

考虑全生命周期碳排放的电热氢综合能源系统 低碳经济调度

潘鹏程^{1,2}, 朱涛杰^{1,2}, 谢培功³

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

3. 海南电网有限责任公司 信息通信分公司, 海南 海口 570203)

摘要:针对大规模新能源制氢系统的碳排放核算边界模糊、氢能的多元化利用不足等问题,提出一种考虑全生命周期碳排放的电热氢综合能源系统低碳经济调度模型。首先,构建储液式碳捕集系统和动态燃气掺氢系统,实现碳捕集电厂的灵活运行和氢能的多元利用;其次,基于生命周期理论,采用全生命周期能源链分析方法对不同能源链全生命周期碳排放进行核算,同时考虑设备回收的碳抵消作用,将修正后的碳排放系数引入阶梯碳交易机制中,进一步引导系统的碳排放;最后,以总运行成本最低为目标函数,搭建电热氢综合能源系统低碳经济调度模型。研究结果表明,所提优化模型有效提高了系统的低碳经济效益。

关键词:电热氢;综合能源系统;全生命周期;储液式碳捕集;动态掺氢;阶梯碳交易

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26196

Low Carbon Economic Dispatch of Electro-thermal-hydrogen Integrated Energy System Considering Whole Life Cycle Carbon Emissions

PAN Pengcheng^{1,2}, ZHU Taojie^{1,2}, XIE Peigong³

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Centre for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 3. Information and Communication Branch, Hainan Power Grid Limited Company, Haikou 570203, Hainan, China)

Abstract: To address the challenges of fuzzy carbon emission accounting boundaries and the limited diversity in the utilization of hydrogen energy within large-scale new energy hydrogen production systems, a low-carbon economic scheduling model for an integrated energy system encompassing electro-thermal-hydrogen energy was proposed, considering the whole life cycle of carbon emissions. Firstly, a liquid storage carbon capture system and a dynamic gas doping system were designed to enable flexible carbon capture operations and diversify hydrogen energy applications. Secondly, employing life cycle theory, the life cycle energy chain method was adopted to comprehensively account for the carbon emissions throughout the whole energy chain lifecycle. Also considered the carbon offset effect from equipment recycling, and introduced corrected carbon emission coefficients into the ladder carbon trading mechanism, guiding the system's carbon emissions. Finally, the optimized scheduling model for the electro-thermal-hydrogen integrated energy system was constructed, with the objective of minimizing the total operating costs. The results demonstrate that the proposed low carbon economic scheduling model significantly enhances the system's low-carbon economic efficiency.

Key words: electro-thermal-hydrogen; integrated energy system (IES); whole life cycle; liquid storage carbon capture; dynamic hydrogen doping; ladder carbon trading

“双碳”战略下,随着气候变化和环境保护问题的日益凸显,绿色能源技术逐渐成为科学研究

基金项目:国家自然科学基金(52307109)

作者简介:潘鹏程(1990—),男,博士,讲师,主要研究方向为新型电力系统、分布式能源发电技术研究, Email: pcp@whut.edu.cn

和政府政策关注的焦点。绿色能源技术的发展,迎合了第三次能源转型低碳化和清洁化需求。而绿氢和绿电作为绿色能源技术的关键形式,其互补体系构建将是能源转型的关键^[1]。综合能源系统(integrated energy system, IES)作为能源互联的重要形式之一,与可再生能源发电系统相结合,能够实现电网、热网、气网等多种能源的深度耦合,为促进可再生能源消纳、实现能源多元利用提供了有效途径^[2-3]。

氢能作为一种清洁、高效的能源载体,针对其多元化利用,文献[4]通过在 IES 中引入富氢压缩天然气,验证了电-气-氢系统的可行性及经济性;文献[5]构建两阶段电转气及掺氢热电联产模型,有效提高了系统的风电消纳水平和能源利用效率;文献[6]考虑可再生能源制氢以及氢混天然气,实现了电、热、冷、氢多能协调和梯级利用,提高了系统的碳减排能力。上述文献验证了燃气掺氢的工程应用价值,但未深入分析燃气掺氢的动态特性对系统的影响,未充分发挥氢能的低碳减排能力。

随着低碳发展理念的不断深入,为进一步发挥 IES 低碳减排能力,国内外研究学者围绕多能耦合系统的协调运行、碳交易市场的建设、碳捕集系统(carbon capture system, CCS)的应用等方向展开了大量研究。文献[7]考虑碳交易以及综合需求响应,搭建电热氢综合能源系统(electro-thermal-hydrogen integrated energy system, ETH-IES)优化模型,实现了能源的高效利用;文献[8]充分考虑天然气和热能的惯性特性,通过碳捕集和碳交易,增强了系统的低碳性与灵活性。上述研究皆基于设备运行阶段的碳排放,并未考虑生产建设、退役处理等阶段碳排放。因此一些学者采用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法对系统全生命周期碳排放进行核算,该方法不仅分析系统运行阶段碳排放,还要考虑系统本身投入、材料运输等阶段的碳排放,对 IES 展开从“摇篮到坟墓”的全生命周期碳排放评估。文献[9]采用 LCA 方法,对 IES 设备循环和能源循环两个循环链进行 LCA 碳排放核算,同时考虑碳捕集技术,搭建低碳经济优化模型,并通过实例验证了模型的有效性;文献[10]基于 LCA 能源链分析方法,综合考虑需求响应和阶梯碳交易机制,建立 IES 低碳经济调度模型,有效降低了系统的碳排放;文献[11]基于 LCA 分析了系统能源转换过

程中的碳排放,利用条件风险价值理论控制系统风险,得到日前调度策略,避免了经济优化结果的理想化。上述研究基于 LCA 对 IES 全生命周期碳排放进行了详细分析,但没有考虑到回收阶段材料的回收利用价值,忽视了可回收材料的碳抵消作用。

综上所述,现有研究未能充分挖掘动态掺氢系统与碳捕集系统的协同运行潜力,且碳排放核算集中于运行阶段或生产建设阶段的碳排放,未考虑回收处理阶段的碳抵消。因此,本文构建了包含储液式碳捕集系统和动态燃气掺氢系统的 ETH-IES 低碳调度模型。综合考虑系统全生命周期的碳排放和碳抵消,搭建 ETH-IES 碳排放核算模型,精确获取系统的碳排放,并将其归一化碳排放系数与阶梯碳交易机制相结合,共同纳入系统的决策优化指标中。最后,通过多场景对比分析,验证了所提模型的低碳性和经济性。

