

计及灵活运行碳捕集电厂捕获能耗的 电力系统低碳经济调度

陈海鹏¹, 陈晋冬¹, 张忠², 王趁录², 王俊祺², 韩皓³, 吕鑫升⁴

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 国网甘肃省电力有限公司兰州供电公司, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国信息通信研究院, 北京 100089;

4. 国网吉林省电力有限公司松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要:针对碳捕集设备会产生较大捕获能耗成本的问题,采用灵活捕获运行模式调节碳捕集设备的捕获水平以降低捕获能耗成本,同时利用储液罐实现捕获能耗时移。通过需求响应削峰填谷增加负荷峰值时碳捕集设备捕获能力并提高风电利用率,从而降低捕获能耗成本和碳排放。以降低捕获能耗、提高碳捕集设备灵活性为目标,建立碳捕集电厂灵活捕获和溶剂存储模型。以系统总调度成本最小为目标,构建采用灵活运行模式的碳捕集电厂并计及需求响应的电力系统低碳经济调度模型。最后基于改进的IEEE 30节点系统对所建立的模型进行仿真,算例分析结果表明,所建模型可有效减少系统总调度成本,降低系统碳排放,提高系统风电消纳能力。

关键词:低碳;碳捕集电厂;灵活捕获;电价型需求响应;削峰填谷

中图分类号:TM 731

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109040

0 引言

2021年,碳达峰、碳中和被首次写入政府工作报告,我国承诺“争取在2060年前实现碳中和”。为了实现这一目标,可再生能源将成为未来能源供应的主体。然而可再生能源(如风能)通常具有较强的不确定性,保留一定比例的化石能源对于维持电网稳定运行至关重要^[1]。煤基工业和燃煤发电行业减排二氧化碳是当前我国碳减排的关键^[2],采用碳捕集技术能够实现大规模减排。碳捕集技术是指收集大型发电厂产生的二氧化碳,并用各种方法储存以避免其排放到大气中。然而,使用碳捕集设备在减少燃煤电厂二氧化碳排放的同时会降低电厂能量输出,进而导致电厂发电成本的增加^[3]。

以往对燃烧后碳捕集系统的研究主要为固定运行模式,即所有来自发电设施的废气都被送到碳捕集系统。采用固定运行模式的碳捕集电厂运行在稳定状态,此时碳捕集系统中二氧化碳的吸收、解吸和压缩速率始终保持相等。文献[4]考虑了虚拟电厂,采用风电、光伏和固定运行模式的碳捕集电厂联合运行方式降低了系统碳排放。文献[5]将固定运行的碳捕集电厂收集的二氧化碳用于电转气技术,将电转气-碳捕集电厂作为整体系统,提升了碳利用水平。文献[6]考虑了风电和负荷的不确定性,建立了风电-光热-碳捕集电厂调度模型,实现了电力低碳化。采用固定运行模式的碳捕集电厂可减少系统

碳排放量,但捕获能耗和发电功率存在耦合关系,即碳捕集能耗随着碳捕集电厂发电功率上升而增加。

带有溶剂存储罐燃烧后的碳捕集系统中富溶剂、贫溶剂储罐能够储存溶剂,这样碳捕集电厂发电和捕获可实现解耦,进而实现捕获系统的灵活运行。灵活的操作模式根据电力需求的可变性来动态改变电力输出和捕获系统能耗以使利润最大化^[7]。文献[8]考虑碳捕集电厂储液式和分流式相结合的运行模式,分析了储液式碳捕集电厂运行的优势。文献[9]采用改进的碳捕集电厂双碳量模型,通过虚拟电厂协调运行使系统更加低碳和经济。上述文献虽然考虑了溶剂存储,但没有充分考虑碳捕集设备运行能耗带来的发电成本损失,并且没有考虑需求侧资源调用对降低系统碳排放、提高系统经济性的作用。

目前对含碳捕集电厂调度模型的研究多位于源侧且采用固定运行模式,通过碳捕集电厂帮助系统降低碳排放。有关碳捕集电厂灵活运行和负荷侧资源调用情况的研究较少。并且碳捕集电厂在运行过程中会产生能量损耗,对能量损耗造成的损失分析还不充分。综上,为了减少系统碳排放并降低系统运行成本,本文考虑在火电厂安装碳捕集设备配合风电场运行,以系统总运行成本最小为目标,并考虑了碳捕集设备运行带来的成本损失,建立了源侧采用灵活捕获和溶剂存储运行模式的碳捕集电厂、荷侧计及需求响应资源调用的调度模型。首先,对碳捕集电厂捕获水平灵活运行模式和储液运行模式进行分析,并对比了灵活运行模式和固定运行模式的差别;其次,阐述了电市场和碳市场的交易机制和需求响应调用机制;最后,构建了采用灵活运行模式的

收稿日期:2021-04-12;修回日期:2021-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907020)

碳捕集电厂并考虑需求响应的电力系统调度模型,通过仿真验证采用本文的调度模型可以实现碳排放下降并降低系统总成本。

1 碳捕集电厂运行情况分析

为了减少二氧化碳排放,化石燃料发电厂可以安装碳捕集设备。目前捕获方法主要包括燃烧前捕获法、富氧燃烧法和燃烧后捕获法这3种^[10]。其中,燃烧后捕获法具有原理简单、适用性广等特点,其投资成本较低但碳捕集成本较高。本文考虑的碳捕集电厂采用燃烧后捕获法。

