

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404066

考虑碳捕集的风光火储综合能源系统 多目标运行优化

韩逸飞¹, 徐婧¹, 谢典², 冯征³

(1.太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2.中国华能集团有限公司能源研究院, 北京 100031;

3.国家电投集团综合智慧能源科技有限公司, 北京 100032)

[摘 要] 针对综合能源系统中碳排放与运行成本冲突的问题, 提出了一种考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多目标优化调度方法, 探讨了碳捕集设备对系统可再生能源消纳、碳排放与运行成本的影响。以某地区典型日的电负荷数据为参考, 以改进的 IEEE 30 节点系统为例, 以系统经济性为优化目标求解。结果表明: 相比无碳捕集的风光火和风光火储情景, 考虑碳捕集的综合能源系统在典型日的运行成本分别下降了 5.19% 和 2.86%; 碳排放量分别减少了 1 159 t 和 1 013 t; 风光消纳率分别提升了 5.01% 和 2.82%。以系统运行成本和碳排放量最小作为优化目标, 采用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 进行多目标寻优, 结合线性加权和法得到了不同目标权重下系统优化调度方案: 随着碳排放量目标权重的增加, 碳排放量逐渐减小, 系统运行成本增加, 单位碳减排成本也会增加; 当碳排放量目标权重从 0 增至 0.5 时, 系统碳排放量减少了 5 159 t, 运行成本增加了 205 466 元; 碳排放量目标权重从 0.4 增加到 0.5 时, 单位碳减排成本增加最小; 碳排放量目标权重在 [0.2, 0.4] 时, 减排效果最为明显。该计及碳捕集的多目标优化调度方法可为决策者在权衡系统碳排放和运行经济性时提供参考。

[关 键 词] 综合能源系统; 运行优化; 碳排放量; 多目标优化

[引用本文格式] 韩逸飞, 徐婧, 谢典, 等. 考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多目标运行优化[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 30-37. HAN Yifei, XU Jing, XIE Dian, et al. Multi-objective operation optimization of wind-solar-thermal-storage integrated energy system considering carbon capture[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 30-37.

Multi-objective operation optimization of wind-solar-thermal-storage integrated energy system considering carbon capture

HAN Yifei¹, XU Jing¹, XIE Dian², FENG Zheng³

(1.College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Energy Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China;

3.SPIC Integrated Smart Energy Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Against the conflict between carbon emission and operation cost in integrated energy systems, a multi-objective optimal scheduling method for wind-solar-thermal-storage integrated energy system considering carbon capture is proposed. It explores how carbon capture equipment affects the renewable energy consumption, carbon emissions, and operating costs. Taking the electric load data of a typical day in a specific area as a reference and the improved IEEE 30-bus system as the example, the system economy is optimized. The results show that, compared with the wind-solar-thermal and wind-solar-thermal-storage scenarios without carbon capture, the operating costs of the integrated energy system considering carbon capture reduces by 5.19% and

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51906171)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51906171)

第一作者简介: 韩逸飞 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域综合能源系统运行优化, hanyifei981215@163.com。

通信作者简介: 徐婧 (1989), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为区域综合能源系统能效分析与优化, xujing@tyut.edu.cn。

2.86% respectively on typical days, and the carbon emissions decrease by 1 159 t and 1 013 t, respectively. The consumption rate of wind and solar power generation increases by 5.01% and 2.82%, respectively. Moreover, with the minimum system operation cost and carbon emissions as the optimization objectives, the non-dominated sorting genetic algorithm II is used for multi-objective optimization, and the system scheduling optimization scheme under different target weights is obtained by combining with the linear weighted sum method. The study finds that, increasing the weight of carbon emission target reduces the carbon emissions but raises the system operation costs and the cost per unit of carbon emission reduction. Specifically, when the target weight of carbon emissions rises from 0 to 0.5, the carbon emissions decrease by 5 159 t and the operating costs increase by 205 466 yuan. The carbon emission reduction cost per unit increases the least when the target weight shifts from 0.4 to 0.5. The most significant emission reductions occur when the target weight is within [0.2, 0.4]. The multi-objective optimal scheduling method considering carbon capture proposed above provides a reference for decision makers when weighing system carbon emissions and operating economy.

