

煤电改核电的经济性分析

吴晓桐¹, 许松¹, 翁挺伟¹, 张文佳², 张广旭¹, 张尧立^{1*}

(1. 厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: [目的] 探究将燃煤电站改造成核电站的经济性。[方法] 采用 G4-ECONS 工具, 考虑了投资成本、燃料循环前端和后端成本、固定和可变运维成本及退役成本等多个因素, 评估煤电改核电方案的净现值和平准化度电成本, 并对建设期、折现率和运维成本等参数开展经济敏感性分析。[结果] 煤电改核电能够有效降低平准化度电成本, 提升净现值; 提高核电厂运行负荷和延长反应堆使用寿命能够进一步增加煤电改核电的经济效益。[结论] 该研究为煤电改核电提供了经济性评价模型和数据, 为推动该方案的产业化提供有力的支持。

关键词: 煤电改核电; 经济性分析; G4-ECONS

中图分类号: TK09

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)01-0204-07

Economic analysis of coal-to-nuclear power conversion

WU Xiaotong¹, XU Song¹, WENG Tingwei¹, ZHANG Wenjia²,
ZHANG Guangxu¹, ZHANG Yaoli^{1*}

(1. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: [Objective] Climate change is one of the most pressing challenges facing the world today. In the energy sector, carbon dioxide emissions from coal-fired power plants are a major contributor to the current climate crisis. Nuclear power plants, with their similar power generation principles, offer a potential clean alternative. Various international proposals for coal-to-nuclear power conversion have been put forward, with the most feasible suggestion being the replacement of coal-fired boilers with nuclear reactors while retaining the entire steam supply and power generation systems. However, the economic viability of this proposal has not been thoroughly analyzed. [Methods] This study constructs a detailed economic model for the conversion of coal-fired power plants to nuclear power plants using the G4-ECONS tool. The model accounts for investment costs, operating costs, front-end and back-end fuel cycle costs, and fixed and variable operation and maintenance costs, among other factors, to evaluate the net present value and levelized cost of electricity for the coal-to-nuclear power conversion scheme. Sensitivity analyses are conducted on parameters such as construction period, discount rate, and operating costs. [Results] The findings indicate that converting coal-fired power plants to nuclear power plants can effectively reduce the levelized cost of electricity and increase the net present value. Sensitivity analysis shows that increasing the operating load of nuclear power plants and extending the lifespan of reactors can further enhance the economic benefits of coal-to-nuclear conversion. [Conclusion] Retrofitting a 1 200 MW coal-fired power plant with high-temperature reactor-pebblebed modules (HTR-PM) resulted in a 14.8% savings in levelized cost of electricity for coal-to-nuclear plants (RNU) compared to newly built nuclear power plants (GNU). In addition, this conversion preserves local employment opportunities and economic activities in regions with existing coal-fired power plants, delivering significant economic and social benefits. The net present values of GNU and RNU are much higher than that of coal-fired power plants, while the net present value of RNU is even higher. For coal-fired power plants, carbon price has a greater impact than coal price. Results of this research provide an economic model and data

收稿日期: 2024-01-15 录用日期: 2024-12-14

* 通信作者: zhangyl@xmu.edu.cn

引文格式: 吴晓桐, 许松, 翁挺伟, 等. 煤电改核电的经济性分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(1): 204-210.

Citation: WU X T, XU S, WENG T W, et al. Economic analysis of coal-to-nuclear power conversion[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(1): 204-210. (in Chinese)



for coal-to-nuclear conversion, offering strong support for promoting the industrialization of this scheme.

Keywords: coal-to-nuclear power conversion; economic analysis; G4-ECONS

随着工业化和城市化进程的加快,人类对能源的需求持续增长,大量传统煤炭等化石燃料的使用带来了环境和气候方面的严重问题^[1].煤炭燃烧释放出大量 CO₂ 等温室气体,导致全球气候变暖,引发海平面上升、极端天气等一系列灾害^[2].因此,减少对煤炭的依赖并发展清洁能源显得尤为重要.清洁能源如风能、太阳能、核能等对环境的影响较小,能够显著减少温室气体的排放,有利于减缓气候恶性变化趋势^[3].

