煤电机组灵活性指标对风光发电调节作用的量化研究

刘玉华1,吕清刚1,3,高政南2,朱书骏1,符津铭1,3,张 伟2,高 鸣1,柴 祯1

(1. 中国科学院工程热物理研究所 煤炭高效低碳利用全国重点实验室, 北京 100190; 2. 内蒙古电力 (集团) 有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010;
 3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘 要:在以风电、光伏为代表的可再生能源快速发展过程中,提升支撑性电源的调节能力是新型 电力系统建设的重要保障,其中,充分发挥煤电机组的灵活性潜力是重要路径之一。目前,对于 煤电机组灵活性指标(最低运行负荷、变负荷速率和启动时间)的要求正在不断提升,但其对风光 发电调节作用的量化分析尚不完善。为解决这一问题,在综合考虑风光时序生产特性和功率平衡 的基础上,利用 Python 语言构建了煤电机组调峰能力计算模型。此外,以内蒙古某区域风光实际 发电曲线为算例,在分钟级的时间步长下,对煤电机组在不同最低运行负荷、变负荷速率和启动 时间下的运行特性进行了分析。研究结果表明:在该区域风光装机和资源条件下,随着煤电机组 最低运行负荷的降低,单位最低运行负荷变化区间(10%)内所能产生的风光消纳增量逐渐下降, 但当最低运行负荷由 30%降至 20%时,其增加的风光消纳电量仍然能够达到该区域全年风光发电 总量的 4.88%。煤电机组变负荷速率的提升可加强煤电对系统负荷波动的平抑作用,当煤电机组 变负荷速率达到 6% Pe/min 时,与无煤电时相比,可将系统总负荷的年平均变化率降低 35%。随 着煤电机组启动时间的降低,单位启动时间变化区间内(1h)所多消纳的风光发电量增多,且当启 动时间由 4h降至 1h,机组单日进行启停的概率由 15.9% 增长至 60.4%。 关键词:煤电机组;调峰能力;时序特性;功率平衡;Python;风光消纳量

中图分类号:TK01 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)05-2752-09

Quantitative study on role of flexibility index of coal-fired power units in regulating wind and solar power generation

LIU Yuhua¹, LYU Qinggang^{1, 3}, GAO Zhengnan², ZHU Shujun¹, FU Jinming^{1, 3}, ZHANG Wei², GAO Ming¹, CHAI Zhen¹

(1.State Key Laboratory of Coal Conversion (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China; 2.Inner Mongolia power (group) co., LTD, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3.School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Within the swift progression of renewable energy, particularly wind and solar power, enhancing the regulatory capacity of supporting power sources is crucial. This serves as a vital assurance for the development of new power systems. A significant approach in this regard involves fully harnessing the flexibility potential of coal-fired power units. Currently, there is a growing demand for enhanced flexibility indicators in coal-fired power units, including the minimum operating load, load change rate, and start-up time. However, methodologies for quantitatively analyzing their regulatory im-

LIU Yuhua, LYU Qinggang, GAO Zhengnan, et al. Quantitative study on role of flexibility index of coal-fired power units in regulating wind and solar power generation[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2752–2760.



移动阅读

收稿日期:2024-07-02 **策划编辑:**韩晋平 责任编辑:黄小雨 **DOI**: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0764 **基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA/29010500)

作者简介:刘玉华(1996—), 女, 山东高密人, 博士研究生。E-mail: liuyuhua@iet.cn

通讯作者: 吕清刚 (1963—), 男, 吉林蛟河人, 研究员, 博士。E-mail: qglu@iet.cn

引用格式:刘玉华,吕清刚,高政南,等.煤电机组灵活性指标对风光发电调节作用的量化研究[J].煤炭学报,2025, 50(5):2752-2760.

