

基于风电-碳捕集电力系统的灵活性调峰策略

崔 杨¹, 张 聪¹, 张 璐², 赵钰婷¹, 施浩波³, 刘新元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. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 4. 国网山西省电力科学研究院, 山西 太原 030012)

摘要:高比例风电并网增大了电力系统调峰负担,因此亟需提高电力系统调峰灵活性,助力新型电力系统低碳-零碳化的发展。分析碳捕集电厂优良的调峰性能及其用于调峰辅助服务的必要性,并论证碳捕集电厂低碳特性在碳交易中发挥的积极作用,由此提出碳捕集电厂灵活性调峰的运行策略,并阐述所提策略的低碳性与经济性。构建以电力系统综合成本最优为目标的风电-碳捕集调度模型,并基于此模型对比不同灵活运行方式下碳捕集电厂的低碳性能与经济效益。最后,在改进的IEEE 39节点系统中进行仿真,结果验证了所提模型可有效协调调峰资源,在满足电力系统调峰需求的同时降低系统的碳排水平与运行成本。

关键词:碳捕集电厂; 风电; 调峰; 灵活性; 经济调度; 低碳

中图分类号:TM73; TK01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202301001

0 引言

随着我国“双碳”目标的提出,以风电、光伏为主的新能源装机容量提升迅速,然而其较强的随机性给电力系统调峰带来了巨大的挑战。我国调峰需求主要由水电机组与火电机组承担,水电机组调峰能力较为理想,但其受到地理条件的制约;火电机组通过常规调峰与深度调峰提升新能源消纳水平^[1],但其作为CO₂的主要排放源,不利于电力系统的低碳转型。

目前,在构建新型电力系统环境下对多省电网开展调峰辅助服务试点运行的举措可有效缓解高比例风电并网的调峰压力^[2]。文献[3]论述了华北区域电力辅助服务运行现状,提出了调峰辅助服务评价体系,目的为构建更完善的调峰辅助服务机制。文献[4]分析了常规火电机组不同级别深度调峰的机组特性,旨在为常规火电提供调峰辅助服务予以技术支持,提高风电渗透率。文献[5]制定了水电机组调峰赔偿方案,旨在为水电机组作为调峰辅助服务主体提供参考,促进风电并网。文献[6]指出了当前调峰辅助服务运营规则的设计正处于动态发展阶段,应根据实际需要不断调整。在展开调峰策略与

政策探究的同时,对火电厂进行低碳化技术改造是促进电力系统低碳转型、提高电力系统调峰能力的另一重要手段^[7]。如今碳捕集电厂灵活运行方式大多采用分流式,但此运行方式存在耦合问题,导致其在调峰与低碳方面存在局限^[8]。文献[9]在碳捕集电厂内部装设CO₂存储器,从而实现碳捕集能耗的能量时移,使碳捕集电厂具备更优良的调峰与低碳性能。此外,目前研究已经论证了碳捕集电厂提供调峰辅助服务的潜力^[10],可使碳捕集电厂作为调峰辅助服务主体具备理论依据。文献[11]引入碳捕集调峰并绘制了调峰成本曲线,旨在调整调峰电源出力顺序,降低系统调峰成本,但未涉及灵活运行方式的碳捕集电厂调峰及碳减排效益的研究,并且未定量分析碳捕集电厂提供调峰辅助服务的低碳效果与经济效益。事实上,在实现碳达峰目标之前,以常规电厂参与调峰或以改造后的碳捕集电厂进行低碳调度等方式,是现在乃至未来一段时间电网调峰的主要手段。上述常规电厂参与深度调峰并获取调峰补偿的相关研究对电网发展具有深刻意义,但对于一种新兴发电主体的碳捕集电厂参与碳交易并提供调峰辅助服务进行灵活性调峰的相关研究还较少,并且碳捕集电厂如何提高调峰积极性还有待探究。此外,不同灵活运行方式下碳捕集电厂灵活性调峰的低碳性与经济性对比尚有不足。

为此,本文提出了考虑调峰灵活性的含风电-碳捕集电力系统低碳经济调度策略。首先,利用碳捕集电厂能量时移特性与低碳特性,并运用调峰辅助服务与碳交易的运营规则,充分探讨了碳捕集电厂参与碳交易并提供调峰辅助服务的低碳性能与经济效益。然后,构建了综合考虑碳交易、调峰辅助服务和灵活运行方式的碳捕集电厂调度模型。最后,通

收稿日期:2022-02-22;修回日期:2022-06-16

在线出版日期:2023-02-01

基金项目: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开放课题(MPSS2021-09);国家自然科学基金资助项目(51777027)

Project supported by the Open Fund of the Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(MPSS2021-09) and the National Natural Science Foundation of China(51777027)

过仿真验证了采用本文所提调度策略有利于电力系统低碳转型。

1 碳捕集电厂灵活性调峰策略

1.1 碳捕集电厂调峰基本原理

分流式运行方式可通过控制分流比调节碳捕集电厂净出力,具备优良的调峰特性。但当分流比一定时,分流式运行方式存在耦合问题,不能依据调峰需求调节碳捕集能耗。相较上述运行方式,本文将分流式碳捕集电厂配备储液罐以形成综合灵活运行的碳捕集电厂。它能够将在负荷高峰时段待处理的 CO_2 暂存在储液罐至负荷低谷时段,通过转移碳捕集能耗,实现能量时移^[12],可进一步降低净出力下限。

碳捕集调峰原理见附录A图A1,可见当总输出功率一定时,相比常规火电厂,碳捕集电厂的净输出功率更小,因此具备更大的调峰深度。此外,相比常规火电厂出力变化需耗费较长时间改变锅炉状态,碳捕集电厂的碳捕集能耗可直接由厂用电提供,迅速改变净出力,在一定幅度内具备更快的调峰响应速度^[13]。

综上所述,碳捕集电厂具备优良的调峰性能,这是碳捕集电厂进行灵活性调峰的基础。

1.2 碳捕集电厂经济运行方式

碳捕集电厂不但具有调峰优势,还具备优良的低碳特性^[14],这是碳捕集电厂参与碳交易的先决条件。碳交易目前多采用碳配额交易方式,即需要减排的电厂获得一定的碳排放配额,成功减排后可将多余配额出售,若超额排放则需购买配额^[15]。本文碳交易成本 C_y 表示如下:

$$\begin{cases} C_y = k_y \left(E_c - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \lambda_y P_{Gi,t} \right) \\ E_c = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} C_i P_{Gi,t} - \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{24} C_i P_{Gi,t} KL \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为燃煤机组总台数; k_y 为碳交易价格; E_c 为总碳排放量; λ_y 为单位出力碳排放配额; $P_{Gi,t}$ 为燃煤机组 i 在 t 时段的输出功率; N_i 为碳捕集机组总台数; C_i 为燃煤机组 i 的碳排放强度; K 为碳捕集效率; L 为烟气分流比。

