室气体清单指南》，可以得到实际碳排放模型与 EHH-IES 中电网、热网以及氢网实际输出功率相关：

$$\begin{cases} C_{EHH\text{-}IES,a} = C_a^E + C_a^Q + C_a^H \\ C_a^E = \sum_{t=1}^{T} (a_1 + b_1 (P_{\mathrm{PV}}(t) + P_{\mathrm{WT}}(t) + P_{\mathrm{Grid}}(t) + P_{\mathrm{CHP},E}(t)) + c_1 (P_{\mathrm{PV}}(t) + P_{\mathrm{WT}}(t) + P_{\mathrm{Grid}}(t) + P_{\mathrm{CHP},E}(t))^2) \\ C_a^Q = \sum_{t=1}^{T} (a_2 + b_2 (P_{\mathrm{CHP},Q}(t) + P_{\mathrm{HP}}(t) + P_{\mathrm{GB}}(t)) + c_2 (P_{\mathrm{CHP},Q}(t) + P_{\mathrm{HP}}(t) + P_{\mathrm{GB}}(t))^2) \\ C_a^H = \sum_{t=1}^{T} (a_3 + b_3 (P_{\mathrm{SMR},Q}(t) + P_{\mathrm{WE}}(t)) + c_3 (P_{\mathrm{SMR}}(t) + P_{\mathrm{WE}}(t))^2) \end{cases} \tag{18}$$

式中，$C_{\mathrm{EHG\text{-}IES}}$、$C_a^E$、$C_a^Q$、$C_a^H$ 分别为 EHH-IES 实际碳排放量、电网、热网以及氢网碳排放量；a_1、b_1、c_1、a_2、b_2、c_2 和 a_3、b_3、c_3 分别为电网、热网以及氢网的碳排放计算参数。

由此可得，EHH-IES 中参与碳交易的碳排量

C_a 为:

$$C_a = C_{\text{EHH-IES},a} - C_{\text{EHH-IES}} \tag{19}$$

本文设定碳交易的出售与购买价格相同,当 C_a 大于零时的购买碳价与 C_a 小于零时的售出碳价一致,确保更好地激励减碳行动。

2.3　阶梯式碳排放交易模型

为响应"双碳"策略,本文考虑在碳排放交易定价阶段采用阶梯型碳价,通过对超过初始碳排放权配额的碳排放量收取递增式的阶梯型碳价来激发系统减排能力。

阶梯式碳价根据碳排放权划分了多个交易区间,模型如下:

$$S_{TA} = \begin{cases} \zeta C_a, C_a \leqslant L \\ \zeta L + \zeta(1+\alpha)(C_a - L), L \leqslant C_a \leqslant 2L \\ \zeta L(2+\alpha) + \zeta(1+2\alpha)(C_a - 2L), \\ \quad 2L \leqslant C_a \leqslant 3L \\ \zeta L(3+3\alpha) + \zeta(1+3\alpha)(C_a - 3L), \\ \quad 3L \leqslant C_a \leqslant 4L \\ \zeta L(4+6\alpha) + \zeta(1+4\alpha)(C_a - 4L), \\ \quad 4L \leqslant C_a \leqslant 5L \end{cases} \tag{20}$$

式中,S_{TA} 为阶梯式碳价;ζ 为基础碳价;α 为阶梯增长幅度;L 为阶梯区间长度。

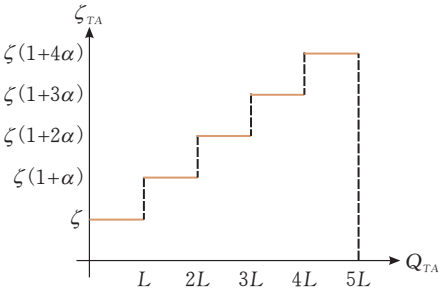


图 2　阶梯碳价

3　考虑碳排放流理论及风光消纳的综合能源系统优化调度

在含有新能源的综合能源系统中,往往忽略了经济成本问题,本文通过引入碳排放流理论提出综合能源系统优化调度策略,将经济成本和综合能源消耗最小设置为目标函数,建立考虑运行成本、碳交易成本、风光消纳惩罚成本以及综合能源系统能耗最小化的 EHH-IES 调度模型,以确保系统运行的经济性、可持续性和效率性。