pact on wind and solar power generation remain under developed. To address this issue, a computational model is developed for the peak shaving capacity of coal-fired power units. This model is constructed via the Python language and considers both the temporal production characteristics of wind and solar energy as well as power balance. Additionally, the operational characteristics of coal-fired power units are examined at minute-level time intervals. This analysis is conducted using the actual wind and solar power generation curves of a region in Inner Mongolia as a case study. The investigation focuses on the impact of varying minimum operating loads, load change rates and start-up times on the operating characteristics of these units. The findings suggest that, given the wind and solar power installations and resources in this region, as the minimum operating load of coal-fired power units decreases, the incremental rise in wind and solar power consumption with the unit's minimum operating load change range (10%) progressively diminishes. Nevertheless, when the minimum operating load decreases from 30% to 20%, the enhanced wind and solar power consumption can still account for 4.88% of the total annual wind and solar power generation in this region. The enhancement of the damping effect on system load fluctuations can be achieved by increasing the load change rate of coal-fired power units. Specifically, when the load change rate reaches 6% Pe/min, it results in a reduction of the annual average change rate of the total system load by 35%, compared to scenario where there is no coal power involvement. As the start-up time for coal-fired power units decreases, the proportion of wind and solar power consumed during the change interval of 1 h increases. Furthermore, the likelihood of a single day witnessing both unit start-ups and shutdowns increases from 15.9% to 60.4% when the start-up time decreases from 4 h to 1 h.

Key words: coal-fired power unit; peak shaving capability; temporal characteristics; power balance; Python language; wind and solar power generation consumption

0 引 言

在碳达峰、碳中和目标的指导下,我国积极推动 建设新型电力系统,大力发展以风电和光伏为代表的 可再生能源。截至2023年底,全国可再生能源装机 容量达到 15.16 亿 kW, 占全国发电总装机超过 50%, 其中,风电与光伏装机总容量达到 10.5 亿 kW^[1]。但 其发电具有随机性、波动性和间歇性的特点,对电力 系统稳定运行带来巨大冲击,亟需与之匹配的灵活性 调节电源[2-3]。2021年国家发展改革委和国家能源局 会同有关方面制定了《全国煤电机组改造升级实施方 案》,要求存量煤电机组灵活性改造应改尽改。2024 年国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于加强 电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》, 对在新能源占比高、调峰能力不足的地区煤电进一步 提升了改造深度,要求在确保安全前提下煤电机组最 小发电出力达到 30% 负荷以下,进一步提升煤电机组 灵活调节型电源作用。发挥煤电机组的灵活性,对于 促进风光消纳和保障电力系统稳定具有重要意义。

煤电机组的灵活性通常体现在最低运行负荷、变 负荷速率和启动时间3个方面。诸多机构及研究学 者对煤电机组灵活性改造技术展开研发^[4-7],煤电机组 各灵活性指标正在不断提高。此外,针对煤电机组在 "风光火储"等综合能源系统^[8-9]中的功能及作用,研 究学者也做了大量的分析和研究。刘吉臻等^[10]研究 表明提升燃煤机组的弹性运行能力,是解决新能源电 力系统能否安全、稳定、高效运行问题的有效手段和 必由之路,并阐明了5项提升燃煤机组弹性运行性能 的关键技术。王晓彬等^[11]构建了煤电与清洁电源双 层迭代优化模型,开展煤电与清洁电源的协同演进路 径研究,其结果表明,通过调节煤电出力(最低运行负 荷 30%)可以实现当地风光的足额消纳。MI等^[12]在 考虑可再生能源波动和系统碳排放的前提下,对不同 情景下的煤电机组容量进行了规划。周保中等^[13]构 建了"风光火一体化"多能互补优化配置模型,通过优 化火电运行方式和出力曲线,实现纵向源荷协调。李 雄威等^[14]建立了考虑火电深度调峰的风光火储系统 日前优化调度模型,在其分析中,当火电机组调峰深 度由 80% 下降到 50% 时,新能源弃电率由 3.62% 增 加到 16.86%。

已有研究充分表明多能互补系统中煤电机组灵 活性提高的必要性,但分析过程中研究学者更多的关 注了煤电机组的总装机容量^[15-17]和最低运行负荷^[18-19] 这2个灵活性指标,对于包含变负荷速率和启动时间 在内的煤电机组灵活性指标的提高对风光发电的调 节作用还有待进一步明确和量化。因此,搭建了煤电 机组调峰能力计算模型,基于风光时序生产的功率平 衡计算,充分分析煤电机组在不同灵活性指标下的负 荷出力特性,获得煤电机组灵活性提升对于风光调节 的量化数据。研究结果可为调峰技术发展和能源基 地优化建设提供支撑。