当前,参与碳交易的成员主要为高碳排的常规火电厂,考虑到碳捕集电厂是由其改造而来的,因此,碳捕集电厂可参与碳交易并利用自身低碳特性获取收益。

1.3 碳捕集电厂调峰灵活性机理分析

1.3.1 碳捕集电厂提供调峰辅助服务可行性分析

本文调峰灵活性策略是通过引入灵活运行方式的碳捕集电厂提供调峰辅助服务替代常规火电厂调

峰。灵活性调峰运行策略如图1所示,图中方式I为常规火电调峰调度方式,方式II为碳捕集灵活性调峰调度方式。碳捕集电厂通过压缩净出力响应调峰需求,这既可促进风电并网,又可避免常规火电厂深度调峰产生大量 CO_2 ^[16],因此具备低碳性;由于碳捕集电厂调峰损耗小,故相较于常规火电厂提供调峰辅助服务,碳捕集电厂所需的补偿价格更低,保证了电力系统经济性。

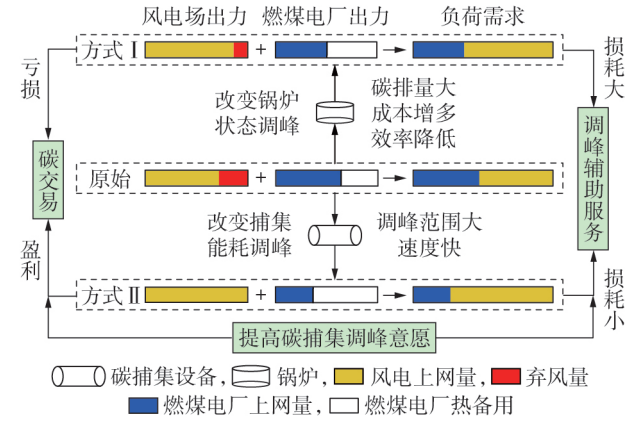


图1 灵活性调峰运行策略

Fig.1 Operation strategy for flexible peak shaving

虽然碳捕集电厂提供调峰辅助服务会造成部分发电侧输出功率无法上网,但增大碳捕集能耗响应调峰可降低碳排放,因此碳捕集电厂调峰与碳减排存在正相关关系,故可利用此关系参与碳交易获利,以此弥补调峰损失,进而提高调峰积极性。

碳捕集电厂能否作为调峰辅助服务的提供主体对该策略至关重要。常规火电厂与碳捕集电厂深度调峰性能对比见附录A表A1。因此,碳捕集电厂替代常规火电厂提供调峰辅助服务可降低调峰损耗,并且减少 CO_2 排放量。由于调峰辅助服务规定了优质资源优先调用的原则^[17],故碳捕集电厂有必要提供调峰辅助服务。

同时,依据各地区调峰辅助服务运营规则,单机容量为100 MW及以上的燃煤机组可作为调峰辅助服务主体为电力系统提供调峰资源^[18]。由于碳捕集电厂是经燃煤电厂低碳化改造而来的,因此碳捕集电厂可作为调峰辅助服务提供主体。

此外,尽管目前鲜有文献对碳捕集电厂提供调峰辅助服务的补偿价格进行说明,但调峰辅助服务的补偿标准是以各发电主体为响应调峰所造成的经济损失作为依据而制定的。鉴于碳捕集电厂具有响应调峰需求的义务并且碳捕集电厂调峰过程并未造成其发电侧产生额外损耗,仅存在碳捕集设备折旧成本和机会成本。因此,在一定调峰容量下可将其补偿价格设置为0。调峰辅助服务的部分规定见附录A图A2。

根据不同调峰深度,现阶段燃煤电厂调峰辅助服务主要采用阶梯型补偿机制,其调峰补偿如下:

$$\begin{cases} C_{N1} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} [m_{i,t}(P_{imed} - P_{Gi,t}) + n_{i,t}(P_{Gi,t} - P_{ia})] I_{price1} \\ C_{N2} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} n_{i,t}(P_{ia} - P_{Gi,t}) I_{price2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{N1} 和 C_{N2} 分别为不投油和投油深度调峰阶段的补偿; I_{price1} 和 I_{price2} 分别为不投油和投油深度调峰阶段单位电量补偿单价; $m_{i,t}$ 和 $n_{i,t}$ 分别为燃煤机组 i 在 t 时段负荷率处于 50% 和 40% 以下时的状态变量,若负荷率小于 50% 则 $m_{i,t}$ 取 1, 否则取 0, 若负荷率小于 40% 则 $n_{i,t}$ 取 1, 否则取 0; P_{imed} 为燃煤机组 i 在常规调峰阶段出力下限; P_{ia} 为燃煤机组 i 在不投油深度调峰阶段出力下限。

综上所述,碳捕集电厂可作为调峰辅助服务的提供主体,并且对电力系统调峰资源的灵活调度发挥积极作用。

1.3.2 灵活性调峰策略的低碳性与经济性分析

低碳性与经济性定性分析图如图 2 所示,影响方式 I、II 低碳性与经济性调度结果的主要有风电、调峰以及碳交易因素。

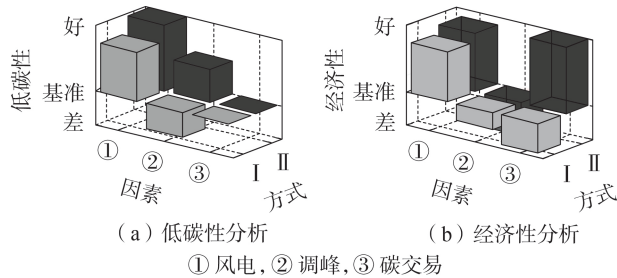


图2 低碳性与经济性定性分析图

Fig.2 Qualitative analysis diagram of low-carbon and economy

首先分析低碳性,对于风电因素,方式 I 与方式 II 响应调峰辅助服务均可促进风电上网,进而提高低碳性;对于调峰因素,方式 I 深度调峰会增大碳排放强度,导致低碳性降低,方式 II 通过增大 CO_2 捕集量调峰,因此低碳性得到提高;对于碳交易因素,虽然是以碳排放配额交易的形式控制碳排放总量,但 CO_2 捕集量受调峰需求的制约,因此,本文着重分析碳交易对经济性的影响。其次分析经济性,对于风电因素,方式 I、II 的风电并网量增加,导致弃风惩罚减小,进而提高经济性;对于调峰因素,方式 I 深度调峰影响发电效率,故降低了经济性,方式 II 碳捕集能耗存在发电成本,故降低了经济性;对于碳交易因素,方式 I 的碳排放强度增加导致电厂需要购买碳排放配额,故降低了经济性,方式 II 碳排放量少,因此可出售碳排放配额,故提高了经济性。

综上所述,本文所提调度策略能够提高电力系

统调峰的低碳性与经济性,并对电网运行产生积极影响。

2 考虑调峰灵活性的电力系统低碳经济调度

考虑调峰灵活性的含风电-碳捕集电力系统由风电场、常规火电厂与碳捕集电厂联合向电网提供负荷需求,并且通过合理调配各电厂净出力提供调峰辅助服务。

2.1 目标函数

本文调度目标是依托灵活运行方式的碳捕集电厂特有的低碳特性与调峰优势,考虑调峰灵活性调度模型,依据电网实际运行工况,在各技术约束符合要求的前提下,实现低碳经济调度。