Key words: integrated energy system; operating optimization; carbon emissions; multi-objective optimization

传统化石能源导致的环境污染问题日益严重^[1], 促使风、光等可再生能源逐步由补充性能源向主导能源过渡^[2-3]。在大规模消纳新能源背景下兴起的综合能源系统 (integrated energy system, IES) 以能源高效清洁利用为目标^[4], 通过对煤、风、光、气等多能源的科学协调与调度^[5], 实现不同品位能源的梯级利用, 对促进我国能源系统低碳转型, 构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源体系^[6], 实现“双碳”目标具有重大战略意义^[7-8]。

近年来, 许多专家学者对 IES 的运行优化问题开展了卓有成效的研究^[9-11]。如文献[12]分析了火电机组调峰过程及弃风弃光对系统的影响, 提出了一种 IES 经济效益最大化的调度策略; 文献[13]提出了基于需求响应的 IES 模型和多时间尺度运行优化方法; 文献[14]构建了园区 IES 的源-网-荷-储的数学模型, 提出了一种可满足不同利益主体目标需求的经济、低碳的运行策略; 文献[15]提出了一种电-热 IES 能流计算方法, 以系统运行成本与污染物排放最小为目标, 实现了能源的高效清洁供应。然而, 上述研究中并未考虑储能设备和碳捕集等灵活性资源对系统的运行成本、风光消纳率及碳排放的影响。

碳捕集^[16]与封存^[17]是助力实现零碳排放和负碳排放的关键技术之一^[18]。近年来, 考虑碳捕集参与 IES 调度的研究屡见不鲜。如文献[19]提出了基于碳捕集和电转气技术的电-气 IES 零碳排放日前调度; 文献[20]提出了碳捕集电厂-电转气-燃气发电机组协同利用框架, 有效降低了虚拟电厂的运行成本和碳排放量; 文献[21]考虑了碳捕集电厂的能量转移特性与风电出力预测精度随预测时间尺度的变化, 研究了不同时间尺度下碳捕集电厂的调度策略; 文献[22]通过挖掘源-荷可调节性资源, 提出

了计及碳捕集低碳特性的源-荷多时间尺度调度方法。上述研究多以系统的经济性或碳排放量为单目标进行优化研究, 未深入探讨当系统运行成本与碳排放量目标冲突时如何决策的问题。

针对上述问题, 本文以风光火储 IES 为研究对象, 基于改进的 IEEE 30 节点系统, 对比分析了考虑碳捕集对 IES 调度成本、风光消纳及碳排放量的影响; 通过动态调整系统运行成本及碳排放量之间的权重, 采用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 进行多目标寻优, 分析不同目标权重下系统运行成本与碳排放量之间的变化关系, 为决策者在风光火储 IES 运行优化时权衡碳排放与运行经济性提供参考。

1 IES 系统模型构建

本文构建的考虑碳捕集的风光火储综合能源系统为区域级, 是以满足该区域的用电需求为背景, 以系统运行的经济性和碳排放量最小化为目标。通过对各类型供能设备、储能设备和碳捕集设备之间的协调运行优化, 实现系统在经济运行的同时兼顾碳排放量。系统结构如图 1 所示。

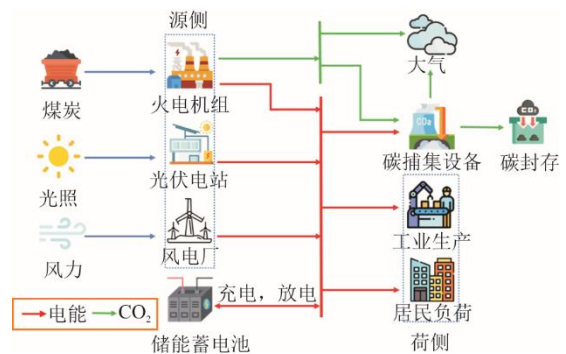


图 1 区域综合能源系统示意
Fig.1 Schematic diagram of the regional integrated energy system

1.1 目标函数

以系统运行成本最小为目标, 考虑火电机组运行燃料成本、风电运行成本、光伏电站运行成本、储能系统运行成本、弃风弃光成本、碳交易成本、碳封存成本。

$$\min C = C_f + C_w + C_s + C_{st} + C_q + C_e + C_k \quad (1)$$

式中: C 为系统的总运行成本; C_f 为火电机组燃料成本; C_w 为风力发电的运行成本; C_s 为光伏发电的运行成本; C_{st} 则为储能系统运行成本; C_q 为系统的弃风弃光成本; C_e 为碳交易成本; C_k 为碳封存成本。

1) 火电机组运行成本计算式为^[23]:

$$C_f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n C_{\text{coal}} (a_i P_{gi,t}^2 + b_i P_{gi,t} + c_i) \quad (2)$$

式中: n 为节点内火电机组数; T 为调度时段数, 本文取 $T=24$; $P_{gi,t}$ 为 t 时刻第 i 组火电机组的出力; C_{coal} 为单位标煤价格; a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 组火电机组煤耗系数。

2) 风电运行成本为:

$$C_w = \sum_{t=1}^T P_{\text{wind},t} C_{\text{wind}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{wind},t}$ 为 t 时刻风电出力; C_{wind} 为风电成本系数。

3) 光伏成本为^[12]:

$$C_s = \sum_{t=1}^T P_{\text{solar},t} C_{\text{solar}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{solar},t}$ 为 t 时刻光伏出力; C_{solar} 为光电成本系数。