1 电热氢综合能源系统

1.1 电热氢综合能源系统架构

本文构建的电热氢综合能源系统主要由能源供给系统、能源转换系统、储能系统以及多元负荷4部分构成。其中能源供给系统主要包括风机(wind turbine, WT)和光伏(photovoltaic, PV);能源转换系统主要包括燃气轮机和余热锅炉组成的热电联产机组(combined heat and power, CHP)、电锅炉(electric boiler, EB)、电解槽(electrolyzer, EL)、氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC);储能系统包括电、热、氢储能;多元负荷包括电、热、氢负荷。同时,为充分发挥 ETH-IES 的低碳调度潜力,本文通过搭建储液式碳捕集系统和动态燃气掺氢系统实现 ETH-IES 的灵活运行,其系统架构如图1所示。

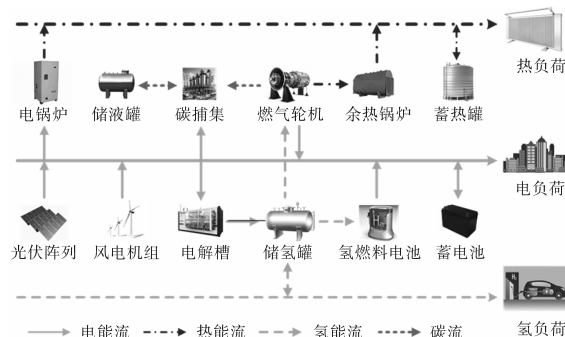


图1 电热氢综合能源系统架构

Fig.1 Structure of the electro-thermal-hydrogen integrated energy system

1.2 储液式CCS模型

在传统的碳捕集系统中,再生塔和吸收塔中的 CO_2 均被视为碳捕集系统的碳捕获量。为细化碳捕集系统的运行过程,通过加装储液罐对碳捕集系统进行改造^[12]。当 CO_2 通过烟气分流进入吸收塔中,储液式CCS可通过储液罐使得碳捕集和碳封存相互独立,完成CCS吸收和再生环节解耦,实现CCS的灵活运行。其结构如图2所示。

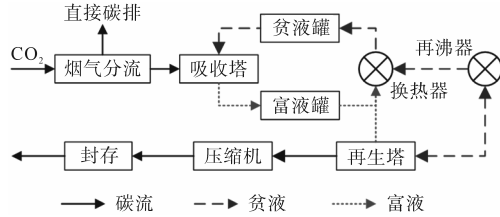


图2 储液式CCS模型

Fig.2 Liquid storage carbon capture system model

本文构建的储液式CCS输出功率由基础能耗和运行能耗两部分组成,其机组模型如下式所示:

$$\begin{cases} P_{\text{ccs}}(t) = P_{\text{ccs},1}(t) + P_{\text{ccs},2}(t) \\ P_{\text{ccs},2}(t) = \lambda C_{\text{ccs}}(t) \\ C_{\text{ccs}}(t) = C_{\text{lst}}(t) + \eta_{\text{ccs}} C_{\text{chp}}(t) \\ E_{\text{at}}(t) = \theta_{\text{fg}} \mu_{\text{at}} C_{\text{chp}}(t) \\ E_{\text{rt}}(t) = E_{\text{at}}(t) + E_{\text{rl}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{ccs}}(t)$, $P_{\text{ccs},1}(t)$, $P_{\text{ccs},2}(t)$ 分别为CCS总能耗、基础能耗和运行能耗,其中基础能耗为定值; λ 为捕集单位 CO_2 所消耗能量; $C_{\text{ccs}}(t)$ 为 t 时段碳捕集系统的 CO_2 捕获量; $C_{\text{lst}}(t)$ 为 t 时段储液罐 CO_2 待捕集量; η_{ccs} 为碳捕集效率; $C_{\text{chp}}(t)$ 为 t 时段热电联产机组碳排放量; θ_{fg} 为烟气分流比; μ_{at} 为吸收塔的吸收效率; $E_{\text{rt}}(t)$, $E_{\text{at}}(t)$, $E_{\text{rl}}(t)$ 分别为 t 时段吸收塔的 CO_2 吸收量、再生塔的 CO_2 再生量以及富液罐 CO_2 流出量。

在计算储液罐容量时,需要考虑存储的醇胺溶液体积和 CO_2 质量的关系,其转换公式如下:

$$V_{\text{ca}}(t) = \frac{C_{\text{lst}}(t) M_{\text{MEA}}}{\mu_{\text{r}} \rho_{\text{r}} E_{\text{rt}}(t) M_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

式中: $V_{\text{ca}}(t)$, M_{MEA} 分别为溶剂的体积和摩尔质量; μ_{r} , ρ_{r} 分别为溶剂的浓度和密度; M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量。

1.3 动态燃气掺氢系统模型

天然气掺氢燃烧作为氢能多元化利用的重要领域,利用新能源发电、谷电制氢和燃气掺氢发电模式,能够有效促进可再生能源消纳,减少

整个能源系统的碳排放^[13]。目前,中国石油在宁夏银川宁东天然气掺氢管道示范项目上实现最高掺氢比例24%的新突破,并实现了设备长时间稳定运行^[14]。因此,本文以24%的掺氢比为上限,搭建的动态燃气掺氢系统模型如下式所示:

$$\begin{cases} P_{\text{chp},e}(t) = \eta_e [P_{\text{gas}}(t) + P_{\text{hy}}(t)] \\ P_{\text{chp},h}(t) = \eta_{h,e} P_{\text{chp},e}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{chp},e}(t)$, $P_{\text{chp},h}(t)$ 分别为 t 时段CHP的电功率和热功率; η_e , $\eta_{h,e}$ 分别为CHP的能源转换效率和热电比; $P_{\text{gas}}(t)$, $P_{\text{hy}}(t)$ 分别为 t 时段CHP天然气和氢气的消耗功率。

