



上海交通大学学报
Journal of Shanghai Jiaotong University
ISSN 1006-2467, CN 31-1466/U

《上海交通大学学报》网络首发论文

题目：考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略
作者：孙毅，谷家训，郑顺林，李熊，陆春光，刘炜
DOI：10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.350
收稿日期：2022-09-08
网络首发日期：2023-03-24
引用格式：孙毅，谷家训，郑顺林，李熊，陆春光，刘炜. 考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略[J/OL]. 上海交通大学学报.
<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.350>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略

孙毅¹, 谷家训¹, 郑顺林¹, 李熊², 陆春光², 刘炜²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网浙江省电力有限公司营销

服务中心, 杭州 311121)

摘要: 综合能源系统是当前能源转型低碳发展背景下实现“双碳”目标的关键, 为了提高综合能源系统碳减排能力, 需要充分利用需求侧负荷资源和传统储能设备等广义储能资源参与综合能源系统优化。首先建立一种综合考虑可再生能源、能源转换设备、广义储能设备、能源市场交易的综合能源系统优化运行模型。其次使用生命周期评估法对综合能源系统中能源循环、设备循环的全过程进行碳排放量计算, 并将碳排放成本纳入到系统总成本中。最后通过仿真实验验证了所提模型不仅有利于降低综合能源系统总调度成本, 还能够降低系统的碳排放量, 有效促进综合能源系统的低碳发展。

关键词: 广义储能; 碳排放; 综合能源系统; 优化运行

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.350

Low-Carbon Optimal Operation Strategy of Integrated Energy System Considering Generalized Energy Storage and LCA Carbon Emission

SUN Yi¹, GU Jiaxun¹, ZHENG Shunlin¹, LI Xiong², LU Chunguang², LIU Wei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,

收稿日期: 2022-09-08 修回日期: 2022-12-15 录用日期: 2022-12-30

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“电力系统碳核查计量支撑基础网络构建与关键技术研究”(5400-202255274A-2-0-XG)

作者简介: 谷家训 (1998-), 硕士生, 从事综合能源系统运行优化方面研究。

通信作者: 孙毅, 教授, 博士生导师; E-mail: sy@ncepu.edu.cn。

Beijing 102206, China; 2. Marketing Service Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,

Hangzhou 311121, China)

Abstract: Integrated energy system is the key to achieve the "double carbon" (carbon peak and carbon neutrality) goal under the current energy industry transformation and low-carbon development background. In order to improve the carbon emission reduction capacity of the integrated energy system, it is necessary to make full use of the load resources on the demand side and the generalized energy storage resources such as traditional energy storage equipment to participate in the optimization of the integrated energy system. Firstly, an integrated energy system optimization operation model considering renewable energy, energy conversion equipment, generalized energy storage equipment and energy market transaction is established. Secondly, the life cycle assessment method is used to calculate the carbon emission of the whole process of energy cycle and equipment cycle in the integrated energy system, and the carbon emission cost is included in the total cost of the system. Finally, the simulation experiments show that the proposed model is not only conducive to reducing the total scheduling cost of the integrated energy system, but also can reduce the carbon emissions of the system and effectively promote the low-carbon development of the integrated energy system.

Key words: generalized energy storage, carbon emissions, integrated energy system, optimize operation

在当前世界化石燃料枯竭和环境污染加剧的背景下，我国正着力推进实现“双碳”目标，严格实施能源“双控”制度。作为《巴黎协定》的积极践行者，中国向全世界承诺：到 2030 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上^[1]。为进一步贯彻落实国家能源安全新战略，大力发展使用清洁和可持续能源的综合能源系统（Integrated Energy System, IES）已成为全方位支撑“双碳”目标落地的重要手段，也是实现能源转型和能源结构调整的重要举措。

作为新一代高效、低碳的能源供应系统^[2-4]，IES 能满足需求侧对电力、供热/冷和燃气等多种形式能源的综合需求^[5-7]。在 IES 中，储能装置由于其对能量强大的时段转移能力而成为 IES 的重要组成部分。文献[8]使用储能系统和需求响应提高了风力发电商在短期电力市场中的利润，文献[9]研究了储能系统对提高 IES 系统灵活性的影响。除了传统储能设备外，空调^[10]、电动汽车^[11]等具备一定储能特性的可控负荷也可以通过某些措施来改变能量时空分布，转化为一类成本较低，调控特性较好的广义储能^[12]。在 IES 中考虑广义储能设备不仅可以节约建设常规储能设备所需的高额成本^[13-14]，还可以减少传统储能设备在生产、运行和退役等环节产生的碳排放。文献[15]利用广义储能，充分发挥电-热-气资源的灵活耦合与多能互补特性，提高了系统的经济性与灵活性。文献[16]针对灾时容灾阶段提出了可改善电网弹性的广义储能调度方法，该方法能改善电网灾后性能并提高其运行弹性的有效性。

随着“双碳”背景下 IES 优化调度相关研究的深入^[17-20]，对 IES 进行碳排放定量计算是实现 IES 低碳运行的先决条件^[21-22]。文献[23]针对现有电力系统碳排放流理论中存在的若干问题提出了一种碳排放量计算的改进方法。文献[24]将碳排放流理论和需求响应引入到 IES 优化调度中，有效提高了能源利用率，降低了系统的碳排放和运行成本。以上研究基于碳排放流理论分析了 IES 运营中各负荷的碳排放量，但没有考虑系统设备的多样性和环境因素的复杂性。为从能源生产源头到退役设备处理全过程的碳排放进行分析，全生命周期评估法（Life

Cycle Assessment, LCA) 已成为精确分析系统碳排放的有效手段^[25]。文献[26]对 3 种大规模储能应用系统进行了全生命周期分析, 得出了他们的度电成本。文献[27]利用全生命周期评价法计算研究了海、陆风电系统的碳排情况, 研究结果表明海上风电系统经济效益更高, 对环境更友好。以上研究为使用生命周期评估法对 IES 的碳排放进行分析提供了探索性的成果, 但所评估的对象均局限于某一具体设备或能源, 未能将 IES 中所有的设备循环与能源循环综合考虑。

综合上述分析, 为实现 IES 的低碳优化运行, 本文首先将多能源储能设备和需求侧灵活性负荷视为广义储能资源, 节约建设成本及碳排放成本, 同时使用 LCA 方法计算全设备和多能源的碳排放量, 全方位、多角度地对综合能源系统进行碳排放评估, 将碳排放成本和系统运行成本纳入到 IES 经济性决策指标中, 建立一种考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统优化运行模型。该模型不仅可以降低综合能源系统的总运行成本, 还能降低系统的碳排放量, 为综合能源系统的低碳发展提供参考。

1 综合能源系统的结构和广义储能设备模型

1.1 考虑广义储能的综合能源系统结构

本文建立的综合能源系统包括电能、气能和热能, 系统结构图如图 1 所示。综合能源系统内的能源供应不仅包括外部电网、气网和热网的供能, 还包括来自风力发电和光伏发电等可再生能源的供能。在能源聚合商间还有一些能源转换设备, 主要包括燃煤热电联产机组 (Combined Heat and Power, CHP)、燃气轮机 (Gas Turbines, GT)、电转气 (Power to Gas, P2G)、电锅炉 (Electric Boilers, GB), 能源转换设备可以实现不同能源间的协调利用和灵活转化。需求侧的能源用户在能源聚合商处进行能源消费, 主要包含电能、气能和热能。广义储能设备包括实际储能和虚拟储能, 储能设备可以在时间尺度上进行能源的互补利用。

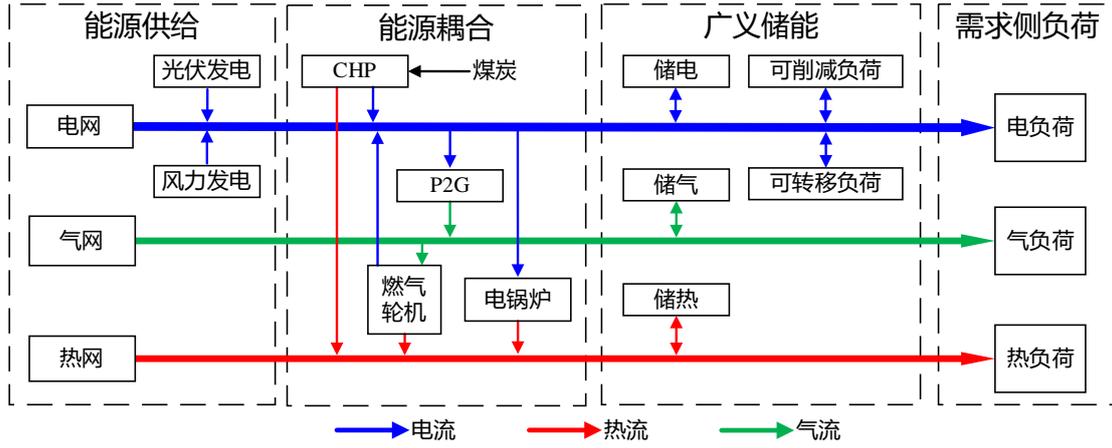


图 1 考虑广义储能的综合能源系统结构

Fig.1 Structure of integrated energy system considering generalized energy storage