4) 储能蓄电池成本为^[12]:

$$C_{st} = \sum_{t=1}^T (P_{dc,t} + P_{c,t}) C_{\text{stor}} \quad (5)$$

式中: $P_{c,t}$ 、 $P_{dc,t}$ 分别为 t 时刻储能蓄电池设备的充放电功率; C_{stor} 为储能成本系数。

5) 弃风弃光成本^[22]:

$$C_q = \sum_{t=1}^T (P_{w,t} - P_{\text{wind},t} + P_{s,t} - P_{\text{solar},t}) C_{\text{qw}} \quad (6)$$

式中: $P_{w,t}$ 、 $P_{s,t}$ 分别为 t 时刻风电和光伏的最大出力; C_{qw} 为弃风弃光惩罚系数。

6) 碳交易成本为^[21]:

$$C_e = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sigma_e (E_S P_{gi,t} - \lambda_c P_{gi,t} - P_{gi,t} E_S \theta_t \eta_b) \quad (7)$$

式中: σ_e 、 E_S 、 λ_c 、 θ_t 、 η_b 分别为碳交易价格、碳排放强度、碳配额系数、 t 时段烟气分流比和碳捕集效率。

7) 碳封存成本为^[20]:

$$C_k = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n P_{gi,t} E_S K_S \theta_t \eta_b \sigma_e \quad (8)$$

式中: K_S 为封存单位二氧化碳成本。

1.2 运行约束

IES 调度时需协调风电、光伏、火电与储能的出力, 要综合考虑多个约束条件。

1) 火电机组出力约束为:

$$P_{i,\min} \leq P_{gi,t} \leq P_{i,\max} \quad (9)$$

式中: $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为火电机组最小容量和最大容量。

2) 火电机组爬坡率约束为:

$$-R_{i,d} \leq P_{gi,t} - P_{gi,t-1} \leq R_{i,u} \quad (10)$$

式中: $R_{i,u}$ 、 $R_{i,d}$ 分别为火电机组升降负荷速率, 本文取 $R_{i,u}=R_{i,d}=1.5\%$ 额定容量。

3) 风电及光伏出力约束为:

$$0 \leq P_{\text{wind},t} \leq P_{\text{wind},\max} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{\text{solar},t} \leq P_{\text{solar},\max} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{wind},\max}$ 为风电场的额定装机容量; $P_{\text{solar},\max}$ 为光伏电站的额定装机容量。

4) 储能系统充放电功率约束为:

$$0 \leq P_{c,t} \leq P_{c,\max} \quad (13)$$

$$-P_{dc,\max} \leq P_{dc,t} \leq 0 \quad (14)$$

式中: $P_{c,\max}$ 、 $P_{dc,\max}$ 分别为储能设备的最大充、放电功率。

同时, 由于储能设备无法同时充放电, 则需满足约束:

$$P_{dc,t} P_{c,t} = 0 \quad (15)$$

5) 储能电池荷电比例约束为:

$$S_{\text{SOC},\min} \leq S_{\text{SOC},t} \leq S_{\text{SOC},\max} \quad (16)$$

$$S_{\text{SOC},t} = S_{\text{SOC},t-1} + (P_{c,t} \eta_c + P_{dc,t} / \eta_{dc}) / C_{\text{ap},st} \quad (17)$$

式中: $S_{\text{SOC},t}$ 为 t 时段储能系统的荷电比例; $S_{\text{SOC},\min}$ 和 $S_{\text{SOC},\max}$ 分别为储能系统荷电比例下限和上限; $C_{\text{ap},st}$ 为储能系统的装机容量; η_c 和 η_{dc} 分别为储能系统充电效率和放电效率。

整个调度周期内储能系统内部充电功率之和等于放电功率之和:

$$\sum_{t=1}^T (P_{c,t} \eta_c + P_{dc,t} / \eta_{dc}) = 0 \quad (18)$$

6) 电网功率平衡约束为:

$$P_{\text{wind},t} + P_{\text{solar},t} + P_{gi,t} + P_{dc,t} - P_{c,t} = P_{el,t} + P_{y,t} \quad (19)$$

式中: $P_{el,t}$ 为系统在 t 时段的电负荷; $P_{y,t}$ 为 t 时刻

碳捕集的运行能耗。本文仅考虑碳捕集的运行能耗，其数学表达式为^[22]：

$$P_{y,t} = \sum_{i=1}^n P_{gi,t} E_s \theta_i \eta_b \sigma_s \quad (20)$$

$$0 \leq \theta_i \leq 1 \quad (21)$$

式中： σ_s 为单位捕碳量能耗。

7) 潮流安全约束为：

$$0 \leq P_{l,t} \leq P_{l,max} \quad (22)$$

式中： $P_{l,t}$ 为 t 时段线路 L 的输电功率； $P_{l,max}$ 为线路 L 的最大输电容量。

8) 可再生能源渗透率：

$$\lambda_{re} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{wind,t} + P_{solar,t})}{\sum_{t=1}^T P_{el,t}} \quad (23)$$

