

考虑联合运行的碳捕集虚拟电厂调度模型

张三杰, 李军祥, 屈德强, 孔得朝

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年12月11日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月25日

摘要

为了增强电力系统的灵活性与经济性、促进新能源的消纳, 针对碳捕集机组传统运行方式在新能源大规模并网背景下灵活性不足的问题。基于碳捕集设备的运行原理, 考虑将区域内风电、光伏、储能与碳捕集电厂进行集成, 通过虚拟电厂进行调度, 使碳捕集设备采用火电、风电、光伏联合供电的方式运行。引入风光储碳捕集虚拟电厂联合运行系统总成本最小的目标函数, 兼顾系统的环境友好性, 建立考虑联合运行的碳捕集虚拟电厂调度模型, 算例分析验证了本文所提模型能够显著促进风电、光伏的消纳并提高系统的经济性与环境友好性。

关键词

碳捕集电厂, 虚拟电厂, 联合运行, 新能源消纳, 优化调度

Scheduling Model of Carbon Capture Virtual Power Plant Considering Joint Operation

Sanjie Zhang, Junxiang Li, Deqiang Qu, Dechao Kong

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 11th, 2023; accepted: Dec. 28th, 2023; published: Jan. 25th, 2024

Abstract

In order to enhance the flexibility and economy of the power system and promote the consumption of new energy, the traditional operation mode of carbon capture units is not flexible enough under the background of large-scale grid connection of new energy. Based on the operation principle of carbon capture equipment, it is considered to integrate wind power, photovoltaic, energy storage, and carbon capture power plants in the region, and dispatch them through virtual power plants, so that the carbon capture equipment can operate in the mode of combined power supply of thermal power, wind power and photovoltaic. The objective function of minimizing the total cost of the combined operation system of the wind-solar carbon storage and capture virtual power plant is introduced, taking

into account the environmental friendliness of the system, and a carbon capture virtual power plant scheduling model considering the combined operation is established. The example analysis verifies that the model proposed in this paper can significantly promote the absorption of wind power and photovoltaic, and improve the economy and environmental friendliness of the system.

Keywords

Carbon Capture Power Plant, Virtual Power Plant, Joint Operation, New Energy Consumption, Scheduling Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双碳背景下, 国家大力鼓励新能源并网, 并且进一步提高新能源入网比例, 但是主流新能源如光伏、风电等均具有出力难以准确预测的缺点[1], 因此在可再生能源并网背景下, 电网往往需要保留一定比例的化石能源来维持其稳定运行。这使得电力系统的碳减排进程受到阻碍。碳捕集电厂正是在此背景下的产物, 其通过消耗一定的机组能量来捕集机组产生的碳排放, 虽然会降低机组的供电效率, 但是能够有效地减少机组的碳排放量[2]。

关于碳捕集电厂在电力系统中的运行方式, 文献[3] [4]考虑将碳捕集电厂与电气综合能源系统结合, 验证了碳捕集装置在综合能源系统中能够有效提升电转气的运行效益, 降低系统碳排放。文献[5]考虑了碳捕集电厂储液式与分流式相结合的灵活运行方式, 建立了含风电的电力系统低碳经济调度模型, 验证了灵活运行方式对于系统成本和碳排放量的优化作用。文献[6] [7]考虑了碳捕集结合新能源的运行情况, 构建了新能源与碳捕集多源协调的考虑风电消纳效益的优化调度模型, 通过优化不同类型机组出力, 有效地促进了新能源消纳、降低了系统的碳排放强度。可以看出, 碳捕集电厂由于其所具有的相对于传统电厂更优的环境友好性和调峰特性[8], 被广泛用于多种能源配合下的电力系统中。

目前对于含碳捕集电厂的多能源调度模型研究多数侧重于碳捕集机组与系统内其他能源形式的出力情况, 通过协调出力来帮助系统降低碳排放, 提升系统经济效益。对于系统内碳捕集设备与其他能源形式更深层次的协同运行方式研究较少。同时, 现有研究中的碳捕集设备运行时均依附于普通发电机组, 与没有碳捕获设备的机组相比, 其捕获 CO₂ 所需的能量会显著降低这些机组的发电效率和净功率输出[9]。并且捕集能耗和对于 CO₂ 的捕集量与机组自身运行情况高度绑定, 在如今能源系统中能源形式多样、参与主体多样的背景下显得灵活性不足。

综上, 为了减少系统的碳排放量并降低系统的运行成本、促进风电和光伏的消纳, 在前人研究的基础上, 本文考虑将区域内光伏、风电、储能设备、碳捕集电厂进行集成, 构建含碳捕集的新能源消纳虚拟电厂, 建立虚拟电厂协调下光伏、风电、储能设备、碳捕集电厂的联合运行模型。最后通过算例仿真验证了本文调度模型能够实现系统弃光、弃风量的减少并能够降低系统的运行成本。