1 研究方法

1.1 风光发电和负荷调度特性

以某区域 4 000 MW 装机的风电和 8 000 MW 装

机的光伏 1 a 的实际出力曲线为基础进行分析和计算, 其中,风电年利用小时数为 2 900 h,光伏年利用小时 数为 1 800 h。单日典型出力曲线如图 1 所示。

风电与光伏具有间歇性,单日风光发电总量最低 一日(图1b)的发电量仅为发电总量最高一日(图1a)



图 1 区域典型风光出力曲线

Fig.1 Typical wind and solar output curve for the region

的 9.6%。风光发电具有随机性,单日光伏发电量可达 到风力发电量的 59.6 倍 (图 1c),风力发电量也可达到 光伏发电量的 12.8 倍 (图 1d)。此外,风光发电还具有 波动性 (图 1e—图 1h),均存在负荷短时间剧烈波动的 情况,总负荷变化率最高可达到 1 109 MW/min。

由于该区域光伏装机高于风电装机,且光伏具有 中午时段发电量高、早晚时段发电量低的特点,同时 结合用电需求,确定该区域单日电力调度曲线为中间 高、两边低的阶梯型曲线,如图2所示。





1.2 煤电机组调峰能力计算模型

利用 Python 语言^[20-21], 在 Pycharm Communication Edition 中搭建了煤电机组灵活性对风光发电调 节作用的计算模型, 即煤电机组调峰能力计算模型。 以风光发电负荷和调度负荷为基础, 在功率平衡的 基础上分析煤电机组在不同灵活性下 (最低运行负 荷、变负荷速率和启动时间)的负荷出力特性, 并量化 煤电机组灵活性提升对于风光发电消纳量、补充电量 和负荷变化率的影响规律, 时间步长为 5 min, 时间总 长度为 364 d。该区域煤电机组装机容量设定为 5 000 MW。

在模型中,借助风电与光伏波动所需的灵活性电 力曲线来判断和反映煤电机组是否满足电力调节需 求。风光波动下某时刻所需的灵活性电源负荷计算 公式如下:

 $L_{\text{need}} = L_{\text{schedule}} - (L_{\text{solar}} + L_{\text{wind}}), \ L_{\text{schedule}} > (L_{\text{solar}} + L_{\text{wind}})$ (1)

式中: L_{need} 、 L_{schedule} 、 L_{solar} 和 L_{wind} 分别为灵活性电源 负荷、调度负荷、光伏负荷和风电负荷, MW。

煤电机组运行范围在最低运行负荷和总装机容 量之间,且一定时间间隔内的负荷变化量受限于机组 能够达到的变负荷速率。因此,模型中煤电机组运行 特性主要通过递推法进行分析,其约束条件如下:

$$(\text{MIN}(L_{\text{coal}})/100 \times IC_{\text{coal}}) \leq L_{\text{coal}} \leq IC_{\text{coal}}$$
(2)

$$L_{\text{coal}}^{t-1} - LR_{\text{coal}} \times \Delta t \leq L_{\text{coal}}^{t} \leq L_{\text{coal}}^{t-1} + LR_{\text{coal}} \times \Delta t \quad (3)$$

式中: MIN(L_{coal}) 为煤电机组的最低运行负荷,%; IC_{coal} 为煤电机组的装机容量; L'_{coal} 和 L'_{coal} 分别为(t-1) 和 t 时刻煤电机组的负荷, MW; LR_{coal} 为煤电机组的 变负荷速率,% Pe/min; Δt 为(t-1)和 t 时刻之间的时 间间隔, min。

考虑到在实际运行过程中煤电机组低负荷段 (50%负荷以下)变负荷速率难以提升,因而在式 (3)中,当 $L'_{coal} < IC_{coal} \times 50\%$ 时, LR_{coal} 在任何工况下的 取值均为 1% Pe/min;当 $L'_{coal} \ge IC_{coal} \times 50\%$ 时,即煤电 机组在高负荷段(50%负荷以上)运行时, LR_{coal} 在不 同工况下取值不同(1%~6% Pe/min),后文所提及的 变负荷速率均指高负荷段的变负荷速率。