1.2 广义储能设备模型

本文考虑的广义储能设备主要由实际储能设备和虚拟储能设备构成，其中实际储能设备包括储电、储气和储热设备，虚拟储能设备包括参与激励型需求响应的可转移负荷和可削减负荷。

1.2.1 实际储能模型 储电设备包括锂离子电池储能电站及压缩空气储能电站等，它们在可再生能源出力高峰和用电谷段时储电，在可再生能源出力不足和用电峰段时放电。储热设备包括水储热站和熔融盐（固体）储热站等，它们可以储存热量，在 IES 需要时释放热量。同理，储气设备包括储气罐等，它们可以储存天然气，在 IES 需要时供给天然气。据此，基于文献 [28]、[29]，可以归纳实际储能的一般模型为：

$$\begin{cases} S_{ES,t}^{EN} = (1 - \eta_{ES}) S_{ES,t-1}^{EN} + \frac{\eta_{ES}^{EN} P_{ES,t-1}^{EN} \Delta T}{S_{ES}^{EN,max}} \\ 0 \leq S_{ES,t}^{EN} \leq S_{ES}^{EN,max} \\ P_{ES}^{EN,min} \leq P_{ES,t}^{EN} \leq P_{ES}^{EN,max} \\ EN \in \{e, h, g\} \end{cases} \quad (1)$$

式中：上标 $EN \in \{e, h, g\}$ 表示电、热、气三类能源； $S_{ES,t}^{EN}$ 为 t 时段实际储能设备的储能量； η_{ES} 为实际储能设备的自放能率； η_{ES}^{EN} 为实际储能设备的运行效率，当实际储能设备充能时为充能效率，放能时为放能效率； $P_{ES,t-1}^{EN}$ 为 $t-1$ 时段实际储能设备的运行功率，充能时其值为正，反之则为负； ΔT 为单个时段的时长； $S_{ES}^{EN,max}$ 为实际储能设备的储能容量； $P_{ES}^{EN,min}$

和 $P_{ES}^{EN,\max}$ 为实际储能设备运行功率的上下限，上限表示最大充能功率，下限表示最大放能功率。

1.2.2 可转移负荷模型 可转移负荷(Transferable Load, TL)在一个调度周期内总用电量一定，但可以在一定的时间范围内“转移”其耗能时间，实现能量的时移。其增加或减少的用电量可视为虚拟储能的充/放电量，其模型如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{TL,t,i}^{out} \leq x_{TL,t,i}^{out} (P_{TL,t-1,i}^{out,\max} - P_{TL,t-1,i}^{out}) \\ 0 \leq P_{TL,t,i}^{in} \leq x_{TL,t,i}^{in} (P_{TL,t-1,i}^{in,\max} - P_{TL,t-1,i}^{in}) \\ x_{TL,t,i}^{in} x_{TL,t,i}^{out} = 0 \\ \sum_{t \in T_i} (x_{TL,t,i}^{out} + x_{TL,t,i}^{in}) = 0 \\ T_i = [t_{i,start}^{TL}, t_{i,end}^{TL}] \\ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (x_{TL,t,i}^{in} P_{TL,t,i}^{in} - x_{TL,t,i}^{out} P_{TL,t,i}^{out}) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中： $P_{TL,t,i}^{out}$ 为 t 时段第 i 种可转移负荷的等效放能功率； $P_{TL,t,i}^{in}$ 为 t 时段第 i 种可转移负荷的等效充能功率； T_i 表示第 i 种可转移负荷的调度周期， $t_{i,start}^{TL}$ 、 $t_{i,end}^{TL}$ 分别表示调度周期的开始与结束时间； $P_{TL,t-1,i}^{out,\max}$ 、 $P_{TL,t-1,i}^{in,\max}$ 为 $t-1$ 时段第 i 种可转移负荷最大充放能功率； $x_{TL,t,i}^{in}$ 、 $x_{TL,t,i}^{out}$ 为等效充/放能状态变量，充/放能状态为 1，反之为 0。

1.2.3 可削减负荷模型 可削减负荷 (Reducible Load, RL) 通过在一定范围内削减功率来等效虚拟储能的放能过程，其模型如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{t,j}^{RL} \leq y_{t,j}^{RL} P_{t,j}^{RL,\max} \\ \sum_{t=1}^T (y_{t,j}^{RL} - y_{t-1,j}^{RL}) y_{t,j}^{RL} = n_{t,j}^{RL} \\ \sum_{t \in T_j} y_{t,j}^{RL} = 0 \\ T_j = [t_{j,start}^{RL}, t_{j,end}^{RL}] \\ 0 \leq n_{t,j}^{RL} \leq n_{t,j}^{RL,\max} \\ z_j^{RL,\min} \leq z_j^{RL} \leq z_j^{RL,\max} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中： $P_{t,j}^{RL}$ 为 t 时段第 j 种可削减负荷功率； $P_{t,j}^{RL,max}$ 为 t 时段第 j 种可削减负荷的削减上限； $y_{t,j}^{RL}$ 为 t 时段第 j 种可削减负荷状态变量，1 为调度，0 为不调度； T_j 表示第 j 种可削减负荷的调度周期， $t_{j,start}^{RL}$ 、 $t_{j,end}^{RL}$ 分别表示调度周期的开始与结束时间； $n_{t,j}^{RL}$ 为 t 时段第 j 种可削减负荷的调度次数； $n_{t,j}^{RL,max}$ 为 t 时段第 j 种可削减负荷的调度次数上限； z_j^{RL} 为第 j 种可削减负荷的单次调度时长； $z_j^{RL,min}$ 、 $z_j^{RL,max}$ 为调度时长上下限。

2 面向综合能源系统碳排放的生命周期评估

2.1 基于生命周期评估的碳排放分析方法

为了实现综合能源系统的科学低碳运行，需要在目标函数中引入使用 LCA 方法的碳排放因子。LCA 方法可以更精确地分析 IES 系统全生命周期能流过程中的碳排放。综合考虑能源循环和电厂运行周期过程中的碳排放，对 IES 进行生命周期评估，过程如图 2 所示。

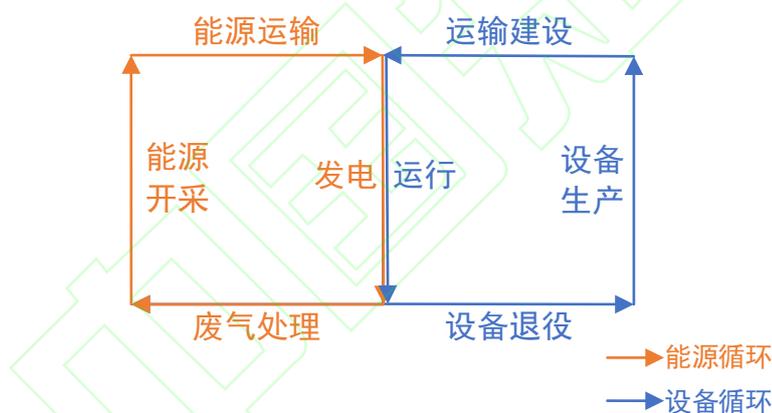


图 2 IES 的生命周期评估过程

Fig.2 Life cycle assessment process of IES

LCA 方法可以全面跟踪 IES 各个环节的碳排放轨迹，有利于更好地进行低碳减排优化，有效降低碳排放。为了全面分析 IES 中各种设备的碳排放，本文使用基于文献[30]和文献[31]的能源/设备循环 LCA 碳排放分析法。即对各类能源循环的碳排放进行全面的分析，考虑不同发电设备的运行参数和各环节的能量损失，对不同发电设备的温室气体排放进行定量计算，再标准化为 CO_2 排放量。然后将能源循环分为开采、运输、使用和处理四个环节，设备循环分为设备生产、运输建设、运行和退役四个环节。

