

基于绿证-碳交易等价交互的综合能源系统低碳优化调度

龙传煜¹,张靖¹,何宇¹,严儒井¹,古庭贇²,李博文²

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要:为了降低综合能源系统运行过程中的碳排放,并完善绿证市场与碳市场的交互机制,提出一种考虑碳捕集电厂、氢能多元化应用以及绿证-碳交易等价交互的综合能源系统低碳优化调度策略。建立了综合灵活运行方式下的碳捕集电厂模型。构建以两段式电转气、储氢、氢燃料电池及掺氢热电联产组成的氢能多元化应用模型,丰富氢能的应用途径;同时,考虑绿证市场供需对绿证价格的影响,提出绿证-碳交易等价交互的交易策略。经算例验证表明,碳捕集电厂与氢能多元应用可显著提高风电消纳水平,有效兼顾系统运行的经济性与低碳性;绿证-碳交易等价交互策略能够消化过剩绿证,最大化可再生能源减碳效益。

关键词:综合能源系统;碳捕集电厂;氢能;绿证-碳交易等价交互;低碳优化调度

中图分类号:TM73;TK01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202512021

0 引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)耦合电、热、气等多种能源形式,可以提高能源利用效率以及减少CO₂排放,对我国实现低碳承诺和能源高质量利用具有重要意义^[1-3]。

目前,常规火电机组在IES中仍发挥着重要作用,其他调节设备无法完全替代火电机组,但亟需解决火电机组碳排放显著的问题^[4]。碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术是当前最为关键的低碳技术之一^[5],碳捕集电厂(carbon capture power plant, CCPP)可有效减少现场源侧火电机组高碳排的问题。文献[6]论述了CCPP参与调峰的优势,有效降低了碳排放。文献[7]建立了考虑综合灵活方式CCPP的IES低碳运行模型,并验证了其在低碳经济方面的有效性。文献[8]指出综合灵活运行方式下的CCPP具备良好的低碳特性,在负荷低谷时段能以更低的净输出功率运行。现有研究提出CCS和电转气(power-to-gas, P2G)技术耦合以促进负荷低谷期风电消纳,降低运行成本。文献[9]建立了CCPP-P2G联合运行的IES低碳经济调度模型,以CO₂为纽带将碳捕集装置与P2G进行耦合,有效提高风电消纳。文献[10]建立CCPP协同两段式P2G低碳调度模型,充分发挥了氢能高效清

洁优势,但忽略了燃气掺氢技术参与IES低碳运行的作用。可见,现有研究在CCPP与其他设备协同配合、促进系统碳减排等方面进行了有益的探索,但对碳-绿证市场调节机制的降碳作用研究不足,尚未考虑CCPP与碳-绿证市场互动机制的协调配合对IES运行的影响。

在市场调节机制方面,国内外学者将碳排放权交易(carbon emission trading, CET)制度和绿色证书交易(green certificate trading, GCT)机制作用于综合能源系统领域。文献[11]建立了考虑CET和GCT的IES低碳经济调度模型,证明综合考虑GCT、CET有更好的降碳效果。文献[12]综合考虑CET、GCT机制对电氢耦合系统运行的影响,并验证了阶梯碳式CET具有更好的减碳效果。但以上研究对碳-绿证市场的联合效应只进行简单加和,没有考虑绿证的碳减排效应。文献[13]考虑GCT-CET交互,将绿证转化成碳配额并在碳市场出售获益,但并未明确单位绿证对应的碳减排量。文献[14]指出,在现有火电占比高的结构下,单位绿证对应碳减排量可由火电与可再生能源电力的全生命周期碳排放作比较获得。所以,GCT-CET等价交互策略使得绿证可以在碳市场和绿证市场之间灵活流通,但是以上研究均未充分考虑绿证价格受市场供需的影响。文献[15]提出绿证市场的交易主要集中在电力行业,参与者数量较少,因此绿证价格容易受到供需变化的影响。而碳市场的参与主体更加多元化,预计未来将成为一个完全竞争的市场,因此碳配额供需波动对价格的影响相对较小。故考虑GCT-CET等价交互时,除了明确绿证与碳减排量的对应关系外,绿证市场供需因素必须纳入考量。综上所述,现有研究在CET和GCT机制以及IES应用方面已有初步研究,以下问题仍需要进一步探讨:①CET机制与GCT

收稿日期:2024-11-03;修回日期:2025-05-28

在线出版日期:2025-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52406227);贵州省科技计划项目(LH[2025]重点014);黔科合平台人才(GCC[2022]016-1)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52406227), the Science and Technology Plan Program of Guizhou Province(LH[2025] Major 014) and the Qiankehe Platform Talents(GCC[2022]016-1)

机制的联合效应仅限于简单加和,缺乏对二者的联合运行进行深入研究;②未精确认定单位绿证对应碳减排量;③未考虑绿证市场供需因素对绿证价格的影响。

针对上述问题,本文从低碳技术和市场调节机制2个层面挖掘IES的降碳潜力,提出考虑CCPP、氢能多元应用以及GCT-CET等价交互的IES低碳经济调度模型,以促进可再生能源消纳,并实现低碳减排。在低碳技术层面,利用储液罐的能量时移特性,充分发挥CCPP灵活运行的优势,并构建氢能多元化应用模型,丰富氢能的利用途径。在市场调节机制层面,本文建立考虑市场供需的GCT模型,以绿证为纽带联动GCT与奖惩型CET机制,提出考虑GCT-CET等价交互的绿证-碳市场交易策略。在此基础上,构建以系统总成本最小化为目标的IES低碳经济调度模型,设置多个运行场景的仿真验证模型的有效性,并分析碳交易基础价格和绿证价格对GCT-CET等价交互策略的影响。