1.1 碳捕集电厂固定运行模式

碳捕集电厂产生的总能耗 P_c^{ccs} 主要分为2类:一类是基准能耗 P_c^m ,其与碳捕集电厂运行状态无关,其值不发生变化;另一类是运行能耗 P_c^o ,其由碳捕集电厂在运行过程中产生^[11]。总能耗的表达式为:

$$P_c^{ccs} = P_c^m + P_c^o \quad (1)$$

由于捕获系统存在能量消耗,碳捕集电厂向电力负载供电的净功率输出 P_c^{net} 等于总功率输出 P_c 和总能耗 P_c^{ccs} 之差:

$$P_c^{net} = P_c - P_c^{ccs} \quad (2)$$

碳排放总量 Q_c 由相应碳捕集电厂的总功率输出和火电机组碳排放强度 q_c 决定:

$$Q_c = q_c P_c \quad (3)$$

t 时段碳捕集设备的运行能耗 $P_{c,t}^o$ 可表示为:

$$P_{c,t}^o = \gamma_c q_c x_c \lambda_t P_{c,t} \quad (4)$$

式中: γ_c 为捕获单位二氧化碳所需的能耗; x_c 为捕获水平; λ_t 为 t 时段的烟气分流比; $P_{c,t}$ 为碳捕集电厂 t 时段总功率输出。运行1d的碳排放总量应低于某个阈值,设置此阈值可以防止火电厂过量排放二氧化碳。碳排放总量与风电场和火电厂净功率输出之间的平衡通过每日平均碳排放量 Q_{avg}^N 来表示:

$$Q_{avg}^N = \sum_{t=1}^T Q_{c,t} / \sum_{t=1}^T (P_{c,t}^{net} + P_{w,t}) \quad (5)$$

式中: $Q_{c,t}$ 为 t 时段碳排放总量; $P_{c,t}^{net}$ 为 t 时段碳捕集电厂向电力负载供电的净功率输出; $P_{w,t}$ 为 t 时段风电出力; T 为调度周期。

1.2 碳捕集电厂灵活运行模式

目前碳捕集电厂普遍面临碳捕集能耗较高、花费较大的问题,为了解决此问题,本文考虑碳捕集电厂的2种灵活运行模式,分别为捕获水平灵活运行模式和溶剂存储灵活运行模式。

1.2.1 捕获水平灵活运行模式

捕获水平灵活运行模式是通过在一定时间间隔根据当时电网电价有选择地降低碳捕集能耗来降低碳捕集成本。碳捕集设备将一部分富溶剂直接返回洗涤器而不流入气提塔,这样可以减少气提塔处理二氧化碳的能量,增加碳捕集电厂的发电量,上述过

程示意图见附录A图A1。由于碳捕集设备需要固定运行和维护,需要设定一个最小捕获值,即捕获水平不低于40%^[12]。

捕获水平的变化主要遵循24h期间市场电力成本的变化,在高电力成本时,捕获水平降低,而在低电力成本时,捕获水平增加。灵活捕获和固定捕获方式对比如图1所示。

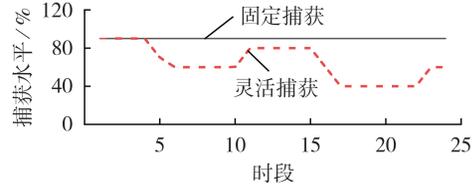


图1 灵活、固定捕获方式对比

Fig.1 Comparison of flexible and fixed capture methods

碳捕集能耗成本 F_{ccs} 用碳捕集设备的运行能耗和运行时段电价来表示:

$$F_{ccs} = P_c^o \mu_t \quad (6)$$

式中: μ_t 为 t 时段电价。捕获水平灵活运行模式在新安装碳捕集设备的电厂中更有利,因为无需额外投资。捕获水平降低会使碳排放总量高于传统碳捕集电厂,本文考虑采用其他措施来进一步降低系统碳排放。

1.2.2 溶剂存储灵活运行模式

在溶剂存储灵活运行模式中,通过能量时移可以提高系统灵活性。在高电力需求期间,通过将部分或全部二氧化碳溶剂暂时储存在富液罐中,降低能量损失;在低电力需求期间,可以将富液罐中富含二氧化碳的溶液送至气提塔进行处理^[13]。 t 时段碳捕集电厂处理的二氧化碳量可表示为:

$$Q_t^{ccs} = Q_{c,t}^{ccs} + Q_{s,t} \quad (7)$$

式中: Q_t^{ccs} 为 t 时段碳捕集电厂处理的二氧化碳量; $Q_{c,t}^{ccs}$ 为 t 时段碳捕集电厂预计处理的二氧化碳量; $Q_{s,t}$ 为 t 时段储液罐提供的二氧化碳量。

本文考虑的溶剂存储灵活运行模式中,储液罐中的溶液为乙醇胺溶液,二氧化碳可以溶解于乙醇胺溶液中^[8],其计算表达式如式(8)所示。

$$V_{CA,t} = Q_{s,t} M_{MEA} / (M_{CO_2} \delta C_R \rho_R) \quad (8)$$

式中: $V_{CA,t}$ 为 t 时段碳捕集电厂储液罐排出二氧化碳所需溶液体积; M_{MEA} 和 M_{CO_2} 分别为乙醇胺和二氧化碳的摩尔质量; δ 为再生塔解析量; C_R 为乙醇胺溶液浓度; ρ_R 为乙醇胺溶液密度。

储液罐中溶液存储量可由储液罐排出二氧化碳溶液体积计算得出,计算公式可表示为:

$$\begin{cases} V_{l,t} = V_{l,t-1} - V_{CA,t} \\ V_{r,t} = V_{r,t-1} + V_{CA,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $V_{l,t}$ 、 $V_{r,t}$ 分别为 t 时段贫液罐、富液罐的溶液体积。假设溶剂存储和提取过程不同时进行。溶剂存储灵活运行模式的实现通过使用附录A图A2所示

的溶剂存储罐,使碳捕集能耗发生能量转移。

采用溶剂存储灵活运行模式存储的碳捕集电厂在高电力需求期间向电网提供更多电能,储液罐存储二氧化碳,减少捕获量;在低电力需求期间,碳捕集电厂降低发电负荷,储液罐排出二氧化碳,增加捕获量。这样捕获系统可以相对独立于发电系统运行,实现能量时移,提高发电效率。

1.3 系统弃风消纳分析

风电作为清洁能源,其成本可忽略不计,充分消纳可再生能源可以更加经济地实现本文低碳经济目标。然而风电存在反调峰特性,在夜间负荷需求较少时风电出力较多,因此会存在较多弃风。采用灵活运行的碳捕集电厂可以降低火电机组最小出力,在一定程度上缓解这部分弃风消纳。但是由于碳捕集电厂也存在最小出力约束,对这部分弃风的消纳并不是十分理想,因此本文考虑通过负荷侧资源调用来进一步消纳弃风。