2. 虚拟电厂协调下碳捕集电厂联合运行特性分析

2.1. 碳捕集电厂系统结构

碳捕集机组由常规发电机组加装碳捕集设备组成, 图 1 为碳捕集电厂的能量流动框图, 图中的能量

流也反映了碳捕集电厂的运行原理。在其运行过程中，由机组运行产生功率并输出电能，在系统中被定义为“等效输出功率”，等效输出功率会被分成两部分，一部分输出到电厂外部系统中，称为“净输出功率”，这部分就是常规意义上的电厂出力；另一部分会被碳捕集系统消耗，称为“捕集能耗”。这部分是碳捕集设备捕集 CO_2 所消耗的能量，分为维持能耗和运行能耗[10]。其中，维持能耗与碳捕集设备运行状态无关，为固定值，记为 α ；运行能耗会随着机组的运行状态变化而变化，和 CO_2 捕集量正相关。

在这种运行方式下，碳捕集设备只依靠发电机组供电，其消耗功率与机组供给功率相等，则碳捕集设备消耗功率可表示为：

$$P_c^c = P_c^{\text{con}} = \alpha + P_c \delta \gamma \beta \quad (1)$$

式中： P_c 、 P_c^c 、 P_c^{con} 分别为碳捕集电厂的总发电功率、捕集设备消耗功率和发电机组供给碳捕集设备功率； δ 表示碳捕集机组的碳排放强度， β 表示碳捕集电厂的捕集效率。 γ 表示碳捕集电厂捕集单位 CO_2 所需能耗。

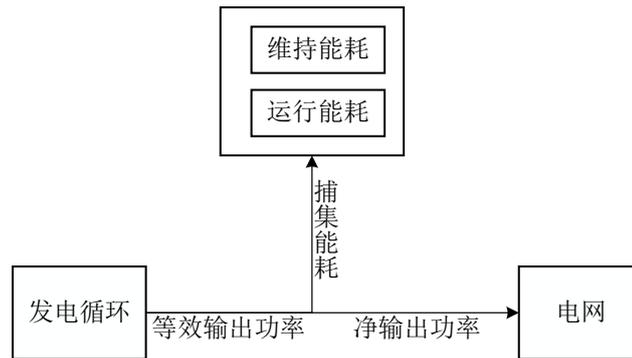


Figure 1. Framework of energy flow for carbon capture plant
图 1. 碳捕集电厂能量流框图

因此，碳捕集电厂的净输出功率 P_c^{net} 可表示为：

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

这种运行方式下碳捕集设备所捕集的 CO_2 量由机组在运行过程中的 CO_2 产量和设备自身的碳捕集效率决定，在系统中能够起到较好的减排作用，但是灵活性欠佳，对于新能源的消纳能力还有提升的空间。在此基础上提出考虑碳捕集设备与新能源联合运行的碳捕集电厂运行模型。

2.2. 风电 - 光伏 - 碳捕集 VPP 联合运行方式分析

本将风电场、光伏、碳捕集电厂、储能设备聚合为一个虚拟电厂，如图 2 所示。在虚拟电厂的调度下，风电、光伏也能够参与碳捕集设备的能源供给，下文称这种运行方式为联合运行。在这种运行方式下，碳捕集设备不仅由火力发电机组供电，也可以在虚拟电厂的协调下接受来自风电、光伏、储能设备的供电。则碳捕集设备联合运行模式下消耗功率 P^c 应为：

$$P^c = \alpha + P \delta \gamma \beta = P_c^{\text{con}} + P_w^c + P_v^c + P_s^c \quad (3)$$

式中： P 、 P^c 、 P_c^{con} 分别为联合运行模式下碳捕集机组总功率、碳捕集设备消耗功率与机组供给碳捕集设备功率， $P_w^c \geq 0$ 、 $P_v^c \geq 0$ 、 $P_s^c \geq 0$ 分别为风电、光伏、储能设备供给碳捕集设备的功率。

则联合运行模式下碳捕集电厂的净输出功率 P^{net} 为：

$$P^{\text{net}} = P - P_c^{\text{con}} \quad (4)$$

风电、光伏的出力分为两部分，一部分用于供给负荷，另一部分参与碳捕集设备的能耗供给，则在这种运行模式下风电、光伏的出力情况如下：

$$\begin{aligned} P_w^n &= P_w - P_w^c \\ P_v^n &= P_v - P_v^c \end{aligned} \tag{5}$$

式中： P_w 、 P_w^n 分别为风电场总功率和供给电网功率； P_v 、 P_v^n 分别为光伏发电总功率和供给电网功率。

对于储能设备，当其总功率 $P_s > 0$ 时，储能设备向电网放电，此时其功率分为两部分；当 $P_s \leq 0$ 时，储能设备充电，此时 P_s^c 、 P_s^n 均为0。储能设备出力情况如下：

$$\begin{aligned} P_s^n &= P_s - P_s^c, P_s > 0 \\ P_s^c &= P_s^n = 0, P_s \leq 0 \end{aligned} \tag{6}$$