则有:

$$\begin{cases} V_{\text{chp},hy}(t) = P_{\text{hy}}(t)/Q_{\text{hy}} \\ V_{\text{chp},gas}(t) = P_{\text{gas}}(t)/Q_{\text{gas}} \\ r_{h,e} \leq V_{\text{chp},hy}(t)/[V_{\text{chp},hy}(t) + V_{\text{chp},gas}(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{\text{chp},hy}(t)$, $V_{\text{chp},gas}(t)$ 分别为 t 时段输入CHP中的氢气和天然气体积; Q_{hy} , Q_{gas} 分别为氢气和天然气热值; $r_{h,e}$ 为掺氢比。

2 ETH-IES碳排放分析

2.1 全生命周期碳排放分析

在进行ETH-IES碳排放分析时,通常只关注设备运行阶段,但设备生产制造、退役处理阶段会产生大量碳排放,这部分碳排放不可忽略。因此,本文采用LCA能源链分析方法^[15],对不同能源链全生命周期碳排放进行定量分析,同时考虑到设备回收的碳抵消性^[16],对碳排放系数进行修正,从而实现ETH-IES碳排放的精确核算。其全生命周期碳排放过程如图3所示。

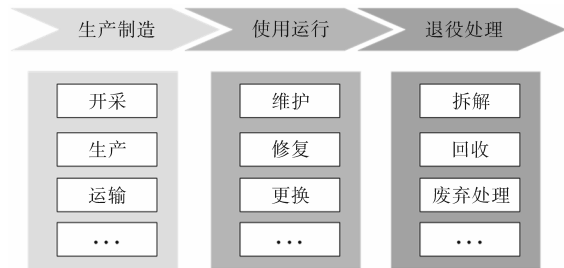


图3 系统全生命周期碳排放

Fig.3 System whole life cycle carbon emissions

2.2 全生命周期碳排放核算

2.2.1 天然气

天然气链碳排放主要集中于开采、运输、运行阶段,其LCA碳排放如下:

$$C_{\text{gs}} = C_{\text{gs},1} + C_{\text{gs},2} + C_{\text{gs},3} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} C_{gs,1} = \alpha_i U_{gi} + \beta_i U_{gas} \\ C_{gs,2} = \delta E_{gl} + (1 - \delta) E_{gp} \\ C_{gs,3} = E_{chp} + E_{chp} \eta_{h,e} \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_{gs} 为整个天然气链的碳排放系数; $C_{gs,1}$, $C_{gs,2}$, $C_{gs,3}$ 分别为开采阶段、运输阶段、运行阶段碳排放系数; α_i , U_{gi} 分别为开采阶段温室气体 i 的碳排放折算系数和碳排放强度; β_i , U_{gas} 分别为开采阶段的天然气自耗率和碳排放强度; E_{gl} , E_{gp} 分别为液化运输和管道运输的碳排放系数; δ 为液化运输所占比重; E_{chp} 为热电联产机组的单位供电电量碳排放系数。

2.2.2 新能源(风、光)

新能源链碳排放主要集中于生产建设阶段和运输阶段,其 LCA 碳排放如下:

$$\begin{cases} C_{ne} = C_{ne,1} + C_{ne,2} \\ ne \in \{wt, pv\} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} C_{ne,1} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \theta_e \left[\frac{E_{si}}{e_{si}} + \frac{(1 + u_i) E_{ej,i}}{e_{ej,i}} \right] \\ C_{ne,2} = \sum_{i=1}^m \theta_e E_{ti} e_{ti} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_{ne} 为新能源链总碳排放系数; $C_{ne,1}$, $C_{ne,2}$ 分别为新能源机组生产建设、运输阶段碳排放系数; θ_e 为单位电能量转换系数; E_{si} , e_{si} 分别为生产阶段材料 i 的碳排放强度和单位所含能量; u_i 为建设阶段材料 i 的损耗系数; $E_{ej,i}$, $e_{ej,i}$ 分别为第 j 建设阶段所需材料 i 的碳排放强度和单位所含能量; E_{ti} 为运输阶段运输材料 i 碳排放强度; e_{ti} 为运输阶段材料 i 的运输耗能能量强度。

2.2.3 储能

储能设备中,热储能和氢储能碳排放较少,故本文不再考虑。而电储能运行阶段会产生大量碳排放,且退役处理难度较大,因此电储能碳排放不可忽视。本文参考文献[17],以不同类型蓄电池的平均碳排放为基准,综合确定电储能全生命周期碳排放。其 LCA 碳排放如下:

$$C_{es} = \frac{C_{es,1} + C_{es,2} + C_{es,3} + C_{es,4}}{4} \quad (9)$$

式中: C_{es} 为电储能碳排放系数; $C_{es,1}$, $C_{es,2}$, $C_{es,3}$, $C_{es,4}$ 分别为铅酸电池、锂电池、钠硫电池、全钒液流电池碳排放系数。

2.2.4 退役处理阶段碳抵消

退役处理阶段,对可回收材料进行回收处

理,可以抵消系统产生的碳排放,产生负碳经济环境效益。在系统不同能源链中,天然气链和储能链可回收材料较少,因此碳抵消系数计为零。

新能源机组在大面积布局和发展的同时,其退役处理阶段直接影响着生态和环境。在回收处理阶段,风电机组采用回收填埋的处理方式^[18],对钢、铁、铝等金属原材料进行回收,对塑料、玻璃纤维等不可回收材料进行填埋处理;光伏阵列采用热解回收的处理方式^[19],对退役光伏阵列的有效成分进行分解回收,最终完成风机和光伏退役阶段的碳排放核算。其碳排放公式如下:

$$\begin{cases} C_{rwt} = \sum_{i \in A_1} \sum_{j \in B_1} (R_{wt,i} U_{wt,i} - \theta_{rc,j} R_{wt,j} U_{wt,j}) \\ C_{rpv} = \sum_{i \in A_2} \sum_{j \in B_2} (R_{pv,i} U_{pv,i} - R_{pv,j} U_{pv,j}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_{rwt} , C_{rpv} 分别为风电机组和光伏阵列退役处理阶段的碳排放,考虑到设备的可回收特性,该值为负; A_1 , B_1 分别为风机不可回收材料集合和可回收材料集合; $R_{wt,i}$, $U_{wt,i}$ 分别为不可回收材料 i 的单位千瓦回收量和对应的碳排放系数; $\theta_{rc,j}$ 为可回收材料 j 的回收率; $R_{wt,j}$, $U_{wt,j}$ 分别为可回收材料 j 的单位千瓦回收量和对应的碳排放系数; A_2 为光伏组件热解回收所消耗的材料集合; B_2 为热解回收的产出物集合; $R_{pv,i}$, $U_{pv,i}$ 分别为热解回收消耗物 i 的消耗量和对应的碳排放系数; $R_{pv,j}$, $U_{pv,j}$ 分别为热解回收产出物 j 的产出量和对应的碳排放系数。