2 电力、碳市场交易机制

2.1 电交易机制

传统的由长期双边合同确定的固定电价无法体现每日负荷的波动性,本文采用分时电价,根据预测负荷的波动情况确定峰谷平时段电价^[14]。当峰谷时段电价差距较大时,碳捕集电厂采用灵活运行方式可以节约更多成本。

2.2 电价型需求响应

电价作为影响用户负荷使用方式的主要因素,当电价上涨时负荷需求呈下降趋势。需求响应过程是需求侧资源根据价格或激励等经济因素作用的过程,根据不同需求响应的特点对需求响应机理进行描述,是实现发用电一体化调度的基础。

电价型需求响应基于用户自愿根据电价的高低选择用电方式,可能会由于其他因素产生需求响应波动。在考虑分时电价情况下,可以采用弹性系数^[15]表示电价变化对负荷变化的影响,负荷需求响应率的计算表达式如式(10)所示。

$$\lambda_{\Delta q,t} = e_{i,j} \lambda_{\Delta c,t} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{\Delta q,t}$ 和 $\lambda_{\Delta c,t}$ 分别为 t 时段的负荷需求响应率和电价变化率; $e_{i,j}$ 为弹性系数,其表达式见式(11)。

$$e_{i,j} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \mu_j / \mu_j} \quad (11)$$

式中: P_i 为需求响应前 i 时段负荷; ΔP_i 为需求响应后 i 时段负荷变化量; μ_j 为需求响应前 j 时段电价; $\Delta \mu_j$ 为需求响应后 j 时段电价变化量。当 $e_{ij} \leq 0$ 时负荷不发生转移,当 $e_{ij} > 0$ 时负荷可以转移到其他时段。设调度周期为24 h,可将式(10)表示成矩阵形式,如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 / P_1 \\ \Delta P_2 / P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{24} / P_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & \cdots & e_{1,24} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & \cdots & e_{2,24} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{24,1} & e_{24,2} & \cdots & e_{24,24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mu_1 / \mu_1 \\ \Delta \mu_2 / \mu_2 \\ \vdots \\ \Delta \mu_{24} / \mu_{24} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.3 碳交易机制

碳交易机制是一种限额交易碳市场的形式,其中政府在各个行业分配固定数量的碳排放许可证,也称为碳排放信用。由于碳排放量较高而超过其碳排放限额的企业在碳市场上从碳排放限额过剩的公司购买碳排放限额。这种碳交易机制激励企业减少二氧化碳排放,以最大限度地提高其在碳市场的利润^[16]。本文假设碳交易发生在1 d结束时且全天的碳价格 π 保持不变。碳交易成本 F_c 可以表示为:

$$F_c = \pi \left(Q_c - \sum_{t=1}^{24} Q_t^{\text{ccs}} - \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^{24} \lambda_h P_{g,t} \right) \quad (13)$$

式中: λ_h 为碳排放配额系数; G 为火电机组总数; $P_{g,t}$ 为 t 时段火电机组 g 的出力。

碳交易成本表示系统的碳排在碳市场中的收益或支出,当系统碳排放大于碳配额时,超出部分碳量需要购买;当系统碳排放小于等于碳配额时,可向碳市场出售多余碳量。采用碳捕集设备减少碳排放会产生较大的捕获成本,故需考虑碳捕集设备的高额能耗,本文采用灵活捕获水平来缓解这些问题。

3 含碳捕集电厂的低碳调度模型

本文低碳调度模型通过对传统火电厂安装碳捕集设备来实现减排,电源侧由碳捕集电厂、传统火电厂和风电场提供电能,其中碳捕集电厂提供的电能为碳捕集电厂总输出电能除去碳捕集设备消耗的电能。负荷侧通过需求响应削峰填谷实现负荷转移。

3.1 目标函数

为了实现低碳目标,目标函数中引入碳交易成本 F_c 。同时考虑碳捕集能耗对机组运行成本的影响,目标函数表达式如式(14)所示。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G [f_g(P_{g,t})u_{gt} + S_{gt}(1-u_{g(t-1)})u_{gt}] + F_{wq} + F_c \quad (14)$$

式中: $f_g(\cdot)$ 为火电机组 g 的煤耗成本函数; u_{gt} 为 t 时段机组 g 的启停计划,取值为1表示启动,取值为0表示停机; S_{gt} 为 t 时段机组 g 的开机费用; F_{wq} 为弃风惩罚费用。

火电机组煤耗成本函数 $f_g(\cdot)$ 为机组出力的二次函数,其表达式如式(15)所示。

$$f_g(P_{gt}) = a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g \quad (15)$$

式中: a_g 、 b_g 、 c_g 为火电机组 g 的燃料费用系数。

弃风惩罚费用 F_{wq} 表达式为:

$$F_{wq} = p_{wq} q_t \quad (16)$$

式中: p_{wq} 为弃风量; q_t 为单位弃风惩罚费用。

3.2 约束条件

火电机组出力约束为:

$$P_g^{\min} u_{g,t} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} u_{g,t} \quad (17)$$

式中: P_g^{\min} 、 P_g^{\max} 分别为火电机组 g 的最小、最大出力。

火电机组爬坡约束为:

$$-R_{\text{dn}} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq R_{\text{up}} \quad (18)$$

式中: R_{up} 和 R_{dn} 分别为机组 g 的上、下坡速率。

旋转备用约束为:

$$\sum_{g=1}^G (P_g^{\max} - P_{g,t}) \geq R_{u,t} \quad (19)$$

$$\sum_{g=1}^G (P_{g,t} - P_g^{\min}) \geq R_{d,t} \quad (20)$$

式中: $R_{u,t}$ 、 $R_{d,t}$ 分别为 t 时段系统的上、下旋转备用。

风电出力不能超过其预测值, 风机出力约束为:

$$P_{w,t} \leq P_{\text{fw},t} \quad (21)$$

式中: $p_{\text{fw},t}$ 为 t 时段风电出力预测值。

需求响应后, 负荷需求响应量的期望值 E 之和为0。电价型需求响应约束为:

$$\sum_{i=1}^T E(\Delta P_i) = 0 \quad (22)$$

式中: ΔP_i 为 t 时段负荷需求响应量。

假设每日开始和结束时刻储液罐中体积相等。

碳捕集机组约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_t \leq 1 \\ 0 \leq V_{l,t} \leq V_l^{\max} \\ 0 \leq V_{r,t} \leq V_r^{\max} \\ V_{l,T} = V_{l,0} \\ V_{r,T} = V_{r,0} \end{cases} \quad (23)$$