本文模型属于混合整数线性规划模型,其目标函数如下:

$$\min F = C_X + C_K + C_Y + C_Q + C_Z + C_M - C_N \quad (3)$$

式中: F 为电力系统综合调度成本; C_X 为燃煤机组煤耗成本; C_K 为燃煤机组启停成本; C_Q 为弃风惩罚成本; C_Z 为碳捕集日折旧成本; C_M 为深度调峰成本; C_N 为深度调峰补偿效益。

1) 机组煤耗成本 C_X 。

$$C_X = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} U_{i,t} (a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i) \quad (4)$$

式中: $U_{i,t}$ 为燃煤机组 i 在 t 时段的启停变量,取 0 时表示该机组停止运行,取 1 时表示该机组正在运行; a_i 、 b_i 、 c_i 为燃煤机组 i 的煤耗系数。

2) 机组启停成本 C_K 。

$$C_K = \sum_{i=1}^N \sum_{t=2}^{24} G_i [U_{i,t}(1 - U_{i,t-1}) + U_{i,t-1}(1 - U_{i,t})] \quad (5)$$

式中: G_i 为燃煤机组 i 的启停成本。

3) 弃风惩罚成本 C_Q 。

$$\begin{cases} C_Q = \sum_{t=1}^{24} k_q P_{wq,t} \\ P_{wq,t} = P_{wpre,t} - P_{ws,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_q 为弃风惩罚系数; $P_{wpre,t}$ 为风电在 t 时段的前出力预测值; $P_{ws,t}$ 为风电在 t 时段的上网功率; $P_{wq,t}$ 为风电在 t 时段的弃风功率。

4) 碳捕集日折旧成本 C_Z 。

$$C_Z = \frac{C_{CF}(1-\alpha)}{365N_{CF}} + \frac{C_{CY}V_{CY}(1-\alpha)}{365N_{CY}} \quad (7)$$

式中: V_{CY} 为储液罐体积; α 为折旧系数; N_{CY} 和 C_{CY} 分别为储液罐折旧年限和单位体积价格; N_{CF} 和 C_{CF} 分别为除储液罐以外碳捕集设备的折旧年限和总价格。式(7)等号右侧第 1 项和第 2 项分别为分流式碳捕集电厂和储液式碳捕集电厂的日折旧成本。

5) 深度调峰成本 C_M 。

在不投油深度调峰阶段,机组运行状态偏离额定值较大,运行效率降低,导致使用年限缩短,本文

参照 Manson-Coffin 公式得到其损耗成本为:

$$\begin{cases} C_{M1} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} m_{i,t} \frac{\theta C_{\text{unit},i}}{2N_f(P_{Gi,t})} \\ N_f(P_{Gi,t}) = 0.00577P_{Gi,t}^3 - 2.682P_{Gi,t}^2 + 484.8P_{Gi,t} - 8411 \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_{M1} 为损耗成本; $N_f(P_{Gi,t})$ 为转子致裂循环周次; $C_{\text{unit},i}$ 为燃煤机组 i 的购机成本; θ 为运行系数。

在深度调峰阶段, 机组不断压低出力, 不但会影响机组运行效率, 还会增加 CO_2 、 NO_x 等污染气体排放, 其排放成本为:

$$C_{M2} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\psi_1 m_{i,t} C_i P_{Gi,t} + \psi_2 n_{i,t} C_i P_{Gi,t}) \quad (9)$$

式中: C_{M2} 为排放成本; ψ_1 和 ψ_2 分别为不投油和投油深度调峰阶段碳排放系数。

当机组出力下降至一定水平时, 需采取投油助燃的措施维持机组水循环和锅炉的正常运行, 投油成本为:

$$C_{M3} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} n_{i,t} Q_{\text{oil},t} S_{\text{oil}} \quad (10)$$

式中: C_{M3} 为投油成本; $Q_{\text{oil},t}$ 为燃煤机组 i 在 t 时段的油耗量; S_{oil} 为油价。

综上所述, 常规火电机组在不同出力阶段下的运行成本组成不同, 本文采用分段函数的方式表达其深度调峰成本, 具体如下:

$$C_M = \begin{cases} 0 & P_{\text{imed}} \leq P_{Gi,t} \leq P_{\text{Gimax}} \\ C_{M1} + C_{M2} & P_{ia} \leq P_{Gi,t} < P_{\text{imed}} \\ C_{M1} + C_{M2} + C_{M3} & P_{ib} \leq P_{Gi,t} < P_{ia} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{Gimax} 为燃煤机组 i 的出力上限; P_{ib} 为燃煤机组 i 投油深度调峰阶段出力下限。

6) 深度调峰补偿效益 C_N

深度调峰状态的描述需运用状态变量, 由于状态变量并非连续函数, 不利于直接代入目标函数, 因此利用布尔变量进行简化, 其取值为:

$$\begin{cases} m_{i,t} = 0, n_{i,t} = 0 & P_{\text{imed}} \leq P_{Gi,t} \leq P_{\text{Gimax}} \\ m_{i,t} = 1, n_{i,t} = 0 & P_{ia} \leq P_{Gi,t} < P_{\text{imed}} \\ m_{i,t} = 1, n_{i,t} = 1 & P_{ib} \leq P_{Gi,t} < P_{ia} \end{cases} \quad (12)$$

综合式(2), 深度调峰补偿效益如下:

$$C_N = \begin{cases} C_{N1} & P_{ia} \leq P_{Gi,t} \leq P_{\text{imed}} \\ C_{N1} + C_{N2} & P_{ib} \leq P_{Gi,t} < P_{ia} \end{cases} \quad (13)$$

2.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束。

$$P_{1,t} = P_{\text{ws},t} + \sum_{i=1}^N P_{ji,t} \quad (14)$$

式中: $P_{1,t}$ 为负荷在 t 时段的功率; $P_{ji,t}$ 为燃煤机组 i 在 t 时段的净输出功率。

2) 常规火电启停约束。

$$\begin{cases} T_{i,t-1}^{\text{ON}} - T_{i,\text{minON}}^{\text{ON}} (U_{i,t-1} - U_{i,t}) \geq 0 \\ T_{i,t-1}^{\text{OFF}} - T_{i,\text{minOFF}}^{\text{OFF}} (U_{i,t} - U_{i,t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $T_{i,t-1}^{\text{ON}}$ 为机组 i 在 $t-1$ 时段不间断开机时间; $T_{i,t-1}^{\text{OFF}}$ 为机组 i 在 $t-1$ 时段不间断关机时间; $T_{i,\text{minON}}^{\text{ON}}$ 与 $T_{i,\text{minOFF}}^{\text{OFF}}$ 分别为机组 i 最小不间断开机和关机时间。

3) 常规火电爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq U_{i,t} R_i^u \\ P_{Gi,t-1} - P_{Gi,t} \leq U_{i,t-1} R_i^u \end{cases} \quad (16)$$

式中: R_i^u 为机组 i 的爬坡速率。

4) 常规火电出力约束。

$$\begin{cases} P_{ib} \leq P_{Gi,t} \leq P_{\text{Gimax}} & U_{i,t} = 1 \\ P_{Gi,t} = 0 & U_{i,t} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

5) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{\text{ws},t} \leq P_{\text{wpre},t} \quad (18)$$

6) 旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^{N-N_i} P_{Gi,t}^{\text{up}} + \sum_{i=1}^{N_i} P_{ji,t}^{\text{up}} \geq \xi_1 P_{1,t} + \xi_2 P_w \quad (19)$$

式中: P_w 为风电场装机容量; $P_{Gi,t}^{\text{up}}$ 和 $P_{ji,t}^{\text{up}}$ 分别为常规火电机组和碳捕集机组在 t 时段的上旋转备用容量; ξ_1 和 ξ_2 分别为考虑负荷和风电不确定性的备用系数。

常规火电机组与碳捕集机组上旋转备用约束如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{Gi,t}^{\text{up}} \leq \min(U_{i,t} P_{\text{Gimax}} - P_{Gi,t}, R_i^u) \\ 0 \leq P_{ji,t}^{\text{up}} \leq \min(U_{i,t} P_{\text{Jimax}} - P_{ji,t}, R_i^u) \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{Jimax} 为碳捕集机组 i 的最大出力。

7) 深度调峰约束。

$$\begin{cases} P_{Gi,t} \leq 0.5P_{\text{Gimax}} & m_{i,t} = 1 \\ P_{ib} \leq P_{Gi,t} \leq 0.4P_{\text{Gimax}} & n_{i,t} = 1 \end{cases} \quad (21)$$

8) 碳捕集电厂约束。

本文研究的灵活运行方式的碳捕集电厂能流- CO_2 流图见附录 A 图 A3。

建立碳捕集电厂模型如下:

$$\begin{cases} P_{Gi,t} = P_{ji,t} + P_{Yi,t} + P_{Bi,t} \\ P_{Yi,t} = \phi E_{\text{ingCO}_2,i,t} \\ E_{\text{ingCO}_2,i,t} = E_{\text{CG},i,t} + KLE_{Gi,t} \\ E_{Gi,t} = C_i P_{Gi,t} \\ 0 \leq E_{\text{ingCO}_2,i,t} \leq ZKL_{\text{max}} C_i P_{\text{Gimax}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{Yi,t}$ 和 $P_{Bi,t}$ 分别为燃煤机组 i 在 t 时段的运行能耗和固定能耗; $E_{\text{ingCO}_2,i,t}$ 为碳捕集机组 i 在 t 时段正在处理的 CO_2 量; ϕ 为处理单位 CO_2 耗能; $E_{\text{CG},i,t}$ 为碳捕集机组 i 在 t 时段储液罐供给的待处理的 CO_2 量; $E_{Gi,t}$ 为碳捕集机组 i 在 t 时段产生的 CO_2 总量; L_{max} 为最大烟气分流比系数; Z 为工作状态最大系数。

CO_2 质量与醇胺溶液体积的关系以及储液罐的容量约束见文献[19]。

9)潮流约束。

本文电力网络潮流约束采用直流潮流模型,详见文献[20],具体约束不再赘述。

2.3 调度控制流程

本文调度控制流程见附录 A 图 A4。

1)调度中心组织各发电商按额定容量分档申报,进而核定各申报机组调峰技术指标。

2)调度中心利用负荷、风电场预测出力等数据,以满足调峰需求等约束条件为前提,保证系统综合效益最优形成日前发电预计划。若调峰资源充足则直接调用申报机组;若调峰资源不足则首先调用全部申报机组,然后对满足调峰指标的未申报机组依据初始额定比例并统筹考虑年度发电量进度依次调用。

3)碳捕集电厂通过压低净出力响应调峰辅助服务,并且碳捕集电厂可将输出功率的压缩部分响应碳交易,在满足含风电-碳捕集电力系统模型约束条件的前提下,形成系统多时段日前调度计划。

4)将调度结果移交至实时调度中心并依据规则进行调用,交易日后根据相关规定进行结算。

上述调度控制方式可依据电力系统实时运行工况对调峰资源进行灵活性调用,在保证碳排水平的同时降低运行成本,体现调峰灵活性。

3 算例分析

本文基于改进的 IEEE 39 节点系统进行仿真分析,系统结构见附录 A 图 A5,分别在节点 3、9、19、22、27、29 接入 200 MW 风电场,并将火电厂 G_1 、 G_2 改造为碳捕集电厂,火电厂参数见附录 A 表 A2。

本文负荷及风电功率采用某地区电网实测数据,见附录 A 图 A6;调峰辅助服务补偿价格见附录 A 表 A3;具体机组参数见附录 A 表 A4。本文采用 CPLEX 进行算例优化求解。

为验证考虑调峰灵活性的风电-碳捕集电力系统模型低碳经济调度的有效性,设置 4 种场景进行对比分析,如表 1 所示。

表 1 各场景设置

Table 1 Setting of each scenario

场景	机组类型	是否参与碳交易	是否提供调峰辅助服务
1	常规机组	是	否
2	常规机组	是	是
3	分流式碳捕集机组	是	是
4	综合灵活运行的碳捕集机组	是	是

3.1 算例结果分析

3.1.1 调度结果分析

为分析本文所提模型的有效性,各场景下的调度结果如表 2 所示。

表 2 各场景下的调度结果

Table 2 Dispatching results under each scenario

指标	结果			
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
煤耗成本 / \$	422 970	410 560	462 310	464 180
启停成本 / \$	11 130	14 960	11 540	12 300
碳交易成本 / \$	51 613	52 689	-107 220	-141 080
弃风惩罚成本 / \$	9693.6	3 232.6	2 983.7	0
日折旧成本 / \$	0	0	79 796	83 961
调峰辅助服务成本 / \$	0	-56 374	0	0
综合成本 / \$	496 772	479 182	449 411	419 369
碳排放量 / t	14 339	13 962	4 930	2 766
弃风量 / (MW·h)	969.36	323.26	298.37	0
风电消纳率 / %	92.42	98.48	98.59	100

由表 2 可知,场景 2 在碳排放量与弃风量方面相对场景 1 分别减少了 377 t 与 646.1 MW·h,综合成本降低了 \$ 17 590,表明常规火电厂提供调峰辅助服务可促进风电消纳并提高电力系统经济性,但其低碳性有待提升。

场景 3 将常规火电厂改造为分流式碳捕集电厂,由于碳捕集电厂具备低碳特性,使得碳排放量较场景 2 降低了 64.69%,且弃风量与综合成本分别下降了 7.70% 与 6.21%,证明了灵活运行方式的碳捕集电厂可有效降低碳排放水平。

场景 4 在场景 3 的基础上增加了储液罐,其能量时移优势进一步扩大了碳捕集电厂净出力范围,因此实现了风电全额消纳,碳排放量与综合成本分别降低了 43.89% 与 6.68%,验证了综合灵活运行的碳捕集电厂考虑调峰灵活性对电力系统低碳经济调度的有效性。

