

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.023

低碳园区综合能源系统捕碳-储能优化配置

汪龙¹, 邱巍¹, 许欣宇¹, 秦景辉², 孙晓荣²

(1. 国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214061;

2. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为降低园区综合能源系统的碳排放量,提升园区新能源消纳水平,文中提出一种面向园区综合能源系统的捕碳-储能联合系统优化配置方法。首先,介绍捕碳-储能联合系统的运行原理及配置方法;其次,利用KL散度(Kullback-Leibler divergence, KLD)描述新能源出力的不确定性,从系统投资、运维、弃风光惩罚以及碳交易成本出发,以园区综合能源系统总成本最小为主目标,以捕碳-储能联合系统投资、运维成本最小为子目标,构建园区综合能源系统捕碳-储能联合系统优化规划模型;最后,利用分布鲁棒优化方法对模型进行求解,通过比较不同场景下模型的经济性、碳减排量以及弃风、弃光效果,验证文中所提模型在园区碳减排和新能源消纳方面的优势。

关键词:综合能源系统;捕碳-储能联合系统;分布鲁棒优化;KL散度(KLD);碳减排;新能源消纳

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0235-12

0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略目标下,建设低碳电源、发展低碳技术、提高电力系统中清洁能源占比和利用效率、推动园区综合能源系统低碳转型是电力行业绿色发展的重要途径^[1-9]。碳捕集利用与封存技术,可有效减少火电机组的碳排放量,缓解化石燃料利用与节能减排之间的矛盾^[10-19]。园区综合能源系统被认为是电力行业节能减排的重要载体,其主要能量设备为微燃机和燃气锅炉,引入碳捕集利用与封存技术有利于减少燃气机组的碳排放量。在园区中配置储能不仅可提高新能源的消纳水平,还能为捕碳机组提供能量来源,因此,联合捕碳-储能技术可提高园区综合能源系统运行的环保性和新能源消纳率^[20-24]。

捕碳机组调节灵活,可显著降低园区的碳排放量,同时对园区的经济调度与低碳运行产生影响。文献[25]分析电源侧捕碳与负荷侧需求响应的低碳互补机理,建立考虑阶梯式碳交易机制的综合能源系统源-荷低碳优化调度模型;文献[26]利用鲁棒线性化方法处理风电出力不确定性,以系统运行成本最小为目标,建立考虑碳捕集利用与封存的综合能源系统日前优化调度模型;文献[27]在日前、日内、实时调度阶段利用碳捕集电厂的灵活性,提高风电消纳水平;文献[28]采用不确定估算的风电功率集合描述风电随机波动性,综合考虑系统运行约束及鲁棒可行性约束,以系统运行成本最小为目

标构建鲁棒机组组合模型;文献[29]提出考虑源-荷不确定性的微电网双层鲁棒规划模型。上层为微电网电源容量配置模型,下层为考虑源-荷不确定性的微电网优化运行模型。然而上述研究侧重于利用碳捕集电厂降低园区的碳排放量,提高园区运行经济性和新能源消纳能力,尚未计及捕碳机组的运行特性。同时,传统鲁棒优化方法考虑的是最恶劣场景,其优化结果趋于保守。而分布鲁棒优化方法将传统鲁棒优化和随机优化方法相结合,可克服传统鲁棒优化方法带来的保守性问题,为此,文中提出采用分布鲁棒优化方法进行捕碳-储能联合系统的优化配置。

储能可实现功率的时空转移,是提高园区综合能源系统运行灵活性的重要设备。文献[30]分析系统配置储能的经济性和可行性,建立全寿命周期的冷、热、电储能双层调度规划模型;文献[31]搭建热力柔性负荷模型,同时考虑可平移、可转移、可削减负荷3类电力柔性负荷,建立综合能源系统电、热优化配置模型;文献[32]以年化运行成本和投资成本最低为目标,提出考虑冷、热负荷日内响应及源-荷不确定性的电、热混合储能的鲁棒配置方法;文献[33]以年综合成本最小为目标,提出计及热网蓄热特性的多园区综合能源系统储能规划方法。以上研究利用储能配合异质能源降低园区的运行和投资成本,而鲜有对于构建捕碳-储能联合系统促进新能源消纳及碳减排的研究。

将捕碳机组与储能进行协同规划,有利于促进园区新能源消纳和综合能源系统的节能减排。文献[34]研究碳捕集电厂与风、光、水、电等多类型电

收稿日期:2024-06-25;修回日期:2024-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077061)

源的协同调度方法,通过灵活调整捕碳机组的出力,降低储能的投资容量,提升可再生能源的消纳率;文献[35]提出一种新型的捕碳-储能联合系统,该系统由承担可再生能源消纳的主储能和保证捕碳机组运行的子储能组成,分析表明所提捕碳-储能联合系统在提高可再生能源消纳水平的同时可保证高捕碳强度。然而上述研究仅针对电源侧或大电网,对园区综合能源系统中将碳捕集电厂与储能协同规划的研究还鲜见报道。

碳交易机制引导电力企业节能减排,可提高清洁能源的利用效率。在传统单一碳价交易机制的基础上,文献[36]引入阶梯型碳交易机制,通过阶梯式增长的碳价促进碳减排。文中将阶梯型碳交易机制应用于园区捕碳-储能联合系统的优化配置中,通过碳交易市场机制实现园区的低碳运行。

综上,文中提出阶梯型碳交易机制下园区综合能源系统捕碳-储能联合系统的优化配置方法。首先,建立捕碳-储能联合系统模型,并利用 KL 散度(Kullback-Leibler divergence, KLD)描述新能源出力的不确定性^[37]。其次,从系统投资、运维、弃风光惩罚以及碳交易成本出发,以综合能源系统总成本最小为主目标,以捕碳-储能联合系统投资运维成本最小为子目标,构建园区综合能源系统捕碳-储能联合系统规划模型,捕碳机组的配置可降低园区的碳排放量并带来收益,主、辅储能的配置可提高储能运行的灵活性。最后,利用分布鲁棒优化方法对模型进行求解,通过算例验证文中所提方法可提高新能源消纳率,促进园区的节能减排并提高园区运行的经济性。

1 捕碳-储能联合运行系统

1.1 碳捕集利用与封存技术

碳捕集利用与封存技术是指收集系统在生产过程中产生的 CO₂,通过化学或物理方法存储或利用,避免大量 CO₂排放至大气中。该方法是减少温室气体排放,减缓全球气候变暖的重要手段。碳捕集电厂主要有 3 类:燃烧前捕集、富氧碳捕集和燃烧后捕集。文中将燃烧后碳捕集技术作为典型研究对象展开分析。

捕碳机组的运行方式有 4 种:常规捕碳方式、分流捕碳方式、储液捕碳方式和综合灵活捕碳运行方式。文中主要介绍综合灵活运行方式下捕碳机组的原理和模型,见图 1。装有 CO₂分离溶液的吸收塔收集微燃机排放的烟气,形成贫/富 CO₂水溶液,其余的烟气排放至大气中,贫/富液输送至 CO₂再生

