

引用格式: 许扬, 蔡安民, 张立英, 等. 老旧风电场改造升级进展及关键技术展望 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 58-70. XU Yang, CAI Anmin, ZHANG Liying, et al. Progress and key technology prospects in the renovation and upgrading of old wind farms [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 58-70. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-276.

老旧风电场改造升级进展及关键技术展望

许扬[✉], 蔡安民, 张立英, 贾蓉

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘要: [目的] 对老旧风电场实施“以大代小”改造升级, 充分发挥存量风资源和土地资源价值, 提升存量风场效益, 是推动新能源发展, 实现“3060”目标的重要保障。[方法] 文章对风电场改造升级现状进行综述, 对政策现状以及典型改造升级项目工程项目进行调研, 对现有进展的经验和存在问题进行总结。[结果] 老旧风电场改造升级国家政策明确, 地方政策逐步落地, 外部环境向好。已顺利实施改造的老旧风电场的先进经验包括积极与主管部门沟通, 充分享受政策红利、原风电场设备充分利旧, 有效降低建设成本、因地制宜制定技术方案, 实现建设成本降低等。但是目前大规模的改造升级仍然面临新能源消纳问题突出、增容改造难度大、电价不确定性增加、资产回收路径不完善等显著问题。[结论] 为了进一步提升老旧风电场改造升级效益, 行业仍需重点关注改造项目边界条件对政策的适用性、风电机组选型、风电场最优化布局、老旧风电场改造环境效益以及合理财务评价方法的选择等多个关键方向, 推进老旧风电场健康、绿色、高效地改造升级。

关键词: 老旧风电场; 改造升级; 风电场技术; 环境效益; 财务评价

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-276

文章编号: 2095-8676(2025)02-0058-13

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-276

中图分类号: TK89; TM614



论文二维码

Progress and Key Technology Prospects in the Renovation and Upgrading of Old Wind Farms

XU Yang[✉], CAI Anmin, ZHANG Liying, JIA Rong

(China Huaneng Group Clean Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] The renovation and upgrading of old wind farms through "replacing small with large", fully tapping into the value of existing wind and land resources, and improving the efficiency of existing wind farms, is an important guarantee for promoting the development of new energy and achieving the "3060" carbon peaking and carbon neutrality goals. [Method] This article provided an overview of the current status of wind farm renovation and upgrading, investigated the policy situation, conducted research and analysis on typical renovation and upgrading projects, and summarized the experience and existing problems of current progress. [Result] The national policies for the renovation and upgrading of old wind farms are clear, local policies are gradually being implemented, and the external environment is improving. The advanced experience of successfully renovated old wind farms includes actively communicating with regulatory authorities, fully benefiting from policy dividends, fully utilizing old wind farm equipment, effectively reducing construction costs, developing technical solutions tailored to local conditions, and achieving cost reduction. However, large-scale renovation and upgrading still face significant problems such as prominent new energy consumption issues, difficulty in capacity expansion and renovation, increased uncertainty in electricity prices, and incomplete asset recovery paths. [Conclusion] To further enhance the efficiency of the renovation and upgrading of old wind farms, the industry still need to focus on the applicability of policy to the boundary conditions of renovation projects, selection of wind turbines, optimal layout of wind farms, consideration of environmental

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2024-09-20 网络首发日期: 2024-11-07

基金项目: 中国华能集团科技项目“风电机组叶片除冰关键技术研究与应用”(HNKJ22-H101)

benefits of renovation of old wind farms and selection of reasonable financial evaluation methods, among other key directions, to promote the healthy, green and efficient the renovation and upgrading of old wind farms.

Key words: old wind farms; renovation and upgrading; wind farm technology; environmental benefits; financial evaluation

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

我国风电发展迅速, 老旧风电场存量巨大。如图 1 所示, 截至 2023 年底, 我国风电累计装机容量达到 0.441 TW, 其中运行超过 15 a 的容量占比达到 12 GW。2020 年 9 月 22 日举行的联合国大会上, 习近平主席承诺中国将在 2030 年前实现碳排放达峰, 并在 2060 年前实现碳中和。同年, 习近平总书记在气候雄心峰会上强调, 到 2030 年, 全国风电、太阳能发电总装机容量将达到 1.2 TW 以上, 这对新增风电开发规模提出了巨大的需求与挑战^[1]。“3060”目标提出后, 风电发展迎来了又一个黄金期。随着开发时序的不断推进, 存量风电场的规模逐渐增大。根据相关统计数据, 截至“十四五”末, 我国陆上风电运行年限超 15 a 的装机规模为 30.044 GW; 到“十五五”末, 该规模将达到 97.514 GW。

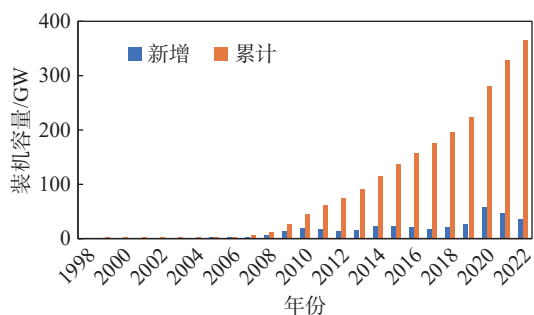


图 1 历年来我国风电装机情况

Fig. 1 Wind power installed capacity in China

存量老旧风电场风资源好, 但运行效益低。早期建设的风电场均处于资源较好的区域, 多集中在 I~III 类资源区。但早期的风场建设时间早, 风资源评估技术水平相对较低, 机组容量小、运行时间较长, 设备老化现象严重, 导致这类风场机组发电效率低、故障率高等问题显著, 现有的运行效益较低。老旧风电场主要存在以下典型问题:

1) 微观选址精度欠缺。早期风资源评估软件的精度、准确度较低, 部分风电场、部分机位点由于微

观选址的原因, 长期处于低效发电状态, 严重影响机组的发电效益。

2) 部分老旧风电场设备故障增多。部分老旧风电场出现批量性设备问题, 安全风险及运维成本增大, 运行安全隐患逐年增加, 维修成本大幅增加。

3) 早期采用进口机型的老旧风电场运维压力大。进口机组风机备品备件均需国外进口, 采购难度大, 供货周期和资金投入压力大。

4) 老旧风电场设备普遍风能利用效率低下。多数风电场在运行 15 a 以后, 由于原有设备风能利用效率低下、故障频发, 发电小时数普遍偏低, 实际利用小时多在 1000 ~ 1600 h 之间, 远低于一类、二类、三类资源区全生命周期合理发电小时数(分别为 2400 h、2200 h、2000 h)。

对老旧风电场实施“以大代小”改造升级, 充分发挥存量风资源和土地资源价值, 提升存量风场效益, 是推动新能源发展, 实现“3060”目标的重要保障。

文章首先对风电场改造升级现状进行综述, 包括政策现状的总结以及典型改造升级项目工程项目的调研和总结, 对现有进展的经验和存在问题进行总结。同时, 针对老旧风电场改造升级工作中存在的关键科学技术问题进行调研与总结, 指出促进老旧风电场改造升级健康、绿色、高效发展的有效途径。

1 改造升级政策现状

1.1 国家政策

如图 2^[2]所示, 自 2020 年以来, 国家相关主管部门陆续发布政策, 为老旧风电场改造的技术水平、经济性提供了政策依据和保障。

2021 年 2 月 26 日, 国家能源局发布关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知, 鼓励启动老旧风电项目技改升级。遵循企业自愿原则, 鼓励业主单位通过技改、置换等方式, 重点开展单机容量小于 1.5 MW 的风电机组技改升级。鼓励地方开展试点, 在试点基础上, 国家出台政策, 地方制定具