3.1.2 调度情况分析

图 3 为场景 1 下的调度情况。

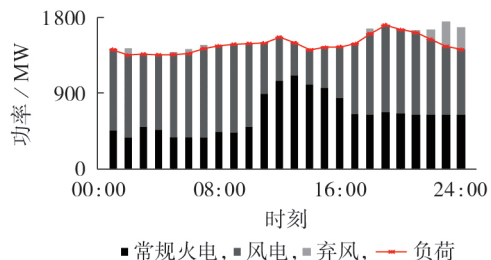


图 3 场景 1 下的低碳经济调度结果

Fig.3 Low-carbon economic dispatching results under Scenario 1

由图 3 可知,场景 1 存在一定程度的弃风,这是因为综合考虑系统启停成本及碳交易成本,故须弃掉一定量的风电才可以实现综合效益最大。

各场景弃风情况受调峰辅助服务中标量的影响,如图 4(a)所示,场景 1 下的中标量为 0,场景 2 在负荷低谷存在中标量。这说明调峰辅助服务可调

动各发电主体积极性,缓解电力系统调峰压力。在16:00—24:00时段,场景4下的中标量低于场景3。这是因为场景4下储液罐可储存多余的 CO_2 ,当出力较大时能维持较低的碳排放强度。考虑小容量机组运行成本较大,故小容量机组关机,碳捕集机组保持较大出力提供负荷需求,因此其调峰辅助服务中标量低,但碳排水平与综合成本优于场景3。这证明了综合灵活运行的碳捕集电厂提供调峰辅助服务会对系统运行产生积极影响。

碳捕集电厂是通过调节碳捕集能耗,进而压缩净出力响应调峰辅助服务需求的,如图4(b)所示。场景4下的碳捕集能耗与负荷需求大致成反比,这是由于储液罐具有辅助调峰电源的作用,即在负荷高峰对 CO_2 只储存不捕集。因为场景3存在分流式碳捕集电厂耦合问题,其碳捕集能耗与净出力大致成正比,故场景4下的碳捕集能耗可灵活调节且上限更大。

各场景下的碳排量如图4(c)所示。场景1与场景2未装设碳捕集设备,故碳排量较高。各场景碳排放的总体趋势相同,但场景3与场景4下的碳排放量远低于其他场景,这是由于碳捕集电厂可捕集 CO_2 ,具备低碳优势;并且在10:00—24:00时段,由于储液罐的能量时移作用,场景4下的碳排放量大幅降低。

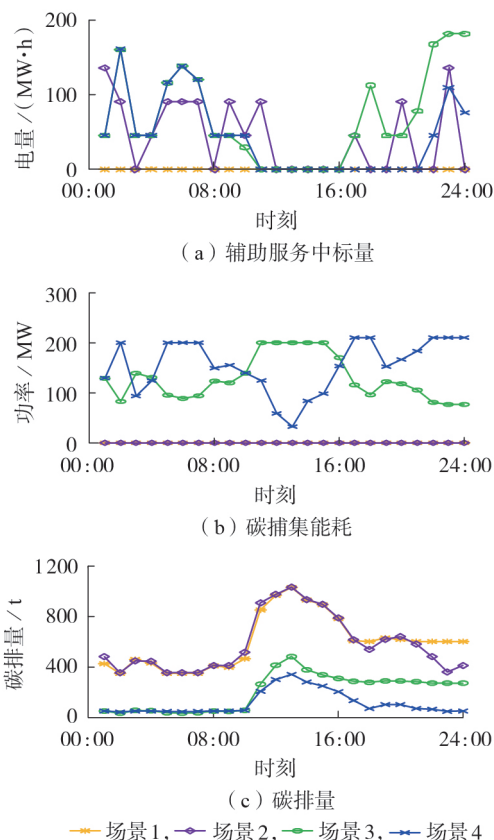


图4 各场景下的调度结果对比

Fig.4 Comparison of dispatching results under each scenario

综上所述,不同灵活运行方式的碳捕集电厂在本文所提灵活性调峰策略的前提下,可积极响应调峰辅助服务并参与碳交易,与常规火电厂相比,弃风水平明显得到改善,碳排量与综合成本均大幅降低,且综合灵活运行的碳捕集电厂整体效益优于分流式碳捕集电厂。

3.2 外部成本敏感性分析

3.2.1 调峰辅助服务补偿价格敏感性分析

补偿价格的大小是电厂提供调峰辅助服务意愿高低的主要依据,其会对各电厂中标量产生较大影响,故对不同调峰补偿价格下各场景的碳排放量与综合成本进行分析,如图5所示。图中,15(85)表示深度调峰第一阶段的补偿价格为15 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 且深度调峰第二阶段的补偿价格为85 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

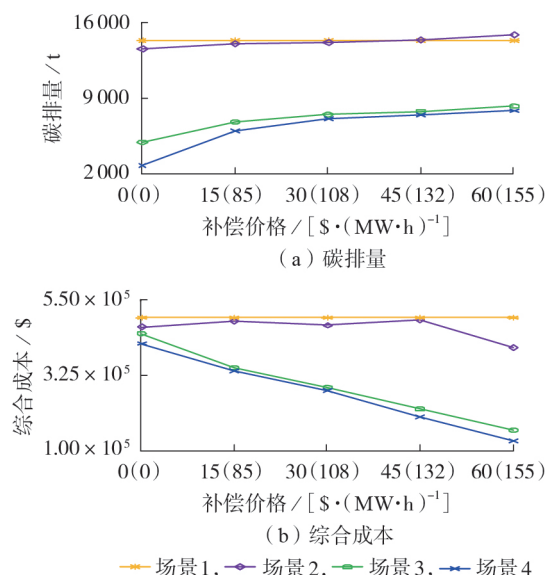


图5 采用不同调峰补偿价格时各场景下的调度结果

Fig.5 Dispatching results under each scenario with different peak shaving compensation prices

由图5(a)可知,场景2下随着补偿价格的不断提高,电厂调峰意愿不断提升,但常规火电深度调峰会导致发电效率降低,故碳排量不断增大。场景3与场景4下随着补偿价格的持续增大,碳排量持续增加,但增幅逐渐放缓,这是因为碳捕集电厂为获取调峰补偿,在调峰需求较小时也降低净出力,导致基本负荷需求由碳排放强度高的小容量机组提供,故碳排量增多。此外,碳捕集电厂净出力受碳捕集能耗最大值限制,当碳捕集电厂净出力减小至一定程度时,可降低出力趋于饱和,故碳排量增幅逐渐放缓。

由图5(b)可知,与场景3相比,场景4在各补偿价格下的综合成本均更低,这是由于储液罐可转移碳捕集能耗所带来的额外效益。随着调峰补偿价格不断增大,场景3与场景4下的综合成本不断降低。

这是由于碳捕集调峰成本较小,为获取更多调峰收益,不断降低自身净出力,直至下降到净出力下限。

由上述分析可知,碳排量与综合成本大致成反比,故需权衡二者关系,科学确定碳捕集电厂调峰补偿标准,保证系统综合效益最优。但不论补偿价格为何值,碳捕集电厂较常规火电提供调峰辅助服务,其碳排水平与经济效益均有较大幅度的改善。

