

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241433

# 考虑风电退役重建和煤电灵活性改造的低碳电力系统 多阶段协同规划方法

陈艳波<sup>1</sup>, 董华玉<sup>1</sup>, 余永康<sup>1</sup>, 黄阮明<sup>2</sup>, 李灏恩<sup>2</sup>, 张智<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200010)

**摘要:** 加快风电等新能源快速发展是实现“双碳”战略的关键路径。但随着“十四五”末期风电退役潮的到来, 我国将面临大规模风电退役和重建的问题, 这将严重威胁电力系统的供电充裕性与灵活性。在此背景下, 煤电仍是电力保供和灵活调节的重要基石, 因此需要统筹协调发展风电与煤电。为此, 提出了一种考虑风电退役重建和煤电灵活性改造的低碳电力系统多阶段协同规划方法。首先, 建立了考虑系统供电充裕性的风电直接退役和延寿改造有序退役模型, 并提出“以大代小-等容改造和扩容改造”的风电场多路径原址重建方案。在此基础上, 考虑煤电灵活性改造对新能源消纳的影响, 构建了内嵌系统运行模拟的风电和煤电改造协同规划模型。最后, 以改进IEEE39节点系统为例进行算例分析, 结果表明所提方法可以给出保障系统供电充裕性的风电退役和重建方案, 且通过煤电灵活性改造能有效满足风电场扩容后的灵活性需求。

**关键词:** 风电退役重建; 煤电灵活性改造; 多阶段协同; 供电充裕性; 风电消纳

## Multi-stage coordinated planning method for low-carbon power systems considering wind power decommissioning and reconstruction and coal power flexibility upgrade

CHEN Yanbo<sup>1</sup>, DONG Huayu<sup>1</sup>, SHE Yongkang<sup>1</sup>, HUANG Ruanming<sup>2</sup>, LI Haoen<sup>2</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200010, China)

**Abstract:** Accelerating the rapid development of new energy sources such as wind power is a key path to achieve the “dual carbon” goals. However, with the approaching wave of wind power decommissioning near the end of the 14th Five-Year Plan, China will face the challenges of large-scale wind power decommissioning and reconstruction, which will seriously threaten the power system’s supply adequacy and flexibility. In this context, coal power remains an important cornerstone for power supply security and flexible regulation, necessitating coordinated development of wind power and coal power. To this end, a multi-stage coordinated planning method for low-carbon power systems considering wind power decommissioning and reconstruction and coal power flexibility upgrades is proposed. First, a model for direct decommissioning of wind power and orderly decommissioning of life extension retrofit considering system supply adequacy is established. A multi-path in-situ reconstruction scheme of wind farm is then proposed, featuring “large replacing small” and “capacity-equivalent retrofit expansion upgrades”. On this basis, considering the impact of coal power flexibility upgrades on new energy consumption, a coordinated planning model of wind power and coal power upgrades is constructed. Finally, a case study using the improved IEEE 39-bus system shows that the proposed method can provide wind power decommissioning and reconstruction schemes to ensure system supply adequacy. In addition, coal power flexibility upgrades can effectively meet the flexibility demands following wind farm expansions.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 1400-202357327A-1-1-ZN).

**Key words:** wind power decommissioning and reconstruction; coal power flexibility upgrade; multi-stage coordination; power supply adequacy; wind power consumption

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(1400-202357327A-1-1-ZN)

## 0 引言

风电行业作为新能源电力领域的重要组成部分, 在实现“双碳”目标的过程中发挥着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。然而, 我国早期的风电投运时间已临近或超过 20 年的设计寿命, 预计到“十四五”末期, 中国将迎来首次风电大规模退役, 达到 20 年服役时间的风电装机量将超过 100 万 kW; 到 2030 年, 风电累计退役规模将超过 6000 万 kW, 约占总装机容量的 7.5%<sup>[4]</sup>, 因此, 风电退役重建规划问题变得尤为紧迫。2023 年 6 月, 国家能源局印发《风电场改造升级和退役管理办法》, 鼓励老旧风电机组开展改造升级<sup>[5]</sup>, 但目前风电场仍面临着如何制定退役策略、到达并网年限后机组能否可靠运行等诸多难题。若短时间内退役大量风电机组, 电网将面临电力短缺的稳定性问题, 同时, 为应对风电场扩容后的消纳问题, 煤电机组的灵活性改造规划也亟须同步进行<sup>[6-8]</sup>。因此, 解决风电退役、重建与煤电改造的协同规划问题, 对实现电力系统低碳转型具有重要的工程价值。

目前, 已有文献对风电场退役改造及风电场优化升级的问题进行了研究。如文献[9-11]对风电场退役和再开发所面临的政策和技术问题进行了分析。文献[12]针对老旧风机占据较好风场资源但利用率低的问题, 分析了风电场改造的必要性, 并对“以大代小”改造后的发电潜力进行了预测。文献[13]对比了老旧风电场全面拆除、检修+局部改造及扩容改造方式的经济性, 并给出 3 种改造方式组合的实施方案。文献[14]通过价值评估方法筛选出需要改造的老旧风电场, 并对不同风电场改造的优先级进行排序。文献[15-16]考虑系统电力电量平衡, 研究了风电场容量规划的问题。以上文献虽然从不同角度对风电场的退役改造与新能源场站容量规划问题进行了研究, 但并未考虑风电场有序退役与原址重建的问题, 难以给出风电退役潮下的合理规划方案。对于风电原址重建工程, 我国已有试点案例, 2023 年 7 月, 国电投中卫香山试点项目直接将 99 台 1.5 MW 老旧风电机组全部拆除, 24 台 6.25 MW 更新机组全部并网投运<sup>[17]</sup>。然而, 当前风电改造试点项目较少, 实际并网容量不到 100 MW, 针对如何评估风电场是否需要退役改造以及如何选择退役改造方案, 尚未形成统一标准。此外, 目前研究仅针对小型风电场站进行了单阶段规划, 而风电大规模退役重建是一个逐年推进的过程, 若不统筹全局, 会带来供电充裕性不足与新能源消纳的问题。因此, 应考虑其多阶段过程, 考虑各阶段方案之间的相互

影响, 以保障电力系统的安全稳定运行。

同时, 在风电场站的扩容重建投运过程中, 会出现系统灵活调节能力不足导致的调峰问题, 为解决这类问题, 国家鼓励通过煤电机组改造来提升系统灵活性, 促进新能源消纳。《全国煤电机组改造升级实施方案》提出“十四五”期间供热改造规模力争达到 5000 万 kW、灵活性改造完成 2 亿 kW<sup>[18]</sup>。对于纯凝机组, 文献[19]构建了考虑火电机组灵活性改造的电力系统长期调度模型, 模型在提升电力系统运行经济性的同时可以促进高比例风电消纳。文献[20]以经济性最优为目标, 提出火电机组灵活性改造规划模型, 以提高机组调节能力并促进新能源的消纳。文献[21]建立了计及弃风的风-火改造集中系统的机组组合模型, 并证明该模型对激励机组参与调峰的有效性。对于热电联产机组, 文献[22]分析了热电机组灵活性改造后的电热运行特性。文献[23]通过仿真证明, 采用热储能改造的热电机组可以有效提升系统风电消纳率与运行经济性。以上文献虽然对不同类型煤电机组的灵活性改造规划进行了研究, 但未考虑风电场大量退役重建对煤电改造带来的影响。如何通过煤电机组改造保障电力系统灵活性, 助力风电升级转型, 仍是亟须研究的难题。

综上分析, 现有风电退役规划研究仍存在以下不足: 1) 缺乏考虑系统供电充裕性的风电有序退役和重建规划路径; 2) 缺乏考虑灵活性需求的风电和煤电改造多阶段协同规划方法。为此, 本文提出了一种低碳电力系统多阶段协同规划模型, 能够有效应对风电退役潮及新能源场站扩容下的充裕性及灵活性需求, 对风电与煤电协同改造影响下的电力系统演化路径进行分析。