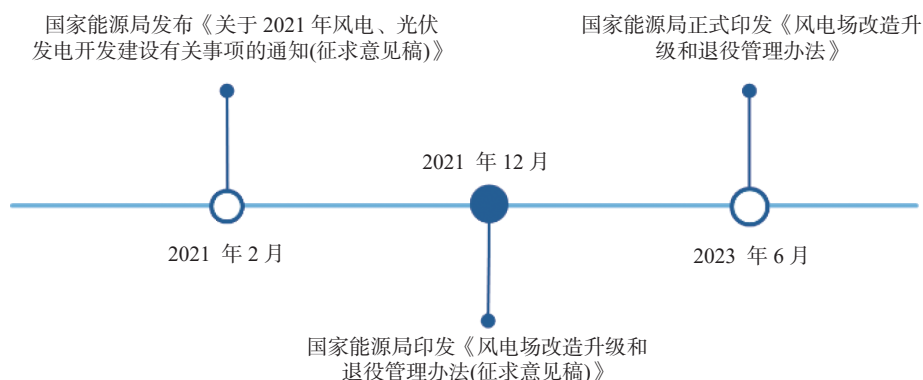


图 2 国家层面老旧风电场改造升级相关政策^[2]

Fig. 2 National policies related to the renovation and upgrading of old wind farms^[2]

体细则并组织实施,促进风电产业提质增效和循环发展。

2023年6月,《风电场改造升级和退役管理办法》(以下简称《办法》)正式印发。《办法》鼓励并网运行超过15a或单机容量小于1.5MW的风电场开展改造升级和退役,“风电场改造升级”是指对风电场风电机组进行“以大代小”,对配套升压变电站、场内集电线路等设施进行更换或技术改造升级。《办法》对老旧风电场升级改造过程中涉及的组织管理、电网接入、用地保障、生态环保、财政补贴、上网电价、循环利用和处置等多个环节管理要求进行了说明。首先,在改造对象方面,《办法》正式文件明确了鼓励并网运行超过15a或单台机组小于1.5MW的风电场开展改造升级和退役,将单台机组小于1.5MW的小容量机组也纳入优先改造的范围。在指标批复方面,办法也明确了各级能源主管部门对项目核准的管理方案,强调了在涉及并网、补贴等方面要充分征求电网以及同级相关部门意见。在接入系统等支撑手续办理方面,《办法》规定无论是等容改造还是增容改造,均需重新办理接入系统意见、变更电力业务许可证,并且均需重新办理环评、水保手续。在用地保障方面,针对原则上不进行改造升级的区域,在自然保护地的基础上,新增了生态保护红线这一项,这对改造风电场的用地设置了一定的限制。

1.2 地方政策

自2020年以来,辽宁、山西、宁夏等省份、自治区也陆续发布政策,进一步明确了老旧风电场改造地方性实施方针和细则。

近年来,陆续9个地区出台风电场升级改造相关政策(表1)。一方面,各地区政策的详细程度有所

差异,宁夏、辽宁等地区政策相对较为具体,可操作性强,对项目落地较为有益;而内蒙古自治区等其他地区,则处于初步的探索阶段,虽然有政策支持,但是具体的执行路线不明确,这将给后续工作推动带来一定的难度。另一方面,上述政策均在正式《办法》发布前制定,考虑到最新的正式版《办法》文件,部分细则与征求意见稿有所出入,因此在后续的具体操作执行上,仍需地方主管部门根据最新的国家政策文件进行统筹安排。

2 改造升级项目进展

2.1 开展项目概况

截至2023年底,全国范围内已经开展实施“以大代小”项目共计19项,改造后总容量1.27GW。典型等容和增容项目改造容量如图3所示。对部分国内已开展改造的典型风电场进行现场调研,主要关注项目改造前后风电机组选型的变化、风电场容量的变化、改造前后项目电价的变化、项目造价、项目收益率以及项目改造场内利旧情况和废旧资产处置情况。以辽宁某风场A为例,A风电场一期工程为12台丹麦Vestas公司V52-850kW风电机组,二期工程为17台西班牙Gamesa公司G52-850kW风电机组,合计58台850kW风机,总装机容量为48MW。改造重新履行环评和水保手续,经项目当地发改部门核准批复。改造技术方案为拆除原有场内所有机组,采用12台4MW机组进行等容替换改造。拆除老旧机组进行报废处理,原有风机基础进行爆破处理,并在原有机位点进行新基础的重建。叶片委托第三方企业采用物理破碎的方式进行无害化回收。改造前项目所发电量执行电价0.61元/kWh,改造后

表 1 各地区老旧风电场改造升级相关政策

Tab. 1 Relevant policies for the renovation and upgrading of old wind farms in various regions

时间	地区	文件	政策内容
2020年	辽宁省	《辽宁省风电项目建设方案》 ^[3]	对已经由能源主管部门核准(审批)同意的项目,且并入电网运行多年的风电场,由于机组服役寿命、质量、效率、安全、经济等原因,项目业主可申请一次性解列拆除全部旧机组,并在原址实施机组等容量更新建设。
2021年	山西省	《关于下达2021年风电技改扩容项目建设方案的通知》 ^[4]	大同、朔州、忻州深挖本区域投产运行5 a以上风电场潜能。在运行5 a以上的风电项目在原场址内技改升级置换及扩容,需要利用原有升压站和送出线路,技改扩容规模上限为送出线路最大容量。
2021年6月	浙江省	《浙江省社会发展“十四五”规划》 ^[5]	拓展光伏、风电等设备监理、维护、修理、运行、升级改造等全生命周期服务。
2021年7月	河北省	《关于抓紧开展百万千瓦风电基地规划编制的通知》 ^[6]	通过老旧风电机组置换、技改和新风机加密等措施推动风电场增容提效探索出台老旧风场增容提效改造相关征地手续、电网接入等方面支持政策,鼓励落实土地、电网等建设条件的风电场增容提效项目优先列入风电基地规划。
2021年8月	宁夏回族自治区	《关于开展宁夏老旧风电场“以大代小”更新试点的通知》 ^[7]	针对全区并网运行时间较长、单机容量在1.5 MW及以下、连续多年利用小时数低下、存在安全隐患的项目。开发企业可根据项目实际情况和企业发展需求选择“等容更新”模式或“等容更新+增容”开展相关试点工作。鼓励研究建立老旧风电场回收再利用机制,培育风机制造、使用、回收再利用的完整产业链。探索叶片、舱罩的玻璃纤维等特殊废弃材料的循环利用方式和废旧高分子材料资源化有效途径,推动风电产业循环发展。同年12月,宁夏发布《宁夏老旧风电场“以大代小”试点项目名单》,确定更新试点项目51个,包括等容项目2.1952 GW,增容项目2.5757 GW,总计4.7709 GW。
2022年3月	内蒙古自治区	《内蒙古自治区“十四五”可再生能源发展规划》 ^[8]	有序推动风电机组退役。推动达到设计年限的风电机组实施退役,加快淘汰落后产能,对15 a以上的老旧风电场,进行安全性评估,开展老旧机组退役示范,推进叶片、发动机、轴承、齿轮箱、塔架回收循环利用试点。
2022年3月	江西省	《江西省“十四五”能源发展规划》 ^[9]	鼓励业主单位通过技改、置换等方式实施老旧风场技术改造升级,重点开展单机容量小于1.5 MW的风机技改升级。
2022年5月	湖南省	《湖南省“十四五”可再生能源发展规划》 ^[10]	提出开展老旧风电场风力发电设备“以大代小”退役改造,因地制宜推进易覆冰风电场抗冰改造,提升装机容量、风能利用效率和风电场经济性。
2022年8月	重庆市	《关于“十四五”能源规划任务分解实施方案的通知》 ^[11]	要求启动一批以实现碳中和为目标的可再生能源项目试点示范。开展风电场技改扩容“退旧换新”大容量高效率机组,提高风电发电效率。