1 综合能源系统运行框架

本文构建含电-热-气-氢的综合能源系统,其中利用碳捕集装置对火电机组进行低碳改造使其成为CCPP,从而捕集烟气中的 CO_2 ,并将其送去封存和作为原料提供给甲烷反应器(methane reactor, MR)合成天然气。电负荷主要由CCPP、燃气掺氢热电联产(combine heat and power, CHP)、氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)以及风电机组提供;电解槽(electrolyzer, EL)消纳富余的风电制取氢气并存储在储氢罐(hydrogen tank, HT)中,在用能高峰期供能给掺氢CHP设备以及HFC;气负荷和CHP设备的耗气量由上级气网和MR提供;热负荷主要由掺氢CHP、HFC以及蓄热罐(heat storage, HS)提供。系统运行框架如附录A图A1所示。

1.1 CCPP模型

常规火电机组进行低碳化改造,加装烟气分流装置以及溶液存储装置,从而形成综合灵活运行方式下的CCPP,其结构示意图如附录B图B1所示,具体模型如附录B式(B1)所示。

1.2 氢能多元化应用模型

EL通过电解水生成氢气和氧气。本文提出的氢能多元化应用运行模式如下:一部分氢气直接提供给HFC生产电能和热能,以满足系统的电力和热力需求,从而提高能源利用效率;另一部分供给CHP设备,以改善燃料的清洁性;还有一部分供给MR,用于生产天然气以满足气负荷和CHP设备的耗气需求;此外,部分富余的氢气被储存在HT中,在其他时段输送至HFC给系统供能,实现能量时移。氢能多元化应用示意图如附录C图C1所示。

1)两段式P2G模型。

本文参考文献[16-17],假设EL以固定效率运行,暂不考虑EL的效率特性和启停特性,EL模型见附录C式(C1)、MR的模型见附录C式(C2)。

2)燃气掺氢CHP模型。

热电比可调的CHP设备能够实现电、热功率的灵活输出^[18],进一步提高运行效率。燃气掺氢CHP模型见附录C式(C3)和式(C4)。

3)氢燃料电池CHP模型。

氢燃料电池CHP的模型见附录C式(C5)。

4)储能模型。

本文包含氢、热储能设备,其模型特性相似,故在此进行统一建模,其模型见附录C式(C6)。

2 GCT-CET等价交互模型

2.1 考虑市场供需的GCT模型

绿证代表了可再生能源电力的绿色环境属性,系统持有绿证表示部分电能由可再生能源提供。当系统持有的绿证数量大于政策规定配额时,可出售多余绿证获得收益;反之,则需要购买绿证以满足配额目标。绿证模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} y_t^{\text{GCT}} = \beta^{\text{GCT}} P_t^{\text{WT}} \\ p_t^{\text{GCT}} = \mu P_t^{\text{Eload}} \\ y_t = y_t^{\text{GCT}} - p_t^{\text{GCT}} - y_t^{\text{GCTtoCET}} \\ 0 \leq y_t^{\text{GCTtoCET}} \leq \mu_t^{\text{GCTtoCET}} (y_t^{\text{GCT}} - p_t^{\text{GCT}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: y_t^{GCT} 为 t 时段系统获得的绿证数量; β^{GCT} 为绿证转化系数,1 MW·h风电结算量对应1本绿证^[19]; P_t^{WT} 为 t 时段风电上网电量; p_t^{GCT} 为 t 时段系统参与考核所需的绿证数量; μ 为系统绿证配额系数; P_t^{Eload} 为 t 时段系统的电负荷; y_t 为 t 时段系统参与绿证市场的绿证交易量; y_t^{GCTtoCET} 为 t 时段用于抵消火电机组碳排放的绿证数量; μ_t^{GCTtoCET} 为 t 时段绿证抵消碳排放状态变量。

由市场供需关系影响,绿证的交易价格随其数量而变化。购买的绿证数量越多,绿证交易价格越高;反之,出售给绿证市场的绿证数量越多则交易价格越低。考虑市场供需的GCT模型如式(2)所示。

$$C_t^{\text{GCT}} = \begin{cases} r_t^{\text{GCT},0} y_t & l_0 - 2q \leq y_t \leq l_0 \\ r_t^{\text{GCT},1} y_t & l_0 \leq y_t \leq l_0 + q \\ r_t^{\text{GCT},2} y_t & l_0 + q \leq y_t \leq l_0 + 2q \\ r_t^{\text{GCT},3} y_t & l_0 + 2q \leq y_t \leq l_0 + 3q \\ r_t^{\text{GCT},4} y_t & l_0 + 3q \leq y_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_t^{GCT} 为 t 时段系统的绿证交易成本; $r_t^{\text{GCT},0}$ 、 $r_t^{\text{GCT},1}$ 、 $r_t^{\text{GCT},2}$ 、 $r_t^{\text{GCT},3}$ 、 $r_t^{\text{GCT},4}$ 分别为不同供需情况下的绿证价格; l_0 、 q 均为常数。