2.3 LCA 阶梯碳交易模型

碳交易的核心是将环境“成本化”,通过与交易市场相结合,将碳排放权作为商品在市场上交易。本文在考虑系统全生命周期碳排放的前提下,引入阶梯碳交易机制,进一步引导系统的碳排放。

2.3.1 初始碳排放配额

全生命周期视角下,风光机组会产生大量碳排放,因此本文纳入碳配额的主体主要包括热电联产机组和风光机组^[15],其碳配额公式如下:

$$C_{IES}^P = C_{wt}^P + C_{pv}^P + C_{chp}^P \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} C_{wt}^P = \theta_e \sum_{t=1}^T P_{wt}(t) \\ C_{pv}^P = \theta_e \sum_{t=1}^T P_{pv}(t) \\ C_{chp}^P = \theta_h \left(\sum_{t=1}^T P_{chp,h}^t + \eta_{e,h} \sum_{t=1}^T P_{chp,e}^t \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: C_{IES}^P 为系统初始碳排放配额; C_{wt}^P , C_{pv}^P , C_{chp}^P 分

别为风机、光伏和CHP初始碳排放配额; θ_e 为单位电量碳排放配额; $P_{wt}(t), P_{pv}(t)$ 分别为 t 时段风机和光伏出力; θ_h 为单位热量的碳排放配额; $P_{chp,h}^t, P_{chp,e}^t$ 分别为 t 时段CHP的热功率和电功率; $\eta_{e,h}$ 为电热转换系数。

2.3.2 基于LCA的实际碳排放

基于各能源链的ETH-IES实际碳排放核算模型如下:

$$C_{IES} = C_{gs,z} + C_{wt,z} + C_{pv,z} + C_{es,z} - C_{ccs,z} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} C_{gs,z} = C_{gs} \sum_{t=1}^T P_{chp}(t) \\ C_{wt,z} = (C_{wt} + C_{rwt}) \sum_{t=1}^T P_{wt}(t) \\ C_{pv,z} = (C_{pv} + C_{rpv}) \sum_{t=1}^T P_{pv}(t) \\ C_{es,z} = C_{es} \sum_{t=1}^T P_{es}(t) \\ C_{ccs,z} = \sum_{t=1}^T C_{ccs}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: C_{IES} 为ETH-IES实际碳排放量; $C_{gs,z}, C_{wt,z}, C_{pv,z}, C_{es,z}$ 分别为天然气、风机、光伏和储能的实际碳排放量; $C_{ccs,z}$ 为CCS的CO₂捕获量; $P_{chp}(t)$ 为 t 时段热电联产机组总输出功率; $P_{es}(t)$ 为 t 时段电储能的充放电功率。

2.3.3 阶梯碳交易

ETH-IES可交易的碳排放配额 C_{CE} 为

$$C_{CE} = C_{IES} - C_{IES}^p \quad (15)$$

将可交易的碳排放配额纳入碳交易市场进行交易,其阶梯碳交易模型为

$$F_{CE} = \begin{cases} \lambda C_{CE} & C_{CE} \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(C_{CE}-l) + \lambda l & l \leq C_{CE} \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(C_{CE}-2l) + \lambda(2+\alpha)l & 2l \leq C_{CE} \leq 3l \\ \lambda(1+3\alpha)(C_{CE}-3l) + \lambda(3+\alpha)l & 3l \leq C_{CE} \leq 4l \\ \lambda(1+4\alpha)(C_{CE}-4l) + \lambda(4+\alpha)l & C_{CE} \geq 4l \end{cases} \quad (16)$$

式中: F_{CE} 为碳交易成本; λ 为碳交易基价,取250t; α 为价格增长率,取25%; l 为区间长度,取50t。

3 ETH-IES优化调度模型

3.1 目标函数

本文以总运行成本最小为目标函数,搭建的综合能源系统低碳经济调度模型如下式所示:

$$\min F = F_{BUY} + F_{OM} + F_{CE} + F_{CUR} + F_{CS} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} F_{BUY} = \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^T P_{buy,a}(t) Q_{buy,a}(t) \\ F_{OM} = \sum_{b \in B} \sum_{t=1}^T E_{om,b}(t) W_{om,b}(t) \\ F_{CUR} = \sum_{t=1}^T [\theta_{cwt} P_{cwt}(t) + \theta_{cpv} P_{cpv}(t)] \\ F_{CS} = \theta_{cs} \sum_{t=1}^T C_{ccs}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中: F 为系统总运行成本; $F_{BUY}, F_{OM}, F_{CE}, F_{CUR}, F_{CS}$ 分别为系统的购能成本、运行维护成本、碳交易成本、弃能成本和碳封存成本; A 为购能集合; B 为ETH-IES中所有设备集合; $P_{buy,a}(t), Q_{buy,a}(t)$ 分别为 t 时段能源 a 的单位购买价格和购买数量; $E_{om,b}(t), W_{om,b}(t)$ 分别为 t 时段设备 b 的输出功率和单位运行维护成本; $\theta_{cwt}, \theta_{cpv}$ 分别为单位弃风和弃光成本; $P_{cwt}(t), P_{cpv}(t)$ 分别为 t 时段弃风和弃光功率; θ_{cs} 为单位CO₂封存成本。

3.2 约束条件

1)可再生能源约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{wt}^{\max} \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv}^{\max} \\ P_{wt}(t) + P_{cwt}(t) = P_{wt}^{\max} \\ P_{pv}(t) + P_{cpv}(t) = P_{pv}^{\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{wt}^{\max}, P_{pv}^{\max}$ 分别为风电机组、光伏阵列的输出功率上限。

2)购能约束:

$$\begin{cases} 0 \leq V_{buy,g}(t) \leq V_{buy,g}^{\max} \\ 0 \leq V_{buy,hy}(t) \leq V_{buy,hy}^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $V_{buy,g}(t), V_{buy,g}^{\max}$ 分别为 t 时段系统的购气量和购气上限; $V_{buy,hy}(t), V_{buy,hy}^{\max}$ 分别为 t 时段系统的购氢量和购氢上限。