式中： λ_{re} 为可再生能源渗透率。

2 算例分析

2.1 案例系统描述

以改进的 IEEE 30 节点系统^[24]为案例进行分析，其结构如图 2 所示。该系统有 30 个并网节点，41 条支路。设置节点 2、11 和 13 为火电机组，其装机容量及模型参数见表 1^[12]。节点 8 为风电机组群，装机容量为 600 MW；节点 20 为光伏电站，装机容量为 300 MW；节点 5 为蓄电池储能电站，初始储能量为 40 MW·h，额定存储容量为 200 MW·h。系统各发电设备的模型参数见表 2^[12, 20-23]。

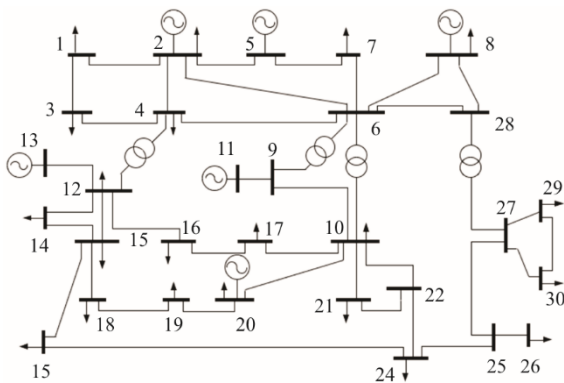


图 2 IEEE 30 节点系统拓扑图

Fig.2 Topology diagram of the IEEE 30-bus system

表 1 火电机组参数

Tab.1 Parameters of the thermal power unit

编号 节点	$P_{i,max}/$ MW	$P_{i,min}/$ MW	$a_i/$ (t·MW ⁻²)	$b_i/$ (t·MW ⁻¹)	$c_i/$ (t·MW ⁻¹)	$R_{i,u}/R_{i,d}$ (MW·min ⁻¹)
1 2	300	100	0.000 130 7	0.232 22	16.007 26	4.5
2 11	300	100	0.000 130 7	0.232 22	16.007 26	4.5
3 13	600	200	0.000 016 9	0.276 01	11.461 96	9.0

表 2 模型主要参数
Tab.2 Main parameters of the model

项目	取值
C_{wind} 、 C_{solar} 、 $C_{stor}/(\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$	30.00、40.00、83.20
标煤单价 $C_{coal}/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	600.00
封存单位 CO_2 价格 $K_s/(\text{\$} \cdot \text{t}^{-1})$	4.89
储能电池 $S_{SOC,min}/\%$ 、 $S_{SOC,max}/\%$	20.00、80.00
储能系统 η_c 、 $\eta_d/\%$	90.00、90.00
单位捕碳量能耗 $\sigma_s/(\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1})$	0.27
碳捕集效率 η_b	0.90
单位弃风弃光惩罚成本 $C_{qw}/(\text{\$} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$	50.00
碳排放配额系数 $\lambda_o/(\text{t} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.70
碳交易价格 $\sigma_c/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	100.00
碳排放强度 $E_s/(\text{t} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.816

选取某地区典型日的 24 h 风、光出力和电负荷数据进行分析，结果如图 3 和图 4 所示。

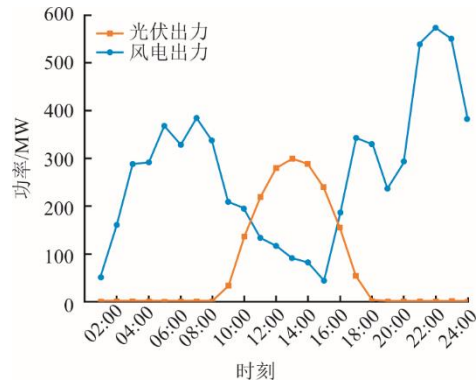


图 3 风电光伏出力

Fig.3 Output curves of the wind power photovoltaic unit

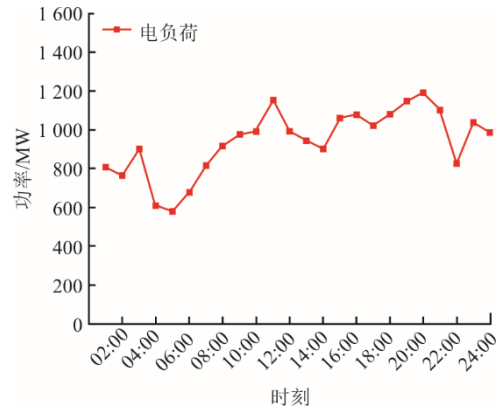


图 4 典型日负荷曲线

Fig.4 Typical daily load curve

2.2 系统运行优化结果

为了解考虑碳捕集对风光火储 IES 运行经济性、风光消纳与碳排放的影响，本文设置如下对比调度情景。

情景 1：考虑风光火的 IES 运行优化；

情景 2：考虑风光火储的 IES 运行优化；

情景 3：考虑碳捕集的风光火储 IES 优化。

以火电机组爬坡率和出力、风电储系统出力、电功率平衡等作为约束条件,以系统运行成本最低为优化目标,采用 Yalmip 工具调用 Gurobi 求解器进行求解。在典型日负荷下,3 个情景下 IES 设备调度出力如图 5—图 7 所示。