3.2.2 碳交易价格敏感性分析

碳交易价格会随国家政策以及社会形势发生变动,其变化会对电力系统调度产生影响,因此本文在不同碳交易价格下对不同场景的碳排量与综合成本进行对比分析,如图6所示。

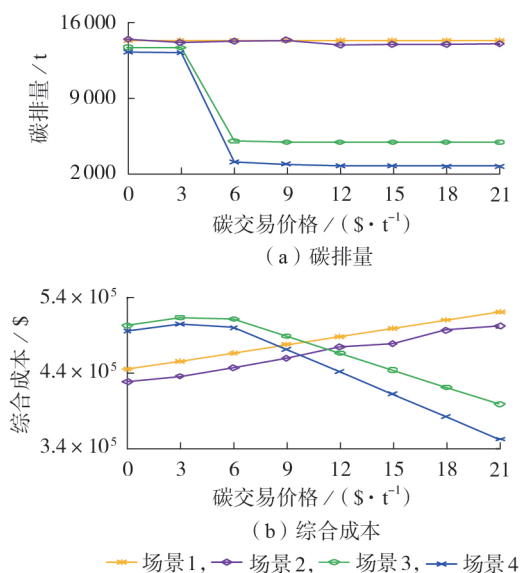


图6 采用不同碳交易价格时各场景下的调度结果
Fig.6 Dispatching results under each scenario with different carbon trading prices

由图6(a)可知,随着碳交易价格的提高,场景3与场景4下的碳排放强度均明显下降,体现了碳捕集电厂低碳运行的有效性。场景4较场景3碳排量低,说明了配备储液罐的碳捕集电厂具备更好的低碳特性。碳交易价格为6 \$/t时,场景3与场景4下的碳排量均大幅度降低,这是由于此时碳捕集电厂碳交易收益大于捕集过程的运行及折旧等成本之和,体现了碳捕集电厂参与碳交易的优势。

由图6(b)可知,碳交易价格较低时,场景3与场景4下的综合成本大于场景1与场景2,这是由于碳捕集设备的折旧成本大于捕碳收益。随着碳交易价格的提高,场景1与场景2下的综合成本不断提高。这是由于其未装设碳捕集设备,因此不会随碳交易价格的提高对CO₂进行捕集。场景3与场景4下的综合成本随碳交易价格的提升先增大后减小。这是因为碳交易价格较低时,碳捕集电厂捕碳积极性较弱使得碳捕集机组维持在较低的捕集水平,所以碳

交易成本随碳交易价格的增大而增大,进而导致综合成本不断增加。但是当单位碳收益增大后,可通过捕碳获利,故综合成本不断下降。

由上述分析可得,碳交易价格不断变化时,本文所提模型在减小系统碳排量与综合成本方面均有显著效果,但不同碳交易价格对优化结果的影响不同。此外,由于不同条件下对于碳排水平的要求存在差异,所以可依据不同的条件合理地确定碳交易价格,在碳排水平要求较宽松时,取较小的碳交易价格,反之亦然。

4 结论

本文构建了不同灵活运行方式下碳捕集电厂进行灵活性调峰的电力系统调度模型,对解决电力系统调峰问题以及低碳经济调度具有积极作用,得到具体结论如下:

1)相比于仅进行基本调峰的常规火电厂,考虑调峰灵活性的碳捕集电厂可充分调配调峰资源,有效缓解电力系统调峰压力,并且具备更优良的低碳性能以及经济效益;

2)综合灵活运行的碳捕集电厂提供调峰辅助服务较分流式碳捕集电厂提供调峰辅助服务具备更大的低碳潜力,并且综合成本降低了\$ 30 042,弃风量减少了298.37 MW·h;

3)当碳捕集电厂提供调峰辅助服务补偿价格较低时,可利用碳捕集电厂参与碳交易与提供调峰辅助服务存在正相关的特性,通过碳交易盈利并抵消因调峰造成的经济损失;

4)通过碳交易价格与调峰补偿价格的敏感性分析,可得本文所提模型在不同碳交易价格下均具有明显的优化效果。

需要说明的是,本文未对碳捕集电厂参与调峰、备用辅助服务的各类成本以及碳捕集电厂的上旋转备用能力进行分析研究,后续工作将开展碳捕集电厂参与调峰、备用补偿价格的制定等相关研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高春辉,肖冰,尹宏学,等. 新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式综述[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 38-43.
GAO Chunhui, XIAO Bing, YIN Hongxue, et al. Energy storage participating in thermal power peaking and configuration in background of new energy: a review[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 38-43.
- [2] 文旭,杨可,毛锐,等. 高水电占比西南电力调峰辅助服务市场构建[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 309-319.
WEN Xu, YANG Ke, MAO Rui, et al. Construction of peak regulation auxiliary service market for Southwest power grid with high proportion of hydropower in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 309-319.
- [3] 史普鑫,史沛然,王佩雯,等. 华北区域电力调峰辅助服务市场

- 分析与运行评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 175-184.
SHI Puxin, SHI Peiran, WANG Peiwen, et al. Analysis and operation evaluation of power peak-shaving ancillary service market in North China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 175-184.
- [4] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3961-3970.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [5] 王若谷, 王建学, 张恒, 等. 水电机组调峰服务的成本分析及实用补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 41-46.
WANG Ruogu, WANG Jianxue, ZHANG Heng, et al. A cost analysis and practical compensation method for hydropower units peaking service[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 41-46.
- [6] 刘永奇, 张弘鹏, 李群, 等. 东北电网电力调峰辅助服务市场设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 148-154.
LIU Yongqi, ZHANG Hongpeng, LI Qun, et al. Design and practice of peak regulation ancillary service market for Northeast China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 148-154.
- [7] 崔杨, 邓贵波, 赵钰婷, 等. 考虑源荷低碳特性互补的含风电电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4799-4815.
CUI Yang, DENG Guibo, ZHAO Yuting, et al. Economic dispatch of power system with wind power considering the complementarity of low-carbon characteristics of source side and load side[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4799-4815.
- [8] 曾鹏. 基于需求响应与碳捕集技术的电力系统低碳经济调度[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
ZENG Peng. Low carbon economic dispatch of power system based on demand response and carbon capture technology [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021.
- [9] 彭元, 姜素华, 吴耀武, 等. 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.
PENG Yuan, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power considering solvent-stored carbon capture power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4508-4516.
- [10] 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, 3(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, 3(4): 339-350.
- [11] 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.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28.
- [12] 陈海鹏, 陈晋冬, 张忠, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 133-139.
CHEN Haipeng, CHEN Jindong, ZHANG Zhong, et al. Low-carbon economic dispatching of power system considering capture energy consumption of carbon capture power plants with flexible operation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 133-139.
- [13] 黄旭锐. 低碳经济下含碳捕集电厂和风电的电力系统优化运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
HUANG Xurui. Power system optimal operation with carbon capture plants and wind power under low carbon economy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [14] FU Sha, ZOU Ji, ZHANG Xiaohua, et al. Review on the latest conclusions of working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2015, 3(1): 109-115.
- [15] 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峰调度[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.
- [16] 崔杨, 周慧娟, 崔成伟, 等. 考虑降低碳排放的多源微网经济调度方法[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(3): 85-92.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, CUI Chengwei, et al. Economic scheduling of multi-source microgrid considering carbon emissions reduction[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(3): 85-92.
- [17] 华东能源监管局. 《华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》(2018版)[EB/OL]. [2022-02-22]. <https://news.bjx.com.cn/html/20181105/939255.shtml>.
- [18] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.
XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in Northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.
- [19] 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, 6163.
CUI Yang, DENG Guibo, ZENG Peng, et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5869-5886, 6163.
- [20] 崔杨, 邓贵波, 王铮, 等. 计及碳交易的光热电站与风电系统低碳经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 232-239.
CUI Yang, DENG Guibo, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for power system with concentrated solar power plant and wind power considering carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 232-239.