2.2 GCT-CET等价交互模型

绿证包含了风光等可再生能源发电上网的全部

信息,通过碳足迹、碳排放流等方式,可计算非水可再生能源的碳减排量。本文将单位风力发电与单位火电产生的碳排放量做比较,得出单位绿证可抵消的碳排放量。本文绿证对应碳减排量系数由火电机组碳排放系数与风电全生命周期碳排放系数的差值得出,且绿证只能抵消火电机组未捕获的CO₂,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \eta^{\text{GCToCET}} = e^{\text{TP}} - e^{\text{WT}} \\ m_t^{\text{GCToCET}} = \eta^{\text{GCToCET}} y_t^{\text{GCToCET}} \\ 0 \leq m_t^{\text{GCToCET}} \leq (1 - \beta \delta_t) e^{\text{TP}} P_t^{\text{TP}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: η^{GCToCET} 为绿证等效火电机组的碳减排系数; e^{TP} 为火电机组的碳排放强度; e^{WT} 为风电全生命周期碳排放系数; m_t^{GCToCET} 为 t 时段绿证抵消火电机组的碳排放量; β 为碳捕集效率; δ_t 为 t 时段烟气分流比; P_t^{TP} 为火电机组在 t 时段的总输出功率。

基于此,以绿证作为交互媒介融合碳、绿证市场,考虑GCT-CET等价交互机制的IES参与碳-绿证市场的交易策略如附录D图D1所示。IES在供能的同时需要满足碳配额考核和新能源消纳责任权重考核。当前,我国采用基准线法免费分配碳配额;新能源消纳责任权重则是指按省级行政区域设定新能源电力消纳责任权重,即新能源电力消费应达到其电力消费设定的比重^[20-21]。具体实施步骤如下。

1) 新能源发电的IES需要经行政管理部门审核后获得绿证,并在GCT市场进行交易以及所有权转移。行政管理部门规定IES必须消费一定比例的新能源电力,即新能源消纳责任权重考核,未达到标准者需要从绿证市场购买绿证补足^[22]。

2) 行政管理部门为IES分配碳配额。若IES碳排放量低于碳配额,则可以将碳排放权在碳交易市场售卖,从而获取相应的收益;反之,则需要购买额外的碳配额以满足考核要求,避免受到处罚。

3) 此外,当IES在满足绿证配额后仍有绿证盈余,可通过GCT-CET等价交互机制,将部分绿证转换成对应的碳减排量,将绿证分摊到2个市场交易盈利,实现碳-绿证市场的有效衔接与互动。

2.3 奖惩型CET模型

IES的实际碳排放包括碳捕集电厂未捕获的CO₂、掺氢CHP设备消耗天然气产生的CO₂以及气负荷产生的CO₂,实际碳排放模型如下。

$$\begin{cases} m_t^{\text{CO}_2} = m_t^{\text{TP}} + m_t^{\text{CHP}} + m_t^{\text{Gload}} \\ m_t^{\text{TP}} = (1 - \beta \delta_t) e^{\text{TP}} P_t^{\text{TP}} \\ m_t^{\text{CHP}} = \lambda^g \varphi^g \phi_{\text{h-e}} P_t^{\text{CHP,g}} \times \frac{44}{12} \\ m_t^{\text{Gload}} = e^{\text{CH}_1} V_t^{\text{Gload}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $m_t^{\text{CO}_2}$ 为 t 时段总的碳排放量; m_t^{TP} 为 t 时段CCPP未捕获的碳排放量; m_t^{CHP} 为 t 时段CHP的碳排放量;

m_t^{Gload} 为 t 时段气负荷碳排放量; $P_t^{\text{CHP,g}}$ 分别为 t 时段CHP消耗的天然气功率; e^{CH_1} 为单位气负荷碳排放系数; V_t^{Gload} 为 t 时段气负荷; λ^g 为天然气的单位热值含碳量; φ^g 为天然气的碳氧化率; $\phi_{\text{h-e}}$ 为电热转换系数;44/12表示CO₂与碳的相对分子质量之比。

在碳交易中,碳排放权作为商品在碳交易市场上进行流通。交易前,先确定碳市场参与主体的碳排放配额。碳排放配额根据政府制定,若系统的碳排放量超过政府规定的碳排放配额,则需要向碳市场购买碳排放配额,若低于配额则可将多余的配额在碳交易市场上出售,赚取收益。

$$\begin{cases} p_t^{\text{CO}_2} = p_t^{\text{TP}} + p_t^{\text{CHP}} \\ p_t^{\text{TP}} = \chi_{\text{coal}}^e P_t^{\text{TP}} \\ p_t^{\text{CHP}} = \chi_g^e P_t^{\text{CHP,e}} + \chi_g^h \phi_{\text{h-e}} P_t^{\text{CHP,h}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $p_t^{\text{CO}_2}$ 为 t 时段系统的碳配额; p_t^{TP} 、 p_t^{CHP} 分别为 t 时段火电机组、CHP设备的碳配额; χ_{coal}^e 为火电机组供电基准值; $P_t^{\text{CHP,e}}$ 、 $P_t^{\text{CHP,h}}$ 分别为 t 时段CHP的产电、产热功率; χ_g^e 、 χ_g^h 分别为燃气机组供电、供热基准值。

采用奖惩型CET模型充分调动碳减排积极性^[23],IES的CET成本计算见附录D式(D1)。考虑绿证通过抵消碳排放参与碳交易市场,IES参与碳市场的交易量 $e_t^{\text{CO}_2}$ 如式(6)所示。

$$e_t^{\text{CO}_2} = p_t^{\text{CO}_2} - (m_t^{\text{CO}_2} - m_t^{\text{GCToCET}}) \quad (6)$$