2.2 综合能源系统的碳排放生命周期评估

2.2.1 设备循环 为了全面分析 IES 中各种设备在系统运行过程中的温室气体排放,本文参考了文献[32]中提出的基于 LCA 设备链的碳排放分析方法。设备循环的 LCA 温室气体排放主要来自设备生产、运输建设、发电运行和退役处理。本文考虑的 IES 设备包括燃气轮机、CHP、风电、光伏、电锅炉、P2G 和储能设备。将四个环节的碳排放量相加,得到总碳排放量,再除以总发电量,可得单位发电量的碳排放系数。过程如式(4)所示:

$$\begin{cases} \delta_{EQ} = \frac{\sum I_{EN,n} Q_{EQ}}{\varphi_{load} S_{pg} L} \\ EQ \in \{PV, WT, CHP, GT, P2G, EB, ES\} \end{cases} \quad (4)$$

式中:下标 EQ 分别表示光伏、风机、CHP、燃气轮机、P2G、电锅炉、储能设备; δ_{EQ} 是设备 EQ 的单位电量碳排放系数; $I_{EN,n}$ 是设备循环中环节 n 所用能量 EN 的能耗; Q_{EQ} 是设备 EQ 的碳排放强度; φ_{load} 是负荷系数; S_{pg} 是发电规模; L 是设备运行寿命。经计算可得到 IES 中各类设备的度电碳排放系数(单位:千克/千瓦时)。

上述设备中,P2G 设备的碳原料来源为设备中的碳捕获装置,该装置可以对 IES 排放气体中的 CO_2 进行分离与捕获,送入 P2G 设备中进行处理,将其转化为天然气后重新输送会系统内气网。虽然包含碳捕获装置的 P2G 设备的运行成本较高(与 IES 中其他设备相比),但提高了环境效益,降低了系统的碳排放量,尤其是与储气装置的配合可以进一步降低额外增加的系统运行成本^[6,18,32]。

2.2.2 能源循环 为了全面分析 IES 中各类能源在系统运行过程中的温室气体排放,本文参考了文献[32]中提出的基于 LCA 能源链的碳排放分析方法。能源循环的 LCA 温室气体排放主要来自能源开采、能源运输、发电运行和废气处理。本文考虑的能源包括综合能源系统从外部购买的煤炭和从能源市场购买的电能、热能和气能。

煤炭在 LCA 能源循环中的温室气体排放主要来自煤炭开采和洗选、加工和运输以及燃

烧发电，如式（5）和式（6）所示：

$$\begin{cases} \delta_{pm} = I_{cp} \eta_{cp} Q_{cm} (1 + \alpha + \beta) \\ \delta_{tm} = \sum_{a=1}^{A_a} \sum_{b=1}^{B_b} I_{a,b} Q_{a,b,c} k_{a,b} M_a D_a \\ \delta_{um} = I_{um} Q_{um,c} \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta_m = \delta_{pm} + \delta_{tm} + \delta_{um} + \delta_{cm} \quad (6)$$

式中： δ_{pm} 是能源循环中煤炭生产环节的度电碳排放系数； I_{cp} 是煤炭的单位损失； η_{cp} 是煤炭的转换效率； Q_{cm} 是煤炭生产的碳排放强度； α 是原煤自燃引起的单位功率损失率； β 是原煤洗选引起的单位功率损耗率。 δ_{tm} 是能源循环中煤炭运输环节的度电碳排放系数； A_a 是煤炭运输方式，主要包括铁路、公路和水路； B_b 是燃料类型，主要包括汽油、柴油和电力； $I_{a,b}$ 是第 a 种运输模式下第 b 种燃料的单位损失； $Q_{a,b,c}$ 是使用第 b 种燃料的第 a 种运输方式产生的第 c 种温室气体的碳排放强度； $k_{a,b}$ 是使用第 b 种燃料的第 a 种运输方式的运输距离与能源循环中总距离的比率； M_a 是通过第 a 种运输方法运输的煤炭总量； D_a 是通过第 a 种运输方法运输的煤炭的平均距离。 δ_{um} 是燃煤发电环节产生的度电碳排放系数； I_{um} 是发电环节的单位煤耗； $Q_{um,c}$ 是能源循环中燃煤发电机组每单位标准煤当量的第 c 种温室气体碳排放强度。 δ_{cm} 是废气处理环节产生的度电碳排放系数。 δ_m 是燃煤发电的碳排放系数。同理可得综合能源系统中天然气能源的碳排放系数 δ_g 。

根据 IES 中各设备产电、热的比例及对应的碳排放系数可得综合能源系统中电能和热能的碳排放系数 δ_e 、 δ_h 。

2.2.3 考虑设备循环和能源循环的 LCA 碳排放 IES 的碳排放生命周期评估包括电厂循环和能源循环，具体包括其中的生产环节、运输环节和使用环节，并考虑每个环节中相应设备单元的碳排放。IES 中的实际碳排放源包括可再生能源发电设备、能源转换设备和储能设备。其中可再生能源发电设备的碳排放 LCA 计算如式（7）所示：

$$\begin{cases} E_{WT} = \delta_{WT} \sum_{t=1}^T P_{WT,t} \\ E_{PV} = \delta_{PV} \sum_{t=1}^T P_{PV,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中： E_{WT} 、 E_{PV} 分别为风电机组和光伏机组的实际碳排放量； δ_{WT} 、 δ_{PV} 分别为风电机组和光伏机组的实际度电碳排放系数（单位：千克/千瓦时）； $P_{WT,t}$ 、 $P_{PV,t}$ 风电机组和光伏机组在时段 t 内的实际出力。

能源转换设备的碳排放 LCA 计算如式（8）所示：

$$\begin{cases} E_{CHP} = (\delta_{CHP} + \delta_m) \sum_{t=1}^T P_{CHP,t} \\ E_{GT} = (\delta_{GT} + \delta_g) \sum_{t=1}^T P_{GT,t} \\ E_{EB} = (\delta_{EB} + \delta_e) \sum_{t=1}^T P_{EB,t} \\ E_{P2G} = (\delta_{P2G} + \delta_e) \sum_{t=1}^T P_{P2G,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中： E_{CHP} 、 E_{GT} 、 E_{EB} 、 E_{P2G} 分别为燃煤 CHP 机组、燃气轮机机组、电锅炉机组和 P2G 机组的实际碳排放量，由于其中 P2G 机组可以在运行过程中吸收部分 CO_2 ，减少 IES 的实际碳排放量，所以 E_{P2G} 小于零； δ_{CHP} 、 δ_{GT} 、 δ_{EB} 分别为燃煤 CHP 机组、燃气轮机机组、电锅炉机组的实际度电碳排放系数， δ_{P2G} 为 P2G 机组的实际度电碳排放系数，一般为负； $P_{CHP,t}$ 、 $P_{GT,t}$ 、 $P_{EB,t}$ 、 $P_{P2G,t}$ 分别是燃煤 CHP 机组、燃气轮机机组、电锅炉机组和 P2G 机组在时段 t 内的实际出力。

储能设备的碳排放 LCA 计算如式（9）所示：

$$\begin{cases} E_{ES}^{EN} = \delta_{ES}^{EN} \sum_{t=1}^T P_{ES,t}^{EN} \\ EN \in \{e, h, g\} \end{cases} \quad (9)$$

式中： E_{ES}^{EN} 为储能设备的实际碳排放量； δ_{ES}^{EN} 为储能设备实际度电碳排放系数； $P_{ES,t}^{EN}$ 为储能设备在时段内 t 的实际出力。

综合能源系统市场购能的碳排放 LCA 计算如式 (10) 所示:

$$E_{Mar} = \sum_{t=1}^T (\delta_e P_{Mar,t} + \delta_h H_{Mar,t} + \delta_g G_{Mar,t}) \quad (10)$$

式中: E_{Mar} 为市场购能的实际碳排放量; $P_{Mar,t}$ 、 $H_{Mar,t}$ 、 $G_{Mar,t}$ 分别为 t 时段的市场购电/热/气功率。

综上, 综合能源系统的碳排放 LCA 计算如式 (11) 所示:

$$E_{all} = E_{wt} + E_{pv} + E_{chp} + E_{gt} + E_{eb} + E_{p2g} + E_{ES}^{EN} + E_{Mar} \quad (11)$$