煤电机组灵活性提升所带来的风电与光伏电量 的消纳增量即为减少的弃风弃光量,可通过不同灵活 性指标下煤电机组运行曲线的积分面积差进行计算。 消纳增量占风光发电总量的比例 (Δ*P*_{solar&wind}, %) 的计 算公式如下:

$$\Delta P_{\text{solar& wind}} = \frac{\int_0^t \left| L_{\text{coal}}^i - L_{\text{cool}}^j \right| dt}{\int_0^t (L_{\text{solar}} + L_{\text{wind}}) dt} \times 100\%$$
(4)

式中: *t* 为时刻; *L*^{*i*}_{coal} 和*L*^{*j*}_{coal} 为煤电机组在不同灵活性 指标下的运行负荷, MW。在变负荷速率指标的分析 中,该式计算的是风光补充与消纳电量的增量之和。

当煤电机组在不同灵活性下,"风光火"系统的弃风弃光率 *R*_{sw,cur} 的计算公式为

$$R_{\rm sw, \, cur} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (L_{\rm solar} + L_{\rm wind} + L_{\rm coal} - L_{\rm schedule}) dt}{\int_{t_1}^{t_2} (L_{\rm solar} + L_{\rm wind}) dt} \times 100\%$$
$$(L_{\rm solar} + L_{\rm wind} + L_{\rm coal}) > L_{\rm schedule}$$
(5)

当煤电机组变负荷速率发生变化时,会对整个系统的负荷变化率 LR_{all}产生影响,计算公式如下:

$$LR_{\rm all} = \frac{\left(L_{\rm coal}^{t} + L_{\rm wind}^{t} + L_{\rm solar}^{t}\right) - \left(L_{\rm coal}^{t-1} + L_{\rm wind}^{t-1} + L_{\rm solar}^{t-1}\right)}{\Delta t}$$
(6)

若风光波动所需的灵活性电源负荷在一段时间 内均为0,且该段时间的长度大于机组的启动时间,则 机组记为停机状态,煤电运行负荷为0。暂不考虑机 组在停机和启动过程中的负荷变化速率。

2 煤电机组调峰能力分析

综合考虑煤电机组灵活性技术现状、布局和发展

趋势,在煤电机组调峰能力分析中,最低运行负荷分 析范围取 10%~50%,变负荷速率分析范围取 1%~ 6% Pe/min,启动时间分析范围取 1~4 h。

2.1 最低运行负荷

首先对煤电机组最低运行负荷分别为 10%、20%、 30%、40% 和 50% 情况下的全年煤电运行曲线进行 计算。分析中不对变负荷速率进行设置, 机组启动时 间设置为 4 h, 即风光波动产生的 0 电量需求的时间 高于 4 h 时, 煤电机组负荷为 0。典型单日煤电机组 运行曲线如图 3 所示。以该日煤电负荷变化曲线为 例, 煤电机组最低运行负荷极大地影响了机组自 0 时 至 15 时的负荷变化。当煤电机组最低运行负荷由 50% 降至 10%, 该日煤电发电量减少 16 595.4 MWh, 即促进了等量风电与光伏的利用, 该日弃风弃光率由 6.6% 降至 0.4%。





对全年煤电机组的负荷运行曲线进行分析和计算,得到煤电机组最低运行负荷的降低对风电与光伏 消纳的影响,如图 4、图 5 所示。当煤电机组最低运 行负荷由 50% 降至 10%,全年弃风弃光率由 30.18% 降至 5.85%。最低运行负荷每降低 10%,其所多消纳



Fig.4 Relationship between $R_{sw,cur}$ and $MIN(L_{coal})$

的风光发电量占全年风光发电总量的比例呈现直线 下降的趋势。当最低运行负荷由 30% 继续下降至 20% 时,仍能促进全年风电与光伏发电总量的 4.88% 进行消纳,此时消纳电量的增量超过 12.7 亿 kWh。