对于全球气候变暖和煤炭使用所带来的环境问题,“煤电改核电”的设想为其提供了一个潜在的解决方案.核电站与传统燃煤电站的发电原理十分类似,因此有可能将燃煤发电站现有的基础设施改造成核电站,从而在清洁发电的同时提高能源生产的经济性^[4].如图 1 所示,将退役的燃煤电厂改造为核电厂,可以尽可能多地利用原本闲置的基础设施,对其蒸汽供应系统和发电系统进行再次利用,从而达到降低核电造价和电力脱碳的双重目的.

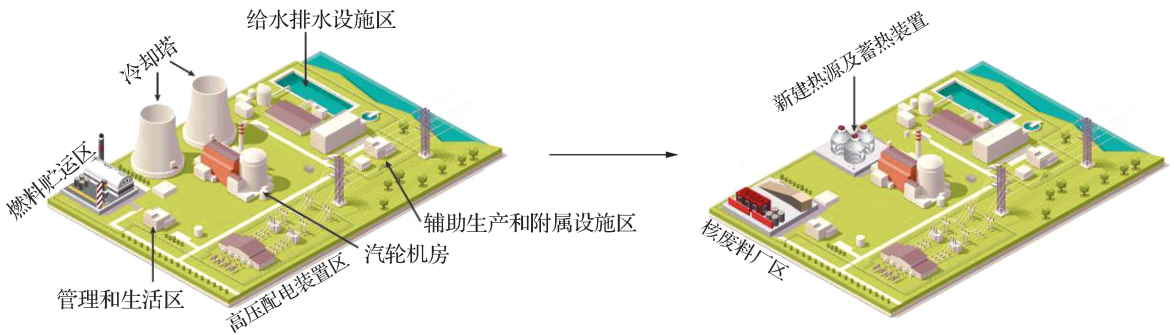


图 1 煤电改核电的示意图

Fig. 1 Schematic overview of coal-to-nuclear power conversion

目前,“煤电改核电”的概念已经引起中国^[5]、美国^[6]、波兰^[7]、韩国、印度、印度尼西亚等多国学者的广泛关注.许多国家或机构提出改造方案,如:国际原子能机构(IAEA)^[8]提出可在退役煤电站原址或附近场所安装小型模块化反应堆;罗马尼亚宣布位于多伊塞斯蒂的燃煤电厂将是该国第一个“煤电改核电”项目的首选地点;美国公用事业公司(PacifiCorp)^[9]计划在即将退役的诺顿煤电厂配置钠冷快堆熔盐储能系统.在已有改造方案中,最具可行性的方案^[6]为:在保留全部蒸汽供应系统和发电系统的条件下使用核反应堆替代燃煤电站的锅炉.然而,其经济性如何尚无深入的分析.

中国典型的 600 MW 超临界燃煤电厂隔夜成本中与煤电直接相关的资金成本占 30%,这意味着煤电厂 30% 的初始投资成本是一个搁浅成本,不能用于脱碳.剩余的近 70% 初始投资成本理论上有很大一部分可以继续使用,包括汽轮发电机系统、冷凝器冷却系统、电气设备和辅助设施^[10-11],但需要根据项目改造时煤电机组的具体情况进行针对性的改造和更新.

常规核电站采用的压水堆产生的蒸汽温度约

300 °C,远低于常规燃煤电站所需的蒸汽温度(约 500 °C).若要充分利用燃煤电站原有的发电设施,需选择能够提供高温蒸汽的先进核反应堆.目前,高温气冷堆-球床模块(HTR-PM)可以产生与锅炉相似的蒸汽温度,这在很大程度上能确保核岛改造锅炉的可能性.

HTR-PM 是由清华大学核能与新能源技术研究所(INET)设计的一种小型模块化高温气冷堆(HTGR),其热功率为 250 MW,由清华大学于 20 世纪 70 年代开始研制的 HTR-10 高温气冷试验堆演变而来.2023 年 12 月 6 日,HTR-PM 核电站示范工程顺利完成了 168 h 的持续运行考核,标志着其商业运行的开始.HTR-PM 核电站采用双堆结构,配备两个反应堆连接一个汽轮机(热功率 500 MW,电功率 210 MW).波兰的煤炭改造脱碳初步案例^[12]研究显示,HTR-PM 可以经济高效地集成到波兰典型的现有煤炭装置中.