3)能源转换设备安全运行约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \\ \Delta P_i^{\min} \leq P_i(t+1) - P_i(t) \leq \Delta P_i^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_i(t)$ 为能源转换设备 i 在 t 时段的输出功率; $P_i^{\max}$ 为设备 i 的输出功率上限; $\Delta P_i^{\max}, \Delta P_i^{\min}$ 分别为设备 i 的爬坡功率上、下限。

4)储能约束:

$$\begin{cases} S_i^{\min} \leq S_i(t) \leq S_i^{\max} \\ S_{ch,i}^{\min} \leq S_{ch,i}(t) \leq u S_{ch,i}^{\max} \\ S_{dis,i}^{\min} \leq S_{dis,i}(t) \leq (1-u) S_{dis,i}^{\max} \\ S_i(1) = S_i(T) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $S_i(t)$ 为 t 时段储能设备的储能量; $S_i^{\max}, S_i^{\min}$

分别为储能容量上、下限; $S_{ch,i}(t), S_{dis,i}(t)$ 分别为 t 时段储能设备的充能功率和放能功率; $S_{ch,i}^{\max}, S_{ch,i}^{\min}$ 分别为充能功率上、下限; $S_{dis,i}^{\max}, S_{dis,i}^{\min}$ 分别为放能功率上、下限; u 为0-1变量, $u=1$ 时表示储能设备正在充能, $u=0$ 时表示储能设备正在放能; $S_i(1), S_i(T)$ 分别为调度周期初始和结束时段储能设备的储能容量。

5) 储液罐约束:

$$\begin{cases} V_r(t) = V_r(t-1) - v_r(t) \\ V_p(t) = V_p(t-1) - v_p(t) \\ 0 \leq V_r(t) \leq V_r^{\max} \\ 0 \leq V_p(t) \leq V_p^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $V_r(t), v_r(t)$ 分别为 t 时段富液罐的溶液存储量和溶液流出量; $V_p(t), v_p(t)$ 分别为 t 时段贫液罐的溶液存储量和溶液流出量; $V_r^{\max}, V_p^{\max}$ 分别为富液罐和贫液罐的最大溶液存储量。

6) 气网交互平衡约束:

$$V_{buy,g}(t) = V_{chp,ch}(t) \quad (24)$$

7) 电、热、氢平衡约束:

$$\begin{cases} P_{lode,e}(t) = P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{chp,e}(t) + P_{hfc}(t) - \\ P_{gb}(t) - P_{ccs}(t) - P_{el}(t) - P_{es}(t) \\ P_{lode,h}(t) = P_{gb}(t) + P_{chp,h}(t) - P_{ts}(t) \\ V_{lode,hy}(t) = V_{el}(t) + V_{buy,hy}(t) - V_{hfc}(t) - \\ V_{chp,hy}(t) - V_{hys}(t) \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{lode,e}(t), P_{lode,h}(t), V_{lode,hy}(t)$ 分别为 t 时段电负荷、热负荷和氢负荷; $V_{el}(t)$ 为 t 时段电解槽的产氢量; $V_{hfc}(t)$ 为 t 时段氢燃料电池的耗氢量; $V_{chp,hy}(t)$ 为 t 时段热电联产机组的掺氢量; $V_{hys}(t)$ 为 t 时段储氢罐的储氢量。

4 算例仿真与分析

4.1 算例参数

为验证优化模型的有效性,本文以图1所示的ETH-IES进行分析,调度周期 $T=24$ h。主要设备参数和储能参数如表1和表2所示,储液式碳捕集系统模型参数参考文献[20]。新能源出力和电热氢负荷预测出力如图4所示,其中氢负荷为加氢站,详细参数参考文献[21]。购气和购氢价格分别为2.42元/ m^3 和2.7元/ m^3 。

采用2.2小节的LCA能源链碳排放核算方法对ETH-IES不同能源链全生命周期碳排放进行核算,并对各能源链中的碳排放系数和碳抵消系数进行归一化处理。最终得到的碳排放核算结

果如表3所示。

表1 主要设备参数

设备名称	容量/ MW	能量转换 效率/%	爬坡约束/ %	运行成本系数/ [(元·(MW·h) ⁻¹]
WT	200	-	-	48
PV	150	-	-	60
CHP	150	热40/电35	20	80
EB	40	75	20	80
EL	120	82	15	40
HFC	50	88	15	40

表2 储能设备参数

储能方式	充放能 效率/%	自损耗 系数/%	运行成本系数/ [(元·(MW·h) ⁻¹]
电储能	0.95	0.01	40
热储能	0.9	0.05	40
氢储能	0.9	0.005	20

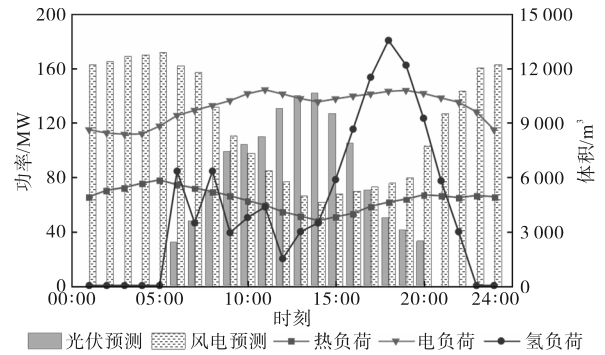


图4 新能源出力及负荷预测

Fig.4 New energy output and load forecast

表3 LCA能源链碳排放核算结果

能源链类型	数据来源	碳排放/ [t·(MW·h) ⁻¹]	碳抵消/ [t·(MW·h) ⁻¹]	LCA碳排放/ [t·(MW·h) ⁻¹]
天然气	文献[9-11]	0.564 7	0	0.564 7
风机	文献[15-16, 18]	0.043 0	0.009 4	0.033 6
光伏	文献[15-16, 19]	0.154 5	0.028 1	0.126 4
储能	文献[15, 17]	0.091 3	0	0.091 3

4.2 场景对比分析

为验证储液式碳捕集系统和燃气掺氢系统对ETH-IES低碳性和经济性的影响,本文基于LCA阶梯碳交易机制,设置以下5种场景进行对比分析,具体方案设置如表4所示。其中,场景5为本文所提模型。