2.2 变负荷速率

在对煤电机组变负荷速率进行分析时,考虑到实际运行过程中低负荷段(50%负荷以下)变负荷速率 难以提升,因而假设不同工况下低负荷段变负荷速率 保持1%Pe/min不变,仅对高负荷段(50%负荷以上) 变负荷速率的提升(1%~6%Pe/min)进行分析,后文 所提及的变负荷速率均指高负荷段的变负荷速率。

假设最低运行负荷为 30%, 机组启动时间 4 h, 变 负荷速率为 1%、3% 和 6% Pe/min 时的煤电机组典型 单日运行曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 煤电机组变 负荷速率为 1% Pe/min 时, 其运行曲线与所需灵活性 电力曲线间差距较大, 相当一部分时间内都不能满足 风光波动对于电量的需求。当变负荷速率提升至 3% Pe/min 时, 煤电机组运行曲线的负荷拐点已基本可以



与所需灵活性电力曲线的负荷拐点吻合,但负荷量难 以满足需求。当变负荷速率继续提升至 6% Pe/min 时, 煤电机组运行曲线与所需灵活性电力曲线的吻合度 进一步提高。将高变负荷速率运行曲线高于低变负 荷速率运行曲线部分的电量记为变负荷速率提升产 生的电量补充增量,将高变负荷速率运行曲线低于低 变负荷速率运行曲线部分的电量记为变负荷速率提 升产生的风光消纳增量。

该日煤电机组变负荷速率为 1% 和 6% Pe/min 时 的电量差为 4 605.8 MWh,其中包含了 4 449.6 MWh 的补充电量和 156.2 MWh 的风光消纳电量。

对不同变负荷速率下的煤电全年运行负荷曲线 进行分析,得到煤电对于风光发电的补充电量及消纳 电量与其变负荷速率之间的关系,如图7所示。由 图7可知,煤电机组变负荷速率的提升对于为风光发 电进行电量补充和促进消纳均有助益,但提升过程 中,每1%Pe/min速率的提高所带来的消纳电量和补 充电量均下降。变负荷速率由5%Pe/min升至6% Pe/min时,多消纳和补充的电量仅占全年风光发电总 量的0.07%。





同时改变机组最低运行负荷和变负荷速率,对不 同变负荷速率变化区间内的电量差距进行计算,结果 如图 8 所示。结果表明,在不同的最低运行负荷下, 煤电机组多补充和消纳的电量与风光发电总量的比 例随机组变负荷速率的变化是一致的。但相同变负 荷速率变化区间内,机组最低运行负荷越低,则产生 的消纳和补充电量越多。

机组变负荷速率的提高除了可以更多地为风光 进行电力补充和促进其消纳外,另一个重要的影响是 能够削弱系统总负荷的变化率。 图 9 和图 10 分别为在煤电机组最低运行负荷为 30% 的条件下,典型单日不同煤电变负荷速率下的 "风光火"总出力曲线和对应的总负荷变化曲线。由



图 8 不同最低运行负荷下风光补充与消纳电量的增量与变 负荷速率变化的关系

Fig.8 The relationship between the incremental amount of wind and solar power complement and absorption and the changes in the LR_{coal} under different MIN(L_{coal})



图 9 不同变负荷速率下的"风光火"系统负荷曲线

Fig.9 System load curve for wind, solar and coal-fired power under different LR_{coal}



Fig.10 Total load change rate for wind, solar and coal-fire power under different LR_{coal}

报

图 9、图 10 可知,随着煤电机组变负荷速率的增大, "风光火"总负荷偏离调度负荷的幅度越来越小,在减 少弃风弃光率的同时,也减少了整个系统短时发生负 荷大幅变化的频率。

当煤电机组变负荷速率为 1% Pe/min 时,该目 "风光火"系统总负荷平均变化率为无煤电时的风光 发电负荷平均变化率的 77%,可将当日风光发电的最 高负荷变化率 (出现在 12:55)降低 8%。而当煤电机 组变负荷速率升至 6% Pe/min 时,该目"风光火"系统 总负荷平均变化率仅为无煤电时的风光发电负荷平 均变化率的 38.8%,可将当日风光发电的最高负荷变 化率降低 50.9%。若以年为尺度,则煤电机组变负荷 速率达到 6% Pe/min 时,可将总负荷的年平均变化率 降低 35%。