式中: V_l^{\max} 、 V_r^{\max} 分别为贫液罐、富液罐最大储存量; $V_{l,0}$ 、 $V_{r,0}$ 分别为初始时段贫液罐、富液罐的溶液体积。

每日平均碳排放量约束为:

$$Q_{\text{avg}}^N \leq q_{c,\text{max}} \quad (24)$$

式中: $q_{c,\text{max}}$ 为碳排放强度最大值。

联络线传输功率约束为:

$$-P_{\text{tie},t}^{\max} \leq P_{\text{tie},t} \leq P_{\text{tie},t}^{\max} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{tie},t}$ 为 t 时段电网联络线传输功率; $P_{\text{tie},t}^{\max}$ 为 t 时段联络线最大传输功率。

电压相角约束为:

$$-\theta_n^{\max} \leq \theta_{n,t} \leq \theta_n^{\max} \quad (26)$$

式中: $\theta_{n,t}$ 为 t 时段节点 n 的电压相角值; θ_n^{\max} 为节点 n 的电压相角最大值。

3.3 模型求解算法

本文采用改进的二元灰狼算法对所建模型进行求解, 该算法为受到灰狼捕食猎物活动启发而开发的一种优化搜索方法, 其具有较强的收敛性能、参数少及易实现等特点, 已被成功应用于车间调度、参数优化和图像分类等领域。算法中的狼群由不同种类的狼组成, 狼群按照特定的顺序分为4层, 以保证狼

群的协调生活和狩猎。灰狼算法优化过程包含了灰狼的社会等级分层、跟踪、包围和攻击猎物等步骤, 具体分析见文献[17]。

机组组合问题的求解过程中存在较多的二元变量, 使用传统灰狼算法求解存在易陷入局部最优和求解速度较慢的问题。本文为了加强算法跳出局部寻优的能力, 完善动态权重策略, 引入概率扰动策略^[18]。算法流程图见附录A图A3, 文献[17-18]证明改进的二元灰狼算法可以较好地求解火电机组组合和电力系统低碳经济调度问题。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

本文采用改进的IEEE 30节点系统进行仿真, 在节点1、2、13分别接入250 MW风电场, 其余节点发电厂为火电厂, 引入碳捕集电厂时, 将容量最大的火电厂改造成碳捕集电厂, 系统结构见附录A图A4。设调度周期为24 h, 火电机组参数见附录A表A1, 模型中其余参数设置见附录A表A2。风电场的出力预测值及负荷、电价预测值见附录A图A5。为了充分验证所提模型在降低系统总成本、减少碳排放方面的优越性, 本文设置以下4种模式进行对比分析: 模式1, 不考虑碳捕集电厂和需求响应; 模式2, 仅考虑需求响应; 模式3, 采用固定运行模式的碳捕集电厂; 模式4, 采用捕获水平和溶剂存储灵活运行模式的碳捕集电厂, 并考虑电价型需求响应。

4.2 运行成本对比

4种运行模式成本对比情况如表1所示, 其中, 模式1—4对应的总成本分别为\$237545.9、225315.0、203570.4、176991.1, 弃风量分别为832.79、729.00、773.84、560.31 MW。通过对比4种运行模式的成本可以得出, 模式1不考虑碳捕集电厂和需求响应, 碳排放量为8379.5 t, 碳排放量超过惩罚限值, 需要在碳交易市场购买碳额度, 并缴纳惩罚费用, 故模式1总成本最高; 模式2仅考虑需求响应, 考虑需求响应可以降低火电机组出力, 并能大幅减少火电机组启停, 碳排放较不考虑需求响应也小幅下降, 对比模式1和模式2可以发现, 考虑需求响应使弃风量降低了103.79 MW, 考虑碳捕集电厂使弃风量降低了58.95 MW, 这说明需求响应降低弃风效果更好; 模式3考虑固定运行方式碳捕集电厂后, 碳排放较模式1下降了51.3%, 由于考虑碳交易市场, 总成本较模式1下降了14.3%; 模式4考虑源荷协调灵活运行, 系统总成本较模式3下降了13.06%, 捕获能耗成本降低5.37%, 火电机组启停成本在4种情况中最低, 这说明采用灵活运行方式优化火电机组运行效果最好, 模式4碳排放量较模式3下降392.1 t, 弃风量减少了213.53 MW。综上, 采用模式4的运行方式在提高系统经济性和降低碳排放方面具有优势。

表 1 4 种运行模式成本对比

模式	火电煤耗成本 / \$	碳交易成本 / \$	启停成本 / \$	捕获成本 / \$	弃风惩罚费用 / \$	碳排放量 / t
1	193 790	28 428	7 000	0	8 327.9	8 379.5
2	187 160	27 205	3 660	0	7 290.0	8 219.4
3	230 350	-42 278	7 760	146 320	7 738.4	4 081.0
4	214 480	-45 732	2 640	138 460	5 603.1	3 688.9

4.3 调度情况分析

图 2 为模式 3 和模式 4 碳捕集能耗的对比情况。由图可知,模式 3 采用固定运行模式的碳捕集电厂,二氧化碳捕获情况和机组出力相关,无法摆脱发电和碳捕集设备出力的限制。模式 4 中电厂考虑了捕获水平和溶剂存储灵活运行模式,使碳捕集设备出力调节范围变得更大,碳捕集设备运行更加灵活。