本研究以某电厂为例,利用 HTR-PM 反应堆对煤机组类型进行改造的成本细节进行深入分析,探讨了燃煤电厂部分设备的可重新利用性,并运用 G4-ECONS 工具对核电替代煤电的经济潜力和市场潜力

进行了全面分析.

1 研究方法

1.1 成本分解和分析方法

四代堆论坛经济建模工作组(EMWG)在 IAEA^[13]提供的会计代码基础上进行了改进,并开发了基于 Excel 的核能系统成本的 G4-ECONS 计算程序.本研究使用该计算程序对案例进行分析.总资本建设成本由直接成本、间接成本、财务成本、所有者成本、补充成本和前期建设成本这 6 个部分组成,其中直接成本、间接成本和财务成本为主要成本.直接成本主要包含设备、人工、材料、建筑,其中人工成本占直接成本的 40%以上.间接成本主要包含设计服务、施工监督、项目管理和现场成本.财务成本主要考虑融资成本,由于核电厂的建设周期长,项目投资方在建设前需要充分考虑负现金流给公司财务带来的风险,因此需要考虑融资利息在内的财务成本.

核电厂初始资本建设成本涉及核岛、常规岛和各类辅助设施.根据初始资本建设成本的理论模型,核电厂中的直接成本主要为基建厂房的设施结构成本、核岛和常规岛内部的相关设备成本、电力设备成本、热排出系统成本、杂项设备成本、特殊材料成本和模拟器成本.

此外,随着碳交易市场的普及和完善,对于燃煤电厂,碳价也是影响现金流的重要因素之一,基于此,本研究假设 CO₂排放价格为 50 \$/t,燃煤机组的 CO₂排放强度为 0.778 t/MWh^[14].

1.2 经济性评价指标

经济指标是一系列具有宏观经济规模的经济数据,主要用来解释当前或未来的投资可能性,这些指标有助于判断一个经济项目的整体健康状况.在项目建设和改造中,本研究采用净现值^[15]和平准化度电成本^[16]作为经济性评价指标.

净现值是反映现金流的一个指标,常用于评价项目的经济效益.它是指在一定时期内,资金流入现值与未来资金流出现值的差额,反映了工厂本期内净增加或净减少的现金及现金等价数额.

$$N = \sum_{i=1}^n (C_1 - C_0)_i \times (1+r)^{-i} - T, \quad (1)$$

$$C_1 = R_E, \quad (2)$$

其中, N 为净现值, r 为折现率(将未来金钱价值折算到现在价值的比率), T 为初始资本建设成本, n 为项目预计使用年限, C_1 为现金流入量, C_0 为现金流出量,

i 为第 i 年, R_E 为售电收入.

平准化度电成本是衡量电厂经济状况的重要参数之一,是初始资本建设成本、运维成本、燃料成本及退役成本之和与年度净发电量之比.在计算度电成本时,需要考虑初始投资资金的时间价值,不同时间点资金的实际价值不同.平准化度电成本的计算公式如下:

$$C_{LCOE} = \frac{F \times T + C_{O\&M} + C_{fuel} + C_D \times S}{E}. \quad (3)$$

其中: C_{LCOE} 为平准化度电成本; F 为资本回报因子,用于计算项目投资在运营期内的年值; E 为核电厂年度发电量; $C_{O\&M}$ 为运维成本; C_{fuel} 为燃料成本; C_D 为退役成本; S 为退役回报因子.

蒙特卡洛分析法^[17]是一种特别适合量化投资成本不确定性的方法.由于改造项目中各组分节约比例有很大的不确定性,本研究采用蒙特卡洛随机抽样的方法对燃煤电厂改造为核电厂的经济性结果进行分析,将所求解的问题转化为某种随机分布的特征数,根据某已知分布的概率密度函数,产生接近符合实际的分布函数.研究考虑了 4 个变化参数,进行 1 万次随机抽样以获取可靠的结果.