3 综合能源系统绿色低碳经济调度模型及求解

3.1 目标函数

本文以日前调度系统总成本 f 最优为目标函数,包括火电运行成本 C^{Coal} 、天然气购买成本 C^{Gas} 、弃风成本 C^{WTc} 、碳交易成本 C^{CET} 、绿证交易成本 C^{GCT} 、碳封存运输成本 C^{CCS} ,如式(7)~(13)所示。

$$f = C^{\text{Coal}} + C^{\text{Gas}} + C^{\text{WTc}} + C^{\text{CET}} + C^{\text{GCT}} + C^{\text{CCS}} \quad (7)$$

$$C^{\text{Coal}} = \sum_{t=1}^T c^{\text{Coal}} P_t^{\text{TP}} \quad (8)$$

$$C^{\text{Gas}} = c^{\text{Gas}} P_t^{\text{buy,g}} \phi_{\text{h-e}} / L_g \quad (9)$$

$$C^{\text{WTc}} = \sum_{t=1}^T c^{\text{WTc}} P_t^{\text{WTc}} \quad (10)$$

$$C^{\text{CET}} = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{CET}} \quad (11)$$

$$C^{\text{GCT}} = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{GCT}} \quad (12)$$

$$C^{\text{CCS}} = \sum_{t=1}^T c^{\text{CCS}} (E_t^{\text{CCS}} - E_t^{\text{MR,CO}_2}) \quad (13)$$

式中: c^{Coal} 为火电机组的单位发电成本; c^{Gas} 为购气价格; $P_t^{\text{buy,g}}$ 为 t 时段系统的购气功率; L_g 为天然气的低位热值; c^{WTc} 为弃风成本系数; P_t^{WTc} 为 t 时段系统的弃风功率; C_t^{CET} 为 t 时段系统的碳交易成本; c^{CCS} 为单位碳封存运输成本系数; E_t^{CCS} 为碳捕集电厂在 t 时段的

CO_2 捕集量; $E_t^{\text{MR},\text{CO}_2}$ 为 t 时段MR合成天然气所需 CO_2 的质量。

3.2 约束条件

约束条件包括功率平衡约束、风电出力约束,如附录E式(E1)、式(E2)所示。

3.3 模型求解

本文构建的IES绿色低碳经济调度模型为混合整数非线性模型,需要先对模型中的非线性项进行线性化处理,将模型转化为混合整数线性模型,再通过YALMIP调用Gurobi求解器进行求解。对于形为分段函数的碳交易成本(见式(D1)),采用分段线性化方法进行处理。

4 算例分析

设置仿真的1个调度周期为24 h,调度时间间隔为1 h。负荷及风电出力预测曲线如附录F图F1所示,CCPP及储液罐模型相关参数见文献[24];氢能多元化应用相关参数见文献[25]。天然气和氢气低位热值分别取 $39 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 和 $11 \text{ MJ}/\text{m}^3$,热电转换系数取值为 $3600 \text{ MJ}/(\text{MW}\cdot\text{h})$,单位体积天然气的购买价格为 $3.79 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。本文依次构建5个场景,场景1仅采用传统燃煤电厂方式参与IES的运行调度,不考虑其他。场景1—5见附录F表F1。

4.1 各场景成本分析

各场景的成本和碳排放量 $m_t^{\text{CO}_2}$ 仿真结果如表1所示。其中,当碳交易成本 C^{CET} 、绿证交易成本 C^{GCT} 的仿真结果为负值时,它们分别表示为碳交易收益、绿证交易收益。

由表1可知,场景1总成本和碳排放量最高,系统经济性和低碳性明显不足,随着场景复杂度不断提升,系统的总成本逐步降低,场景5总成本和碳排放量较场景1降低26.07%和66.38%;相比于场景1,场景2的火电运行成本、碳封存成本虽有所提升,但碳交易成本却下降了200.43%,这是因为CCPP在向系统供电的同时需要满足碳捕集设备的能耗,从而导致火电运行成本增加,但是碳排放量减少了55.33%,可以将多余的碳配额售卖以获利,总成本降低了7.68%。相比于场景2,场景3由EL消纳富余的风电,使得总成本降低了15.13%;其中,天然气购买成本相比与场景2降低了12.56%,说明氢能多元化应用拓宽氢能利用路径,提升风电利用率,天然

气掺氢措施使得CHP设备减少其碳排放量,系统获得多余碳排放权参与碳市场以提高碳交易收益。相比于场景3,场景4考虑了供需GCT,总成本得到进一步降低,相比于场景3降低了5.29%,但场景4增加的绿证交易收益削减了碳减排积极性,碳排放量略有提高。场景5考虑GCT-CET等价交互机制,相比于场景4,碳交易收益和绿证交易收益分别升高和降低了60243.64元和31687.25元,由于场景5考虑GCT-CET等价交互,将绿证转化成碳排放权在碳市场获得收益。得益于奖惩型CET,获得的碳排放权越多单位碳排放权售价越高,进一步提高了碳减排积极性,碳排放量比场景4低14.69%。综上,本文所提调度模型和交易策略能降低火电碳排放,进一步优化资源,保证IES的低碳经济性。

4.2 CCPP耦合氢能多元化应用分析

场景2和场景3运行方式下的电能优化调度结果如图1所示。具体分析如下:在场景2中,由于风电出力在01:00—07:00和22:00—24:00时段达到高峰,尽管CCPP已经将净出力调整至极低水平以适应风电的波动,系统仍然无法完全消纳风电,导致弃风现象较为严重;而场景3通过引入氢能多元化应用模型,EL利用多余的风电进行制氢,将无法通过CCPP调节的多余风电转化为氢能进行存储。这一过程不仅减少弃风量,还有效降低了CCPP的调节负担,提高了系统的经济性。