本文首先构建了风电场退役及重建过程的技术经济性模型, 可对达到寿命的机组是否直接退役做出决策, 并对机组“以大代小”原址重建进行定容。然后, 基于纯凝机组和热电联产机组的运行特性, 建立了多类型煤电的灵活性改造模型, 以提升系统灵活性, 促进风电扩容期间的新能源消纳。基于以上模型, 从协同规划的视角, 构建了包含风电退役重建、煤电灵活性改造的多阶段优化模型, 并通过分阶段优化保证改造任务的协调性和经济性。最后, 通过改进的 IEEE39 节点系统进行仿真分析, 验证了所提方法在解决风电有序退役与重建消纳问题上的有效性。

## 1 风电场退役重建建模

风电的退役和重建属于中长期电源规划, 需要根据整个规划周期, 在不同时间阶段, 合理做出决

策。本节提出的风电场(wind farm, WF)改造模型, 可以考虑风机直接退役或延寿改造两种情况, 并在机组退役后, 以大容量机组代替小容量机组, 进行等容或扩容改造。

### 1.1 风电场有序退役建模

风机的退役成本包括两个部分: 设备拆除成本和资产回收成本。其中, 拆除成本包括拆除电机、叶轮、控制系统等。资产回收成本可以部分补偿拆除成本。风电场与风机的退役成本如式(1)~式(3)所示。式(4)限制了风机在  $s-1$  阶段退役后,  $s$  阶段是退役状态, 避免被重新使用; 式(5)限制了达到并网年限的风机必须进行延寿改造才能保留在电力系统中。

$$C_{g,s}^{\text{rtz}} = \sum_{i=1}^{N_i} C_{i,s}^{\text{rt}} \quad (1)$$

$$C_{i,s}^{\text{rt}} = \frac{(\delta_{i,s-1}^{\text{rt}} - \delta_{i,s}^{\text{rt}})c_{\text{rt}}V_{i,s}^{\text{rt}}}{(1 + \varepsilon_1)^{(s-1)Y}} \quad (2)$$

$$c_{\text{rt}} = c_u - c_o(1 + b^{\text{rt}})^{-(L_{i,s}^{\text{max}} + y - 1)} \quad (3)$$

$$\delta_{i,s}^{\text{rt}} \leq \delta_{i,s-1}^{\text{rt}} \quad (4)$$

$$\delta_{i,s}^{\text{rt}} \leq \bar{\delta}_{i,s}^{\text{rt}} + \delta_{i,s}^{\text{re}} \quad (5)$$

式中:  $C_{g,s}^{\text{rtz}}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段的退役成本;  $N_i$  为风电场中风机总数;  $C_{i,s}^{\text{rt}}$  为风机  $i$  在  $s$  阶段的退役成本;  $\delta_{i,s}^{\text{rt}}$  为  $s$  阶段的退役决策变量, 若  $\delta_{i,s}^{\text{rt}} = 0$  则风机退役,  $\delta_{i,s}^{\text{rt}} = 1$  则风机仍保留在电力系统中;  $c_{\text{rt}}$  为每 MW 风机的净退役成本;  $V_{i,s}^{\text{rt}}$  为退役风机的容量;  $\varepsilon_1$  为风机折现率;  $Y$  为每个阶段的年数, 在文中各阶段年数相同;  $c_u$  为每 MW 风机的拆除成本;  $c_o$  为每 MW 已拆除材料的回收成本;  $b^{\text{rt}}$  为设备净值递减率;  $L_{i,s}^{\text{max}}$  为风机的设计寿命;  $y$  为投运年至退役年的总年数;  $\delta_{i,s}^{\text{re}}$  为  $s$  阶段的延寿改造决策变量, 若达到年限的风机退役则  $\delta_{i,s}^{\text{re}} = 0$ , 但部分风机因系统要求等原因, 选择延寿改造后留在系统中, 则  $\delta_{i,s}^{\text{re}} = 1$ ;  $\bar{\delta}_{i,s}^{\text{rt}}$  为风机寿命决策变量,  $\bar{\delta}_{i,s}^{\text{rt}} = 0$  表示风机已达到并网年限,  $\bar{\delta}_{i,s}^{\text{rt}} = 1$  表示风机未达到并网年限。

风电场的延寿改造成本及约束如式(6)~式(9)所示。

$$C_{g,s}^{\text{rez}} = \sum_{i=1}^{N_i} C_{i,s}^{\text{re}} \quad (6)$$

$$C_{i,s}^{\text{re}} = \frac{(\delta_{i,s-1}^{\text{re}} - \delta_{i,s}^{\text{re}})c_{\text{re}}V_{i,s}^{\text{re}}}{(1 + \varepsilon_1)^{(s-1)Y}} \quad (7)$$

$$\delta_{i,s}^{\text{re}} \leq \delta_{i,s}^{\text{rt}} \quad (8)$$

$$\delta_{i,s}^{\text{re}} \leq \delta_{i,s-1}^{\text{re}} \quad (9)$$

式中:  $C_{g,s}^{\text{rez}}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段的延寿改造成本;  $C_{i,s}^{\text{re}}$  为风机  $i$  在  $s$  阶段的延寿改造成本;  $c_{\text{re}}$  为每 MW 风机的延寿改造设备安装成本;  $V_{i,s}^{\text{re}}$  为延寿改造风机的容量。

### 1.2 风电场原址再建建模

风电场在  $s$  阶段的改造成本分别如式(10)、式(11)所示。式(14)限制了风电场的再建容量; 式(15)限制了风机不能同时进行等容改造和扩容改造; 式(16)保证了风机在退役后可以进行等容或扩容改造; 式(17)确保在做出改造决策后, 再建风机在下一阶段仍留在系统中。

$$C_{g,s}^{\text{ecz}} = \sum_{i=1}^{N_i} C_{i,s}^{\text{ec}} \quad (10)$$

$$C_{g,s}^{\text{krz}} = \sum_{i=1}^{N_i} C_{i,s}^{\text{kr}} \quad (11)$$

$$C_{i,s}^{\text{ec}} = \frac{(\delta_{i,s-1}^{\text{ec}} - \delta_{i,s}^{\text{ec}})c_{\text{ec}}V_{i,s}^{\text{ec}}}{(1 + \varepsilon_1)^{(s-1)Y}} \quad (12)$$

$$C_{i,s}^{\text{kr}} = \frac{(\delta_{i,s-1}^{\text{kr}} - \delta_{i,s}^{\text{kr}})c_{\text{kr}}V_{i,s}^{\text{kr}}}{(1 + \varepsilon_1)^{(s-1)Y}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,s}^{\text{ec}}V_{g,s-1}^{\text{rtz}} = V_{g,s}^{\text{ecz}} \\ \delta_{i,s}^{\text{kr}}V_{g,s-1}^{\text{rtz}} < V_{g,s}^{\text{krz}} \leq \delta_{i,s}^{\text{kr}}\mu_{\text{kr}}V_{g,s-1}^{\text{rtz}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\delta_{i,s}^{\text{ec}} + \delta_{i,s}^{\text{kr}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,s}^{\text{ec}} \leq 1 - \delta_{i,s}^{\text{rt}} \\ \delta_{i,s}^{\text{kr}} \leq 1 - \delta_{i,s}^{\text{rt}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \delta_{i,s}^{\text{ec}} \geq \delta_{i,s-1}^{\text{ec}} \\ \delta_{i,s}^{\text{kr}} \geq \delta_{i,s-1}^{\text{kr}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} V_{g,s}^{\text{rtz}} = \sum_{i=1}^{N_i} V_{i,s}^{\text{rt}} \\ V_{g,s}^{\text{rez}} = \sum_{i=1}^{N_i} V_{i,s}^{\text{re}} \\ V_{g,s}^{\text{ecz}} = \sum_{i=1}^{N_i} V_{i,s}^{\text{ec}} \\ V_{g,s}^{\text{krz}} = \sum_{i=1}^{N_i} V_{i,s}^{\text{kr}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $C_{g,s}^{\text{ecz}}$ 、 $C_{g,s}^{\text{krz}}$  分别为风电场  $g$  在  $s$  阶段的等容改造成本或扩容改造成本;  $C_{i,s}^{\text{ec}}$ 、 $C_{i,s}^{\text{kr}}$  分别为风机  $i$  在  $s$  阶段的等容、扩容改造成本;  $\delta_{i,s}^{\text{ec}}$  为风机  $i$  在  $s$  阶段的等容改造决策变量;  $\delta_{i,s}^{\text{kr}}$  为风机  $i$  在  $s$  阶段扩容改造的决策变量;  $c_{\text{ec}}$ 、 $c_{\text{kr}}$  分别为每 MW 风机等容安