塔中进行解析,解析后的 CO₂送至压缩机中,余液则送至吸收塔中再利用,压缩后的 CO₂进行地质封存或工业利用,完成碳捕集封存与利用。

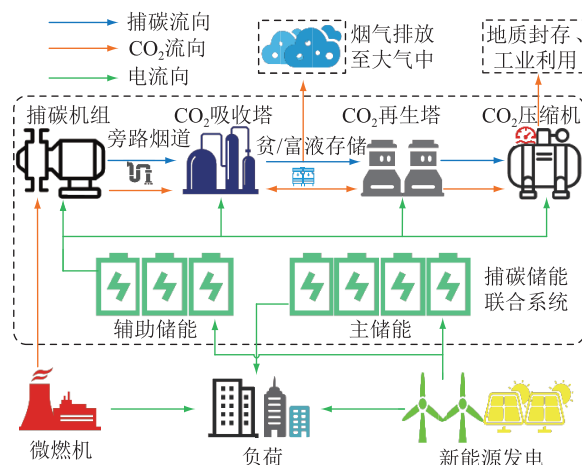


图 1 捕碳-储能联合系统运行框架

Fig.1 Operation frame of carbon capture-energy storage joint system

1.2 捕碳-储能联合数学模型及约束

图 1 中,储能系统分为主储能和辅助储能两部分,其中主储能用于园区电力平衡以及平抑新能源的出力波动;辅助储能用于捕碳机组供电,减少微燃机的出力并独立地调节发供循环,提高机组运行的灵活性。

综合灵活捕碳方式下,捕碳机组加装旁路烟道控制烟气的分流比,加装贫/富液存储系统以实现捕碳系统的临时存放,是目前捕碳机组最具有灵活性的捕碳方式。捕碳机组的碳捕集量、捕碳机组的捕碳功率及其电功率约束如式(1)所示。

$$\begin{cases} F_t^{\text{CO}_2} = \eta^{\text{CO}_2} \beta_t (P_{t,k}^e + Q_{t,k}^b) \\ P_t^0 = p^{\text{CO}_2} F_t^{\text{CO}_2} \\ P_t^{\text{CO}_2} = P_t^F + P_t^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_t^{\text{CO}_2}$ 为捕碳机组 t 时刻的碳捕集量; η^{CO_2} 为捕碳机组的捕碳效率,取 0.89; β_t 为燃气机组 t 时刻的碳排放强度; $P_{t,k}^e$ 为第 k 个典型日微燃机 t 时刻的出力; $Q_{t,k}^b$ 为第 k 个典型日燃气锅炉 t 时刻的功率; p^{CO_2} 为捕集单位碳量所需功率; P_t^0 为捕碳机组 t 时刻的捕碳功率; $P_t^{\text{CO}_2}$ 为捕碳机组 t 时刻所需要的电功率; P_t^F 为捕碳机组 t 时刻的运行损耗。

综合灵活捕碳系统根据不同的分流比将所捕集的 CO₂送入吸收塔和排放至大气中,因此引入分流比例模型,如式(2)所示。

$$F_t^{\text{CO}_2} = \varphi_v \eta^{\text{CO}_2} \beta_t P_{t,k}^e \quad \varphi_v \in [0, 1] \quad (2)$$

式中: φ_v 为烟气分流比,为 0 时表示所捕集碳量均排放至大气中,为 1 时表示所捕集碳量均输送至

CO₂吸收塔。

除装设分流装置外,综合灵活捕碳机组在吸收塔和再生塔之间安装贫/富液存储设备,该设备的引入避免了吸收塔内的CO₂溶液全部送至再生塔,使得CO₂的吸收与再生环节相互独立,从而控制CO₂的吸收与再生速率,达到降低捕碳机组整体能耗的目的。贫/富液存储设备处理CO₂量与功率之间的关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_t^O = P_t^A + P_t^D + P_t^C \\ F_{\text{ADC}}^{\text{CO}_2} = p_t^A P_t^A + p_t^D P_t^D + p_t^C P_t^C \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_t^A 、 P_t^D 、 P_t^C 分别为 t 时刻吸收、再生和压缩环节所需要的电功率; p_t^A 、 p_t^D 、 p_t^C 分别为 t 时刻设备吸收、再生和压缩单位碳量所需功率; $F_{\text{ADC}}^{\text{CO}_2}$ 为吸收、再生和压缩环节所处理的CO₂总量。为保证设备间传输的碳量相匹配,再生塔与压缩机的运行工况还应满足:

$$p_t^D P_t^D \approx p_t^C P_t^C \quad (4)$$

上述建立的综合灵活型捕碳机组运行模型,一方面可以独立控制捕碳机组功率以及吸收塔、再生塔和压缩机的运行状态;另一方面,机组主要依靠辅助储能系统维持运行,可减小对燃气机组的功率需求并助力新能源消纳。

2 捕碳-储能系统容量优化配置

2.1 新能源不确定性建模

KLD是用来度量概率分布相似度的指标,文中采用KLD描述新能源出力的不确定性^[38]。

假设有 M 个样本可以分类到 N 个区间中,则每个区间共有 M_1 、 M_2 、 \dots 、 M_N 个样本,样本区间的期望值由每个区间的代表样本决定,区间对应的概率为 $\mu_n = M_n/M$ ($n = 1, 2, \dots, N$), 概率密度函数为 $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ 。根据新能源的历史出力数据生成参考概率分布 $P_{\text{his}}^{\text{res}}$,同时假设未来新能源出力的实际概率分布 $P_{\text{rea}}^{\text{res}}$ 。KLD则用于描述实际分布函数与参考分布函数的距离测度,KLD值越小,2个分布函数的相似程度越高。

新能源发电功率KLD值为 $D_{\text{KLD}}^{\text{res}}$,如式(5)所示。

$$D_{\text{KLD}}^{\text{res}}(P_{\text{rea}}^{\text{res}} || P_{\text{his}}^{\text{res}}) = \int_{\tau} f(\rho) \ln \left(\frac{f(\rho)}{f_0(\rho)} \right) d\rho \quad (5)$$

式中: ρ 为发电功率; τ 为发电功率的样本空间; $f(\rho)$ 、 $f_0(\rho)$ 分别为发电功率的实际概率密度函数和发电功率的参考概率密度函数。

为保证新能源出力的实际分布 $P_{\text{rea}}^{\text{res}}$ 与生成参考分布 $P_{\text{his}}^{\text{res}}$ 尽可能高度相似,基于KLD构造的不确定

集合 W_{res} 如下:

$$W_{\text{res}} = \{P_{\text{rea}}^{\text{res}} | D_{\text{KLD}}^{\text{res}}(P_{\text{rea}}^{\text{res}} || P_{\text{his}}^{\text{res}}) \leq d_{\text{KLD}}^{\text{res}}\} \quad (6)$$

为避免参考分布与实际分布相差过大而无法计算KLD,参考文献[39]中基于卡方分布的拟合优度方法,即在得到 M 个抽样数据后选择对应的散度值 $d_{\text{KLD}}^{\text{res}}$ 。

$$d_{\text{KLD}}^{\text{res}} = \frac{1}{2M} \chi_{N-1, \alpha^*}^2 \quad (7)$$

式中: χ_{N-1, α^*}^2 为 $N-1$ 自由度的卡方分布 α^* 上分位数,可以保证新能源发电功率以不小于 α^* 的概率包络在不确定集合 W_{res} 中。 α^* 的取值反映了决策者的风险偏好,其值越大表明实际分布越容易被包络在不确定集合中,规避风险的倾向越强;反之则容易溢出不确定集合,风险偏好值越高。