执行电价 0.3444 元/kWh。工程单位千瓦造价约 5520 元/kW。改造前风场年等效发电小时数为 1188 h,改造后年等效利用小时数约为 3000 h。

通过实地调研辽宁、广东、重庆、宁夏 4 个区域的不同风电场,获得各改造项目的关键信息,为了更好地进行比较,具体项目指标对比如表 2 所示。

2.2 改造风场经验

2.2.1 积极与主管部门沟通,充分享受政策红利

除宁夏回族自治区下发明确地方性改造升级通知并已列出试点项目,其他地区已改造的项目均是在国家或地方政策框架的基础上,积极主动与地方政府沟通,从而获得项目改造的备案或核准许可。老旧风电场项目有很大一部分均是处于亏损或亏损的边缘,尽早争取到改造的指标,在机组技术水平提升的基础上,更可以一定程度享受补贴电价的红利,

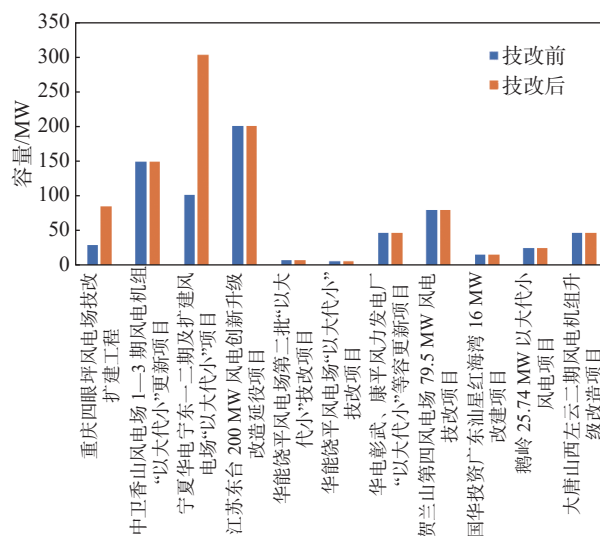


图 3 国内“以大代小”项目

Fig. 3 The "Replacing Small with Large" project in China

表 2 国内“以大代小”典型项目调研信息汇总

Tab. 2 Summary of research information on the "Replacing Small with Large" typical projects in China

项目名称	A	B	C	D
项目地点	辽宁省	广东省	重庆市	宁夏回族自治区
原容量/MW	48	4.5	46.75	102
原机型	12台Vestas V52-850 kW, 17台西班牙Gamesa G52-850 kW风电机组	2台单机容量750 kW 机组和4台单机容量 750 kW机组	55台H56-850型风电机组	68台华创1.5 MW机组
原发电小时数/h	1188	1581	1713	1200
原执行电价/(元·kWh ⁻¹)	0.61	0.61	0.61	一期0.56, 二期0.58
改造后容量/MW	48	16.5	85.6	300
改造后机组机型	12台4 MW 机组	3台4 MW、 1台4.5 MW机组	4台5 MW机组、11台4 MW机组 和6台3.6 MW机组	等容部分采用11台6.25 MW、 5台6.7 MW机组; 增容部分采 用30台6.7 MW机组
改造后发电小时数/h	可研2931, 实际等效小时数 超出可研水平3%~4%	第一批改造后3272	2440	~2400(未滿1 a, 无准确 数据)
改造后执行电价/(元·kWh ⁻¹)	执行燃煤标杆电价 0.3444	执行补贴电价 0.61	等容部分执行原电价0.61(全部电量享 受); 增容部分通过竞配后确定电价为 0.5(全部电量享受)	等容部分: 一期0.56, 二期0.58; 增容部分: 0.2595 (标杆电价)
批准立项部门	地方发改委	广东省工信厅	重庆市发改委	宁夏自治区发改委
单位千瓦造价/(元·kW ⁻¹)	~5520	第一批约4875, 第二批约4611	4088	—
改造收益率情况	资本金内部收益率为8.5%	第一批改造全投资税 前收益率为20%	全投资税前收益率为17.6%	—
场内利旧情况	无利旧	集电线路利旧、场站 道路在原有基础上 进行利旧	等容改造部分, 升压站电气一次均未作 改动, 升压站电气二次基本全部更换	一、二期改造35 kV集电线路 全部更换, 电气一次开关柜 均更换, 其他设备未更换
退役资产处置情况	按废旧物资处理, 进行拆除及处置	第一批改造拆除的2 台机组采用资产减值 入库做备件; 第二批 改造的4台机组进行 资产报废	退役机组保留部分大部件(9台)作为备 品备件, 35台电气小元器件保留作为备 品备件, 备品备件进行资产报废后再按 照其残值重新进行入库, 按流动资产管 理, 其余资产报废后挂网拍卖	走报废流程后处置拍卖

注: “—”为调研未获得数据。

尽早改善风电场的经营状况。此外, 本次调研的项目中, 宁夏 D 风电场争取到税收优惠, 增容改造部分作为新项目享受所得税三免三减半优惠政策, 很大程度提升了项目的经济性。

2.2.2 原风电场设备充分利旧, 有效降低建设成本

已开展实施以大代小的风电场在集电线路、升压站电气设备等场内设施均有不同程度的利旧。一方面, 对原场站设备进行利旧可以实现原有资产的充分有效利用, 减少资产报废损失; 另一方面, 也可以降低改造项目的投资, 提升改造项目的经济性。值得注意的是, 对原厂站设备是否进行利旧、利旧的程度暂时无统一的标准, 需根据各场站初期建设情况以及实际运行情况结合, 以安全性为原则, 综合考

虑设备的寿命、故障率, 在改造前对改造风场进行设备状况摸底, 结合生产运行人员的反馈意见, 以确定最终原场站设备的利旧情况。

2.2.3 因地制宜制定技术方案, 实现建设成本降低

已开展实施改造升级的风场既有山地风场, 也有平原风场。不同的地形, 设备运输、吊装等工程施工条件限制均有很大的不同。比如, 对于 B 风电场, 为了规避技改项目塔筒在山地道路运输的制约性, 第二批技改实施时将塔筒由第一批“以大代小”技改项目 4 节塔筒改成五节塔筒, 每节塔筒控制在 20 m 以内, 减少道路拓宽所需要费用和提提高大件运输安全性。此外, 为最小程度减少平台施工的环境破坏以及解决风电场原有小容量机组平台较小制约机组

吊装问题,使用陆上风机单叶片吊装技术,最低程度进行平台拓宽,减少植被破坏,大大节约吊装平台面积减少租地费用,同时为后续受平台限制的风机机位选址、机型选择以及吊装方式提供有力借鉴。

2.3 存在挑战难点

老旧风电场改造升级拥有利好政策、较大市场需求等有利条件,但同时,也面临一定的挑战和难点。

2.3.1 新能源消纳问题突出,增容改造难度大

从2022年各地区风电利用情况来看,全国平均风电利用率96.8%^[12]。海南、云南、广东等地的风电利用率最高,达到100%、99.9%和99.9%,而三北地区风电利用率普遍偏低。国内老旧风场存量较多在内蒙、河北等华北区域以及黑龙江、吉林、辽宁等东北区域。老旧风电场存量较多的蒙西、蒙东、吉林等地区,2022年风电利用率仅有92.9%、90%、95.2%,分别较全国平均水平低3.9%、6.8%、1.6%,面临严峻的消纳问题。根据调研信息,上述已开展以大代小风电场中,位于重庆、广东的风电场,由于消纳条件好,暂不存在弃风情况。而位于宁夏的风电场,限电量约为2%。整体而言,无论等容改造带来发电量增加或是增容改造带来装机容量的增加,均会加剧消纳矛盾,这给老旧风场改造升级,特别是进行增容改造带来了一定的阻力。