式中: E_{all} 为综合能源系统的碳排放量。

3 考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统优化运行模型

3.1 目标函数

综合能源系统在考虑能源供给、能源储存和 LCA 碳排放的前提下, 以运行成本 C_{IES} 最小为目标, 建立综合能源系统优化运行模型为:

$$\min C_{IES} = \sum_{t=1}^T (C_{Device,t} + C_{Market,t} + C_{Carbon,t}) \quad (12)$$

式中: $C_{Device,t}$ 为综合能源系统内设备运行成本, 具体包括可再生能源、能源转换设备和储能设备的运行成本; $C_{Market,t}$ 为综合能源系统从外部能源网络购能的成本; $C_{Carbon,t}$ 为综合能源系统的碳排放成本。

3.1.1 设备运行成本

$$C_{Decive,t} = C_{RE,t} + C_{CV,t} + C_{ES,t} \quad (13)$$

式中: $C_{RE,t}$ 为 t 时段可再生能源设备运行成本; $C_{CV,t}$ 为 t 时段能源转换设备运行成本; $C_{ES,t}$ 为 t 时段储能设备运行成本。

$$C_{RE,t} = k_{WT} P_{WT,t} + k_{PV} P_{PV,t} + k_{WT}^p (P_{WT,t}^{for} - P_{WT,t}) + k_{PV}^p (P_{PV,t}^{for} - P_{PV,t}) \quad (14)$$

式中： k_{WT} 和 k_{PV} 分别为风机和光伏的单位运行成本； $P_{WT,t}$ 和 $P_{PV,t}$ 分别为风机和光伏在 t 时段的实际出力； k_{WT}^p 和 k_{PV}^p 为单位弃风/光惩罚系数； $P_{WT,t}^{for}$ 和 $P_{PV,t}^{for}$ 为风机和光伏在 t 时段的预测出力。

$$C_{CV,t} = k_{CHP}P_{CHP,t} + k_{GT}P_{GT,t} + k_{EB}P_{EB,t} + k_{P2G}P_{P2G,t} \quad (15)$$

式中： k_{CHP} 、 k_{GT} 、 k_{EB} 、 k_{P2G} 分别为 CHP 机组、燃气轮机、电锅炉和 P2G 的单位运行成本； $P_{CHP,t}$ 、 $P_{GT,t}$ 、 $P_{EB,t}$ 、 $P_{P2G,t}$ 分别为 CHP 机组、燃气轮机、电锅炉和 P2G 在 t 时段的运行功率。

$$C_{ES,t} = k_{ES}^e P_{ES,t}^e + k_{ES}^h P_{ES,t}^h + k_{ES}^g P_{ES,t}^g + k_{TL} (P_{TL,t}^{in} + P_{TL,t}^{out}) + k_{RL} P_{RL,t} \quad (16)$$

式中： k_{ES}^e 、 k_{ES}^h 、 k_{ES}^g 分别为电储能、热储能、气储能设备的单位运行成本； $P_{ES,t}^e$ 、 $P_{ES,t}^h$ 、 $P_{ES,t}^g$ 分别为电储能、热储能、气储能设备在 t 时段的运行功率； k_{TL} 、 k_{RL} 分别为可转移负荷和可削减负荷的单位补偿成本。

3.1.2 市场购能成本

$$C_{Market,t} = (k_{Mar,t}^e P_{Mar,t} + k_{Mar,t}^h H_{Mar,t} + k_{Mar,t}^g G_{Mar,t}) \Delta T \quad (17)$$

式中： $k_{Mar,t}^e$ 、 $k_{Mar,t}^h$ 、 $k_{Mar,t}^g$ 分别为 t 时段的市場购电/热/气价格； $P_{Mar,t}$ 、 $H_{Mar,t}$ 、 $G_{Mar,t}$ 分别为 t 时段的市場购电/热/气功率； ΔT 为单个时段的时长。

3.1.3 系统碳排放成本 综合能源系统的碳排放成本与其碳排放量成正比。在前文中已经详细阐述了如何基于 LCA 方法计算综合能源系统的碳排放量，因此综合能源系统的碳排放成本可表示为式 (18)：

$$C_{Carbon,t} = \tau_{tax} E_{all} \quad (18)$$

式中： τ_{tax} 为碳排放税； E_{all} 为经 LCA 方法得出的综合能源系统碳排放量。

3.2 约束条件

3.2.1 设备运行约束 可再生能源设备运行约束为：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,t}^{for} \\ 0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{for} \end{cases} \quad (19)$$

燃煤热电联产机组的运行约束为：

$$\begin{cases} P_{CHP,t} = \eta_{e,CHP} I_{CHP,t} \\ H_{CHP,t} = \eta_{h,CHP} I_{CHP,t} \\ P_{CHP}^{\min} \leq P_{CHP,t} \leq P_{CHP}^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $P_{CHP,t}$ 、 $H_{CHP,t}$ 分别为 CHP 在 t 时段的电出力、热出力； $\eta_{e,CHP}$ 、 $\eta_{h,CHP}$ 分别为 CHP 的电出力、热出力效率； $I_{CHP,t}$ 为 CHP 在 t 时段的燃煤消耗量； P_{CHP}^{\max} 、 P_{CHP}^{\min} 分别为 CHP 的出力上下限。本文中考虑的 CHP 为定热电比运行模式。

燃气轮机设备的运行约束为：

$$\begin{cases} P_{GT,t} = \eta_{e,GT} G_{GT,t} \\ H_{GT,t} = \eta_{h,GT} G_{GT,t} \\ P_{GT}^{\min} \leq P_{GT,t} \leq P_{GT}^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $P_{GT,t}$ 、 $H_{GT,t}$ 分别为 GT 在 t 时段的电出力、热出力； $\eta_{e,GT}$ 、 $\eta_{h,GT}$ 分别为 GT 的电出力、热出力效率； $G_{GT,t}$ 为 GT 在 t 时段的燃气消耗量； P_{GT}^{\max} 、 P_{GT}^{\min} 分别为 GT 的出力上下限。

电锅炉设备的运行约束为：

$$\begin{cases} H_{EB,t} = \eta_{EB} P_{EB,t} \\ H_{EB}^{\min} \leq H_{EB,t} \leq H_{EB}^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $H_{EB,t}$ 为 EB 在 t 时段的产热功率； η_{EB} 为 EB 的产热效率； $P_{EB,t}$ 为 EB 在 t 时段的耗电量； H_{EB}^{\max} 、 H_{EB}^{\min} 分别为 EB 的产热量上下限。

电转气设备的运行约束为：

$$\begin{cases} G_{P2G,t} = \eta_{P2G} P_{P2G,t} \\ G_{P2G}^{\min} \leq G_{P2G,t} \leq G_{P2G}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $G_{P2G,t}$ 为 P2G 在 t 时段的产气量； η_{P2G} 为 GT 的制气效率； $P_{P2G,t}$ 为 P2G 在 t 时段的耗电量； G_{P2G}^{\max} 、 G_{P2G}^{\min} 分别为 P2G 的产气量上下限。

3.2.2 市场购能约束

$$\begin{cases} P_{mar}^{\min} \leq P_{mar,t} \leq P_{mar}^{\max} \\ H_{mar}^{\min} \leq H_{mar,t} \leq H_{mar}^{\max} \\ G_{mar}^{\min} \leq G_{mar,t} \leq G_{mar}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中： P_{mar}^{\min} 、 P_{mar}^{\max} 分别为市场购电功率的上下限； H_{mar}^{\min} 、 H_{mar}^{\max} 分别为市场购热功率的上下限； G_{mar}^{\min} 、 G_{mar}^{\max} 分别为市场购气功率的上下限。

3.2.3 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{mar,t} + P_{wt,t} + P_{pv,t} + P_{chp,t} + P_{gt,t} - P_{p2g,t} - P_{eb,t} - P_{ES,t} = P_{0,t} + (P_{TL,t}^{in} - P_{TL,t}^{out}) + P_{RL,t} \\ H_{mar,t} + H_{chp,t} + H_{gt,t} + H_{eb,t} - H_{ES,t} = H_{0,t} \\ G_{mar,t} + G_{p2g,t} - G_{gt,t} - G_{ES,t} = G_{0,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $P_{0,t}$ 、 $H_{0,t}$ 、 $G_{0,t}$ 为 t 时段需求侧的电/热/气基线负荷。