式中： P_s 、 P_s^n 分别为储能设备总功率和供给电网功率。

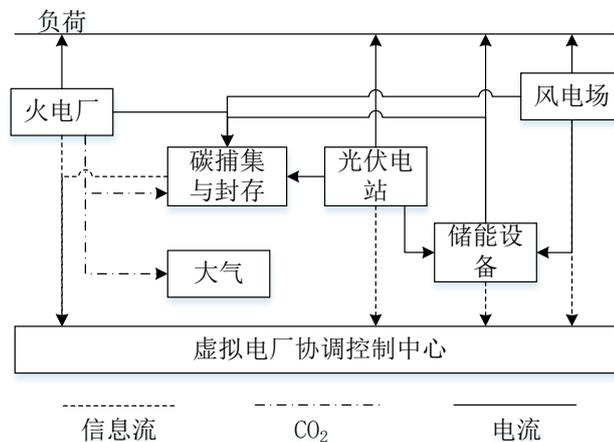


Figure 2. VPP model considering joint operation of carbon capture equipment

图 2. 考虑碳捕集设备联合运行的 VPP 模型

3. 考虑联合运行的碳捕集虚拟电厂优化模型

3.1. 目标函数

对于含碳捕集设备以及新能源综合出力的电力系统，本文在优化时主要考虑的问题为系统经济性和低碳特性，综合考虑发电成本、碳排放成本、弃光弃风成本、储能电池成本以及售电损失，并考虑多个等式以及不等式约束。成本函数为

$$F = F_{co_2} + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \tag{7}$$

式中： F_{co_2} 为碳排放成本； F_1 为常规机组发电成本； F_2 为弃光弃风成本； F_3 为储能设备运行成本； F_4 为售电损失成本。

1) 碳排放成本

碳排放成本即为供电企业在政府标准下由于实际碳排放量多于或少于政府所分配的免费碳配额而分别受到惩罚和奖励的成本，当供电企业的实际碳排放量小于分配到的碳排放额度，就可以受到政府鼓励绿色发展的奖励；反之，就要向政府按照比例缴纳超出部分的环境治理成本。

$$F_{co_2} = C(E_p - E_q) \tag{8}$$

式中： F_{CO_2} 为碳排放成本， E_p 为碳捕集机组的碳排放量， E_q 为政府分配的碳捕集机组免费碳配额， C 为政府对单位碳排放量的惩罚或奖励额度。

对于系统内碳捕集机组的免费碳排放配额，其取决于机组的上网电量，本文采用行业基准线法[11]来计算供电企业的免费碳排放配额 E_q

$$E_q = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \xi P_{i,t}^{\text{net}} \Delta t \quad (9)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{net}}$ 为碳捕集机组 i 在 t 时段的净输出功率， ξ 为单位电量碳配额初始分配系数， Δt 为单位调度时间， T 为调度周期， N 为机组数量，下同。

碳捕集装置开启之后，机组产生的 CO_2 排放大部分被碳捕集设备捕获，剩下部分由于功率限制无法充分捕获的 CO_2 会被排放至系统外部。碳捕集电厂的 CO_2 排放量 E_p 为：

$$E_p = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t} (1 - \beta_{i,t}) \delta_i \Delta t \quad (10)$$

式中： $P_{i,t}$ 为 t 时段机组 i 的总功率， $\beta_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的碳捕集效率， δ_i 为机组 i 的碳排放强度。

2) 发电成本

火电机组发电成本主要是煤耗成本，本文采用二次函数来进行描述。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (11)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 分别为各个机组的发电成本参数，由机组的结构性质决定[12] [13]。

3) 弃光弃风成本

当系统内风电、光伏出力结合常规机组能够满足系统负荷需求，并且储能设备充电功率达到上限的情况下仍有剩余时，系统将进行弃光弃风操作，此时会产生弃光弃风的惩罚成本[14]。弃光弃风惩罚成本表述如下：

$$F_2 = \sum_{t=1}^T P_{q,t} C_q \Delta t \quad (12)$$

式中： $P_{q,t}$ 为时刻 t 的弃光弃风量， C_q 为单位弃光弃风惩罚成本。

4) 储能设备运行成本

储能设备不能在一个时段内同时充放电，因此本文用布尔变量 θ_t 来描述储能设备在某一时刻的充放电状态，当储能设备处于一种状态时，公式中代表另一种状态的项乘以 0，则储能设备的充放电功率可表述如下：

$$P_{s,t} = \theta_t P_t + (\theta_t - 1) P_t \quad (13)$$

式中： P_t 表示 t 时刻储能设备的充放电功率数值， $P_t \geq 0$ ， $P_{s,t}$ 表示当前时段储能设备功率；当 θ_t 为 0 时 $P_{s,t} \leq 0$ ，表示储能设备为充电状态，同理当 θ_t 为 1 时 $P_{s,t} \geq 0$ ，表示储能设备处于放电状态。

同理也可采用布尔变量 θ_t 来对储能设备的蓄电量进行表述，使我们不必去判断某个时段储能设备的充放电状态。并且储能设备的运行会伴随着能量损耗，因此，考虑了储能电池自身能量损耗的蓄电量表达式如下：

$$E_t = (1 - \varepsilon) E_{t-1} - \theta_t P_t / \eta_{\text{dis}} - (\theta_t - 1) P_t \eta_{\text{ch}} \quad (14)$$