2.3.2 电力市场建设加快,电价不确定性增加

随着我国电力市场建设日益完善,电力现货交易是大势所趋。2023年上半年,全国各电力交易中心累计组织完成市场化交易电量2650.1TWh,同比增长6.7%,占全社会用电量比重达61.5%^[13]。根据2022年统计数据,现货试点地区中,现货价格最高的是蒙西,而最低的是甘肃。但从最能反映新能源主体收益的结算均价来看,蒙西反而在4个新能源现货试点中居于末席,反而是现货均价仅倒数第二低的山东新能源能获得最高的结算均价。可见,面临的现货规则、竞争环境和自身交易能力都将会影响新能源在现货中的收益,而这也给老旧风电场改造升级的经济性带来很大的不确定因素。此外,国家发展改革委、国家能源局于2023年11月8日联合印发《关于建立煤电容量电价机制的通知》^[14],决定自2024年1月1日起,建立煤电容量电价机制。建立煤电容量电价机制主要是电价结构的调整,煤电总体价格水平是基本稳定的,特别是电量电价小幅

下降,将可能带动新能源等其他电源参与市场交易部分电量电价随之下行,这也进一步增加了新能源电价的不确定性。

2.3.3 固废处置路径不清晰,缺乏标准化管理

风电场升级改造产生的退役老旧资产从利用价值来分类,主要包括2大类:有价值可回收的资产和需要相应处理的固体废弃物。对于原有的老旧风机、箱变等有价值可回收的资产,多采用备件回收、闲置资产内部调配、资产报废后评估交易等方式进行处理;对于风机叶片、机舱罩等以纤维增强树脂复合材料为主的部件需要进行无害化处理,且这类固体废弃物的处理对行业可持续发展具有较大的影响,是影响行业发展的重要技术瓶颈。经过对多家项目单位的调研,目前均反映废旧资产处置是一项比较棘手的问题,其涉及的资产处置的合规性、额度较大的资产减值问题、以及资产评估技术的准确性等问题,均给目前大规模开展升级改造以及退役资产处置带来了阻力。

3 关键研究方向及展望

老旧风电场改造升级不仅是工程问题,更涉及多学科的关键科学问题。影响老旧风电场改造升级效益的关键因素包括增容倍数、年提升利用小时数、电价及补贴、建设投资、税收优惠、改造期间发电量损失、运营成本等,涵盖了政策、技术、财务、环境效益等多个方面。针对老旧风电场改造升级的议题在较早的时候便已被提出,国内外也已进行了一定的研究。根据文献调研,德国、西班牙、意大利等欧洲国家以及印度、美国、巴西等均已对老旧风电场再发电进行了深入的研究探讨,主要关注政策支持^[15-17]、风电场技术^[18-28]、环境效益^[29-33]、物资退役处理^[34-39]等因素对老旧风场改造升级效益影响的研究^[40-48]。

3.1 政策

Serri等^[15]开展了一项关于评估意大利风力发电潜力的研究活动。这项工作的主要目标是了解2020年将达到寿命末期的风电容量的数量、特征和地理分布,并制定改造升级方案,评估其技术经济可持续性。结果显示,考虑到通过改造升级重新供电增加风能生产的总体效益,应采取特殊措施(年容量配额、上网电价补贴、授权流程简化)推动这类措施,以最大化利用现有风电场址。Tang等^[16]采用了系

统动力学方法,提出了整合扩容/退役等策略以及电力生产中的随机性和季节性因素等的模型。研究发现,可再生能源的发展可能会引发电价下降;可再生能源可能会导致核能淘汰,从而在生物质非碳中和燃料的背景下导致碳排放升高。可再生能源增大电价波动,未来能源市场调度系统至关重要。持续增加配额的决策不一定有利于可再生能源的长远发展。Bona 等^[17]结合巴西的实际情况,对影响改造升级的关键边界条件进行了分析。模型结果显示,电价补贴是影响经济性指标的非常重要的因素;在电价下降的情况下,改造将更具吸引力;风力机组的性能和能源销售价格是评价重新供电是否可行的重要因素。

钟财富等^[18]对我国风电机组退役改造置换的需求进行了分析,并提出相应的政策建议,对提前退役和到期正常退役、提前改造置换拆旧换新、正常退役换新、延期退役分别给出针对性建议,以完善项目管理,提升改造效益。

风电场改造升级既有新建项目的特点,又有技改项目的特点。项目边界条件众多,政策的影响对项目改造收益的影响巨大,因此,相关机构、部门宜因地制宜,研究制定有助于推动行业健康发展的产业政策。同时,改造升级风电场应当准确评估风电场边界条件,选择合适的改造策略和改造方案。

3.2 风电场技术

风力发电机组的选型对改造效益有直接影响。Bona 等^[17]分析了风力发电机组的技术进步如何影响发电量。结果显示,在所研究的风场中,将 0.5 MW 的风机换成 2 MW,轮毂高度为 100 m 的风机效果最好;同等轮毂高度下,3 MW 机组不一定比 2 MW 机组性能好;Grau 等^[19]评估了德国在 2021—2040 年的再发电潜力。它估计了在不违反最近重新制定的地理限制的情况下,德国有多少现有风力发电机组场地可用于重新供电,同时满足重新供电风力发电机组的适当间距标准。结果显示,德国的再发电潜力受到重新规划的地理限制和用于再发电的风力发电机组类别的影响。与 2021 年基准年陆上风电提供的能源相比,最佳情况下可提供 110%。Syed 等^[20]讨论了在上游风电场尾流影响下陆上风电场部分改造升级策略。采用具有风电场参数化的中尺度天气预报(Weather Research & Forecasting, WRF)模型来评估单个风力发电机组观测到的风速和功率损失。

在 61.5 m 和 100 m 的新轮毂高度下评估了功率输出和风切变剖面,并将结果与 80 m 的现有轮毂高度风力发电机组进行了比较。与现有情况相比,61.5 m 的较低轮毂高度下的功率输出降低了 12%,而 100 m 轮毂高度的情况下则增加了约 13.6%。从研究结果来看,采用不同轮毂高度的风机,受评估风电场的整体风力发电量平均增加 7.5%。结果进一步验证了通过改变风机的轮毂高度进行混排,以改变受尾流影响的范围和程度,可以一定程度增加全场功率输出,如图 4^[21]所示。此外,风电场改造升级后的发电量会受到周边已有风电场(尤其是主风向上游风电场)的影响;同时,改造后的风电场也会对周边风电场,尤其是处于主风向向下风向的风电场带来发电量的影响。因此,在开展改造时,要对改造升级后与周边邻近风电场的相互影响进行综合评价。

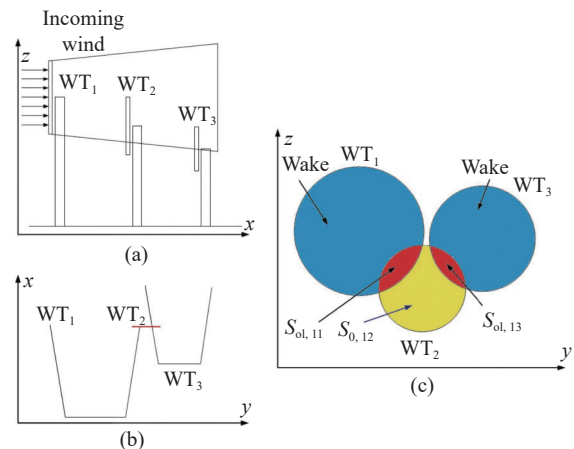


图 4 不同轮毂高度风机混排尾流影响示意图^[21]

Fig. 4 Schematic diagram of the influence of mixed exhaust flow of fans with different hub heights^[21]