1.3 输入参数

燃煤电厂和核电厂,除锅炉岛和核岛存在差异外,其他建筑或设备都可以重新利用.因此假定在改造过程中,燃煤电厂的一些设施设备可以直接用于核电厂.相较于新建核电厂,有研究提出了改造机组的资本成本分解和可节约比例,如表 1 所示^[18].可以看出如果对现有燃煤电厂进行改造,前期的投资成本可

表 1 假设的改造工厂的隔夜成本份额和潜在节约比例^[18]

Tab. 1 Assuming the overnight cost share and potential savings ratio of the renovation factory^[18] %

成本组成	预算份额	潜在成本节约比例
设计、建筑、工程和许可	5	20~30
项目工程、采购和施工管理	7	0
核岛施工	28	0
常规岛施工	15	80~95
辅助车间施工	18	20~40
场地开发和土木工程	20	20~30
运输	2	0
调试和首堆燃料	5	0
合计	100	20.6~28.2

以节约 20.6%~28.2%，包括与现有蒸汽循环执行改造集成的所有预期成本，该比例用于评估燃煤电厂改为核电厂的成本节约范围。此外，假定再利用的设备定义为搁浅资产，意味着这部分设备不需要额外增加成本负担。以 24% 的隔夜成本作为燃煤电厂改造为核电厂的改造节约基准值。

为了方便分析，假定 3 个案例，分别为新建核电厂(GNU)、燃煤电厂改造为核电厂(RNU)、燃煤电厂(CU)。表 2 是 G4-ECONS 计算程序的主要输入参数。在考虑碳价对项目成本的影响时，特别是对于发电或工业项目，将碳价并入运维成本。

表 2 经济参数假设

Tab. 2 Economic parameter assumptions

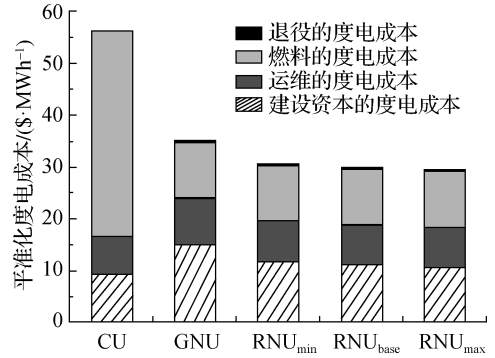
参数	GNU	RNU	CU
建造工期/年	6	6	4
额定发电量/MW	1 200	1 200	1 200
平均能力因子/%	92	92	70
施工期实际利率/%	5	5	5
寿命/年	40	40	40
热力学效率/%	41.2	41.2	41.2
隔夜成本/(\$·kW ⁻¹)	2 044 ^[14]	1 532	1 160 ^[19]
建设期利息/10 ⁶ \$	310	262	150
总投资成本/10 ⁶ \$	2 762.8 ^[14]	2 100.4	1 542.0
燃料前端成本/(\$·MWh ⁻¹)	8.89 ^[20]	8.89 ^[20]	
燃料后端成本/(\$·MWh ⁻¹)	1.85 ^[20]	1.85 ^[20]	
煤价/(\$·GJ ⁻¹)			2.87 ^[21]
电价/(\$·MWh ⁻¹)	60 ^[21]	60 ^[21]	60 ^[21]
碳价/(\$·t ⁻¹)			50
可变运维成本/(\$·MWh ⁻¹)	2.37 ^[20]	2.37 ^[20]	5.8 ^[22]
固定运维成本/(\$·MW ⁻¹)	56 000	44 000	12 300 ^[22]
退役成本/(\$·MWh ⁻¹)	0.17 ^[20]	0.17 ^[20]	0.05

2 结果与讨论

2.1 经济性分析

基于上述输入参数和假设，对所提出的 RNU 方案进行经济性分析。图 2 展示了 3 种方案的平准化度电成本，可以看出：RNU 和 GNU 方案的各项成本相差不大，而 CU 方案的平准化度电成本最高，且其燃料的度电成本占比最大，高达 70%。RNU 方案相较于