电力系统通过优化火电、光伏、风电等出力来形成调度策略,本文主要制定目标函数,给出约束条件,最终给出考虑碳排放流理论及风光消纳的综合能源系统优化调度策略。

3.1　目标函数

本文通过优化火电、光伏、风电机组出力来形成一套综合能源系统优化调度策略,指导综合能源系统运行。其中目标函数由经济成本以及能耗损失最小为目标。

$$\min F = f_s + f_l \tag{21}$$

式中,f_s 为经济成本;f_l 为能耗损失。

$$f_s = S_E + S_Q + S_H + S_{TA} + S_E \tag{22}$$

$$\begin{cases} S_E = D_E \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + \\ \quad P_{\text{Grid}}(t) + P_{\text{CHP},E}(t)) \\ S_Q = D_Q \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{CHP},Q}(t) + P_{\text{HP}}(t) + P_{\text{GB}}(t)) \\ S_H = D_H \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{SMR}}(t) + P_{\text{WE}}(t)) \\ S_F = D_{\text{PV}} \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{PVF}}(t) - P_{\text{PV}}(t)) + \\ \quad D_{\text{WT}} \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{WTF}}(t) - P_{\text{WT}}(t)) \end{cases} \tag{23}$$

式中,S_E 为电网运行成本;S_Q 为热网运行成本;S_H 为氢网运行成本;S_F 为弃风弃光惩罚成本;D_E 为单位电网运行成本;D_Q 为单位热网运行成本;D_H 为单位氢网运行成本;D_{PV} 和 D_{WT} 分别为单位弃光惩罚成本以及单位弃风惩罚成本;$P_{\text{PVF}}(t)$ 和 $P_{\text{WTF}}(t)$ 分别为光伏发电及风力发电预测出力。

$$f_l = \sum_{t=1}^{T} (L_{\text{WE}}(t) + L_{\text{HP}}(t) + L_{\text{CHP}}(t) + L_{\text{GB}}(t) + L_{\text{SMR}}(t)) \tag{24}$$

$$\begin{cases} L_{\text{WE}}(t) = P_{\text{WE}}(t)(1 - \omega_{\text{WE}}) \\ L_{\text{HP}}(t) = P_{\text{HP}}(t)(1 - \omega_{\text{HP}}) \\ L_{\text{CHP}}(t) = (P_{\text{CHP},E}(t) + P_{\text{CHP},Q}(t)) \cdot \\ (1 - \omega_{\text{CHP},E} - \omega_{\text{CHP},Q}) \\ L_{\text{GB}} = P_{\text{GB}}(t)(1 - \omega_{\text{GB}}) \\ L_{\text{SMR}}(t) = P_{\text{SMR}}(t)(1 - \omega_{\text{SMR}}) \end{cases} \tag{25}$$

式中,$L_{\text{WE}}(t)$、$L_{\text{HP}}(t)$、$L_{\text{CHP}}(t)$、$L_{\text{GB}}(t)$、$L_{\text{SMR}}(t)$ 分别为水电解槽、热泵、热电联产、燃气锅炉、蒸汽甲烷重整的能量损耗量。由于碳排放流理论是根据能量流计算,所以 EHH-IES 中碳排密度转换率与能量转换率相同。

