

基于风电和碳捕集电厂的低碳经济调度方法

张瑞君

(华电新能源集团股份有限公司, 北京 100031)

摘要 针对火电厂在发电过程中排放大量二氧化碳导致环境污染的问题,电力系统必须向清洁、低碳的方向发展。碳捕集电厂,即应用碳捕集、利用与封存(CCUS)技术实现二氧化碳分离与处理的电厂,将在低碳发展中发挥重要作用。然而,碳捕集电厂的运行需要较高的能耗和成本,这制约了低碳经济调度的发展。本文提出了一种协调风电与碳捕集电厂运行的低碳经济调度方法,构建了以含碳捕集电厂为依托的风电与火电低碳经济调度模型。该模型基于粒子群优化(PSO)算法,以静态调度结果为初始粒子,并引入约束处理方法,进而求得可行解。基于IEEE 39节点系统的仿真结果表明,该方法能够有效降低系统的碳排放和发电成本,以期为电力系统的低碳转型提供参考。

关键词 清洁能源; 碳捕集电厂; 风电; 电力经济调度

中图分类号:F426

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.001

0 引言

火力发电作为传统的电力生产方式,由于大量燃烧化石燃料,将持续向大气中排放二氧化碳等温室气体,导致全球气候变化加剧,严重威胁了生态系统的安全和人类的可持续发展。为实现低碳转型,需通过能效提升、清洁能源与碳捕集、利用与封存技术(CCUS)的综合应用降低碳排放^[1]。风电作为清洁能源虽能助力减排,但其出力波动性常导致弃风现象,尤其在风—火联合系统中表现显著^[2]。引入碳捕集装置的火电厂既可降低自身碳排放,又能提升风电消纳能力,但由此形成的多能耦合系统使调度模型复杂度骤增^[3]。含CCUS的风—火协同调度需统筹三方面约束:首先,碳捕集设备的捕集效率直接影响减排效果;其次,捕集能耗将改变系统运行经济性;最后,需协调间歇性风电与可控火电的出力匹配。这类多目标优化问题呈现高维、非线性特征,传统算法难以有效求解^[4]。基于此,本研究采用粒子群优化算法(PSO)构建优化框架,该算法凭借全局搜索能力与快速收敛特性,可以有效处理系统经济性与环保性的多准则权衡^[5]。模型创新体现在将碳捕集运行成本、碳排放权交易机制与机组运行约束整合至统一优化框架。通过动态调整碳捕集强度,在保障电网稳定前提下实现两个关键平衡,分别是碳捕集能耗与风电消纳量的动态匹配,系统运行成本与环境效益的帕累托最优。

1 碳捕集设备的溶剂存储灵活运行模式

如图 1 所示, 碳捕集系统的优化方案: 本装置通过创新性溶剂分储机制提升二氧化碳捕集效能, 其技

术核心在于分时段运行策略。系统采用阶段处理模式：在电网负荷高峰时段，富二氧化碳溶剂暂存于专用储罐；低负荷时段则启动气提分离流程。具体实施包括三个关键环节：（1）烟气预处理阶段，火电厂烟气经洗涤装置分流，部分直接排放，富集二氧化碳的胺基溶液转入储罐；（2）二氧化碳分离阶段，存储溶液经气提塔实现气液分离，所得高纯度二氧化碳进入压缩单元；（3）溶剂再生阶段，脱碳溶液通过热交换系统实现余热回收，经再沸器活化后返回吸收塔循环使用。

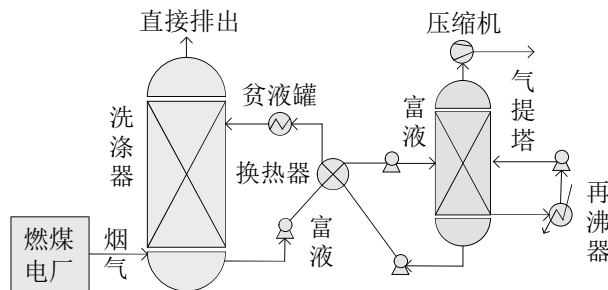


图1 碳捕集电厂的溶剂存储灵活运行模式运行原理

碳捕集电厂的功率 P_c 由两部分组成：一部分是流向电力负载的净功率 P_c^{net} ，另一部分是碳捕集电厂总能耗 P_c^{CCS} ，用于捕获二氧化碳的电量。