对原有风电场关键部件的再利用是降低建设投资的有效手段。除了已有部分工程项目在优化设计的基础上,实现集电线路和升压站部分设备的利旧外,风机基础设计使用寿命约为 50 a,经过合理的计算与设计加固,可满足风电场升级改造的要求。目前,工程案例中已有个别采用该方案的项目,但是该领域的研究目前还尚未得到有效跟进。在风机基础加固的研究方面,文献 [22-29]借助于有限元计算工具提出预应力加固法、环梁加固法、夹板连接加固法等方法实现风机基础的加固,并且部分得到了工程示范应用。相关的方法有望进一步延伸拓展至风电场升级改造的案例中研究和应用。

3.3 环境效益

White 等^[30] 比较了火电站、风电、核电站的 CO₂ 排放量, 当使用适当的核算方法时, 核设施和风能设施计算出的 CO₂ 排放量为 8 ~ 17 t/GW_eh, 远小于燃煤电站的 974 t/GW_eh。Martinez 等^[31] 研究了风电场改造升级对环境的影响和效益(图 5^[31])。通过对改造升级全生命周期建模评价, 研究发现变电站和集电线路对陆地生态毒性的影响最大; 折合成当量 CO₂ 排放, 改造升级过程影响 CO₂ 排放增加最主要的部件为风机, 其次为集电线路; 但以上影响均不及由于新增发电量所带来的 CO₂ 减排。整体来讲, 风电场改造升级是一项有助于实现碳减排的举措。

国内学者关于风电场建设以及改造升级对生态环境影响也进行了较为深入的研究。高扬等^[32] 对某海上风电场建站前、工程期和运营期对海洋生态环境的影响进行了研究, 对水质变化、沉积物质量变化、生物质量变化等进行了分析, 结果表明风电工程对海洋生态环境的不利影响主要出现在工程期, 施工结束后这些不利影响会逐渐减弱或消失。周江玲^[33] 集中对 3 个陆上风电场和 2 个海上风电场构建了生命周期评价模型, 分析海-陆风电开发的环境影响。整体来说, 相比于陆上风电场, 海上风电场由于基础设施复杂, 产生的生态环境影响较大; 但无论是海上风电场还是陆上风电场, 采用单机容量更大的风机均有助于优化其系统环境表现。

老旧风机关键零部件的处理, 尤其是叶片等关键材料的处理, 是影响行业循环持续发展的关键。目前对复合材料的回收方式主要有机械回收、热回收和化学回收 3 种主要方式^[34-37]。

如图 6^[34] 所示, 机械回收方法是将复合材料进行破碎, 然后再进一步研磨成粉末状, 并进一步应用到下游产品生产制造中。热回收法是将嵌入的纤维通过热处理从交联的聚合物基体中释放出来, 从而将复合材料分解为基体和增强成分, 并将其转化为有用产品。化学回收是指聚合物通过化学反应转化为可溶性低分子量产物的过程。机械回收尽管不会产生任何有害物质, 但是会破坏纤维的机械性能; 而化学回收和热回收可以更好地保留材料的性能, 但是化学回收方法需要进行高温处理, 消耗更多的能量, 同时化学回收过程中会使用溶剂, 因此会对环境和生态系统产生负面影响(表 3)。更合理的处理方

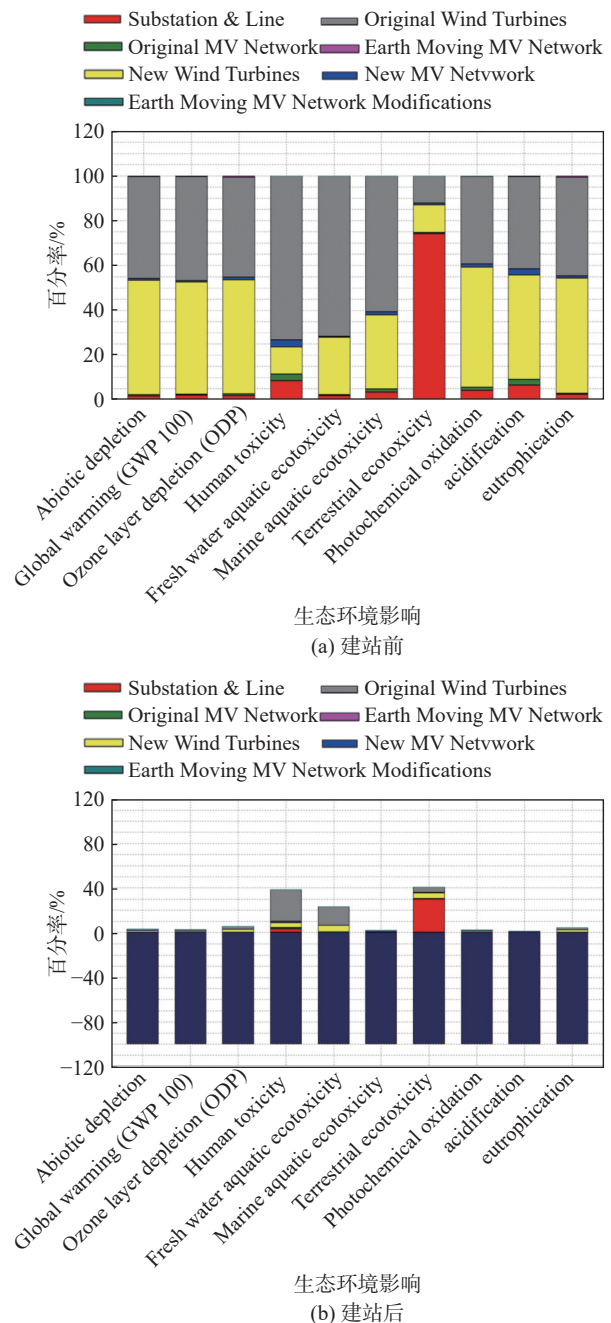


图 5 改造升级风电场的环境影响^[31]

Fig. 5 Environmental impact of wind farm renovation and upgrading^[31]

式或者更好的处理模式仍需要进行进一步的探索和研究。一方面需要进一步研究热固性复合材料废弃物处理技术, 以降低成本和提高回收效率, 让回收过程绿色无污染, 同时为回收产品的再利用寻找工业化道路; 另一方面, 开发可再生、可降解且可循环使用的新型风电叶片材料, 比如热塑性复合材料、混杂复合材料、天然纤维复合材料和纳米复合材料等, 从

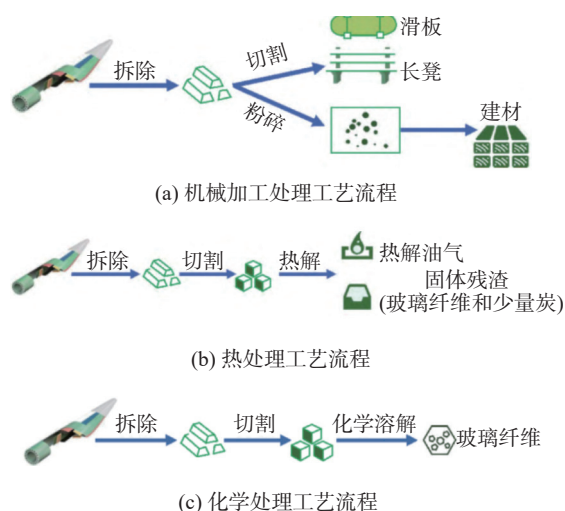


图 6 叶片回收处置典型技术路线^[34]

Fig. 6 Typical technical route for blade recycling and disposal^[34]

表 3 主要叶片处理方式及优缺点

Tab. 3 Main blade treatment methods and their advantages and disadvantages

处理方法	优点	缺点
机械回收	工艺简单;无有害气体;可工业化	纤维性能损失严重,回收物市场价值低
热回收	回收纤维机械性能损失较小;可工业化	碳纤维的纯度较低,产生一定有害气体
化学回收	处理能力强;碳纤维纯度较高,回收纤维的机械性能损失小	化学试剂成本高,难以工业化