装和扩容安装设备成本;  $V_{i,s}^{ec}$ 、 $V_{i,s}^{kr}$  分别为风机等容和扩容再建的容量;  $V_{g,s}^{rtz}$ 、 $V_{g,s}^{rez}$ 、 $V_{g,s}^{ecz}$ 、 $V_{g,s}^{kz}$  分别为风电场  $g$  在  $s$  阶段的总退役容量、总延寿改造容量、总等容再建容量、总扩容再建容量;  $\mu_{kr}$  为比例系数, 对扩容容量上限进行约束。

## 2 煤电灵活性改造建模

在低碳转型背景下, 煤电仍是主要的保供和灵活性资源, 本节对纯凝机组调峰改造和热电联产机组热电解耦改造进行建模, 通过提升煤电机组的灵活性来满足新能源场站扩容带来的调峰需求。

### 2.1 纯凝机组改造建模

纯凝机组根据不同的调节能力, 机组运行区间与电功率的关系可用图 1 表示<sup>[24]</sup>。图 1 中,  $P_{cn}^{max}$  为机组最大出力;  $P_{cn}^{min}$ 、 $P_{cn}^a$  分别为机组灵活性改造前、后的最小技术出力。

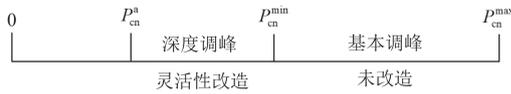


图 1 纯凝机组运行区间示意图

Fig. 1 Schematic diagram of operating range of pure condensing unit

纯凝机组通过灵活性改造可以降低出力下限, 提升系统低谷调峰能力, 进行深度调峰。机组灵活性改造成本如式(19)所示。

$$C_{r,s}^{pcup} = \frac{c_{pcup} \Delta_{r,s}^{noi} P_{cn}^{max}}{(1 + \varepsilon_2)^{(s-1)Y}} \quad (19)$$

式中:  $C_{r,s}^{pcup}$  为机组  $r$  在  $s$  阶段的改造成本;  $c_{pcup}$  为纯凝机组的单位改造成本;  $\varepsilon_2$  为煤电设备折现率;  $\Delta_{r,s}^{noi}$  为机组  $r$  在  $s$  阶段改造决策变量, 若  $\Delta_{r,s}^{noi} = 1$  则机组进行灵活性改造,  $\Delta_{r,s}^{noi} = 0$  则机组不进行改造。

纯凝机组运行成本由灵活性改造前后输出功率所处区间决定, 如式(20)所示。式(21)、式(22)分别为机组运行于基本调峰和深度调峰阶段时的发电费用。

$$C_{r,s}^{isu} = (1 - \Delta_{r,s}^{noi}) C_{r,s}^{bps} + \Delta_{r,s}^{noi} C_{r,s}^{dp} \quad (20)$$

$$C_{r,s}^{bps} = c_{fr1} P_{r,s}^{cn} \quad (21)$$

$$C_{r,s}^{dp} = c_{fr2} P_{r,s}^{cn} \quad (22)$$

式中:  $C_{r,s}^{isu}$  为机组  $r$  在  $s$  阶段运行成本;  $C_{r,s}^{bps}$ 、 $C_{r,s}^{dp}$  分别为机组  $r$  在  $s$  阶段基调、深调阶段的运行成本;  $P_{r,s}^{cn}$  为机组  $r$  在  $s$  阶段的电出力;  $c_{fr1}$ 、 $c_{fr2}$  分别为机组基调、深调阶段的单位发电成本。

### 2.2 热电联产机组改造建模

#### 2.2.1 机组灵活性改造建模

热电联产(combined heat and power, CHP)机组“以热定电”特性显著, 当机组在高供热功率的情况下, 其电功率调节范围较小, 出力较高, 调峰能力较差, 不利于新能源的消纳。本文采用增设电锅炉或蓄热罐的方式对 CHP 机组进行热电解耦, 提高机组的调峰灵活性, 如图 2 所示。

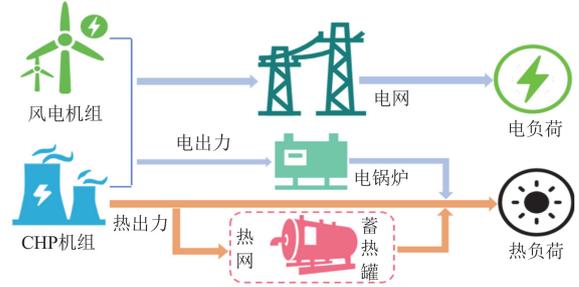


图 2 热电解耦系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of thermoelectric decoupling system

CHP 机组的灵活性改造成本如式(23)所示。

$$C_{n,s}^{ft} = \frac{c_{EB} y_{n,s} V_{n,s}^{EBM} + c_{HST} x_{n,s} V_{n,s}^{HSTM}}{(1 + \varepsilon_2)^{(s-1)Y}} \quad (23)$$

式中:  $C_{n,s}^{ft}$  为机组  $n$  在  $s$  阶段灵活性改造成本;  $c_{EB}$ 、 $c_{HST}$  分别为电锅炉和蓄热罐的单位造价成本;  $V_{n,s}^{EBM}$ 、 $V_{n,s}^{HSTM}$  分别为在  $s$  阶段机组  $n$  增设的电锅炉或蓄热罐容量;  $x_{n,s}$ 、 $y_{n,s}$  分别为第  $n$  台机组在  $s$  阶段是否进行蓄热罐或电锅炉改造的决策变量,  $x_{n,s} = 1$  则进行蓄热罐改造,  $x_{n,s} = 0$  则不改造,  $y_{n,s} = 1$  则进行电锅炉改造,  $y_{n,s} = 0$  则不改造。

#### 2.2.2 机组运行成本建模

图 3 为 CHP 机组运行区间示意图, 在机组改造前, 运行区间如图中 ABCD 区域(橙色线)所示; 机组经灵活性改造, 增设电锅炉与蓄热罐后, 运行区

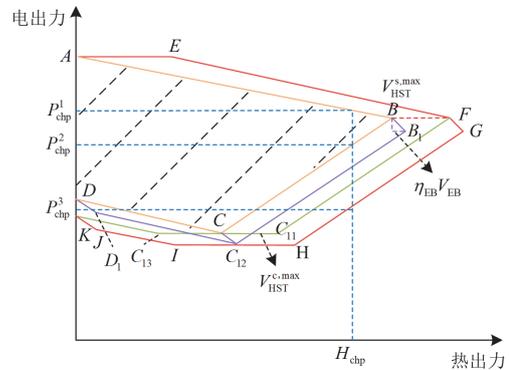


图 3 CHP 机组可行运行区域

Fig. 3 Feasible operating area of CHP unit

间拓展为  $AEFGHIJK$  区域(红色线), 以同样的供热功率  $H_{\text{chp}}$  运行时, 电功率运行区间由  $P_{\text{chp}}^1 \sim P_{\text{chp}}^2$  拓展为  $P_{\text{chp}}^1 \sim P_{\text{chp}}^3$ , 降低了最小技术出力, 提高了爬坡速率, 有利于风电消纳。图 3 中,  $AEFC_{11}C_{13}K$  (绿色线) 为仅增设蓄热罐后的运行区间;  $ABB_1C_{12}D_1D$  (紫色线) 为仅增设电锅炉后的运行区间;  $V_{\text{HST}}^{c,\max}$ 、 $V_{\text{HST}}^{s,\max}$  分别为蓄热罐最大储、放热容量;  $V_{\text{EB}}$ 、 $\eta_{\text{EB}}$  分别为电锅炉容量和电转热效率。