2.3 启动时间

在调峰市场中,机组参与启停调峰的频率逐渐加 大,机组启动所需时间将在机组灵活性中占据更为重 要的地位。对机组启动时间为4、3、2和1h的煤电 出力曲线进行分析,假定机组最低运行负荷为30%, 不考虑机组启动时所处的状态和变负荷速率。图11 为煤电机组启动时间为4和1h的典型单日运行曲线。 由图11可知,当机组启动时间为4h时,尽管该日需 要灵活性电源降至0负荷,但需要灵活性电源在0负 荷维持的时间短于机组启动所需时间,因而没有可以 实现停机的时段。而当机组启动所需时间降至1h时, 该日可跟随风光波动进行2次启停,多消纳的风光发 电量可达到6875 MWh。







对全年机组启动时间变化带来的风光消纳量进 行计算,结果如图 12 所示。随着机组启动时间的降 低,启动时间每 1 h 降幅下多消纳的风光发电量逐渐 增多。若机组启动时间由 4 h 降至 1 h,则多消纳的风 光发电量可超过 680 000 MWh,占全年风光发电总量



in the start-up time

的 2.6%。在煤电机组灵活性的 3 个表征参数中, 机组 启动时间的降低对风光消纳产生的影响介于最低运 行负荷和变负荷速率之间。

由上述单日运行曲线可知,机组启动时间对于风 光消纳量的影响主要是通过机组启停次数来实现的 (图 13)。当机组启动时间由 4 h 降至 1 h 时,全年机组 启停次数将增加 279%,机组单日进行启停的概率由 15.9% 增长至 60.4%。



图 13 机组全年启停次数与启动时间的关系



3 结 论

 1)建立的煤电机组调峰能力计算模型能够充分 反映煤电机组在不同灵活性指标下的运行特性,利用 该模型可计算得到不同风光资源和装机容量下配套 煤电机组灵活性提升对风光调节的影响。

2)随着煤电机组最低运行负荷的降低,单位最低运行负荷变化区间内(10%)所多消纳的风光发电量 占全年风光发电总量的比例呈现直线下降的趋势。 若煤电机组最低运行负荷可以由30%降至20%时, 则可促进该区域全年风光发电总量的 4.88% 进行消纳, 电量超过 12.7 亿 kWh。

3)煤电机组变负荷速率的提升对风光发电有保 证电量补充、促进电量消纳和削弱负荷波动 3 方面影 响。随着变负荷速率的提升,单位变负荷速率变化区 间 (1% Pe/min)所带来的消纳和补充电量均下降,但 对负荷波动的平抑作用加强。与无煤电时相比,当煤 电机组变负荷速率达到 6% Pe/min 时,该区域系统总 负荷的年平均变化率降低 35%。

4)随着煤电机组启动时间的降低,机组启停次数 增加,单位启动时间变化区间内(1h)所多消纳的风光 发电量占比增多,该区域机组单日进行启停的概率由 15.9% 增长至 60.4%。

5)煤电机组灵活性提升在为风光等可再生能源 提供调节和支撑作用的同时,自身也将面临着经济投 入和运行风险增大的问题,需要加快技术突破和加强 电力市场引导。通过对机组调峰能力的分析,在综合 经济投入和风险机率的基础上,可进一步分析并获得 适宜区域资源禀赋和电力结构的煤电机组灵活性运 行策略。

参考文献(References):

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据
 [EB/OL]. (2024-01-26)[2024-07-01] https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm
- [2] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8773-8789.
 OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fire boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8773-8789(in Chinese).
- [3] 魏一鸣,余碧莹,唐葆君,等.中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(4):13-26.
 WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, et al. Roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality pathway[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 13-26.
- [4] 蒙涛,梁双荣. 电站锅炉低负荷稳燃燃烧器选型评述[J]. 煤炭加工 与综合利用, 2021(12): 92-97.
 MENG Tao, LIANG Shuang-rong. Comments on the selection of low load stable combustion burners for utility boilers[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2021(12): 92-97(in Chinese).
- [5] 王志平.火电厂灵活性深度调峰改造技术及应用[M].北京:中国 电力出版社,2020.
- [6] ZHU S J, HUI J C, LYU Q G, et al. Experimental study on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed: Preheating characteristics for peak shaving[J]. Fuel, 2022, 324: 124684.