式中： E_t 为储能设备在时刻 t 的电量； ε 为储能设备自放电率， η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能设备的充放电效率。则储能设备的运行成本 F_3 可表述为：

$$F_3 = \sum_{t=1}^T P_t C_b \Delta t \quad (15)$$

式中： C_b 为储能设备单位运行成本。

5) 售电损失成本

本文在总体成本上考虑售电损失，由于碳捕集电厂在运行时需要向碳捕集系统供给其所需的捕集能耗，在常规电厂未安装碳捕集系统时，该部分能量可以出售获利[15]。因此，将在安装碳捕集系统后损失的本应获得的利润定义为售电损失成本。

$$F_4 = m \sum_{t=1}^T P_t^{\text{con}} \quad (16)$$

式中： m 为发电厂供给电网的上网电价， P_t^{con} 为 t 时段碳捕集电厂发电机组供给碳捕集设备的功率。

3.2. 约束条件

机组约束主要包括机组出力上下限约束和机组出力爬坡约束，具体约束参考文献[16]，在本文不再赘述。在忽略电力输送网络损耗的前提下，系统需要遵循功率平衡约束，各个时刻的碳捕集电厂机组、风电、光伏与储能设备的输出功率之和与电网的负荷相等。具体约束如下，式中， $P_{i,t}^{\text{net}}$ 为 t 时段碳捕集机组 i 的净输出功率，即碳捕集机组输送至电网的输出功率， $P_{w,t}^n$ 、 $P_{v,t}^n$ 、 $P_{s,t}^n$ 分别为 t 时段风电、光伏以及储能设备放电时向电网的输出功率， $P_{L,t}$ 为 t 时段电网的负荷需求， $P_{q,t}$ 为 t 时段系统的弃光弃风量。当 $P_{s,t}^n > 0$ 时，储能设备向系统内放电，此时 $P_{s,t}^n \geq 0$ ，应满足：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{net}} + P_{w,t}^n + P_{v,t}^n + P_{s,t}^n - P_{q,t} = P_{L,t} \quad (17)$$

当 $P_{s,t}^n \leq 0$ ，储能设备充电，此时 $P_{s,t}^n = 0$ ，不向电网输出功率，此时应满足：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{net}} + P_{w,t}^n + P_{v,t}^n + P_{s,t} - P_{q,t} = P_{L,t} \quad (18)$$

碳捕集效率约束：

$$0 \leq \beta_{i,t} \leq \beta^{\max} \quad (19)$$

式中： β^{\max} 为碳捕集电厂的最大碳捕集率。

储能设备功率与容量约束：

$$\begin{aligned} P_s^{\min} &\leq P_t \leq P_s^{\max} \\ E_{\min} &\leq E_t \leq E_{\max} \end{aligned} \quad (20)$$

式中： P_s^{\min} 、 P_s^{\max} 分别为储能设备运行功率的最小、最大限制值， E_{\max} 、 E_{\min} 分别为储能设备容量的上下限。

常规电力系统内的备用设置主要是为了应对机组停运或是对于负荷预测的误差所带来的影响。在大规模新能源并网的情况下，由于对风、光电预测的准确度不高，加大了电力系统对于备用容量的需求。一般同时考虑正、负旋转备用容量约束来减少由于预测误差对整体系统调度的影响，系统旋转备用约束具体表述如下：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (P_i^{\max} - P_{i,t}) &\geq R_{\text{ur}} \\ \sum_{i=1}^N (P_{i,t} - P_i^{\min}) &\geq R_{\text{dr}} \end{aligned} \quad (21)$$

式中： R_{ur} 与 R_{dr} 分别为系统在时刻 t 的正、负旋转备用的需求，一般可以取当前时段内负荷的5%和新能源出力的10%的和。

综上所述，考虑碳捕集电厂联合运行的VPP模型总结为如下混合整数非线性规划模型：

$$\begin{aligned} \min F &= F_{\text{co}_2} + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ \text{s.t.} &\text{式(8)~(21)} \end{aligned} \quad (22)$$

4. 算例分析

4.1. 算例数据

本文中模型考虑配置风电与光伏各400 MW、储能系统400 MW；6台由常规火电机组改造的碳捕集机组，其机组具体参数如表1所示。算例以一天内24 h为一个调度周期，周期内系统中风力发电、光伏发电预测功率以及调度日内24时段的负荷预测值如图3所示。仿真过程中的数值设置如下：