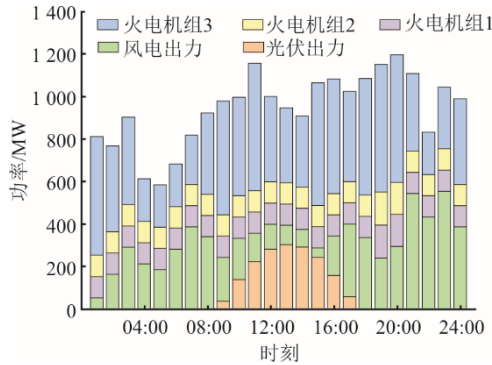


图 5 情景 1 典型日风光火 IES 设备出力

Fig.5 Output of the wind-solar-thermal IES equipment in Case 1 on a typical day

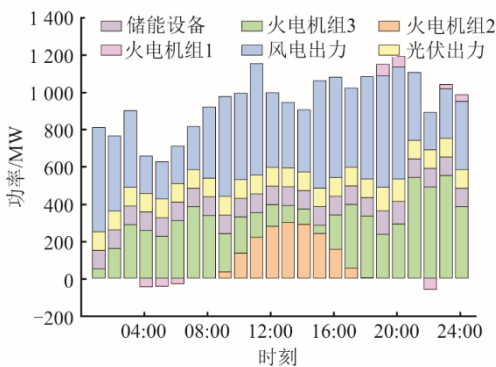


图 6 情景 2 典型日风光火储 IES 设备出力

Fig.6 Output of the wind-solar-thermal-energy storage IES equipment in Case 2 on a typical day

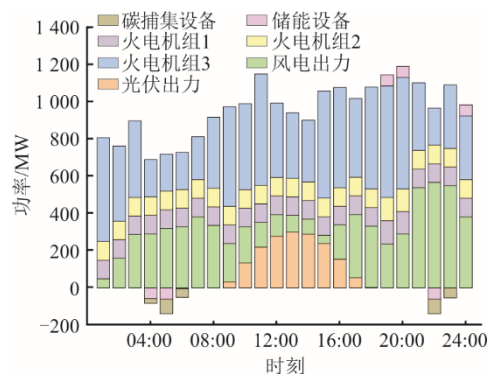


图 7 情景 3 典型日考虑碳捕集风光火储 IES 设备出力

Fig.7 Output of the IES equipment of wind-solar-thermal-energy storage with carbon capture in Case 3 on a typical day

由图 5—图 7 可见,3 种调度情景下系统主要依靠调节火电机组 3 的出力,来满足电功率平衡约束,支撑风电与太阳能发电的消纳。在情境 2 中当蓄电池

参与调度时,蓄电池在 04:00—06:00 和 22:00 充电,用以消纳更多的风电;在 19:00、20:00、23:00、24:00 点放电,以满足在火电机组升负荷速率受限时,快速供电的需求。在情景 3 中考虑碳捕集时,碳捕集设备在 04:00—06:00、22:00—23:00 开始工作,在这些时段电负荷需求较低(图 3),但风电出力较大(图 2),蓄电池不足以消纳风电时,碳捕集设备开始工作,以进一步实现风电消纳。

2.3 风电消纳与碳排放影响分析

图 8 为 3 个情景下系统的弃风量随时间变化情况。由图 8 可见,弃风主要发生在 04:00—06:00 和 22:00,其中无储能装置的情景 1 的弃风、弃光量最大,蓄电池参与调度的情景 2 次之,计及碳捕集的调度情景 3 弃风、弃光量最小。3 个情景的风光消纳率分别为 94.37%、96.56%、99.38%。结合 3 个情景典型日负荷日出力(图 5—图 7)可以看到,在发生弃风的时段,情景 2 和情景 3 的储能设备处于充电状态,增加了风电的消纳,提高了风电消纳率。相比于情景 2,在电力富裕时段,情景 3 碳捕集设备开始工作,在减少碳排放的同时,进一步提高了风电消纳率。

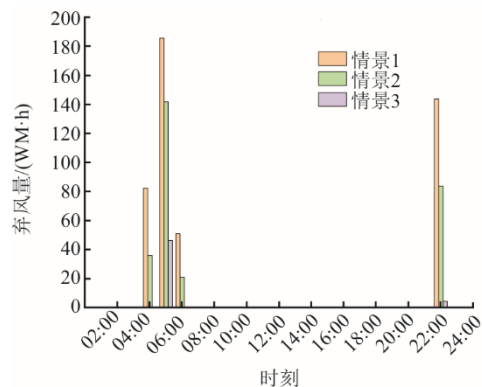


图 8 弃风量随时间分布情况

Fig.8 Distribution of wind power abandonment with time

3 个情景下系统风电消纳及碳排放量见表 3。由表 3 可见,相比于情景 1 与情景 2,考虑碳捕集的调度情景 3 典型日的碳排量分别减少了 1 159、1 013 t,即降低了 9.58%、8.47%。由于碳捕集的投运,情景 3 在提升系统可再生能源渗透率的同时,有效降低了碳排放量。