本文基于上述5种场景,搭建ETH-IES低碳经济调度模型,通过Matlab平台调用Cplex商业求解器进行求解,优化结果如表5所示。

表4 运行场景设置

Tab.4 Running scenario settings

场景	常规碳捕集	储液碳捕集	固定掺氢	动态掺氢
1				
2	√			
3		√		
4		√	√	
5		√		√

表5 情景1~5优化结果

Tab.5 Scenarios 1~5 optimization results

场景	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
碳排放量/t	1 082.06	574.92	377.83	316.21	326.01
碳交易/万元	50.98	25.62	15.77	12.69	13.18
购能成本/万元	58.28	69.01	70.74	71.30	68.46
运维成本/万元	54.61	51.97	51.72	49.68	49.36
弃风弃光率/%	2.89	0	0	0	0
碳封存成本/万元	0	2.67	3.80	3.56	3.74
总成本/万元	169.51	149.28	142.03	137.23	134.73

由表5可知,场景2相较于场景1,碳排放和总运行成本分别下降46.83%和11.93%,验证了碳捕集系统在低碳经济调度方面的有效性,同时碳捕集系统在捕获CO₂时会消耗一定的电能,在消纳完可再生能源出力后,会提高热电联产机组出力,因此系统的购能成本上升15.55%,弃风弃光率下降为0。与场景2相比,场景3通过在碳捕集系统中引入储液罐,碳排放和碳交易成本分别下降34.28%和38.45%,总运行成本下降4.85%,说明配有储液罐的碳捕集系统能够进一步促进系统的低碳性和经济性。

对比场景3~5可知,在场景3的基础上,场景4和场景5分别考虑了固定掺氢和动态掺氢。采用固定掺氢后,系统的总运行成本降低3.38%,碳排放量降低了16.31%,但购能成本上升3.83%。而采用动态掺氢使系统的总运行成本降低5.14%,碳排放和购能成本分别下降了13.72%和3.22%。这是由于固定掺氢的掺氢比固定,为满足掺氢需求,在新能源出力不足时,会向上级电网和氢网购能,因此购能成本上升,总运行成本下降。而动态掺氢的掺氢比随着时间动态变化,电解槽产生的氢气首先会满足氢负荷,其次才会考虑掺氢需求,在新能源出力高于负荷需求时,电解槽输出功率增加,系统会提高燃气掺氢的掺氢比,在电热氢负荷需求较大时,降低系统的掺氢比,从而有效降低系统碳排放和总运行成本,实现系统的灵活运行。

4.3 调度平衡结果分析

图5提供了本文场景的电热氢平衡结果。

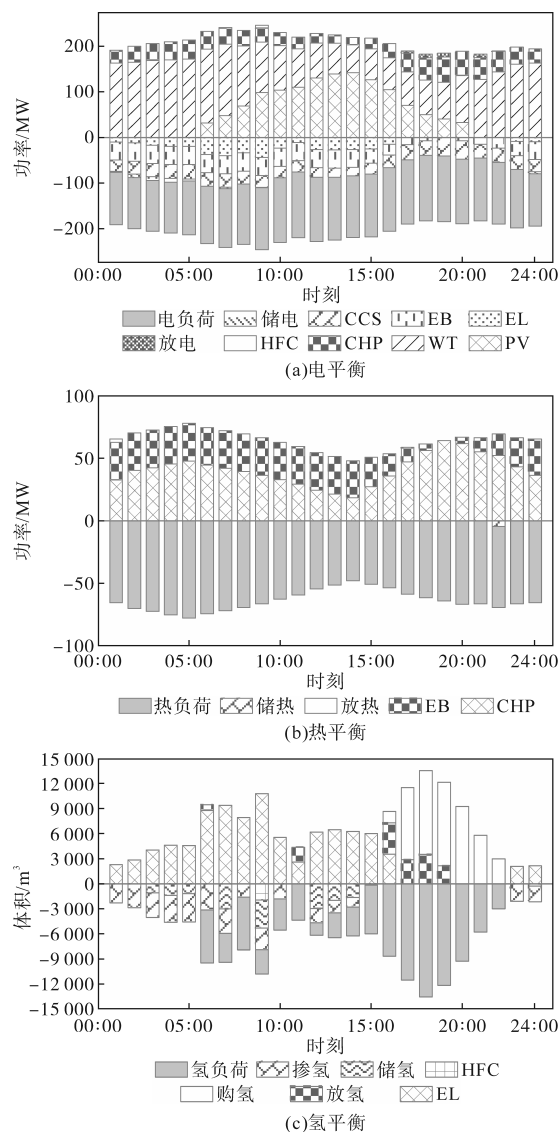


图5 电热氢平衡结果

Fig.5 Electric thermal hydrogen balance results

由图5可知,在01:00—05:00和23:00—24:00时段,氢负荷需求为0,在满足电负荷和热负荷需求后,系统通过电解槽将未消纳的新能源出力转化为氢气,从而满足燃气掺氢的氢气需求,因此电解槽功率不断提高,多余电量则通过蓄电池和储氢罐进行存储,从而有效提高系统的风光消纳率。在06:00—14:00时段,氢负荷需求增加,导致电解槽一直处于较高的输出功率,同时热负荷需求降低,CHP机组作为高碳排机组,为降低系统的碳排放,输出功率不断降低。在15:00—22:00时段,风光总出力降低,负荷总需求增加,储能设备不能满足负荷需求,系统开始大量购能,为保证系统的经济性,系统不再考虑