碳捕集电厂捕集单位 CO_2 所需能耗 γ 为0.18 MW，维持能耗为3 MW，碳捕集效率最大值 β^{\max} 为0.9，碳排放成本中政府对单位碳排放量的惩罚或奖励额度 c 为300元/吨，机组电力上网电价 m 为300元/MW，弃光弃风惩罚成本 C_q 为500元/MW，储能设备运行成本 C_b 为50元/MW，储能设备的容量上下限 E_{\max} 、 E_{\min} 分别为400 MW、100 MW，碳配额分配额定强度 ξ 为0.76，机组的碳排放强度 δ 为0.96，充放电功率上下限 P_s^{\max} 、 P_s^{\min} 分别为50 MW/h、0，充放电效率 η_{ch} 、 η_{dis} 均为0.95，自放电率 ε 为0.01。

4.2. 仿真分析

本文所建立的考虑联合运行的风光储碳捕集虚拟电厂模型是一个较为典型的混合整数非线性规划模型，其求解可以采用成熟的商用求解器来求解。本文采用Yalmip工具箱和Gurobi求解器结合的方法来求解[17]。为了对比碳捕集机组对于风电、光伏的消纳作用和系统的低碳经济情况，本文考虑了该调度模型运行时的三种场景：

场景1：只考虑风电、光伏、储能以及常规火电机组运行的系统结构。场景2：考虑风电、光伏以及火电机组改装碳捕集机组，不采用联合供电。在该情境下，碳捕集机组能耗均来自于常规火电机组的供电。场景3：考虑风电、光伏以及碳捕集机组联合运行，在联合运行场景下，碳捕集设备不仅能够由常规火电机组供电，同时也可以接受来自于风电、光伏、储能设备的供电。

Table 1. Parameters of carbon capture unit

表1. 捕集机组参数

机组	P_i^{\max} /MW	P_i^{\min} /MW	(U_i, Z_i) / (MW/h)	燃料成本系数		
				a_i	b_i	c_i
1	300	100	(50, 50)	0.0504	160.44	10232.6
2	300	100	(50, 50)	0.0504	160.44	10232.6
3	300	100	(50, 50)	0.1197	189.35	8075.9
4	300	100	(50, 50)	0.0266	190.12	26351.5
5	300	100	(50, 50)	0.0532	190.12	13175.4
6	400	100	(50, 50)	0.1197	189.35	8075.9

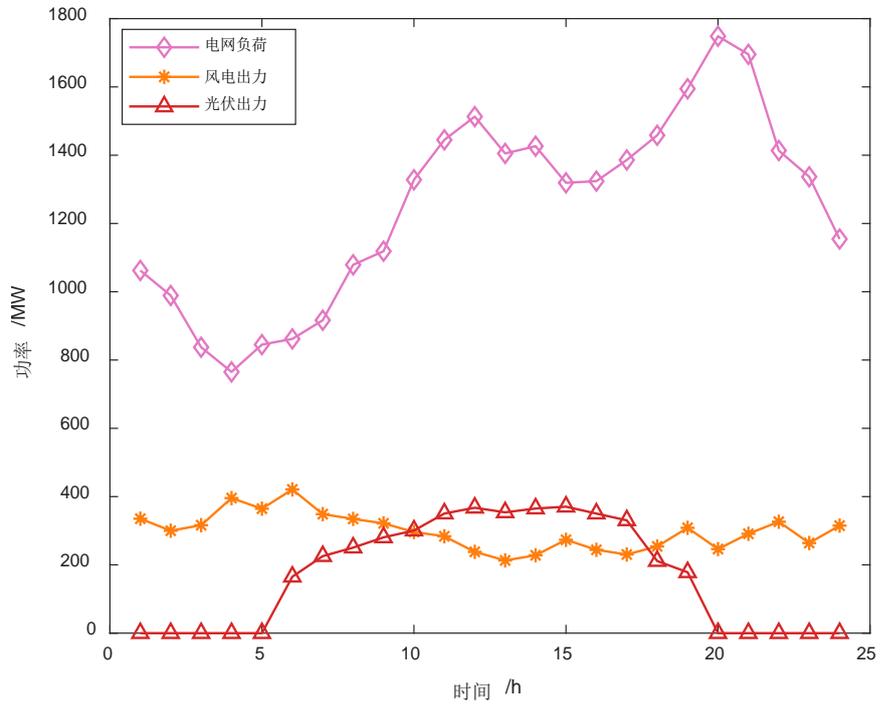


Figure 3. Forecast power of wind power, photovoltaic and grid load
图3. 风电、光伏及电网负荷预测功率

