DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 07. 011

考虑改进阶梯式碳交易机制与需求响应的综合 能源系统优化调度

Integrated energy system optimization scheduling considering improved stepped carbon trading mechanism and demand responses

葛磊蛟¹,于惟坤²,朱若源^{2*},王关涛²,白星振² GE Leijiao¹,YU Weikun²,ZHU Ruoyuan^{2*},WANG Guantao²,BAI Xingzhen²

(1.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072; 2.山东科技大学 电气与自动化 工程学院,山东 青岛 266590)

 (1.School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
 2.School of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

摘 要:综合能源系统是推动我国"双碳"目标实施,实现国家能源低碳转型的重要手段之一。为有效提升IES碳 减排能力和经济效益水平,提出一种考虑改进阶梯式碳交易机制与需求响应的IES优化调度模型。首先,在能量中 心框架下引入碳流模型,促进反应系统中二氧化碳的流动,并改进阶梯式碳交易机制,从而有力推动系统碳减排; 其次,引入用户侧的多能需求响应,以价格激励推进用户用能方式转变,促进可再生能源消纳;最后,考虑决策者偏 好,以改进碳交易机制为连接点,建立IES低碳经济优化调度模型,以碳排放指标和用户舒适度引导运行调度,并利 用CPLEX求解器对IES模型进行求解。进一步,通过5种场景对所提模型和方法进行仿真验证,结果证明了改进碳 交易机制、需求响应机制与优化调度模型的配合可有效提高IES的低碳性和经济性。

关键词:综合能源系统;"双碳"目标;改进阶梯式碳交易机制;碳流模型;需求响应;优化调度

中图分类号:TK 01*9:F7 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)07-0097-10

Abstract: The integrated energy system (IES) is an important approach to pursue the "dual carbon" target and achieve lowcarbon energy transformation of China. In order to facilitate the carbon emission reduction of the IES and improve its economic benefits, an IES optimization scheduling model considering improved stepped carbon trading mechanism and demand response mechanism is proposed. Firstly, a carbon flow model is introduced in the energy hub framework to reflect the flow of carbon dioxide in the system, and an improved stepped carbon trading mechanism is proposed to facilitate carbon reduction of the system. Then, the multi-energy demand response mechanism on user side is introduced to drive the transformation of energy usage pattern motivated by pricing mechanism, so as to promote the consumption of renewable energy. Considering decision maker preference, with the improved stepped carbon trading mechanism as the connection point, a low-carbon IES economic optimization scheduling model is established. The optimization scheduling is guided by the carbon emission index and user comfort, and CPLEX solver is used to solve the scheduling model. The proposed model and mechanisms are verified under five scenarios, whose results prove that the cooperation of the improved carbon trading mechanism, demand response mechanism and optimization scheduling model can effectively lower the carbon emissions and improve the economy of IESs.

Keywords: integrated energy system; dual carbon target; improved stepped carbon trading mechanism; carbon flow model; demand response; optimization scheduling

基金项目:国家自然科学基金项目(52277118);天津市自然 科学基金重点项目(22JCZDJC00660) National Natural Science Foundation of China (52277118); Natural Science Foundation of Tianjin(22JCZDJC00660)

0 引言

随着化石能源危机和环境污染的日益突出,全 球气候变暖和能源短缺等现象已成为日渐紧迫、亟 待解决的问题^[1]。面对生态形势和绿色能源需求的 困境,我国制定了战略目标,在2030年前实现碳排 放达峰和碳排放强度下降60%~65%。寻求一种更 低碳、更可持续的生活模式,建立一个更清洁的新 能源供应体系,实现低碳和清洁能源结构的转型已 成为一种趋势^[2-4]。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是一种多能源系统形态,充分利 用源-网-荷-储各环节能量资源的灵活性,以提高 可再生能源比例为目标,主动或被动地降低碳排放 量^[5-7]。利用电、热、气等多种能源类型的互补特性, 基于能量梯级利用原则对多能系统进行统一规划 和协调优化运行,以有效提高能源利用率^[8-10]。

为了应对能源和环境的双重压力,将碳交易机 制引入能源行业,特别是电力行业,可以有效减少 二氧化碳排放,促进能源的可持续发展,对保护生 态环境和推进经济发展具有重要的意义。文献 [11]将碳交易机制引入含风电的系统调度模型,全 面考虑了电力系统的经济效益与环境效益。文献 [12-13]将碳交易机制应用于电力系统电源规划模 型,缓解了低碳能源发电经济性与低碳性之间的矛 盾。文献[14]提出了系统碳减排目标的概念并构 建了阶梯形碳排放权价格,进一步限制了电力系统 的碳排放。文献[15]提出了一种以碳排放强度和 区域碳排放量为指标的碳排放权分配方案,实现了 碳资源的优化配置。上述文献将碳交易机制引入 IES,但并未考虑阶梯式碳交易成本为分段函数、交 易周期固定、结算成本偏高的缺点,并且鲜有研究 关注对碳交易成本的处理。

IES中含有多种灵活负荷资源,需求响应通过 能源价格调整与激励补偿等手段,引导用户主动改 变用能行为,实现能源供应方与需求方之间的匹配 优化,从而协助 IES 进行可再生能源消纳和碳减排, 同时提升系统运行的经济性[16-18]。文献[19]将电价 型需求响应引入IES优化调度,综合了系统经济性 与低碳性。文献[20]提出了一种供需灵活双响应 机制,进一步优化了系统运行。文献[21]根据2种 不同时间尺度,提出了一种考虑负荷侧需求响应和 含电制热设备用户群的IES氢储能双层优化配置模 型,降低了购能成本,提高了用电灵活性。文献 [22]将一种多能、多型需求响应用于孤立IES模型, 用于孤立IES内资源的联动开发。以上文献对多元 柔性需求响应负荷的潜力进行了挖掘,提升了系统 运行的灵活性,但鲜有关注需求响应负荷在时间和 空间维度上对用户用能带来的影响。