2.2 分布鲁棒机会约束处理

分布鲁棒优化方法克服传统鲁棒方法过于保守的问题,该方法寻求与经验参考分布函数距离最接近的一簇概率分布函数,研究最恶劣场景下的优化结果,兼顾保守性和鲁棒性的优势^[38]。由于新能源出力的不确定性,其消纳情况采用鲁棒机会约束的形式如下:

$$\begin{cases} R_{\text{curt}}^{\text{wt}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} (P_{t,k}^{\text{wt,pre}} - P_{t,k}^{\text{wt}}) / P_{t,k}^{\text{wt}} \\ \Pi = \Pr(R_{\text{curt}}^{\text{wt}} \leq R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}) \geq 1 - \alpha_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} R_{\text{curt}}^{\text{pv}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} (P_{t,k}^{\text{pv,pre}} - P_{t,k}^{\text{pv}}) / P_{t,k}^{\text{pv}} \\ \Pi = \Pr(R_{\text{curt}}^{\text{pv}} \leq R_{\text{curt,lim}}^{\text{pv}}) \geq 1 - \alpha_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R_{\text{curt}}^{\text{wt}}$ 、 $R_{\text{curt}}^{\text{pv}}$ 分别为园区的弃风、弃光率; $R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}$ 、 $R_{\text{curt,lim}}^{\text{pv}}$ 分别为园区的弃风、弃光率限值; $P_{t,k}^{\text{wt}}$ 、 $P_{t,k}^{\text{pv}}$ 分别为第 k 个典型日 t 时刻园区消纳的风电、光伏功率; K 为规划期内典型日天数; Π 、 Π 分别为所有风电、光伏出力集合中最大的最小值; $P_{t,k}^{\text{wt,pre}}$ 、 $P_{t,k}^{\text{pv,pre}}$ 分别为第 k 个典型日 t 时刻风电、光伏预测功率; $\Pr(\cdot)$ 表示概率,式(8)一式(9)表示在前述得到的风光集合 W_{res} 中,最恶劣情况下,弃风、弃光率仍低于限值的概率大于等于 $1 - \alpha_1$ 和 $1 - \alpha_2$; α_1 、 α_2 为概率阈值。采用KLD描述不确定集合时,该鲁棒机会约束等价于式(10)一式(12)的传统机会约束。

$$\Pr((R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}) \leq 0) \geq 1 - \alpha_1 \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \max\left(0, 1 - \inf_{z \in \gamma(z)} \left(\frac{e^{-d_{\text{KLD}}^{\text{res}} z^{1-\alpha}} - 1}{z - 1} \right) \right) \quad (11)$$

$$\gamma(z) = z \log_2(z) - z + 1 \quad (12)$$

式中: z 为引入的辅助变量,定义域为 $(0, 1)$; \inf 为

取下限值; $\gamma(z)$ 为辅助变量的函数; d_{kl} 为对应的 KLD 值; α 为等价变换后的概率阈值, $\alpha_1 \leq \alpha$ 。 α_1 通过 $\log_2(1/\vartheta)$ 步二分搜索后实现精度为 ϑ 的估算后得到, 但该约束仍非凸。文中需要一个保守的凸近似方法求解。

式(10)等价于式(13)。

$$\Pr((R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}) > 0) = E_{P_{\text{his}}}(I(R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}})) \leq \alpha_1 \quad (13)$$

式中: $I(x) = 1$ 时 $x > 0$, $I(x) = 0$ 时 $x \leq 0$, $x = R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}$; $E_{P_{\text{his}}}$ 为风电满足历史参考分布 P_{his} 时的期望函数。

再引入凸函数 $\Psi(x) = \{0, ax+1(a>0 \text{ 为待优化参数})\}$ 对 $I(x)$ 进行凸近似, 可得如式(14)所示。

$$\sum_{j=1}^J p_j \max(0, a(R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}}) + 1) \leq \alpha_1 \quad (14)$$

式中: p_j 为典型样本 j 被抽中的概率; J 为样本数。

引入辅助变量 l_j 后, 分布鲁棒机会约束被转换为线性约束:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^J p_j l_j \leq \frac{\alpha_1}{a} = \alpha_1 a' & a' > 0 \\ a' + R_{\text{curt}}^{\text{wt}} - R_{\text{curt,lim}}^{\text{wt}} \leq l_j & l_j \geq 0; \forall j \end{cases} \quad (15)$$

式中: a' 为引入辅助变量后的待优化参数。分布鲁棒机会约束经过上述转换, 可表述为线性约束的形式^[39], 可利用 MATLAB 中 YALMIP 调用 CPLEX 进行求解。

2.3 捕碳-储能容量配置模型

文中建立含主-子目标的低碳园区捕碳-储能的优化配置模型。主目标为综合能源系统的总规划成本最低, 子目标为捕碳-储能联合系统的规划成本最小, 如图 2 所示。其中园区的运行工况影响捕碳-储能系统的运行工况, 储能的荷电状态主要由新能源的出力决定, 间接影响捕碳机组的运行工况。捕碳-储能联合系统作为园区的主要部分, 储能容量的合理配置和捕碳机组的高效投入决定园区的运行效益。

2.3.1 主目标函数

主目标函数为综合能源系统总规划年化成本最低, 主要包括年能源购置成本、现有设备运维成本、弃风光惩罚成本以及捕碳-储能联合系统规划成本。目标函数如式(16)所示。

$$C_{\text{cost}} = \min(C_e + C_{\text{gas}} + C_{\text{hs}} + C_{\text{cp, ch}} + C_{\text{pres}}) \quad (16)$$

式中: C_{cost} 为系统年化总成本; C_e 为年购电成本; C_{gas} 为年购气成本; C_{hs} 为现有设备的年运维成本; $C_{\text{cp, ch}}$ 为捕碳-储能联合系统年规划成本; C_{pres} 为系统的弃

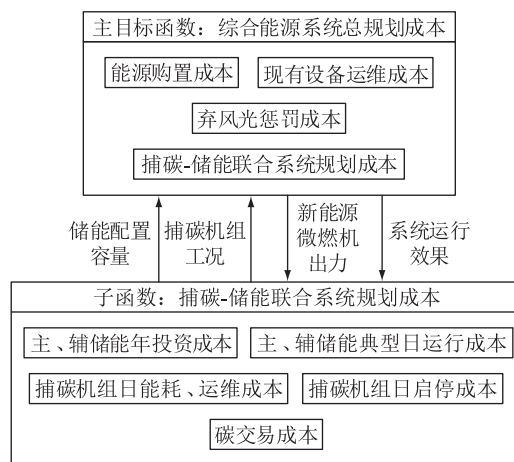


图 2 主-子目标函数交互关系

Fig.2 Relation of main-sub objective function

风光年惩罚成本。

购电成本表示为:

$$C_e = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} c_{t,k}^{\text{grid}} P_{t,k}^{\text{grid}} \quad (17)$$

式中: $c_{t,k}^{\text{grid}}$ 为第 k 个典型日 t 时刻园区的购电价格; $P_{t,k}^{\text{grid}}$ 为第 k 个典型日 t 时刻园区与电网的交互功率。

购气成本表示为:

$$C_{\text{gas}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} c_{\text{gas}}^{\text{gas}} \left(\frac{P_{t,k}^{\text{g}}}{\eta^{\text{g}}} + \frac{Q_{t,k}^{\text{b}}}{\eta^{\text{b}}} \right) \quad (18)$$

式中: $c_{\text{gas}}^{\text{gas}}$ 为天然气单位热值价格; η^{g} 、 η^{b} 分别为微燃机和燃气锅炉的运行效率。

现有设备的运维成本中蓄热槽的运行维护费占主导, 将其表示为:

$$C_{\text{hs}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} c_{t,k}^{\text{hs}} (Q_{t,k}^{\text{hsc}} + Q_{t,k}^{\text{hsl}}) \quad (19)$$