2.4 系统运行成本分析

3 个情景下系统运行成本见表 4。由表 4 可见,情景 3 的总运行成本相比于情景 1 和情景 2 分别减少了 254 567 元和 137 079 元,即日运行成本下降了 5.19%

和 2.86%。结合各项成本可以看出，情景 3 高风光消纳率增加了风电的发电成本；但消纳的风电被碳捕集设备消耗，减少了系统的碳排放量，降低了弃风、弃光成本和碳交易成本，从而降低系统运行的总成本。

表 3 不同情景下风电消纳及碳排放量
Tab.3 Carbon emissions and wind power consumption in different cases

参数	情景 1	情景 2	情景 3
可再生能源渗透率/%	34.30	35.10	36.13
风电消纳率%	94.37	96.56	99.38
碳排放量/t	12 102	11 956	10 943

表 4 不同情景下系统运行成本 单位：元
Tab.4 Operating costs of the system in different cases

成本	情景 1	情景 2	情景 3
总成本	4 903 524	4 786 036	4 648 957
燃料成本	4 313 645	4 228 467	4 247 991
风电成本	181 182	186 582	193 537
光伏成本	68 188	68 188	68 188
储能成本	0	29 952	29 952
弃风弃光成本	168 457	102 883	18 423
碳封存成本	0	0	26 009
碳交易成本	172 052	169 963	64 857

需要说明的是，由式(7)所示的碳捕集与封存的成本可知，碳捕集与运行经济性是两个互相冲突的目标。当以系统运行经济性为单目标进行运行优化时，只在风电出力过剩且储能设备无法消纳时，碳捕集设备才投入运行（图 6）。系统对风电的消纳率达到最高后，想进一步减小系统的碳排放量时，则需运行成本较高的火电机组来为碳捕集设备提供能耗。因此，当权衡碳排放量与运行成本时，需进一步讨论以系统运行成本和碳排放量为优化目标的多目标优化问题。

3 计及碳捕集的多目标运行优化

为解决实际调度中，系统运行经济性和碳排放的权重问题，以系统典型日的运行成本和碳排放量最小为优化目标，采用 NSGA-II 对计及碳捕集的风光火储 IES 进行多目标优化求解，获得其多目标帕累托解集。再结合线性加权和法，得到不同目标权重下的碳减排量与运行成本。

3.1 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法^[25]是一种基于帕累托最优概念的多目标优化算法，1995 年首先由 Deb 等人提出，引入了分层和拥挤度的概念，在多目标优化问题中得到了广泛应用。该算法流程如图 9 所示^[26]。

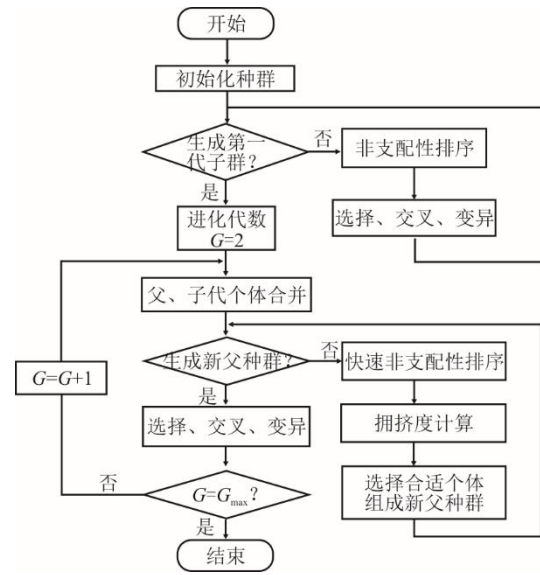


图 9 NSGA-II 算法流程

Fig.9 Flow chart of the NSGA-II algorithm

3.2 多目标优化函数

系统优化目标为运行成本和碳排放量。其中，系统运行成本的目标函数见式(1)，碳排放量 E 的目标函数数学表达式为：

$$\min E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (E_S P_{gi,t} - P_{gi,t} E_S \theta_i \eta_b) \quad (24)$$

3.3 多目标优化决策方法

1) 归一化

为消除运行成本和碳排放量的量纲差异，数据需进行归一化处理：

$$X_{scale} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (25)$$

式中： X_{scale} 为归一化的结果； X 为原始数据集； X_{max} 、 X_{min} 分别为数据集中的最大值和最小值。

2) 线性加权和法

设 W 为运行成本和碳排放量的综合优化目标，取 W 值最小作为决策方案。

$$W = \lambda_1 X_C + \lambda_2 X_E \quad (26)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (27)$$