3.2　约束条件

3.2.1　功率平衡约束

1)电功率平衡约束　由于风光出力的不确定性,本文不考虑 EHH-IES 向上级电网馈电情况。

$$\begin{cases} P_{\text{Grid}}(t) = P_{E,\text{Lord}}(t) + P_{\text{WE}}(t) + P_{\text{HP}}(t) \\ - P_{\text{CHP},E}(t) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{WT}}(t) \\ 0 \leqslant P_{\text{Grid}}(t) \leqslant P_{\text{Grid,max}}(t) \end{cases} \tag{26}$$

式中:$P_{E,\text{Lord}}(t)$ 为 t 时刻电负荷功率;$P_{\text{Grid,max}}(t)$ 为 t 时刻电网出力最大值。

2)热功率平衡约束

$$P_{\text{CHP},Q}(t) + P_{\text{GB}}(t) + P_{\text{HP}}(t) = P_{Q,\text{Lord}}(t) \tag{27}$$

式中：$P_{Q,\mathrm{Lord}}(t)$ 为 t 时刻热负荷功率。

3)氢功率平衡约束

$$P_{\mathrm{SMR}}(t)+P_{\mathrm{WE}}(t)=P_{H,\mathrm{Lord}}(t) \tag{28}$$

式中：$P_{H,\mathrm{Lord}}(t)$ 为 t 时刻氢负荷功率。

3.2.2 机组约束

1)风光出力约束：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{PV}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{PV}}(t)\leqslant P_{\mathrm{PV}}^{\max}(t)\\ P_{\mathrm{WT}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{WT}}(t)\leqslant P_{\mathrm{WT}}^{\max}(t)\end{cases} \tag{29}$$

式中：$P_{\mathrm{PV}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{PV}}^{\max}(t)$ 为光伏发电 t 时刻的最小出力和最大出力；$P_{\mathrm{WT}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{WT}}^{\max}(t)$ 为风力发电 t 时刻的最小出力和最大出力。

2)热电联产出力与爬坡约束：

$$\begin{cases}\omega_{\mathrm{CHP},E}P_{\mathrm{CHP}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{CHP},E}(t)\leqslant\omega_{\mathrm{CHP},E}P_{\mathrm{CHP}}^{\max}(t)\\ \omega_{\mathrm{CHP},Q}P_{\mathrm{CHP}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{CHP},Q}(t)\leqslant\omega_{\mathrm{CHP},Q}P_{\mathrm{CHP}}^{\max}(t)\\ -\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{down}}\omega_{\mathrm{CHP},E}\Delta t\leqslant P_{\mathrm{CHP},E}(t)-P_{\mathrm{CHP},E}(t-1)\leqslant\\ \quad\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{up}}\omega_{\mathrm{CHP},E}\Delta t\\ -\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{down}}\omega_{\mathrm{CHP},Q}\Delta t\leqslant P_{\mathrm{CHP},Q}(t)-P_{\mathrm{CHP},Q}(t-1)\leqslant\\ \quad\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{up}}\omega_{\mathrm{CHP},Q}\Delta t\\ 0\leqslant\omega_{\mathrm{CHP},E}+\omega_{\mathrm{CHP},Q}\leqslant 1\end{cases} \tag{30}$$

式中：$P_{\mathrm{CHP}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{CHP}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻热电联产最小和最大出力；$-\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{down}}$ 和 $\varphi_{\mathrm{CHP}}^{\mathrm{up}}$ 分别为热泵爬坡功率上下限；Δt 为一个调度周期。

3)EHH-IES 运行设备约束：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{GB}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{GB}}(t)\leqslant P_{\mathrm{GB}}^{\max}(t)\\ P_{\mathrm{HP}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{HP}}(t)\leqslant P_{\mathrm{HP}}^{\max}(t)\\ P_{\mathrm{SMR}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{SMR}}(t)\leqslant P_{\mathrm{SMR}}^{\max}(t)\\ P_{\mathrm{WE}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{WE}}(t)\leqslant P_{\mathrm{WE}}^{\max}(t)\end{cases} \tag{31}$$