- [7] ZHU S J, HUI J C, LYU Q G, et al. Experimental study on pulverized coal swirl-opposed combustion preheated by a circulating fluidized bed. Part A. Wide-load operation and low-NO_x emission characteristics[J]. Energy, 2023, 284: 128573.
- [8] KANG C A, BRANDT A R, DURLOFSKY L J. Optimal operation of an integrated energy system including fossil fuel power generation, CO₂ capture and wind[J]. Energy, 2011, 36(12): 6806–6820.
- [9] 王瑞林, 孙杰, 洪慧. 可再生能源与燃煤发电集成互补系统综述[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(11): 10-18+4.
 WANG Ruilin, SUN Jie, HONG Hui. Review on integration of renewable energy and coal-fired power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11): 10-18+4.
- [10] 刘吉臻,曾德良,田亮,等.新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
 LIU Jizhen, ZENG Deliang, TIAN Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [11] 王晓彬, 孟婧, 石访, 等. 煤电与清洁电源协同演进优化模型及综合评价体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 43-52.
 WANG Xiaobin, MENG Jing, SHI Fang, et al. An optimization model and comprehensive evaluation system for the synergistic evolution of coal-fired power plants and clean power sources[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 43-52.
- [12] MI Y Z, LIU C Y, YANG J Y, et al. Low-carbon generation expansion planning considering uncertainty of renewable energy at multitime scales[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 261– 272.
- [13] 周保中, 刘敦楠, 张继广, 等. "风光火一体化"多能互补项目优 化配置研究[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 10-18.
 ZHOU Baozhong, LIU Dunnan, ZHANG Jiguang, et al. Research on optimal allocation of multi-energy complementary project of wind-solar-thermal integration[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 10-18.
- [14] 李雄威, 王昕, 徐家豪, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统分层优化调度模型[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 74-81.
 LI Xiongwei, WANG Xin, XU Jiahao, et al. A hierarchical optimal scheduling model of wind-photovoltaic-thermal-energy storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6): 74-81.
- [15] 韩逸飞,徐婧,谢典,等. 考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多 目标运行优化[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 30-37.
 HAN Yifei, XU Jing, XIE Dian, et al. Multi-objective operation optimization of wind-solar-thermal-storage integrated energy system considering carbon capture[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 30-37.
- [16] 德格吉日夫,田雪沁,王新雷,等. 计及运行成本与排放量德风光 火储联合外送调度多目标优化模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2022,38(6):121-128.

Degejirifu, TIAN Xueqin, WANG Xinlei, et al. Transmission dispatching of wind, solar, thermal-power and storage considering operation cost and emission[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 121–128.

[17] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、 光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报, 2014,34(16):2513-2522.

LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of largescale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513–2522.

 [18] 程瑜, 邵振州, 张金波, 等. 火电与风光储耦合规划设计[J]. 洁净煤 技术, 2022, 28(11): 82-89.
 CHENG Yu, SHAO Zhenzhou, ZHANG Jinbo, et al. Planning and

design of thermal power and wind solar storage coupling[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11): 82-89.

[19] 吴庆泽,吕丽霞,刘长良,等.多模式风光火储系统多目标优化调

度[J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2024, 51(5): 100-107, 117.

WU Qingze, LYU Lixia, LIU Changliang, et al. Multi-objective optimal scheduling of multi-mode solar energy fire storage system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2024, 51(5): 100–107, 117.

[20] 侯永超.综合能源系统多时空尺度实时仿真平台设计与开发[D]. 济南:山东大学,2022.

HOU Yongchao. Design and development of multiple temporal and spatial scales real-time simulation platform for integrated energy system [D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[21] DA SILVA F S, MATELLI J A. Script for resilience analysis in energy systems: Python programming code and partial associated data of four cogeneration plants[J]. Data in Brief, 2021, 36: 106986.