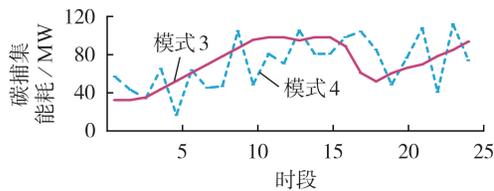


图 2 模式 3、模式 4 碳捕集能耗对比

Fig.2 Comparison of carbon capture energy consumption between Mode 3 and Mode 4

图 3 为模式 4 中储液罐的工作情况。综合分析图 2、3 可知,在时段 1—3,火电机组出力需求较小,此时电价较低,采用捕获水平和溶剂存储灵活运行模式的碳捕集电厂将捕获水平维持在较高值,储液罐会排出含有二氧化碳的富溶剂,使二氧化碳捕获量增加。在时段 10—12,负荷为高峰时期,火电机组出力需求较高,此时碳捕集电厂降低捕获水平,储液罐存储一部分火电机组发电产生的二氧化碳在富液罐中,使碳捕集能耗降低。时段 13 为负荷低谷时期,此时灵活捕获使捕获水平提高并且储液罐排出富溶剂进一步增加二氧化碳捕获量。在时段 18—21,负荷需求增加,但此时风电出力较大,火电机组无需提供大量电能,储液罐倾向于增加捕获力度。综上,通过灵活捕获和溶剂存储相结合的方式可以使碳捕集电厂的碳捕集能耗和发电能耗实现解耦,并且可以增强碳捕集设备的捕获能力。

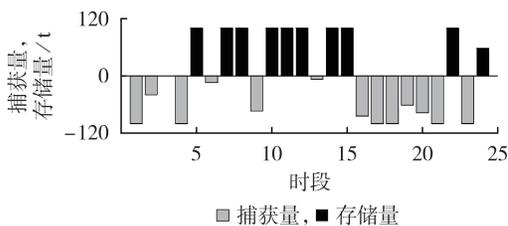


图 3 模式 4 下储液罐工作情况

Fig.3 Working condition of liquid storage tank under Mode 4

图 4 为灵活捕获水平变化情况,由图可知在时段 9—14 及时段 20、21 电价和捕获水平均保持在最高状态,时段 1—4 及时段 24 电价和捕获水平降为最小值。通过观察图 3、4 可知,捕获水平灵活运行模式和溶剂存储灵活运行模式相互配合,在储液罐排出二氧化碳溶剂时捕集水平保持较高状态,储液罐存储二氧化碳溶剂时捕获水平下降,这样增加了碳捕集设备的灵活运行能力,证明了碳捕集电厂采用灵活捕获配合溶剂存储方案的合理性。不同运行模式下火电机组 1 净出力情况见附录 B 图 B1,由图可知采用碳捕集设备后火电厂的出力下限变得更低(常规机组为 150 MW),这说明夜间风电出力较高时,碳捕集火电厂可以更好地与风电资源配合,满足负荷需求响应。通过模式 2 曲线可以看出需求响应削峰填谷能使火电厂出力更加平稳。

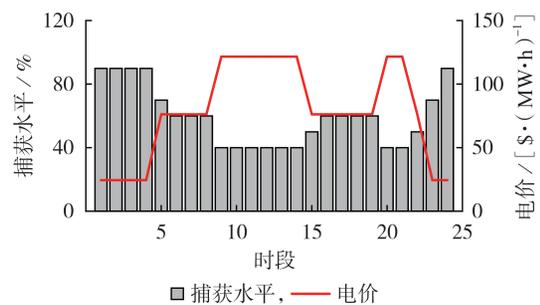


图 4 捕获水平变化示意图

Fig.4 Schematic diagram of capture level change

4.4 需求响应转移情况分析

考虑需求响应时需求侧资源转移情况如附录 B 图 B2 所示,图中净负荷为负荷与风电出力差值,通过净负荷可以更好地对风电受阻情况和火电机组出力进行分析。在时段 1—4,负荷需求低,净负荷出现负值,会使风电消纳困难,考虑需求响应后,负荷在净负荷较低的时段转入,在净负荷较高的时段转出,可以利用更多的风电资源。

4 种模式的弃风情况如附录 B 图 B3 所示。采用固定运行模式的碳捕集电厂可以使机组最小净出力下降,减少系统弃风。考虑灵活运行模式后,在风电受阻时段储液罐排出含有二氧化碳的富溶剂增大碳捕集设备出力,可以使碳捕集设备出力增加更多,使更多的风电资源得到利用;考虑需求响应后,在时段 1—4 负荷大量转入,给风电提供更多的上网空间。综上,碳捕集电厂灵活运行方式并考虑需求响应可以有效缓解夜间弃风过高现象。

本文需求响应转移率为 5%,实际情况中需求响应的转移率会发生变化,附录 B 图 B4 分析了需求响应转移率变化对系统调度结果的影响。由图可知,随着需求响应转移率的增加系统碳排放降低。附录 B 图 B5 分析了转移率不同时碳捕集电厂净输出。由图可知,当负荷转移率提高时,碳捕集电厂处于出

力峰值时段的情况明显少于低转移率时,这是因为通过负荷转移可以将高峰负荷转出使碳捕集电厂发电出力降低,为碳捕集设备运行提供更多的出力空间,这证明了需求响应可以有效提高碳捕集电厂运行能力,降低系统的碳排放量。

4.5 储液罐容量分析

利用储液罐可以实现捕获能量时移,时移量与储液罐容量相关,采用容量较大的储液罐时碳捕集能量时移效果更好,但会带来高额的经济成本。附录B图B6分析了不同储液罐容量对系统总成本和碳排放量的影响。由图可知,当储液罐容量由3650 m³增加至18250 m³时,系统碳排放量共下降7%,系统总成本下降了3.2%。系统碳排放降低是因为增加储液罐容量可以增加碳捕集电厂的发电需求较低时的二氧化碳捕获量。总成本下降是因为系统减少碳排放带来的收益高于储液罐容量增加带来的成本。当储液罐容量由18250 m³增加至25500 m³时,系统碳排放量下降了3.6%,系统总成本上升了0.5%。当储液罐容量超过25500 m³时,系统碳捕集量已接近饱和,储液罐容量增加带来的花费远高于系统减少碳排放量带来的收益,因此可以选择25500 m³作为储液罐的最佳容量。