式中：$P_{\mathrm{GB}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{GB}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻燃气锅产热最小和最大出力；$P_{\mathrm{HP}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{HP}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻热泵供热最小和最大出力；$P_{\mathrm{SMR}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{SMR}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻蒸汽甲烷重整最小和最大出力；$P_{\mathrm{WE}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{WE}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻水电解槽产氢最小和最大出力。

3.2.3 联络线传输功率约束

$$P_{\mathrm{Line}}^{\min}(t)\leqslant P_{\mathrm{Line}}(t)\leqslant P_{\mathrm{Line}}^{\max}(t) \tag{32}$$

式中：$P_{\mathrm{Line}}(t)$、$P_{\mathrm{Line}}^{\min}(t)$ 和 $P_{\mathrm{Line}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻电网联络线传输功率、电网联络线传输最小和最大功率。

3.2.4 天然气网约束 天然气网络主要是向热网以及氢网提供稳定的天然气、气源、节点压力以及天然气管道，流量约束如下：

$$\begin{cases}V_a^{\min}\leqslant V_{a,t}\leqslant V_a^{\max}\\ p_i^{\min}\leqslant p_i\leqslant p_i^{\max}\\ Q_{ij,t}=\chi_{ij}\,\mathrm{sgn}(p_{i,t}-p_{j,t})\sqrt{|\,p_{i,t}^2-p_{j,t}^2\,|}\\ \mathrm{sgn}(p_{i,t}-p_{j,t})=\begin{cases}1,p_{i,t}>p_{j,t}\\0,p_{i,t}=p_{j,t}\\-1,p_{i,t}<p_{j,t}\end{cases}\end{cases} \tag{33}$$

式中：$V_{a,t}$ 为 t 时段气源 a 的供气量；$V_a^{\min}$ 和 $V_a^{\max}$ 分别为气源 a 的供气量最小和最大值；P_i 为节点 i 压强；$P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为节点 i 的能承受气压的下上限；$Q_{ij,t}$ 为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的天然气流量；$X_{ij,t}$ 为天然气管道传输参数；$\mathrm{sgn}(P_{i,t}-P_{j,t})$ 为天然气传输方向参数。