式中: $c_{t,k}^{\text{hs}}$ 为第 k 个典型日 t 时刻蓄热槽的运行维护成本; $Q_{t,k}^{\text{hsc}}$ 、 $Q_{t,k}^{\text{hsl}}$ 分别为第 k 个典型日 t 时刻蓄热槽的充、放热功率。

园区的弃风光惩罚成本表示为:

$$C_{\text{pres}} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} [\chi_1 (P_{t,k}^{\text{wt,pre}} - P_{t,k}^{\text{wt}}) + \chi_2 (P_{t,k}^{\text{pv,pre}} - P_{t,k}^{\text{pv}})] \quad (20)$$

式中: χ_1 、 χ_2 分别为弃风、弃光量的惩罚价格, $\chi_1 = \chi_2 = 1.2$ 元/kW。

2.3.2 子目标函数

以捕碳-储能联合系统的年规划成本最小为目标, 数学模型如式(21)所示。

$$C_{\text{cp, ch}} = \min(C_{\text{main}}^{\text{inv}} + C_{\text{aux}}^{\text{inv}} + C_{\text{pt}}^{\text{inv}} + \sum_{k=1}^K (C_{\text{main},k}^{\text{op}} + C_{\text{aux},k}^{\text{op}} + C_{\text{day},k}^{\text{cp}} - C_{\text{day},k}^{\text{tra}} + C_{\text{qt},k}^{\text{cp}} + C_{\text{pt},k}^{\text{op}})) \quad (21)$$

式中: $C_{\text{main}}^{\text{inv}}$ 、 $C_{\text{aux}}^{\text{inv}}$ 分别为主、辅储能系统的年投资成

本; C_{pt}^{inv} 为捕碳机组的投资成本; $C_{main,k}^{op}$ 、 $C_{aux,k}^{op}$ 分别为第 k 个典型日主、辅储能系统的运行成本; $C_{day,k}^{cp}$ 为第 k 个典型日捕碳机组的能耗成本; $C_{day,k}^{tra}$ 为第 k 个典型日捕碳机组的碳交易成本,文中拟定工业利用 50% 的碳捕集量; $C_{qt,k}^{cp}$ 为第 k 个典型日捕碳机组的启停成本; $C_{pt,k}^{op}$ 为第 k 个典型日捕碳机组的运维成本。

其中,主储能系统的年投资成本为:

$$C_{main}^{inv} = c_p E_{main}^{cap} \left(\frac{M_{main}^{cyc}}{N_{main}^{lif}} + \gamma_{main}^{op} \right) \quad (22)$$

式中: c_p 为主储能系统的单位容量建设成本; E_{main}^{cap} 为主储能的总配置容量; M_{main}^{cyc} 、 N_{main}^{lif} 分别为主储能系统的年充放电次数和全生命周期内可充放电总次数; γ_{main}^{op} 为主储能系统的年运维成本系数。相应地,辅助储能投资成本模型同式(22)。

捕碳机组的日能耗成本如下:

$$C_{day,k}^{cp} = \sum_{t=1}^{24} c_t (P_t^F + p^{CO_2} \eta^{CO_2} \beta_t P_{t,k}^g) \quad (23)$$

式中: c_t 为 t 时刻辅助储能系统向捕碳机组的供电价格。

碳排放权交易是将政府部门分配的碳排放配额作为商品进行买卖,以达到增加园区碳收益的目的。文中采用预分配和基准线法确定园区中免费碳配额量。园区中的碳排放源主要包括微燃机和燃气锅炉,其免费碳配额量如式(24)所示。

$$C_p = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} (P_{t,k}^g B^g + Q_{t,k}^b B^b) \quad (24)$$

式中: C_p 为碳排放配额; B^g 为微燃机碳排放基准; B^b 为燃气锅炉碳排放基准。

实际碳排放量 C_L 由微燃机和燃气锅炉的出力决定,具体如式(25)所示。

$$C_L = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} [a_1 + b_1 P_{t,k}^g + c_1 (P_{t,k}^g)^2] + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} [a_2 + b_2 Q_{t,k}^b + c_2 (Q_{t,k}^b)^2] \quad (25)$$

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 为微燃机碳排放系数; a_2 、 b_2 、 c_2 为燃气锅炉碳排放系数。

考虑到碳排放权交易价格随交易量而改变,文中引入阶梯型碳交易模型衡量碳收益:

$$C_{day,k}^{tra} = \begin{cases} \varepsilon_k (C_p - C_L) & C_p \leq C_L + d \\ (1 + \varepsilon_k) \varepsilon_k (C_p - C_L - d) & C_L + d < C_p \leq C_L + 2d \\ (1 + 2\varepsilon_k) \varepsilon_k (C_p - C_L - 2d) & C_L + 2d < C_p \leq C_L + 3d \\ (1 + 3\varepsilon_k) \varepsilon_k (C_p - C_L - 3d) & C_p > C_L + 3d \end{cases} \quad (26)$$

式中: ε_k 为第 k 个典型日市场碳交易价格; d 为碳排放量区间长度。 $C_p < C_L$ 时,表示碳交易为收益。

捕碳机组的日启停成本如式(27)所示。

$$C_{qt,k}^{cp} = \sum_{t=1}^{24} U_t s_k \quad (27)$$

式中: U_t 为捕碳机组在 t 时刻的运行状态,为 0 时表示停机,为 1 时表示运行; s_k 为第 k 个典型日捕碳机组启停成本。

2.3.3 约束条件

(1) 园区电力平衡约束。

主储能系统主要用于园区电力平衡:

$$P_{t,k}^{grid} + P_{t,k}^g + P_{t,k}^{pv} + P_{t,k}^{wt} + P_{main,t,k}^{esd} = L_{t,k}^e + P_{t,k}^{ec} + P_{main,t,k}^{esc} \quad (28)$$

式中: $P_{main,t,k}^{esd}$ 、 $P_{main,t,k}^{esc}$ 分别为第 k 个典型日 t 时刻主储能系统的充、放电功率; $L_{t,k}^e$ 为第 k 个典型日 t 时刻电负荷功率; $P_{t,k}^{ec}$ 为第 k 个典型日 t 时刻电制冷机功率。

辅助储能系统主要向捕碳机组供电:

$$P_{aux,t,k}^{esd} = P_t^A + P_t^D + P_t^C + P_{aux,t,k}^{esc} \quad (29)$$

式中: $P_{aux,t,k}^{esd}$ 为第 k 个典型日 t 时刻辅助储能系统的放电功率; $P_{aux,t,k}^{esc}$ 为第 k 个典型日 t 时刻辅助储能系统的充电功率。

(2) 园区热能供需平衡约束。

$$\eta^{wh} Q_{t,k}^{wh} + Q_{t,k}^b + Q_{t,k}^{hsd} = L_{t,k}^h + Q_{t,k}^{hx} + Q_{t,k}^{hsc} \quad (30)$$

式中: η^{wh} 为余热锅炉的效率; $Q_{t,k}^{wh}$ 为第 k 个典型日 t 时刻余热锅炉的输入功率; $Q_{t,k}^{hsc}$ 、 $Q_{t,k}^{hsd}$ 分别为第 k 个典型日 t 时刻蓄热槽的充、放热功率; $L_{t,k}^h$ 为第 k 个典型日 t 时刻热负荷功率; $Q_{t,k}^{hx}$ 为第 k 个典型日 t 时刻热交换器的功率。