本文针对上述问题,提出一种改进阶梯式碳交 易机制下考虑用户侧需求响应的综合能源低碳经 济调度模型,通过设置多个运行场景对比验证本文 所提模型及方法的有效性。

1 IES框架

IES内部耦合了多种灵活可调资源,通过调度 使用户用能需求得到满足的同时,结合碳交易的引 导,促进自身低碳经济运行。文中所建立的IES结 构如图1所示,其中:能源供给侧包括外部电网、天 然气网和风电机组;能量转换设备包括热电联产 (Combined Heat and Power, CHP)、燃气锅炉(Gas Boiler,GB)、电转气(Power to Gas,P2G)设备及余热 锅炉(Waste Heat Boiler,WHB);储能设备包括储电、 储热及储气;用户侧包含电负荷、气负荷及热负荷。 目前,国内外学者对能量转换设备的具体建模已有 较多研究^[23-25],本文不再赘述。此外,本文在IES框 架中加入了相当于电、气、热能流的二氧化碳流动, 简称碳流。碳流能清晰地反映IES中二氧化碳的产 生及流动,指引IES限制碳排放行为。



2 改进阶梯式碳交易机制

碳交易机制是IES实现低碳目标的关键支撑。 为了进一步限制IES碳排放,本文引入改进阶梯式 碳交易机制,由碳排放权配额、实际碳排放和碳交 易机制3部分构成。

2.1 碳排放权配额模型

本文IES中碳排放源有CHP机组、GB、气负荷 及燃煤机组。碳排放权配额模型为

$$\begin{cases} E_{\text{IES}}^{*} = E_{\text{CHP}}^{*} + E_{\text{GB}}^{*} + E_{\text{huy, e}}^{*} + E_{\text{g, load}}^{*} \\ E_{\text{CHP}}^{*} = \lambda_{\text{h}}^{*} \sum_{t=1}^{T} \left(\lambda_{\text{e, h}} P_{\text{CHP, e}}(t) + P_{\text{CHP, h}}(t) \right) \\ E_{\text{GB}}^{*} = \lambda_{\text{h}}^{*} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{GB, h}}(t) \\ E_{\text{buy, e}}^{*} = \lambda_{\text{e}}^{*} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{buy, e}}(t) \\ E_{\text{g, load}}^{*} = \lambda_{\text{g}}^{*} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{g, load}}(t) \end{cases}$$
(1)

式中: E_{IES}^* 为 IES 的总碳排放配额; E_{CHP}^* , E_{GB}^* , $E_{\text{buy,e}}^*$, $E_{g,\text{load}}^*$ 分别为 CHP 机组、GB、外部购电、气负荷的碳 排放配额; λ_h^* , λ_e^* , λ_g^* 分别为燃气机组生产单位热功 率、燃煤机组生产单位电功率和消耗单位气负荷获 得的碳排放配额; $P_{\text{CHP,e}}(t)$, $P_{\text{CHP,h}}(t)$ 分别为t时段 CHP 机组的产电量及余热量; $P_{\text{GB,h}}(t)$ 为t时段 GB 产 热量; $P_{\text{buy,e}}(t)$ 为t时段外部购电量; $P_{g,\text{load}}(t)$ 为t时段 气负荷; $\lambda_{e,h}$ 为 CHP 机组的电热折算系数;T为调度 周期。

2.2 实际碳排放模型

本文设定外部电网购电全部由燃煤机组生产。 考虑到用户侧气负荷的使用多是以燃烧的形式消 耗,也会产生碳排放,本文将气负荷加入实际碳排 放模型;同时,P2G设备运行时会吸收部分二氧化 碳。实际碳排放模型为

$$\begin{cases} E_{\text{IES}} = E_{\text{CHP}} + E_{\text{GB}} + E_{\text{buy,e}} + E_{\text{g,load}} - E_{\text{P2G}} \\ E_{\text{CHP}} = \lambda_{\text{h}} \sum_{t=1}^{T} \left(\lambda_{\text{e,h}} P_{\text{CHP,e}}(t) + P_{\text{CHP,h}}(t) \right) \\ E_{\text{GB}} = \lambda_{\text{h}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{GB,h}}(t) \\ E_{\text{buy,e}} = \lambda_{\text{e}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{buy,e}}(t) , \quad (2) \\ E_{\text{g,load}} = \lambda_{\text{g}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{g,load}}(t) \\ E_{\text{P2G}} = \lambda_{\text{P2C}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{P2G,g}}(t) \end{cases}$$

式中: E_{IES} 为IES实际碳排放量; E_{CHP} , E_{GB} , $E_{\text{buy},e}$, $E_{g,\text{load}}$ 分别为CHP机组、GB、外部购电、气负荷的实际碳排 放量; E_{P2G} 为P2G设备消耗的实际碳排放量; λ_h , λ_e , λ_g 分别为燃气机组生产单位热功率、燃煤机组生产 单位电功率和消耗单位气负荷获得的实际碳排放 量; λ_{P2G} 为P2G设备实际消耗的单位碳排放量。

2.3 改进阶梯式碳交易模型

在一个碳交易结算周期内,IES参与碳交易市 场的交易额是由IES的实际碳排放量与碳排放权配 额的差值决定的,即

$$E_{\rm CO_2} = E_{\rm IES} - E_{\rm IES}^*,$$
 (3)