本文采用顶点凸组合法构建 CHP 机组运行模型, 如式(24)所示。

$$\begin{cases} P_{n,t,s}^{\text{chp}} = L_{t,s}^1 P_{n,t,s}^A + L_{t,s}^2 P_{n,t,s}^B + L_{t,s}^3 P_{n,t,s}^C + L_{t,s}^4 P_{n,t,s}^D \\ H_{n,t,s}^{\text{chp}} = L_{t,s}^1 H_{n,t,s}^A + L_{t,s}^2 H_{n,t,s}^B + L_{t,s}^3 H_{n,t,s}^C + L_{t,s}^4 H_{n,t,s}^D \\ L_{t,s}^1 + L_{t,s}^2 + L_{t,s}^3 + L_{t,s}^4 = K_{n,t,s}^{\text{chp}} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $P_{n,t,s}^{\text{chp}}$ 、 $H_{n,t,s}^{\text{chp}}$  分别为灵活性改造前机组  $n$  在  $s$  阶段  $t$  时刻的电出力和热出力;  $L_{t,s}^1 - L_{t,s}^4$  为 0/1 变量;  $P_{n,t,s}^j$ 、 $H_{n,t,s}^j$  分别为图 3 中  $ABCD$  区域各顶点的电出力和热出力,  $j \in \{A, B, C, D\}$ ;  $K_{n,t,s}^{\text{chp}}$  为机组的热出力启停状态。

CHP 机组灵活性改造后的电出力  $P_{n,t,s}^{\text{ft}}$ 、热出力  $H_{n,t,s}^{\text{ft}}$  分别如式(25)、式(26)所示。

$$P_{n,t,s}^{\text{ft}} = P_{n,t,s}^{\text{chp}} - y_{n,s} V_{n,t,s}^{\text{EB}} \quad (25)$$

$$H_{n,t,s}^{\text{ft}} = H_{n,t,s}^{\text{chp}} + y_{n,s} \eta_{\text{EB}} V_{n,t,s}^{\text{EB}} + x_{n,s} (V_{n,t,s}^{\text{HST}} - V_{n,t-1,s}^{\text{HST}}) \quad (26)$$

式中:  $V_{n,t,s}^{\text{EB}}$ 、 $V_{n,t,s}^{\text{HST}}$  分别为第  $n$  台 CHP 机组增设的电锅炉、蓄热罐在  $s$  阶段  $t$  时刻的运行容量。

CHP 机组运行成本由电热出力共同决定, 如式(27)所示。

$$C_{n,t,s}^{\text{chp}} = a_n^{\text{chp}} (P_{n,t,s}^{\text{ft}} + E_{n,t,s} H_{n,t,s}^{\text{ft}})^2 + b_n^{\text{chp}} (P_{n,t,s}^{\text{ft}} + E_{n,t,s} H_{n,t,s}^{\text{ft}}) + c_n^{\text{chp}} \quad (27)$$

式中:  $C_{n,t,s}^{\text{chp}}$  为机组  $n$  在  $s$  阶段  $t$  时刻的运行成本;

$a_n^{\text{chp}}$ 、 $b_n^{\text{chp}}$ 、 $c_n^{\text{chp}}$  为成本系数;  $E_{n,t,s}$  为转换系数。

### 3 考虑风电退役再建和煤电灵活性改造的低碳电力系统多阶段协同规划模型

#### 3.1 规划模型基本架构及特点

本节从协同规划的角度出发, 统筹优化风电场的有序退役、原址再建和煤电机组灵活性改造的多阶段方案, 实现新能源和传统电源的协同发展, 规划框架如图 4 所示。

风电退役再建与煤电灵活性改造是多年中长时间尺度的规划问题, 将整个规划周期以 3 年为一个周期, 周期以 1 年为一个阶段, 阶段索引与时间维

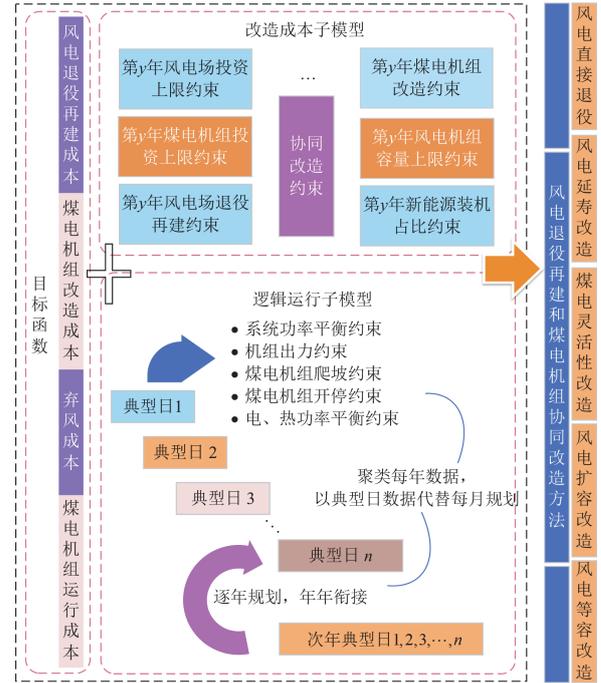


图 4 协同规划模型框架

Fig. 4 Collaborative planning model framework

度一一对应, 在每个阶段每年的 1 月开始进行整体改造, 每个阶段均进行机组的退役与延寿筛选。第一阶段进行风电机组的有序退役和部分煤电机组的灵活性改造; 第二阶段进行“以大代小”等容改造补充第一阶段退役容量, 同时进行剩余煤电机组的灵活性改造; 第三阶段进行“以大代小”扩容改造补充第二阶段退役容量。重点研究风电退役再建问题和风电扩容后消纳问题。为简便计算, 参考文献[25]的处理方法, 在各阶段选取典型日作为代表进行运行仿真计算。运行模拟中的典型日数据通过 K-means 聚类方法对历史数据聚类得到, 然后根据新能源装机和负荷需求的增长, 得到各阶段典型日运行曲线<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.2 目标函数

本文提出的多阶段规划模型的目标是在满足系统安全运行的前提下, 使整个规划周期内的总成本  $C_{\text{total}}$  最小, 包括改造成本和运行成本, 如式(28)所示。改造成本包括: 风电直接退役或延寿改造成本、等容或扩容改造成本、煤电机组改造成本。系统运行成本包括: 煤电机组运行成本、弃风惩罚成本、切负荷成本。

$$\min C_{\text{total}} = C_{\text{ROS}} + C_{\text{OC}} \quad (28)$$

$$C_{\text{ROS}} = \sum_s \left[ \sum_{g=1}^{N_g} (C_{g,s}^{\text{rtz}} + C_{g,s}^{\text{rez}} + C_{g,s}^{\text{ecz}} + C_{g,s}^{\text{krz}}) + \sum_{r=1}^{N_r} C_{r,s}^{\text{pcup}} + \sum_{n=1}^{N_n} C_{n,s}^{\text{ft}} \right] \quad (29)$$

$$C_{OC} = T_s \sum_t \sum_c \pi_c \left[ \left( \sum_{r=1}^{N_r} C_{r,t,c,s}^{isu} + \sum_{n=1}^{N_n} C_{n,t,c,s}^{chp} + \sum_{g=1}^{N_g} D^{curt} P_{g,t,c,s}^{curt} + \sum_d^{N_d} C^{load} \Delta P_{d,t,c,s}^L \right) / (1 + \varepsilon_2)^{(s-1)Y} \right] \quad (30)$$