(3) 主储能系统运行约束。

$$\begin{cases} U_t^{esc} P_t^{esc, \min} \leq P_{main,t,k}^{esc} \leq U_t^{esc} P_t^{esc, \max} \\ U_t^{esd} P_t^{esd, \min} \leq P_{main,t,k}^{esd} \leq U_t^{esd} P_t^{esd, \max} \\ W_{es,t} = W_{es,t-1} (1 - \sigma_{es}) + (\eta^{esc} P_{main,t,k}^{esc} - P_{main,t,k}^{esd} / \eta^{esd}) \Delta t \\ W_{es}^{\min} \leq W_{es,t+1} \leq W_{es}^{\max} \\ U_t^{esc} + U_t^{esd} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $P_t^{esc, \max}$ 、 $P_t^{esc, \min}$ 分别为 t 时刻主储能充电功率的上、下限; $P_t^{esd, \max}$ 、 $P_t^{esd, \min}$ 分别为 t 时刻主储能放电功率的上、下限; U_t^{esc} 、 U_t^{esd} 分别为 t 时刻主储能充、放电状态标记位,为 0 时表示停止充、放电,为 1 时表示进行充、放电; $W_{es,t}$ 为主储能在 t 时刻储存的电能; σ_{es} 为主储能系统自放电率; η^{esc} 、 η^{esd} 分别为主储能的充、放电效率; W_{es}^{\max} 、 W_{es}^{\min} 分别为主储能容量的上、下限; Δt 为时间间隔。辅助储能系统的运行

约束同式(31)。

(4) 风电、光伏出力约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,k}^{wt} \leq P_{t,k}^{wt,pre} \\ 0 \leq P_{t,k}^{pv} \leq P_{t,k}^{pv,pre} \end{cases} \quad (32)$$

式(32)仅列出电热平衡方程和主要设备的运行约束,其余设备运行约束见参考文献[36]。

3 算例分析

3.1 算例设置

图3为华东地区某科技园综合能源系统框架。其中,负荷包括冷、热、电、气4种,采用集中+分布式协同的供能方式;园区通过2座110 kV变电站与主网连接。

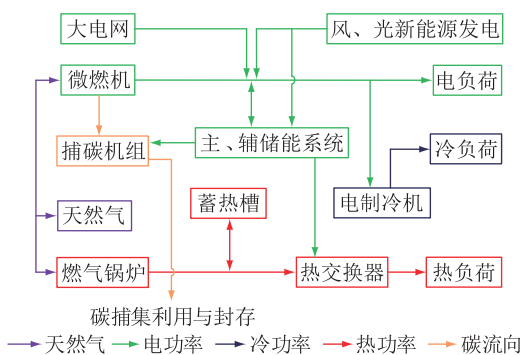


图3 园区综合能源系统框架

Fig.3 Frame of integrated energy system in the park

园区中相关设备参数见表1,表中数值为出力限值或容量,因此未加下标 t,k 。 Q^{hs} 为蓄热槽容量; Q_{min}^{hsc} 、 Q_{max}^{hsc} 分别为蓄热槽充、放热功率限值; η_{hs}^c 、 η_{hs}^d 分别为蓄热槽充、放热效率; σ_{hs} 为蓄热槽自放热率; C_{ec} 为电制冷机制冷效率; η^{hx} 为热交换器效率;热电比为1.7。新能源发电(风电、光伏)年出力时序曲线见图4,冷、热、电负荷曲线见图5。由于拉丁超立方抽样采用分层抽样的形式,样本点可以全面、均匀地覆盖变量的分布范围,有效提高抽样的效率^[40]。为此文中采用拉丁超立方抽样方法得到4个季度内72组典型日数据,从中抽取4组数据进行算例仿真。文中初始碳价为0.15元/kg,天然气价格为0.349元/(kW·h)。在求解时,将系统碳排放量进行线性化处理,每区间的调度模型转换为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题。

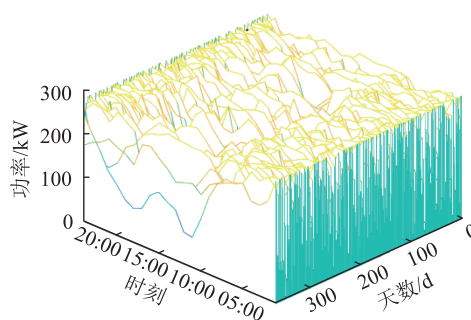
3.2 捕碳-储能容量配置结果

根据拉丁超立方抽样方法得到的72组典型日数据后,从中随机选取32组数据用于分布鲁棒优化的样本测试,计算不同新能源散度值 d_{KLD}^{res} 下园区成本和标准差,如图6所示。

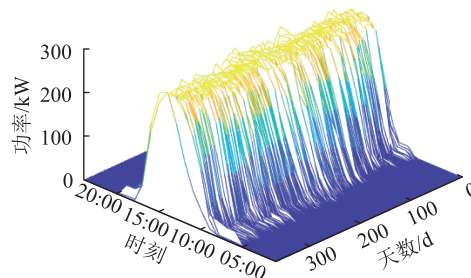
表1 园区中设备容量及参数

Table 1 Capacity and parameters of equipment in the park

设备	参数	数值
捕碳机组	P^{CO_2}/kW	300
	P_1^c/kW	300
微燃机	P_2^c/kW	500
	η^g	0.95
	Q^b/kW	800
燃气锅炉	η^b	0.90
	γ_{main}^{op}	0.004
	N_{main}^{hif}	6 000
	$c_p/(元 \cdot kW^{-1})$	1.5×10^8
蓄电池	η^{esc} 、 η^{esd}	0.95
	σ_{es}	0.04
	Q^{hs}/kW	1 000
	Q_{min}^{hsc}/kW	200
蓄热槽	Q_{max}^{hsc}/kW	200
	η_{hs}^c 、 η_{hs}^d	0.89
	σ_{hs}	0.06
	Q^{wh}/kW	600
余热锅炉	η^{wh}	0.76
	P^{ec}/kW	300
电制冷机	C_{ec}	4
	Q^{hx}/kW	200
热交换器	η^{hx}	0.95
	光伏	P^{pv}/kW
风机	P^{wt}/kW	300



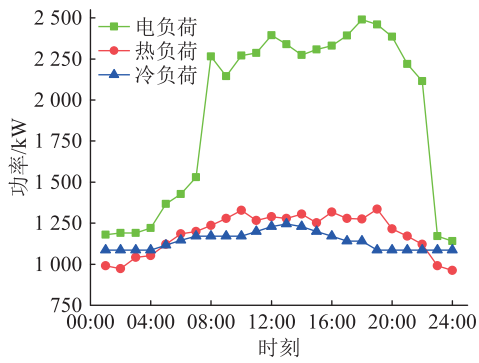
(a) 风电



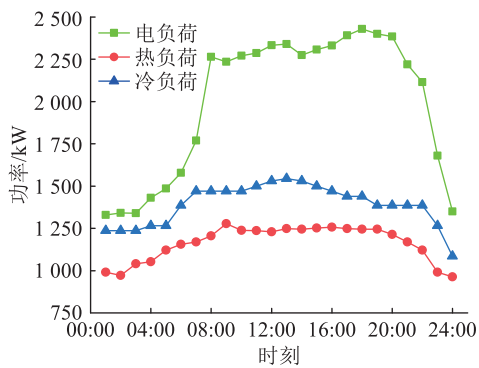
(b) 光伏

图4 风电、光伏年出力时序曲线

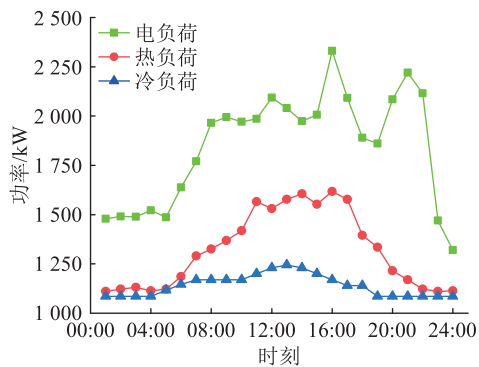
Fig.4 Wind and photovoltaic power annual output time series curves