式中:E_{co2}为碳交易额度。

传统阶梯式碳交易机制通过在不同的碳交易 额区间设置阶梯式碳价来限制系统碳排放,每当碳 交易额提升一个区间,相应区间的碳交易基价就会 提升,达到限制碳排放的目的。本文参考文献 [26],在传统阶梯式碳价的基础上,在每个碳交易 额区间内进一步优化处理,引入一种改进碳交易机 制,公式如下

$$C_{\rm CO_2} = \begin{cases} xE_{\rm CO_2} & 0 \le E_{\rm CO_2} < d\\ (1+\alpha)xE_{\rm CO_2} & d \le E_{\rm CO_2} < 2d, \\ (1+2\alpha)xE_{\rm CO_2} & 2d \le E_{\rm CO_2} < 3d \end{cases}$$
(4)

式中: C_{co_a} 为系统碳交易成本;d为碳交易额区间; α 为碳价增长率;x为碳交易基价。

式(4)表示碳交易成本是斜率依次增长的三段 式线性函数。

当系统碳排放量大于系统配额且碳交易额度 小于标准碳排放区间,即0 < E_{co_2} < d时,传统阶梯 式碳交易机制采用标准碳基价进行碳交易,本文的 改进碳交易基价并不会在每个碳排放区间固定,而 是随着碳交易额的增长呈线性增加;当 E_{co_2} > d时, 碳交易成本逐渐增长,以达到限制碳排放的目的。 传统阶梯式碳交易机制与改进阶梯式碳交易机制 对比如图2所示。



我国现有碳交易市场施行的碳交易机制中,碳 交易价格每日变动,下一日的碳交易基价以前一日 的市场交易量为参考,频繁变动的碳交易价格使得 传统阶梯式碳交易机制在固定的碳配额区间失去 灵活性,碳交易额在固定区间内的变动造成了碳交 易成本的增加,难以带来经济效益。随着我国碳交 易市场的逐步发展,为了应对每日碳交易价格变 动,改进阶梯式碳交易机制会使碳交易更加精准、 合理,带来更大的经济效益。

3 二维多能需求响应模型

本文需求响应机制包含时间维度的横向需求

响应和空间维度的纵向需求响应。电、热、气、冷负 荷均参与二维需求响应,均可分为固定负荷、横向 负荷及纵向负荷^[27]。

$$\begin{bmatrix} P_{\text{e, load}}(t) \\ P_{\text{h, load}}(t) \\ P_{\text{g, load}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{e, load}}^{\text{F}}(t) \\ P_{\text{h, load}}(t) \\ P_{\text{g, load}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\text{e, load}}^{\text{H}}(t) \\ P_{\text{h, load}}^{\text{H}}(t) \\ P_{\text{g, load}}^{\text{H}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\text{e, load}}^{\text{V}}(t) \\ P_{\text{h, load}}^{\text{V}}(t) \\ P_{\text{g, load}}^{\text{V}}(t) \end{bmatrix}, (5)$$

式中: $P_{e, load}(t)$, $P_{h, load}(t)$, $P_{g, load}(t)$ 分别为t时段用户所 需的电负荷、热负荷与气负荷; $P_{e, load}^{F}(t)$, $P_{h, load}^{F}(t)$, $P_{g, load}^{F}(t)$ 分别为3类固定负荷; $P_{e, load}^{H}(t)$, $P_{h, load}^{H}(t)$, $P_{g, load}^{H}(t)$ 为横向需求响应负荷; $P_{e, load}^{V}(t)$, $P_{h, load}^{V}(t)$, $P_{g, load}^{V}(t)$ 为纵向需求响应负荷。

其中固定负荷不参与需求响应,下文不予 赘述。

3.1 横向需求响应

时间维度上的横向需求响应是指同种类负荷 依据价格激励,转换使用时间,从而达到转移负荷、 节约成本的目的。例如洗衣机、电动车充电等灵活 的电负荷需求,可以在电价较低的时段使用。横向 需求响应建模如下

$$\begin{cases} P_{n,\text{load}}^{\text{H}}(t) = B_{n}^{\text{H},\text{in}}(t) P_{n,\text{load}}^{\text{H},\text{in}}(t) - B_{n}^{\text{H},\text{out}}(t) P_{n,\text{load}}^{\text{H},\text{out}}(t) \\ B_{n}^{\text{H},\text{in}}(t) + B_{n}^{\text{H},\text{out}}(t) = 1 , (6) \\ P_{n,\text{min}}^{\text{H}} \leqslant P_{n,\text{load}}^{\text{H}}(t) \leqslant P_{n,\text{max}}^{\text{H}} \end{cases}$$

式中:n代表3种不同类型负荷, $B_n^{H,in}(t)$, $B_n^{H,out}(t)$ 分别为t时段横向需求响应负荷的转入、转出状态,为 0~1的变量; $P_{n,load}^{H,in}(t)$, $P_{n,load}^{H,out}(t)$ 分别为t时段各类型横向需求响应负荷的转入、转出量; $P_{n,max}^{H}$, $P_{n,min}^{H}$ 分别为用户参与横向需求响应的上、下限。