式中:  $C_{ROS}$ 、 $C_{OC}$  分别为系统改造成本和运行成本;  $C_{r,t,c,s}^{isu}$  为纯凝机组  $r$  在  $s$  阶段  $c$  典型日  $t$  时刻的运行成本;  $C_{n,t,c,s}^{chp}$  为 CHP 机组  $n$  在  $s$  阶段  $c$  典型日  $t$  时刻的运行成本;  $X_T$  为调度时段总数;  $T_s$  为  $s$  阶段的天数;  $\pi_c$  为典型日  $c$  的比例;  $D^{curt}$  为单位弃风惩罚成本系数;  $P_{g,t,c,s}^{curt}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段  $c$  典型日  $t$  时刻下的弃风电量;  $C^{load}$  为切负荷成本;  $\Delta P_{d,t,c,s}^L$  为节点  $d$  在  $s$  阶段  $c$  典型日  $t$  时刻下的切负荷功率;  $N_g$ 、 $N_r$ 、 $N_n$ 、 $N_d$  分别为风电场、纯凝机组、CHP 机组、节点总数。

### 3.3 约束条件

约束条件包含多阶段规划模型中的规划约束和系统运行约束。

#### 3.3.1 规划约束

规划约束包括: 风电退役约束(式(4)一式(5)、式(8)一式(9)), 等容或扩容改造约束(式(14)一式(18)); CHP 机组改造约束(式(31)和式(32)); 系统投资成本上限约束(式(33)); 新能源发电占比约束<sup>[28-29]</sup>。

1) CHP 机组改造约束: 式(31)限制了机组只能选择一种改造方式。式(32)限制了机组在风电装机满足要求时才能进行改造。

$$x_{n,s} + y_{n,s} \leq 1 \quad (31)$$

$$x_{n,s} + y_{n,s} = 0, \sum_{g=1}^{N_g} V_{g,t,s}^{wt} \leq \sum_{g=1}^{N_g} V_{g,t,s}^{wt,min} \quad (32)$$

式中:  $V_{g,t,s}^{wt}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段  $t$  时刻的容量;

$V_{g,t,s}^{wt,min}$  为系统规定风电最小装机容量。

2) 系统投资成本上限约束: 将系统投资成本限制在预算范围内。

$$C_{ROS} \leq \Pi^{\max} \quad (33)$$

式中:  $\Pi^{\max}$  为投资成本上限。

#### 3.3.2 系统运行约束

1) 系统功率平衡约束<sup>[30]</sup>

$$\sum_{g=1}^{N_g} P_{g,t,s}^{wt} + \sum_{r=1}^{N_r} P_{r,t,s}^{cn} + \sum_{n=1}^{N_n} P_{n,t,s}^{ft} = \sum_{d=1}^{N_d} (P_{d,t,s}^L - \Delta P_{d,t,s}^L) \quad (34)$$

$$0 \leq \Delta P_{t,s}^L \leq \mu_L P_{t,s}^L \quad (35)$$

$$\sum_{r=1}^{N_r} H_{n,t,s}^{ft} = H_{t,s}^L \quad (36)$$

式中:  $P_{g,t,s}^{wt}$  为实际风电出力;  $P_{t,s}^L$ 、 $H_{t,s}^L$  分别为系统电、热负荷;  $\mu_L$  为比例系数;  $P_{d,t,s}^L$ 、 $\Delta P_{d,t,s}^L$  分别为节点  $d$  在  $s$  阶段  $t$  时刻下的系统电负荷、切负荷功率。

#### 2) 风电运行约束

$$P_{g,t,s}^{curt} = e_{g,t,s} V_{g,t,s}^{wt} - P_{g,t,s}^{wt} \quad (37)$$

$$\sum_{g=1}^{N_g} V_{g,s}^{wt} = \sum_{g=1}^{N_g} (V_{g,s-1}^{wt} + V_{g,s}^{ecz} + V_{g,s}^{krz} - V_{g,s}^{rtz} + V_{g,s}^{rez} - V_{g,s-1}^{rez}) \quad (38)$$

式中:  $P_{g,t,s}^{curt}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段  $t$  时刻下的弃风电量;  $e_{g,t,s}$  为风电预测出力系数;  $V_{g,s}^{wt}$  为风电场  $g$  在  $s$  阶段的容量;  $V_{g,s-1}^{rez}$  为风电场在  $s-1$  阶段的总延寿改造容量。

#### 3) 纯凝机组运行约束

纯凝机组运行约束包括: 出力约束(式(39)); 开停约束(式(40)一式(41)); 爬坡约束(式(42)和式(43))。

$$P_{r,s}^{cn,min} \leq P_{r,t,s}^{cn} \leq P_{r,s}^{cn,max} \quad (39)$$

$$[T_{r,t-1,s}^{on} - T_{r,s}^{on,min}] \cdot [u_{r,t-1,s} - u_{r,t,s}] \geq 0 \quad (40)$$

$$[T_{r,t-1,s}^{off} - T_{r,s}^{off,min}] \cdot [u_{r,t-1,s} - u_{r,t,s}] \geq 0 \quad (41)$$

$$P_{r,t-1,s}^{cn} - P_{r,t,s}^{cn} \leq R_{r,s}^{op,d} u_{r,t,s} + P_{r,s}^{cn,min} (u_{r,t-1,s} - u_{r,t,s}) + P_{r,s}^{cn,max} (1 - u_{r,t-1,s}) \quad (42)$$

$$P_{r,t,s}^{cn} - P_{r,t-1,s}^{cn} \leq R_{r,s}^{op,u} u_{r,t,s} + P_{r,s}^{cn,min} (u_{r,t,s} - u_{r,t-1,s}) + P_{r,s}^{cn,max} (1 - u_{r,t-1,s}) \quad (43)$$

式中:  $P_{r,s}^{cn,max}$ 、 $P_{r,s}^{cn,min}$  分别为机组出力  $P_{r,t,s}^{cn}$  的上、下限, 由机组运行区间决定;  $T_{r,t-1,s}^{on}$ 、 $T_{r,t-1,s}^{off}$  分别为机组连续开机、停机时间;  $T_{r,s}^{on,min}$ 、 $T_{r,s}^{off,min}$  分别为机组最小连续开机、停机时间;  $P_{r,t,s}^{cn}$  为机组  $r$  在  $s$  阶段  $t$  时刻的电出力;  $u_{r,t,s}$  为机组运行状态变量, 当  $u_{r,t,s} = 1$  时表示机组运行, 当  $u_{r,t,s} = 0$  时表示机组停机;  $R_{r,s}^{op,u}$ 、 $R_{r,s}^{op,d}$  分别为机组向上、向下爬坡速率, 由机组运行区间决定。

#### 4) CHP 机组运行约束

CHP 机组运行约束包括: 电出力约束(式(44)); 热出力约束(式(45)); 爬坡约束(式(46))。

$$(1 - \alpha_{n,s}) P_{n,s}^{chp,min} + \alpha_{n,s} P_{n,s}^{ft,min} \leq P_{n,t,s}^{ft} \leq P_{n,s}^{chp,max} \quad (44)$$

$$0 \leq H_{n,t,s}^{ft} \leq H_{n,s}^{chp,max} \quad (45)$$

$$-[(1 - \alpha_{n,s}) R_{n,s}^{chp,d} + \alpha_{n,s} R_{n,s}^{ft,d}] \leq P_{n,t,s}^{ft} - P_{n,t-1,s}^{ft} \leq (1 - \alpha_{n,s}) R_{n,s}^{chp,u} + \alpha_{n,s} R_{n,s}^{ft,u} \quad (46)$$