作者简介:



崔 杨

崔 杨(1980—),男,教授,博士研究生导师,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: cuiyang0432@163.com);

张 聪(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源联网发电协调调度(E-mail: 1162884609@qq.com);

张 璐(1990—),男,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源、智能配电网等(E-mail: zhanglul@cau.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第45页 continued on page 45)

Time-space two-dimensional regulation modeling of charging station load powered by bi-building special transformers

ZHANG Yongjun¹, ZHOU Xingyue¹, TANG Yuan¹, YANG Jingxu², YAO Lanni¹, LI Qilin¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510670, China)

Abstract: Driven by the demand of carbon emission reduction and environmental protection, the popularization of electric vehicles has been accelerated. Meanwhile, exploring the regulation potential of charging load from time and space dimensions can effectively alleviate the expansion pressure of distribution network. Based on this, a two-dimensional regulation method of time-space characteristics for charging station load powered by bi-building special transformers is proposed. The two-dimensional regulation mechanism of charging station load time-space characteristics is introduced. The charging station is powered by the redundant capacity of the bi-building special transformers and the energy storage system. Combining three regulation methods, namely the energy storage charging and discharging regulation, the switching of dual power switching switch (DPSS) of charging piles and energy storages, and the real-time power scheduling of charging piles, a time-space two-dimensional regulation strategy of charging station load is proposed. The optimization model of charging station combining day-ahead and real-time time scales is proposed. The day-ahead optimization model of energy storage system charging and discharging is established with electric vehicle service rate as the optimization objective, the real-time optimization model of DPSS switching is established with the standard deviation of transformer load as the objective, and the real-time scheduling model of charging pile power is established with the scheduling cost in each period as the objective, so as to improve the economy and safety of the charging station through various regulation means. The effectiveness of the proposed model is verified by example simulation.

Key words: electric vehicles; charging station; dual power supply; energy storage system; real-time scheduling; time-space two-dimensional regulation

(上接第17页 continued from page 17)

Flexible peak shaving strategy of power system based on wind power-carbon capture

CUI Yang¹, ZHANG Cong¹, ZHANG Lu², ZHAO Yuting¹, SHI Haobo³, LIU Xinyuan⁴

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

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

4. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030012, China)

Abstract: The high proportion of grid-connected wind power increases the burden of peak shaving in the power system. Therefore, it is urgent to improve the flexibility of peak shaving in the power system and assist the low-carbon and zero-carbon development in the new power system. The excellent peak shaving performance of carbon capture power plant and the necessity of using it for peak shaving auxiliary services are analyzed, and the positive role of low-carbon characteristics of carbon capture power plant in carbon trading is demonstrated. Therefore, the flexible peak shaving operation strategy of carbon capture power plant is put forward, and the low-carbon and economy of the proposed strategy are expounded. The wind power-carbon capture dispatching model aiming at the optimal comprehensive cost of power system is constructed, and based on this model, the low-carbon performance and economic benefits of carbon capture power plants under different flexible operation modes are compared. Finally, the simulative results of the improved IEEE 39-bus system verify that the proposed model can effectively coordinate the peak shaving resources, satisfy the peak shaving demand of the power system, and meanwhile reduce the carbon emission level and operation cost of system.

Key words: carbon capture power plant; wind power; peak shaving; flexibility; economic dispatching; low-carbon

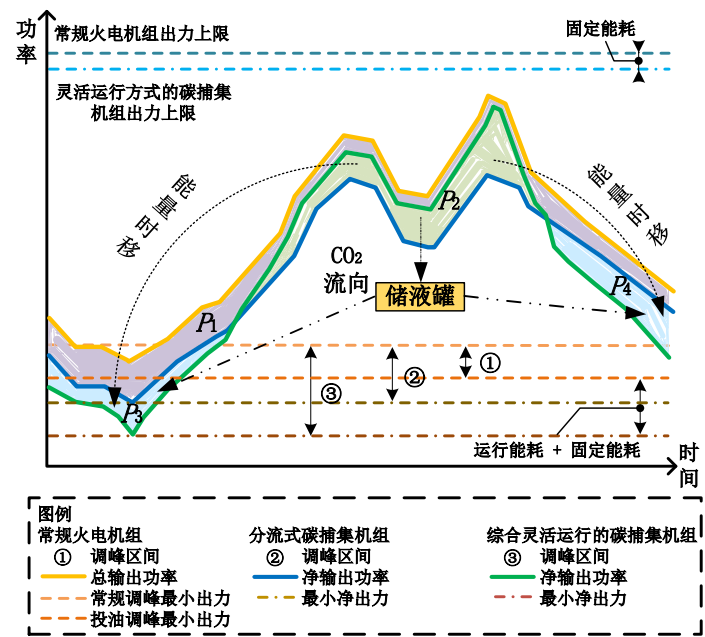


图 A1 碳捕集调峰原理图

Fig.A1 Principle diagram of carbon capture peak regulation

表 A1 深度调峰性能对比

Table A1 Performance comparison of deep peak shaving

机组类型	调峰性能	调峰损耗	低碳性
常规火电	调峰区间较	调峰损耗大 (煤耗、投油损耗)	一般
	小、调峰速		
	度慢		
碳捕集	调峰区间	调峰损耗小	较好
	大、调峰速		
	度快		