式中： λ_1 、 λ_2 分别为运行成本和碳排放量的权重系数，取值范围为[0, 1]。

3.4 多目标优化结果分析

以运行成本及碳排放量为目标，采用 NSGA-II 算法进行求解，种群大小设置为 100，迭代次数为 300，交叉率设置为 0.8，变异率设置为 0.2。图 10 为 IES 多目标帕累托解集。由图 10 可知，运行成本与碳排放量呈负相关关系，即随着碳排放量的减小，运行成本会逐渐增加。碳捕集设备虽然能减少碳排放量，

但会增加系统的运行成本。

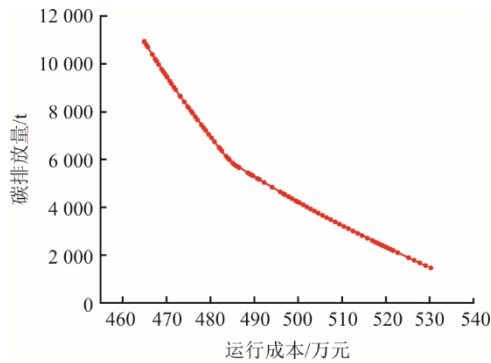


图 10 IES 多目标帕累托解集

Fig.10 Multi-objective Pareto solution set of IES

当碳排量与运行经济性之间的权重由 0 变化到 1 时, 系统的运行成本与碳排放量见表 5。由表 5 可见: 随着碳排放量权重 λ_2 的增加, 系统运行成本增加, 单位碳减排成本逐渐上升; 当 λ_2 从 0.4 增加到 0.5 时, 单位碳减排成本增加最小, 仅由 39 元/t 增至 40 元/t; 当 λ_2 在[0.5, 1.0)之间变化时, 单位碳减排成本增加较快; 当 λ_2 从 0 增加到 0.5 时, 碳排放量减小了 5 159 t, 运行成本增加了 205 466 元; 而当 λ_2 从 0.5 增加到 1.0 时, 碳排放量仅减小了 4 316 t, 运行成本却增加了 448 076 元; 当 λ_2 从 0.2 增加到 0.4 时, 碳排放量减小了 4 669 t, 降低了 42.67%, 碳减排效果最为明显。因此, 想获得明显减排效果时, 可考虑 λ_2 在[0.2, 0.4]选取。

表 5 不同目标权重下 IES 的碳排放量与运行成本

Tab.5 The carbon emissions and operating costs of the IES with different target weights

λ_1	λ_2	运行成本/元	碳排放量/t	运行成本变化/元	碳排放变化量/t	单位碳减排成本/(元·t ⁻¹)
1.0	0	4 649 022	10 943	0	0	0
0.8	0.2	4 657 171	10 699	8 149	-244	33
0.6	0.4	4 840 948	6 030	191 926	-4 913	39
0.5	0.5	4 854 488	5 784	205 466	-5 159	40
0.4	0.6	5 064 907	3 573	415 885	-7 370	56
0.2	0.8	5 251 772	1 893	602 750	-9 050	67
0	1.0	5 302 564	1 468	653 542	-9 475	69

4 结 论

本文分析了碳捕集对风光火储 IES 的可再生能源消纳、碳排放量和运行成本的影响, 以运行成本和碳排放量最小为优化目标, 结合 NSGA-II 算法与线性加权和法进行多目标寻优, 得到不同目标权重下系统的运行成本, 主要结论如下。

1) 考虑碳捕集调度时, 可有效提升 IES 系统的风电消纳率, 并减少系统碳排放量。相比于风光火和风光火储调度情景, 考虑碳捕集的风光火储

IES 碳排放量分别降低了 9.58% 和 8.47%, 风光消纳率提升了 5.01% 和 2.82%。

2) 当以运行成本和碳排放量最小为优化目标进行多目标运行优化时, 碳排放权重的增加会增加系统的运行成本与单位碳减排成本。当碳排放权重从 0.4 增加到 0.5 时, 单位碳减排成本增加最小; 碳排放量目标权重在[0.2, 0.4]之间时, 减排效果最为明显。

3) 综合考虑运行成本和碳排放成本时, 碳排放权重设置在(0, 0.5], 碳减排量较大, 运行成本增加量较少, 单位减排成本较小, 可有效兼顾系统运行的低碳与经济性的。

[参 考 文 献]

- [1] 崔杨, 张家瑞, 仲悟之, 等. 计及电热转换的含储热光热电站与风电系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6482-6494.
- [2] CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal scheduling of concentrating solar power plant with thermal energy storage and wind farm considering electric-thermal conversion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6482-6494.
- [3] KATARAY T, NITESH B, YARRAM B, et al. Integration of smart grid with renewable energy sources: opportunities and challenges: a comprehensive review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 58, 103363.
- [4] 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.
- [5] ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [6] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [7] ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [8] MENG Y, YISHENG L. A two-stage robust configuration optimization framework for integrated energy system considering multiple uncertainties[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105120.
- [9] 胡福年, 张彭成, 周小博, 等. 计及灵活性资源的综合能源系统源荷协调优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 2-13.
- [10] HU Funian, ZHANG Pengcheng, ZHOU Xiaobo, et al. Coordinated optimal scheduling of source and load of integrated energy system considering flexible resources[J]. China Electric Power, 2014, 57(5): 2-13.
- [11] 朱健全, 刘海欣, 叶汉芳, 等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. 高压技术, 2022, 48(7): 2469-2482.
- [12] 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.