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

碳捕集电厂的总能耗 P_c^{CCS} 由两部分组成:

$$P_c^{ccs}=P_c^m+P_c^o \quad (2)$$

式中, P_c^m 是碳捕集电厂处理二氧化碳的基准能耗, P_c^o 是碳捕集电厂的运行能耗。

碳捕集电厂用于捕获二氧化碳的能耗可以由下式表示。

$$P_{c,t}^o = \gamma_c q_c \chi_c \lambda_t P_{c,t} \quad (3)$$

式中, γ_c 、 q_c 、 χ_c 分别为碳捕集电厂的捕获单位二氧化碳所需的能耗、碳排放强度和捕获水平, λ_t 是 t 时刻碳捕集电厂的烟气分流比, $P_{c,t}$ 和 $P_{c,t}^o$ 是 t 时段碳捕集电厂的总功率输出和总能耗。

为了与风电协调, 溶剂存储灵活运行模式的碳捕集电厂设计了两个储液罐, 加入储液罐后 t 时段碳捕集电厂处理的二氧化碳量如下所示:

$$Q_t^{ccs} = Q_{c,t}^{ccs} + Q_{s,t} \quad (4)$$

式中, Q_t^{ccs} 是 t 时段碳捕集电厂处理的二氧化碳量, $Q_{c,t}^{ccs}$ 是 t 时段碳捕集电厂预计处理的二氧化碳量, $Q_{s,t}$ 是 t 时段储液罐提供的二氧化碳量。本文使用乙醇胺溶液存储二氧化碳, 提供二氧化碳之后富液罐和贫液罐中溶液存储量如下所示:

$$V_{CA,t} = \frac{Q_{s,t} M_{MEA}}{M_{CO_2} \delta C_R \rho_R} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_{l,t} = V_{l,t-1} - V_{CA,t} \\ V_{r,t} = V_{r,t-1} + V_{CA,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $V_{CA,t}$ 是 t 时段储液罐排除二氧化碳所需要的体积, M_{MEA} 和 M_{CO_2} 分别是乙醇胺和二氧化碳的摩尔质量, δ 是气提塔二氧化碳解析量, C_R 和 ρ_R 是乙醇胺溶液的浓度和密度, $V_{l,t}$ 和 $V_{r,t}$ 是 t 时段贫液罐和富液罐中溶液体积, $V_{l,t-1}$ 和 $V_{r,t-1}$ 是 $t-1$ 时段贫液罐和富液罐中溶液体积。

2 风电—碳捕集电厂互补的低碳运行模式

风电出力受气象条件影响呈现显著波动性, 而火电机组的刚性爬坡约束常导致调度过程中产生弃风现象。碳捕集电厂通过预置捕集能耗形成弹性调节能力, 相较常规火电具备更优的功率调节裕度。二者的协同运行具有双重效益: 环境效益方面, 碳捕集技术可有效抑制调度系统的碳排放强度; 运行效益层面, 其动态调节特性可提升风电消纳水平。

联合系统的能量交互机制呈现双向流动特性: (1) 碳捕集电厂将发电量分解为电网净输出与捕集能耗两个流向; (2) 风电在保障基础输出的同时, 剩余功率通过调度指令转化为碳捕集作业的辅助能源。这种协同机制将原本被弃置的风电资源转化为碳捕集系统的有效供能, 实现资源循环利用。

3 含碳捕集电厂的低碳调度模型

本文提出了一种清洁的经济调度模型, 旨在通过传统火电厂安装碳捕集设备来降低碳排放。

3.1 目标函数

如公式 (7) 所示, 为了优化碳捕集效果, 我们考虑了碳捕集设备能耗对机组运行成本的影响。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G [f_g(P_{g,t}) u_{gt} + S_{gt} (1 - u_{g(t-1)}) u_{gt}] + F_{wq} \quad (7)$$

式中, f_g 表示火电机组 g 的能耗成本; u_{gt} 是机组 g 在时间段 t 的启停状态变量; S_{gt} 为机组 g 在时间段 t 的开机成本; F_{wq} 为弃风惩罚所浪费的费用。

3.2 约束条件

火电机组出力约束是指其发电功率需在最小技术出力与最大出力之间运行, 以确保设备安全和电网稳定。具体如下:

$$P_g^{\min} u_{gt} \leq P_{gt} \leq P_g^{\max} u_{gt} \quad (8)$$

式中, $P_g^{\max}$ 和 $P_g^{\min}$ 分别表示火电机组的最大、最小出力。

火电机组的爬坡约束通常用以下公式表示:

$$|P_{gt} - P_{g(t-1)}| \leq R_g \quad (9)$$

其中, P_{gt} 为火电机组 g 在时间段 t 的出力, $P_{g(t-1)}$ 为火电机组 g 在时间段 $t-1$ 的出力, R_g 为火电机组 g 的爬坡速率限制。这个公式表示火电机组 g 在相邻两个时间段内的出力变化不能超过其爬坡速率限制。