掺氢,电解槽输出功率降低。

4.4 LCA 阶梯碳交易效益分析

为探究碳交易机制中 LCA 的引入对 ETH-IES 调度结果的影响,本文在场景 5 的基础上设置以下场景进行对比分析。其对比结果如图 6 所示。

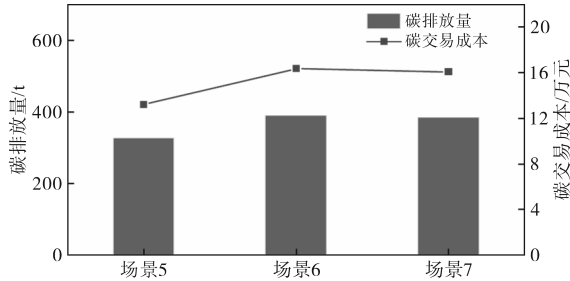


图6 碳交易效益分析

Fig.6 Analysis of the benefits of carbon trading

场景 6: 阶梯碳交易机制中考虑 ETH-IES 各能源链全生命周期碳排放,不考虑设备回收的碳抵消。

场景 7: 传统的阶梯碳交易机制,不考虑全生命周期碳排放。

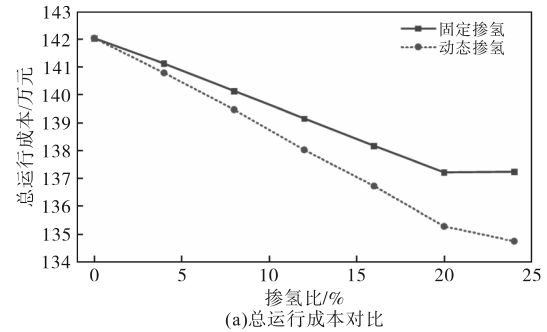
由图 6 可知,与场景 7 相比,场景 6 考虑了全生命周期碳排放,在给予新能源机组一定的碳排放配额情况下^[15],系统的碳排放量和碳交易成本分别上升 1.45% 和 1.78%。场景 5 在场景 6 的基础上考虑了设备回收的碳抵消作用,系统的碳排放量和碳交易分别下降了 16.24% 和 19.34%。可见,对系统全生命周期碳排放进行核算,并考虑设备回收的碳抵消作用,能够精确分析系统的碳排放,进一步推动系统的低碳发展。

4.5 掺氢效益分析

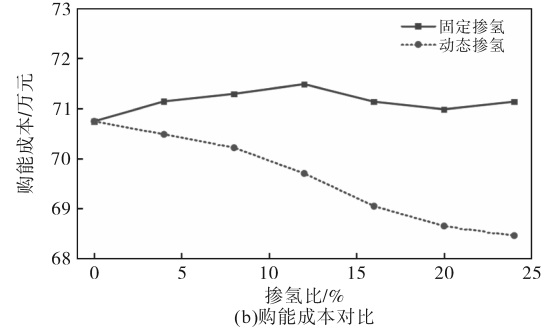
4.5.1 固定掺氢和动态掺氢对比分析

为深入分析燃气掺氢对系统经济性的影响,以 4% 为步长,将掺氢比从 0% 上升至 24%,从而对不同比例的固定掺氢和动态掺氢进行对比分析,其对比结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,随着掺氢比的不断升高,系统的总运行成本不断降低,在掺氢比达到 20% 左右,系统总运行成本降低速度逐渐放缓。由于固定掺氢的掺氢比固定,为满足掺氢需求,系统购氢成本上升,导致系统总购能成本上升,而动态掺氢能够动态调整掺氢比,购能成本进一步下降,因此相较于固定掺氢,动态掺氢系统的运行成本下降趋势较为迅速,在掺氢比达到 24% 时,动态掺氢系统总运行成本降低 1.82%,购能成本下降 3.75%。



(a)总运行成本对比



(b)购能成本对比

图7 掺氢效益分析

Fig.7 Analysis of hydrogen blending benefits

4.5.2 燃气掺氢动态特性分析

本节以 12%、16%、20%、24% 掺氢比上限为例,对燃气掺氢的动态特性进行分析,其动态特性曲线如图 8 所示。

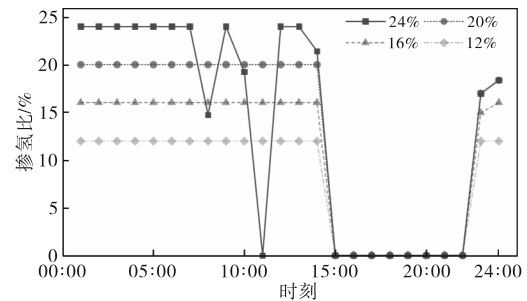


图8 燃气掺氢动态特性分析

Fig.8 Dynamic characterization of gas hydrogen doping

在 01:00—05:00 时段,电解槽产生的氢气在满足掺氢需求后,多余的存储于储氢罐中,因此掺氢比维持在 24%。06:00—14:00 时段,风电出力大幅减少,光伏出力增加,氢负荷需求增加,在掺氢比上限不高于 20% 的情况下,电解槽产生的氢气能够满足氢负荷和掺氢需求,掺氢比维持在最高点。掺氢比上限为 24% 时,电解槽产生的氢气不能同时满足氢负荷和 24% 的掺氢需求,为维持氢能平衡,实现 ETH-IES 低碳经济运行,系统会首先满足氢负荷,其次考虑燃气掺氢,在氢负荷需求升高时降低掺氢比,需求降低时提高掺氢比。15:00—21:00 时段,光伏出力大幅减少,风机出力增加,新能源总出力减少,同时氢负荷需

求大幅增加,电解槽产氢不足,系统开始向上级氢网购氢,为实现系统经济效益的最大化,不再考虑燃气掺氢,掺氢比为0%。22:00—24:00时段,总负荷需求减少,风电出力增加,系统掺氢比提高。因此,动态掺氢相较于固定掺氢,能够有效降低系统的总运行成本,提高系统调度策略的灵活性。

5 结论

本文基于生命周期理论,构建一种考虑储液式碳捕集和动态燃气掺氢系统的电氢综合能源系统低碳经济调度模型,主要研究结论如下:

1)相较于未考虑碳捕集和燃气掺氢的系统,本文构建的优化模型碳排放和总运行成本分别降低了69.87%和20.52%,验证了本文所提模型的有效性;

2)基于LCA的阶梯碳交易模型,能够解决传统方法只考虑运行阶段的局限性,精确表征系统的碳排放;

3)储液式碳捕集系统的引入,在增加购能成本和碳封存成本的同时,极大降低了系统的碳排放,提高新能源消纳率;

4)动态掺氢会根据负荷和新能源出力,动态调整掺氢比,解决固定掺氢会导致系统灵活性不足的问题,有效提高了综合能源系统的低碳性和经济性。

参考文献

- [1] 许勤华,张艳伟.绿色能源的技术突破和未来能源产业前瞻[J].人民论坛,2023(16):45-49.
XU Qinhu, ZHANG Yanwei. Technological breakthroughs in green energy and future energy industry outlook[J]. People's Tribune, 2023(16):45-49.
- [2] YANG F, YANG X, LI X. China's diverse energy transition pathways toward carbon neutrality by 2060[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 47:236-250.
- [3] 滕越,赵莺,袁铁江,等.绿电-氢能-多域应用耦合网络关键技术现状及展望[J].发电技术,2023,44(3):318-330.
TENG Yue, ZHAO Qian, YUAN Tiejia, et al. Key technology status and outlook for green electricity-hydrogen energy-multi-domain applications coupled network[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3):318-330.
- [4] ZHOU S, ZHENG S, ZHANG Z, et al. Consuming the redundant renewable energy by injecting hydrogen into the gas network: a case study of electricity-gas-hydrogen coupled system of Ireland[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,

77:1149-1162.