3.3 模型求解分析

由式(12)~式(18)可知，本文设置的考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统优化运行模型的目标函数为一个线性函数，同时由式(19)~式(25)可知，其约束条件均为线性约束，由此可知，此优化模型为一个典型的线性规划模型，可基于梯度的方法进行求解。

4 算例分析

为验证上述算法的有效性，本文在不考虑广义储能/不考虑碳排放的情况下对比了所述算法的仿真结果。综合能源系统内用户的基线负荷和风电、光伏的预测出力情况参考文献 [33]，综合能源系统日前购能如图 3 所示，市场购能价格如图 4 所示。

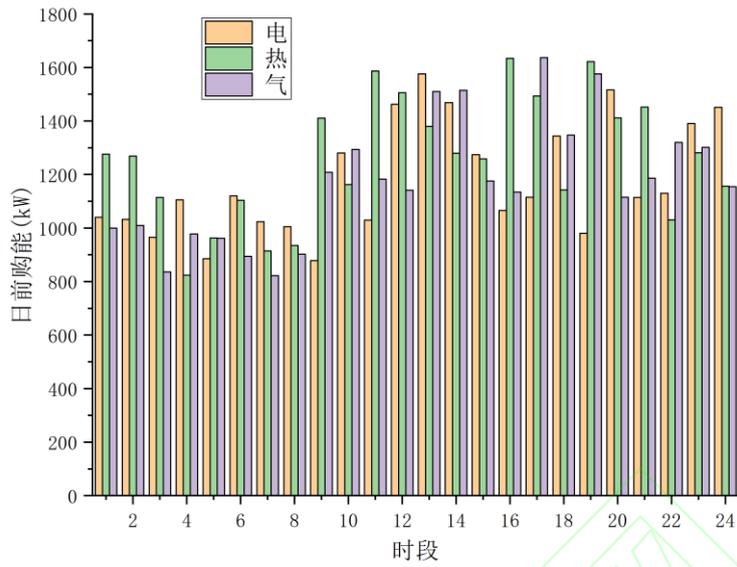


图3 综合能源系统日前购能

Fig.3 Day-ahead energy purchase of integrated energy system

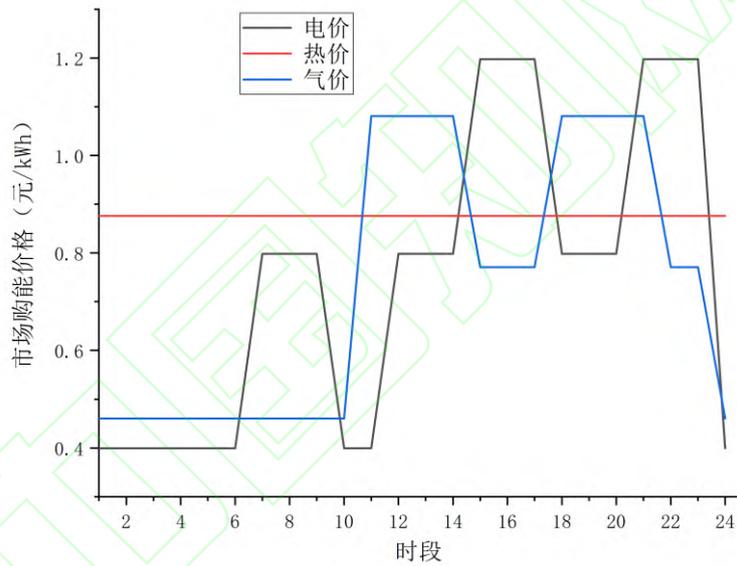


图4 能源市场中的能源交易价格

Fig.4 Energy transaction price in energy market

4.1 基础运行仿真结果分析

根据前文所述 IES 的 LCA 碳排放分析方法，计算碳排放系数，其计算过程的数据来源如表 1 所示。

表 1 碳排放计量参数来源

Tab.1 Measuring parameters of carbon emission sources

| 能源 | 循环 | 环节 | 参考文献 |
|----|------|------|---------|
| 风电 | 设备循环 | 生产 | [34,35] |
| 风电 | 设备循环 | 运输建设 | [34] |
| 风电 | 设备循环 | 退役 | [34,36] |

| | | | |
|----|------|-------|------------|
| 光伏 | 设备循环 | 生产 | [34,36] |
| 光伏 | 设备循环 | 运输建设 | [34] |
| 光伏 | 设备循环 | 退役 | [34,37] |
| 煤电 | 设备循环 | 全过程 | [38] |
| 煤电 | 能源循环 | 生产 | [39,40] |
| 煤电 | 能源循环 | 运输 | [39,40] |
| 煤电 | 能源循环 | 运行 | [39,40,41] |
| 气电 | 设备循环 | 全过程 | [38] |
| 气电 | 能源循环 | 生产、运输 | [42,43] |
| 气电 | 能源循环 | 运行 | [42] |
| 气电 | 能源循环 | 处理 | [42] |
| 储能 | 设备循环 | 全过程 | [44] |

系统其余运行参数设置参考文献[45],基准碳价设置为 50 元/吨。模型使用基于 MATLAB 的 IPOPT 工具箱进行求解。

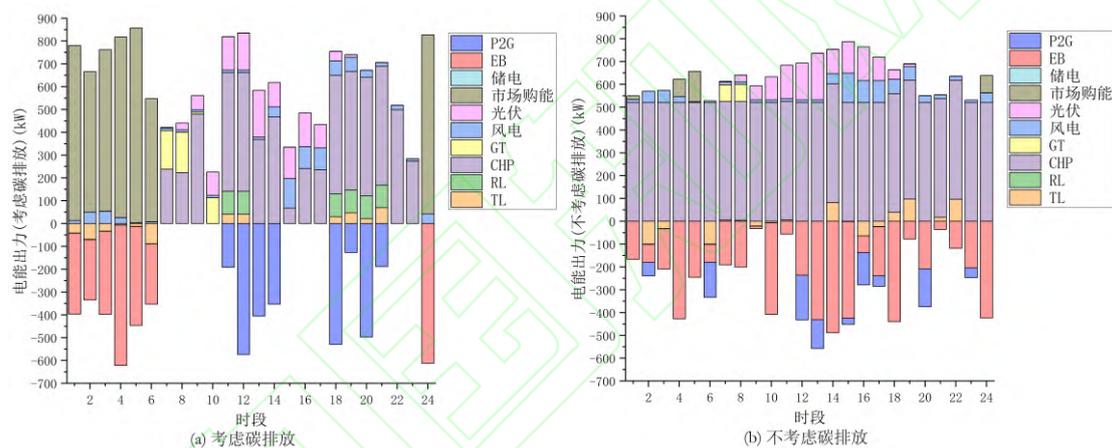


图 5 各时段综合能源系统中各设备的电能出力

Fig.5 Electric output of each equipment in the integrated energy system in each period

图 5 为综合能源系统在考虑/不考虑碳排放两种情况下电能的出力情况，从图中可以看出，两种情况对风电及光伏的出力影响不大，这是因为对弃风/光现象的惩罚会使得综合能源系统尽可能选择消纳可再生能源出力；由于 P2G 设备中的碳捕获装置可以吸附废气中的 CO₂，所以在考虑碳排放的场景下，系统会尽量增加 P2G 设备出力以减少碳排放量；在电价上涨同时又是用电高峰的时段（7-23 时段），EB 会停止工作以减少系统用电量；由于煤炭燃料的低成本等因素，CHP 设备在不考虑碳排放时会增加出力来增加系统发电量，但在考虑碳排放时会减少出力来减少系统碳排；在考虑碳排放的情况下，广义储能也在用能谷期储能，在用能峰期放能，发挥出了削峰填谷、平抑波动的作用。