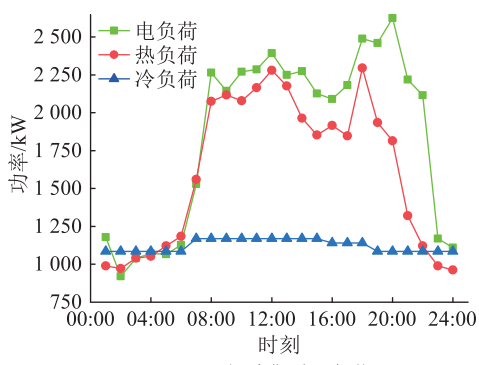
(a) 春季典型日负荷



(b) 夏季典型日负荷



(c) 秋季典型日负荷

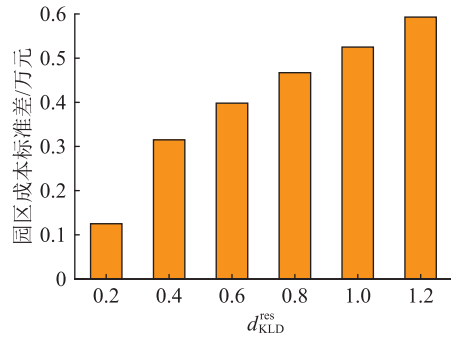


(d) 冬季典型日负荷

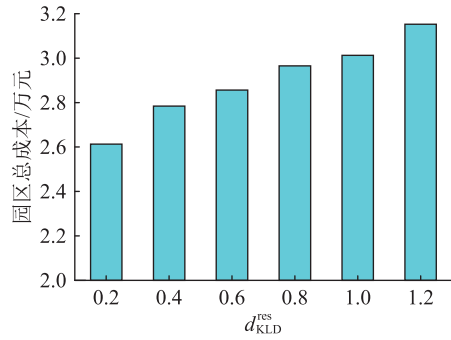
图5 典型日冷、热、电负荷曲线

Fig.5 Typical daily cooling, heating and power load curves

从图6中可以看出,随着新能源散度值的增大,园区规划总成本和其标准差也在不断增大。因此,当散度值 $d_{KLD}^{res} = 0.2$ 时园区综合能源系统的规划成本最小,此时新能源以不小于90%的概率包络在不



(a) 不同散度值下园区成本标准差



(b) 不同散度值下园区总成本

图6 鲁棒优化样本测试

Fig.6 Performance test of robust optimization sample 确定集合 W_{res} 中。

为验证所提模型的有效性,文中分别求解有、无捕碳机组2种情况下的储能配置容量,具体结果如表2所示。

表2 储能配置容量优化结果

Table 2 Optimization results of energy storage capacity kW

捕碳机组	主储能配置容量	辅助储能配置容量	总容量
无	1 823.54	210.99	2 034.53
有	1 578.96	1 277.34	2 856.30

从表2可以看出:

(1) 未装设捕碳机组时,园区主储能配置容量为1 823.54 kW,辅助储能容量为210.99 kW,此时辅助储能用于微燃机的灵活爬坡。

(2) 装设捕碳机组时,园区主储能配置容量较未装设捕碳机组时减少了244.58 kW,辅助储能容量增加了1 066.35 kW。这是由于园区为保证捕碳机组的高效运行,须增加储能容量配置,这种情况虽不利于园区的经济运行,但可以带来可观的碳收益。

3.3 园区低碳效益分析

不同储能配置下有无配置捕碳机组的园区碳排放量、碳减排效益和园区总成本如表3所示。

表3 园区低碳效益分析

Table 3 Low carbon benefit analysis in the park

指标	单一储能 无捕碳	单一储能 有捕碳	主、辅储能 无捕碳	主、辅储能 有捕碳
碳减排 收益/ 10^4 元	1.009	1.427	1.624	2.131
碳排放量/ 10^5 t	0.312	0.224	0.201	0.168
园区 总成本/ 10^5 元	139.21	139.11	139.13	138.75

从表3可以看出:

(1) 比较单一储能情况时无捕碳机组时碳收益较有捕碳机组减少了 0.418×10^4 元,相应地碳排放量增加了 0.088×10^5 t。

(2) 在园区配置主、辅储能,无捕碳机组情况下,由于储能配置容量的增加,可消纳更多的新能源电量,因而储能出力替代微燃机出力,减少园区的碳排放量并带来碳减排收益;相较于单一储能有/无捕碳情况,其碳减排收益较高,碳排放量较低,但经济效益仍低于主、辅储能有捕碳机组情况。

(3) 在园区配置主、辅储能有捕碳机组情况下,其碳收益最佳,较单一储能配置有捕碳机组的碳收益增加了 0.704×10^4 元,碳排放量减少了 0.056×10^5 t;相较于配置主、辅储能无捕碳机组情况,其碳收益增加了 0.507×10^4 元,碳排放量减少了 0.033×10^5 t。

(4) 主、辅储能有捕碳机组情况下,园区总成本低于主、辅储能但无捕碳机组下的成本,这是由于配置捕碳机组的年化成本为1 795元(设寿命为20 a),但碳减排将增加收益5 070元,因此总体来说主、辅储能有捕碳机组情况下园区总成本最小。同样方法可分析单一储能下的系统总成本。

由此可见,园区配置主、辅储能并引入捕碳机组,可提高园区的碳收益和经济性,促进园区的节能减排。

3.4 优化方法对比

文中针对园区节能减排和储能配置问题,提出低碳园区捕碳-储能优化配置模型,利用分布鲁棒优化方法对模型求解,并与确定性优化方法(线性规划方法)进行对比。

2种优化方法下系统的经济指标对比如表4所示,包括园区的年储能成本、弃风弃光惩罚成本、碳减排收益、园区总成本。

从表4可以看出:分布鲁棒优化的储能成本,弃风、弃光成本和园区的总规划成本均有所降低,但碳减排收益有所增加。其中,主储能和辅助储能成

表4 园区运行经济指标

Table 4 Economic indicators in the park 10^5 元

经济指标	确定性优化	分布鲁棒优化
主储能成本	12.28	8.98
辅助储能成本	6.41	5.57
弃风惩罚成本	1.83	1.44
弃光惩罚成本	1.23	0.76
碳减排收益	0.192 6	0.213 1
园区总成本	151.63	138.75

本较确定性优化方法分别降低了26.9%和13.1%,这表明园区在考虑新能源出力不确定后,优化了对储能容量的配置,减少储能的冗余成本;园区的弃风、弃光成本较确定性优化方法分别减少了21.3%和38.2%,说明园区在考虑新能源出力不确定情况下增加了对新能源的消纳;园区的总成本相较于确定性优化方法降低了 12.88×10^5 元,表明园区配置捕碳机组和适当容量的储能后,辅助储能和捕碳机组的联合运行,降低了园区的碳排放量,增加了园区碳减排收益,同时也减少了园区的弃风弃光成本和外购能源成本。