GNU 方案，平准化度电成本下降了 14.8%，小于输出参数的潜在节约比例，这是由于运维成本等不能通过改造而降低；而相较于 CU 方案，RNU 方案的平准化度电成本下降了 47.0%，因此 RNU 方案是一种经济上可行的选择。这也表明了核电机组脱碳改造在降低发电成本方面的潜力和重要性。



RNU_{min}、RNU_{max} 和 RNU_{base} 分别表示改造节省的最小比例方案、最大比例方案和基准方案，下同。

图 2 不同投资方案下的平准化度电成本
Fig. 2 Levelized costs of electricity under different investment cases

图 3 展示了在寿命周期内不同方案的净现值大小，可以看出：CU 方案的净现值最小，仅约 6 亿美元，反映了其成本高且收益较低；而 GNU 和 RNU 均呈现较高的净现值，其中 RNU_{base} 方案的净现值高达 50 亿美元，尽管改造成本可能较高，但其寿命周期内的收益明显高于 CU 方案，凸显了核电机组脱碳改造在经济上的优势和潜力。这表明在能源转型背景下，核电机组的投资回报更为可观，经济性更优，有助于提高能源结构的可持续性和稳定性。

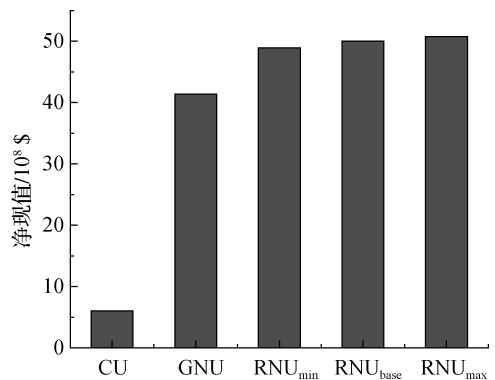


图 3 不同投资方案下的净现值
Fig. 3 Net present values under different investment cases

2.2 不确定性分析

在改造过程中,成本节约比例给出的是一个区间范围,具有很大的不确定性,因此分析成本的不确定性可以显著增强改造结果的实用性.

图 4 是采用蒙特卡洛分析法得到的结果分布直方图和累积概率曲线,展示出 RNU_{base} 方案投资成本的不确定性. 可以看到,95%置信区间对应的总投资成本在 17.68 亿~19.44 亿美元之间,其均值±标准差为(18.56±0.53)亿美元,与之前在经济分析中计算的平均值非常接近,证明了蒙特卡洛方法的有效性. 通过本研究获得的投资成本的概率函数,可以与其他非 RNU 情况下的核电厂投资成本进行对比分析,帮助投资人和研究人员对该改造项目的成本投入有更加全面的了解. 该结果表明,在 RNU 方案中要想实现更高的盈利,需要付出一定的资本投资,这意味着相应的财务风险也会更高.

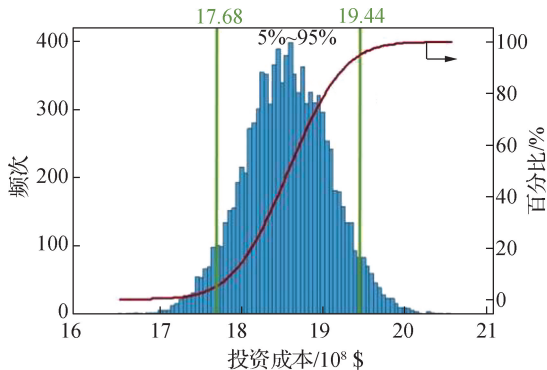


图 4 RNU_{base} 方案投资成本的不确定性

Fig. 4 Uncertainty of investment cost of RNU_{base} case

2.3 敏感性分析

本研究通过建设期、折现率、寿命及电厂能力因子等参数对 GNU 和 RNU (节约成本比例采用 RNU_{base} 数据,下同) 方案的平准化度电成本进行敏感性分析,以探究不同参数对经济指标的影响.