4.6 模型普适性验证

由于风力发电的不确定性和相关性,有必要考虑不同时刻风电出力分布函数的差异性。本文运用Copula函数建立多风电场时序联合出力模型,对模型进行概率抽样并拼接生成大量初始场景集,采用K-means聚类算法进行场景缩减生成附录B图B7所示的风电时序联合出力4个典型场景^[19]。然后使用这4个典型场景分别进行低碳经济调度计算,算例分析结果如附录B表B1—B4所示。通过算例分析可知,不同场景下采用模式4的运行方式在提高系统经济性和降低碳排放方面均具有优势,证明了本文调度模型具有普适性。

5 结论

本文构建了含2种运行模式的碳捕集电厂并计及需求响应的电力系统优化调度模型,证明了该模型在降低碳排放、减少系统总成本方面的有效性,具体结论如下。

1)考虑灵活运行模式的碳捕集电厂可以使系统总成本较固定运行模式的碳捕集电厂降低了13.06%。碳排放量较采用固定运行模式的碳捕集电厂碳排放量降低了392.1 t。这证明了采用灵活运行模式的碳捕集电厂在保证低碳的同时降低了系统总成本。

2)通过灵活捕获运行模式可使捕获水平下降并减少捕获能耗,通过溶剂存储可实现捕获能耗时移,2种模式相互配合可增强碳捕集设备的捕获能力。

3)通过采用电价型需求响应可以实现削峰填谷,缓解风电消纳受阻现象,提高可再生能源利用率。通过负荷转移使碳捕集电厂在负荷高峰时段减轻发电压力,为碳捕集设备留出更多运行空间,从而实现降低系统碳排放。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张尧翔,刘文颖,李潇,等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):1-7,32.
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):1-7,32.
- [2] 毕夏,史长东,程竹,等. 低碳背景下我国新能源行业利用现状及发展前景分析[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(5):86-90.
BI Xia, SHI Changdong, CHENG Zhu, et al. The utilizing and developing analysis of China's new energy industry under low-carbon background[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(5):86-90.
- [3] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11):85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):85-93.
- [4] 孙慧娟,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):4040-4051.
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):4040-4051.
- [5] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7):61-67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):61-67.
- [6] 仲悟之,黄思宇,崔杨,等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9):3424-3432.
ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(9):3424-3432.
- [7] WILBERFORCE T, OLABI A G, SAYED E T, et al. Progress in carbon capture technologies[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 761:143203.
- [8] 崔杨,曾鹏,惠鑫欣,等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(5):1877-1886.
CUI Yang, ZENG Peng, HUI Xinxin, et al. Low-carbon economic dispatch considering the integrated flexible operation mode of carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1877-1886.
- [9] 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 cons-

- traint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.
- [10] 韩学义. 电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(2): 110-117.
HAN Xueyi. Current situation and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in electric power industry[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(2): 110-117.
- [11] LI X, ZHANG R F, BAI L Q, et al. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1219-1228.
- [12] ZIAI S, COHEN S, ROCHELLE G T, et al. Dynamic operation of amine scrubbing in response to electricity demand and pricing[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 4047-4053.
- [13] KHALILPOUR R. Multi-level investment planning and scheduling under electricity and carbon market dynamics: retrofit of a power plant with PCC(Post-combustion Carbon Capture) processes[J]. Energy, 2014, 64: 172-186.
- [14] 杨世博, 孙亮, 陈立东, 等. 计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 15-23.
YANG Shibo, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 15-23.
- [15] 蔡含虎, 向月, 杨昕然. 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 186-194.
CAI Hanhu, XIANG Yue, YANG Xinran. Economic capacity allocation and benefit analysis of integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 186-194.
- [16] 檀勤良, 丁毅宏. 考虑碳交易的火电节能调度优化模型及应对模式[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 175-181, 188.
TAN Qinliang, DING Yihong. Optimal energy-saving dispatching model for thermal power considering carbon trading and its coping mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 175-181, 188.
- [17] PANWAR L K, REDDY K S, VERMA A, et al. Binary grey wolf optimizer for large scale unit commitment problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 38: 251-266.
- [18] 金星, 邵珠超, 王盛慧. 一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 266-269.
JIN Xing, SHAO Zhuchao, WANG Shenghui. A hybrid optimization algorithm based on differential evolution and grey wolf optimizer[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 266-269.
- [19] 汤向华, 李秋实, 侯丽钢, 等. 基于Copula函数的风电时序联合出力典型场景生成[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 152-161, 168.
TANG Xianghua, LI Qiushi, HOU Ligang, et al. Generation of typical sequential joint output scenarios of wind power based on Copula function[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 152-161, 168.

作者简介:



陈海鹏

陈海鹏(1983—),男,吉林长春人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统运行分析、新能源联网发电关键技术等(**E-mail**: haipeng0704@126.com);

陈晋冬(1998—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度(**E-mail**: 1440083520@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Low-carbon economic dispatching of power system considering capture energy consumption of carbon capture power plants with flexible operation mode

CHEN Haipeng¹, CHEN Jindong¹, ZHANG Zhong², WANG Chenlu², WANG Junqi², HAN Hao³, LÜ Xinsheng⁴

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Lanzhou Power Supply Company of State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

3. China Academy of Information Communications Technology, Beijing 100089, China;

4. Songyuan Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Songyuan 138000, China)

Abstract: Aiming at the problem of higher capture energy consumption cost produced by carbon capture devices, the flexible capture operation mode is used to adjust the capture level of the carbon capture devices to decrease the capture energy consumption cost, at the same time, the liquid storage tank is used to realize the time shift of the capture energy consumption. The capture ability of the carbon capture devices at the peak load is increased and the utilization rate of wind power is improved by peak load shifting of the demand response, so as to realize the capture energy consumption cost and decrease carbon emission. Aiming at decreasing capture energy consumption and improving the flexibility of carbon capture devices, the flexible capture and solvent storage model of carbon capture power plants are constructed. Aiming at minimizing the total dispatching cost of system, a low-carbon economic dispatching model of power system with flexible operation mode of carbon capture power plants and demand response is constructed. Finally, the established model is simulated based on the improved IEEE 30-bus system. The example analysis results show that the established model can effectively reduce the total dispatching cost of system, decrease the carbon emission of system, and improve the ability of system to accommodate wind power.