在场景3的运行方式下,氢能优化结果如图2所示。EL充分利用富余风电制取氢气,从而有效减少了弃风现象,并为系统提供了多种氢能应用的途径。具体而言,一部分氢气被用于CHP机组,提升了燃料的清洁性,减少了对传统化石燃料的依赖,进而降低了碳排放。另一部分氢气被供给HFC,以满足系统的电力和热力需求,从而在需求波动时提供更大的灵活性。剩余的氢气被储存在HT中,以备在风电出力较低而负荷需求较高时供能。由于合成天然气的MR设备需经过2次能量转化过程,导致其产能效率显著降低,因此在当前的优化调度模型下,MR设备几乎处于停止状态。

为了进一步验证氢能多元应用的低碳经济优势和能效优势,根据氢能应用方式的不同,设置以下4种不同的场景:场景6,不考虑氢能利用(即场景2);

表1 各场景仿真数据对比

Table 1 Comparison of simulation data for each scenario

场景	$f/\text{元}$	$C^{\text{Coal}}/\text{元}$	$C^{\text{Gas}}/\text{元}$	$C^{\text{Wtc}}/\text{元}$	$C^{\text{CET}}/\text{元}$	$C^{\text{CCS}}/\text{元}$	$m_t^{\text{CO}_2}/\text{t}$	$C^{\text{GCT}}/\text{元}$	$m_t^{\text{CCToCET}}/\text{t}$
1	7892577.24	1537210.45	5279221.99	843592.34	232810.52	0	5988.93	0	0
2	7286124.60	1957279.50	4911440.74	484368.04	-233802.57	166838.87	2674.96	0	0
3	6183695.65	1999661.82	4294338.64	0	-268444.67	158139.85	2360.09	0	0
4	5856447.09	2000616.17	4294451.88	0	-268669.39	158214.94	2360.38	-328166.50	0
5	5834951.55	2033213.04	4266350.94	0	-328913.03	160779.85	2013.65	-296479.25	339.84

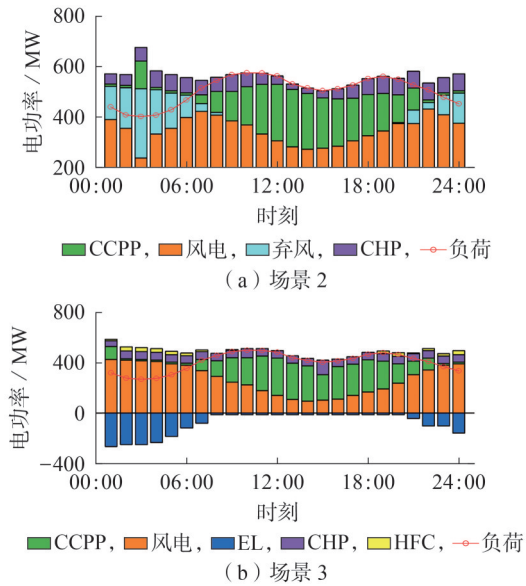


图1 场景2和场景3电功率平衡图

Fig.1 Electric power balance diagram of Scenario 2 and Scenario 3

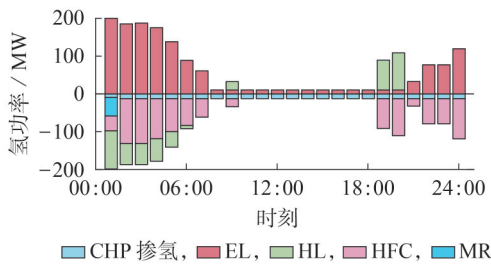


图2 场景3氢功率平衡图

Fig.2 Hydrogen power balance diagram of Scenario 3

场景7,考虑MR;场景8,考虑MR和HFC;场景9,考虑MR、HFC和掺氢CHP设备(即场景3)。场景之间对比系统总成本、碳排放量和能源利用效率3个方面,场景6—9的优化结果如表2所示。

表2 场景6—9的优化结果

Table 2 Optimization results of Scenario 6—9

场景	总成本 / 万元	碳排放量 / t	能源利用效率 / %
6	7 286 124.60	2 674.96	82.27
7	6 453 058.27	2 538.50	84.30
8	6 388 381.50	2 469.81	86.02
9	6 183 695.65	2 360.09	88.19

从表2可以看出,随着氢能应用场景的逐步拓展,系统总成本和碳排放量呈持续下降趋势,而能源利用效率则不断提高。这主要是因为MR的能源利用路径为电-氢-气-电/热,低效率的多转化过程不可避免地造成较大的能量损耗,但与场景6的弃电情况相比具有一定优势。然而,HFC和掺氢CHP设备能够直接将氢气作为能源进行燃烧供能,增加电-氢-电/热的应用模式,减少中间转换环节,不仅提升了系统的能源利用效率,还降低了系统的总成本