式中:  $P_{n,s}^{chp,min}$ 、 $P_{n,s}^{chp,max}$  分别为机组改造前的电出力

上、下限； $P_{n,s}^{ft,min}$  为机组改造后的电出力下限； $H_{n,s}^{chp,max}$  为机组热出力上限； $\alpha_{n,s}$  为机组改造决策变量，包含蓄热罐或电锅炉改造两种形式； $R_{n,s}^{chp,u}$ 、 $R_{n,s}^{chp,d}$  分别为机组改造前的向上、向下爬坡速率的最大值； $R_{n,s}^{ft,u}$ 、 $R_{n,s}^{ft,d}$  分别为机组改造后的向上、向下爬坡速率最大值。

### 4 算例分析

本节采用改进的 IEEE39 节点系统进行算例分析。所提模型和求解算法在 Matlab-2023b 环境中实现，采用 Gurobi-10.0.1 求解。

#### 4.1 算例设置

系统包含 4 个风电场，初始装机容量为 500 MW，1—4 号风电场的装机容量分别为 102 MW、203 MW、130 MW、65 MW，分别在节点 3、8、16、20 接入。其中 1—4 号风电场达到运行年限的风机总装机容量分别为 30 MW、40.5 MW、40 MW、40 MW。煤电机组装机容量为 1300 MW，包含 3 台纯凝机组，6 台 CHP 机组，如图 5 所示。

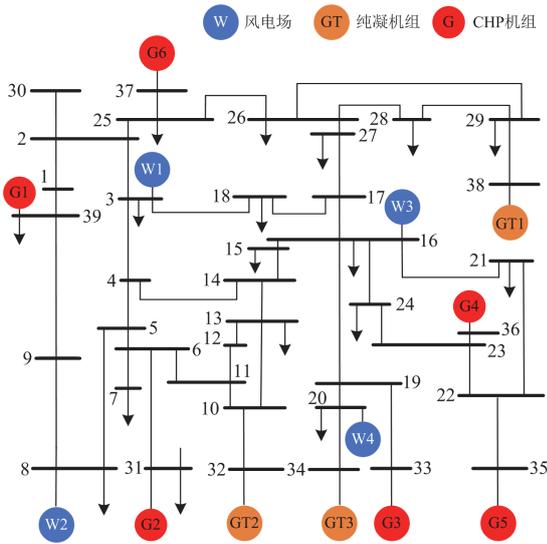


图 5 IEEE39 节点测试系统  
Fig. 5 IEEE39-node test system

结合上海电力系统与市场的规定，风电场改造参数如表 1 所示。纯凝机组参数如附录 A 表 A1 所示；CHP 机组改造情况与运行参数如附录 A 表 A2 和表 A3 所示。电锅炉、蓄热罐、热负荷参数见文献[22]。

为了验证本文模型的有效性，表 2 设置以下 4 个案例进行对比分析。基准方案为本文规划方案；方案 2 不考虑风电延寿改造，采取全部直接退役的决策；方案 3 在第二阶段不考虑风电扩容改造，采

取全部扩容改造的决策；方案 4 不进行煤电机组的协同改造，仅考虑风电机组退役再建过程。

表 1 风电改造相关参数

Table 1 Parameters related to wind power renovation

参数	取值	参数	取值
$c_u$ /(万元/MW)	66.67	$\varepsilon_1$	0.09
$c_o$ /(万元/MW)	8.34	$b^{ft}$	0.06
$c_{re}$ /(万元/MW)	200	$L_{i,s}^{max}$ /年	15
$c_{ex}$ /(万元/MW)	500	$c_{kr}$ /(万元/MW)	675

表 2 案例比较设置

Table 2 Case comparison settings

情景	延寿改造	扩容改造	扩容改造	煤电改造
基准方案	✓	✓	✓	✓
方案 2	×	✓	✓	✓
方案 3	✓	×	✓	✓
方案 4	✓	✓	✓	×

注：“✓”表示改造；“×”表示不改造

#### 4.2 规划结果分析

##### 4.2.1 经济性分析

表 3 为规划周期内各方案规划成本。由表 3 可知，采用基准方案进行风电场和煤电机组的规划整体经济性更佳。这是因为煤电运行成本与弃风成本占总成本的比例较大，而基准方案在风电有序退役再建与煤电协同改造的情况下，煤电机组灵活性改造率较高，可以在更广泛的范围内寻找最优出力方式，降低煤电的发电量，从而降低煤电的运行成本，同时降低弃风率和弃风成本。

表 3 方案成本分析

Table 3 Cost analysis of the plan

成本	方案			
	基准	2	3	4
总成本	205 369.38	337 380.48	285 105.84	312 167.22
退役成本	6569.86	8296.24	6569.86	6569.86
延寿成本	166.8	0	166.8	166.8
扩容成本	54 711.3	68 119.27	0	54 711.3
扩容成本	16 475.89	29 542.97	79 840.76	15 384.89
弃风成本	14 167.63	17 717.50	19 516.31	27 077.68
切负荷惩罚	0	2596.46	0	0
煤电运行成本	109 804.77	210 648.15	176 605.23	208 256.69

基准方案总成本比方案 2 低 132 011.1 万元，这是因为通过延寿改造，实施设备设施置换的方法，可以实现存量风机经济效益的最大化，降低退役成本，并且可以保障电力电量平衡，降低切负荷惩罚。方案 3 与基准方案风电退役成本相同，而基准方案采取风电“扩容+扩容”的改造方式，系统风电消纳

压力较小, 弃风成本低 5348.68 万元。相较方案 4, 基准方案煤电运行成本低 98 451.92 万元, 弃风成本低 12 910.05 万元, 可见考虑煤电协同改造的重要性。

#### 4.2.2 改造过程中系统充裕性与灵活性分析

选取各阶段典型日作为本阶段代表, 比较各方案对系统稳定性的影响。

由图 6 可以看出, 在各阶段弃风严重时段, 煤电机组经灵活性改造, 促进了风电消纳, 2028 年后弃风量有了显著的降低。基准方案 2030 年弃风率为 3.87%, 较规划初期和方案 4 分别降低了 12.3% 和 13.72%。方案 3 较基准方案在 2026 年弃风率高 3.34%, 这是因为在第二阶段方案 3 令再建风电全部扩容, 具有较大的风电消纳需求, 而基准方案进行等容改造, 风电消纳压力低。可见, 综合考虑风电和煤电协同改造、风电有序扩容对促进风电的消纳具有重要意义。

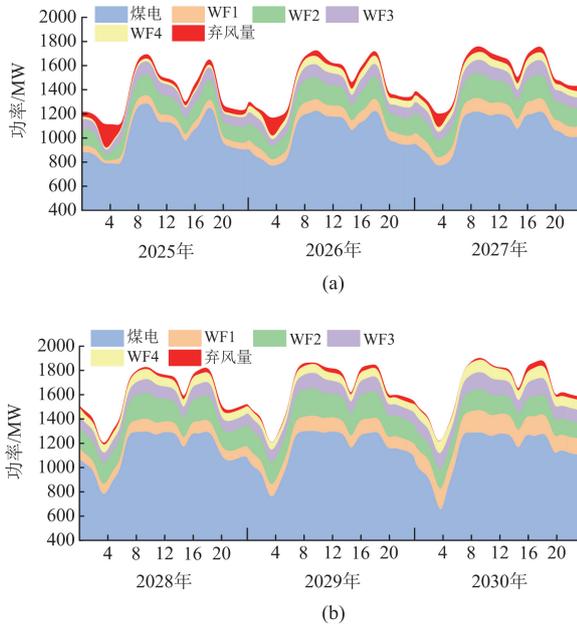


图 6 基准方案各阶段风电与煤电出力图

Fig. 6 Wind and coal power output maps for each stage of the benchmark plan

对比图 6 和图 7 可以看出, 方案 2 在 2025 年由于风电机组大量退役, 源侧无法满足负荷需求, 造成切负荷情况。而基准方案在 2025 年通过 WF3 与 WF2 的延寿改造与少量退役, 保障了系统的供电充裕性。可见, 风电的有序退役可以防止系统出现安全稳定问题。