3.3 模型求解

模型求解过程：

1)初始化风光预测出力、各类负荷、机组参数以及线路节点参数。

2)对电网、天然气网以及氢网进行初步运行，计算出 EHH-IES 中各网络的初始碳排放配额。

3)对 EHH-IES 中的能源转换装置进行调度，计算出 EHH-IES 系统网络中联络线功率以及天然气传输。

4)若满足电网以及天然气网线路约束则输出调度结果，若不成立则返回 3 重新进行调度计算。

5)输出调度结果进行分析。

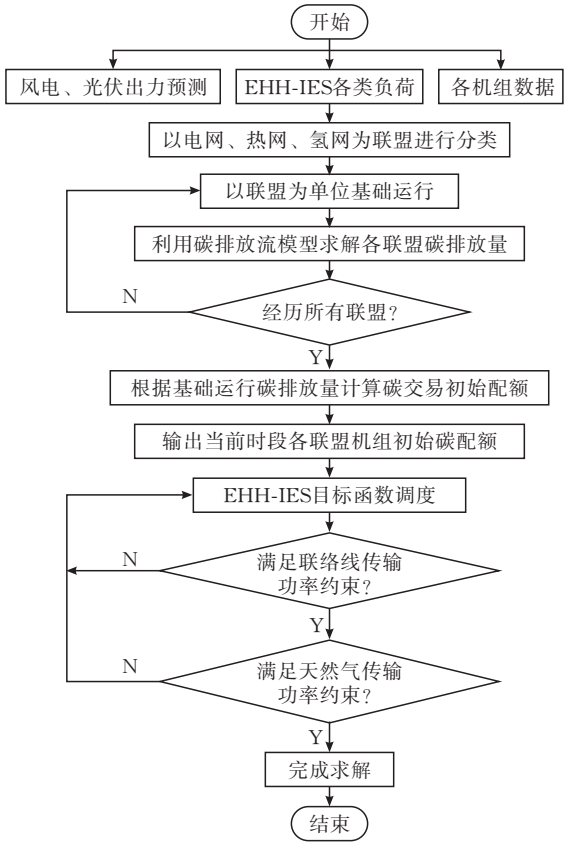


图 3 求解流程

上述流程图优化出综合能源系统的调度运行策略，综合能源调度运行策略是光伏出力 $P_{\mathrm{PV}}(t)$、风机出力 $P_{\mathrm{WT}}(t)$、燃气锅产热出力 $P_{\mathrm{GB}}(t)$、热泵供热出力 $P_{\mathrm{HP}}(t)$、蒸汽甲烷重整出力 $P_{\mathrm{SMR}}(t)$、电解槽制氢出力 $P_{\mathrm{WE}}(t)$。

基于碳排放流的电-热-氢综合能源系统优化调

度策略各机组出力

$$F_p(t)=f(P_{PV}(t),P_{WT}(t),P_{GB}(t),P_{HP}(t),P_{SMR}(t),P_{WE}(t)) \tag{34}$$

通过上述优化求解流程优化出各机组 $F_p(t)$,的出力,以确保目标函数 r_2 最优。

4　算例分析

4.1　基础数据

为检验所提调度方法的实用性,设置算例进行仿真验证。仿真参数参考文献[16-18]。EHH-IES 中的负荷以及风光出力预测结果见图 4,EHH-IES 中各设备安装容量以及运行参数见表 1,本文假设所有电网出力为火电机组,光伏与风力出力碳排放量为 0,碳交易参数见表 2,单位弃风弃光成本为 0.2 元/(kW·h)。阶梯碳价区间长度为 2 t,价格增长率为 25%,碳交易基础价为 250 元/t。本文采用 Yalmip 以及 CPLEX 联合求解,系统调度总周期为 24 h,1 h 为仿真步长,设置三种调度方案:

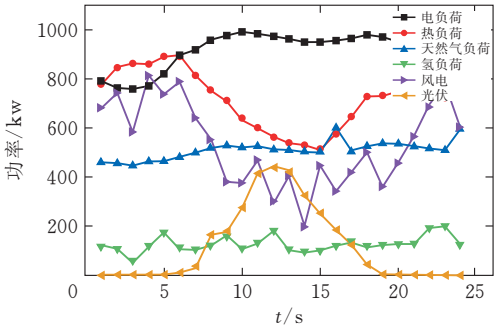


图 4　负荷预测

表 1　设备参数

	容量/kw	转换率/%	爬坡约束/%
热电联产	600	92	20
热泵	250	95	20
燃气锅炉	800	95	20
水电解槽	500	87	20
甲烷蒸汽重组	250	60	20

表 2　EHH-IE 碳交易参数

	碳排放强度 ($kgCO_2$/MW)	碳排放权配额 (kg/(kW·h))
电网	600	0.798
天然气网	200	0.385

方案一:考虑碳交易以及弃风弃光惩罚的 EHH-IES 低碳经济调度;

方案二:考虑碳交易、不考虑弃风弃光惩罚的 EHH-IES 低碳经济调度;