和碳排放量。这表明,直接利用氢气作为能源,而非通过低效率的转化过程合成天然气,是更为高效和经济的决策。

4.3 供需GCT和GCT-CET等价交互效果分析

场景4和场景5绿证交易价格和交易量如图3所示。

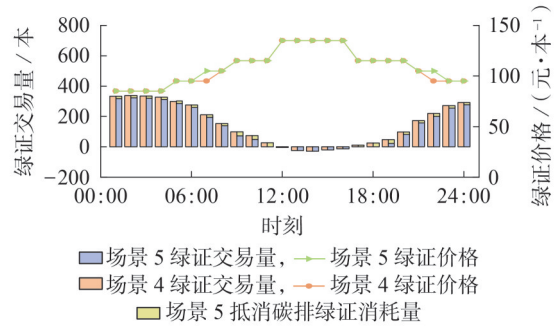


图3 场景4和场景5绿证交易价格和交易量

Fig.3 Green certificate trading prices and volumes of Scenario 4 and Scenario 5

夜间风电出力较高,而电力需求较低,导致风电在总电能消耗中的占比增加,因此获得的绿证数量相对较多。在相同的绿证配额系数下,夜间可交易的绿证数量明显高于白天时段,这一趋势在场景4和场景5中均有所体现。

相较于场景4,场景5能够将部分绿证用于抵消碳排放,将绿证转化为可交易的碳配额参与碳市场交易。场景4和场景5碳交易量 $e_t^{CO_2}$ 和碳排放量 $m_t^{CO_2}$ 如图4所示。

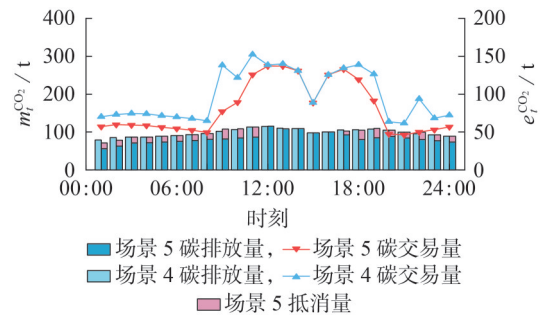


图4 场景4和场景5碳交易量和碳排放量

Fig.4 Carbon trading and carbon emissions of Scenario 4 and Scenario 5

场景5在风电出力大的时段,其碳排放量显著低于场景4,同时其配额交易量也高于场景4。通过将绿证在绿证市场和碳市场之间合理分配,场景5实现了可再生能源消纳效益的最大化。此外,由于可交易绿证数量逐渐减少,场景5在07:00和22:00时刻获得更高的绿证出售价格。通过GCT-CET等价交互,场景5能够优化绿证的分配,将部分绿证转化为碳排放权在碳市场中变现,从而避免绿证交易供过于求导致价格下跌的情况,将经济效益最大化。

4.4 绿证配额系数对 GCT-CET 机制的影响

由式(1)、(2)可知,GCT成本与绿证配额系数有关,为探究绿证配额系数对 GCT-CET 机制的影响,本文以场景 5 的数据为基准,分析不同绿证配额系数对系统总成本、绿证收益、碳交易收益的变化情况,结果如图 5 所示。

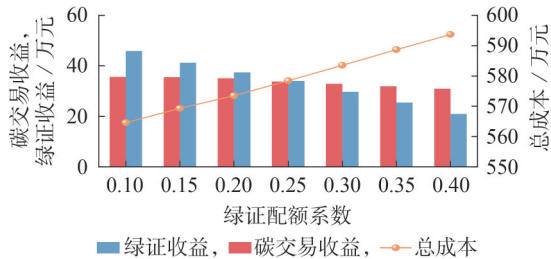


图 5 绿证配额系数对系统运行的影响

Fig.5 Impact of green certificates quota coefficients on IES operation

由图 5 可知,随着配额系数的增大,系统总成本在不断提高,而绿证收益和碳交易收益在不断降低。原因在于绿证配额系数越大表示系统需持有的绿证数量越多,而系统可调度的风电场总发电量不变,即系统获得的绿证数量不变,压缩了系统在满足配额指标后可支配的绿证数量,从而用于抵消碳排放的绿证数量相应减少。

4.5 碳交易基价和绿证价格对 GCT-CET 等价交互策略的影响

为了研究碳交易价格和绿证对 GCT-CET 等价交互策略的影响,本文基于场景 5 的数据为基准,分析在碳交易基价为 50—210 元/t、绿证价格为 50—210 元/本 的范围内,IES 的碳交易收益、绿证收益,结果见附录 F 图 F2、F3。由图 F2、F3 可知,碳交易收益和绿证收益对碳交易基价和绿证价格呈现高度敏感性。当绿证价格和碳交易基价上升时,这 2 种收益均会对应减少。具体而言,高价绿证会抑制低价位(碳交易基价 50—80 元/t)的碳交易收益,而高碳交易基价则会抑制高价位(绿证价格 180—210 元/本)的绿证收益。因此,保持碳交易基价高于绿证价格可以取得更好的效果。这是因为未来的碳市场作为一个完全竞争市场,庞大的配额需求量能够吸收部分绿证,将其转化为配额进行交易。不同碳交易价格和绿证价格下的绿证抵消碳排放量 $m_i^{GCTtoCET}$ 的变化情况如图 6 所示。

图 6 中,在右下角区域,绿证抵消碳排放量低于左侧区域。每当碳交易基价达到绿证价格的 50% 时,绿证抵消碳排放量会显著增加,这说明当碳交易基价达到绿证价格的一半时,碳配额在市场上的竞争力超过了绿证。