如图 5 所示:随着建设期和折现率的成本增加,GNU 和 RNU 方案的平准化度电成本也增加,而随着寿命和能力因子的增加,这两种方案的平准化度电成本则下降. 这表明延长反应堆使用年限和提高核电厂的运行负荷是一种有效的提高核电厂经济效益的策略.

本研究还从运维成本和燃料成本等方面分别对 GNU 和 RNU 方案的净现值进行敏感性分析. 如图 6 所示:随着各项指标的增加,GNU 方案的净现值变化率均略大于 RNU,表明 RNU 对市场变化、成本波动

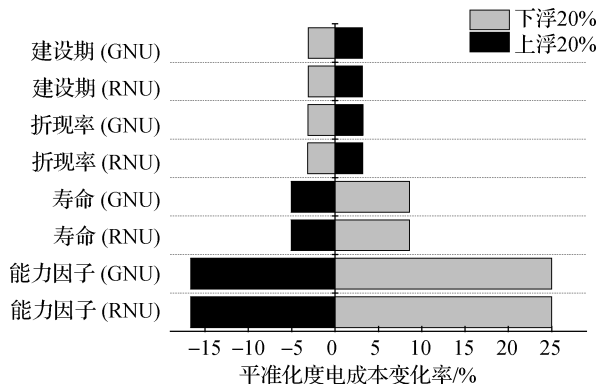


图 5 平准化度电成本的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of levelized costs of electricity

等具有较好的抵抗能力,有助于减轻投资者和利益相关者的担忧,提高项目的可靠性. 其中,净现值对固定运维成本和燃料循环前端成本的敏感度较高. 这是因为固定运维成本往往与项目的寿命周期相关,其时间跨度较大,固定运维成本的变化会在项目运行的多个年份内产生影响,进而对净现值产生明显的影响;燃料循环前端(比如核燃料采购和处理)的成本在整个项目中占比较大,其变化对项目的经济性有较大影响,直接影响净现值.

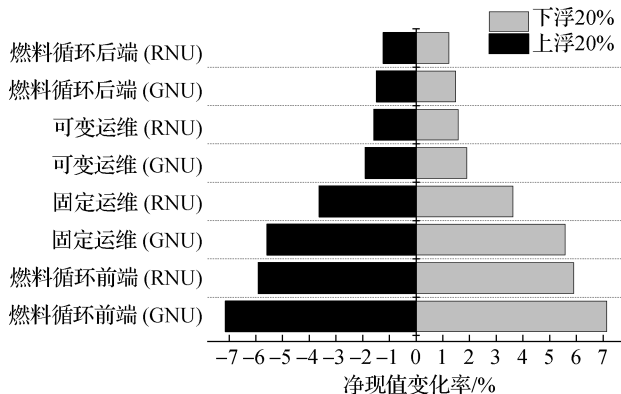


图 6 RNU 和 GNU 方案净现值的敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of net present values of RNU and GNU cases

图 7 是从碳价和运维成本等方面分别对 CU 和 RNU 方案的净现值进行敏感性分析. RNU 方案对可变运维和固定运维成本的变化敏感度远小于 CU 方案. 与煤价相比,碳价对 CU 方案的影响更大. 这体现了核电厂在经济上的优势,尤其是核电改造项目的潜力. 随着环保意识的增强,碳价的上升对于能源市场的影响也越发显著. 这些结果为投资者和政策制定者提供了重要的参考,有助于更准确地评估和规划未来能源投资和政策方向.

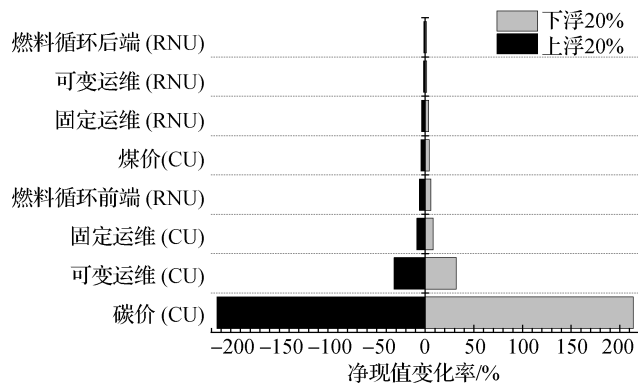


图 7 RNU 和 CU 方案净现值的敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of net present values of RNU and CU cases