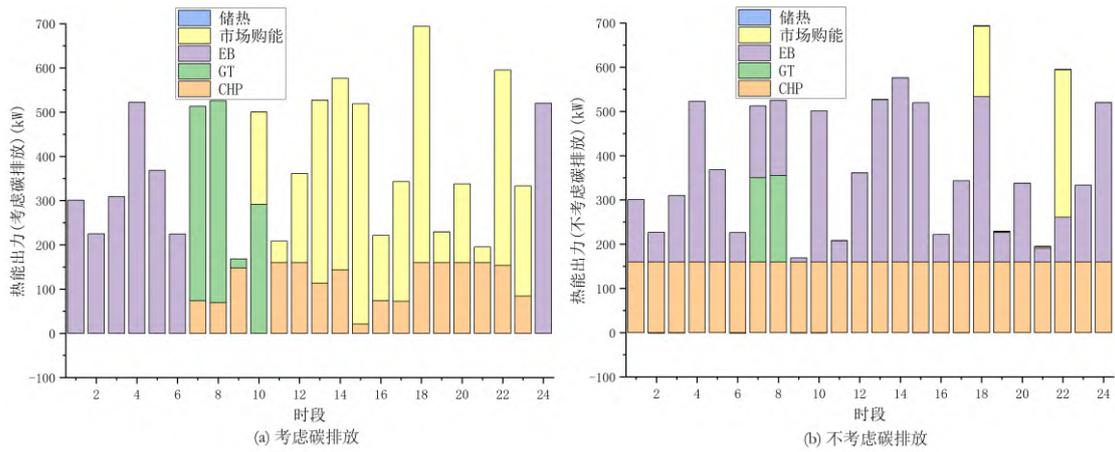


图 6 各时段综合能源系统中各设备的热能出力

Fig.6 Thermal output of each equipment in the integrated energy system in each period

图 6 为综合能源系统在考虑/不考虑碳排放两种情况下热能出力情况，从图中可以看出，由于 CHP 设备运行的碳排高而市场购能和 GT 设备运行的碳排低，所以在考虑碳排放的情况下，CHP 设备会减少出力，转而增加 GT 出力和市场购能；同时在用电高峰期，考虑碳排放的系统发电量会下降，此时 EB 设备会停止出力。

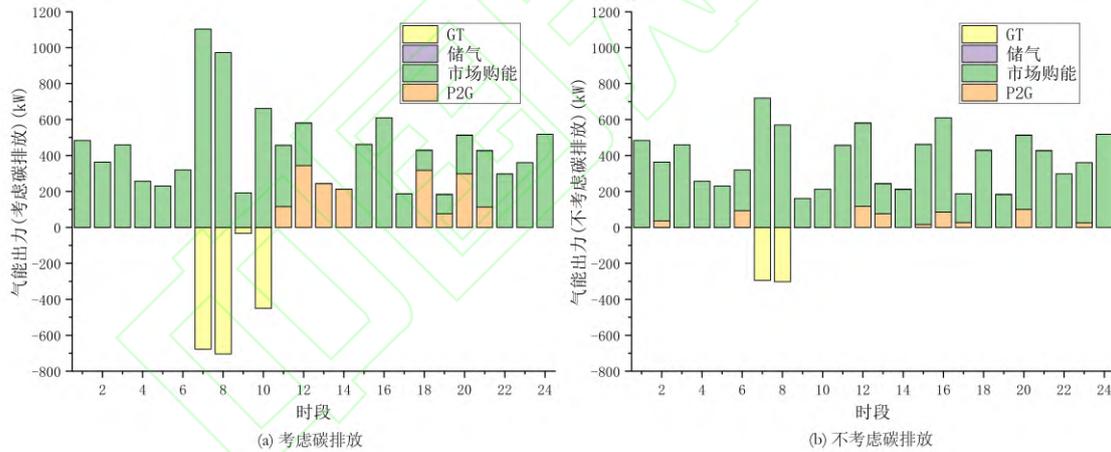


图 7 各时段综合能源系统中各设备的气能出力

Fig.7 Gas output of each equipment in the integrated energy system in each period

图 7 为综合能源系统在考虑/不考虑碳排放两种情况下气能的出力情况，从图中可以看出，在考虑碳排放的情况下，由于 GT 设备运行的碳排低，系统会倾向于增加 GT 设备的出力进行替代，同时增加 P2G 设备的出力以减少系统碳排。

综上所述，本文提出的考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化调度策略可以有效调度 IES 内设备，尽可能地消纳可再生能源出力，减少高碳排设备出力，增加低碳

排设备出力，在用电谷期调度广义储能设备充能，在用电高峰期放能，达到节能减排削峰填谷的目的。

4.2 引入广义储能/LCA 碳排放的有效性分析

为验证引入广义储能/LCA 碳排放参与 IES 运行的有效性，在前述基础场景上，设置对比场景 A：考虑碳排放同时考虑广义储能；场景 B：不考虑碳排放但考虑广义储能；场景 C 考虑碳排放但不考虑广义储能；场景 D：不考虑碳排放也不考虑广义储能。基于上述场景重新对模型进行求解，结果如图 8、图 9 及表 2 所示。

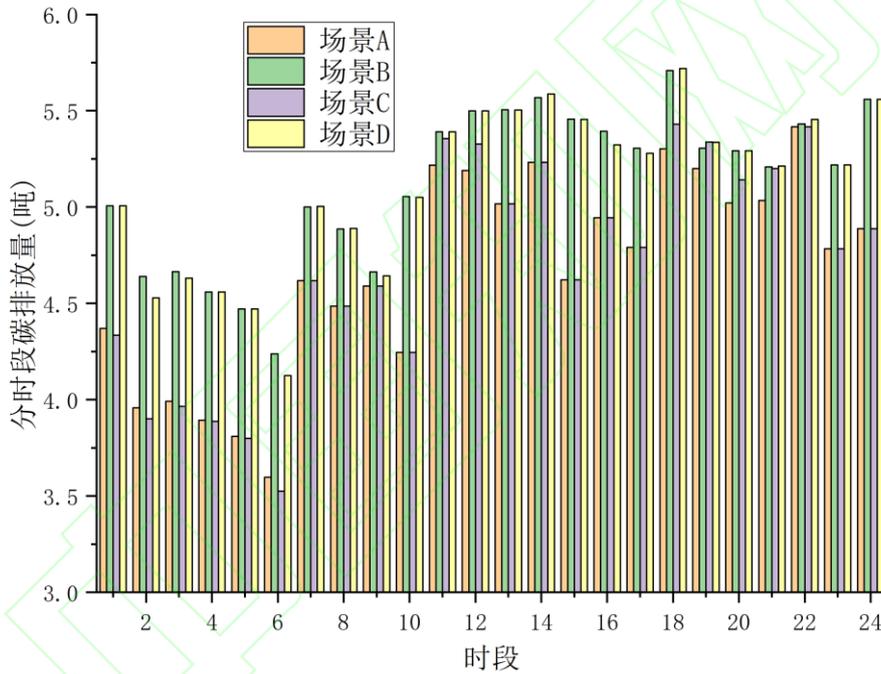


图 8 不同场景下综合能源系统的分时段碳排放量

Fig.8 Carbon emissions of integrated energy system by time period under different scenarios

从图 8 中可以看到，场景 A、C 的分时段碳排放量在大部分时段都小于场景 B、D 的分时段碳排放量，这是因为在优化目标函数中考虑碳排放成本会使系统减少如 CHP 等碳排放量大的设备出力，转而增加 P2G 等可以减少碳排放量的设备出力，导致系统的碳排放量减少。在 6 时前，电价较低，综合能源系统会调度广义储能设备进行充能，故此时场景 A 的碳排放量会略高于场景 C；从 12 时至 22 时，负荷侧需求增加，场景 A 中的广义储能设备