制造端解决叶片回收处置的难题,是未来一项关键的研究方向。

3.4 财务评价方法

在进行老旧风电场改造升级经济性评价时,采用不同的测算方法会得到不同的收益预测结果。由于项目边界条件众多并复杂,目前尚无统一的评价方法^[49-53]。吴宪等^[49]分析比较了“增量法”、“简化后的新建项目法”在判断改造项目经济性的特点,并补充“统一净现值法”用以衡量不同改造时点对改造收益的影响,从而判断最优改造时点。杜文珍等^[50]讨论了账面价值法、资产重新估值法、收入成本增量法在老旧风电场改造中的应用。杜丽娟等^[52]采用增量法对老旧风电场以大代小改造时间节点进行了分析。在不同的研究中,对采用的计算方法有不同的命名,但整体可分为 2 类:(1)将原项目资产计入为新项目的投资,进而对新项目的经济性进行评价,即“总量法”。“总量法”的优点是能够显示其

绝对效果,但是计算较为复杂,需要对原项目的资产进行估值,资产估价工作的实际难度较大;(2)方法为计算技改新增投资带来的新增收益,即“增量法”。“增量法”的优点是计算结果能直接反映项目改造的决策是否合理,且由于不涉及原项目的资产估值,计算相对简便;缺点是只能判断该项目是否需要改造,无法判断原项目决策的合理性。一方面,由于目前改造升级项目尚未大规模开展,财务评价方法行业内尚未形成统一的标准;另一方面,在实际的使用中,宜根据项目的特点和投资决策的需求对不同的方法进行灵活组合应用,以达到科学决策的目的。

4 结论

老旧风电场改造升级国家政策明确,地方政策逐步落地,外部环境向好。本文对国内已开展改造的典型风电场进行案例调研,结果显示目前老旧风电场改造的先进经验包括积极与主管部门沟通,充分享受政策红利、原风电场设备充分利旧,因地制宜制定技术方案,实现建设成本降低等,但是目前大规模的改造升级仍然面临新能源消纳问题突出、增容改造难度大、电价不确定性增加、资产回收路径不完善等显著问题。为进一步提升老旧风电场改造升级效益,仍需重点关注以下问题:

1) 关键政策的研究、制定和运用。区域电力网允许的风电场增容倍数、电价及补贴、税收优惠等政策边界条件直接影响项目的收益,对改造升级产业的推进规模和推进速度具有重要影响。

2) 风电机组选型以及风电场的最优化布局。风机设备进入大型化、智能化、定制化的发展方向,机组选型需结合资源条件和技术发展趋势,开展多机型、多目标、多方案的比选优化;同时,根据风场的实际边界条件,适当考虑全局最优的混排方案,最大程度提升改造风电场效益。

3) 风电场改造升级环境效益分析。对退役资产的利旧与回收有助于实现资源循环利用,寻找合适的途径,最大化利用退役资产。此外,对玻璃纤维复合材料等较难处理的固体废弃物,应持续研究高值回收利用方法,实现绿色可持续的退役。

4) 财务评价方法的选择。目前,老旧风场改造升级的财务评价方法行业内尚未形成统一的标准,在实际使用中,应兼顾各类方法评价的科学性,

同时综合考虑已有案例的经验,以达到科学决策的目的。

参考文献:

- [1] 习近平. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议 [EB/OL]. (2021-03-15) [2024-06-21]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
XI J P. Xi Jinping presided over the ninth meeting of the Central Financial Leading Group [EB/OL]. (2021-03-15) [2024-06-21]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
- [2] 国家能源局. 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 国能发新能规〔2023〕45号 [EB/OL]. (2023-06-05) [2024-05-28]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-06/05/c_1310726993.htm.
National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on issuing the management measures for wind farm transformation, upgrading, and retirement, national energy development new energy regulations [2023]. No. 45 [EB/OL]. (2023-06-05) [2024-05-28]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-06/05/c_1310726993.htm.
- [3] 佚名. 关于印发《辽宁省风电项目建设方案》《辽宁省光伏发电项目建设方案》的通知 辽发改能源〔2020〕253号 [EB/OL]. (2020-05-15) [2024-05-28]. <http://www.21spv.com/news/show.php?itemid=70029>.
Anon. Notice on issuing the construction plans for wind power projects and photovoltaic power generation projects in Liaoning Province, Liaoning development and reform commission energy [2020] No. 253 [EB/OL]. (2020-05-15) [2024-05-28]. <http://www.21spv.com/news/show.php?itemid=70029>.
- [4] 浙江省发展和改革委员会. 《浙江省社会发展“十四五”规划》浙发改规划〔2021〕87号 [EB/OL]. (2021-04-22) [2024-06-18]. https://www.zj.gov.cn/art/2021/4/22/art_1229203592_2270227.html.
Zhejiang Provincial Development and Reform Commission. The 14th five year plan for social development in Zhejiang Province, Zhejiang development and reform commission plan [2021] No. 87 [EB/OL]. (2021-04-22) [2024-06-18]. https://www.zj.gov.cn/art/2021/4/22/art_1229203592_2270227.html.
- [5] 山西省能源局. 《关于下达2021年风电技改扩容项目建设方案的通知》晋能源新能发〔2021〕135号 [EB/OL]. (2021-10-20) [2024-06-18]. https://zwgk.sxxz.gov.cn/szfgzbm/smtgyj/bmwj_3852/202111/t20211101_3696456.shtml.
Shanxi Provincial Energy Administration. Notice on issuing the construction plan for wind power technical renovation and expansion projects in 2021, Jin energy new energy development [2021] No. 135 [EB/OL]. (2021-10-20) [2024-06-18]. https://zwgk.sxxz.gov.cn/szfgzbm/smtgyj/bmwj_3852/202111/t20211101_3696456.shtml.
- [6] 河北省发改委. 关于抓紧开展百万千瓦风电基地规划编制的通知 [EB/OL]. (2021-07-21) [2024-06-20]. https://hbdrc.hebei.gov.cn/nsjg/snyj/xnyc/gzdt_886/202309/t20230906_76088.html.
Hebei Provincial Development and Reform Commission. Notice on urgently carrying out the planning and compilation of million kilowatt wind power bases [EB/OL]. (2021-07-21) [2024-06-20]. https://hbdrc.hebei.gov.cn/nsjg/snyj/xnyc/gzdt_886/202309/t20230906_76088.html.
- [7] 宁夏回族自治区发展改革委. 自治区发展改革委关于开展宁夏老旧风电场“以大代小”更新试点的通知 宁发改能源(发)〔2021〕601号 [EB/OL]. (2021-08-30) [2024-06-20]. https://fzggw.nx.gov.cn/tzgg/202108/t20210830_2996881.html.
Ningxia Hui Autonomous Region Development and Reform Commission. Notice of the development and reform commission of the autonomous region on launching the pilot program of "replacing small with large" renewal of old wind farms in Ningxia, Ningfa Gai energy (development) [2021] No. 601 [EB/OL]. (2021-08-30) [2024-06-20]. https://fzggw.nx.gov.cn/tzgg/202108/t20210830_2996881.html.
- [8] 内蒙古自治区能源局. 内蒙古自治区能源局关于印发《内蒙古自治区“十四五”可再生能源发展规划》的通知 内能新能字〔2022〕103号 [EB/OL]. (2022-03-03) [2024-06-20]. https://nyj.nmg.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/fdzdgnr/tzgg_16482/tz_16483/202203/t20220303_2012218.html.
Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau. Notice of Inner Mongolia Autonomous Region Energy Bureau on issuing the "14th five year plan for the development of renewable energy in Inner Mongolia Autonomous Region", Neining Xinneng Zi [2022] No. 103 [EB/OL]. (2022-03-03) [2024-06-20]. https://nyj.nmg.gov.cn/zwgk/zfxxgkzl/fdzdgnr/tzgg_16482/tz_16483/202203/t20220303_2012218.html.
- [9] 江西省政府办公厅. 江西省人民政府办公厅关于印发江西省“十四五”能源发展规划的通知 赣府厅发〔2022〕15号 [EB/OL]. (2022-05-07) [2024-06-20]. https://www.jiangxi.gov.cn/art/2022/5/17/art_4968_3961051.html?eqid=e6190e0e000422700000002643cb8e2.
Office of Jiangxi Provincial Government. Notice of the General Office of the People's Government of Jiangxi Province on issuing the "14th five year plan" for energy development in Jiangxi Province, Gan Fu Ting Fa [2022] No. 15 [EB/OL]. (2022-05-07) [2024-06-20]. https://www.jiangxi.gov.cn/art/2022/5/17/art_4968_3961051.html?eqid=e6190e0e000422700000002643cb8e2.
- [10] 湖南省发展和改革委员会. 湖南省发展和改革委员会关于印发《湖南省“十四五”可再生能源发展规划》的通知 湘发改能源规〔2022〕405号 [EB/OL]. (2022-06-23) [2024-06-20]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/xxgk/wjk/szbm/szfzcbm_19689/sfzhggwyh_19690/gfxwj_19691/202206/t20220627_26526958.html.
Hunan Provincial Development and Reform Commission. Notice of the Development and Reform Commission of Hunan Province on issuing the "14th five year plan for the development of renewable energy in Hunan Province", Xiangfa Gai energy regulations [2022] No. 405 [EB/OL]. (2022-06-23) [2024-06-20]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/xxgk/wjk/szbm/szfzcbm_19689/sfzhggwyh_19690/gfxwj_19691/202206/t20220627_26526958.html.