3 结 论

本研究借助 G4-ECONS 工具,分析利用核能替代中国现有燃煤电厂的燃煤锅炉的潜在经济性,利用 HTR-PM 反应堆对煤机组类型进行改造分析。结果表明:

1) 与 GNU 方案相比,RNU 方案的平准化度电成本下降了 14.8%,同时可保留目前拥有燃煤电厂地区的当地就业岗位和经济活动,可为社会带来巨大的经济和社会效益。

2) GNU 和 RNU 方案的平准化度电成本随着反应堆使用寿命和能力因子的增加而降低,表明可以通过延长反应堆使用寿命和提高核电厂运行负荷来提高核电厂的经济效益。

3) GNU 和 RNU 方案的净现值均远高于 CU 方案,其中 RNU 方案的净现值更高。与煤价相比,碳价对 CU 方案的影响更大。

本研究的平准化度电成本结果是基于汽轮机组能够重用的理想条件下得到的,此时建设成本下降 25%。然而,本课题组的后续研究表明部分汽轮机组存在无法重用的可能性。若不能重用,则 RNU 的建设成本仅能下降 10%左右,但仍然具有较优经济性。

本研究从经济层面初步验证了燃煤电厂转型为核电厂的可行性,该研究结果为推动清洁能源发展、提升能源结构的可持续性提供了重要参考,对于制定未来的能源政策和投资决策具有重要意义。此外,燃煤电厂转型为核电厂对于核能行业来说同样是深度参与全球能源低碳化转型过程的绝佳选择,核电与煤电都能增加能源系统的稳定性,而核电相较于煤电碳排放更低,更能适应未来能源体系低碳化转型需求。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
- [2] GE W D, LI J, LIU J F, et al. Impacts of coal use phase-out in China on the atmospheric environment: (1) emissions, surface concentrations and exceedance of air quality standards [J]. Atmospheric Environment, 2023, 315: 120163.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] HANEKLAUS N, QVIST S, GLADYSZ P, et al. Why coal-fired power plants should get nuclear-ready [J]. Energy, 2023, 280: 128169.
- [5] XU S, LU Y H M, MUTAILIPU M, et al. Repowering coal power in China by nuclear energy: implementation strategy and potential[J]. Energies, 2022, 15(3): 1072.
- [6] QVIST S, GLADYSZ P, BARTELA Ł, et al. Retrofit decarbonization of coal power plants: a case study for Poland[J]. Energies, 2020, 14(1): 120.
- [7] ŁUKOWICZ H, BARTELA Ł, GLADYSZ P, et al. Repowering a coal power plant steam cycle using modular light-water reactor technology[J]. Energies, 2023, 16(7): 3083.
- [8] International Atomic Energy Agency. Repurposing fossil fuel power plant sites with SMRs to ease clean energy transition[EB/OL]. [2024-11-25]. <https://www.iaea.org/newscenter/news/repurposing-fossil-fuel-power-plant-sites-with-smrs-to-ease-clean-energy-transition>.
- [9] HANSEN J K, JENSON W D, WROBEL A M, et al. Investigating benefits and challenges of converting retiring coal plants into nuclear plants[EB/OL]. [2024-11-25]. <https://www.osti.gov/biblio/1886660>.
- [10] 2×600 MW 火电厂收口概算审定版[EB/OL]. [2024-11-25]. <https://www.docin.com/p-92056687.html>.
- [11] HU B Y, ZHAI H B. The cost of carbon capture and storage for coal-fired power plants in China [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 65: 23-31.
- [12] Ministry of Climate and Environment Republic of Poland. Energy policy of Poland until 2040 (EPP2040) [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040>.
- [13] HOLCOMB D E, PERETZ F J, QUALLS A L. Advanced high temperature reactor systems and economic analysis[EB/OL]. [2024-11-25]. <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub32466.pdf>.
- [14] OECD, Nuclear Energy Agency. Unlocking reductions in