Key words: low-carbon; carbon capture power plants; flexible capture; electricity price-based demand response; peak load shifting

附录 A

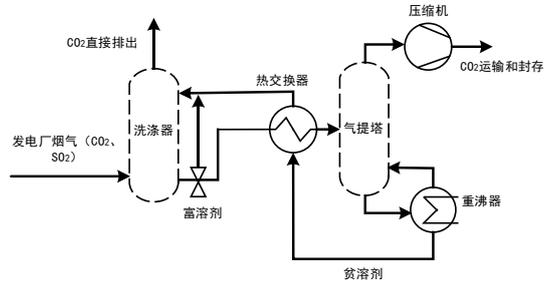


图 A1 捕集水平灵活运行模式原理图

Fig.A1 Schematic diagram of capture level flexible operation mode

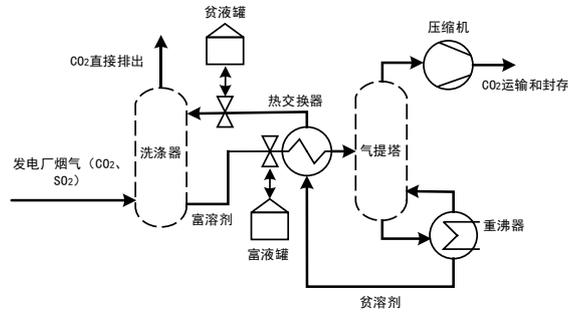


图 A2 溶剂存储灵活运行模式原理图

Fig.A2 Schematic diagram of flexible operation mode of solvent storage

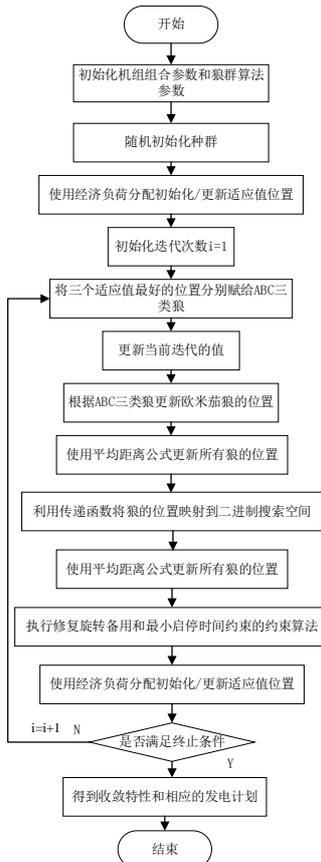


图 A3 改进二元灰狼算法流程图

Fig.A3 Flowchart for improved binary grey wolf optimizer

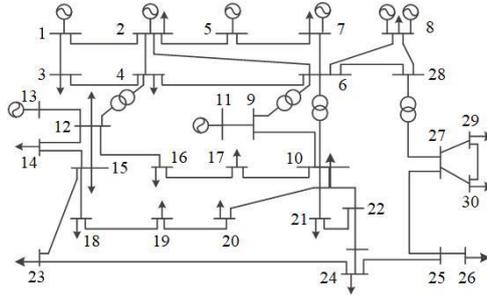


图 A4 改进 IEEE-30 节点系统拓扑

Fig.A4 Topology of improved IEEE-30 bus system

表 A1 火电机组参数

Table A1 Parameters of thermal power plant

机组	P_{\max} /MW	P_{\min} /MW	a /[\$ (MW h ²) ⁻¹]	b /[\$ (MW h) ⁻¹]	c /(\$ h ⁻¹)	开机费用/\$	碳排放强度/[t (MW h) ⁻¹]
1	455	150	0.000 48	16.19	1 000	9 000	0.90
2	130	20	0.002 00	16.60	700	1 100	0.99
3	130	20	0.002 11	16.50	680	1 200	0.98
4	162	25	0.003 98	19.70	450	1 800	1.02
5	80	20	0.007 12	22.26	370	340	1.05

表 A2 碳捕集设备参数

Table A2 Parameters of carbon capture device

参数	数值	参数	数值
P_c^m /MW	3	C_R /%	30
x_c	0.9	ρ_R / (g ml ⁻¹)	1.01
γ_c /[(MW h) t ⁻¹]	0.296	λ_h / [t (MW h) ⁻¹]	0.7
M_{MEA} / (g mol ⁻¹)	61.8	π / (\$ t ⁻¹)	14
M_{CO_2} / (g mol ⁻¹)	44	$q_{c,\max}$ / [t (MW h) ⁻¹]	0.3
δ	0.24		