3.2 纵向需求响应

空间维度上的纵向需求响应是指用户使用不同种类的负荷代替完成负荷需求,例如在电力负荷 高峰期,电价高于气价时,用户更多地使用燃气灶 代替电饭煲来满足炊事需求,使用吸收式制冷机而 非电制冷机保证制冷需求等。纵向需求响应建模 如下

$$\begin{cases} P_{n, \text{load}}^{V}(t) = B_{n}^{V, \text{in}}(t) P_{n, \text{load}}^{V, \text{in}}(t) - B_{n}^{V, \text{out}}(t) P_{n, \text{load}}^{V, \text{out}}(t) \\ B_{n}^{V, \text{in}}(t) + B_{n}^{V, \text{out}}(t) = 1 \\ P_{n, \text{min}}^{V} \leqslant P_{n, \text{load}}^{V}(t) \leqslant P_{n, \text{max}}^{V} , (7) \\ P_{e, \text{load}}^{V}(t) + P_{g, \text{load}}^{V}(t) + P_{h, \text{load}}^{V}(t) = 0 \end{cases}$$

式中: $B_n^{V,in}(t)$, $B_n^{V,out}(t)$ 分别为t时段纵向需求响应负荷的转入、转出状态,为0~1变量; $P_{n,load}^{V,in}(t)$, $P_{n,load}^{V,out}(t)$ 分别为t时段各类型纵向需求响应负荷的转入、转出量; $P_{n,max}^{V}$, $P_{n,min}^{V}$ 分别为用户参与纵向需求响应的上、下限。

3.3 用户舒适度指标

需求响应机制的运行伴随着用户用能习惯的 改变,必然会对用户的生产生活造成影响,对此,以 用户舒适度来评价用户对需求响应的满意程度。 用户舒适度指标为^[28]

$$c_n = \frac{\sum \left| t_n^{\text{start}} - t_n^{\text{end}} \right|}{t_n^{\text{L}}},\tag{8}$$

式中: c_n 为各负荷的用户舒适度; t_n^{start} , t_n^{end} 分别为横向 需求响应负荷依据价格激励的最佳启、停时间; t_n^{L} 为 横向需求响应负荷的运行时间。

4 IES低碳经济调度模型

为应对碳交易市场每日碳交易价格的频繁变 化,本文以改进阶梯式碳交易机制为连接点,以碳 排放指标和用户舒适度引导运行调度,根据碳交易 市场的走势及碳排放需求安排不同的调度策略,以 获得经济效益和碳排放的最优解。

4.1 考虑碳排放指标和用户舒适度的低碳经济优 化调度

4.1.1 目标函数

考虑系统对风电的消纳,以供需两侧成本、系 统碳排放量最低为目标函数,基于改进阶梯式碳交 易机制,设定每日碳排放指标,考虑用户侧需求响 应舒适度参数,建立调度模型,得到本日调度的最 优决策,以满足供需两侧的经济效益及低碳目标。

由于本文优化调度的目标为系统的低碳性与 经济性,为反映决策者的偏好,有必要设置经济性 与低碳性的权重以便决策者做出最优选择。首先, 设定关于成本最低及碳排放量最低的单目标优化 调度,得到2个经济性、低碳性的最优值;其次,设定 经济与低碳权重,进行多目标优化。权重设置如下

$$\begin{cases} w_1 + w_2 = 1 \\ w_1 = \frac{C_1 - C_1^*}{C_1^*}, \\ w_2 = \frac{C_2 - C_2^*}{C_2^*} \end{cases}$$
(9)

式中: w_1 与 w_2 分别为低碳性与经济性权重; C_1 为系 统低碳成本; C_2 为经济成本; C_1^* 与 C_2^* 分别为单目标 优化的低碳、经济最优值。

目标函数为

$$\begin{cases} C = w_1 C_1 + w_2 C_2 \\ C_1 = \min(C_{cur} + C_{CO_2}) \\ C_2 = \min(C_{buy} + C_{op} + C_{dr}) \end{cases}$$
 (10)

式中:C为系统综合成本; C_{eur} 为弃风成本; C_{huy} 为系统购能成本; C_{on} 为系统运行成本; C_{dr} 为需求响应补

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

偿成本。

$$C_{\rm cur} = C_{\rm cur}^{\rm u} \sum_{t=1}^{T} P_{\rm wt, \, cur}(t), \qquad (11)$$

式中: $P_{wt,eur}(t)$ 为t时段IES的弃风功率; C_{eur}^u 为单位 弃风惩罚成本。

$$C_{\rm buy} = \sum_{t=1}^{T} (p_{\rm e} P_{\rm buy,e}(t) + p_{\rm g} P_{\rm buy,g}(t)), \qquad (12)$$

式中: $P_{\text{buy,g}}(t)$ 为系统t时段购气量; p_e, p_g 分别为系统购电、购气价格。

$$C_{\rm op} = \sum_{i=1}^{n} C_{\rm ce}^{\rm u} P_{i,\,\rm out}(t) + \sum_{i=1}^{4} C_{\rm es}^{\rm u} S_i(t), \qquad (13)$$

式中: $P_{i,out}(t), S_i(t)$ 分别为第i种耦合设备、储能设备 在t时段的输出功率及容量; C_{ee}^u, C_{es}^u 分别为耦合设备 和储能设备的单位运行成本。

$$C_{\rm dr} = \sum_{n=1}^{3} \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\rm H}^{\rm u} P_{\rm n, \, load}^{\rm H}(t) + C_{\rm V}^{\rm u} P_{\rm n, \, load}^{\rm V}(t) \right), \quad (14)$$

式中:*C*^w_H,*C*^w分别为横向、纵向需求响应负荷的单位补偿成本。

4.1.2 约束条件

(1) 外部购能约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{buy,e}}(t) \leq P_{\text{buy,e}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{buy,g}}(t) \leq P_{\text{buy,g}}^{\text{max}}, \end{cases}$$
(15)

式中: $P_{\text{buy,e}}^{\text{max}}$, $P_{\text{buy,g}}^{\text{max}}$ 分别为单位时段外部购电、购气量的上限。