方案三:不考虑碳交易以及弃风弃光惩罚的 EHH-IES 经济调度。

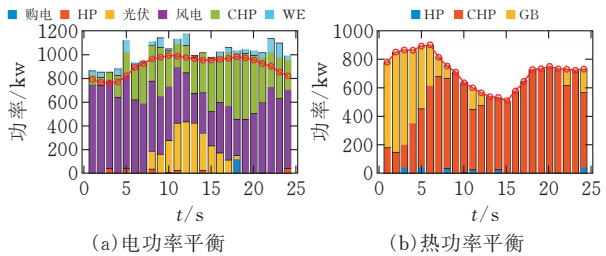
4.2　调度结果分析

4.2.1　成本分析　通过对方案一与方案二的比较,在同时考虑碳交易的前提下,方案一同时考虑弃风弃光,系统的总成本减少了 8.91%,碳排放量降低 10.58%,弃风弃光率减少 44.8%。可以得出,在方案一下,由于弃风弃光惩罚函数的加入,加大了 EHH-IES 对于风光出力的消纳,不仅大大减少对传统电网的依赖性也降低了碳排量,提高系统的低碳性。另一方面,方案一的弃风弃光惩罚提高了碳交易的激励作用,从而实现了减碳与经济运行的高效结合。对比方案二和方案三,方案二考虑了碳交易模式,系统总成本提高 27.40%,碳排放量降低了 48.51%,弃风弃光量减少 24.09%。可以看出方案三虽然运行总成本减少但是碳排量剧烈增加、对风光消纳能力大幅度降低。对比方案一与方案三,系统总成本提高 16.10%,碳排量减少 53.97%,弃风弃光量减少 68.89%。因此可知本文方法在小幅度提高系统总成本的情况下,极大减少了碳排放量和增强了风光消纳能力。

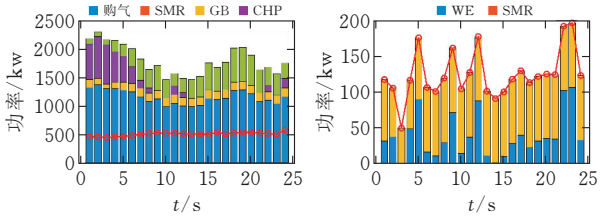
表 3　各方案下系统成本

	总成本/元	碳排量/kg	弃风弃光率/%
方案一	36265.569	3549.0924	12.31
方案二	39811.407	3969.0422	57.11
方案三	31235.252	7709.8731	81.20

4.2.2　调度方式分析　如图 5 所示,方案一中 EHH-IES 电网馈送电量很少,大部分出力来源于风机和热电联产机组,极大程度地减少了传统火电机组引起的碳排放量,同时热网中热功率也是由热电联产机组产生,减少了燃气锅炉的使用,进一步减少了碳排放。对比图 6,方案二风机出力、热电联产出力减少,随着购电量增多,增加火力机组出力导致碳排放量的增加。在不考虑碳交易以及风光消纳情况下,如图 7 所示,购电量急剧增加,减少了热电联产电功率出力,但是加大了热功率出力,氢网负荷大部分由水电槽电解维持氢功率平衡,相对于方案一与方案二,电负荷显著增加。综合图 6、图 7、图 8 可知:方案一中 EHH-IES 各网络功率平衡,各能量转换装置出力均匀,有利于 EHH-IES 整体稳定。