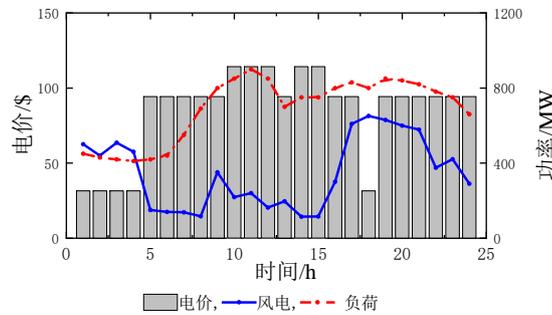


图 A5 风电、负荷和电价曲线

Fig.A5 Curves of wind power output, load and power price

附录 B

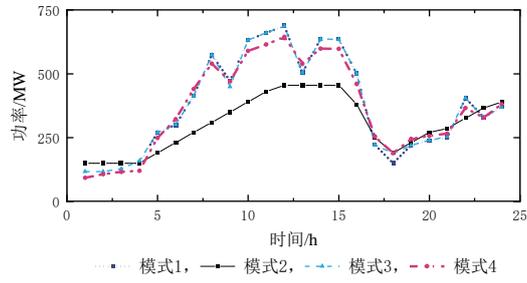


图 B1 机组 1 净出力
Fig.B1 Net output of Unit 1

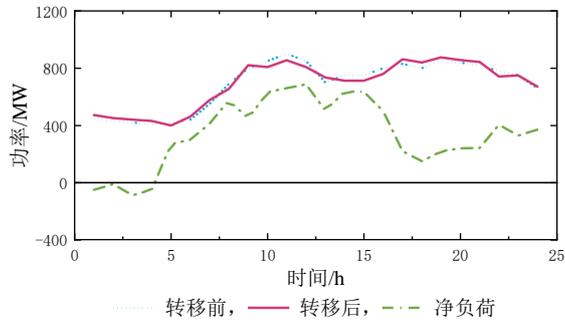


图 B2 模式 3 需求响应转移情况
Fig.B2 Demand response shift situation in Mode 3

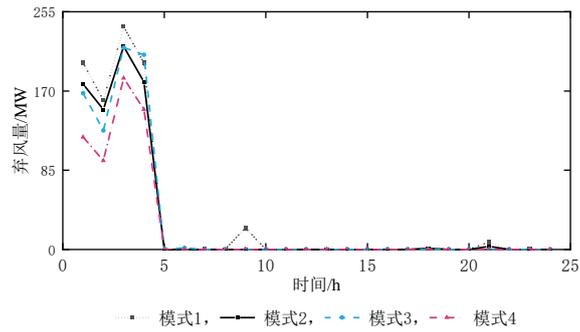


图 B3 4 种模式弃风情况
Fig.B3 Wind curtailment conditions in four modes

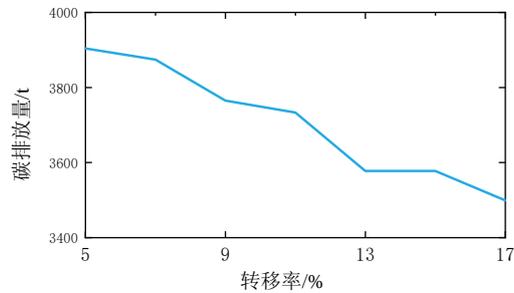


图 B4 需求响应转移率对碳排放影响
Fig.B4 Effect of demand response transfer rate on carbon emission

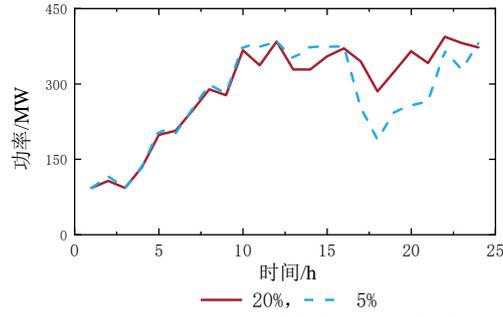


图 B5 转移率不同时碳捕集电厂净输出

Fig.B5 Net output of carbon capture power plant with different transfer rates

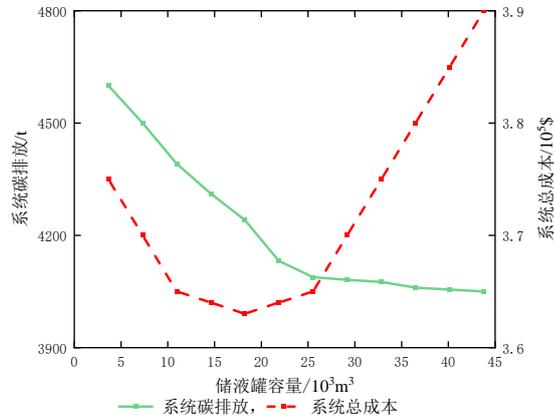


图 B6 储液罐容量对系统总成本和碳排放影响

Fig.B6 Influence of liquid storage tank capacity on total system cost and carbon emission

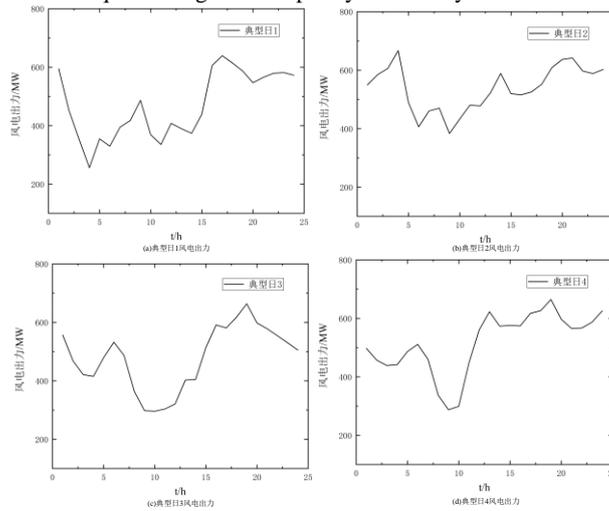


图 B7 不同典型场景下风电出力

Fig.B7 Wind power output under different typical scenarios

表 B1 风电典型日 1 调度结果

Table B1 Dispatching results on wind power typical day 1

模式	总成本/\$	碳排放/t	弃风率
1	264 440	5 819.7	9.06
2	263 340	5 801.8	7.90
3	223 781	2 396.7	8.33
4	207 593	2 345.2	6.45

表 B2 风电典型日 2 调度结果

Table B2 Dispatching results on wind power typical day 2

模式	总成本/\$	碳排放/t	弃风率
1	270 170	5 256.2	16.12
2	255 290	4 735.5	14.69
3	251 638	2 051.0	14.88
4	231 935	1 913.1	13.65

表 B3 风电典型日 3 调度结果

Table B3 Dispatching results on wind power typical day 3

模式	总成本/\$	碳排放/t	弃风率
1	315 460	6 147.7	13.94
2	281 700	5 806.6	12.54
3	258 344	2 857.4	12.65
4	245 123	2 339.1	12.44

表 B4 风电典型日 4 调度结果

Table B4 Dispatch results on wind power typical day 4

模式	总成本/\$	碳排放/t	弃风率
1	255 040	5 302.0	13.21
2	231 910	5 006.6	11.64
3	235 882	2 354.2	12.39
4	224 430	1 917.6	11.47