4.2.1. 模型目标优化结果及其分析

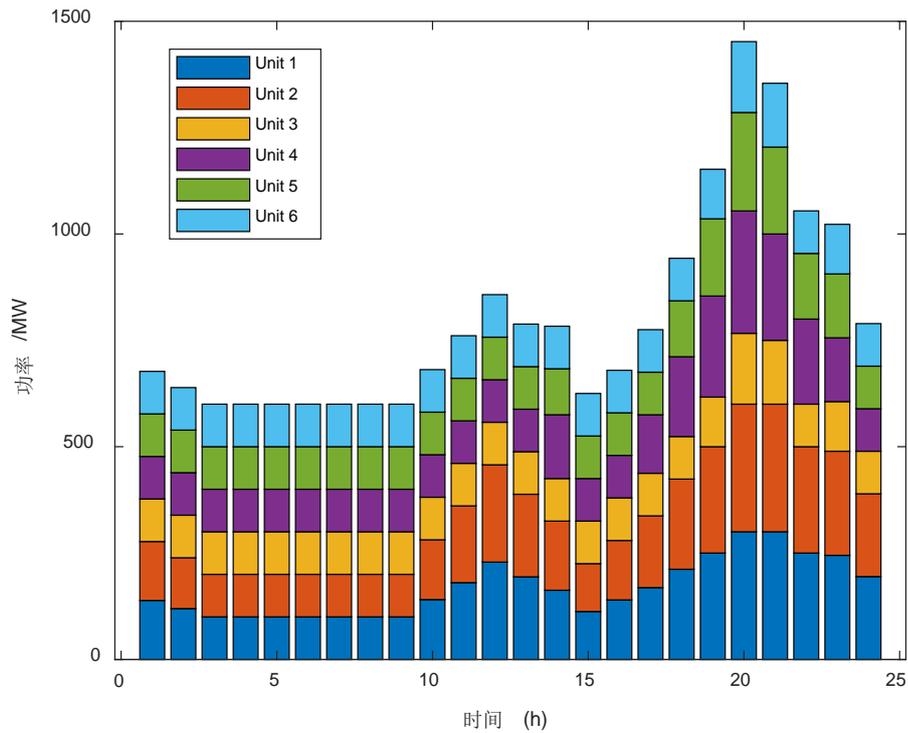


Figure 4. Output of each carbon capture unit under combined operation
图4. 联合运行下各碳捕集机组出力情况

三种场景下系统总成本以及各项成本的值如表 2 所示, 由表 2 可见, 三种场景下的综合成本由低到高依次为场景 3、场景 2、场景 1。在为系统增加碳捕集设备后, 系统运行总成本降低了 283.16 万元, 这说明碳捕集设备能够显著提高系统在运行过程中的经济性。在各项成本中, 发电成本相比于增加碳捕集设备之前有部分增加, 这是由于碳捕集机组的运行特性所导致的, 机组需要增大发电功率来供给碳捕集设备的能耗, 但同时也给系统带来了碳排放量的显著减少。系统由于碳排放量少于预分配碳配额量而得到了政府环保部门的奖励, 从而显著降低了碳排放成本。场景 3 中, 在系统中的碳捕集设备与风电、光伏、储能设备联合运行之后, 系统总成本进一步减少, 系统运行总成本相比场景 2 降低了 267.11 万元。其中碳排放成本减少原因是相较于场景 2 中的运行方式, 场景 3 的联合运行方式能够为电网输出更多的上网电量, 因此也能够得到更多的碳配额分配。场景 3 的弃光弃风成本也由于联合运行模式下弃光弃风量的减少有了显著减少。

Table 2. Comparison of main costs of each scenario

表 2. 各场景主要成本对比

场景	总成本/万元	发电成本/万元	弃光弃风成本/万元	碳排放成本/万元
场景 1	723.48	541.91	62.25	115.41
场景 2	440.32	608.75	29.58	-359.34
场景 3	173.21	609.89	16.43	-454.77

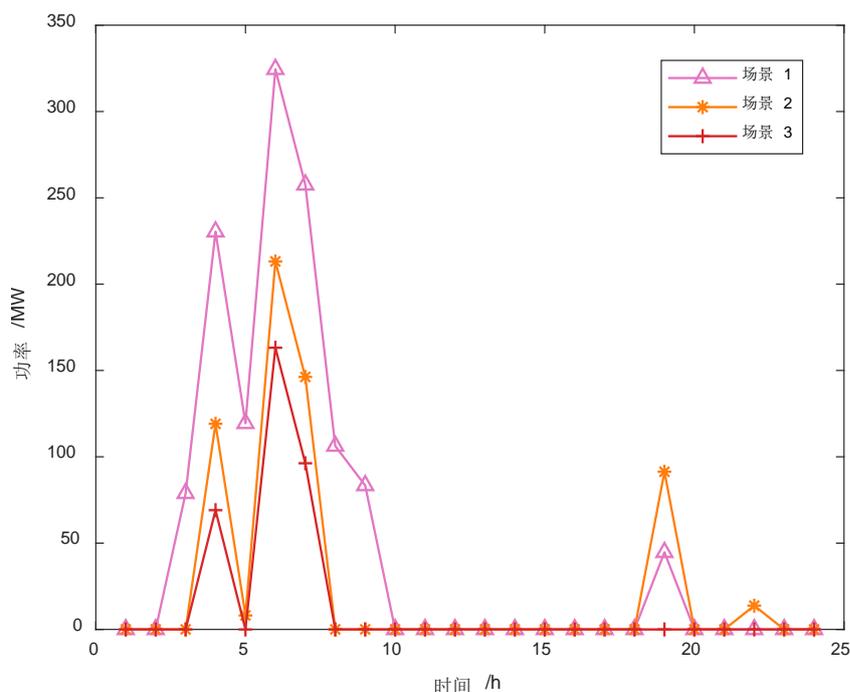


Figure 5. Abandonment of wind power and photovoltaic power generation under three scenarios