(2) 耦合设备运行约束(耦合设备包括 CHP, P2G, WHB, GB)。

$$\begin{cases} P_{i, \text{out}}(t) = \eta_i P_{i, \text{in}}(t) \\ P_{i, \text{in}}^{\min} \leqslant P_{i, \text{in}}(t) \leqslant P_{i, \text{in}}^{\max} \\ \Delta P_{i, \text{in}}^{\min} \leqslant P_{i, \text{in}}(t) - P_{i, \text{in}}(t-1) \leqslant \Delta P_{i, \text{in}}^{\max} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $P_{i,in}(t)$ 为第i种耦合设备t时段的输入功率, η_i 为第i种耦合设备的能量转换效率; $P_{i,in}^{max}$, $P_{i,in}^{min}$ 分别为耦合设备的容量上、下限; $\Delta P_{i,in}^{max}$, $\Delta P_{i,in}^{min}$ 分别为耦合设备的容量上、下限; $\Delta P_{i,in}^{max}$, $\Delta P_{i,in}^{min}$ 分别为耦合设备的爬坡上、下限。

(3) 储能设备约束。

$$\begin{cases} S_m(t) = (1 - \varepsilon) S_m(t - 1) + \\ \eta_{m, in} P_{m, in}(t) - \frac{P_{m, out}(t)}{\eta_{m, out}} \\ S_m^{\min} \le S_m(t) \le S_m^{\max} \\ 0 \le P_{m, in}(t) \le B_m^{in}(t) P_{m, in}^{\max} \\ 0 \le P_{m, out}(t) \le B_m^{out}(t) P_{m, out}^{\max} \\ 0 \le B_m^{in}(t) + B_m^{out}(t) \le 1 \\ S_m(1) = S_m(T) \end{cases}$$
(17)

式中:m表示3种能量类型; $S_m(t)$ 为t时刻储能设备的容量; ε 为储能设备自损率; $P_{m,in}(t)$, $P_{m,out}(t)$ 分别为储能设备在t时段的储能和放能功率; $\eta_{m,in}$, $\eta_{m,out}$

分别为第n种储能设备的储、放能效率; S_m^{max}, S_m^{min} 分别为储能设备容量的上、下限; $B_m^{in}(t), B_m^{out}(t)$ 分别为储能设备在t时段的储、放能状态,均为0~1变量; $P_{m,in}^{max}, P_{m,out}^{max}$ 分别为储能设备的储、放能最大功率。

(4) 功率平衡约束。

电功率平衡约束

 $P_{\rm buy,e}(t) + P_{\rm wt}(t) + P_{\rm CHP,e}(t) + P_{\rm e,out}(t) =$

 $P_{\text{load, e}}(t) + P_{\text{P2G, e}}(t) + P_{e, \text{in}}(t),$ (18) 式中: $P_{\text{wt}}(t)$ 为t时段风电并网功率; $P_{e, \text{out}}(t)$ 为t时段 放电功率; $P_{\text{load, e}}(t)$ 为t时段用户预测电负荷; $P_{\text{P2G, e}}(t)$ 为t时段P2G设备消耗电功率; $P_{e, \text{in}}(t)$ 为t时段储电功率。

风电出力约束

$$0 \leq P_{\rm wt}(t) \leq P_{\rm wt}^{\rm max}, \tag{19}$$

式中:P_{wt}为风电出力上限。

热功率平衡约束

$$P_{\rm GB,h}(t) + P_{\rm WHB,h}(t) + P_{\rm h,out}(t) = P_{\rm load,h}(t) + P_{\rm h,in}(t),$$
(20)

式中: $P_{GB,h}(t)$, $P_{WHB,h}(t)$ 分别为t时段GB,WHB产生的热功率; $P_{h,out}(t)$ 为t时段放热功率; $P_{load,h}(t)$ 为t时段用户预测热负荷。

气功率平衡约束

$$P_{\text{buy, g}}(t) + P_{\text{P2G, g}}(t) + P_{\text{g, out}}(t) = P_{\text{load, g}}(t) + P_{\text{GHP, g}}(t) + P_{\text{GB, g}}(t) + P_{\text{g, in}}(t), \quad (21)$$

式中: $P_{P2G,g}(t)$ 为t时段 P2G设备的产气功率; $P_{g,out}(t)$ 为t时段的放气功率; $P_{load,g}(t)$ 为t时段用户预测气负荷; $P_{GB,g}(t)$ 为t时段 GB 消耗的功率; $P_{g,in}(t)$ 为t时段储气功率。

(5)需求响应约束见式(5)-(7)。

(6)用户舒适度约束。

$$c_n \ge c_n^{\min},$$
 (22)

式中: c_n^m为用户舒适度的下限,取值0.8。

4.1.3 调度结果处理

系统依据年碳排放量制定每日碳交易标准,如 调度后的碳排放量超过每日碳交易标准,则系统需 要修正碳交易模型中的碳交易基价参数,使系统碳 排放量重新达到标准。当系统碳排放量满足每日 碳排放标准时,形成最优决策,引导调度。调度后 的机组初始状态、储能设备的荷电状态可作为下一 日运行调度的参考。