#### 4.2.3 低碳电力系统转型指标比较

图 8 从第三阶段末系统的碳排放量<sup>[31]</sup>、煤电发电量和灵活性改造率 3 方面比较了 4 种方案的优缺点, 坐标数值为标么值。

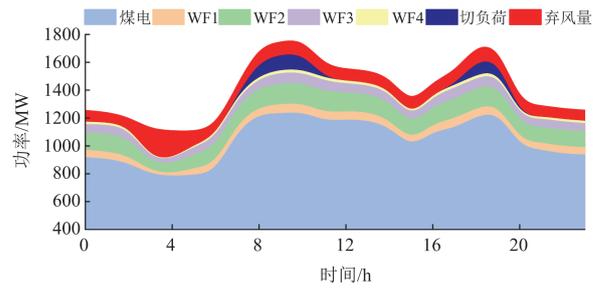


图 7 方案 2 的 2025 年风电与煤电出力图

Fig. 7 2025 wind and coal power output map in scheme 2

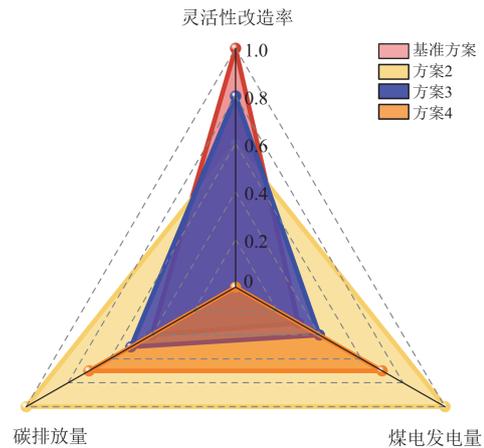


图 8 各方案低碳电力系统转型指标比较

Fig. 8 Indicator comparison of low-carbon power system of different schemes

由图 8 中可以看出, 基准方案具有最高的灵活性改造率与较低的碳排放量。方案 2 的碳排放量是基准方案的 3 倍, 灵活性改造率仅为基准方案的 70%。这是因为大量风电机组直接退役, 造成的电力缺口由煤电机组增发弥补, 导致发电量较高, 同时由于煤电机组担任电力保供的任务, 无法及时进行灵活性改造。方案 3 的碳排放量与灵活性改造率分别为基准方案的 1.25 倍、80%。方案 4 的碳排放量为基准方案的 1.8 倍。可见, 风电和煤电的改造需要统筹全局, 关注各阶段之间的相互影响。

#### 4.2.4 各方案容量规划结果分析

基于本文规划方法, 风电场容量变化如图 9 所示。各方案容量对比情况如图 10 所示。

##### 1) 基准方案风电场容量变化图

由图 9 可以看出风电有序退役与再建特征。WF1、WF2 与 WF4 采用直接退役的方式, WF3 采用延寿改造的方式。在第一周期第一阶段, WF1 与 WF4 分别以 29.4% 和 61.54% 的年均退役率退役大量机组(此退役率指各风场退役装机占本风场总装

机的比重), 在第二阶段进行等容改造, 在第三阶段 WF1 与 WF4 进行扩容改造, 较规划初期的装机容量分别增加了 15 MW 和 10 MW。在第二周期第三阶段, WF1 与 WF4 的装机容量较规划初期分别增加了 87 MW 和 45 MW。这表明, 随着煤电灵活性改造的完成, 风电场允许更大规模的装机并网。

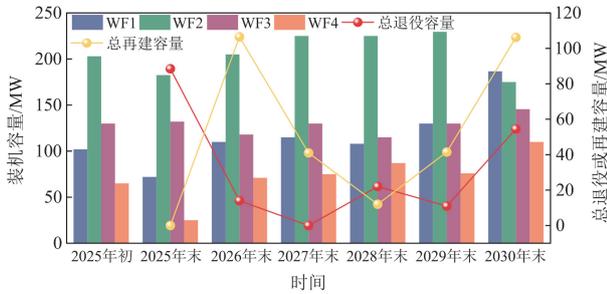


图 9 基准方案风电场容量变化图

Fig. 9 Diagram of wind farm capacity change of benchmark scheme

为保障系统的供电充裕性, WF2 规划前期的退役率仅为 11.23%, 到 2030 年末, 随着其余风场扩容改造的完成, WF2 的退役率提高至 31.43%; 在第一阶段, WF3 对机组进行了延寿改造, 到 2030 年末, WF3 的装机容量较规划初期增加了 15.5 MW。可见, 风机有序退役不仅可以保障系统的供电充裕性, 还实现了机组的扩容。

2) 各方案装机容量分析

为比较各规划方案对风电场最终装机容量的影响, 选取规划第一周期末风场容量进行对比分析。

由图 10 可以看出, 基准方案的风电场总装机容量最高。方案 4 较基准方案装机容量低 83.5 MW, 原因在于方案 4 未进行煤电灵活性改造, 风电消纳能力有限, 对风电装机上限进行限制。WF1、WF2、WF4 在基准方案规划下具有最高的装机容量。然而,

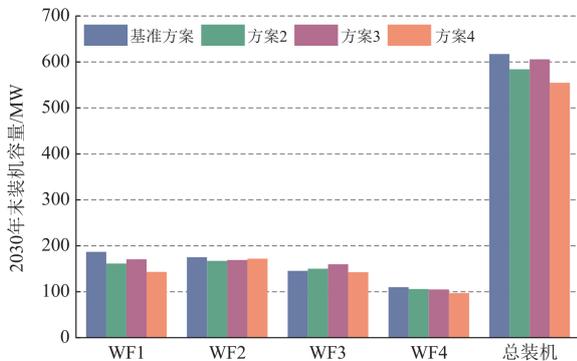


图 10 容量对比图

Fig. 10 Capacity comparison chart

在方案 3 下, WF3 装机容量较基准方案高 15.5 MW, 这是因为方案 3 未进行等容改造, 因此装机容量较高, 但此方案可能导致煤电出力增加、碳排放量升高等问题。因此, 合理有序地安排风电场退役再建过程、风电和煤电协同改造, 对电力系统安全稳定低碳转型具有重要意义。

5 结论

为应对我国风电大规模退役问题, 本文提出了一种考虑风电退役再建的风电-煤电多阶段协同规划方法, 在满足系统安全性与稳定性的前提下, 得到经济性最优的风电机组有序退役计划、再建容量配置以及煤电协同改造方案。并通过改进的 IEEE39 节点算例系统仿真分析, 得出以下结论。

1) 面临风电的退役潮, 合理有序的风电退役及再建规划不仅可以降低系统成本, 而且可以实现风电扩容和存量资源的最大化利用, 且能保障系统的供电充裕性。

2) 在风电扩容再建的过程中, 煤电机组的灵活性改造在保证碳排放量降低的同时, 还可以有效提升风电消纳率。此外, 考虑风电装机容量变化的影响, 可以更合理地实现煤电改造。

3) 在低碳转型的背景下, 通过多阶段协同规划, 在时间维度上充分考虑了风电退役与煤电改造任务的逻辑依赖与动态变化, 实现了两者的有序衔接, 提高了系统的灵活性和可靠性。

下一步将结合煤电建设的意愿不足所带来的装机不确定性问题, 从安全保供的角度出发, 研究本文电源更替方式给电网应变力、防御力、恢复力带来的风险。

附录 A

表 A1 纯凝机组参数

Table A1 Pure condensing unit parameters

机组	$c_{f1}/(\text{元}/\text{MWh})$	$c_{f2}/(\text{元}/\text{MWh})$	$c_{pcup}/(\text{万元}/\text{MW})$	$\epsilon_2$
1	300	400	80	0.08
2	300	400	80	0.08
3	300	400	80	0.08

表 A2 2030 年 CHP 机组灵活性改造情况

Table A2 Flexibility transformation of CHP units in 2030

机组	1	2	3	4	5	6
配置情况	电锅炉	蓄热罐	电锅炉	蓄热罐	蓄热罐	电锅炉
容量	50 MW	50 MWh	50 MW	50 MWh	50 MWh	50 MW