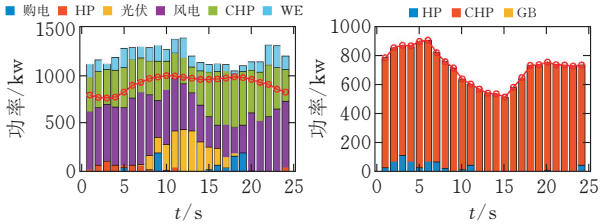


(a)电功率平衡　　(b)热功率平衡

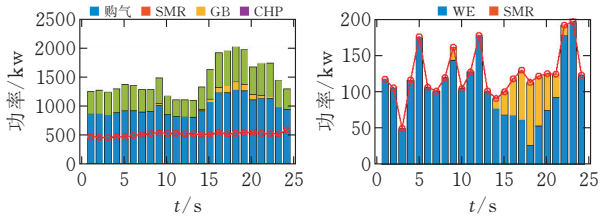


(c)气功率平衡 (d)氢功率平衡

图 5 方案 1 系统

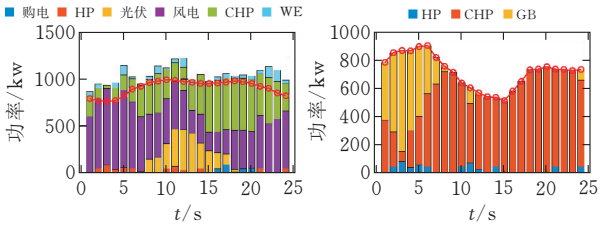


(a)电功率平衡 (b)热功率平衡

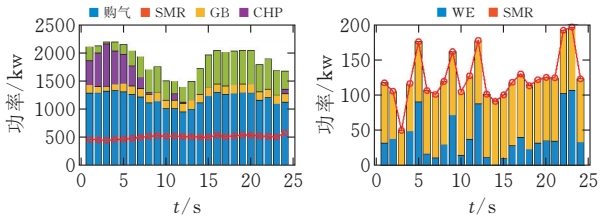


(c)气功率平衡 (d)氢功率平衡

图 6 方案 2 系统



(a)电功率平衡 (b)热功率平衡



(c)气功率平衡 (d)氢功率平衡

图 7 方案 3 系统

4.2.3 弃风弃光率分析 如图 8 所示,方案一零弃光,方案二在光伏出力高峰期为 11.65%,方案三在 11:00—13:00 弃光率为 4.8%和 17.36%;方案一弃风率为 12.31%,方案二总弃风率为 45.46%,方案三总弃风率为 59.57%。对比三个方案,方案一的弃风弃光率最小,且达到零弃光,大幅度减少了向电网购电成本以及碳排放量,实现系统低碳经济运行。

4.2.4 不同模型下的对比分析 对比三种不同模型下的分析结果,第一种是只考虑碳排放量指标的模型 1,第二种是只考虑经济运行成本的模型 2,第三种是本文提出的低碳经济调度模型 3,同时兼顾考虑碳排放量和经济运行成本。

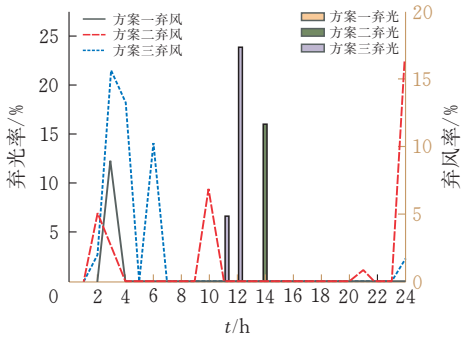


图 8 弃风弃光率

表 4 各模型下的对比结果分析

	总成本/元	碳排量/kg	弃风弃光率/%
模型 1	45112.23	3528.0033	23.22
模型 2	43331.45	4123.2234	26.51
模型 3	36265.569	3549.0924	12.31

根据表格 3 的数据可以得出结论:本文所提出的低碳经济调度模型在总成本方面有明显优势。相比模型 1,它可以减少 8846.661 元的成本;相比模型 2,它可以减少 7065.881 元的成本。尽管模型 3 的碳排放量稍高于模型 1,但是它的弃光率却比模型 1 和 2 都要低。因此,可以得出结论:本文提出的模型在降低系统成本、减少弃风弃光以及控制碳排放量方面具有优势。

5 总结

本文利用碳排放流模型计算 EHH-IES 中的碳排放量,合理分配各能量转换装置的初始碳配额,并考虑综合能源系统对风光消纳影响,在基于 EHH-IES 经济性与低碳性的前提下,提出考虑碳排放流和风光消纳的 EHH-IES 低碳经济调度模型。结合算例得到以下结论:

1)碳排放流计算模型可以有效计算综合能源系统中各能量网络以及各能量转换装置的碳排量,相比于传统碳计量方式,碳排放流模型可以更精确的计算碳责任以及初始碳配额。

2)考虑碳交易模型后,引入阶梯碳价机制加强 EHH-IES 中各能量网络中碳排放约束,更好的引导减少碳排放量。

3)在碳交易模型后加入风光消纳惩罚,进一步降低 EHH-IES 碳排放,降低系统运行成本,平衡综合能源系统中各能源转化装置的运行,达到经济低碳理想调度。

[参 考 文 献]