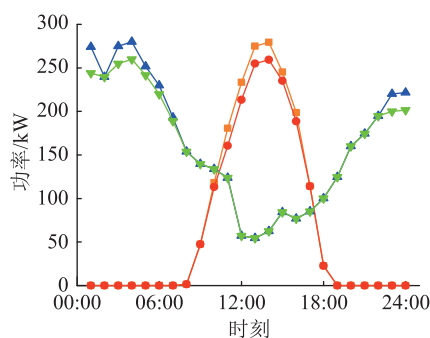
3.5 新能源消纳水平分析

4个典型日中园区新能源的消纳情况如图7所示。

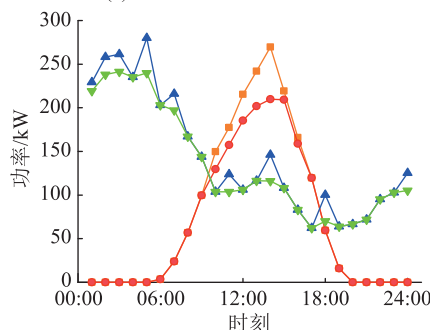
从图7可以看出:

(1) 园区的弃风率较低,仅在风电出力波动较大时弃风,这说明文中利用KLD考虑风电出力不确定性在运行优化过程中起着作用。

(2) 园区弃光多集中在12:00时,且弃光时段



(a) 春季典型日新能源消纳情况



(b) 夏季典型日新能源消纳情况

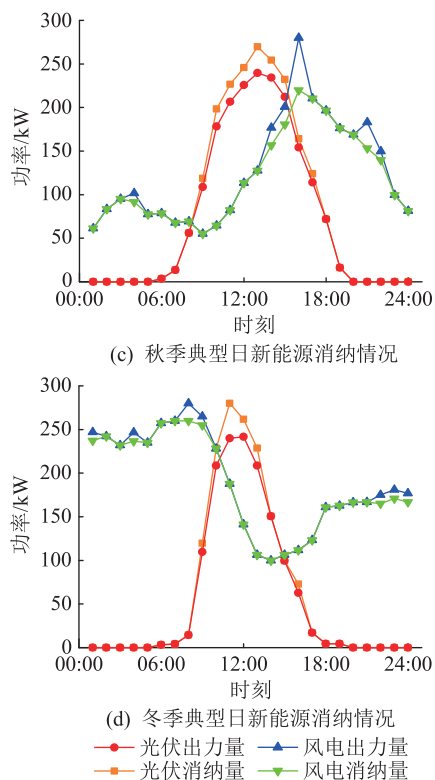


图7 新能源消纳率

Fig.7 New energy consumption rate

较少。由于风电、光伏的出力不确定性,在新能源发电量大(如12:00时)且负荷水平降低时将无法实现全部消纳。

由此可见,将捕碳-储能联合系统引入园区综合能源系统中,可有效地应对新能源的弃风、弃光现象,捕碳机组得到辅助储能系统的灵活供应,可及时收集燃气机组碳排放并加以利用和封存,促进系统低碳运行且带来碳交易收益。

4 结论

文中面向低碳园区综合能源系统,提出阶梯型碳交易机制下园区综合能源系统捕碳-储能联合系统的优化配置模型,利用KLD描述新能源出力的不确定性,并采用分布鲁棒优化算法对模型进行求解,与未考虑新能源波动性的确定性优化方法进行对比,算例分析得到的结论如下:

(1) 捕碳-储能联合系统中的储能分为主储能和辅助储能,主储能用于保证园区电力平衡,辅助储能系统用于捕碳机组供电,提高园区新能源消纳率和储能系统运行的灵活性。

(2) 较单一储能配置相比,配置主、辅储能下综合能源系统的碳收益增加了 0.704×10^4 元,碳排放量减少了 0.056×10^5 t,降低了园区的碳排放量并带来碳减排收益,为打造“零碳”园区综合能源系统提供

基础。

(3) 相较于确定性优化,考虑新能源出力不确定性的分布鲁棒优化方法的求解结果具有更好的经济性,主储能和辅助储能成本分别降低了26.9%和13.1%,园区的弃风和弃光成本分别减少了21.3%和38.2%,储能的配置容量与新能源消纳之间更加协调,捕碳-储能联合系统保证了园区的高效率捕碳和新能源消纳。

参考文献:

- [1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3125.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125.
- [2] 黎立丰,刘春晓,朱浩骏,等. 考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4):162-168.
LI Lifeng, LIU Chunxiao, ZHU Haojun, et al. Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 162-168.
- [3] 宁毕武,张冠锋,王海鑫,等. 考虑梯次利用储能系统安全阈值的综合能源系统低碳经济调度方法[J]. 电力建设,2023,44(6):1-11.
NING Biwu, ZHANG Guanfeng, WANG Haixin, et al. A low-carbon economic dispatch method for IES considering the safety threshold of echelon utilization energy storage system [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 1-11.
- [4] WU L Z, WANG C C, CHEN W, et al. Research on the bi-layer low carbon optimization strategy of integrated energy system based on Stackelberg master slave game[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 389-402.
- [5] 李鹏,余晓鹏,周青青,等. 计及风电不确定信息间隙的火电-储能-需求响应多源低碳调峰交易优化模型[J]. 电力建设,2022,43(12):131-140.
LI Peng, YU Xiaopeng, ZHOU Qingqing, et al. Multi-source low-carbon peak-shaving transaction optimization model for thermal power-energy storage-demand response considering the uncertainty information gap of wind power[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 131-140.
- [6] 黄文轩,刘道兵,李世春,等. 双碳目标下含P2G与需求响应的综合能源系统双层优化[J]. 电测与仪表,2022,59(11):8-17.
HUANG Wenxuan, LIU Daobing, LI Shichun, et al. Two-level optimization of integrated energy system with P2G and demand response under dual carbon objective [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 8-17.
- [7] 魏震波,杨超,李银江. 参与多元耦合市场的电气综合能源系统低碳经济调度[J]. 智慧电力,2023,51(5):8-14,22.
WEI Zhenbo, YANG Chao, LI Yinjiang. Low-carbon economic dispatching of electric-gas integrated energy system participating