- the construction costs of nuclear [EB/OL]. [2024-11-25]. <https://doi.org/10.1787/33ba86e1-en>.
- [15] YE S D, TIONG R L K. NPV-at-risk method in infrastructure project investment evaluation [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2000, 126(3): 227-233.
- [16] UECKERDT F, HIRTH L, LUDERER G, et al. System LCOE: what are the costs of variable renewables? [J]. *Energy*, 2013, 63: 61-75.
- [17] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. *电力系统自动化*, 1997, 21(6): 68-75.
- [18] World Nuclear Association. Economics of nuclear power [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://wna.origindigital.co/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power>.
- [19] Massachusetts Institute of Technology. The future of the nuclear fuel cycle [R/OL]. [2024-01-15]. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/04/MITEI-The-Future-of-the-Nuclear-Fuel-Cycle.pdf>.
- [20] United State Energy Information Administration. Capital cost and performance characteristic estimates for utility scale electric power generating technologies [R/OL]. [2024-01-15]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/power-plants/capitalcost/>.
- [21] LI Z X, WANG Q H, FANG M X, et al. Thermodynamic and economic analysis of a new 600 MWe coal-fired power plant integrated with CaO-based carbon capture system [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103386.
- [22] ZHANG D W, PALTSEV S. The future of natural gas in China: effects of pricing reform and climate policy [J]. *Climate Change Economics*, 2016, 7(4): 1650012.

(责任编辑: 曾礼娜)

[上接第 203 页]

- [46] 准格尔旗: 创新引领新能源产业实现由“点”到“链” [EB/OL]. [2024-05-30]. https://www.nmg.gov.cn/ztl/tjlswdrw/nyzlyjd/202403/t20240328_2486627.html.
- [47] 大安“化风为宝”发展绿色产业 [EB/OL]. [2024-05-30]. https://www.jl.gov.cn/szfzt/gzlfz/gzdt/202309/t20230910_2514693.html.
- [48] 中国石化申报乌兰察布 10 万吨/年风光制氢一体化项目(制氢厂部分)正式获批 [EB/OL]. [2024-05-30]. <https://www.wulanchabu.gov.cn/bmxxgk/1472787.html>.
- [49] 向“新”求变 向“绿”同行 [EB/OL]. [2024-05-30]. http://epaper.tongliaowang.com/paper/pc/content/202312/07/content_22985.html.
- [50] 中煤图克绿色低碳产业示范园区规划 [EB/OL]. [2024-05-30]. http://www.wsq.gov.cn/zw/fpgz_154204/202312/P020231215379647474585.pdf.
- [51] 中国华电集团有限公司. 12000 Nm³/h! 中国华电 20 万千瓦新能源制氢示范项目投产 [EB/OL]. [2024-05-30]. <https://www.chd.com.cn/site/2/2024-03-09/e8827c8189c6466b9165ffaf26ac6739.html>.
- [52] 全国首个海岛“绿氢”示范工程在台州投运 [EB/OL]. [2024-05-30]. <http://paper.people.com.cn/zgnyb/images/2022-07/11/16/zgnyb2022071116.pdf>.
- [53] 宁波市经济和信息化局. 国家电网首个氢电耦合国家重点研发计划项目通过验收, 以绿电制绿氢 [EB/OL]. [2024-05-30]. http://jxj.ningbo.gov.cn/art/2024/6/14/art_1229561617_58939688.html.
- [54] 建设新型电力系统助力浙江碳达峰、碳中和 [EB/OL]. [2024-05-30]. <http://zj.people.com.cn/n2/2021/0915/c186327-34915387.html>.
- [55] 全国首个乡村生态氢能示范工程在缙云投运 [EB/OL]. [2024-05-30]. https://www.lishui.gov.cn/art/2022/11/10/art_1229218391_57340510.html.
- [56] 杭州钱塘多能互补零碳柔直示范工程正式启动投运 [EB/OL]. [2024-05-30]. <http://zj.people.com.cn/n2/2022/0525/c186327-35285870.html>.
- [57] 关于印发《氢能产业标准体系建设指南(2023 版)》的通知 [EB/OL]. [2024-05-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6897986.htm.

(责任编辑: 徐婷婷)