4.2 求解流程

优化调度流程如图3所示。

5 算例分析

IES以24h为1个调度周期,1h为调度时段。



图 5 化化 则反加性 Fig. 3 Optimized scheduling process

系统内部的风电出力以及电、热、气负荷预测参考 文献[15],如图4所示;分时电价与气价见表1,IES 中各设备参数见表2,IES中储能参数见表3,实际碳 排放参数见表4;燃煤机组的碳排放权配额系数为 0.728 kg/(kW·h),天然气机组的碳排放权配额系数 为0.367 kg/(kW·h),消耗单位气负荷的碳排放权 配额系数为0.180 kg/(kW·h),单位碳排放量区间 长度为2000kg,价格增长率为25%,碳交易基价为 0.25 元/kg;每日碳交易量限值为4000 kg,超出限 值后对碳交易参数的修正为碳交易价格增长率增 加25%、碳交易基价增加0.25元/kg,先后交替循环 进行;单位弃风功率惩罚成本为0.35元/(kW·h); 电、热、气负荷的横向、纵向负荷占比均分别为总负 荷的2%,3%;单位横向、纵向需求响应负荷补偿成 本分别为0.40,0.20元/(kW·h)。设定决策者偏好 为低碳性权重0.6,经济性权重0.4。





为了验证本文模型的有效性,设置以下5种场 景进行对比分析。

场景1:目标函数考虑阶梯式碳交易成本与碳

表1 分时电价、大然气价格

Table 1 Time-of-use electricity price and natural gas price

项目	时段	数值
	00:00-7:00,22:00-24:00	0.48
电价/[元・(kW・h) ⁻¹]	07:00-11:00,04:00-18:00	0.88
	11:00-14:00,18:00-22:00	1.10
气价/(元·m ⁻³)	00:00-24:00	0.35

表2 设备参数

Table 2 Equipment parameters

设备	容量/kW	能量转化效率/%	爬坡约束/%	
CUD机组	35(气转电)		20	
い日子初に組	1 400	45(气转热)	20	
GB	600	82	20	
P2G设备	500	60	20	
WHB	630	80	20	

表3 储能参数

Table 3 Energy storage parameters

设备	容量/ 上W	容量上/下限	爬坡约	自损 率/%	储、放能
储电	450	90/10	20	0.1	95
储热	500	90/10	20	1.0	95
储气	300	90/10	20	1.0	95

表4 碳排放参数 Table 4 Carbon emission parameters

碳排放参数	数值
单位电量 CO_2 排放量/[t·(MW·h) ⁻¹]	1.080
单位热量 CO_2 排放量/(t·GJ ⁻¹)	0.065
单位气负荷 CO ₂ 排放量/[t·(MW·h) ⁻¹]	0.200
电-热折算系数/[MJ·(kW·h)⁻1]	6

排放指标约束,不考虑需求响应。

场景2:在场景1基础上,目标函数考虑改进阶 梯式碳交易成本。

场景3:在场景2基础上,仅考虑横向需求响应。

场景4:在场景3基础上,考虑纵向需求响应。

场景5:在场景4基础上,不考虑碳排放指标 约束。

上述场景的调度结果见表5。

5.1 改进阶梯式碳交易机制分析

通过场景1,2分析不同碳交易机制产生的调度 成本与碳排放量的区别。在成本方面,考虑改进阶 梯式碳价的场景2总成本较低,比场景1少649.6 元;在碳排放方面,综合调度后对碳交易参数进行 修正,场景2的碳交易成本比场景1少465.3元,而 碳排放量比场景1增加了213.1kg。

为应对快速变化的碳交易市场,本文在算例分 析中设置了对碳交易量的约束,以模拟每日碳交易

第7期

表5 5种场景调度结果						
	Tabl	e 5 Scheduling result	s under five scenarios			
项目	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5	
购能成本/元	18 077.1	17 892.8	17 481.2	17 265.2	16 614.9	
弃风成本/元	334.5	334.5	55.8	0	128.1	
需求响应补偿成本/元	0	0	641.3	768.5	819.0	
碳交易成本/元	2 875.3	2 410.0	2 459.9	2 334.4	1 600.4	
碳交易基价/增长率修正	0.50/0.25	0.50/0.50	0.50/0.50	0.50/0.50		
碳交易量/kg	3 667.0	3 880.1	3 946.5	3 779.2	4 700.9	
总成本/元	29 931.7	29 282.1	28 463.9	28 665.8	27 617.5	

额的变化。当碳交易量不断变化时,改进碳交易机 制下的碳交易价格波动比传统阶梯式碳交易机制 更小。由于场景2优化了碳交易成本的计算方式, 导致碳排放成本降低,使得系统中高碳排放、高经 济性机组出力增加,与之对应的购能成本比场景1 减少了184.3元。综上所述,相比传统阶梯式碳交 易机制,改进碳交易机制对碳交易市场的适应更加 出色。

5.2 需求响应分析

为验证横向需求响应对系统的影响,对场景2、 场景3的调度结果进行对比,如图5所示。22:00— 07:00电价处于谷时阶段,横向需求响应电负荷增 加;午间和晚间用电高峰期,电价处于峰时阶段,横 向需求响应电负荷减少。由此可见,横向需求响应 电负荷从电价高峰期转入电价低谷期,有效增强了 系统经济性。同样可以看出,横向需求响应热负荷 由夜间转移到午间,有利于对风电的消纳。场景3 购能成本比场景2降低了411.6元,弃风成本比场 景2降低了278.7元。综上所述,横向需求响应负 荷起到了削峰填谷、减缓用能压力的作用。



为验证纵向需求响应对系统的影响,对场景3、 场景4的调度结果进行对比,如图6所示。夜间电

价谷时阶段,荷侧受价格激励影响,纵向需求响应 热负荷减少,电负荷增加;午间与夜间电价峰时阶 段,同样受价格激励影响,电负荷减少,热负荷增 加。经济方面,场景4总成本相比场景3减少了 270.1元;碳排放方面,经碳排放修正后,场景4的 碳排放量比场景3减少了167.3kg;新能源消纳方 面,场景4完全消纳了风电,未发生弃风现象。由此 可见,横向需求响应与纵向需求响应的配合进一步 降低了系统成本,减少了碳排放。