- [5] 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.
- [6] 张栋顺,全恒立,谢桦,等.考虑碳交易机制与氢混天然气的园区综合能源系统调度策略[J].中国电力,2024,57(2):183-193.
ZHANG Dongshun, QUAN Hengli, XIE Hua, et al. Dispatching strategy of park-level integrated energy system considering carbon trading mechanism and hydrogen blending natural gas[J]. Electric Power, 2024, 57(2):183-193.
- [7] 王江磊,樊小朝,史瑞静,等.碳交易与综合需求响应下的微能源网优化调度[J].电气传动,2023,53(7):39-48.
WANG Jianglei, FAN Xiaochao, SHI Ruijing, et al. Optimal scheduling of micro energy grid under carbon trading and comprehensive demand response[J]. Electric Drive, 2023, 53(7):39-48.
- [8] JIAO P H, CAI X, WANG L L, et al. Flexibility operation for integrated energy system considering hydrogen energy under inertia characteristics and stepped carbon trading mechanism[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98:104809.
- [9] WANG R T, WEN X Y, WANG X Y, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. Applied Energy, 2022, 311:118664.
- [10] ZHANG J, LIU Z. Low carbon economic scheduling model for a park integrated energy system considering integrated demand response, ladder-type carbon trading and fine utilization of hydrogen[J]. Energy, 2024, 290:130311.
- [11] WU M, XU J, LI Y, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering life cycle assessment and risk cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153:109287.
- [12] LIANG T, CHAI L, TAN J, et al. Dynamic optimization of an integrated energy system with carbon capture and power-to-gas interconnection: a deep reinforcement learning-based scheduling strategy[J]. Applied Energy, 2024, 367:123390.
- [13] 邱玥,周苏洋,顾伟,等.“碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1301-1321.
QIU Yue, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4):1301-1321.
- [14] 李玲.掺氢天然气,终端咋利用[N].中国能源报,2023-06-05(010).
LI Ling. Hydrogen doped natural gas, how to utilize terminals (下转第80页)

- NIE Yingwang, WANG Lei, MEI Chenyang, et al. FR-PVT: A feature-refined pyramid vision transformer for accurate image segmentation[J]. Journal of Wenzhou Medical University, 2024, 54 (8): 631-640.
- [13] JIA H, WEN Q, WANG Y, et al. Catch fish optimization algorithm: a new human behavior algorithm for solving clustering problems[J]. Cluster Computing, 2024, 27(9): 13295-13332.
- [14] 罗毅,段明达. 基于 IWOA-Transformer 的磨煤机故障预警[J]. 动力工程学报, 2024, 44(6): 939-946.
- LUO Yi, DUAN Mingda. Fault warning of coal mill based on IWOA-Transformer[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44 (6): 939-946.
- [15] 薛健侗,马宏忠,杨洪苏,等. 基于格拉姆角场与迁移学习-AlexNet 的变压器绕组松动故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 154-163.
- XUE Jiandong, MA Hongzhong, YANG Hongsu, et al. A fault diagnosis method for transformer winding looseness based on Gramian angular field and transfer learning-AlexNet[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51 (24): 154-163.
- [16] 解骞,徐浩岚,王彤,等. 基于自主认知深度时间聚类表示的
- 隔离开关故障诊断方法[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 281-289.
- XIE Qian, XU Haolan, WANG Tong, et al. Disconnecter fault diagnosis method based on autonomous-cognition deep temporal clustering representation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19 (1): 281-289.
- [17] 雷春丽,薛林林,夏奔锋,等. 采用马尔科夫转移场和图注意力网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2024, 37(12): 2158-2167.
- LEI Chunli, XUE Linlin, XIA Benfeng, et al. Rolling bearing fault diagnosis method using Markov transition field and graph attention network[J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37 (12): 2158-2167.
- [18] 张彬桥,雷钧,万刚. 基于 MTF-Swin Transformer 的风机齿轮箱故障诊断[J]. 可再生能源, 2024, 42(5): 627-633.
- ZHANG Binqiao, LEI Jun, WAN Gang. Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on MTF-Swin Transformer[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42 (5): 627-633.

收稿日期:2024-10-10

修改稿日期:2024-11-15

(上接第63页)

- [N]. China Energy News, 2023-06-05(010).
- [15] 王泽森,石岩,唐艳梅,等. 考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.
- WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (6): 1614-1626, 1858.
- [16] 周建力. 风-光-氢综合能源系统容量配置优化及决策模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
- ZHOU Jianli. Research on capacity configuration optimization and decision-making model of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [17] 谭艳秋. 电力系统应用中电池储能系统的生命周期温室气体影响分析[D]. 南京:南京大学, 2017.
- TAN Yanqiu. Life cycle greenhouse gas impacts of battery energy storage systems in power system applications[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [18] LI J, LI S, WU F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory [J]. Renewable Energy, 2020, 155: 456-468.
- [19] 赵若楠,董莉,白璐,等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
- ZHAO Ruonan, DONG Li, BAI Lu, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2751-2757.
- [20] 崔杨,管彦琦,李佳宇,等. 考虑碳捕集机组与氢储能系统协调运行的源荷储低碳经济调度[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2307-2316.
- CUI Yang, GUAN Yanqi, LI Jiayu, et al. Source-load-storage low-carbon economic dispatching considering coordinated operation of carbon capture unit and hydrogen energy storage system [J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2307-2316.
- [21] WU X, QI S, WANG Z, et al. Optimal scheduling for microgrids with hydrogen fueling stations considering uncertainty using data-driven approach[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113568.

收稿日期:2024-09-26

修改稿日期:2024-11-19