- 19689/sfzhggwyh_19690/gfxwj_19691/202206/t20220627_26526958.html.
- [11] 重庆市发展改革委. 重庆市发展和改革委员会 重庆市能源局关于印发《“十四五”能源规划任务分解实施方案》的通知 [EB/OL]. (2022-08-08) [2024-06-20]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202208/t20220808_10984592.html. Chongqing Municipal Development and Reform Commission. Notice of Chongqing Development and Reform Commission and Chongqing Energy Bureau on issuing the implementation plan for task decomposition of energy planning during the 14th five year plan period [EB/OL]. (2022-08-08) [2024-06-20]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202208/t20220808_10984592.html.
- [12] 国家能源局. 国家能源局关于 2022 年度全国可再生能源电力发展监测评价结果的通报 [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-06-20]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm. National Energy Administration. Announcement by the National Energy Administration on the monitoring and evaluation results of national renewable energy power development in 2022 [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-06-20]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm.
- [13] 光明网. 上半年中国市场化交易电量占全社会用电量六成以上 [EB/OL]. (2023-07-31) [2024-06-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772921631795749419&wfr=spider&for=pc>. Guangming Net. In the first half of the year, market-oriented trading accounted for over 60% of China's total electricity consumption [EB/OL]. (2023-07-31) [2024-06-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772921631795749419&wfr=spider&for=pc>.
- [14] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于建立煤电容量电价机制的通知 [EB/OL]. (2023-11-08) [2024-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914744.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice from the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on establishing a coal electricity capacity pricing mechanism [EB/OL]. (2023-11-08) [2024-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914744.htm.
- [15] SERRI L, LEMBO E, AIROLDI D, et al. Wind energy plants repowering potential in Italy: technical-economic assessment [J]. *Renewable energy*, 2018, 115: 382-390. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.031.
- [16] TANG O, REHME J. An investigation of renewable certificates policy in Swedish electricity industry using an integrated system dynamics model [J]. *International journal of production economics*, 2017, 194: 200-213. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.03.012.
- [17] DE BONA J C, FERREIRA J C E, DURAN J F O. Analysis of scenarios for repowering wind farms in Brazil [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2021, 135: 110197. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110197.
- [18] 钟财富, 韩雪, 时璟丽. 我国风电机组退役改造置换的需求分析和政策建议 [J]. 网络版, 2021(1): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2021.01.012.
- ZHONG C F, HAN X, SHI J L. Demand analysis and policy recommendations for the retirement, renovation, and replacement of wind turbines in China [J]. *Wind energy*, 2021(1): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2021.01.012.
- [19] GRAU L, JUNG C, SCHINDLER D. Sounding out the repowering potential of wind energy: a scenario-based assessment from Germany [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 293: 126094. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126094.
- [20] SYED A H, JAVED A, FERROZ R M A, et al. Partial repowering analysis of a wind farm by turbine hub height variation to mitigate neighboring wind farm wake interference using mesoscale simulations [J]. *Applied energy*, 2020, 268: 115050. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115050.
- [21] HOU P, ENEVOLDSEN P, HU W H, et al. Offshore wind farm repowering optimization [J]. *Applied energy*, 2017, 208: 834-844. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.064.
- [22] 汪宏伟. 采用环梁加固风机基础的有限元分析 [J]. *可再生能源*, 2016, 34(4): 558-562. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.04.014.
- WANG H W. Finite element analysis of the wind turbine foundation reinforced with ring beam [J]. *Renewable energy resources*, 2016, 34(4): 558-562. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.04.014.
- [23] 何潇锟, 吕伟荣, 翁红幸, 等. 风机基础加固设计与计算分析 [C]//陆新征. 第 26 届全国结构工程学术会议论文集 (第 III 册). 北京:《工程力学》出版社, 2017: 7.
- HE X K, LV W R, WENG H X, et al. Reinforcement design and calculation analysis of wind turbine foundation [C]//LU X Z. Proceedings of the 26th National Conference on Structural Engineering No. III. Beijing: Engineering Mechanics Press, 2017: 7.
- [24] 陈俊岭, 何欣恒, 冯又全. 风力发电塔基础环基础疲劳破坏加固方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 122-128. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0911.
- CHEN J L, HE X H, FENG Y Q. Research on strengthening method for fatigue damage of embedded-ring concrete foundation for wind turbine tower [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(2): 122-128. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0911.
- [25] 胡良明, 刘志鹏, 曾宇, 等. 基于 ABAQUS 对风机基础加固前后应力与损伤分析 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(5): 223-233. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.05.024.
- HU L M, LIU Z P, ZENG Y, et al. Stress and damage analysis of wind turbine foundation reinforcement based on ABAQUS [J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2021, 52(5): 223-233. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.05.024.
- [26] 张峰, 李清石, 胡辉. 基于基础环的风机基础缺陷加固处理分析 [J]. *科技风*, 2020(35): 174-175, 178. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202035082.
- ZHANG F, LI Q S, HU H. Analysis on reinforcement for defects of wind turbine foundation using foundation ring [J]. *Technology wind*, 2020(35): 174-175, 178. DOI: 10.19392/j.cnki.