表 A3 CHP 机组运行参数

Table A3 Parameters of CHP unit

机组	最大发电功率/MW	最小发电功率/MW	最大供热功率/MW	$a_n^{\text{chp}}/(\text{元}/\text{MWh})$	$b_n^{\text{chp}}/(\text{元}/\text{MWh})$	$c_n^{\text{chp}}/(\text{元}/\text{h})$	$R_s^{\text{chp}}/(\text{元}/\text{MWh})$
1	200	100	300	0.003	110.2	9500	500
2	200	100	300	0.003	110.2	9500	500
3	150	55	200	0.003	110.2	9500	500
4	100	30	150	0.003	110.2	9500	500
5	180	75	280	0.003	110.2	9500	500
6	180	75	280	0.003	110.2	9500	500

## 参考文献

- [1] 张小莲, 孙啊传, 郝思鹏, 等. 风电场参与电网调频的多机协同控制策略[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 448-457. ZHANG Xiaolian, SUN Achuan, HAO Sipeng, et al. Multi-machine cooperative control strategy of wind farm participating in power grid frequency modulation[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 448-457.
- [2] 李军徽, 罗铨众, 朱星旭, 等. 基于绿证-碳交易机制的风-火-蓄联合调峰控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 11-20. LI Junhui, LUO Xuanzhong, ZHU Xingxu, et al. Peak regulation control strategy of wind-thermal-storage combined based on green certificate-carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 11-20.
- [3] 叶宇剑, 王卉宇, 刘曦木, 等. 电-碳耦合市场环境下可再生能源投资规划优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 92-104. YE Yujian, WANG Huiyu, LIU Ximu, et al. Optimization method for renewable energy investment planning under electricity-carbon coupled market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 92-104.
- [4] 付毕安. 未雨绸缪退役风光组件回收利用推动新能源产业持续健康发展[J]. 中国经贸导刊, 2023(4): 53-54.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委, 国家能源局关于印发《风电场改造升级和退役管理办法》的通知[EB/OL]. [2023-02-27]. [http://www.nea.gov.cn/2023-02/27/c\\_1310711058.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-02/27/c_1310711058.htm)
- [6] 李梦琪. 大规模风电并网条件下火储联合深度调峰模型研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022. LI Mengqi. Research on combined deep peak shaving model of integrated thermal power generation and energy storage system under the condition of large-scale wind power grid connection[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022.
- [7] 张国斌, 李瑞连, 刘永江, 等. 火电机组灵活性改造对风电消纳能力的影响分析[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(4): 93-96. ZHANG Guobin, LI Ruilian, LIU Yongjiang, et al. Influence analysis of wind power consumption ability by thermal power unit flexibility transformation[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(4): 93-96.
- [8] 张少强, 孙晨阳, 余落杭, 等. 燃煤发电机组灵活性改造的研究进展综述[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 48-54. ZHANG Shaoqiang, SUN Chenyang, YU Luohang, et al. Research progress on flexibility modification of coal-fired generating units[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 48-54.
- [9] 张华耀, 徐鹤. 风电场改造升级和退役面临的问题及建议[J]. 中国设备工程, 2023(14): 239-241.
- [10] 雷鸣, 赵青, 程施霖, 等. “上大压小”风电场改造项目的风电机组布局优化方案研究[J]. 太阳能, 2023(2): 81-86. LEI Ming, ZHAO Qing, CHENG Shilin, et al. Study on optimization scheme of wind turbines layout in the “large-replace-small wind turbines” wind farm renovation project[J]. Solar Energy, 2023(2): 81-86.
- [11] 冯磊, 邓杰. 风电退役与再开发: 挑战与建议[J]. 能源, 2022(2): 46-51.
- [12] 加快推动风电机组“以大代小”促进资源循环高效利用[J]. 中国电力企业管理, 2023(16): 80-81.
- [13] 郭日阳, 李巍, 张欣刚, 等. 老旧风电场优化升级与退役处置[J]. 能源与节能, 2023(2): 45-47, 180. GUO Riyang, LI Wei, ZHANG Xingang, et al. Optimization and decommissioning of old wind farms[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(2): 45-47, 180.
- [14] 杜丽娟, 王建明, 刘昊, 等. 老旧风电场以大代小改造评估与决策分析[C]//第十届中国风电后市场交流合作大会论文集, 2023年5月8日-10日, 中国, 合肥.
- [15] 伏泽来. 考虑新能源消纳能力的电源规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2020. FU Zelai. Generation expansion planning considering the utilization of new energy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [16] SIANO P, CHEN P, CHEN Z, et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J].

- IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(5).
- [17] 中卫市人民政府. 中卫香山“以大代小”等容更新试点项目投产[EB/OL]. [2023-09-18]. [https://www.nxzw.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zdxmjs/zdxm/202309/t20230918\\_4270698.html](https://www.nxzw.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zdxmjs/zdxm/202309/t20230918_4270698.html).
- [18] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委, 国家能源局关于印发《全国煤电机组改造升级实施方案》的通知[EB/OL]. [2021-11-03]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202111/t20211103\\_1302857.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202111/t20211103_1302857.html).
- [19] LIU J, GUO T, WANG Y, et al. Multi-technical flexibility retrofit planning of thermal power units considering high penetration variable renewable energy: the case of China[J]. Sustainability, 2020, 12(9).
- [20] 李星梅, 钟志鸣, 阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 51-57.  
LI Xingmei, ZHONG Zhiming, YAN Jie. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 51-57.
- [21] 马龙飞, 吴耀武, 梁彦杰, 等. 计及火电机组灵活性改造的电源扩展弱鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 102-110.  
MA Longfei, WU Yaowu, LIANG Yanjie, et al. Light robust planning for generation expansion considering flexibility reformation of thermal power unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (11): 102-110.
- [22] 陈艳波, 马彦虎, 郑国栋, 等. 计及需求响应的多CHP机组热电解耦协调规划[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3821-3832.  
CHEN Yanbo, MA Yanhu, ZHENG Guodong, et al. Coordinated planning of thermo-electrolytic coupling for multiple CHP units considering demand response[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3821-3832.
- [23] 鲁业安, 马玲, 张磊, 等. 计及火电机组热储能的含风电系统柔性调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 75-84.  
LU Yean, MA Ling, ZHANG Lei, et al. Flexible dispatch of a power system with wind power considering thermal energy storage retrofit of thermal power units[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 75-84.
- [24] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2263.  
LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [25] KHODAEI A, BAHRAMIRAD S, SHAHIDEHPOUR M. Microgrid planning under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2417-2425.
- [26] ZHANG Z, ZHOU M, YUAN B, et al. Decarbonizing the power system by co-planning coal-fired power plant transformation and energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66.
- [27] LIU L, HU X, CHEN J, et al. Embedded scenario clustering for wind and photovoltaic power, and load based on multi-head self-attention[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 122-132.
- [28] WANG Peng, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Power system planning with high renewable energy penetration considering demand response[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 69-80.
- [29] 秦建茹, 李海波, 孙谊嫻, 等. 考虑新能源极限并网强度约束的常规机组最小开机方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 127-135.  
QIN Jianru, LI Haibo, SUN Yiqian, et al. Optimal method of minimum start-up mode for conventional units considering new energy limit grid-connection strength constraint[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 127-135.
- [30] 张野, 李凤婷, 张高航, 等. 考虑风电爬坡备用需求的风电高渗透电力系统优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 95-106.  
ZHANG Ye, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimization and scheduling methods for wind power high-penetration power systems considering wind power ramping reserve requirements[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 95-106.
- [31] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.  
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.

收稿日期: 2024-10-26; 修回日期: 2025-02-12

作者简介:

陈艳波(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划、能量管理、大数据和新一代人工智能等;  
E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn

张智(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统规划与运行。E-mail: zz\_dqgc@163.com

(编辑 张颖)