图 5. 三种场景下弃光弃风量

4.2.2. 风、光电消纳情况分析

场景 3 碳捕集电厂各机组的出力情况如图 4 所示, 可以看出, 发电成本系数较小的机组出力较大, 并且在风电、光伏出力较大且负荷相对较小时, 机组的出力都维持在相对较低的水平。结合图 5 可以看

到, 在机组出力最低的时段, 往往伴随着一定的弃光弃风量, 这是由于此时风电、光伏和机组的出力大于系统中所需要的负荷, 并且储能设备功率也达到了上限, 因此系统只能弃掉一部分风电、光伏的出力来满足系统的功率平衡约束。在加装碳捕集设备后, 由于碳捕集设备向电网的输出功率小于其总功率, 电网能够更多的接纳新能源, 因此在系统中风电、光伏较多时, 具有一定的促进风电、光伏消纳的作用, 因此在场景 2 中, 弃风弃光量有了较为显著的减少。在联合运行方式下, 风电、光伏也能够参与到碳捕集设备的运行中去, 不仅能够提高机组的净输出功率, 也能够促进风电与光伏的消纳。因此场景 3 的弃风弃风量相比于场景 2 进一步减少。

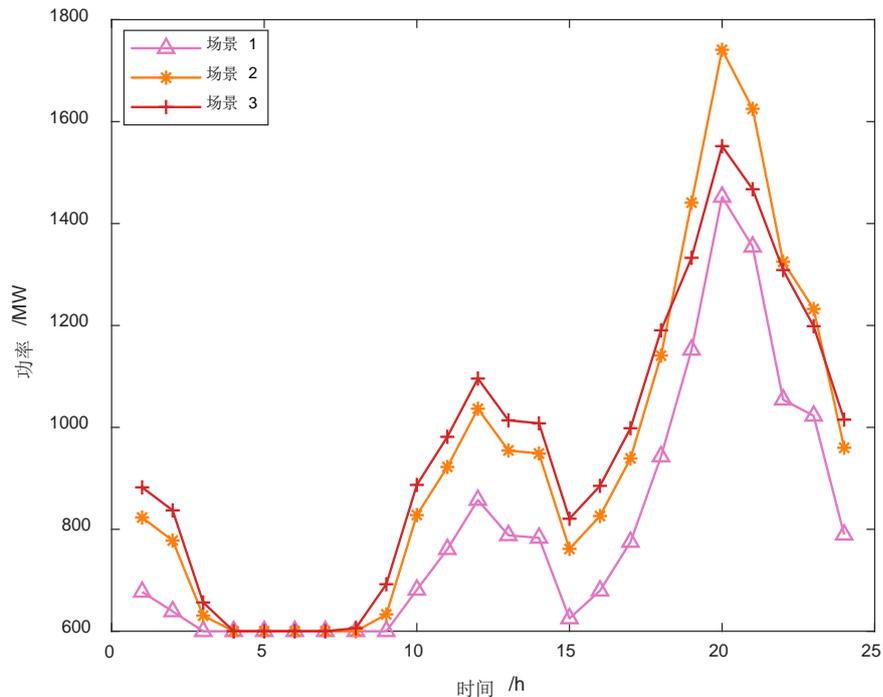


Figure 6. Total power of unit under three scenarios
图 6. 三种场景下机组总功率图

4.2.3. 机组运行情况分析

三种场景下机组总功率如图 6 所示。加装碳捕集设备后, 机组的总功率相比于之前常规运行时有所提升, 这是由碳捕集机组本身的运行机制所造成的。机组的总功率被分为两部分, 一部分用来供给碳捕集设备的能耗, 另一部分作为机组的上网功率参与系统的电力调度。在联合运行后, 场景 3 碳捕集机组的功率相较于场景 2 的机组功率有所波动, 这是由于碳捕集设备在接受来自机组、风电、光伏、储能四种渠道的供电之后, 机组运行方式更加的灵活, 不必为了满足碳捕集设备的需求而在已经满足上网功率的情况下增加功率, 能够将新能源发电的电功率用于供给碳捕集设备的能耗。在负荷相对较低的时段, 场景 3 的机组出力略高于场景 2, 在负荷达到峰值的时段, 场景 3 机组出力略低于场景 2, 体现出联合运行方式由于其灵活性对于机组出力的峰谷具有一定的调节作用。

三种场景下机组的碳排放量如图 7 所示, 在加装碳捕集设备后, 机组产生的大部分 CO_2 均被碳捕集设备捕获, 只剩余少量排放到系统外部, 机组的碳排放量有了明显的减少, 受限于碳捕集设备自身效率因素, 碳排放量并不会为 0。在系统联合运行后, 由发电成本可知, 场景 2 与场景 3 的机组功率相差不多, 在机组所产生 CO_2 被充分捕集的情况下, 两种场景下的 CO_2 排放量没有显著差别。