- in multi-coupling market [J]. Smart Power, 2023, 51(5): 8-14, 22.
- [8] 王凌云,徐健哲,李世春,等. 考虑电-气-热需求响应和阶梯式碳交易的综合能源系统低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 45-52.
WANG Lingyun, XU Jianzhe, LI Shichun, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering electricity-gas-heat demand response and tiered carbon trading [J]. Smart Power, 2022, 50(9): 45-52.
- [9] 杨明杰,胡扬宇,千海霞,等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.
- [10] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [11] 程耀华,杜尔顺,田旭,等. 电力系统中的碳捕集电厂:研究综述及发展新动向[J]. 全球能源互联网, 2020(4): 339-350.
CHENG Yaohua, DU Ershun, TIAN Xu, et al. Carbon capture power plants in power systems; review and latest research trends [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020(4): 339-350.
- [12] 招景明,李经儒,潘峰,等. 电力碳排放计量技术现状及展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 1-8.
ZHAO Jingming, LI Jingru, PAN Feng, et al. Current status and future prospects of electricity carbon emission measurement technology [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 1-8.
- [13] SUN F, HUO Y J, FU L, et al. Load-forecasting method for IES based on LSTM and dynamic similar days with multi-features [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 285-296.
- [14] 王瑞,程杉,汪业乔,等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 12-21.
WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12-21.
- [15] 张涛,刘伉,陶然,等. 计及热惯性及光热电站的综合能源系统优化[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 109-117.
ZHANG Tao, LIU Kang, TAO Ran, et al. Integrated energy system optimization considering thermal inertia and CSP station [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 109-117.
- [16] 唐建林,余涛,肖勇,等. 基于迁移多搜索器 Q 学习算法的碳能复合流无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 18-29.
TANG Jianlin, YU Tao, XIAO Yong, et al. Reactive power optimization of carbon-energy composite flow based on transfer multi-searcher Q-learning [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 18-29.
- [17] 杨毅,易文飞,王晨清,等. 基于碳排放流理论的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 33-41.
YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon economic dispatching of park integrated energy system applying carbon emission flow theory [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 33-41.
- [18] 江训谱,吕施霖,王健,等. 考虑阶梯碳交易和最优建设时序的园区综合能源系统规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 11-19.
JIANG Xunpu, LYU Shilin, WANG Jian, et al. Park-level integrated energy system planning considering tiered carbon trading and optimal construction timing [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 11-19.
- [19] 张翰林,汪睿哲,刘友波,等. 考虑源荷碳势耦合的电力系统双层低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 28-42.
ZHANG Hanlin, WANG Ruizhe, LIU Youbo, et al. Two-stage low-carbon economic scheduling of power system considering source-load carbon intensity coupling [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 28-42.
- [20] 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]. 电网技术, 2022, 46(9): 3290-3303.
YANG Long, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Regional low-carbon integrated energy system planning: key technologies and challenges [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3290-3303.
- [21] 顾伟,陆帅,姚帅,等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 203-213.
GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 203-213.
- [22] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [23] 梁泽琪,周云,冯冬涵,等. 考虑电碳绿证市场耦合的园区综合能源系统日前优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 43-53.
LIANG Zeqi, ZHOU Yun, FENG Donghan, et al. Day-ahead optimal scheduling of park-integrated energy system considering electricity-carbon-green certificate market [J]. Electric

- Power Construction, 2023, 44(12):43-53.
- [24] 周专, 苗帅, 边家瑜, 等. 基于系统动力学氢需求预测与综合能源系统优化配置研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(6):12-22.
ZHOU Zhuan, MIAO Shuai, BIAN Jiayu, et al. Hydrogen demand prediction based on system dynamics and research on optimal configuration of integrated energy system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6):12-22.
- [25] 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]. 电力自动化设备, 2023, 43(7):133-141.
QI Xianjun, JIANG Zhongqi, ZHANG Jingjing, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary of carbon capture and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7):133-141.
- [26] 罗平, 闫文乐, 王严, 等. 考虑 CCUS 的电-气-热综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 高电压技术, 2022, 48(6):2077-2087.
LUO Ping, YAN Wenle, WANG Yan, et al. Robust optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering carbon capture, utilization and storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6):2077-2087.
- [27] 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):946-960.
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Multiple time scales scheduling strategy of wind power accommodation considering energy transfer characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3):946-960.
- [28] 陈伟伟, 张增强, 张高航, 等. 计及需求响应及抽水蓄能的含风电系统鲁棒机组组合[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2):75-82.
CHEN Weiwei, ZHANG Zengqiang, ZHANG Gaohang, et al. Robust unit commitment of power systems integrated wind power considering demand response and pumped storage units[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):75-82.
- [29] 张文杰, 吴杰康, 赵俊浩, 等. 考虑源-荷不确定性的水风柴微电网优化配置[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2):117-126.
ZHANG Wenjie, WU Jiekang, ZHAO Junhao, et al. Optimal capacity configuration of hydro-wind-diesel microgrid considering uncertainty of renewable energy and load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):117-126.
- [30] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):31-38.
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):31-38.
- [31] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16):8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16):8-18.
- [32] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1):118-126.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):118-126.
- [33] 许周, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2):53-59.
XU Zhou, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):53-59.
- [34] 张宏业, 吴杰康, 蔡锦健, 等. 考虑空调负荷和柔性热负荷响应的综合能源系统储能鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2022, 46(7):2733-2741.
ZHANG Hongye, WU Jiekang, CAI Jinjian, et al. Robust optimal allocation of energy storage in integrated energy system considering demand response of air conditioning load and flexible heating load[J]. Power System Technology, 2022, 46(7):2733-2741.
- [35] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6):1675-1683, 1904.
ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6):1675-1683, 1904.
- [36] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):248-255.
LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):248-255.
- [37] 孙惠娟, 蒙锦辉, 彭春华. 风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11):4040-4049.
SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power/photovoltaic/hydropower/carbon-capture units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4040-4049.
- [38] 王骞, 易传卓, 张学广, 等. 兼顾捕碳强度与可再生能源消纳的储能容量配置优化方法[J]. 中国电机工程学报,

2023,43(21):8295-8309.

WANG Qian, YI Chuanzhuo, ZHANG Xueguang, et al. Optimization of energy storage capacity sizing considering carbon capture intensity and renewable energy consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21):8295-8309.

[39] 杨立滨, 曹阳, 魏韡, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16):45-52.

YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16):45-52.

[40] 徐青山, 杨阳, 黄煜, 等. 基于非正定型相关性控制的拉丁超立方随机潮流计算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7):

2292-2299.

XU Qingshan, YANG Yang, HUANG Yu, et al. Probabilistic load flow computation using non-positive definite correlation control and Latin hypercube sampling[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2292-2299.

作者简介:



汪龙

汪龙(1981),男,学士,工程师,从事电网规划相关工作(E-mail:591397605@qq.com);

邱巍(1981),男,硕士,高级工程师,从事电网规划相关工作;

许欣宇(1985),男,学士,高级工程师,从事电力系统优化调度相关工作。

Optimal planning of the carbon capture-energy storage joint system for integrated energy system in a low-carbon park

WANG Long¹, QIU Wei¹, XU Xinyu¹, QIN Jinghui², SUN Xiaorong²

(1. State Grid Wuxi Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214061, China;

2. School of Electrical and Power Engineering Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to reduce the carbon emission of the integrated energy system in the park and to increase the new energy consumption, a novel planning method to optimize the carbon capture-energy storage joint system is proposed in this paper. Firstly, the operating principle and plan method of a carbon capture-energy storage joint system is introduced. Secondly, the Kullback-Leibler divergence (KLD) is used to illustrate the uncertainty of the new energy. Based on this, the optimal planning model of the carbon capture-energy storage joint system for the integrated energy system is proposed from the aspects of system investment, the operation and maintenance cost, the penalties of tripping the wind and photovoltaic power and the carbon trading cost. In the planning model, the overall cost of the integrated energy system is the main goal and the investment and maintenance cost of the carbon capture-energy storage joint system is the sub-goal. Finally, the distributed robust optimization method is utilized to solve the model, and the advantages of the proposed model on carbon emission reduction and new energy consumption are demonstrated by comparing the economy, emission reduction and new energy tripped under different scenarios.

Keywords: integrated energy system; carbon capture-energy storage joint system; distributed robust optimization; Kullback-Leibler divergence (KLD); carbon emission reduction; new energy consumption

(编辑 吴昊)