- [8] 臧海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 等. 电-热-气混联综合能源系统状态估计研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 187-199.
ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, et al. Review and prospect of research on state estimation of electric thermal gas hybrid integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 187-199.
- [9] 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 dispatching of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [10] 葛磊蛟, 李京京, 李昌禄, 等. 面向零碳园区的综合能源系统优化运行技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1821-1835.
GE Leijiao, LI Jingjing, LI Changlu, et al. An overview of integrated energy system optimal operation technology for zero-carbon parks[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1821-1835.
- [11] 邱瑛, 陆帅, 陆海, 等. 综合能源系统灵活性: 基本内涵、数学模型与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 16-43.
QIU Yue, LU Shuai, LU Hai, et al. Flexibility of integrated energy system: basic connotation, mathematical model and research framework[J]. Power System Automation, 2022, 46(17): 16-43.
- [12] 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2270-2280.
YE Ze, LI Xiangqi, JIANG Fei, et al. Hierarchical optimization economic dispatch of wind-solar-thermal-storage combined system considering optimal energy abandonment rate[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2270-2280.
- [13] LI X, WANG H. Integrated energy system model with multi-time scale optimal dispatch method based on a demand response mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 445: 141321.
- [14] 涂春雷, 毛知新. 多目标优化的园区级低碳综合能源系统运行策略[J]. 电气应用, 2023, 42(2): 17-27.
TU Chunlei, MAO Zhixin. Multi-objective optimization of park-level low-carbon integrated energy system operation strategy[J]. Electrical Applications, 2023, 42(2): 17-27.
- [15] 董亮, 黄励, 刘万根, 等. 电-热综合能源系统多目标优化[J]. 电气自动化, 2023, 45(4): 54-56.
DONG Liang, HUANG Li, LIU Wange, et al. Multi-objective optimization of electricity-heat integrated energy system[J]. Electrical Automation, 2023, 45(4): 54-56.
- [16] 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): 2537-2543.
MI Jianfeng, MA Xiaofang. An analysis of the development trend of CCUS technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2543.
- [17] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
LI Zheng, LI Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [18] GERBY M K L, KYUNGJAE T, CHANGSOO K, et al. Toward economical application of carbon capture and utilization technology with near-zero carbon emission[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7482-7482.
- [19] 李卫东, 张力兵, 齐大伟, 等. 考虑零碳排放的电-气综合能源系统日前优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 145-151.
LI Weidong, ZHANG Libing, QI Dawei, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas integrated energy system considering zero carbon emission[J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(6): 145-151.
- [20] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3534-3545.
SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, et al. Optimal scheduling of carbon capture and waste incineration virtual power plant considering power-to-gas coordination[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3534-3545.
- [21] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 考虑碳捕集电厂能量转移特性的弃风消纳多时间尺度调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 946-961.
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. A multi-time scale scheduling strategy for wind curtailment considering the energy transfer characteristics of carbon capture power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 946-961.
- [22] 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. Source-load multi-time scale scheduling method for power system with wind power considering low carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5869-5886.
- [23] 马大卫, 王正风, 何军, 等. 安徽煤电深度调峰下机组煤耗和污染物排放特征研究[J]. 华电技术, 2019, 41(12): 1-7.
MA Dawei, WANG Zhengfeng, HE Jun, et al. Study on the coal consumption and pollutant discharge characteristics of coal-fired units participating in deep peak-regulating operation in anhui province[J]. Huadian Technology, 2019, 41(12): 1-7.
- [24] 刘路登, 陈天宇, 张炜, 等. 基于差分进化算法的电力多目标调度运行优化方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(19): 184-188.
LIU Ludeng, CHEN Tianyu, ZHANG Wei. Research and Application of machine learning algorithms based on multi-text data mining of power network regulation business[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(19): 184-188.
- [25] PRASAD D D, KUMAY D S, BASU M. Application of NSGA-II for environmental constraint economic dispatch of thermal-wind-solar power system[J]. Renewable Energy Focus, 2022, 43: 239-245.
- [26] 高维东, 吕丽霞, 王梓齐, 等. 基于 NSGA-II 的塔式太阳能电站定日镜场调度方案研究[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 94-101.
GAO Weidong, LYU Lixia, WANG Ziqi, et al. Scheduling scheme of heliostat field of tower solar power station based on NSGA-II[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 94-101.

(责任编辑 杨嘉蕾)