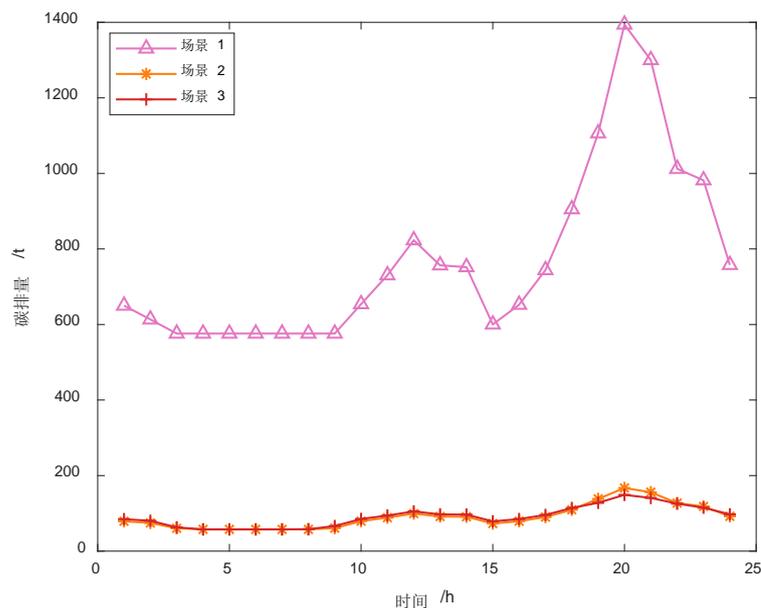


Figure 7. Carbon emission of units under three scenarios
图 7. 三种场景下机组碳排放量

5. 结论

在新能源大规模并网的背景下, 本文针对碳捕集电厂参与的多能源协同电力系统, 将碳捕集电厂和新能源发电站与常规虚拟电厂进行集成, 构建了考虑联合运行的风光储碳捕集虚拟电厂调度模型, 其中新能源发电可以作为碳捕集设备的辅助能源供应商, 增强了碳捕集设备运行的灵活性。对建立的混合整数非线性规划模型进行求解和分析。结果显示, 碳捕集系统的加入能够有效地降低系统的碳排放量, 且在联合运行模式下, 系统对风电、光伏的消纳能力有明显的提升, 能够显著降低系统的运行成本并促进风电、光伏的消纳。有效地增加电力系统的经济性和环境友好性。

基金项目

国家自然科学基金项目(72701130, 71871144, 12071112)和大学生创新项目(XJ2023156)。

参考文献

- [1] 戴蕾思, 叶承晋, 傅旭华, 孙可, 边巧燕, 辛焕海. 考虑概率分布约束的含高渗透率风电电力系统储能鲁棒优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 769-777.
- [2] 康重庆, 季震, 陈启鑫. 碳捕集电厂灵活运行方法评述与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6):1-10.
- [3] 盛四清, 吴昊, 顾清, 李朋旺, 陈海瑞. 含碳捕集装置的电气综合能源系统低碳经济运行[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 82-90.
- [4] 陈伯达, 林楷东, 张勇军, 陈泽兴, 王奖, 苏洁莹. 计及碳捕集和电转气协同的电气互联系统优化调度[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 9-17.
- [5] 崔杨, 曾鹏, 惠鑫欣, 李鸿博, 赵君田. 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.
- [6] 赵冬梅, 王浩翔, 陶然. 计及风电-负荷不确定性的风-火-核-碳捕集多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 707-718.
- [7] 盛四清, 李亮亮, 刘梦, 李明跃. 风电-碳捕集电厂联合运行的电力系统优化调度[J]. 电测与仪表, 2016, 53(24): 75-79+99.
- [8] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.

- [9] Chen, Q.X., Kang, C.Q., Xia, Q. and Kirschen, D.S. (2012) Optimal Flexible Operation of a CO₂ Capture Power Plant in a Combined Energy and Carbon Emission Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 1602-1609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2185856>
- [10] 程耀华, 杜尔顺, 田旭, 张宁, 康重庆. 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, 3(4): 339-350.
- [11] 彭元, 娄素华, 吴耀武, 王莹, 周鲲鹏. 考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4508-4516.
- [12] 高岩. 基于需求侧管理实时电价优化方法综述[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(2): 103-111+121.
- [13] 李军祥, 张文财, 高岩. 基于用户电器分类的智能电网实时定价研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(4): 210-216.
- [14] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 刘波, 冯万兴, 周盛, 陈轩恕, 韦古强, 孙辰军, 张崧. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133.
- [15] 周任军, 刘阳升, 成天乐, 潘志, 肖国骏. 考虑碳排放权价格敏感区间的碳捕集水平优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 46-50+57.
- [16] 杨媛媛, 杨京燕, 夏天, 白晓磊, 马昌建. 基于改进差分进化算法的风电并网系统多目标动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 24-29+35.
- [17] 邱纯, 应展烽, 冯奕, 颜建虎. 计及碳配额的混合储能综合微能源网优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 119-127.