- 1671-7341.202035082.
- [27] 李永亮. 某风力发电场兆瓦级风电机组塔筒加固方案有限元分析 [J]. 智能制造, 2017(11): 42-45. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8186.2017.11.012.
- LI Y L. Finite element analysis of tower reinforcement scheme for megawatt level wind turbines in a wind power plant [J]. *Intelligent manufacturing*, 2017(11): 42-45. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8186.2017.11.012.
- [28] 黄培荣. 受损钢结构塔筒安全检测及加固修复方案优选研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- HUANG P R. Study on safety testing and reinforcing and repairing schemes of damaged steel structure tower structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [29] 胡辉. 乌江源风电场风机基础安全评价及加固研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2019. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2019.000359.
- HU H. Study on safety assessment and reinforcement of fan foundation in Wujiangyuan wind farm [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019. DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2019.000359.
- [30] WHITE S W, KULCINSKI G L. Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants [J]. *Fusion engineering and design*, 2000, 48(3/4): 473-481. DOI: 10.1016/S0920-3796(00)00158-7.
- [31] MARTINEZ E, LATORRE-BIEL J I, JIMÉNEZ E, et al. Life cycle assessment of a wind farm repowering process [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, 93: 260-271. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.044.
- [32] 高扬. 风电工程对海洋生态环境影响研究——以江苏沿海为例 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023. DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.001341.
- GAO Y. Research on the impact of wind power engineering on marine ecological environment: a case study of the coastal area of Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023. DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.001341.
- [33] 周江玲. 我国风电南移过程中海-陆风电开发生态环境影响对比研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.001014.
- ZHOU J L. Comparative study on the ecological environment impact of offshore-onshore wind farm development in the process of wind power southward migration in China [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.001014.
- [34] 马文静, 张宇彤, 杨春振, 等. 大宗风电退役风机叶片资源化回收利用技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(10): 17-26. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CN23053101.
- MA W J, ZHANG Y T, YANG C Z, et al. Research progress on resource recycling technology of retired wind turbine blades in bulk wind power plants [J]. *Clean coal technology*, 2023, 29(10): 17-26. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CN23053101.
- [35] 许冬梅, 张兴林, 荆涛. 废旧热固性复合材料绿色回收利用关键技术研究——以风电行业废弃风叶片为例 [J]. 环境保护, 2019, 47(20): 54-56. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.20.013.
- XU D M, ZHANG X L, JING T. Research on key technologies of recycling and utilization of waste thermosetting composites such as waste wind blades in China's wind power industry [J]. *Environmental protection*, 2019, 47(20): 54-56. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.20.013.
- [36] 张星楠, 李颖, 郭穆骞, 等. 废弃风机叶片回收技术的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2024, 52(4): 264-267. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2024.04.045.
- ZHANG X N, LI Y, GUO M Q, et al. Research progress of waste wind turbine blade recycling technology [J]. *New chemical materials*, 2024, 52(4): 264-267. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2024.04.045.
- [37] 许淳瑶, 葛立超, 冯红翠, 等. 风力发电现状及叶片组成与回收利用综述 [J]. 热力发电, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rlfid.202204082.
- XU C Y, GE L C, FENG H C, et al. Review on status of wind power generation and composition and recycling of wind turbine blades [J]. *Thermal power generation*, 2022, 51(9): 29-41. DOI: 10.19666/j.rlfid.202204082.
- [38] DELANEY E L, MCKINLEY J M, MEGARRY W, et al. An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2021, 170: 105601. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105601.
- [39] SPIELMANN V, BREY T, DANNHEIM J, et al. Integration of sustainability, stakeholder and process approaches for sustainable offshore wind farm decommissioning [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2021, 147: 111222. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111222.
- [40] ZIEGLER L, GONZALEZ E, RUBERT T, et al. Lifetime extension of onshore wind turbines: a review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, 82: 1261-1271. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.100.
- [41] SEDLAR D K, VULIN D, KRAJAČIĆ G, et al. Offshore gas production infrastructure reutilisation for blue energy production [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 108: 159-174. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.052.
- [42] RÍO P D, SILVOSA A C, GÓMEZ G I. Policies and design elements for the repowering of wind farms: a qualitative analysis of different options [J]. *Energy policy*, 2011, 39(4): 1897-1908. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.12.035.
- [43] COLMENAR-SANTOS A, CAMPÍÑEZ-ROMERO S, PÉREZ-MOLINA C, et al. Repowering: an actual possibility for wind energy in Spain in a new scenario without feed-in-tariffs [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 41: 319-337. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.041.
- [44] PAUL A, PRABU T. Technical and economic feasibility study on repowering of wind farms [J]. *Indian journal of science and*

- technology, 2016, 9(38): 101960. DOI: [10.17485/jst/2016/v9i38/101960](https://doi.org/10.17485/jst/2016/v9i38/101960).
- [45] LANTZ E, LEVENTHAL M, BARING-GOULD I. Wind power project repowering: financial feasibility, decision drivers, and supply chain effects [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [46] RAJARAM H R, KRISHNAN B, GURU B. Leveraging on repowering of wind sites for potential wind-solar hybrid capacities: a case study [J]. *International energy journal*, 2021, 21(1): 183-192.
- [47] BOOPATHI K, RAMASWAMY S, KIRUBAHARAN V, et al. Optimization of the wind farm layout by repowering the old wind farm and integrating solar power plants: a case study [J]. *International journal of renewable energy research*, 2020, 10(3): 1287-1301. DOI: [10.20508/ijrer.v10i3.11226.g8003](https://doi.org/10.20508/ijrer.v10i3.11226.g8003).
- [48] 王成. 大基地风电场“以大代小”等容量排布方案分析 [J]. *中外能源*, 2024, 29(4): 34-39. DOI: [10.3969/j.issn.1673-579X.2024.4.zwny202404006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-579X.2024.4.zwny202404006).
WANG C. Study on equal capacity arrangement scheme for large base wind farms during replacing small wind turbines with large ones [J]. *Sino-global energy*, 2024, 29(4): 34-39. DOI: [10.3969/j.issn.1673-579X.2024.4.zwny202404006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-579X.2024.4.zwny202404006).
- [49] 吴宪. 基于“以大代小”改造的风电项目经济评价方法研究 [J]. *风能*, 2023(5): 98-107. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2023.05.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2023.05.020).
WU X. Research on the economic evaluation method of wind power projects based on the "replacing small with large" transformation [J]. *Wind energy*, 2023(5): 98-107. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2023.05.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2023.05.020).
- [50] 杜文珍, 吴俊辉. 经济性评估方法在老旧风电场改造中的应用 [J]. *风电场*, 2022(12): 60-65. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.016).
DU W Z, WU J H. Application of economic evaluation methods in the renovation of old wind farms [J]. *Wind energy*, 2022(12): 60-65. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.016).
- [51] 谢斯尘, 王泽雷, 于夕朦, 等. 老旧风场“以大代小”的市场分析与政策建议 [R]. 2024.
XIE S C, WANG Z L, YU X M, et al. Market analysis and policy suggestions on "replacing small with large" in old wind farms [R]. 2024.
- [52] 杜丽娟, 王建国, 刘昊, 等. 老旧风电场以大代小改造时间节点分析 [C]// Anon. 第十届中国风电后市场交流合作大会论文集. 大连: 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2023: 5. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2023.033540](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2023.033540).
DU L J, WANG J M, LIU H, et al. Analysis of time nodes for large scale to small scale renovation of old wind farms [C]// Anon. Proceedings of the 10th China Wind Power Aftermarket Exchange and Cooperation Conference. Dalian: Wind Machinery Branch of China Agricultural Machinery Industry Association, 2023: 5. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2023.033540](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2023.033540).
- [53] 贾蓉, 曾利华, 张立英, 等. 在役风电场机组“以大代小”评价方法 [J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(12): 136-140, 145. DOI: [10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.12.031](https://doi.org/10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.12.031).
JIA R, ZENG L H, ZHANG L Y, et al. Evaluation method of "replacing small with large" for wind farm units in service [J]. *Technology innovation and application*, 2022, 12(12): 136-140, 145. DOI: [10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.12.031](https://doi.org/10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.12.031).

作者简介:



许扬

许扬(通信作者)

1993-, 女, 高级工程师, 动力工程及工程热物理博士, 主要从事新能源技术研发工作 (e-mail)xuyang_thu@163.com。

蔡安民

1976-, 男, 高级工程师, 机械工程硕士, 主要从事风电技术研发工作 (e-mail)am_cai@qny.chng.com.cn。

张立英

1984-, 女, 高级工程师, 土木工程硕士, 主要从事新能源勘察设计工作 (e-mail)ly_zhang@qny.chng.com.cn。

贾蓉

1984-, 女, 高级工程师, 热能工程硕士, 主要从事新能源技术研发工作 (e-mail)jiarong.nj@163.com。

(责任编辑 孙舒)