综上所述,二维需求响应负荷的加入使系统负 荷曲线更加平缓,起到了消纳可再生能源、削峰填 谷的作用,增强了系统的低碳性与经济性。





5.3 碳排放指标分析

将场景4与场景5进行对比,分析设置碳排放 指标对系统的影响。无碳排放指标制约的场景5的 总成本比场景4低1693元(3.6%),碳排放量比场 景4多921.7kg(24.3%)。由此可以看出,未经调度 修正碳排放参数时,高碳排放机组的出力不受碳排 放限制,从而导致碳排放量大幅增加;经调度修正 后,场景4的系统碳排放量得到有效限制,同时对高 碳排放机组出力的限制促进了风电消纳。综上所 述,本文优化调度方法在不失经济性的同时确保了 系统低碳运行。

5.4 决策者偏好分析

不同的决策者偏好调度结果见表 6。由表 6 可 以看出:当从 $w_1 = 0.1, w_2 = 0.9$ 调整到 $w_1 =$ 0.3, $w_2 = 0.7$,经济成本缓慢上升,低碳成本显著降 低,这是由于低碳成本在总成本中的占比较低,低 碳性的权重过低导致加权后的低碳成本增加并不 明显;从 $w_1 = 0.6, w_2 = 0.4$ 调整到 $w_1 = 0.9, w_2 =$ 0.1,由于低碳性的权重逐渐上升,低碳成本的降低 趋势减缓,而经济成本在改变决策者偏好权重的整 个过程中增幅并不明显。综上所述,IES决策者应 灵活权衡系统经济性与低碳性,以做出合理决策。

	表6	决策者偏好调度结果
Table 6	Schedul	ling results based on decision maker

	8	
	preference	元
<i>w</i> ₁ , <i>w</i> ₂	低碳成本	经济成本
0.1,0.9	4 144.8	66 253.8
0.3,0.7	3 132.1	66 304.2
0.6,0.4	2 334.4	66 983.4
0.7,0.3	2 300.1	67 559.2
0.9,0.1	1 934.7	71 239.1

6 结论

为尽快推进"双碳"目标,实现低碳转型,本文 提出了一种考虑改进阶梯式碳交易机制与需求响 应的IES优化调度模型。通过算例分析可得出以下 结论。

(1)改进阶梯式碳交易机制的引入优化了碳交易计算方式,增强了系统的经济性。

(2)用户侧受价格激励参与二维需求响应,使 系统灵活运行,在提升系统经济性的同时,进一步 促进可再生能源消纳,起到削峰填谷的作用。

(3)考虑决策者偏好与用户舒适度的优化调度 模型与改进碳交易机制、二维需求响应的配合兼顾 了系统低碳性与经济性,IES决策者可根据调度结 果做出合理决策。

本文暂未考虑可再生能源的不确定性因素,也 未考虑系统中耦合设备的非线性建模,将在今后的 研究中重点分析。

参考文献:

[1]黎静华,朱梦姝,陆悦江,等.综合能源系统优化调度综述[J].电网技术,2021,45(6):2256-2272.

LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems [J]. Power

System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.

- [2]HONG B W, ZHANG W T, ZHOU Y, et al. Energy-Internet-oriented microgrid energy management system architecture and its application in China [J]. Applied Energy, 2018, 228: 2153-2164.
- [3]骆钊, 卢涛, 马瑞, 等. 可再生能源配额制下多园区综合 能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 8-14.

LUO Zhao, LU Tao, MA Rui, et al. Optimal scheduling of multipark integrated energy system under renewable portfolio standard [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 8-14.

- [4]MA W X, DENG W, PEI W, et al. Operation optimization of electric power-hot water-steam integrated energy system[J]. Energy Reports, 2022, 8: 475-482.
- [5]曾慧,杜源,李涛,等.考虑碳交易与绿证交易的电-热
 耦合园区低碳规划[J].综合智慧能源,2023,45(2):
 22-29.

ZENG Hui, DU Yuan, LI Tao, et al. Low-carbon planning of a park-level integrated electric and heating system considering carbon trading and green certificate trading[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2):22–29.

[6]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 dual carbon targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (8) : 189-207.

[7]尹硕,郭兴五,燕景,等.考虑高渗透率和碳排放约束的
 园区综合能源系统优化运行研究[J].华电技术,2021,43(4):1-7.

YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 1–7.

[8]朱海东,郝浩,郑剑,等.基于冷热电多能互补的园区综合能源系统设计[J].华电技术,2021,43(4):34-38.
ZHU Haidong, HAO Hao, ZHENG Jian, et al. Design of integrated energy system for parks based on complementation of cold, heat and electricity[J]. Huadian Technology, 2021,43(4):34-38.

- [9]WANG Y L, WANG X H, YU H Y, et al. Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 115(5):563-578.
- [10]章文浦,王强钢.基于遗传算法的分布式多能互补能源
 系统优化配置[J].华电技术,2021,43(1):52-58.
 ZHANG Wenpu, WANG Qianggang. Optimized allocation

of multi-energy complementary distributed energy system based on genetic algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 52–58.

[11] 卢志刚,郭凯,闫桂红,等.考虑需求响应虚拟机组和 碳交易的含风电电力系统优化调度[J].电力系统自动 化,2017,41(15):58-65.

LU Zhigang, GUO Kai, YAN Guihong, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering virtual generator units of demand response and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 58–65.