为确保电力系统的稳定性和可靠性, 在任何时段内, 发电机组的上、下旋转备用需求必须满足以下两个公式所描述的约束条件:

$$\sum_{g=1}^G (P_g^{\max} - P_{g,t}) \geq R_{u,t} \quad (10)$$

$$\sum_{g=1}^G (P_{g,t} - P_g^{\min}) \geq R_{d,t} \quad (11)$$

式中, $R_{u,t}$ 和 $R_{d,t}$ 分别代表在时间段 t 内, 系统的上、下旋转备用需求。这些约束确保了电力系统在面对负荷波动时, 能够有足够的备用容量来维持系统的稳定和可靠运行。

为了确保碳捕集系统在每日运行过程中储液罐体积的平衡, 我们引入以下约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_t \leq 1 \\ 0 \leq V_{l,t} \leq V_l^{\max} \\ 0 \leq V_{r,t} \leq V_r^{\max} \\ V_{l,t} = V_{l,0} \\ V_{r,t} = V_{r,0} \end{cases} \quad (12)$$

在这个碳捕集系统的约束模型中, λ_t 表示操作参数, $V_{l,t}$ 和 $V_{r,t}$ 分别代表贫液罐和富液罐在时间 t 的溶液体积, 而 $V_l^{\max}$ 和 $V_r^{\max}$ 是它们的最大容量, 确保系统在运行过程中体积变化符合初始和结束时体积相等的要求。

3.3 模型求解算法

本研究采用粒子群优化 (PSO) 算法进行模型求解。每个可能方案对应搜索空间中的一个粒子, 表示模型参数的一组候选值。粒子通过更新速度和位置在搜索空间中移动, 其运动轨迹由自身经验和群体经验共同决定。算法中每个粒子持续追踪两个最优解: 个体最优 (粒子自身找到的最佳位置) 和全局最优 (整个群体中的最佳位置)。

如图 2 所示, 使用粒子群优化算法求解模型的具体过程如下:

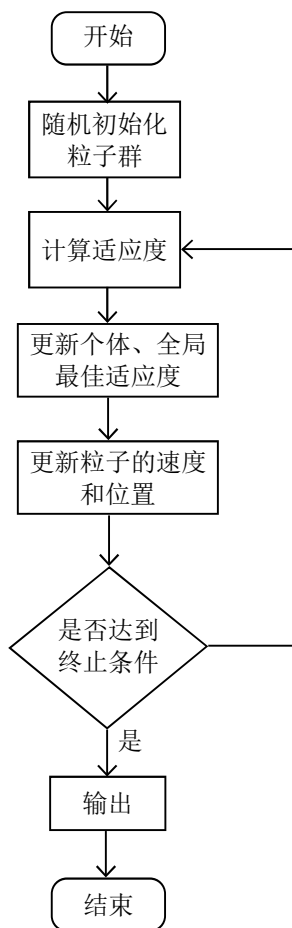


图 2 粒子群优化算法求解模型的具体过程

4 算例分析

为了全方位地验证所提出的低碳经济调度方法的有效性, 本文精心设计了四种不同的运行模式, 并对它们进行了对比分析 (见表 1)。这四种运行模式分别为:

1. 模式 A: 传统调度模式。在这种模式下, 既不考虑风电的接入, 也不涉及碳捕集技术的应用, 完全按照传统的调度方式运行。

2. 模式 B: 仅考虑风电接入的调度模式。在这种模式中, 虽然接入了风电, 但并未采用碳捕集技术, 主要研究风电接入对系统调度的影响。

3. 模式 C: 仅采用碳捕集技术的调度模式。在这种模式下, 未接入风电, 而是专注于研究碳捕集技术单独应用对系统调度的影响。

4. 模式 D: 综合考虑风电接入和碳捕集技术的低碳经济调度模式。这是本文重点研究的模式, 它同时考虑了风电接入和碳捕集技术的应用, 最终旨在实现低碳经济调度的目标。

表 1 不同运行模式的成本

模 式	火电能耗 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
A	243 789.5	45 300.3	0	0	12 645.6	10 200.1
B	198 765.4	26 204.7	3 660.8	0	7 289.5	8 419.4
C	187 654.3	-35 678.9	7 760.5	146 320.0	7 737.8	7 000.0
D	214 480.2	-45 732.1	2 640.1	138 460.5	5 603.1	3 688.9

5 结论

本研究针对火电厂碳排放问题, 设计了融合风电与碳捕集技术的电力系统优化调度方案。引入 CCUS 技术控制碳排放, 利用风电优化能源结构。采用粒子群优化算法求解, 结合约束处理机制确保解的可行性。IEEE 39 节点系统验证表明, 该模型在碳减排、发电成本和风电利用率等指标上优于传统模式, 可有效缓解弃风问题。

参考文献:

- [1] 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(09):3424-3432.
- [2] 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(04):15-23.
- [3] 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(04):1-7, 32.
- [4] 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(07): 61-67.
- [5] 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.