[1] 张运洲,代红才,吴潇雨,等.中国综合能源服务发展趋

势与关键问题[J].中国电力，2021，54(02)：1-10.
[2] KIM I，JAMES J A，CRITTENDEN J.The case study of combined cooling heat and power and photovoltaic systems for building customers using HOMER software[J]. Electric Power Systems Research，2017，143：490-502.
[3] 曾鸣，刘英新，周鹏程，等.综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J].电网技术，2018，42(06)：1697-1708.
[4] 崔杨，郭福音，仲悟之，等.多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度[J].电网技术，2022，46(08)：2964-2975.
[5] 施泉生，丁建勇，刘坤，等.含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J].电力自动化设备，2019，39(08)：269-276.
[6] MUNKSGARRD J，PEDERSEN K A.“CO2 accounts for open economies：Producer or consumer responsibility[J]. Energy Policy，2007，29(04)：327-334.
[7] 许汉平，李姚旺，苗世洪，等.考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(17)：18-25.
[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(09)：3094-3106.
[9] 陈俊先，贾燕冰，韩肖清，等.考虑需求侧碳交易机制的多微能网分布式协同优化调度[J].电网技术，2023，47(06)：2196-2206.
[10] CHENG Y，ZHANG N，WANG Y，et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Trans. Smart *Grid*，2019，10(04)：3562-3574.
[11] 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(03)：241-247.
[12] 孙子茹，艾芊，居来提·阿不力孜，等.考虑季节性氢储及期货式碳交易的综合能源系统年度规划研究[J].中国电力，2022，55(08)：2-13.
[13] 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(02)：412-418.
[14] 顾欣，王琦，胡云龙，等.基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J].电网技术，2022，46(04)：1464-1482.
[15] 侯昊宇，葛晓琳，曹旭丹.考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J].电力系统及其自动化学报，2023，35(03)：77-85.
[16] 张玉敏，孙鹏凯，吉兴全，等.考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J].电网技术，2023，47(08)：3174-3183，38-45.
[17] 张笑演，王橹裕，黄蕾，等.考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J].电力系统自动化，2023，47(09)：34-46.
[18] 詹博淳，冯昌森，王晓晖，等. 基于碳排放流模型的分布式产消者点对点电-碳交易机制[J]. 上海交通大学学报，2024，58(12)：1846-1856.

Optimal Dispatch Strategy of Electricity-heat-hydrogen Integrated Energy System Considering Carbon Emission Stream

HE Zhongwei[1]，XIANG Yong[1]，WANG Yu[2]，LUO Jie[2]，XIAO Jianbo[2]
(1 *State* Grid *Enshi Power Supply Company*，*Enshi* 445000，*China*；
2 *Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy*，*Hubei Univ. of Tech.*，*Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：In this paper，an integrated energy-electric-heat-hydrogen integrated energy system is proposed，which conducts collaborative analysis of electricity，heat and hydrogen energy，and introduces carbon emission flow theory to allocate carbon emissions. At the same time，a carbon trading mechanism with a tiered carbon price will be established to strengthen the energy conservation and emission reduction capacity of the integrated energy system. Finally，a low carbon economic dispatch model considering the comprehensive energy operating cost，carbon dioxide emission cost，wind and solar absorption penalty cost and energy loss are established. Through simulation verification，compared with the traditional scheme，the carbon emission is reduced by 53.97%，and the amount of curtailed wind and light is reduced by 68.89% when the total cost is increased by 16.10%. The model has the effect of improving the utilization rate of clean energy，reducing low carbon emissions，and realizing low carbon economic dispatch.

Keywords：carbon streams；integrated energy systems；tiered carbon price；low carbon economic dispatch；abandon the wind and abandon the light

[责任编校：赵　瞳]