[12]秦婷,刘怀东,王锦桥,等.基于碳交易的电-热-气综 合能源系统低碳经济调度[J].电力系统自动化,2018, 42(14):8-13,22.

QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13,22.

[13]魏震波,马新如,郭毅,等.碳交易机制下考虑需求响应 的综合能源系统优化运行[J].电力建设,2022,43(1): 1-9.

WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimized operation of integrated energy system considering demand response under carbon trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1-9.

 [14]陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光,等.考虑阶梯式碳交易机制 与电制氢的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设 备, 2021, 41(9): 48-55.
 CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system

considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48–55.

[15]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): 98-107.

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): 98-107.

[16]李东东,张凯,姚寅,等.基于信息间隙决策理论的电动 汽车聚合商日前需求响应调度策略[J].电力系统保护 与控制,2022,50(24):101-111.

LI Dongdong, ZHANG Kai, YAO Yin, et al. Day-ahead demand response scheduling strategy of an electric vehicle aggregator based on information gap decision theory [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (24) : 101–111.

[17] 贠保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与"双碳" 机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控 制,2022,50(22):11-19.

YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a "dual carbon" mechanism [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(22):11-19.

[18]许志荣,张高瑞.响应用户有限理性需求的微电网优化策略[J].综合智慧能源,2022,44(11):43-49.
XU Zhirong, ZHANG Gaorui. Optimization strategy of microgrid responding users' bounded rational demand [J].
Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(11): 43-49.

[19]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):447-461.

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): 447-461.

[20]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):3094-3106.

CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Lowcarbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response [J]. Power System Technology, 2021, 47(9):3094-3106.

[21] 栗然,彭湘泽,吕慧敏,等.考虑氢储能和需求响应的综合能源系统双层优化配置[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),2022.(2022-07-13)[2023-04-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqlhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD65HZSBVVNne0dvJHX9H96DUBUt3xeYykub2UyKudZ0_gltkvbEzlP95&uniplatform=NZKPT.

LI Ran, PENG Xiangze, LYU Huimin, et al. Two-layer optimal configuration for integrated energy system regarding hydrogen storage and demand response [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022. (2022–07–13) [2023–04–10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract? v=3uoqIhG8C 45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD65HZSBVVNne OdvJHX9H96DUBUt3xeYykub2UyKudZ0_gltkvbEzlP95& uniplatform=NZKPT.

- [22]YANG S B, LIN H Y, MA J, et al. A two-stage operation optimization model for isolated integrated energy systems with concentrating solar power plant considering multienergy and multi-type demand response [J]. Energy Reports, 2022,8(8): 13320-13332.
- [23]徐恒志,周博文,李广地,等.含水源热泵的区域综合能 源系统低碳运行优化研究[J].综合智慧能源,2022,44

(1): 39-48.

XU Hengzhi, ZHOU Bowen, LI Guangdi, et al. Research on optimal operation of the regional integrated energy system with water-source heat pumps [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1):39-48.

[24]钟鹏元,杨晓宏,寇建玉.含储氢结构的园区综合能源系 统优化配置研究[J].综合智慧能源,2022,44(9): 11-19.

ZHONG Pengyuan, YANG Xiaohong, KOU Jianyu. Research on the optimal configuration of integrated energy systems for parks with hydrogen storage devices [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9):11–19.

[25]王翔,胡明,闫岩,等.基于改进量子粒子群算法的综合 能源系统优化配置[J].综合智慧能源,2022,44(10): 19-24.

WANG Xiang, HU Ming, YAN Yan, et al. Optimal configuration of integrated energy system based on improved quantum particle swarm optimization [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10):19-24.

- [26]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, 2023, 14 (1) : 576-586.
- [27]ZHANG D D, ZHU H Y, ZHANG H C, et al. Multiobjective optimization for smart integrated energy system considering demand responses and dynamic prices [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13 (2) : 1100-1112.
- [28]胡可心,李康平,刘春阳,等.动态分时电价下居民用户 需求响应基线负荷预测方法[J/OL].电测与仪表,2023.

(2023-01-07)[2023-04-10].https://kns.cnki.net/kcms2/ article/abstract? v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2v= 3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD64iL FH7p67cuMWhQEKTJUS2Wa-TlFhaFWcgVPpeU0yBKLu g_KyxxOgA&uniplatform=NZKPT.

HU Kexin, LI Kangping, LIU Chunyang, et al. A baseline load forecasting method for residential demand response under dynamic time-of-use electricity price [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023. (2023– 01–07) [2023–04–10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/ abstract? v=3uoqlhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhT DCdPD64iLFH7p67cuMWhQEKTJUS2Wa–TlFhaFWcgVP peU0yBKLug_KyxxOgA&uniplatform=NZKPT.

(本文责编:刘芳)

收稿日期:2023-04-14;修回日期:2023-05-30 上网日期:2023-06-24;附录网址:www.iienergy.cn

作者简介:

葛磊蛟(1984),男,副教授,博士,从事智能配电网态势 感知、云计算和大数据方面的研究,legendglj@tju.edu.cn;

于惟坤(1998),男,在读硕士研究生,从事配电台区拓扑 关系辨识、综合能源系统优化等方面的研究, 2662323124@qq.com;

朱若源*(1997),男,在读硕士研究生,从事综合能源系 统优化研究,982827570@qq.com;

王关涛(1998),男,在读硕士研究生,从事综合能源系统 优化研究,1539372350@qq.com;

白星振(1977),男,教授,博士,从事智能配电网状态估 计与感知、智能数据分析及应用等方面的研究,xzbai@163. com。

*为通信作者。