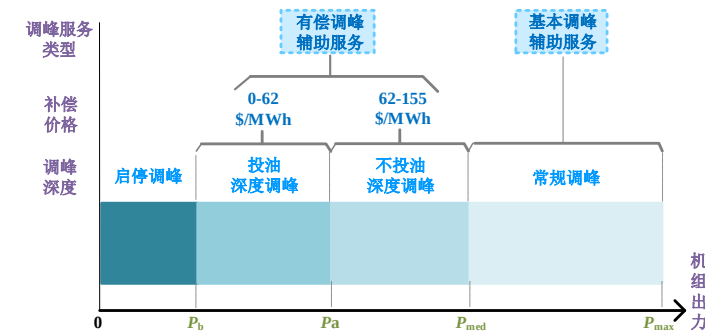


图 A2 调峰辅助服务类型示意图

Fig.A2 Schematic diagram of peak shaving auxiliary service

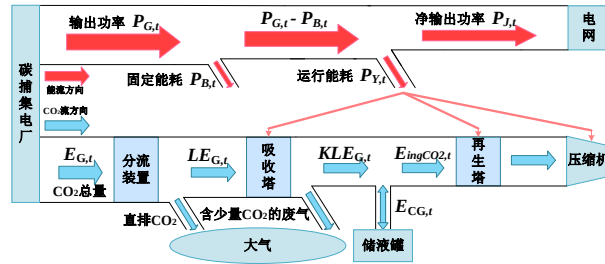


图 A3 碳捕集电厂能流-CO₂ 流示意图

Fig.A3 Schematic diagram of energy flow-CO₂ flow in carbon capture power plant

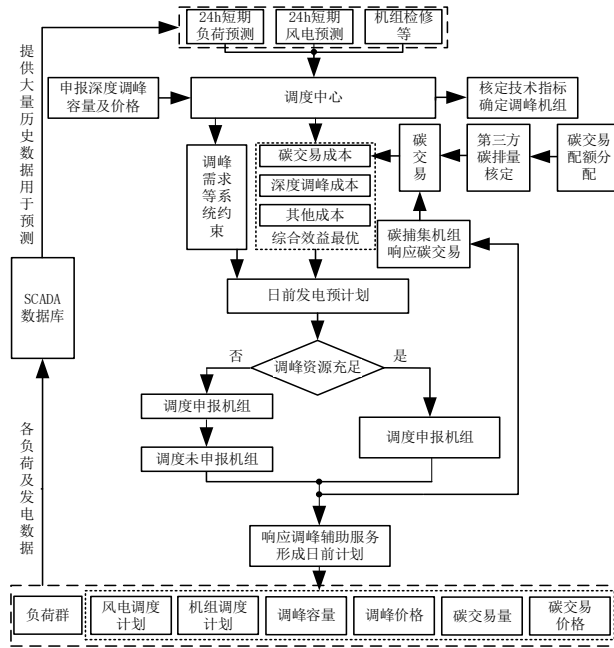


图 A4 调度控制流程图

Fig.A4 Dispatching control flowchart

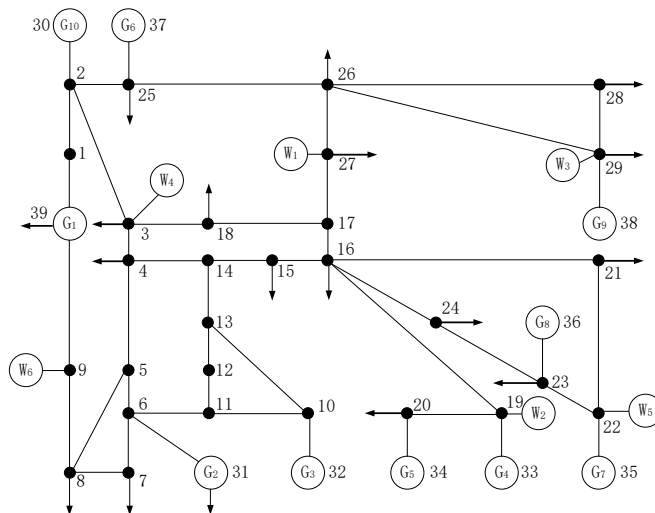


图 A5 IEEE 39 节点系统结构图

Fig.A5 IEEE 39-bus system structure diagram

表 A2 火电机组参数

Table A2 Parameters of thermal power units							
机组	最大出力/ MW	最小出力/ MW	起停成本/\$	成本参数 $a/(\$ \cdot \text{MW}^{-2})$, $b/(\$ \cdot \text{MW}^{-1}),c/ \$$	最小起/停 时间/h	机组爬坡/ (MW $\cdot$ h $^{-1}$)	碳排放强度/ [t $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]
1	455	200	4500	0.00048,16.2,1000	6/6	200	0.9
2	455	150	5000	0.00031,17.3,970	5/5	200	0.92
3	130	30	550	0.002,16.6,700	5/5	100	0.99
4	130	25	560	0.00211,16.5,680	5/5	100	0.98
5	162	45	900	0.00398,19.7,350	5/5	100	1.02
6	80	20	170	0.00712,22.3,370	3/3	72	1.05
7	85	25	260	0.00079,27.7,480	3/3	80	1.06
8	55	10	30	0.00413,25.9,660	1/1	60	1.12
9	55	10	30	0.00222,27.3,665	1/1	60	1.15
10	55	10	30	0.00173,27.8,670	1/1	60	1.1

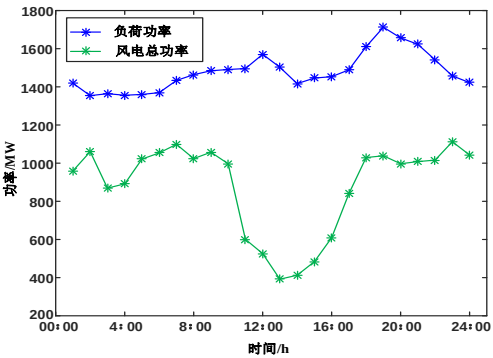


图 A6 负荷及风电功率
Fig.A6 Load and wind power

表 A3 调峰辅助服务补偿价格

Table A3 Compensation price for peak shaving auxiliary services			
机组类型	负荷率/%	报价下限/[\$ $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]	报价上限/[\$ $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]
常规火电厂	40 ~ 50	0	62
	30 ~ 40	62	155

表 A4 参数表

Table A4 Parameter table			
名称	数值	名称	数值
ϕ (单位捕碳量能耗)/(MW $\cdot$ h $\cdot$ t $^{-1}$)	0.269	C_{unit} (购机成本)/(\$ $\cdot$ MW $^{-1}$)	500000
K (碳捕集效率)	0.9	Q_{oil} (投油调峰油耗量)/(t $\cdot$ h $^{-1}$)	4.8
N (工作状态最大系数)	1.2	S_{oil} (油价)/(\$ $\cdot$ t $^{-1}$)	0.9
M_{MEA} (MEA 摩尔质量)/(g $\cdot$ mol $^{-1}$)	61.08	θ (火电机组运行系数)	1.2
M_{CO_2} (CO $_2$ 摩尔质量)/(g $\cdot$ mol $^{-1}$)	44	λ_y (碳排放配额系数)/[t $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]	0.7
C_R (醇胺溶液浓度)/%	30	K_q (弃风惩罚成本系数)/[\$ $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]	10
ρ_R (醇胺溶液密度)/(g $\cdot$ ml $^{-1}$)	1.01	C_{CF} (碳捕集设备总成本)/万\$	23594.2
P_B (固定能耗)/(MW $\cdot$ h)	5	N_C (碳捕集设备折旧年限)/a	15
V_{CR} (储液罐体积)/m 3	20000*4	C_{CY} (储液罐单位价格)/(\$ $\cdot$ m $^{-3}$)	100
$V_{\text{CF},0}$ (富液存储罐初始体积)/m 3	10000	N_{CF} (储液罐折旧年限)/a	5
$V_{\text{CY},0}$ (贫液存储罐初始体积)/m 3	10000	K_y (碳交易价格)/(\$ $\cdot$ t $^{-1}$)	14.286