放能，但场景 C 中的综合能源系统只能通过增加产能设备的出力来满足负荷需求，故此时场景 A 的碳排放量小于场景 C。

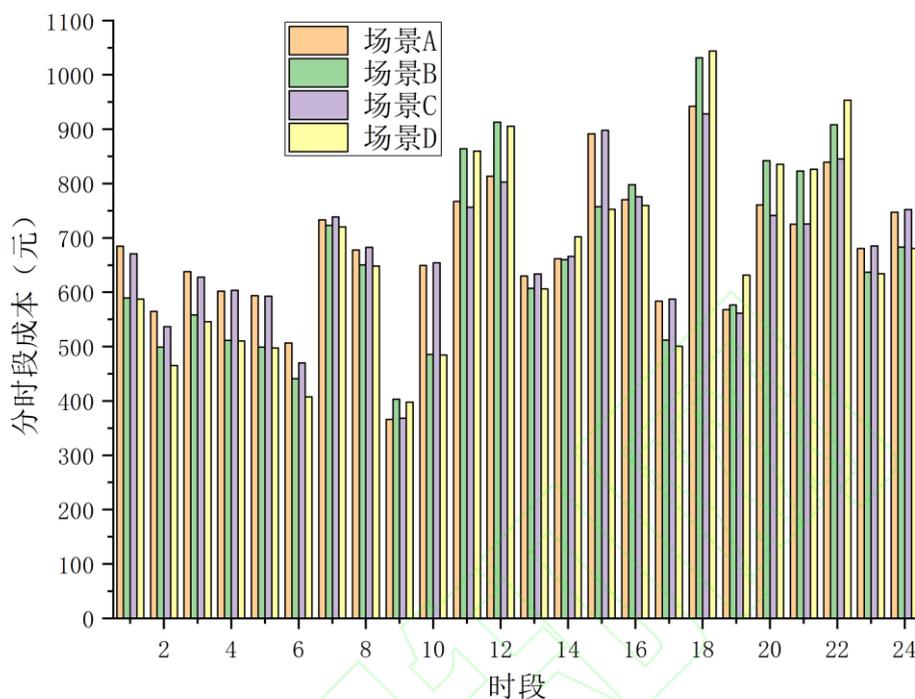


图9 不同场景下综合能源系统的分时段成本

Fig.9 Cost of integrated energy system by time period under different scenarios

从图9中可以看到，场景A、C的分时段成本在大部分时段都小于场景B、D的分时段成本，说明在优化函数中考虑系统碳排放成本不仅可以减少系统的碳排放量，还可以降低系统的运行成本。广义储能设备虽然可以减少系统的碳排放量，但调度广义储能设备的成本较高，故在用电谷期，广义储能设备充能，场景A的成本高于场景C；在用电峰期，广义储能设备放能，场景A的成本低于场景C。

表2 不同场景下综合能源系统的运行成本、碳排放成本和总成本

Tab.2 Operation cost, carbon emission cost and total cost of integrated energy system under different scenarios

| 场景 | 运行成本 | 碳排放成本 | 总成本 |
|-----|----------|---------|----------|
| 场景A | 16394.33 | 5610.81 | 22005.14 |
| 场景B | 15971.53 | 6458.71 | 22430.24 |
| 场景C | 16303.06 | 5813.38 | 22116.44 |
| 场景D | 15955.87 | 6557.03 | 22512.90 |

从表2中可以看到，场景B、D由于不考虑碳排放，故其运行成本（包括设备成本和市场购能成本）略低于场景A、C，但其碳排放成本高于场景A、C，最终总成本也高于场景

A、C。由于实际储能具有低运行成本、高碳排放，虚拟储能具有高运行成本、低碳排放的性质，不考虑广义储能的场景 C 的运行成本略低于场景 A，但其碳排放成本高于场景 A，最终总成本高于场景 A。综合上述分析，同时考虑广义储能和 LCA 碳排放会使综合能源系统的总成本最低，碳排放成本也最低。

综上所述，本文提出的考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化调度策略可以有效降低系统的碳排放量与总运行成本。

5 结论

本文为解决综合能源系统的运行中的碳计量和碳减排问题，提出了一种考虑广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略。首先，针对减碳问题，在 IES 中考虑可以减少传统储能设备在生产、退役处理等环节的碳排放的广义储能设备；其次，针对碳计量问题，使用可以精确计算综合能源系统的总碳排放量的 LCA 方法。最后，基于 LCA 碳排放建立了一种综合考虑可再生能源设备、能源转换设备、广义储能设备及能源市场交易的综合能源系统低碳优化运行模型。算例结果表明所提优化模型可以使系统碳减排 16.86%，同时也使总调度成本减少 2.31%。

本文提出的计及广义储能和 LCA 碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略能充分发挥各类能源形式之间的互补优势和协同效益，科学精准地减少系统的碳排放量，并有效促进综合能源系统的低碳发展。

参考文献：

- [1] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[J]. **中华人民共和国国务院公报**, 2020(35):7.
XI Jinping. Building on Past Achievements and Launching a New Journey for Global Climate Actions——Statement At the Climate Ambition Summit[J]. **Gazette of the State Council of the People's Republic of China**, 2020(35):7.
- [2] 杨龙, 张沈习, 程浩忠, 等. 区域低碳综合能源系统规划关键技术与挑战[J/OL]. **电网技术**:1-14. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1552.
YANG Long, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Regional low-carbon integrated energy system

- planning: key technologies and challenges[J/OL]. **Power System Technology**:1-14. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1552.
- [3] 朱建全,刘海欣,叶汉芳,等.园区综合能源系统优化运行研究综述[J].**高电压技术**,2022,48(7):2469-2482.
ZHU Jianquan, LIU Haixin, YE Hanfang, et al. Review on optimal operation of park-level integrated energy system[J]. **High Voltage Engineering**, 2022, 48(7):2469-2482.
- [4] 王永真,康利改,张靖,等.综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势[J].**太阳能学报**,2021,42(8):84-95.
WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system[J]. **Acta Energetica Solaris Sinica**, 2021, 42(8):84-95.
- [5] 齐先军,蒋中琦,张晶晶,等.考虑碳捕集与综合需求响应互补的综合能源系统优化调度[J/OL].**电力自动化设备**:1-13. DOI:10.16081/j.epae.202208026.
QI Xianjun, JIANG Zhongqi, ZHANG Jingjing, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering complementation of carbon capture and integrated demand response[J/OL]. **Electric Power Automation Equipment**:1-13. DOI:10.16081/j.epae.202208026.
- [6] 高强,王天群,高挺,等.碳源/汇作用下气电热综合能源系统多目标分层协调优化调度[J/OL].**电测与仪表**:1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220520.1934.012.html>
GAO Qiang, WANG Tianqun, GAO Ting, et al. Research on optimal dispatch method of gas-electric-heat integrated energy system considering the effect of carbon sources and sinks[J/OL]. **Electrical Measurement & Instrumentation**:1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220520.1934.012.html>
- [7] 王俐英,林嘉琳,董厚琦,等.计及阶梯式碳交易的综合能源系统优化调度[J].**系统仿真学报**,2022,34(7):1393-1404.
WANG Liying, LIN Jialin, DONG Houqi, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading[J]. **Journal of System Simulation**, 2022, 34(7):1393-1404.
- [8] Jamali A, Aghaei J, Esmaili M, et al. Self-scheduling approach to coordinating wind power producers with energy storage and demand response[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2020, 11(3):1210-1219.
- [9] Ahmad N, Jamshid A, Miadreza S K, et al. Assessing increased flexibility of energy storage and demand response to accommodate a high penetration of renewable energy sources[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2018, PP:1-1.
- [10] 吴杰康,蔡志宏,刘国新,等.含广义储能虚拟电厂电-气-热三阶段协同优化调度[J].**电网技术**,2022,46(5):1857-1868.
WANG Ruidong, WU Jiekang, CAI Zhihong, et al. Three-stage collaborative optimal scheduling of electricity-gas-heat in virtual power plant with generalized energy storage[J]. **Power System Technology**, 2022, 46(5):1857-1868.
- [11] 代琼丹,杨莉,林振智,等.考虑功能区差异性和虚拟储能的综合能源系统多元储能规划[J].**电力自动化设备**,2021,41(9):182-190.
DAI Qiongdan, YANG Li, LIN Zhenzhi, et al. Multi-storage planning of integrated energy system considering functional area difference and virtual storage[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(9):182-190.
- [12] Wang D, Meng K, Gao X, et al. Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in LV grids for voltage regulation[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2017:1-1.
- [13] 朱旭,杨军,李高俊杰,等.计及虚拟储能系统的区域综合能源系统优化调度策略[J].**电力建设**,2020,41(8):99-110.
ZHU Xu, YANG Jun, LI Gaojunjie, et al. Optimal dispatching strategy of regional integrated energy system