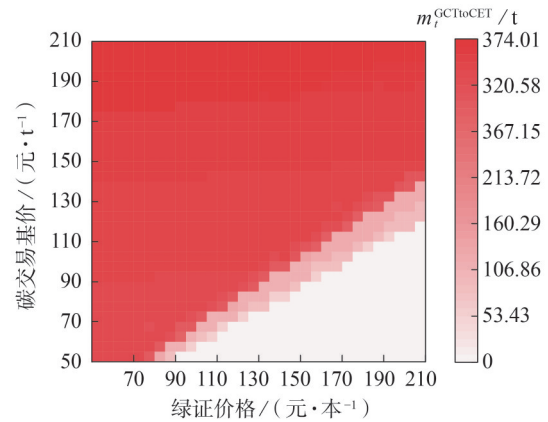


图 6 碳-绿证价格对绿证抵消碳排放的影响

Fig.6 Impact of carbon-green certificates price on green certificates offsetting carbon emissions

5 结论

针对综合能源系统运行过程中新能源消纳困难的现象以及碳绿市场降碳机制研究不足的问题,本文构建了一种含 CCP 和氢能多元化应用的 IES 低碳经济调度框架,并提出绿证-碳交易等价交互的交易策略。通过算例验证,可得结论如下。

1)CCPP 与氢能多元化应用联合运行可减少碳排放,降低弃风成本。CCPP 利用溶液存储装置实现对捕集能耗的时移,兼顾 CET 机制的同时响应 GCT 机制;氢能多元化利用为风电出力提供空间,并丰富了氢能的利用途径。

2)考虑绿证-碳交易等价交互的交易策略能够对绿证进行合理分配,使得综合能源系统实现效益最大化,与不考虑绿证-碳交易等价交互的情况相比,总调度成本降低了 0.37%,碳排放降低了 14.69%。

3)当碳交易基价大于绿证价格时,IES 服务商能从碳绿市场中能够获取较好的交易收益;当碳交易基价达到或超过绿证价格的一半时,碳配额在市场上更具竞争力,部分绿证将转化为碳配额并在碳市场出售,从而获取更高的收益。

需要指出的是,本文模型中的源、荷预测数据均来自于确定性模型,未考虑源、荷不确定性对 IES 低碳优化调度的影响,后续工作在本文的基础上重点开展源、荷不确定性以及多时间尺度协调优化研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 吕佳伟,张沈习,程浩忠,等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021.
LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review district-level integrated energy system planning interconnection interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.

- [2] 米剑锋,马晓芳. 中国CCUS技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(9):2537-2544.
MI Jianfeng,MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture,utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(9):2537-2544.
- [3] 王志杨,张靖,何宇,等. 数据与模型混合驱动的区域综合能源系统双层优化调度决策方法[J]. 电网技术,2022,46(10):3797-3813.
WANG Zhiyang,ZHANG Jing,HE Yu,et al. Hybrid data-driven and model-driven bi-level optimal scheduling decision for regional integrated energy systems[J]. Power System Technology,2022,46(10):3797-3813.
- [4] WU Min,XU Jia Zhu,SHI Zhenglu. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering extended electric heating demand response[J]. Energy,2023,278:127902.
- [5] 张贤,李阳,马乔,等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):70-80.
ZHANG Xian,LI Yang,MA Qiao,et al. Development of carbon capture,utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE,2021,23(6):70-80.
- [6] 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):575-584.
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):575-584.
- [7] 王义军,李梦涵,齐岩. 计及碳捕集电厂综合灵活运行方式的含P2G综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(1):1-8.
WANG Yijun,LI Menghan,QI Yan. Low-carbon economic dispatching of integrated energy system with P2G considering comprehensive and flexible operation mode of carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(1):1-8.
- [8] 崔杨,邓贵波,曾鹏,等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(16):5869-5886.
CUI Yang,DENG Guibo,ZENG Peng,et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(16):5869-5886.
- [9] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):61-67.
ZHOU Renjun,XIAO Junwen,TANG Xiafei,et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):61-67.
- [10] 骆钊,王菁慧,王华,等. 考虑碳捕集和电转气的综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(12):127-134.
LUO Zhao,WANG Jinghui,WANG Hua,et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering carbon capture and power-to-gas[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(12):127-134.
- [11] 刘晓军,聂凡杰,杨冬锋,等. 碳捕集电厂-电转气联合运行模式下考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术,2023,47(6):2207-2222.
LIU Xiaojun,NIE Fanjie,YANG Dongfeng,et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering green certificates-carbon trading mechanism under CAPP-P2G joint operation model[J]. Power System Technology,2023,47(6):2207-2222.
- [12] 杜易达,王迩,谭忠富,等. 电-碳-气-绿证市场耦合下的电氢耦合系统运行优化研究[J]. 电网技术,2023,47(8):3121-3135.
DU Yida,WANG Er,TAN Zhongfu,et al. Operation optimization of electro-hydrogen coupling system under coupling of electricity,carbon,gas and green card market[J]. Power System Technology,2023,47(8):3121-3135.
- [13] 孟宇翔,马刚,李豪,等. 基于绿证-阶梯式碳交易交互的源荷互补调度优化[J]. 中国电力,2023,56(9):149-156.
MENG Yuxiang,MA Gang,LI Hao,et al. Optimal scheduling of source-load complementation based on green certificate-step carbon trading interaction[J]. Electric Power,2023,56(9):149-156.
- [14] 崔杨,沈卓,王铮,等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4508-4517.
CUI Yang,SHEN Zhuo,WANG Zheng,et al. Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificate-carbon emission equivalent interaction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(12):4508-4517.
- [15] 陈巍,江岳文. 碳-绿证-电量市场耦合交易优化研究[J]. 电网技术,2023,47(6):2273-2287.
CHEN Wei,JIANG Yuewen. Trading optimization of carbon-green certificate-electricity market coupling[J]. Power System Technology,2023,47(6):2273-2287.
- [16] 孙惠娟,胡紫平,彭春华,等. 含氢综合能源系统多目标最优折中分布鲁棒低碳调度[J]. 电力自动化设备,2025,45(4):10-18,36.
SUN Huijuan,HU Ziping,PENG Chunhua,et al. Multi-objective optimal compromise distributionally robust low-carbon scheduling of hydrogen integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(4):10-18,36.
- [17] 郑杰凯,何山,韩璐,等. 计及混合博弈配电网与氢能系统的多综合能源服务商优化调度[J]. 电力自动化设备,2025,45(1):67-75.
ZHENG Jiekai,HE Shan,HAN Lu,et al. Optimal scheduling of multi-integrated energy service provider considering hybrid game-based distribution network and hydrogen energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(1):67-75.
- [18] 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. Thermo-electric 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.
- [19] 刘佳佳,田铭兴,苏照旭,等. 基于氢能多元利用与绿证-碳联合交易机制的微网-共享储能运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(19):52-67.
LIU Jiajia,TIAN Mingxing,SU Zhaoxu,et al. Operation optimization strategy for multiple microgrids with shared energy storage considering multi-utilization of hydrogen and green certificate-carbon joint trading mechanism[J]. Power System Protection and Control,2025,53(19):52-67.
- [20] 孙晓荣,尤咏,潘学萍,等. 计及碳市场和绿证市场的配电网投资效益动态评估[J]. 电力自动化设备,2024,44(5):103-111.
SUN Xiaorong,YOU Yong,PAN Xueping,et al. Dynamic evaluation of investment benefit for distribution network considering carbon market and green certificate market[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(5):103-111.

- [21] 巴金宇,何川,南璐,等. 基于绿证-阶梯碳交易联动与分布鲁棒机会约束的含氢园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2025,45(10):169-176.
BA Jinyu,HE Chuan,NAN Lu,et al. Low-carbon economic scheduling of park-integrated energy system containing hydrogen based on green certificate-tiered carbon trading and distributionally robust chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(10):169-176.
- [22] 陈霖,王冰,陈玉全,等. 基于绿证-阶梯碳交易联合机制的综合能源系统多主体协同优化方法[J]. 智慧电力,2025,53(9):10-18.
CHEN Ji,WANG Bing,CHEN Yuquan,et al. A multi-agent collaborative optimization method for integrated energy systems based on green certificate-stepped carbon trading joint mechanism[J]. Smart Power,2025,53(9):10-18.
- [23] 陈登勇,刘方,刘帅. 基于阶梯碳交易的含P2G-CCS耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术,2022,46(6):2042-2054.
CHEN Dengyong,LIU Fang,LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading[J]. Power System Technology,2022,46(6):2042-2054.
- [24] 刘妍,胡志坚,陈锦鹏,等. 含碳捕集电厂与氢能多元利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化,2024,48(1):31-40.
LIU Yan,HU Zhijian,CHEN Jinpeng,et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture power plant and multi-utilization of hydrogen energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(1):31-40.
- [25] 龚汉森,胡志坚,武经瀚,等. 含储液式碳捕集与氢能多元利用的IES调度[J]. 武汉大学学报(工学版),2024,57(10):1372-1383.
GONG Hansen,HU Zhijian,WU Jinghan,et al. Scheduling of integrated energy system with liquid storage carbon capture and multiple utilization of hydrogen energy[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2024,57(10):1372-1383.

作者简介:

龙传煜(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度(E-mail:2134310076@qq.com);

张靖(1979—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、稳定与控制(E-mail:zhangjing@gzu.edu.cn);

何宇(1978—),女,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与保护(E-mail:yuhe@gzu.edu.cn)。

(编辑 丁欣欣)

Low-carbon optimal dispatch of integrated energy systems considering green certificate-carbon trading equivalent interactions

LONG Chuanyu¹,ZHANG Jing¹,HE Yu¹,YAN Rujing¹,GU Tingyun²,LI Bowen²

(1. College of Electrical Engineering,Guizhou University,Guiyang 550025,China;

2. Electric Power Research of Guizhou Power Grid Co.,Ltd.,Guiyang 550002,China)

Abstract:To reduce the carbon emission during the integrated energy system operation and enhance the interaction mechanism between the green certificate market and the carbon market,a low-carbon optimal dispatch strategy for integrated energy system is proposed,which considers carbon capture power plant,diversified end-use applications of hydrogen and green certificate-carbon trading equivalent interaction. A carbon capture power plant model under comprehensive flexible operation mode is established. The diversified application model of hydrogen energy composed of two-stage power-to-gas,hydrogen storage,hydrogen fuel cell and hydrogen-blended combined heat and power is constructed to enrich the utilization of hydrogen energy. At the same time,considering the influence of the supply and demand of the green certificate market on the price of the green certificate,the trading strategy of the green certificate-carbon trading equivalent interaction is proposed. The example verification shows that the carbon capture power plants and diversified applications of hydrogen can significantly improve the level of wind power consumption,and effectively take the economy and low carbon of system operation into account. The green certificate-carbon trading equivalent interaction strategy can digest the excess green certificate and maximize the carbon reduction benefits of renewable energy.

Key words:integrated energy system;carbon capture power plant;hydrogen energy;green certificate-carbon trading equivalent interaction;low-carbon optimal dispatch