- considering virtual energy storage system[J]. **Electric Power Construction**, 2020, 41(8):99-110.
- [14] 刘洋,李立生,刘志伟,等.考虑广义储能集群参与的配电网协同控制策略[J].**电力建设**,2021,42(8):89-98.
LIU Yang, LI Lisheng, LIU Zhiwei, et al. Cooperative control strategy of distribution network considering generalized energy storage cluster participation[J]. **Electric Power Construction**, 2021, 42(8):89-98.
- [15] 张大海,负韞韵,王小君,等.考虑广义储能及光热电站的电热气互联综合能源系统经济调度[J].**电力系统自动化**,2021,45(19):33-42.
ZHANG Dahai, YUN Yunyun, WANG Xiaojun, et al. Economic dispatch of integrated electricity-heat-has energy system considering generalized energy storage and concentrating solar power plant[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(19):33-42.
- [16] 孙伟卿,张婕,叶磊,等.考虑广义储能的电力系统运行弹性优化[J].**系统仿真学报**,2021,33(4):962-972.
SUN Weiqing, ZHANG Jie, YE Lei, et al. Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage[J]. **Journal of System Simulation**, 2021, 33(4):962-972.
- [17] 吕祥梅,刘天琪,刘绚,等.考虑高比例新能源消纳的多能源园区日前低碳经济调度[J].**上海交通大学学报**,2021,55(12):1586-1597.
LÜ Xiangmei, LIU Tianqi, LIU Xuan, et al. Low-carbon economic dispatch of multi-energy park considering high proportion of renewable energy[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(12):1586-1597.
- [18] 祝荣,任永峰,孟庆天,等.基于合作博弈的综合能源系统电-热-气协同优化运行策略[J].**太阳能学报**,2022,43(4):20-29.
ZHU Rong, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Electricity-heat-gas cooperative optimal operation strategy of integrated energy system based on cooperative game[J]. **Acta Energetica Sinica**, 2022, 43(4):20-29.
- [19] 江婷,邓晖,陆承宇,等.电能量和旋转备用市场下电-热综合能源系统低碳优化运行[J].**上海交通大学学报**,2021,55(12):1650-1662.
JIANG Ting, DENG Hui, LU Chenyu, et al. Low-carbon optimal operation of an integrated electricity-heat energy system in electric energy and spinning reserve market[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(12):1650-1662.
- [20] 赵海彭,苗世洪,李超,等.考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J].**中国电机工程学报**,2022,42(2):573-589.
ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for park-level integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2022, 42(2): 573-589.
- [21] 黄景光,熊华健,李振兴,等.基于生命周期法和碳权交易的综合能源系统低碳经济调度[J].**电测与仪表**,2022,59(3):82-91.
HUANG Jingguang, XIONG Huajian, LI Zhenxing, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on life cycle method and carbon trading[J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**, 2022, 59(3):82-91.
- [22] 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.
- [23] 汪超群,陈懿,文福拴,等.电力系统碳排放流理论的若干问题及改进方法[J/OL].**电网技术**:1-11. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2071.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Some problems and improvement of carbon emission flow

- theory in power systems[J/OL]. **Power System Technology**:1-11. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2071.
- [24] 刘哲远,邢海军,程浩忠,等.考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J/OL].**高电压技术**:1-11. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20211780.
LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-Level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J/OL]. **High Voltage Engineering**:1-11. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20211780.
- [25] 耿晓倩,徐玉杰,黄景坚,等.先进压缩空气储能系统全生命周期能耗及二氧化碳排放[J/OL].**储能科学与技术**:1-11. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0129.
GENG Xiaoqian, XU Yujie, HUANG Jingjian, et al. Life cycle energy consumption and carbon emissions of advanced adiabatic compressed air energy storage[J/OL]. **Energy Storage Science and Technology**:1-11. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0129.
- [26] 文军,刘楠,裴杰,等.储能技术全生命周期度电成本分析[J].**热力发电**,2021,50(8):24-29.
WEN Jun, LIU Nan, PEI Jie, et al. Life cycle cost analysis for energy storage technology[J]. **Thermal Power Generation**, 2021, 50(8):24-29.
- [27] 向宁,王礼茂,屈秋实,等.基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J].**资源科学**,2021,43(4):745-755.
XIANG Ning, WANG Limao, QU Qiushi, et al. Comparison of emissions from offshore and onshore wind power systems based on life cycle assessment[J]. **Resources Science**, 2021, 43(4):745-755.
- [28] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等.考虑广义储能与火电联合调峰的日前-日内两阶段滚动优化调度[J].**电网技术**,2021,45(1):10-20.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Two-stage day-ahead and intra-day rolling optimization scheduling considering joint peak regulation of generalized energy storage and thermal power[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(1):10-20.
- [29] 李宏仲,房宇娇,肖宝辉.考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J].**电网技术**,2019,43(9):3130-3138.
LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on Optimized Operation of Regional Integrated Energy System Considering Generalized Energy Storage[J]. **Power System Technology**, 2019,43(9):3130-3138.
- [30] Wang Y, Pan Z, Zhang W, et al. Life cycle assessment of combustion-based electricity generation technologies integrated with carbon capture and storage: A review[J]. **Environmental Research. Section A**, 2022;207:112219.
- [31] Wang Z, Shi Y, Tang Y, 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):1614-26.
- [32] 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.
- [33] 丛琳,王冰,王楠,等.考虑需求侧多能源响应的虚拟电厂优化运行策略[J].**科学技术与工程**,2021,21(17):7133-7142.
CONG Lin, WANG Bing, WANG Nan, et al. Optimal operation strategy of virtual power plant considering integrated demand response in demand side[J]. **Science Technology and Engineering**, 2021, 21(17):7133-7142.
- [34] 郭敏晓. 风力、光伏及生物质发电的生命周期 CO₂ 排放核算[D].**清华大学**,2012.
GUO Minxiao. The life emissions cycle accounting of CO₂ for wind, PV and biomass power generation in China[D]. **Beijing:Tsinghua University**, 2012.

- [35] 杨东,刘晶茹,杨建新,等.基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析[J].**环境科学学报**,2015,35(3):927-934.
YANG Dong, LIU Jingru, YANG Jianxin, et al. Carbon footprint of wind turbine by life cycle assessment[J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2015, 35(3): 927-934.
- [36] 贾亚雷,王继选,韩中合,等.基于 LCA 的风力发电、光伏发电及燃煤发电的环境负荷分析[J].**动力工程学报**,2016,36(12):1000-1009.
JIA Yalei, WANG Jixuan, HAN Zhonghe, et al. Analysis on Environmental Load of Wind, PV and Coal-fired Power Generation Based on Life Cycle Assessment[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2016,36(12):1000-1009.
- [37] 翁琳,陈剑波.光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析[J].**上海理工大学学报**,2017,39(3):282-288.
WENG Lin, CHEN Jianbo. Environmental and Economic Analysis on the Carbon Dioxide Emissions Calculation in the Life Cycle of a Photovoltaic System[J]. **Journal of University of Shanghai for Science and Technology**, 2017,39(3):282-288.
- [38] Li X, Ou X, Zhang Xu, et al. Life-cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emission intensity of dominant secondary energy path ways of China in 2010. **Energy** 2013;50:15–23.
- [39] 王彦哲,周胜,姚子麟,等.中国煤电生命周期二氧化碳和大气污染物排放相互影响建模分析[J].**中国电力**,2021,54(8):128-135.
WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, YAO Zilin, et al. Life Cycle Modeling Analysis of the Interaction Between Carbon Dioxide and Air Pollutant Emissions of Coal Power in China[J]. **Electric Power**, 2021, 54(8): 128-135.
- [40] 夏德建,任玉珑,史乐峰.中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J].**统计研究**,2010,27(8):82-89.
XIA Dejian, REN Yulong, SHI Lefeng. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain[J]. **Statistical Research**,2010,27(8): 82-89.
- [41] 姜子英,潘自强,邢江,等.中国核电能源链的生命周期温室气体排放研究[J].**中国环境科学**,2015,35(11):3502-3510.
JIANG Ziyang, PAN Ziqiang, XING Jiang, et al. Greenhouse gas emissions from nuclear power chain life cycle in China[J]. **China Environmental Science**, 2015, 35(11): 3502-3510.
- [42] 董志强,马晓茜,张凌,等.天然气利用对环境影响的生命周期分析[J].**天然气工业**,2003,23(6):126-130.
DONG Zhiqiang, MA Xiaoqian, ZHANG Ling, et al. Life cycle assessment for influence of using natural gas on environment[J]. **Natural Gas Industry**, 2003, 23(6): 126-130.
- [43] 付子航.煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较[J].**天然气工业**,2010,30(9):100-104.
FU Zihang. Life cycle assessment of carbon emission from synthetic natural gas(SNG) and its horizontal comparison analysis[J]. **Natural Gas Industry**, 2010, 30(9): 100-104.
- [44] 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].**南京大学**,2017.
TAN Yanqiu. Life cycle greenhouse gas impacts of battery energy storage systems in power system applications[D]. **Nanjing University**, 2017.
- [45] 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.